

P N C T J 1 6 0 7 9 1 - 0 0 1

配布限定

本資料は 年 月 日付けで登録区分、
変更する。 2001. 6. 20

[技術情報室]

新原子力エネルギー発生装置 に関する研究

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究報告書)

1991年3月

東京工業大学 総合理工学研究科 エネルギー科学専攻

小川 雅生

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2001

配布限定

PNC PJ1607 91-001

1991年 3月

新原子力エネルギー発生装置に関する研究



小川 雅生

要 旨

中性子の少ない核融合反応を用いてエネルギーを取り出すことを指向した研究の初期段階を行なった。

本研究ではエネルギーが $10 \sim 20 \text{ keV}$ の重陽子分子イオンビームを入射し、解離した原子イオンをミラー磁場の中に閉じ込めるための基礎実験装置の設計を進めた。装置の設計に必要な情報を得るために、ビーム軌道のシミュレーションを行なった。

本報告書は、東京工業大学・総合理工学研究科・エネルギー科学専攻の小川雅生が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

LIMITED DISTRIBUTION
PNC-PJ1607 91-001
MARCH, 1991



Basic Study on A Generator of Aneutronic Energy

Masao Ogawa*

Abstract

The first step of basic study on an energy generator based on aneutronic fusion reactions was carried out.

Experimental components were designed in order to confine dissociated atomic ions in a magnetic field of mirror geometry by injecting a deuteron-molecular ions of 10 ~ 20 keV energy. For the design of reaction chamber, orbits of the injection beam were simulated for various steering conditions.

Work performed under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Cooperation

* Department of Energy Sciences, Tokyo Institute of Technology

目 次

1. 序 論	-----	1
2. 中性子の少ない核融合 (ANEUTRONIC FUSION ENERGY)	-----	2
3. 基礎実験装置	-----	4
4. 分子イオンビームの軌道計算	-----	9
5. まとめと今後の問題	-----	13
謝 辞	-----	14

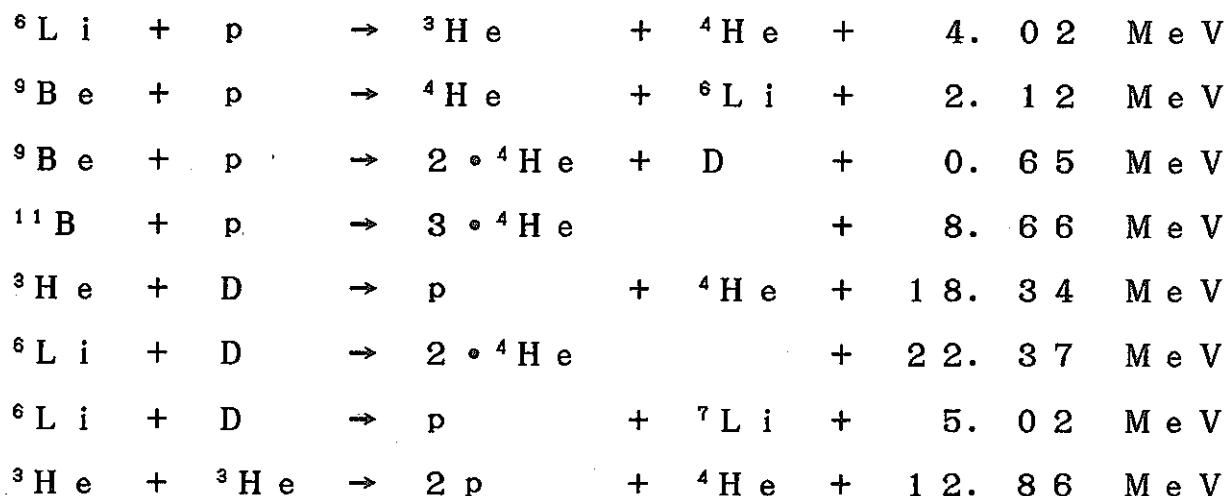
1. 序 論

$^3\text{He} + \text{D} \rightarrow ^4\text{He} + \text{p} + 18.34 \text{ MeV}$ のような中性子を伴わない核融合反応を実現できれば、放射性物質が非常に少ない、クリーンな原子力エネルギーを得ることができる。この様な核融合の可能性を調べておくことは原子力エネルギーの長期シナリオにとって重要である。

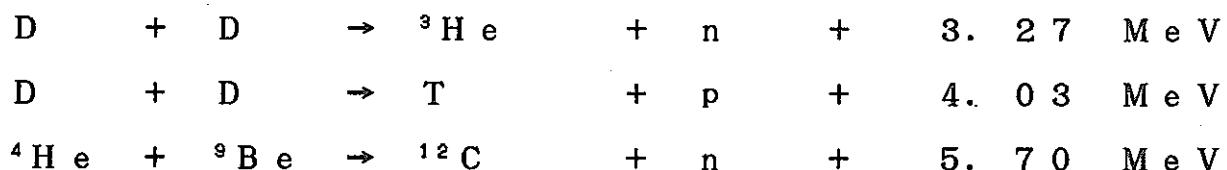
上記の非中性子反応は D T 熱核融合よりも温度の高い系、すなわちエネルギーの高い系を必要とする。そのための1つの方法はプラズマの代わりにビームをミラー磁場の中に閉じ込め、中心部に高密度状態を作り出すことである。本委託研究では、基礎実験として、10~20 keVの低エネルギー・ビームを閉じ込めるミラー磁場を発生するコイルを製作する場合に必要なビーム軌道の計算を行なう。

