

NATIONAL INSTITUTE FOR FUSION SCIENCE

プラズマ対向機器・P S I ・熱・粒子制御
合同研究会報告

平成9年6月27日(金) 9:00 ~16:20
核融合科学研究所・管理棟4F第1会議室

(Received - July 30, 1997)

NIFS-PROC-34

Oct. 1997

RESEARCH REPORT
NIFS-PROC Series

This report was prepared as a preprint of work performed as a collaboration research of the National Institute for Fusion Science (NIFS) of Japan. This document is intended for information only and for future publication in a journal after some rearrangements of its contents.

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to the Research Information Center, National Institute for Fusion Science, Nagoya 464-01, Japan.

プラズマ対向機器・P S I・熱・粒子制御 合同研究会報告書

開催期日： 平成9年6月27日（金）9：00～16：20

開催場所： 核融合科学研究所・管理棟4F第1会議室

NIFS Joint Research Meeting
on
Plasma Facing Components, PSI, and Heat/Particle Control

June 27 , 1997
National Institute for Fusion Science

T. Yamashina (Hokkaido University)

Abstract

The LHD collaboration has been started in 1996. Particle and heat control is one of the categories for the collaboration, and a few programs have been nominated in these two years. A joint research meeting on PFC, PSI, heat and particle meeting was held at NIFS on June 27, 1997, in which present status of these programs were reported. This is a collection of the notes and view graphs presented in this meeting. Brief reviews and research plan of each program are included in relation to divertor erosion and sputtering, impurity generation, hydrogen recycling, edge plasma structure, edge transport and its control, heat removal, particle exhaust, wall conditioning etc.

Keywords: plasma facing components, PSI, particle exhaust, heat removal, edge transport

はじめに

プラズマ・壁相互作用の分野では、核融合開発足以来昨年まで、大型ヘリカル装置「本体設計・建設及びR&D」の共同研究作業の一環として、「LHDプラズマ対向壁およびプラズマ表面相互作用の総合評価」というタイトルのもとに、一連の作業会、研究会を開催してまいりました。今年度は、昨年発足したLHD・熱・粒子制御法計画共同研究が2年目を迎え、新しい共同研究課題を加えていっそうの充実、発展を期するところとなっております。本研究会はこうした経緯と状況を踏まえ、計画共同研究の実施状況、あるいは今後の計画を討論する場として開催されました。

ここに、研究会での発表内容と、そこでの主な討論をまとめ、報告書として出版することにいたしました。プラズマ・壁相互作用研究、熱・粒子制御法研究のいっそうの深化、とくにLHD計画共同研究の充実、発展に役立てることができれば幸いです。

平成9年7月18日

核融合科学研究所共同研究

「LHDプラズマ対向壁およびプラズマ表面相互作用の総合評価」

代表者 山科俊郎

研究会プログラム

- | | | | |
|-------------|--|---------------|---------|
| 9:00 | あいさつ | 本島 修 | (核融合研) |
| 9:10 | LHDダイバータ材料の損耗と損傷の評価 | 吉田直亮 | (九大応力研) |
| 9:50 | 定常高粒子束イオンビームによる
対向材料スパッタリングの評価 | 西川雅弘 | (阪大工) |
| 10:20 | 溶融塩トリチウム増殖材料FLIBEと
構造材料の共存性 | 寺井隆幸
田中 知 | (東大工) |
| 10:50 | 溶融塩強制循環ループユニットの開発と
それを用いたダイバータ高熱流除熱体
及びブランケット溶融塩技術の開発と評価 | 戸田三朗 | (東北大工) |
| 11:20 | 高熱流束による材料損傷と
ダイバータ板冷却特性評価 | 奥 達雄 | (茨城大工) |
| 11:50 | 定常強磁場中の第一壁
コンディショニング法の研究 | 菅井秀郎,
豊田浩孝 | (名大工) |
| 12:20~13:20 | 昼 食 | | |
| 13:20 | 第一壁における燃料粒子リサイクリングと
不純物の発生・輸送 | 森田健治 | (名大工) |
| 13:50 | LHDにおける材料中のトリチウム計測
とインベントリー評価 | 松山政夫 | (富山大) |
| 14:20 | プラズマ中の静電場形成による
熱・粒子輸送制御法の開発 | 島山力三,
犬竹正明 | (東北大工) |
| 14:50 | 高熱流シートプラズマによる
ダイバータ模擬実験 | 河村和孝 | (東海大) |
| 15:20 | 磁化プラズモイド入射法による
高温プラズマ熱粒子制御の試行実験 | 宇山忠男 | (姫路工大) |
| 16:00 | 総合討論とまとめ | 山科俊郎 | (北大工) |

LHDダイバータ材料の損耗と 損傷の評価

九州大学応用力学研究所 吉田直亮

- 研究の背景と目的
- 表面プローブシステムの設計性能と製作の進捗状況
- 定常放電下のプラズマ・材料相互作用
……………材料に及ぼす影響
- 実験計画

LHD 計画共同研究 [カテゴリー (高温プラズマ・粒子制御法)]

LHD ダイバータ材の損耗・損傷評価

研究組織：	研究代表者	九州大学応用力学研究所	教授	吉田直亮
	所内責任者	核融合科学研究所	助教授	小森彰夫
	研究分担者	九州大学応用力学研究所	助教授	中村一男
		九州大学応用力学研究所	助教授	坂本瑞樹
	九州大学応用力学研究所	助教授	渡辺英雄	
	九州大学応用力学研究所	助手	徳永和俊	
	名古屋大学理工科学 総合研究センター	教授	田辺哲朗	
	茨城大学工学部	教授	奥 達雄	
	東北大学金属材料研究所	助教授	栗下裕明	
	北海道大学工学部	教授	山科俊郎	
	北海道大学工学部	教授	日野友明	
	北海道大学工学部	助手	藤田一郎	
	核融合科学研究所	教授	本島 修	
	核融合科学研究所	教授	野田信明	
	核融合科学研究所	助教授	相良明夫	
	核融合科学研究所	助手	鈴木 肇	
核融合科学研究所	助手	坂本隆一		

LHD ダイバータ材料の損耗と損傷の評価

九州大学応用力学研究所 吉田直亮

(1) LHD 計画共同研究「LHD ダイバータ材料の損耗と損傷の評価」の目的

定常運転を目指す LHD においては、適切なダイバータ材料の選択とデザインの最適化が最も重要な研究・開発課題の一つとなっている。特に次期ダイバータとして研究が進められているローカルアイランドダイバータ(LID)では熱負荷、粒子負荷が高く、その開発には実際のダイバータプラズマにより引き起こされる材料の損耗や放出不純物粒子のプラズマへの影響についての実験的なデータが不可欠である。LHD 計画共同研究「LHD ダイバータ材料の損耗と損傷の評価(代表:吉田直亮)」では LHD ダイバータプラズマ領域に試料を挿入できる表面プローブシステムを開発することにより、LHD ダイバータプラズマと材料の相互作用を総合的に理解することを目的として昨年度より 3 カ年計画でスタートした。

本研究で取り組む主な課題を以下に列挙する。

(a) LHD ダイバータプラズマによるプラズマ対向材の損耗評価とそのメカニズムの解明

材料に入射するダイバータプラズマは表面原子のはじき出し(スパッタリング)のみならず、材料温度の上昇、内部結晶構造の破壊、またそれに伴う材料の変質等をもたらす。しかもこれらの現象はプラズマのエネルギー分布、入射フラックス、また不純物プラズマの存在等により大きく左右されることが予想される。この研究では実際のダイバータ領域で起こる材料の損耗・変質現象を明らかにし、それを引き起こす要因の解明を目指す。

(b) LHD プラズマにおける不純物粒子の輸送と水素リサイクリング

表面プローブ上に堆積した不純物原子やプローブ材内部に蓄積された水素原子を測定することにより、プラズマ/対向壁境界領域での不純物粒子と水素の挙動を明らかにする。

(c) ローカルアイランドプラズマによる材料損耗評価と LID ヘッドデザインの最適化

LID ヘッドは $10\text{MW}/\text{m}^2$ に達する高い熱負荷と、激しいプラズマ粒子の照射を受ける。ローカルアイランドプラズマによる材料の損耗、変質に関する基礎データを集積することにより、不純物の発生量の少ない長寿命ヘッドのための材料選択とデザインの最適化を行う。

(2) 表面ステーション製作の進捗状況と設計性能

表面ステーションは平成 8、9 年度の 2 カ年計画で製作され、まず九大応力研の TRIAM-1M で性能試験、予備実験を行い、NIFS での受け入れ態勢が整い次第 LHD に移設される。TRIAM-1M では水平型で使用されるが LHD では垂直型の設置となる。現在日本真空技術(株)において製作中であり、本年 8 月に TRIAM-1M に取り付け本年度下半期の運転期間で調整等を予定している。

以下に本装置の主な性能を列挙する。

- 到達真空度: 2×10^{-8} Torr 以下

- 試料ホルダー（金メッキした無酸素銅製）冷却能力：1.5kW 以上（3kW 程度は可能）
- 試料サイズ：縦 30mm x 横 30mm x 長さ 30-50mm 以下
- 試料およびヘッドの温度の計測（6 系列の熱電対、Pt-Pt/Rh、W-W/Re、等）
- プラズマ計測用プローブが取り付け可能
- 試料位置（相対位置）制御

レーザー等による試料位置の計測、電動試料移動機構（ストローク 2000mm、移動速度 1-30mm/s、精度 0.5mm）、放電中の移動が可能

（3）表面プローブを用いたこれまでのプラズマ表面相互作用の研究

九大応力研では強トロイダル磁場実験装置 TRIAM-1M に超高真空試料搬送装置を取り付け、長パルスストカマク放電下の不純物堆積現象や周辺プラズマによる材料の照射損傷についての研究を進めている。前者においては回転プローブを開発することにより、不純物粒子の堆積現象を時間の関数として計測することに成功している。又、後者においては透過型電子顕微鏡による微細組織の観察から、荷電交換中性水素粒子による損傷が材料の変質に重要な役割を果たすことを明らかにしている。

（4）当面の実験計画

1. ダイバータ板等の対向材料の寿命評価

定常放電下での損耗と再堆積の測定をもとに素過程を明らかにすることによって、ダイバータ等の寿命を評価する。

2. 実機における熱・粒子負荷量の評価

材料によって、二次電子放出量等が異なるため、シース電圧が異なり、入射粒子自体のエネルギーが異なる。さらにプラズマからの粒子が表面に衝突した際、反射率が材料により異なる。これらにより、材料が異なると、熱・粒子負荷量が異なることが予想される。そこで、実機条件下での熱・粒子負荷量を評価する。

3. 試料の電位と損傷・損耗との相関

試料の電圧を、リミターや真空容器壁と同電位した場合や電圧を変化させた場合の電位と損傷、損耗、再堆積との関係を調べる。

4. プラズマ対向材料の照射損傷と損耗

プラズマ粒子による照射損傷や水素リテンション、損耗について調べる。

5. プラズマ対向材料の熱負荷損傷と損耗

熱負荷による損傷と損耗について調べる。

6. 再堆積層の物性評価

再堆積した層の性質やプラズマに及ぼす影響を調べる。

目 的

LHD の定常運転……適切なダイバータ材料の選択、デザインの最適化

特に、LID では熱負荷、粒子負荷：大 → その開発には実際のダイバータプラズマにより引き起こされる 材料の損耗／再付着や放出不純物粒子のプラズマへの影響 についての実験的なデータ が不可欠である。



1. LHD ダイバータプラズマ領域に試料を挿入できる
表面プローブシステムの開発
2. LHD ダイバータプラズマによる材料の損耗・損傷の実体の解明
3. ダイバータ開発に必要なダイバータ領域における
プラズマ・材料相互作用に関する実機データの取得

研究の具体的内容

(1) LHD ダイバータプラズマによる材料損耗と不純物粒子輸送

- * プローブ試料の損耗や不純物原子の再付着の測定 → 実機における正味の損耗を評価
- * その基礎となるプラズマ／対向壁境界領域での不純物粒子の輸送現象の研究

(2) プラズマ対向材における損傷の評価とその発現機構

プラズマ粒子 → スパッタリング、材料温度の上昇、内部結晶構造の破壊、変質
これらの現象はプラズマのエネルギー分布、入射フラックス、また不純物プラズマの存在等により大きく左右されるため、最終的には実機による研究が必要。



- * 実際のダイバータ領域で起こる材料の損傷・変質現象を明らかにし、その発現機構の解明を目指す。

(3) LI プラズマによる材料損耗評価と LID ヘッドデザインの最適化

LID ヘッドは $10\text{MW}/\text{m}^2$ に達する高い熱負荷と、激しいプラズマ粒子の照射を受ける。



- * ローカルアイランドプラズマによる材料の損耗、変質に関する基礎データを集積することにより、不純物発生が少ない長寿命ヘッドのための材料選択とデザインの最適化を行う。

実施計画

1. 表面プローブシステムの製作（平成 8、9 年度）
2. 固体表面観察・分析装置の製作（平成 10 年度）
3. プラズマ・材料相互作用(PMI)計測実験用ヘッドの製作（平成 11 年度）
4. 九大応力研附属強磁場プラズマ・材料実験施設、TRIAM-1M での性能試験および実験（平成 9 年度～）
5. LHD の稼働状況に応じ LHD に移設、LHD 共同研究の開始

装置の基本性能

表面プローブシステム

1. 試料を周辺プラズマの所定の位置に短期間の予備排気の後にはトーラスの真空を劣化させることなく導入できる。
2. 放電終了後直ちに試料を取り出し、各種の分析・観察を行うことができる。
3. 2 種類のプローブヘッドを準備し、目的に応じて交換して使用する。

*高熱負荷実験用ヘッド

高熱負荷実験用ヘッド部の強制水冷却、試料/ヘッド温度の計測。

*プラズマ・材料相互作用(PMI)計測実験用ヘッド

損耗・再堆積や照射損傷等の計測用。試料の移動・回転機能を持ち、複数個の試料が装着できる。また放電時間の関数として計測できる。

4. 試料への可変電圧の印加および流入電流の測定ができる。

固体表面観察・分析装置(走査型分析電子顕微鏡)