2. 中性子の少ない核融合 (ANEUTRONIC FUSION ENERGY)

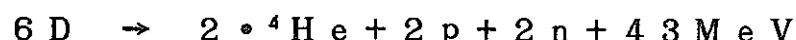
核融合反応の中で、燃料に放射性物質を、具体的にはトリチウム (T) を使わず、中性子が反応生成物として現われない例の幾つかを下に示す。



ただし、こうした場合でも2次反応では



のように、中性子やトリチウムが発生する。従って、ANEUTRONIC FUSION反応を利用しても放射能をゼロにすることはできが、そうでない場合に比べれば非常に低いレベルに押さえることができる。そうした条件に近いのはDD反応であり、その理由は



という反応の収支を考えることができるからである。

図1に各種の核融合反応についての、断面積 σ の重心エネルギーEに対する依存性と熱核融合断面積 $\langle \sigma v \rangle$ のプラズマ温度に対する依存性を示す。熱核融合断面積は温度Tで粒子の速度vがMaxwell分布していることを考慮したものである。すなわち、

$$\langle \sigma v \rangle = \int \sigma(v) f(v) dv$$

$f(v)$: Maxwell 分布 関数

当然のことながら D-T 反応が σ 、 $\langle \sigma v \rangle$ とともに最も大きな値となっている。ところが σ については D- ^3He 反応や p- ^{11}B 反応が MeV に近いエネルギーの領域でかなり大きくなっている。 $\langle \sigma v \rangle$ に関してはプラズマ温度が MeV オーダーになると D- ^3He 、 p- ^{11}B 、 D-D 等の値が D-T の値に近づいていることが分かる。

上記の反応の中で反応断面積が大きく、しかも反応生成エネルギーの多いものは D- ^3He 反応である。 ANEURONIC FUSION の第 1 候補は D- ^3He 反応であり、次は D-D 反応であろう。

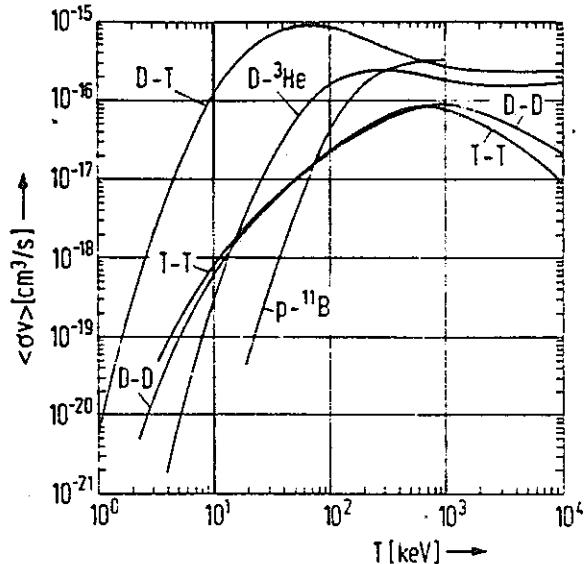
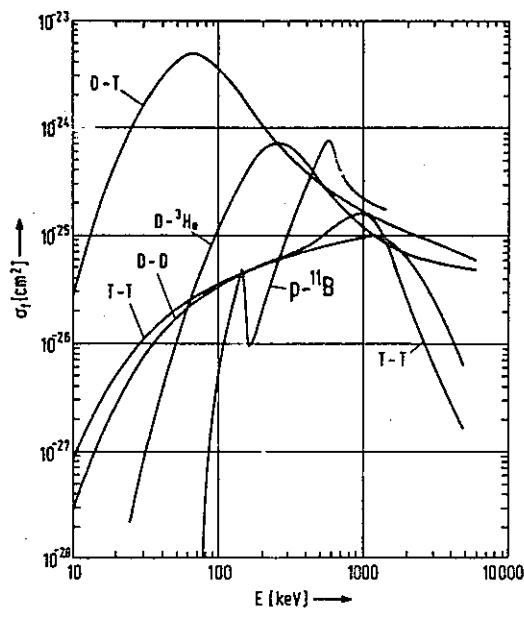


図 1 断面積 σ と
熱核融合断面積 $\langle \sigma v \rangle$

3. 基礎実験装置

エネルギーが 10 ~ 20 keV の H₂ または D₂ の分子イオンビームを入射し、それが解離した原子イオン H⁺ または D⁺ を閉じ込めるという基礎実験を行なう装置系を設計した。その全体の配置を図 2 に示す。イオン発生装置は加速電圧が 20 kV の RF イオン源である。分子イオンビームは電磁石により質量分析され、収束用の四重極マグネット、ステアラーマグネットを経て反応チャンバーに入射される。真空排気はターボ分子ポンプにより行なわれ、最終段の反応チャンバーは目標真空度が 10⁻⁹ Torr の超高真空仕様で設計される。ミラー磁場を発生するソレノイドコイルが図 2 の面に垂直な方向に反応チャンバーを挟むように組み込まれる。