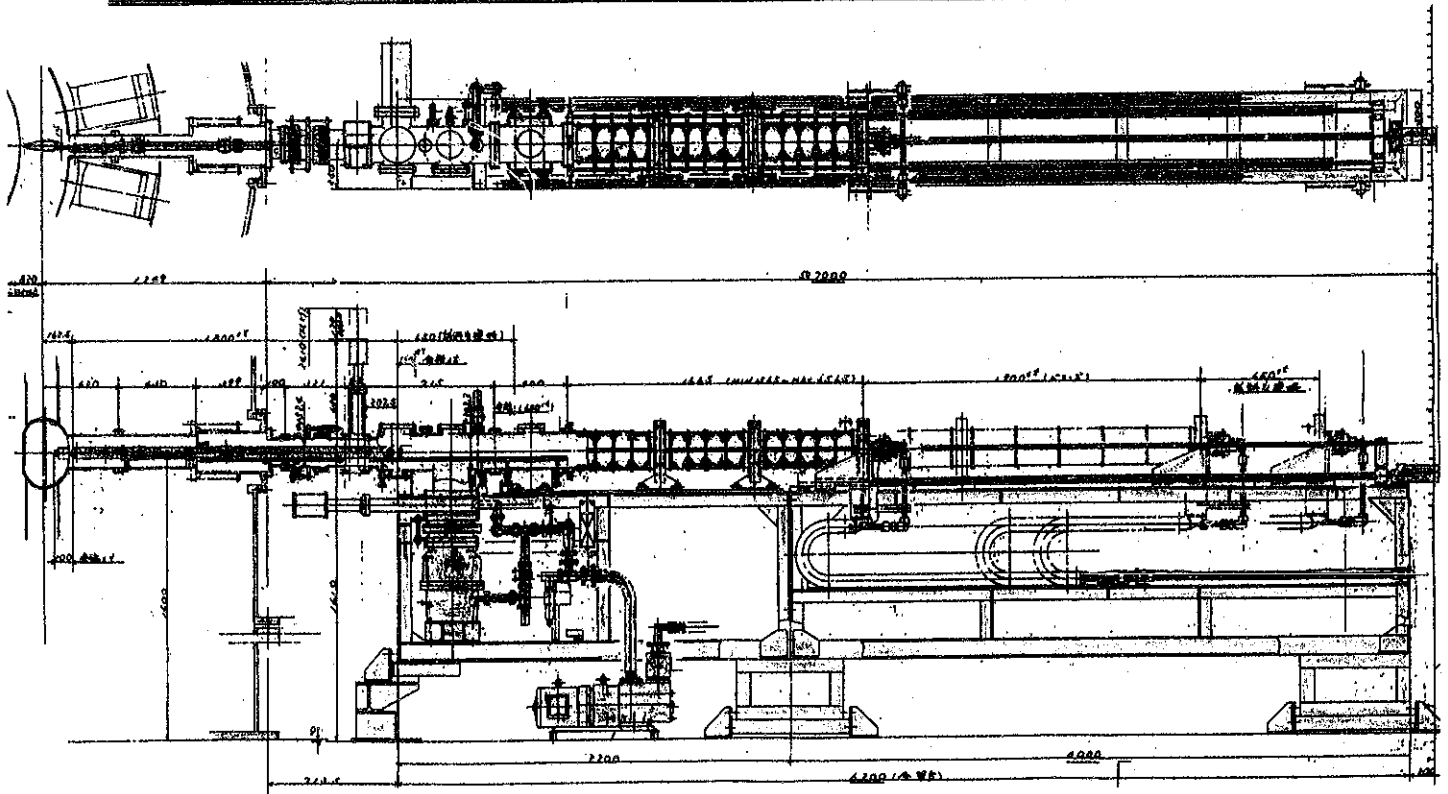
1. 再付着層や材料の損耗・変質の評価等

表面形状観察、微小領域での高さ・深さの定量計測、表面組成の定量分析（B～U）

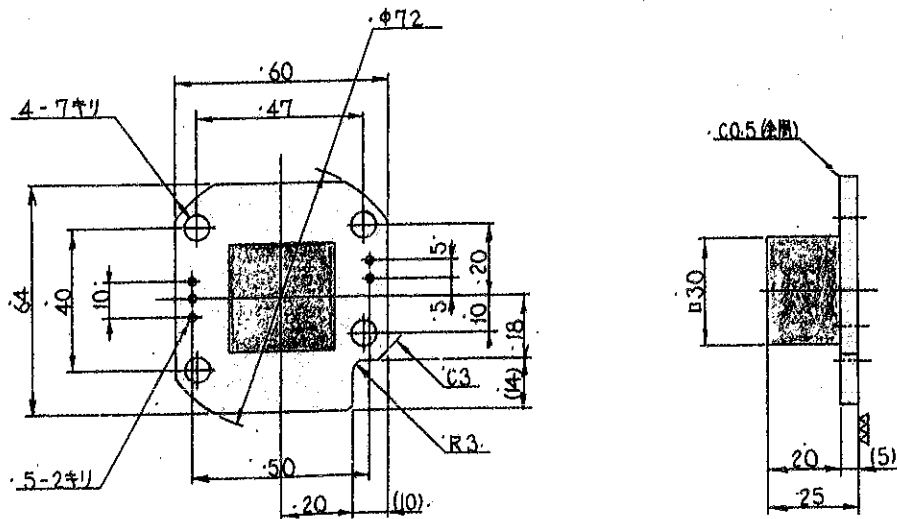
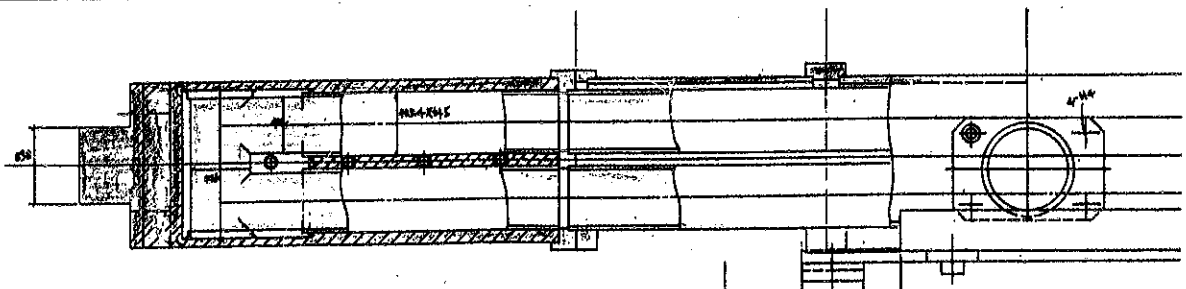
高熱負荷実験用表面プローブシステム基本性能

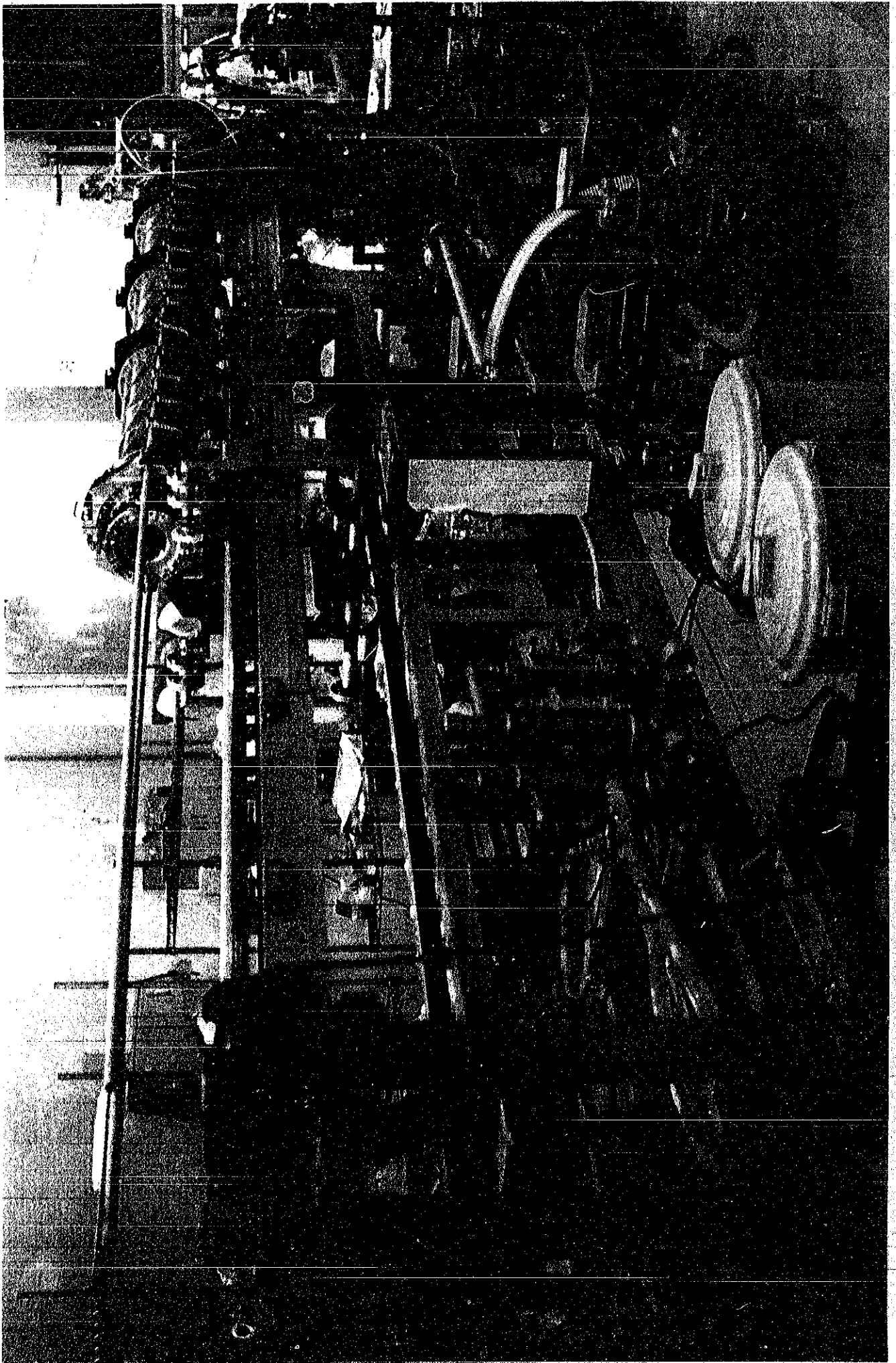
- TRIAM において現在の試料搬送装置と置き換えて設置できる。
- LHD への縦型取り付けが可能（要一部改造）。
- 到達真空度： 2×10^{-8} Torr 以下（TRIAM 取り合い部）。
- 試料ホルダー（無酸素銅製）冷却能力：1.5kW 以上
- 試料取り付けサイズ：30mm X 30mm
- 熱電対による試料およびヘッドの温度の計測：6 系列、Pt-Pt/Rh、W-W/Re、等）
- 試料および熱電対の着脱のための試料交換機構を有す。
- プラズマ計測用プローブが取り付け可能。
- 全系のベーキング。
- 赤外線ランプ加熱によるヘッド部のベーキング（最大 250°C）。
- 試料位置（相対位置）制御
 - レーザーによる試料位置の計測
 - 電動試料移動機構（ストローク 2000mm、移動速度 1-30mm/s、精度 0.5mm）
 - 放電中の移動が可能
- 排気容量：TMP2300l/s 1 台
- 非磁性材料の使用
- 制御機能
 - インターロック（真空、メインバルブ、試料温度）、
 - 真空排気系自動制御、水平移動機構、試料位置計測、
 - 温度計測

表面プローブシステム全体図



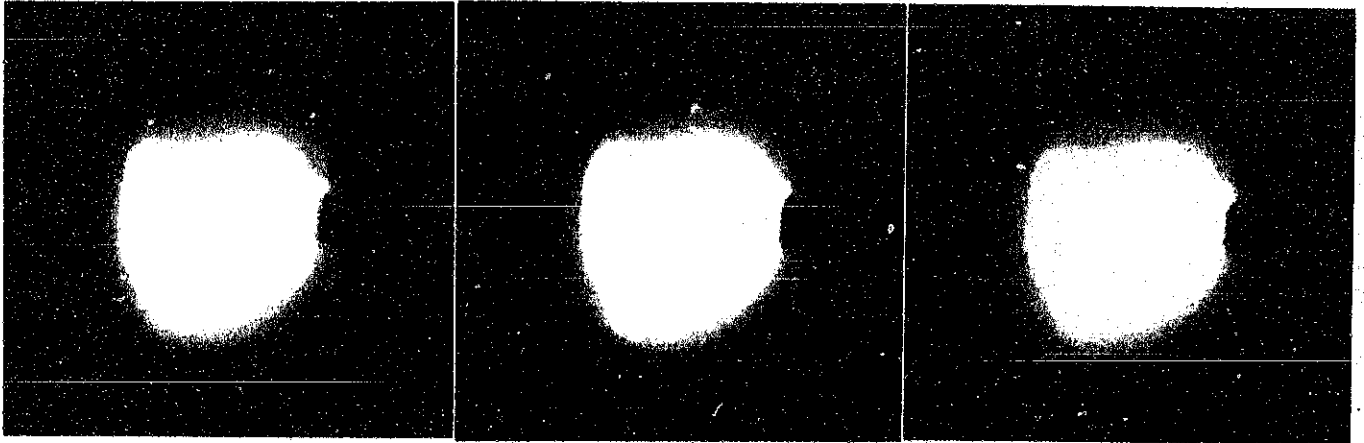
水冷却ヘッドおよび試料ホルダー





Flashing during Long Pulse Discharge

TRIAM-1M LHCD Discharge, $I_p=20\text{kA}$, $\langle n_e \rangle = 2 \times 10^{18}/\text{m}^3$



実験計画(1)

(1) ダイバータ板等の対向材料の寿命評価

(a) 定常放電下での損耗量を評価する。

これまでの他の装置での実験では、放電時間が短いために、放電の立ち上がり及び終了時の過渡的放電状態の影響が大きい。

(b) 損耗と再堆積の素過程の解明

損耗量を評価するだけでなく、材料からの原子等の放出、再堆積の過程を解明する。

(2) 実機における熱・粒子負荷量の評価

対向材料に対して、熱・粒子の実際の負荷量を測定する。

材料によって、二次電子放出量等が異なるため、シース電圧が異なり、入射粒子自体のエネルギーが異なる。さらにプラズマからの粒子が表面に衝突した際、反射率が材料により異なる。これらにより、材料が異なると、熱・粒子負荷量が異なることが予想される。そこで、実機条件下での熱・粒子負荷量を評価する。

実験計画(2)

(3) 試料の電位と損傷・損耗との相関

試料の電圧を、リミターや真空容器壁と同電位した場合や電圧を変化させた場合の電位と損傷、損耗、再堆積との関係を調べる。

(4) スクレイブオフ層のプラズマの密度・温度測定

ラングミュアプローブにより、試料位置でのスクレイブオフプラズマの密度・温度測定し材料損傷、損耗との関係を調べる。

(5) プラズマ対向材料の照射損傷と損耗

プラズマ粒子による照射損傷や水素リテンション、損耗について調べる。

(6) プラズマ対向材料の熱負荷損傷と損耗

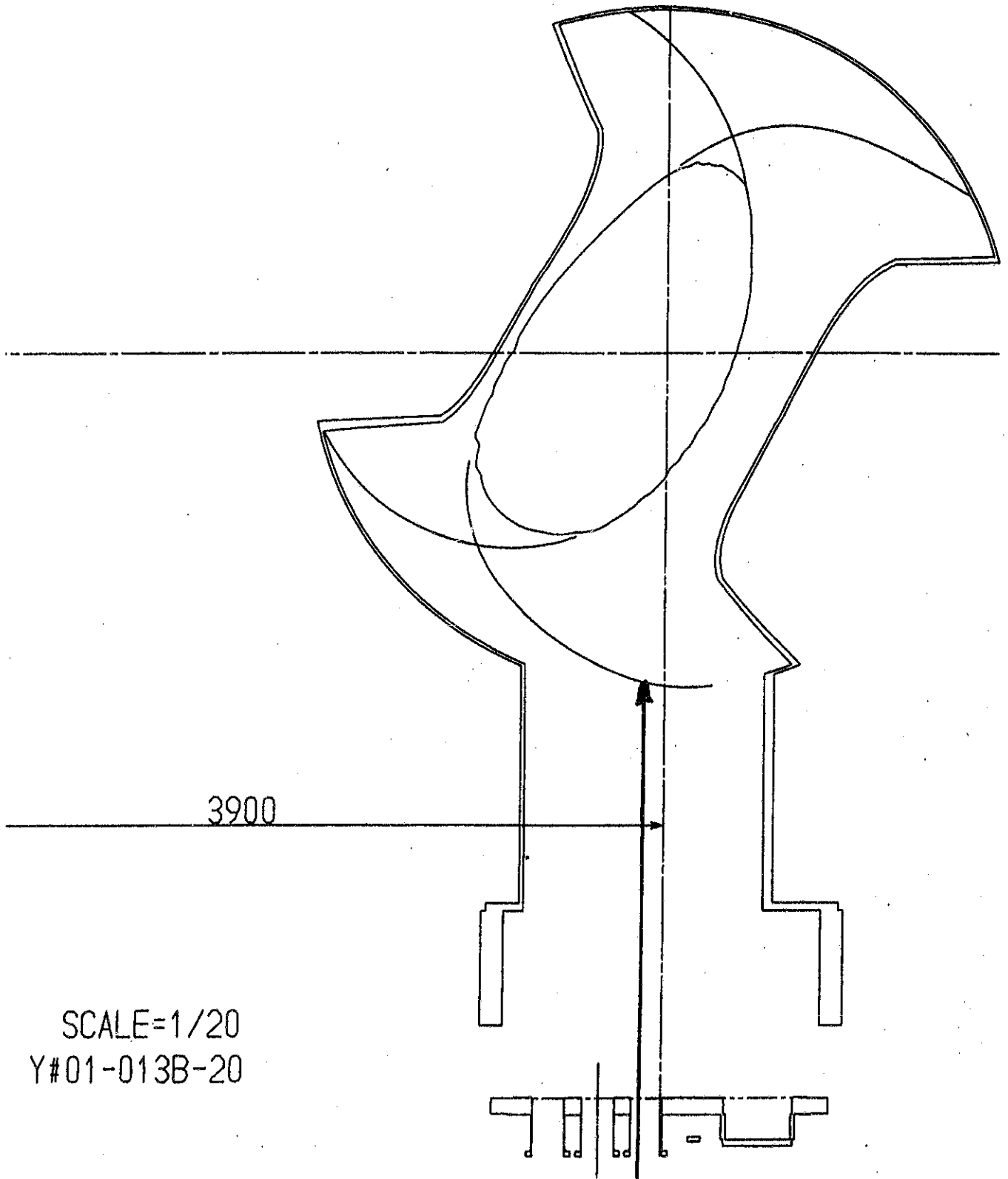
熱負荷による損傷と損耗について調べる。

(7) 再堆積層の物性評価

再堆積した層の性質やプラズマに及ぼす影響を調べる。

LHD における取り付けポート

- 下部よりダイバータ領域に挿入



SCALE=1/20
Y#01-013B-20

関連する研究及び準備状況

(1) 表面プローブを用いたプラズマ・材料相互作用の研究

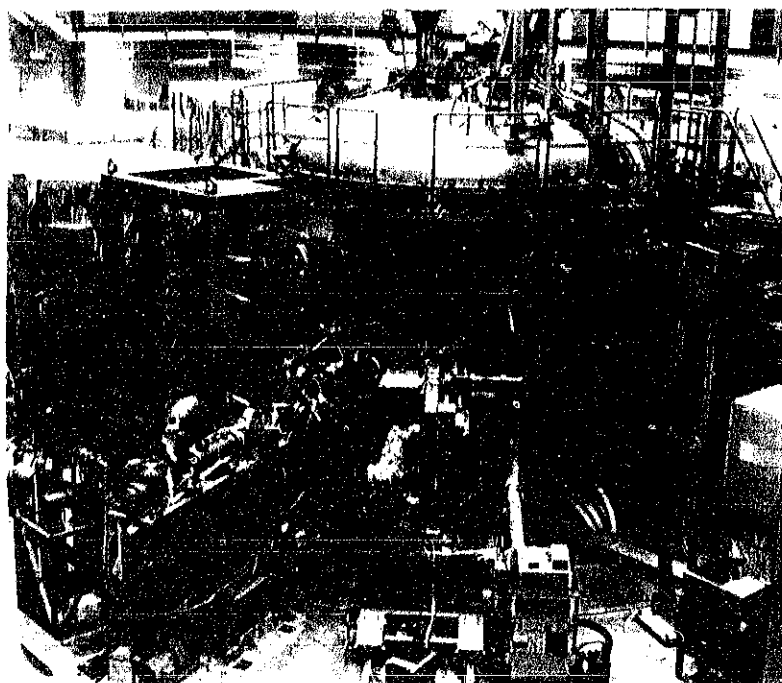
九大応力研（吉田、徳永、伊藤、中村、坂本ら）では TRIAM-1M に超高真空試料搬送装置を取り付け、長パルストカマク放電下の不純物堆積現象や周辺プラズマによる材料の照射損傷についての研究を進めている。前者においては回転プローブを開発することにより、不純物粒子の堆積現象を時間の関数として計測することに成功している。又、後者においては透過型電子顕微鏡による微細組織の観察から、荷電交換中性水素粒子による損傷が材料の変質に重要な役割を果たすことを明らかにしている。

また、プラズマ研の JIPPT-IIIU や京大のヘリオトロン E に表面プローブを取り付け不純物粒子の輸送に関する研究が盛んに行われていた経緯がある（野田、山科ら）。

(2) 不純物粒子のプラズマ閉じこめへの影響

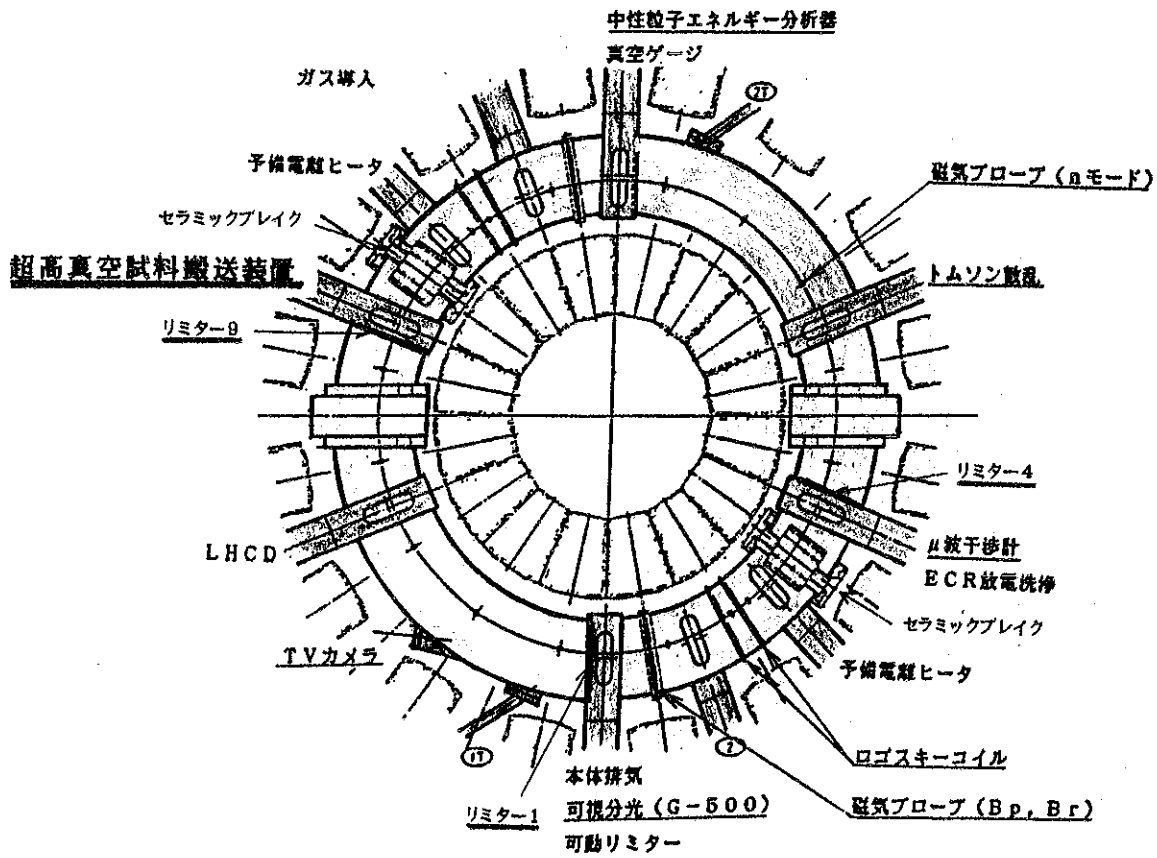
TEXTOR 共同研究の一つとして高 Z テストリミターから放出される高 Z 不純物粒子のプラズマ閉じこめへの影響が研究されている（田辺、野田ら）。

TRIAM-1M Tokamak



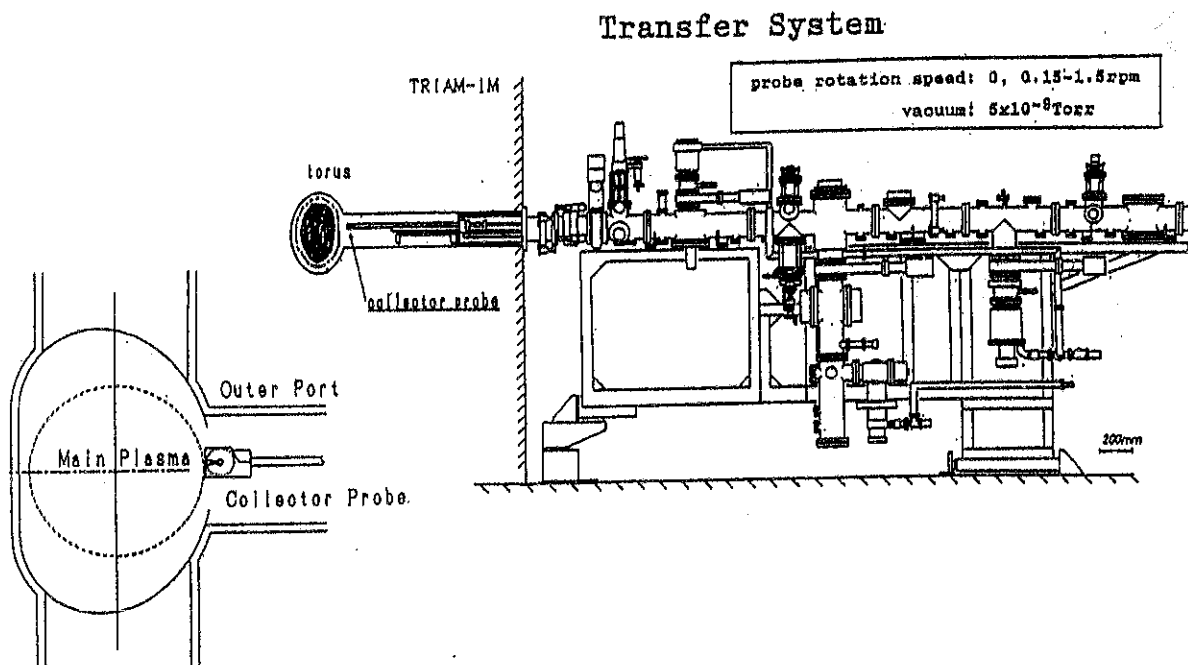
Major Radius	0.8m
Minor Radius	0.12x0.18m
Elongation	1.6
Toroidal Field (plasma center)	8T
Plasma Current(OH)	0.5MA
Discharge Duration (OH)	0.5s
Discharge Duration (LHCD)	>2 hours
Outer Vessel Diam.	~4m
Outer Vessel Height	~4m
Total Weight	95tom

TRIAM-1M計測機器配置図

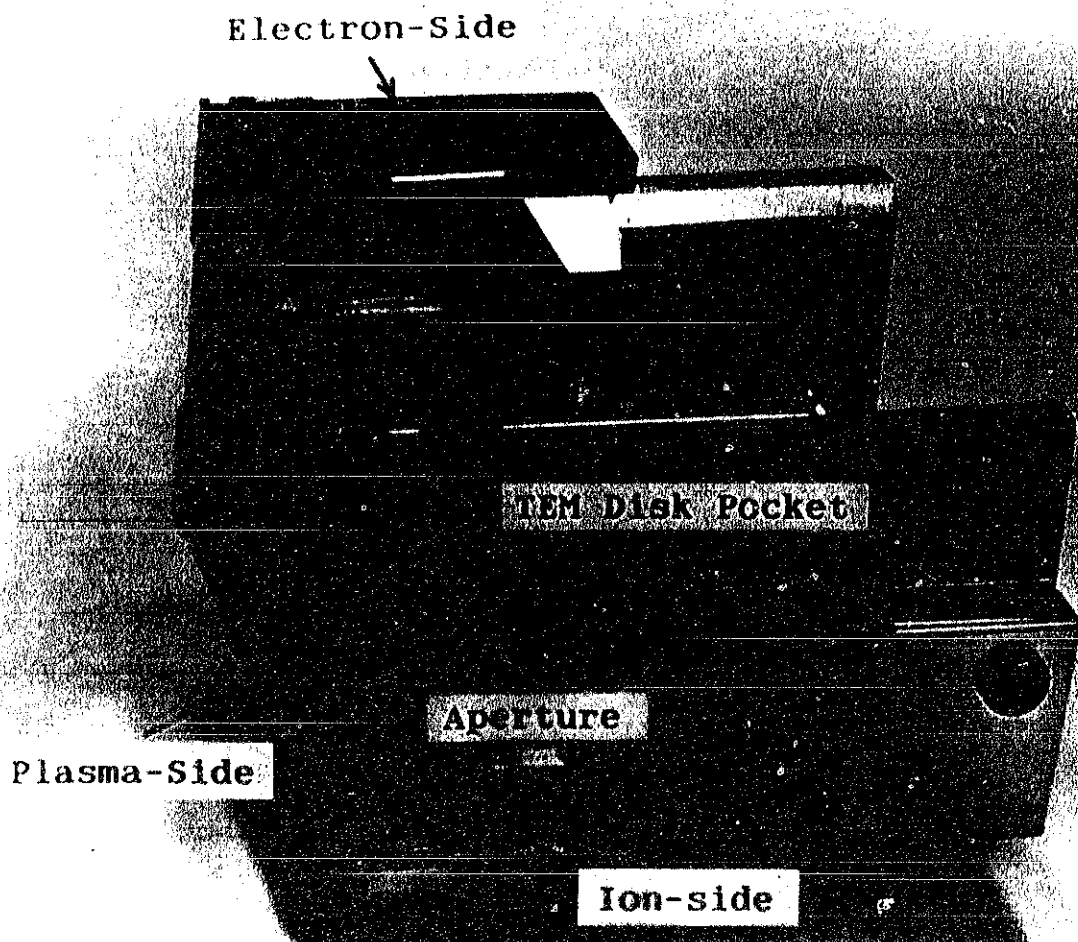
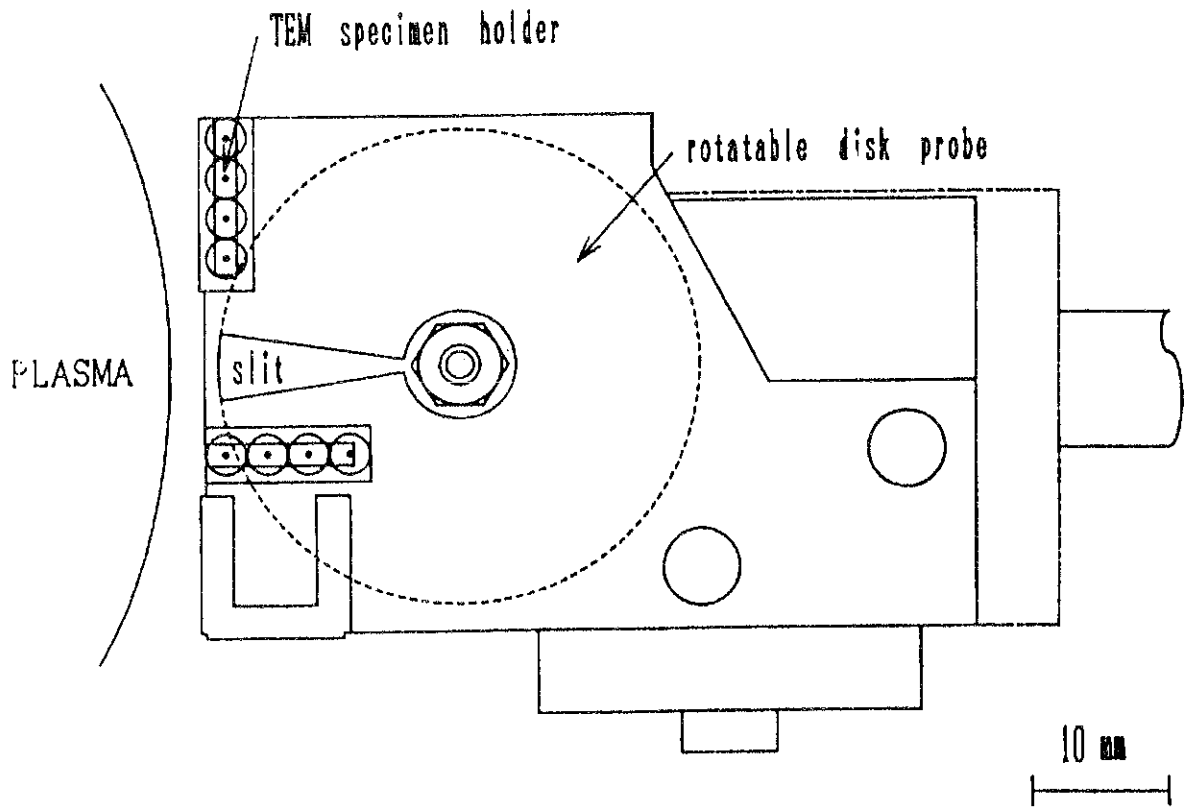


TRIAM-1Mにおける材料照射実験

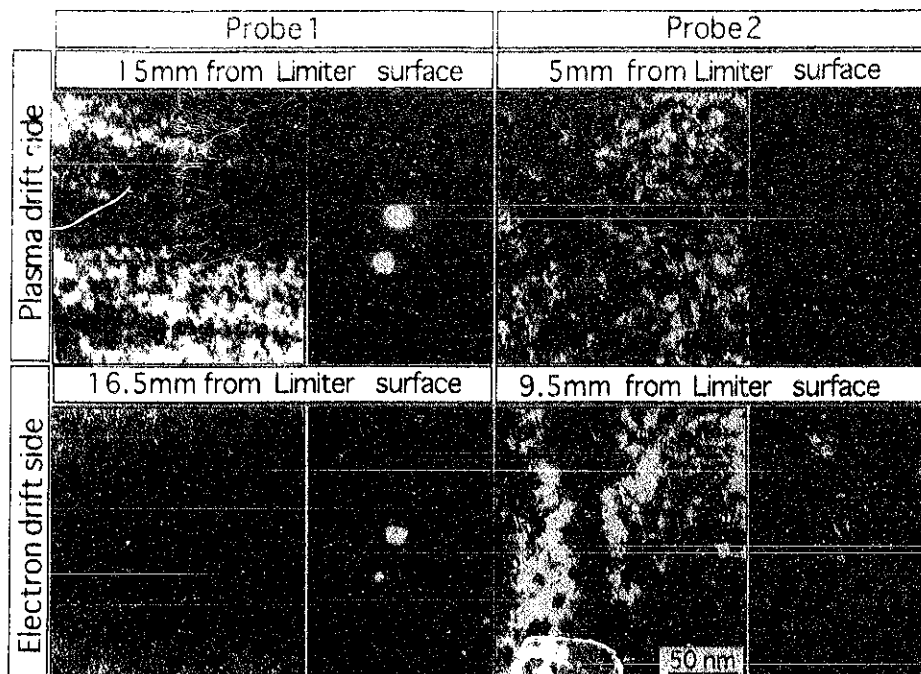
試料搬送装置



Collector Probe



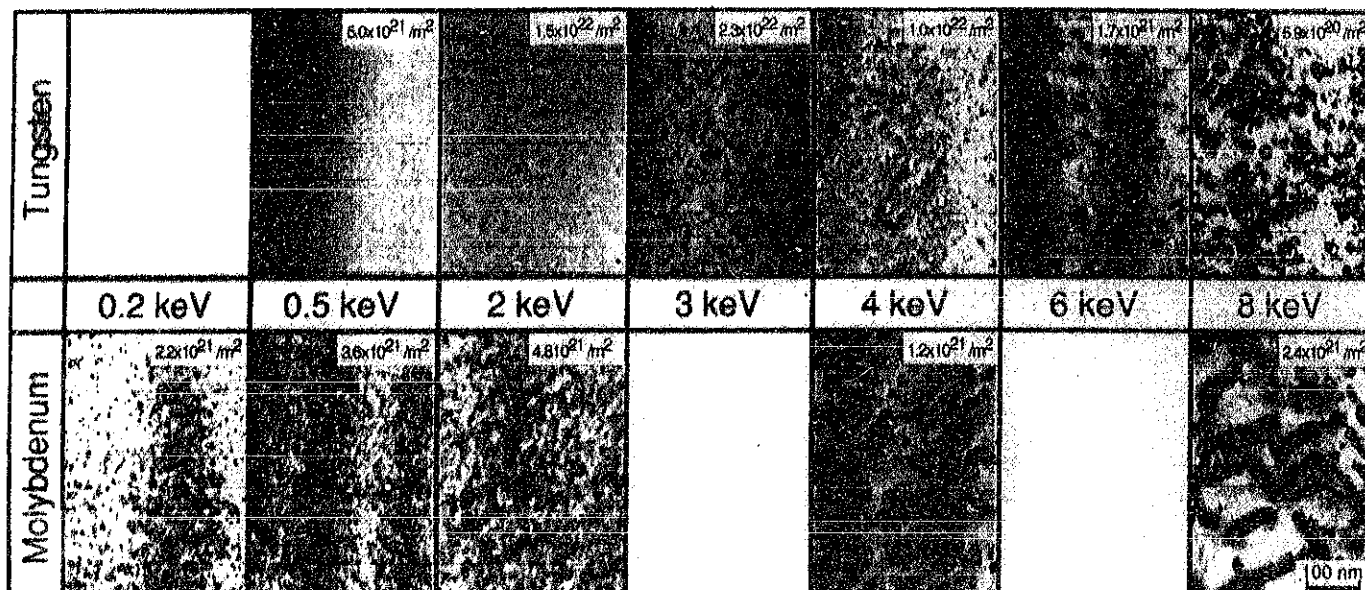
プローブ実験 1 およびプローブ実験 2 のW 試料の損傷組織



プローブ実験 1 P-side: 回折リングあり, E-side: 回折リングなし
 プローブ実験 2 P-side: 回折リングなし, E-side: 回折リングあり