図 3 に反応チャンバーの設計案を示す。ビームの入口部は上下に幅の広い角形パイプであり、ビームの入射位置を色々に選べるようにしなっている。チャンバーには観測用のポートが多数取り付けられる。

図 4 はビームステアラーマグネット部の設計案を示す。ビームの入射位置は 2 個の上下ステアラーマグネットと 1 個の左右ステアラーマグネットにより制御される。個々のマグネットは自然空冷であり、その最大磁場は約 500 ガウスである。

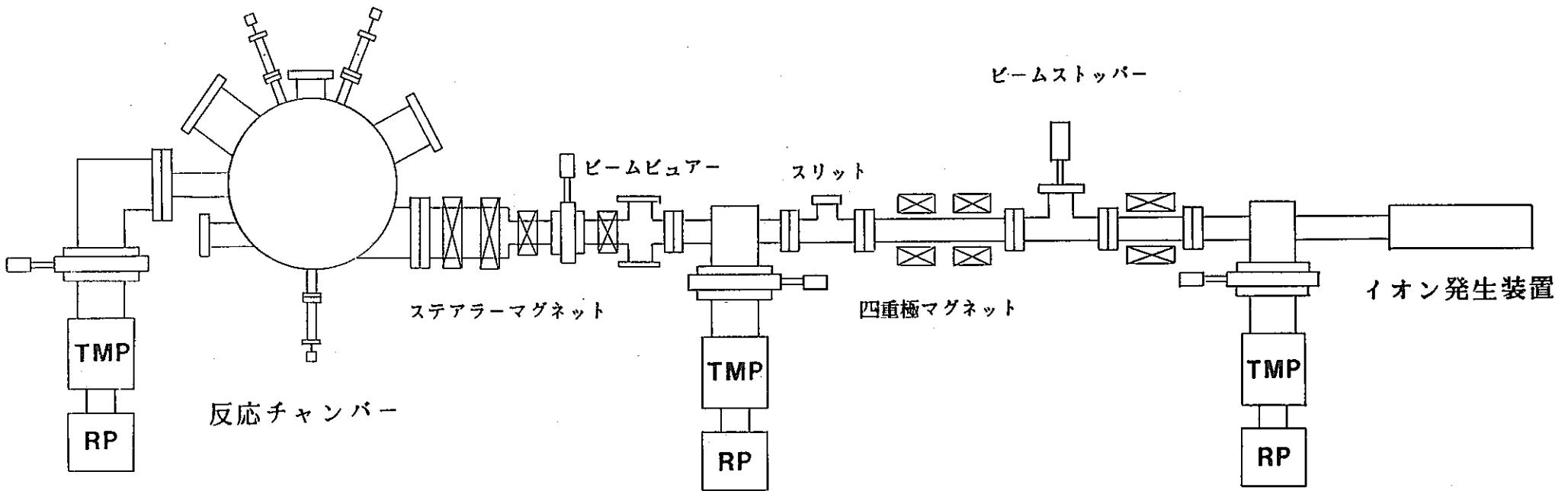


図2
基礎実験装置の案

(注) ICF152のTMP用ポート以外の
ポートは高さ中心位置

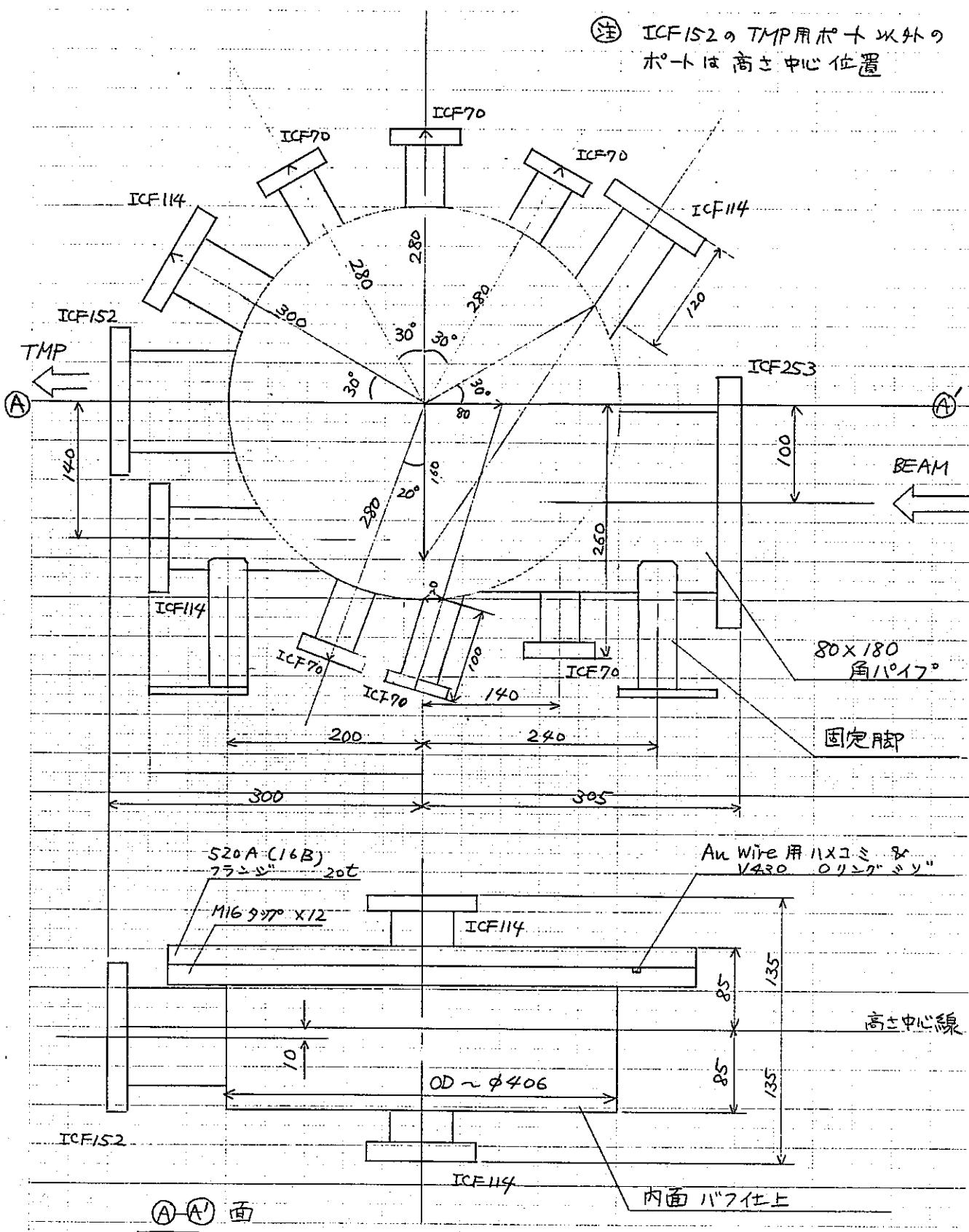


図 3A 反応チャンバーの設計案

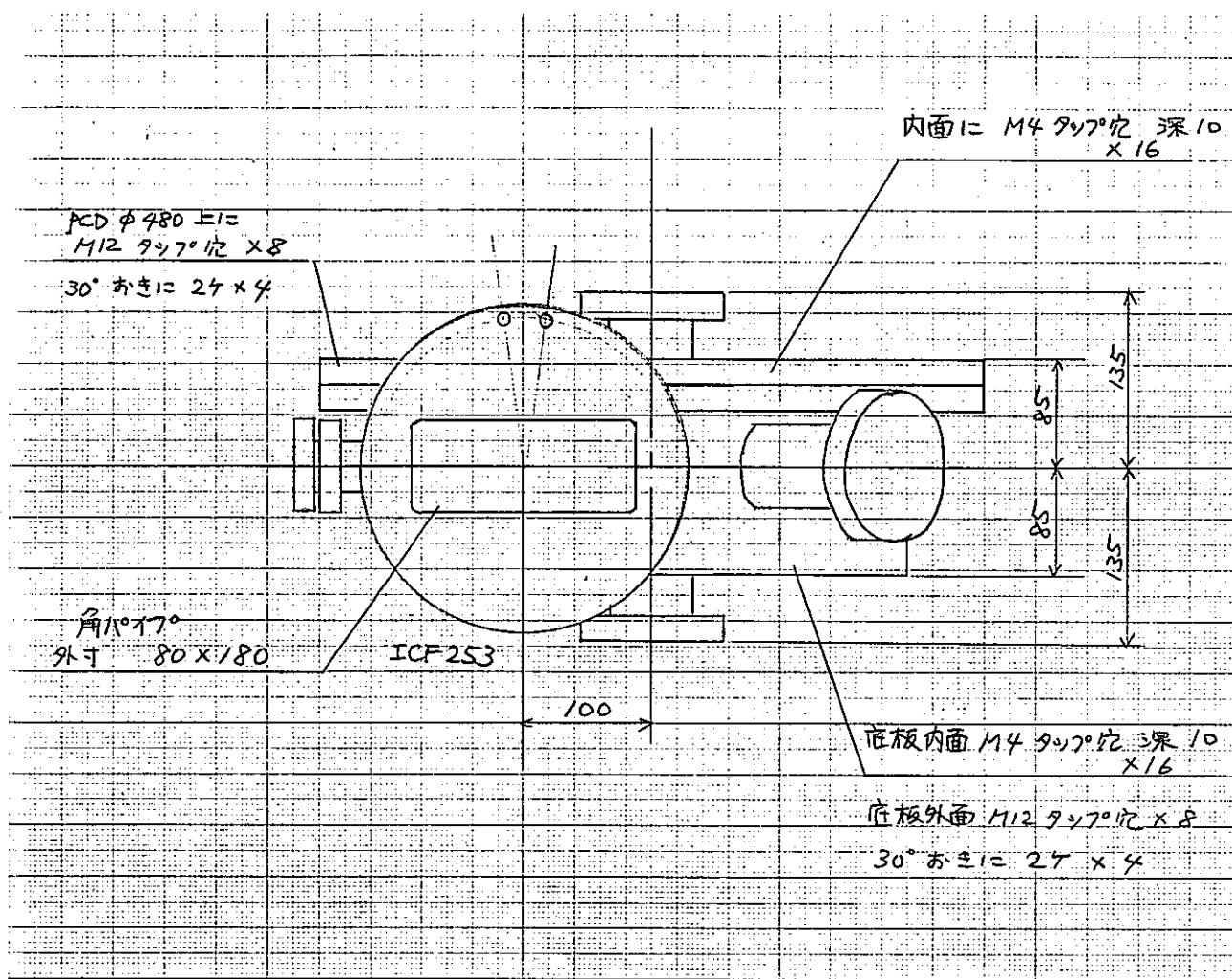


図3B 反応チェンバーの設計案