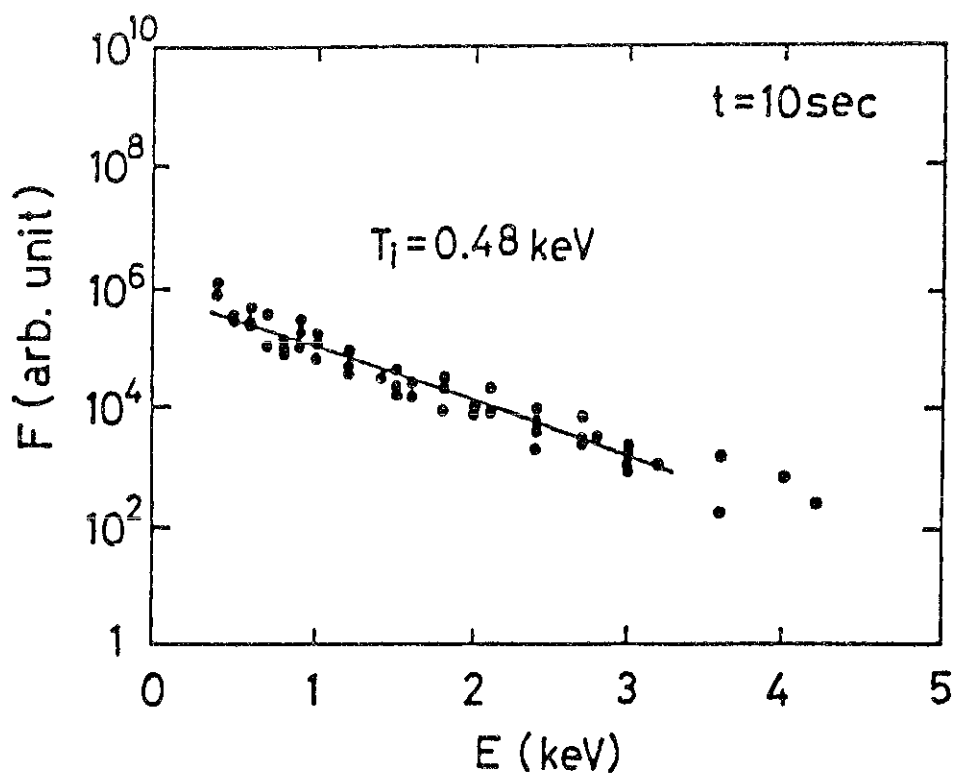
W および Mo における水素イオン照射損傷組織のイオンエネルギー依存性

試料温度：室温

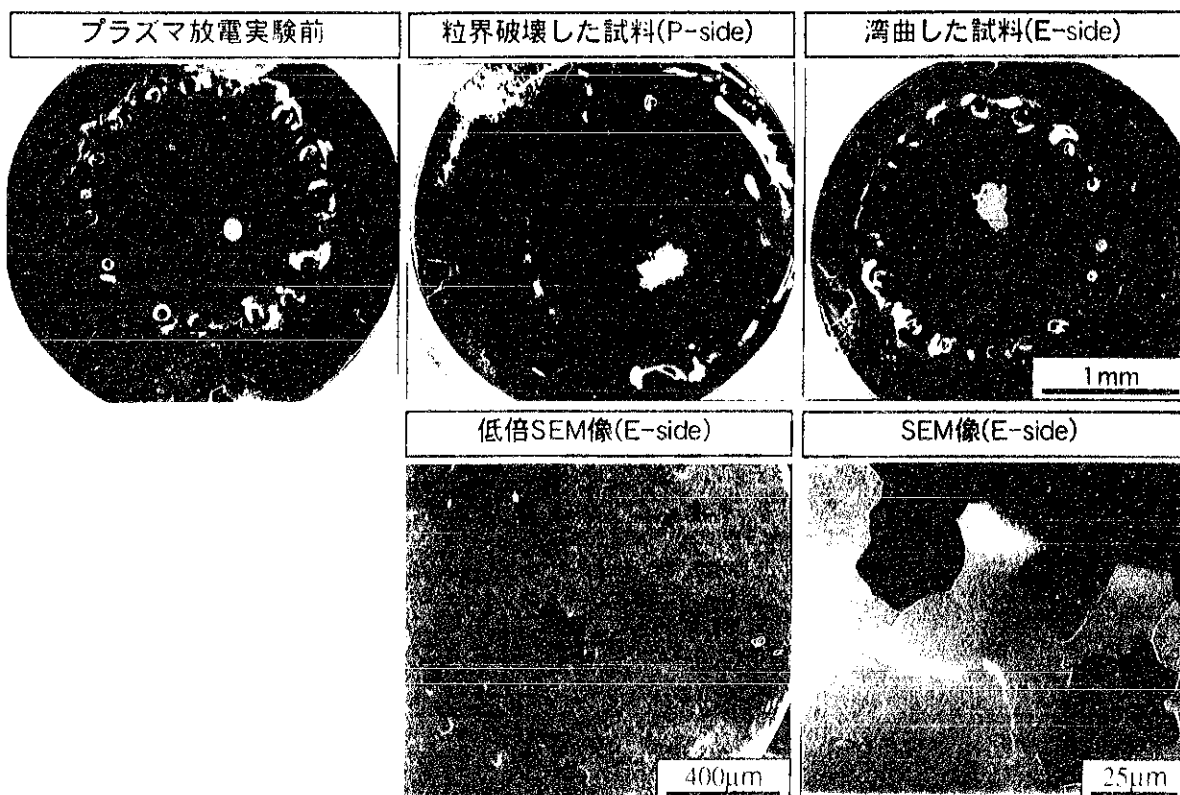


Energy Distribution of Neutral H in TRIAM-1M

$I_p = 23\text{kA}$, $\langle n_e \rangle = 2 \times 10^{18}/\text{m}^3$

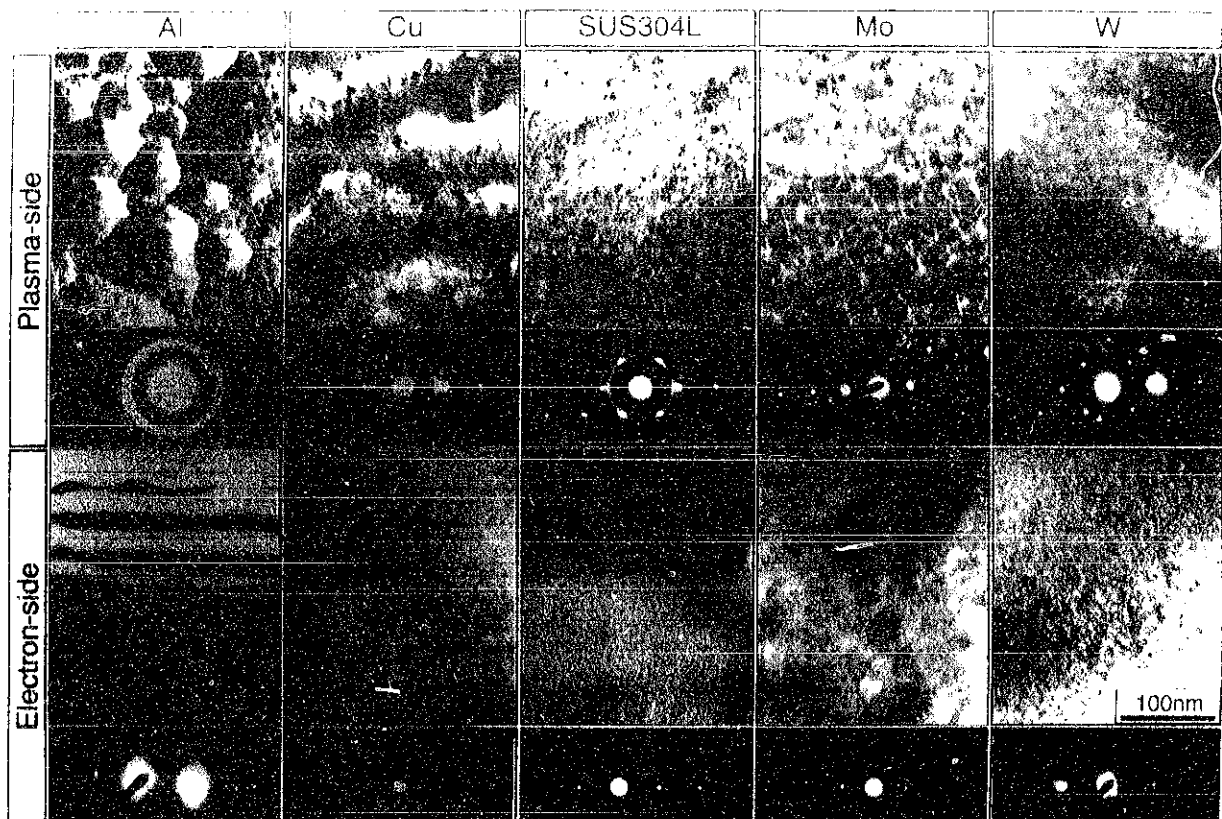


TRIAM-1M の長時間放電に曝した多結晶Wの破壊



Modification by Long Duration Plasma

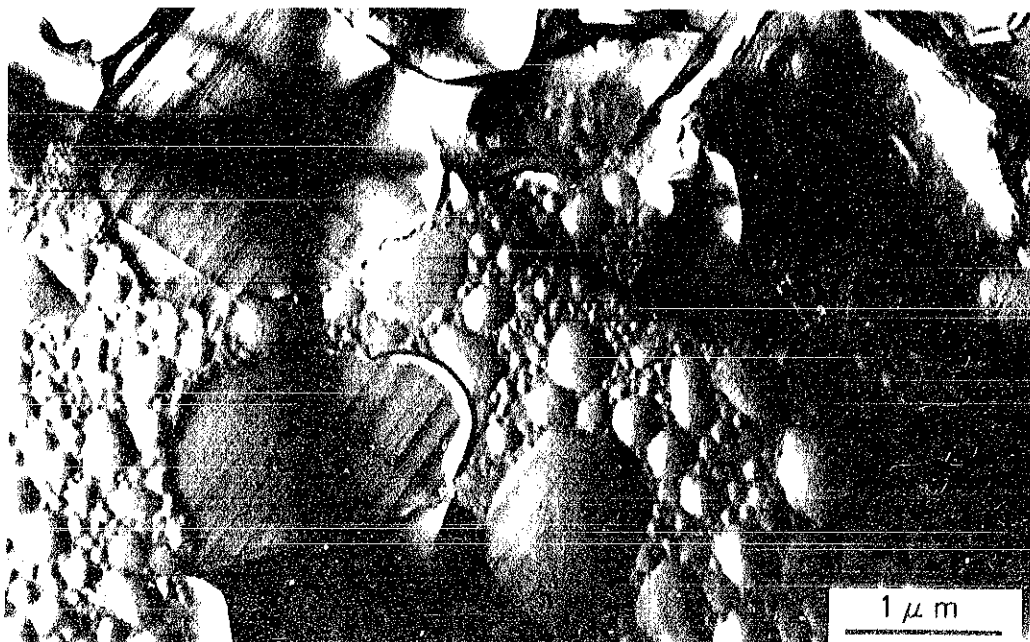
TR-10, $I_p=20\text{kA}$, $\langle n_e \rangle = 2 \times 10^{18}/\text{m}^3$, $t_j=78.4\text{min}$ (5 shots)



Re-Deposited Impurity Layer

TR-10, $I_p=20\text{kA}$, $\langle n_e \rangle = 2 \times 10^{18}/\text{m}^3$, $t_j=78.4\text{min}$ (5 shots), Al(P-side)

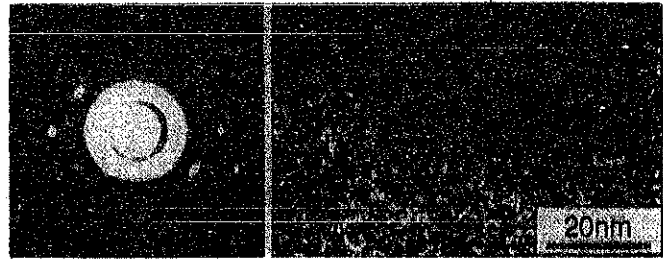
- Blistering and Exfoliation (role of hydrogen gas)
⇒ impurity source ⇒ disturb long duration discharge



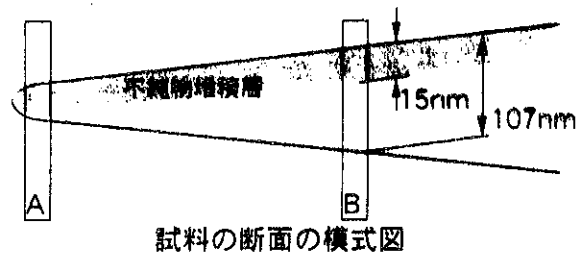
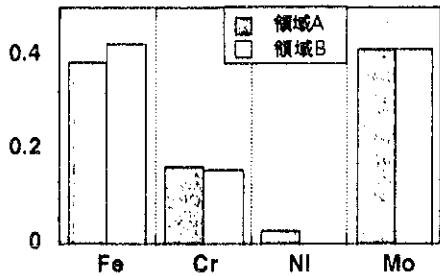
プラズマサイドのCu試料表面に堆積した不純物堆積層

- 不純物堆積層の暗視野像

FCC構造を示す回折図形
1nm程度の微結晶を形成



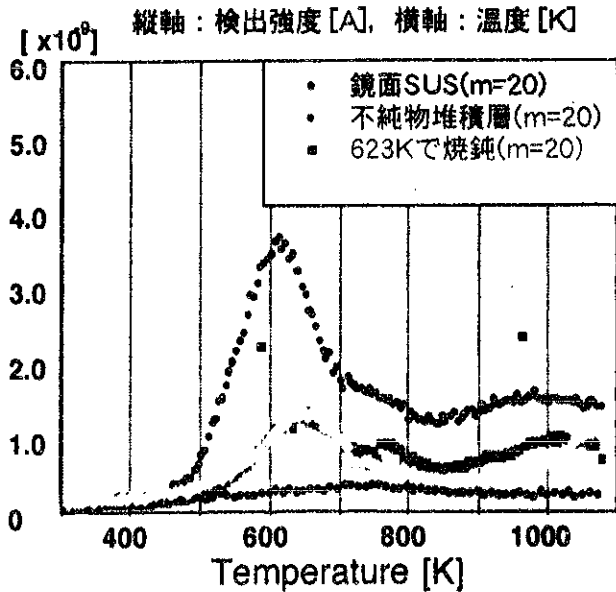
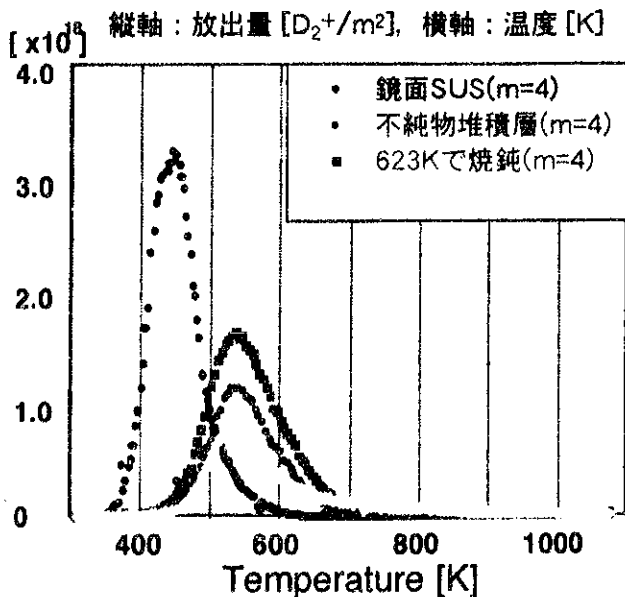
- 不純物堆積層のEDS分析および厚さの決定



真空容器およびリミターに由来した組成

約80分の放電で15nm程度の不純物堆積層が形成 → 1分間に0.2nmの堆積
長時間放電により真空容器およびリミターと特性の異なる表面層が形成

重水素(D₂)および重水(D₂O)放出スペクトル



- SUS304Lに比べて、不純物堆積層の重水素(D₂)放出スペクトルが高温側に約100Kシフト
- 不純物堆積層の重水素(D₂)放出ピーク温度は焼鈍によって変化なし

定常高粒子束イオンビームによる 対向材料スパッタリングの評価

平成9年度 核融合科学研究所計画共同研究・研究会

6月27日（金）核融合科学研究所にて

研究組織

研究代表者 西川雅弘（大阪大学）
所内世話人 相良明男（核融合研）
研究協力者 堀池 寛（大阪大学）
飯田敏行（大阪大学）
上田良夫（大阪大学）
里見憲男（大阪大学）
磯部倫郎（大阪大学）
森田健治（名古屋大学）
山村泰道（岡山理科大学）
野田信明（核融合研）
本島 修（核融合研）

定常高粒子束イオンビームによる対向材料スパッタリングの評価

研究代表者：大阪大学 西川雅弘

所内世話人：相良明男

平成9年6月27日 プラズマ対向機器・PSI・熱・粒子制御合同研究会

高粒子束実験の意義

従来のイオンビーム装置の粒子束 ($< 10^{20} \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$) はエッジプラズマからの粒子束 ($> 10^{23} \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$) よりかなり小さく、照射実験の結果が炉内環境で実現されているかどうかは明らかではない。従って、プラズマ対向材料の損耗研究にはエッジプラズマ環境に近い高粒子束ビームによる照射実験が必要である。

現在の大阪大学における研究

従来より2桁以上大きい粒子束 (D(1.7 keV): $> 10^{22} \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、Ar (5 keV): $> 10^{22} \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$) を持つビーム装置を用いて、炭素材の化学スパッタリングや照射促進昇華の損耗率が高粒子束下で減少する事を明らかにした。また、RG-Ti (Ti添加再結晶黒鉛) やボロン添加黒鉛についても実験を行っている。

本共同研究の目的

LHDのプラズマ対向材の損耗特性の評価を、高粒子束かつ高フルーエンスのビーム照射により行う。実験では、損耗量、表面形状の安定性、複合材の損耗の選択性、水素のリテンション特性等を調べる。

装置の設計方針

1. 定常イオンビーム生成 (大排気量ポンプ、冷却 [現有装置、2秒程度のパルス運転])、2. 低不純物化・イオン種の多様化 (ECRイオン源の採用)、3. 低エネルギー高粒子束化、4. 簡易オペレーション (共同研究のため) を設計方針とする。

装置概要

ビームエネルギー5keV以下 (最低エネルギー0.5keV程度)、粒子束は現有装置以上 (D(1.7 keV): $> 10^{22} \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、Ar (5 keV): $> 10^{22} \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)、イオン源はECRイオン源 (最大マイクロ波パワー5kW)、加速減速電極系使用 (実効径140 mm)。照射時の照射室の真空度 10^{-5} Torr程度。

装置構成

ECRイオン源、ビーム輸送チャンバー、試料照射室。照射室に付属するものとして、赤外線加熱装置、スパッタ粒子検出装置、昇温脱離装置 (水素吸蔵の過渡特性)、磁場偏向型質量分析器。

ECRイオン源

ECR放電による高密度プラズマをバケット型容器へ拡散して、大面積一様プラズマを生成 (東大、二瓶らの方式)。イオン源からのガスの流出量を減らすため、低圧力放電を行う ($< 1 \text{ mTorr}$)。

共同研究の現状

試料照射室は完成し、現有装置に取り付け予備実験を開始するところである。イオン源については、詳細設計を行っている。

研究テーマ

1. 高粒子束下での炭素材の化学スパッタリングの機構解明

実験：スパッタ粒子の直接測定、損失質量測定

高粒子束照射下での、ダイナミックな表面反応の測定。

照射直後の過渡特性や、高フルーエンス照射効果。

2. 高粒子束照射時における炭素材の水素吸蔵（過渡特性）

実験：高速真空内搬送装置による昇温脱離

ダイナミックリテンションの解明

炭素やSiCを被覆したペブル（ペブルダイバーター用）の特性評価

3. 炭素中の水素吸蔵形態

実験：FTIR（赤外吸収分光法）によるATR測定

水素ビーム照射した炭素材表面での炭素と水素の結合状態の解明

水素ビーム照射時のIn situでのFTIR測定（将来計画）

4. 炭素材の高粒子束照射下での照射促進昇華（RES）

実験：スパッタ粒子直接測定、損失質量測定

広い粒子束（温度）範囲で、RESの損耗率を測定しその機構を解明

添加物（Ti、B）のRESに及ぼす影響の解明

5. 高粒子束下照射での高Z金属材のスパッタリング

実験：スパッタ粒子直接測定

スパッタ粒子の電子衝突断面積（エネルギー依存性）の測定

高温におけるスパッタ率の温度依存性

表面不純物（炭素、酸素）のスパッタ粒子種やスパッタ率に対する依存性

ビーム特性

最大粒子束（ $\sim 10^{22} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$: D、 $\sim 10^{21} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$: Ar）、エネルギー（100 eV ~ 5 keV）

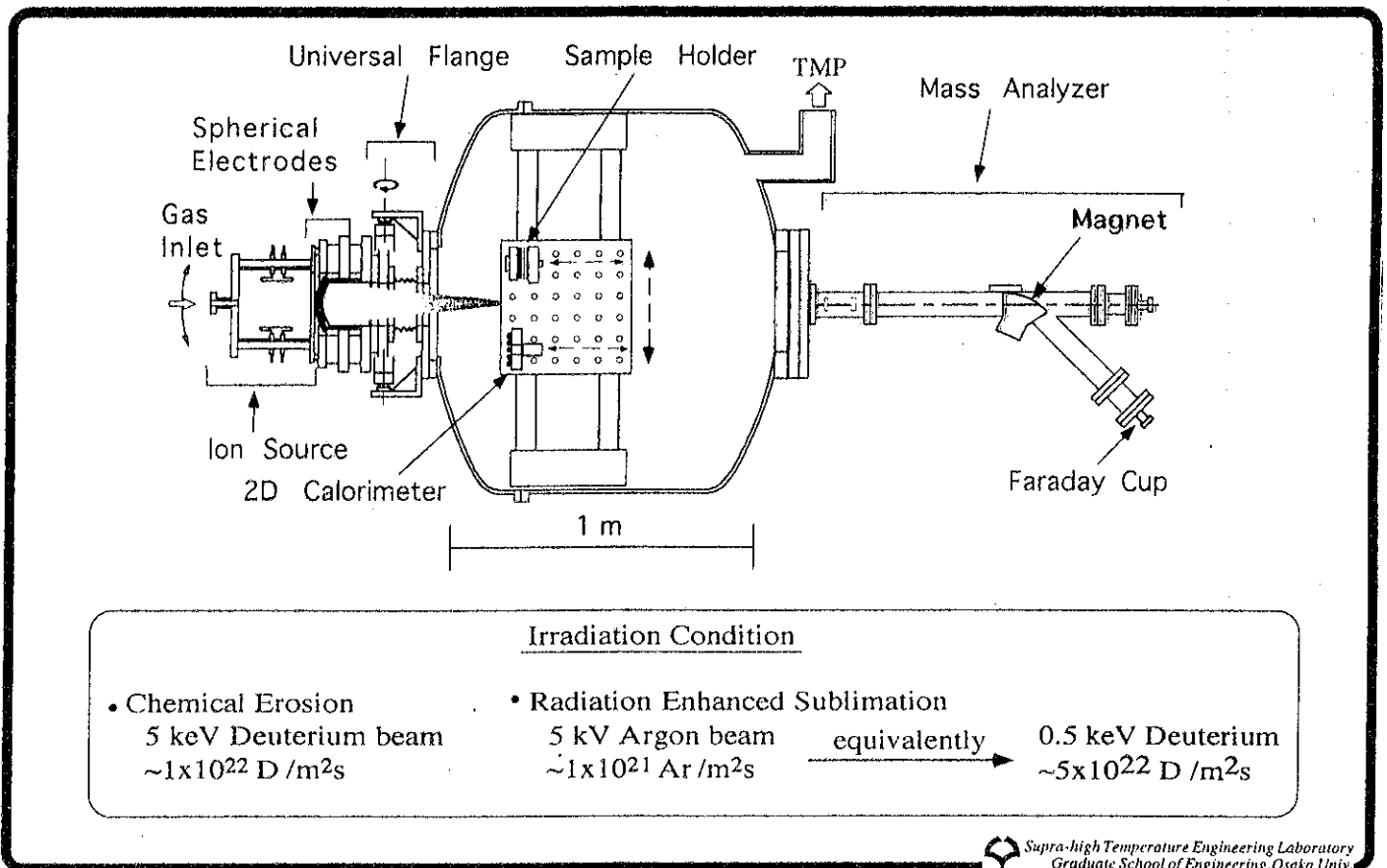
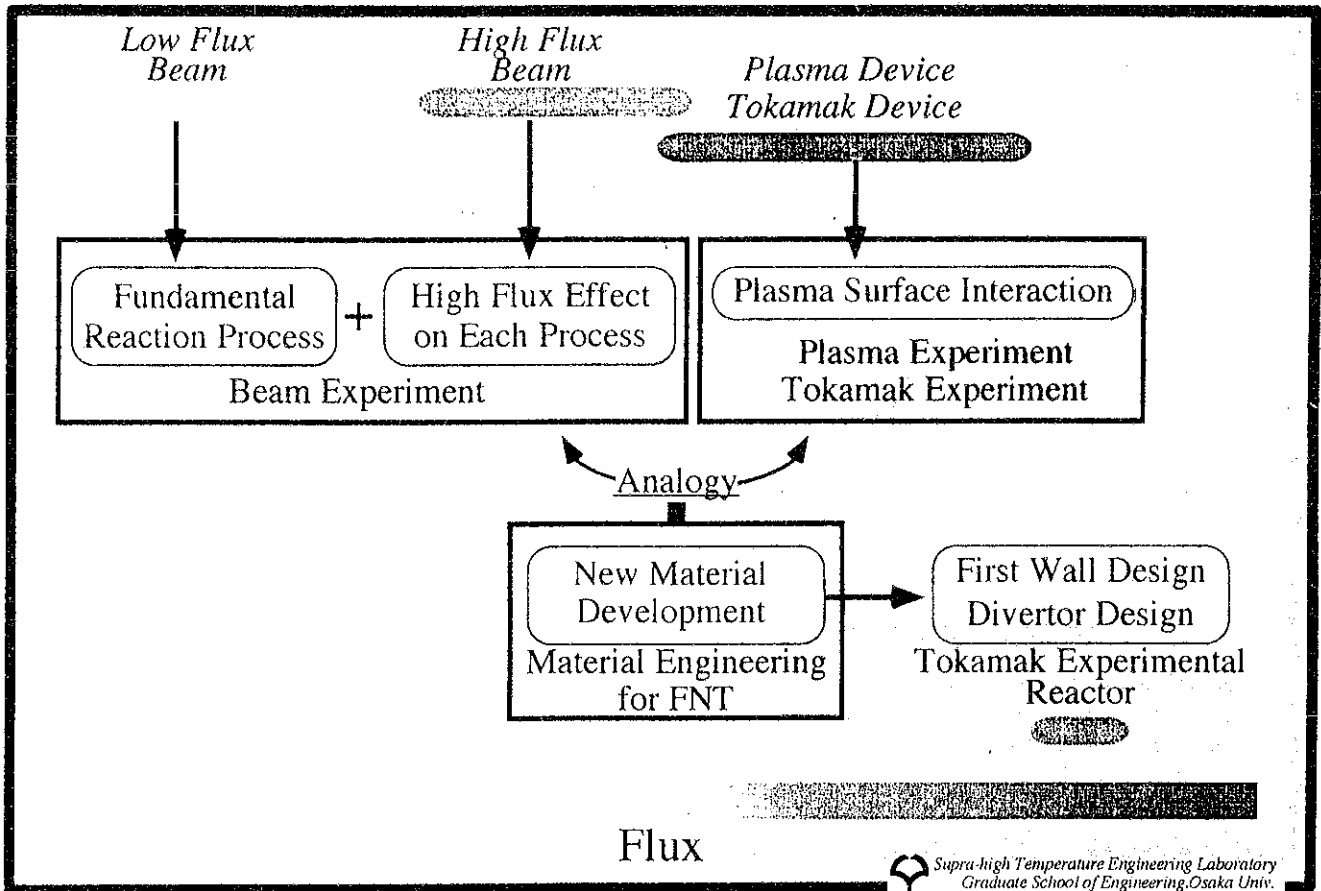
High Flux Beam Experiment in Osaka University

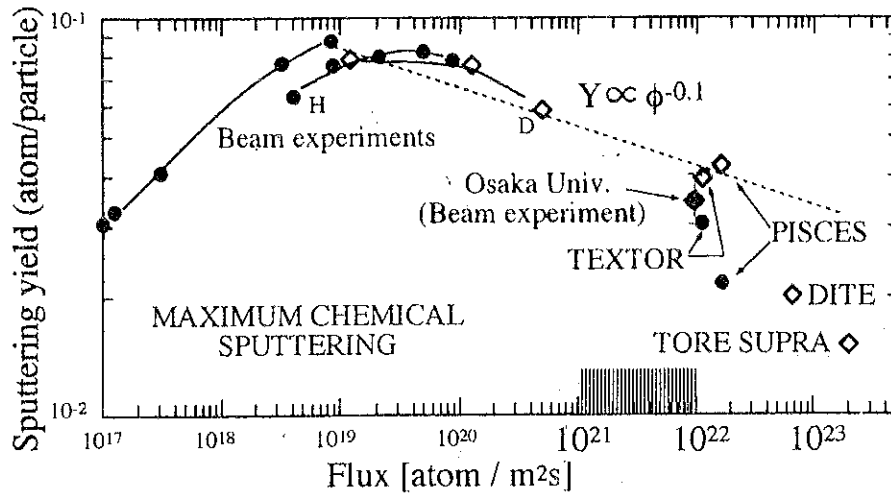
- Erosion
 - Chemical Erosion
 - Flux dependence
 - Temperature dependence
 - Radiation Enhanced Sublimation
 - Flux dependence
 - Temperature dependence
 - Incident angle dependence

- Recycling and Retention
 - Dynamic Retention
 - Simulation for Retention
 - Pebble Divertor Concept



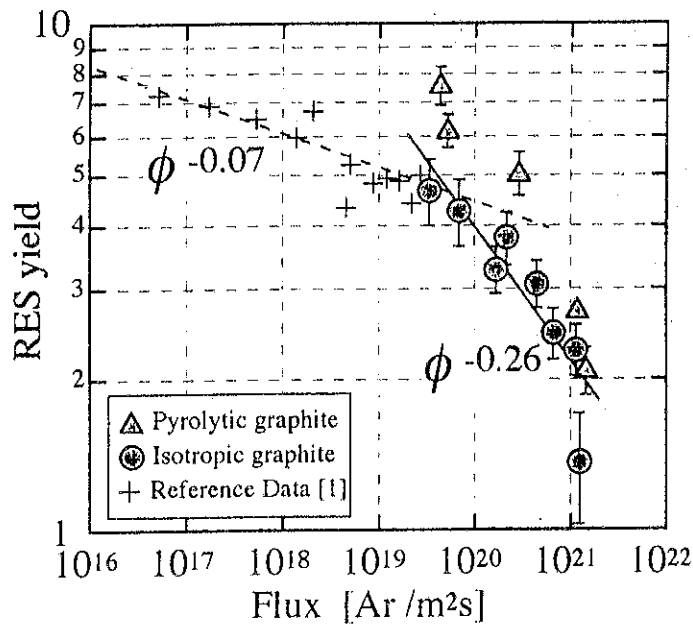
*Supra-high Temperature Engineering Laboratory
Graduate School of Engineering, Osaka Univ.*





Flux dependence of the maximum chemical sputtering yield

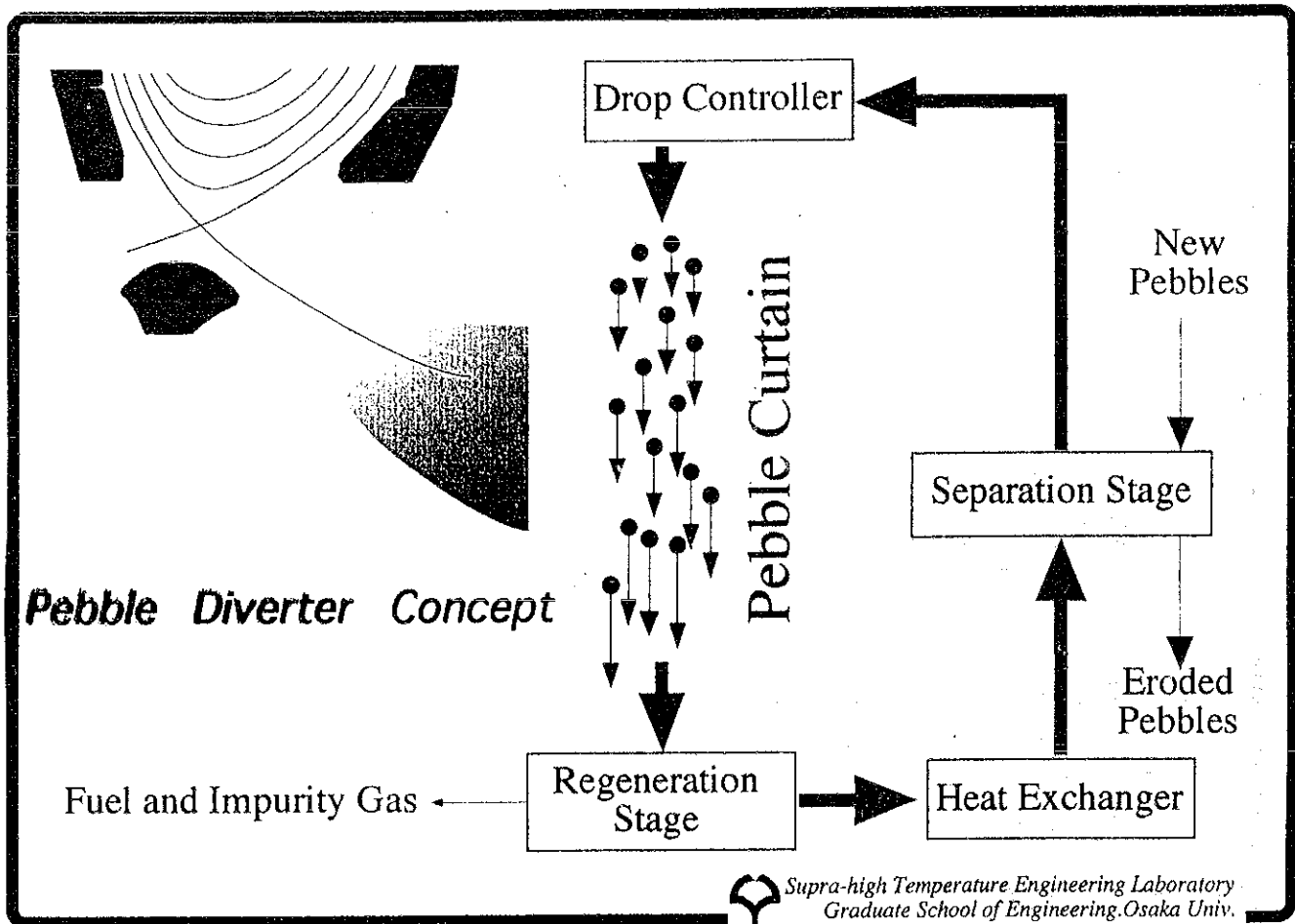
H(●) and D(◇) at energies between 250 and 2000 eV from ion beam experiment and plasma experiments. The dashed curve extrapolating the high fluxes is taken from an empirical formula. Our data at $1 \times 10^{22} / \text{m}^2 \text{s}$ is also plotted.