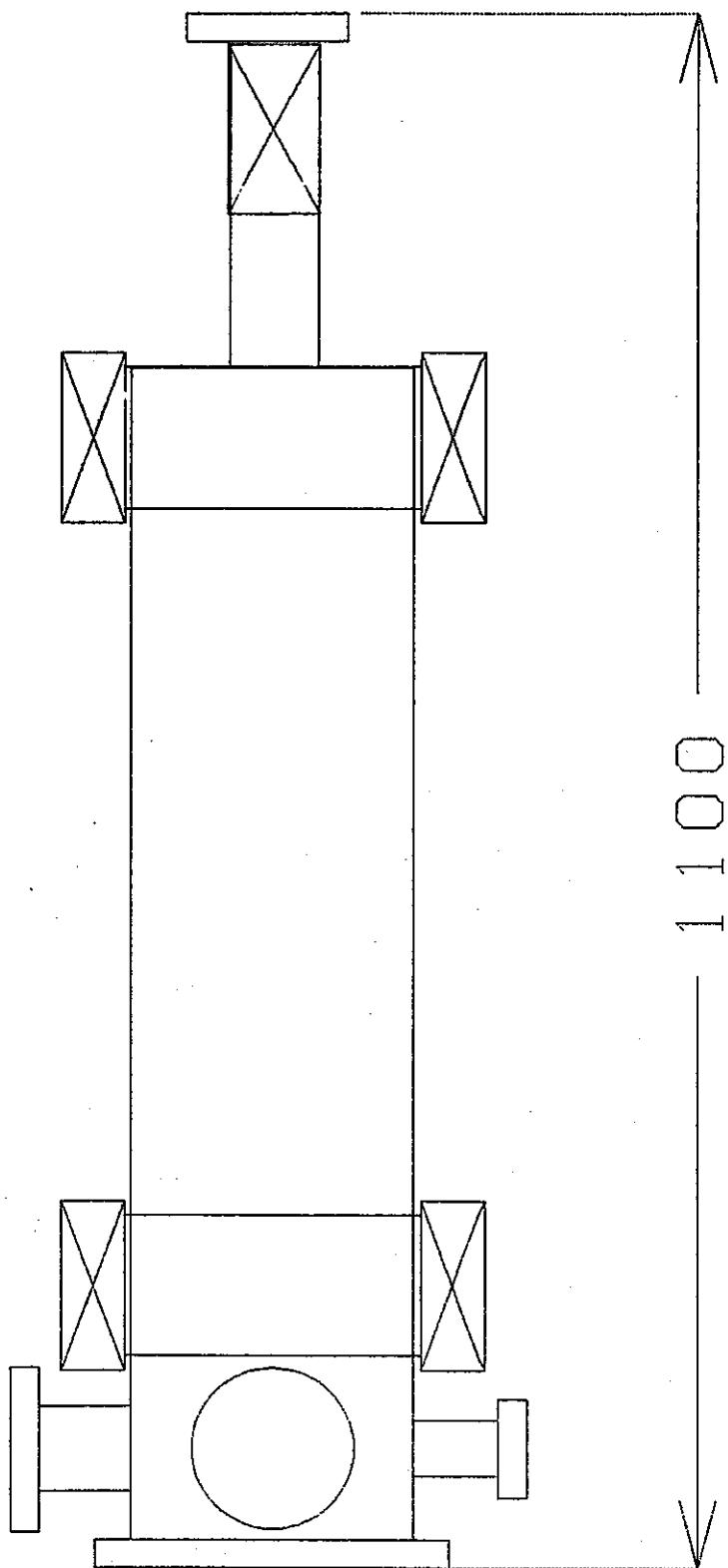


図4 ステアラー部の設計案

4. 分子イオンビームの軌道計算

ミラー磁場を発生するソレノイドコイルは 20 keV で入射する D₂ 分子イオンが解離した後、その原子イオンを閉じ込めるこことを目標に設計されたものを想定している。最大励磁電流は 750 A であり、その時のアンペアターン数は 525 kAT である。磁場の貯蔵エネルギーは約 1 kJ である。