RES yield as a function of incident flux 5keV Ar beam.

Solid line is fitting to our data in the flux range above $1 \times 10^{20} / \text{m}^2 \text{s}$. The reference data (arbitrary unit) were taken for pyrolytic graphite at 1820K. The reference data are normalized by physical sputtering yield so that their absolute values are almost the same as those of our data at a flux of $3 \times 10^{19} / \text{m}^2 \text{s}$.

[1] V. Philipps et al., J. Nucl. Mater. 155-157(1988) 319



Summary

- ① The chemical sputtering at the high flux of $1 \times 10^{22} / \text{m}^2 \text{s}$ is investigated by the beam apparatus, and the yield is estimated to be from 0.03 to 0.04 which value is nearly same value measure by Tokamak experiments. This result may support the flux dependence as $\phi^{-0.1}$.
- ② The flux dependence of the RES yield for isotropic graphite in the high flux region of more than $1 \times 10^{20} \text{ Ar} / \text{m}^2 \text{s}$ is represented as $\phi^{-0.26}$, while the weak flux dependence of RES yield is observed as $\phi^{-0.07}$ to $\phi^{-0.08}$ in the low flux region less than $1 \times 10^{20} / \text{m}^2 \text{s}$.
- ③ In the hydrogen retention, the detrapped rate becomes predominant in comparison with the trapped rate as increasing the incident flux. Active hydrogen will play a dominant role for the recycling and the retention during the operation of fusion reactor.
- ④ When we can understand and evaluate the surface condition in high flux beam experiments, the control over the erosion and recycling / retention will be achieved for long term operation for reflection to fusion system.



本研究の目的

LHD装置 → 超電導コイルを用いた長時間放電

プラズマ対向材の評価：高粒子束 ($\geq 10^{23} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

高フルーエンス

評価項目：

損耗量（フルーエンス依存性）

表面形状の安定性

損耗の選択性（複合材）

水素のリテンション

↓ ↓ ↓ ↓ ↓

定常高粒子束イオンビームの必要性

装置の設計方針

1. 定常イオンビームの生成

大排気量ポンプの使用 → 3000 l/s 3台

→ イオン源低圧放電（排気負荷減少）

イオン源の適切な冷却

[現有装置：パルス幅最大 2 sec]

2. 低不純物化、イオン種の多様化（酸素）

高周波イオン源の採用（ECR）

[現有装置：バケット型イオン源（熱陰極アーク放電）]

3. 低エネルギー高粒子束化

最低ビームエネルギー0.5keV 以下

（現有装置：3~5keV）

高輝度ビーム引き出し → 加速減速系における減速電圧高圧化

電極形状最適化

ビーム輸送特性最適化 → 空間電荷中和

4. 簡易オペレーション

共同研究の可能性

装置の概要

1. ビームエネルギー

最大5 keV (最低エネルギー : 0.5 keV以下)

2. 照射粒子束

Ar : 5.0 keVで $10^{21} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (現有装置での値) 以上

H : 5.0 keVで $10^{22} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (現有装置での値) 以上

: 0.5 keVで $10^{21} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 以上

3. ビーム電流

1.0 A以上 (H_2) [イオン飽和電流密度 : 15 mA/cm²以上]

0.4A 以上 (Ar) [イオン飽和電流密度 : 6 mA/cm²以上]

4. イオン源

ECRイオン源 (マイクロ波パワー最大 5 kW)

5. 電極系

加速減速 3 枚電極系

電極有効系 : 140 mmφ (電極孔 : 3.8 mmφ、637個)

集束距離 : 約600 mm

6. 照射環境

照射室 : 10^{-5} Torr前半

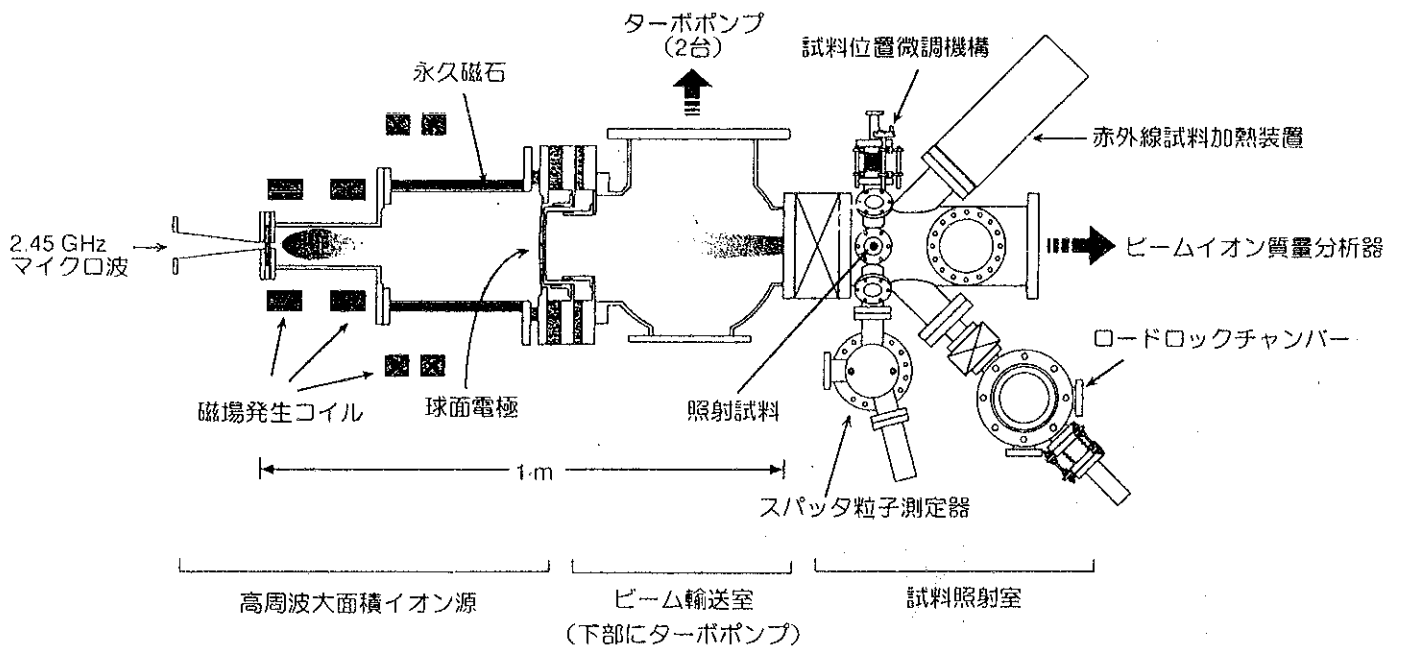
ビーム輸送室 : 5×10^{-4} Torr以下

6. 付属設備

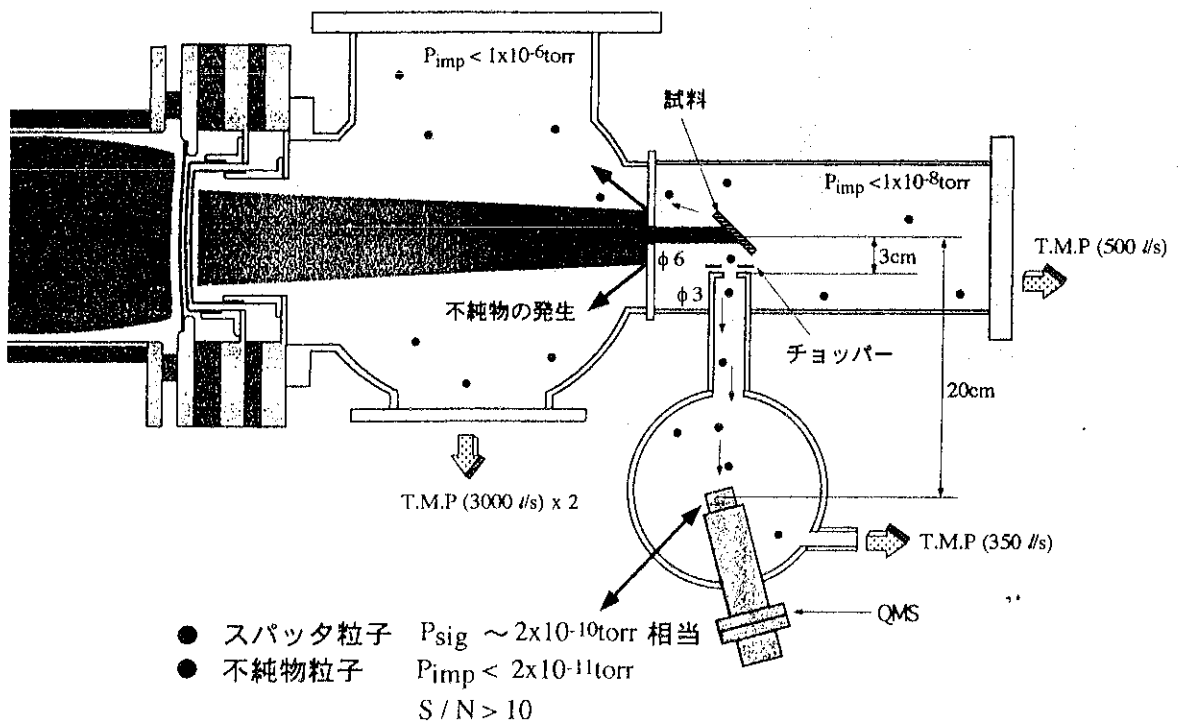
スパッタ粒子測定装置

昇温脱離測定装置

磁場偏向型質量分析器

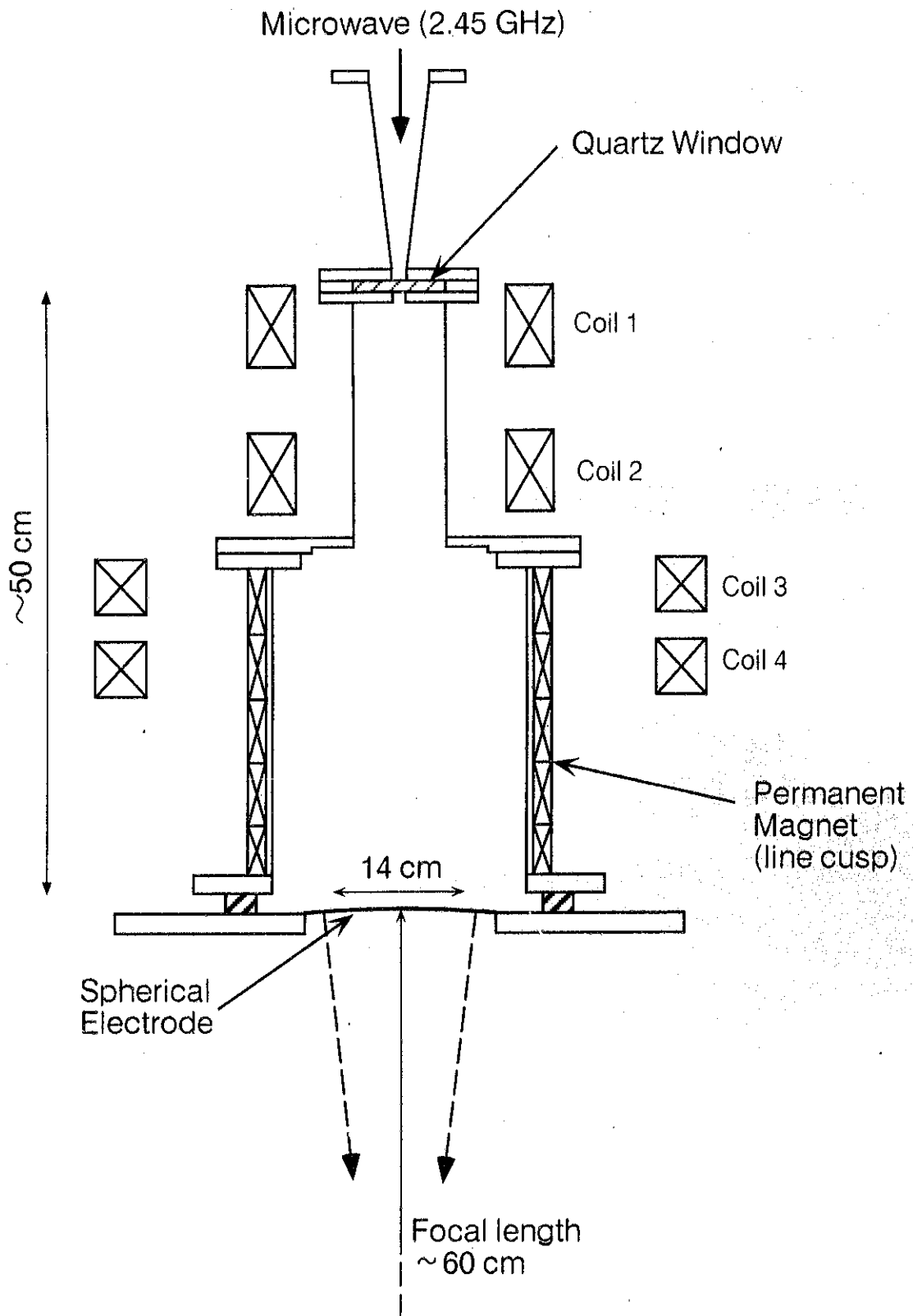


定常高粒子束ビーム照射実験装置 (上面図)



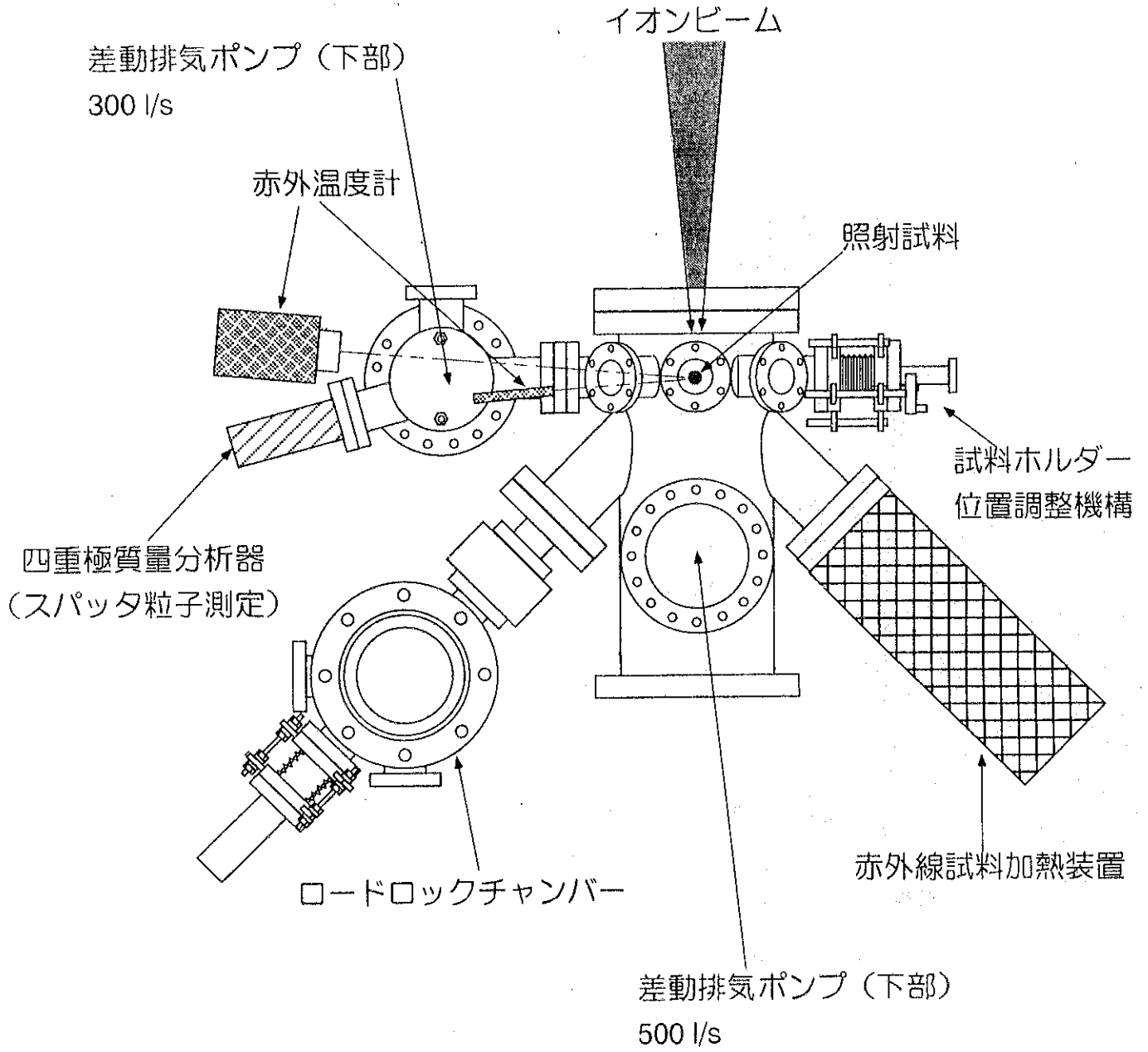
スパッタ粒子検出概略図

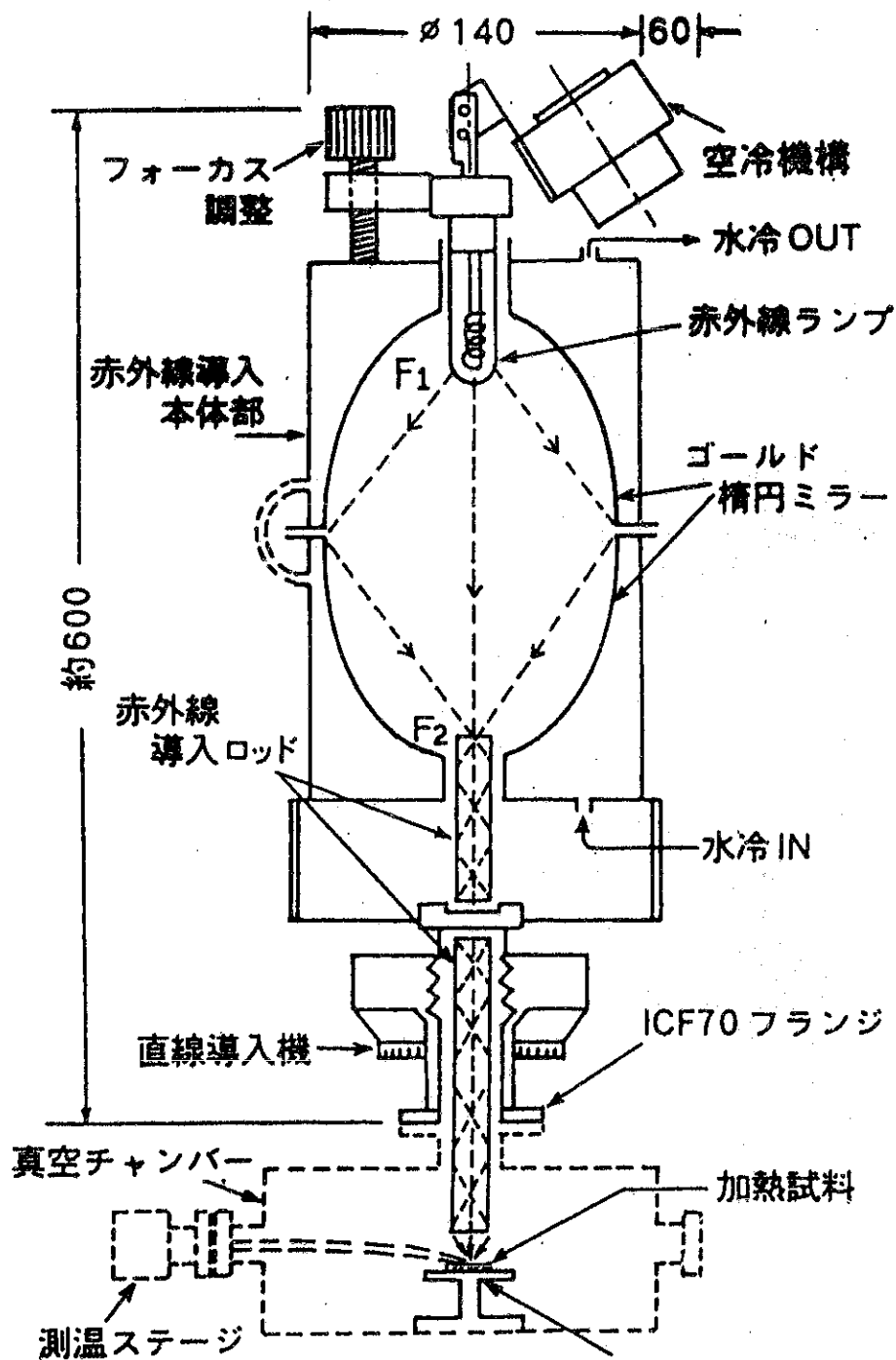
ECRイオン源概略図



動作実績 : Ar 17 mA/cm² (マイクロ波パワー 1.8 kW)

試料照射チャンバー





赤外線導入加熱装置の構造 (IR-1000GV)

高粒子束照射時における水素吸蔵の過渡特性の測定

目的

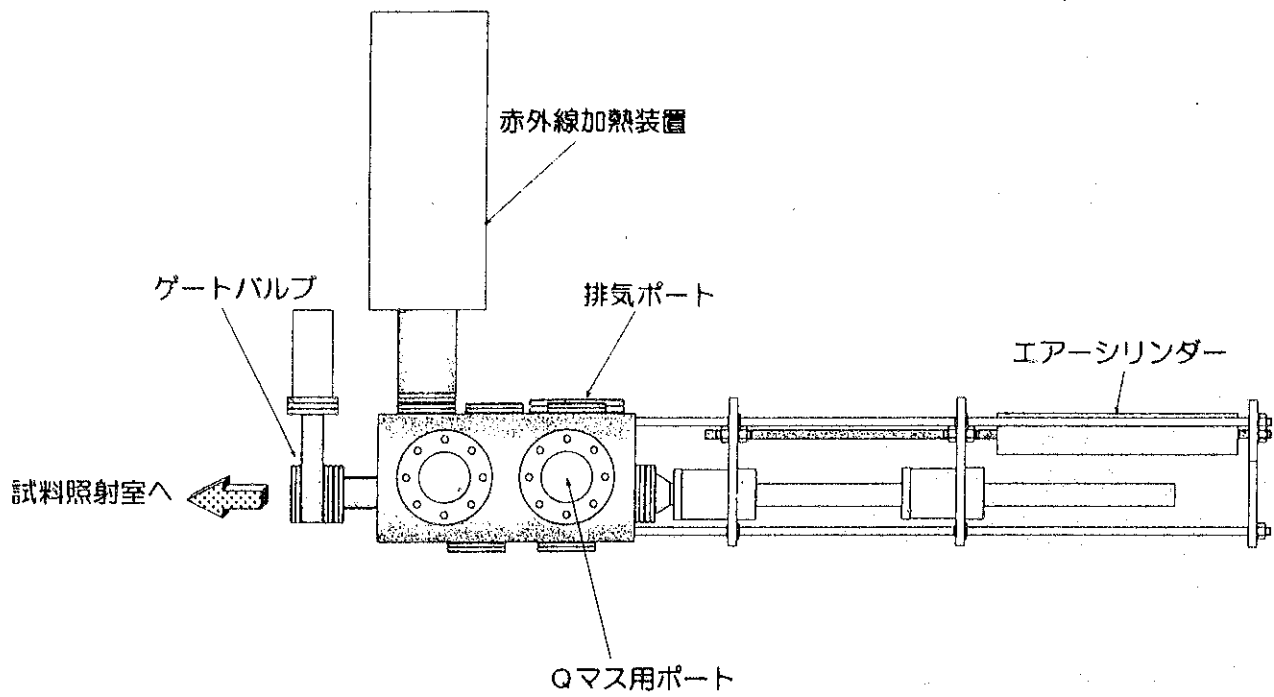
1. 高粒子束水素ビーム照射により水素飽和させた炭素材料の照射終了直後のガス放出の過渡特性を測定することにより、Dynamic Retention と呼ばれる照射中特有の水素吸蔵機構についての研究を行うとともに、その応用を検討する。
2. グラファイト、SiC 等により多層被覆された材料の照射後の加熱・脱ガス特性を調べることにより、ペブルダイバータコンセプトにおけるダイバータ粒子の再生条件の検討を行う。

実験装置

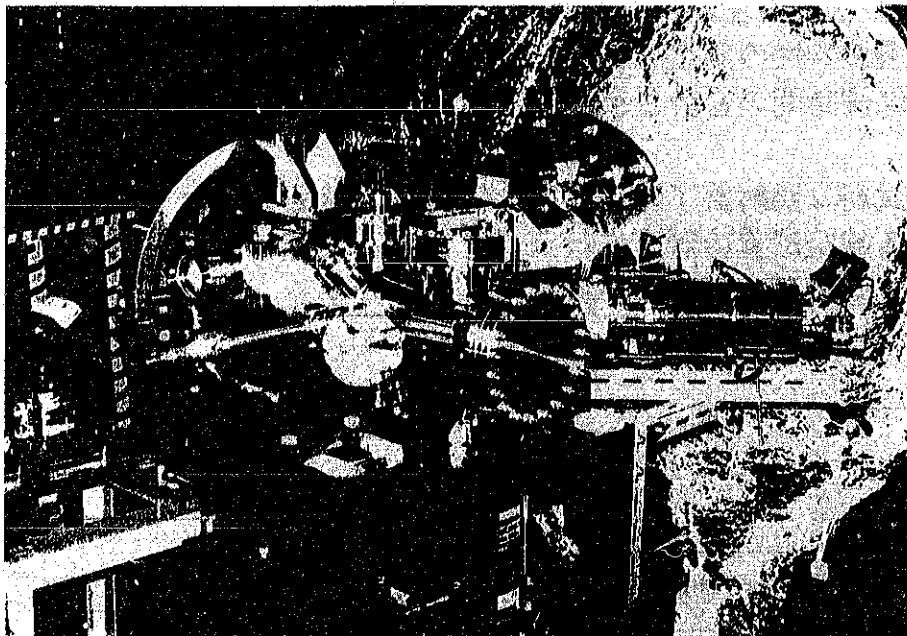
TDS 装置を、高粒子束ビーム照射装置にインラインで設置する。試料は高粒子束水素ビーム照射を行い、照射による加熱によりあらかじめ指定した表面温度に到達した時点で、高速真空内搬送装置により、TDS チャンバー内へ輸送する。照射直後の過渡特性の測定を目的とする為、試料輸送時間および輸送後から測定開始までの準備時間の合計 3 sec 以内に抑える方法を現在検討している。

輸送された試料は照射終了時の温度を保持した状態でのガス放出量の測定および追加熱による総吸蔵量の測定を行うことにより、照射終了後の過渡特性の測定と試料の水素吸蔵量の照射粒子束依存性を測定する。





昇温脱離測定チャンバー概略図



試料照射室

(現有装置に接続)

熔融塩トリチウム増殖材料 FLIBE と 構造材料との両立性

東京大学工学部
寺井隆幸・田中 知

LiF-BeF₂ フッ化物熔融塩 (Flibe) は液体増殖材料の一種であり、(1) それ自身の化学的形態が極めて安定であり、万が一の配管破断などの場合にも、高温においても空気と反応を起こさない、(2) それ自身の電気伝導率が液体金属と比べて著しく小さいため、磁場中を流すときに生じる MHD 圧力損失が小さい、という特長を有することから、LHD の高熱流速機器の高性能化をめざした先進冷却方式 (低圧高温運転・低 MHD 圧損・高安全性) を念頭においた FFHR の伝熱媒体およびトリチウム増殖材料として使用することが検討されている。しかしながら、Flibe については、ブランケット設計に必要なトリチウムの挙動や構造材料に対する腐食のデータが不十分であり、今後、これらのデータを求めて行くことが極めて重要である。東京大学工学部では、これらの観点から、1) FLIBE 熔融塩からのトリチウム放出機構の解明とトリチウム移行の制御、および 2) FLIBE 熔融塩と構造材料との両立性に関する研究を行いつつある。

このうち前者については、東大「弥生」炉 (原子力工学研究施設・東海村) を用いた原子炉内中性子高温照射下トリチウム放出・回収実験および原子炉外水素同位体移行実験を行うことにより、トリチウム移行素過程の解明・トリチウムの構造材料透過挙動の研究と透過漏洩の防止・効果的なトリチウム回収法の検討を行っている。また、後者については、その一部を NIFS 計画共同研究 (平成 9 年度～11 年度) として実施している。ここでは、後者の研究計画について説明する。

ブランケット設計のためには、現実のブランケット条件 (高温・中性子照射・磁場・熔融塩流動下) において Flibe と構造材料との共存性を明らかにすることが必要があるが、本研究ではそのための基礎研究として、高温・静的条件下 における、Flibe と構造材料との共存性や腐食のメカニズムを実験と理論的解析により明らかにすることを目的としている。Flibe の構造材料に対する腐食挙動についての研究はこれまでもいくつか行われている。特に、Ni 基合金については研究が比較的好く行われており、たとえば Hastelloy N では 600℃ で 26000 時間まで腐食はほとんど進まなかったが、深さ 0.1 mm 程度の粒界腐食が認められたと報告されている。一般的に、腐食においては体系内の微量不純物が重要な役割を果たすことが多いが、Flibe の場合にはブランケット中で TF を生成するため、

HF(TF)の構造材料に対する腐食挙動を十分に調べておく必要がある。鉄基合金 (JFL-1 など) やバナジウムなどが FFHR では想定されているが、これらについての腐食に関するデータはほとんどない。ただし、 FeF_2 や CrF_3 は Flibe に対して大きな溶解度を持つ (NiF_2 の数十倍程度) ため、大きな腐食速度を持つことが予想される。また、FFHR で想定されている、Be 共存下 (還元性雰囲気) での腐食挙動・酸化還元状態が複雑に関与しあう体系における腐食挙動・ MoF_6 の熱分解によるコーティングなどに関しては不明な点が多い。

具体的な実施研究内容は、以下の通りである。

(1) 雰囲気制御系を備えた溶融塩腐食実験装置を新たに製作する。試験用試料片 (Mo, Ni, W, Fe, V, SUS, etc.) を高温 (470°C , 500°C , 550°C , 600°C) で一定時間溶融 Flibe 中に静的に浸漬したのち取り出して洗浄し、重量変化・断面金相観察 (SEM, XMA, etc.) ・X線回折測定・RBS 法による元素分布測定・XPS による元素の化学状態の測定などを行い、腐食速度の測定と腐食メカニズムについての検討を行う。

(2) 腐食に及ぼす体系内の酸化・還元状態 (フッ化水素活量や水素活量) の影響を検討するために、雰囲気ガスを $\text{Ar} + \text{HF}$, $+\text{H}_2$, $+\text{O}_2$, $+\text{H}_2\text{O}$, etc. と変化させるとともに、共存物質として Be, Li, MoF_6 , etc. などを添加し、これらの不純物共存条件下で腐食がどのように起こるのかを調べる。

(3) MoF_6 等の熱分解による体系内での in-situ Mo コーティングや、Be 添加時の CrF_3 や FeF_2 の分解による自己修復性について予備的に検討する。

なお、研究の次の段階においては、溶融塩精製系・不純物制御系・雰囲気制御系を備えた溶融塩化学実験ループを製作し、流動下における腐食速度と質量移行を解明することが必要となるが、本研究の成果は、次の段階での溶融塩化学実験ループを用いた研究の設計に直接反映される。また、本研究は $\text{LiF}-\text{BeF}_2$ の伝熱流動ループに関する研究計画 (代表: 東北大工学部・戸田三朗教授) と相補的に実施するものである。なお、本研究は平成9年度からの3年度計画で実施されるものであり、平成9年度はおもに腐食試験装置の製作と予備試験を実施する。

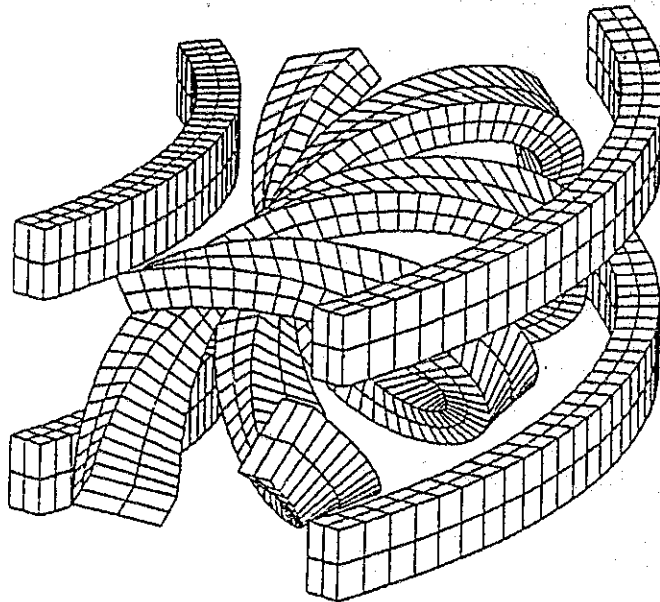
ヘリカル型実用核融合炉(FFHR) におけるトリチウム増殖材料

ヘリカル型実験装置(LHD)