ビーム軌道の計算に必要な反応チャンバー内部の各点 (r, z) における磁場の値 $B_z(r, z)$ および $B_R(r, z)$ は次の様にして求めた。ビオ・サバールの式を基にして、個々のコイルが作る磁場およびベクトルポテンシャルを計算し、その合成和を位置 (r, z) の関数として求める。ベクトルポテンシャルを r, z の 8 次の多項式で表わすことができるよう、その係数を最小 2 乗法で決定した。磁場の値 B_z , B_R は得られたベクトルポテンシャルを微分することから求められる。

分子イオンビームの軌道計算は最も簡単な条件、すなわち单一粒子が電場の無い磁場の中を運動する場合として行なった。これは、他の粒子からのクーロン力を受けない、粒子密度が低い場合に対応する。

分子イオンビームの軌道計算の例を以下に示す。ソレノイドコイルの励磁電流は 500 A であり、入射ビームは 20, 15, 10 keV の H₂ 分子イオンである。反応チャンバーの入口部にある上下ステアラーの磁場を ±400 ガウスの範囲で 100 ガウス刻みで変化させた場合の予想軌道を図 5 に示す。図 6 には入射位置を 10 mm づつ平行移動させた場合の予想軌道を示す。

なお、上記の軌道計算の基になったソレノイドコイルの磁場 B_z の分布を参考として図 7 に示す。

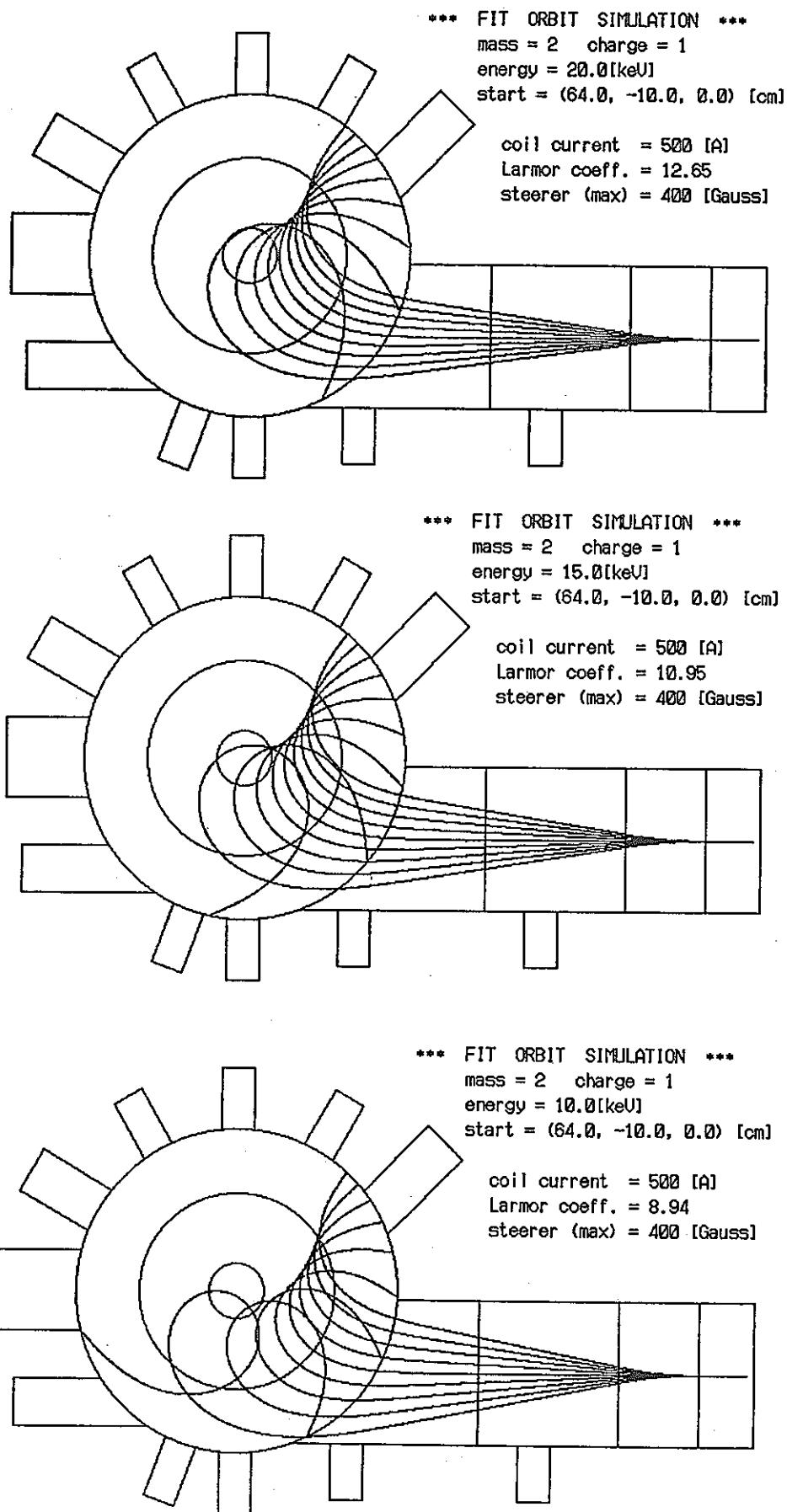


図 5 ステアラーで入射角度を
変化させた場合の H₂ 軌道

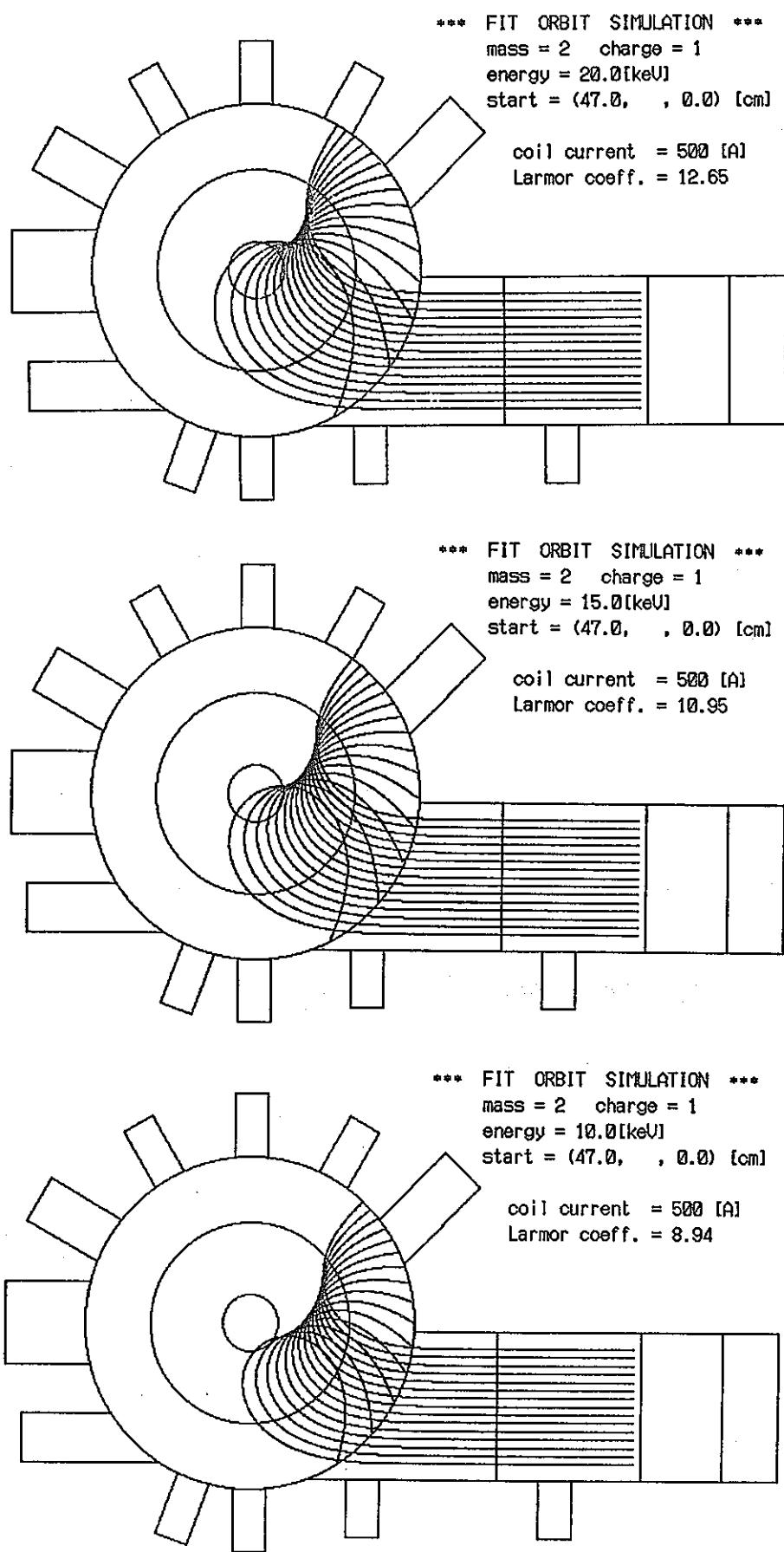


図 6 ステアラーで入射位置を 10 mm づつ平行移動させた場合の H₂ 軌道

pos. width r_in r_out kAT

file=test.dat				
12.8	8.5	7.0	20.6	120.00
21.2	8.5	3.0	19.1	142.50
-12.8	8.5	7.0	20.6	120.00
-21.2	8.5	3.0	19.1	142.50

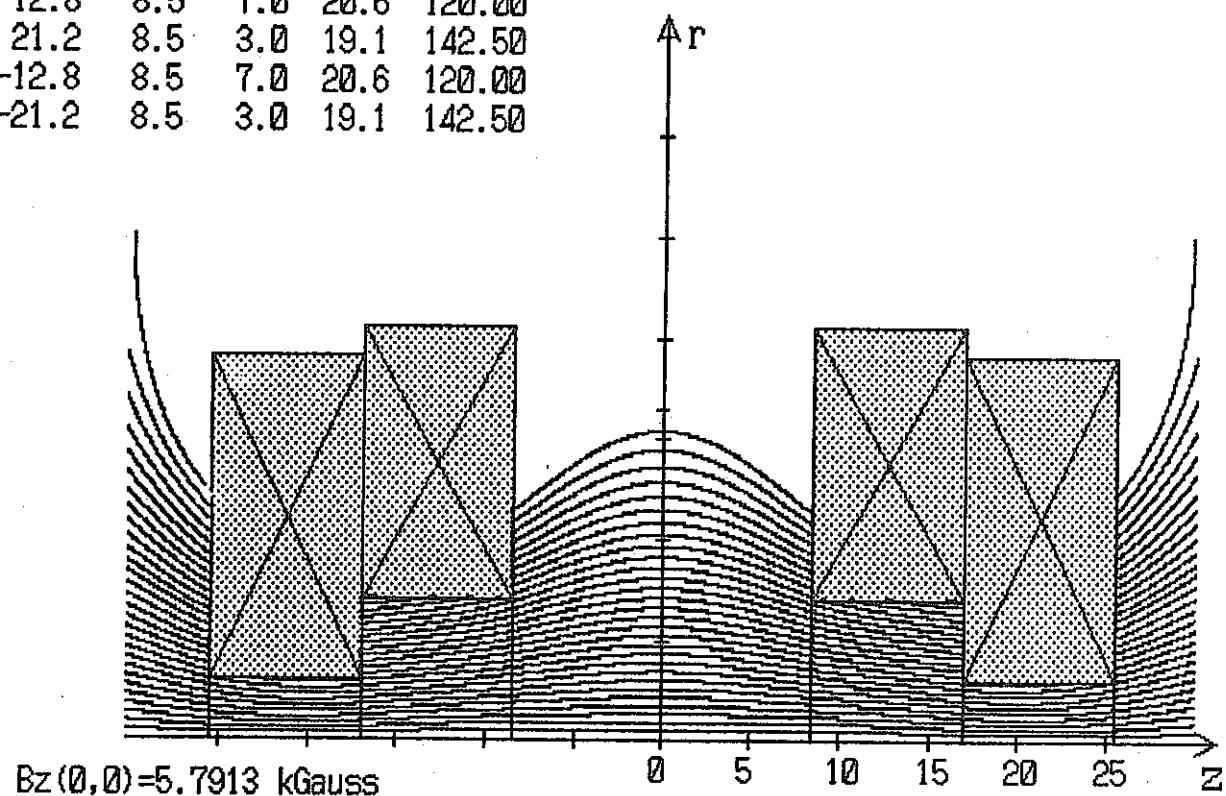


図 7 ソレノイドコイルの磁場分布

5. まとめと今後の問題

中性子が無く、放射能も無い原子力エネルギーは理想の極限の1つである。これが簡単に実現するとは言えないが、絶えず考えておくことが大切であろう。ここでは、それを指向した基礎研究の第1歩として、装置系の設計を行なった。

分子イオンビームの軌道計算から明かになったのは以下の点である。

- ① 分子イオンビーム軌道が解離した原子イオンが閉じ込められている領域とオーバラップしないことが望ましい。このためにはビームのエネルギーが固定された場合、磁場強度に最適値が存在する。
- ② 分子イオンビームを受け止めるファラデーカップを置く場所とその形状。

今後の問題点は

- ③ 軌道計算には他の粒子からの影響、例えば、空間電荷効果、クーロン散乱などを取り入れること。これは高密度ビーム状態に対応する。
- ④ 基礎実験を行い、原子イオンの閉じ込めの道筋を調べること。
- ⑤ 分子イオンを強制的に解離させる方法の検討。
- ⑥ 荷電中性化の積極的な方法。
- ⑦ 非平衡な系から平衡な系へ、すなわちプラズマ的な系への変化に関する物理とその手法。
- ⑧ 閉じ込められたイオンと電子の密度や温度を測定する方法。
低エネルギーで低密度の場合から高エネルギーで高密度の場合までの種々の条件に対応できる方法。

謝 辞

本研究の遂行にあたり色々なご協力を頂きました動力炉・核燃料開発事業団に深く感謝いたします。

また、研究を立ち上げるにあたり、動力炉・核燃料開発事業団の先端技術開発室の笛尾 信之室長や須藤 収氏、およびフロンティア研究開発推進室の佐久間 実氏に大変お世話になりました。理研の郷農 靖之氏と河本 進氏にはコイルの設計や磁場の計算に関して大変お世話になりました。

東工大のエネルギー科学専攻の小川研究室の皆様や、総理工の事務の方々のご協力に感謝致します。