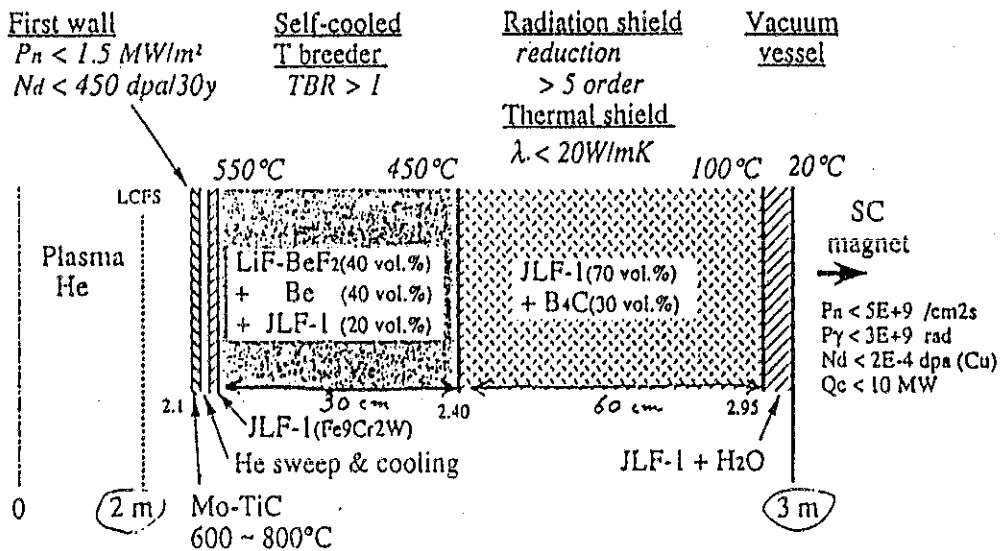
ヘリカル型実用核融合炉(FFHR)の概念設計：熱出力3GW

複雑な形状を持つヘリカルコイル内のブランケット



- 分解交換が不要ない
- 冷却材として兼用

Flibe(60%LiF-40%BeF₂)を
有力なブランケット材料と考えている。

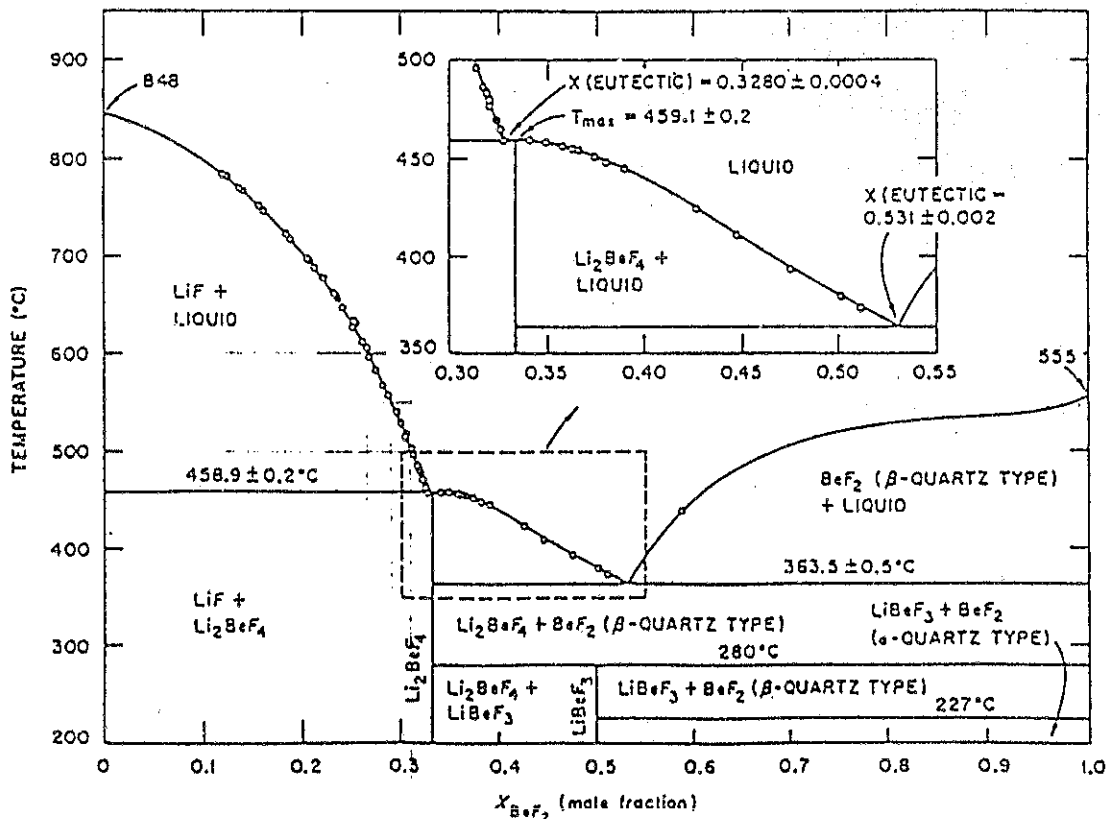


Flibe (LiF-BeF₂) の特徴

- (1) それ自身の化学的形態が極めて安定であることから、万が一の配管破断などの場合にも、高温においても空気と反応を起こさない
- (2) それ自身の電気伝導率が液体金属と比べて著しく小さいことから、磁場中を流すときに生じるMHD圧力損失が小さい

Flibe についての検討課題

- (1) トリチウムの挙動に関するデータが不十分
- (2) 構造材料に対する腐食のデータが不十分



東京大学工学部における FLIBE 化学に関する全体計画

- 1) FLIBE 溶融塩からのトリチウム放出機構の解明とトリチウム移行の制御
 - トリチウム放出化学形・トリチウム放出速度
 - トリチウムの構造材料透過と透過漏洩の防止
 - 効果的なトリチウム回収法の検討

- 2) FLIBE 溶融塩と構造材料との両立性
 - 腐食機構の解明（特に不純物の効果）
 - 腐食防止方法の検討

FLIBE の化学的挙動に関する研究の展開

規模	小規模	中・大規模
実験手法	STATIC POT を用いた実験 (雰囲気・不純物制御)	DYNAMIC LOOP を用いた実験 (循環・精製・雰囲気・不純物制御)
FLIBE からの T 放出	素過程の解明	流動下における T 移行プロセスの解明
FLIBE の 腐食特性	素過程の解明	流動下腐食に伴う物質移行 速度論
コスト	各 1 千万円程度以下	各数千万円～数億円

FLIBE 溶融塩からのトリチウム放出機構の解明 とトリチウム移行の制御

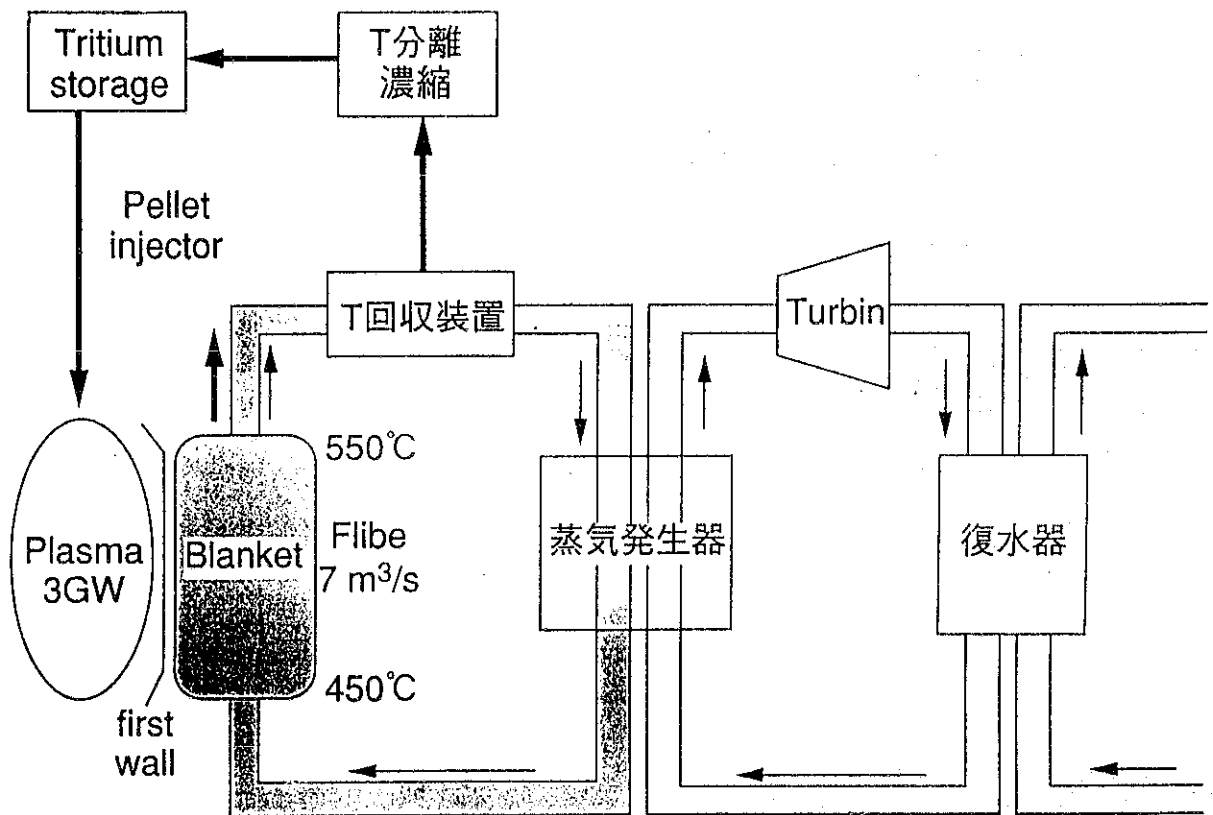
- 1) 東大「弥生」炉（原子力工学研究施設・東海村）を用いた原子炉内中性子高温照射下トリチウム放出・回収実験および原子炉外水素同位体移行実験
- 2) トリチウム移行素過程の解明
（放出化学形・移行速度）（酸化・還元雰囲気の影響）（溶融塩の流動状態）
- 3) トリチウムの構造材料透過挙動と透過漏洩の防止
（トリチウム透過挙動の解明）
（ MoF_6 等の熱分解によるトリチウム透過バリアーの in-situ コーティング）
- 4) 効果的なトリチウム回収法の検討
（スプレー塔、二重管透過法など）

Flibeからのトリチウム放出挙動

- Process (1) が律速過程（化学形TF、小さな放出速度）
- Process (2) が律速過程（化学形HT、水素濃度に依存する中程度の放出速度）
- Process (3) が律速過程（化学形HT、水素濃度に依存しない大きな放出速度）

		He			H ₂
		スweepガス He	スweepガス He+0.01%H ₂	スweepガス He+1%H ₂	スweepガス H ₂
HF濃度	H ₂ 濃度				
	HF濃度				
	乾燥時間				
	24~26日	HT (+TF) 放出速度 小	HT (+TF) 放出速度 中	HT (+TF) 放出速度 大	HT 放出速度 大
	3~5日	TF 放出速度 極小	_____	HT (+TF) 放出速度 大	HT (+TF) 放出速度 大
	スweepガス He+2%HF	TF (+HT) 放出速度 極小	_____	_____	_____

FFHRにおける冷却材を兼ねた Flibeブランケット

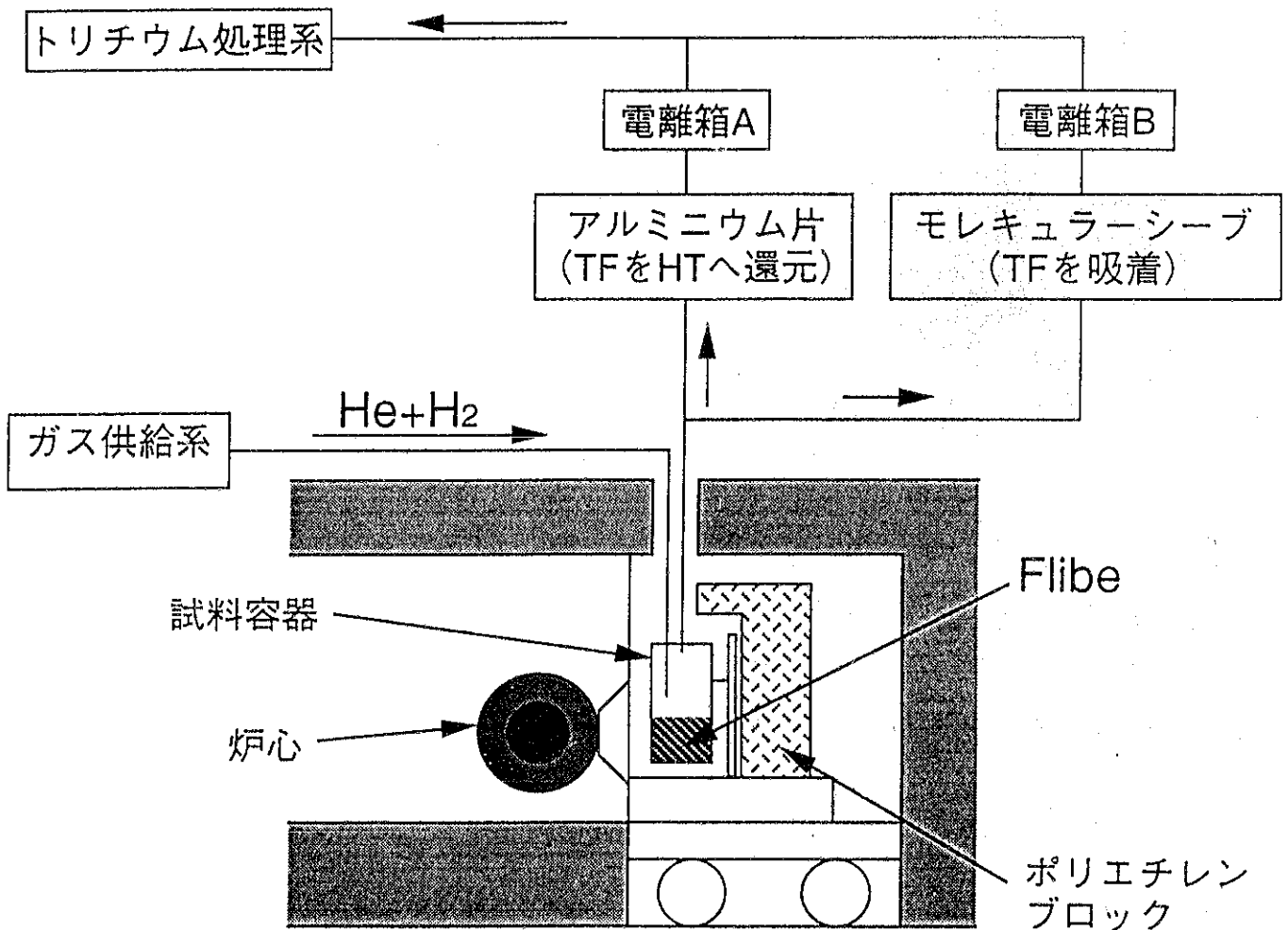


トリチウムを含んだ熱媒体FLiBeの検討課題

- トリチウムの化学形制御
- 配管材料壁を通してのトリチウム透過漏洩の防止
- 熱交換器を通してのトリチウム透過漏洩の防止
- Flibeからのトリチウムの回収方法

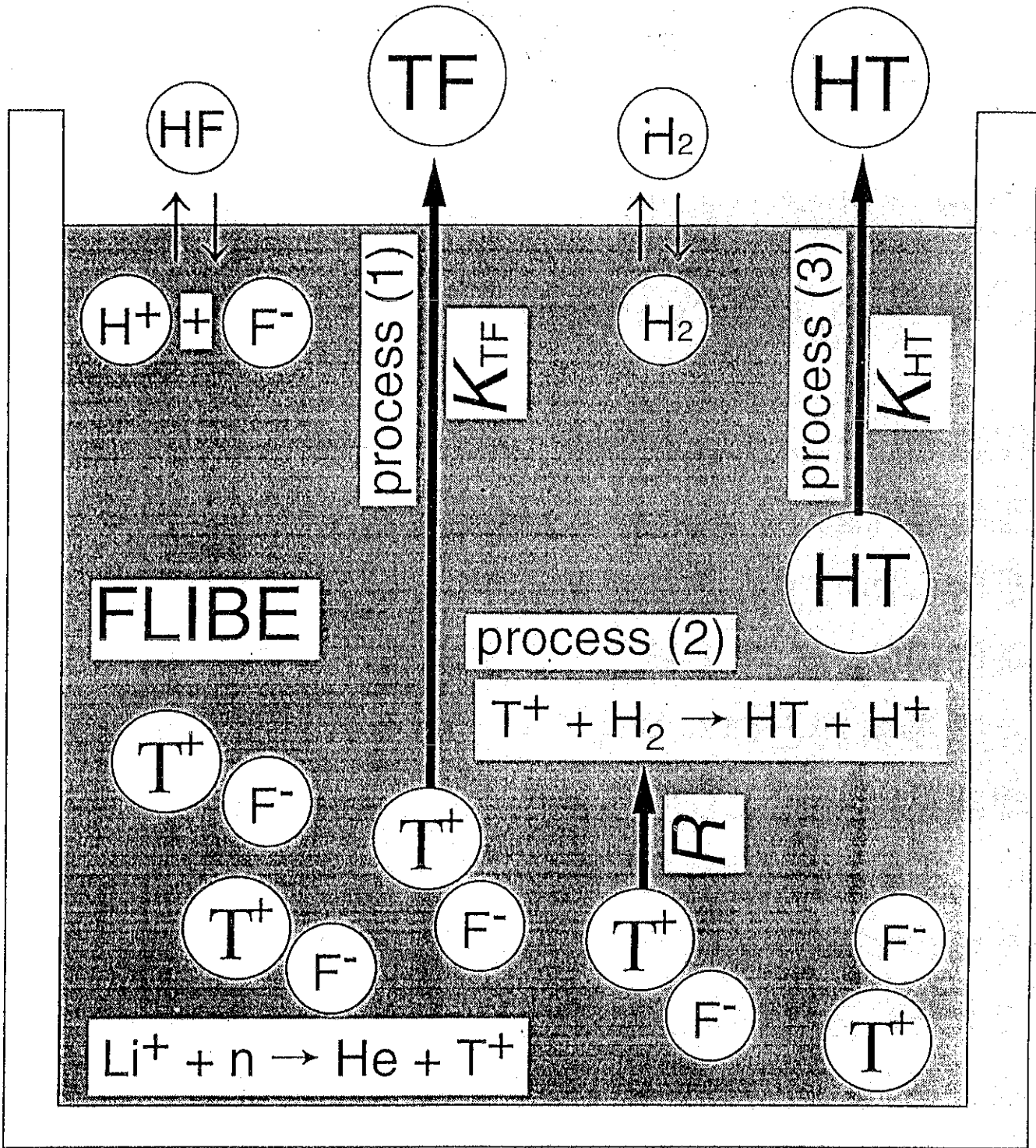
実験体系

東大弥生炉($10^8 \sim 10^9 \text{ n/cm}^2\text{s}$)において
600°Cに加熱した溶融Flibeを中性子照射し、
発生したトリチウム(5Bq/g-Li,s)を
スイープガス($\text{He}+\text{H}_2$)によって回収し、
トリチウムの化学形を確認した。



Flibeから放出されたトリチウムは、
電離箱Aで総量 (HTとTF両方の寄与分) が測定でき、
電離箱BでHTの寄与分だけを測定することができる。

トリチウム放出モデル



Process (1) : T^+ が直接気相へTFとして放出される過程

Process (2) : T^+ が試料中の H_2 と同位体交換を行い、HTになる過程

Process (3) : 生成したHTが気相へ放出される過程

FLIBE 熔融塩と構造材料との両立性

(計画共同研究)

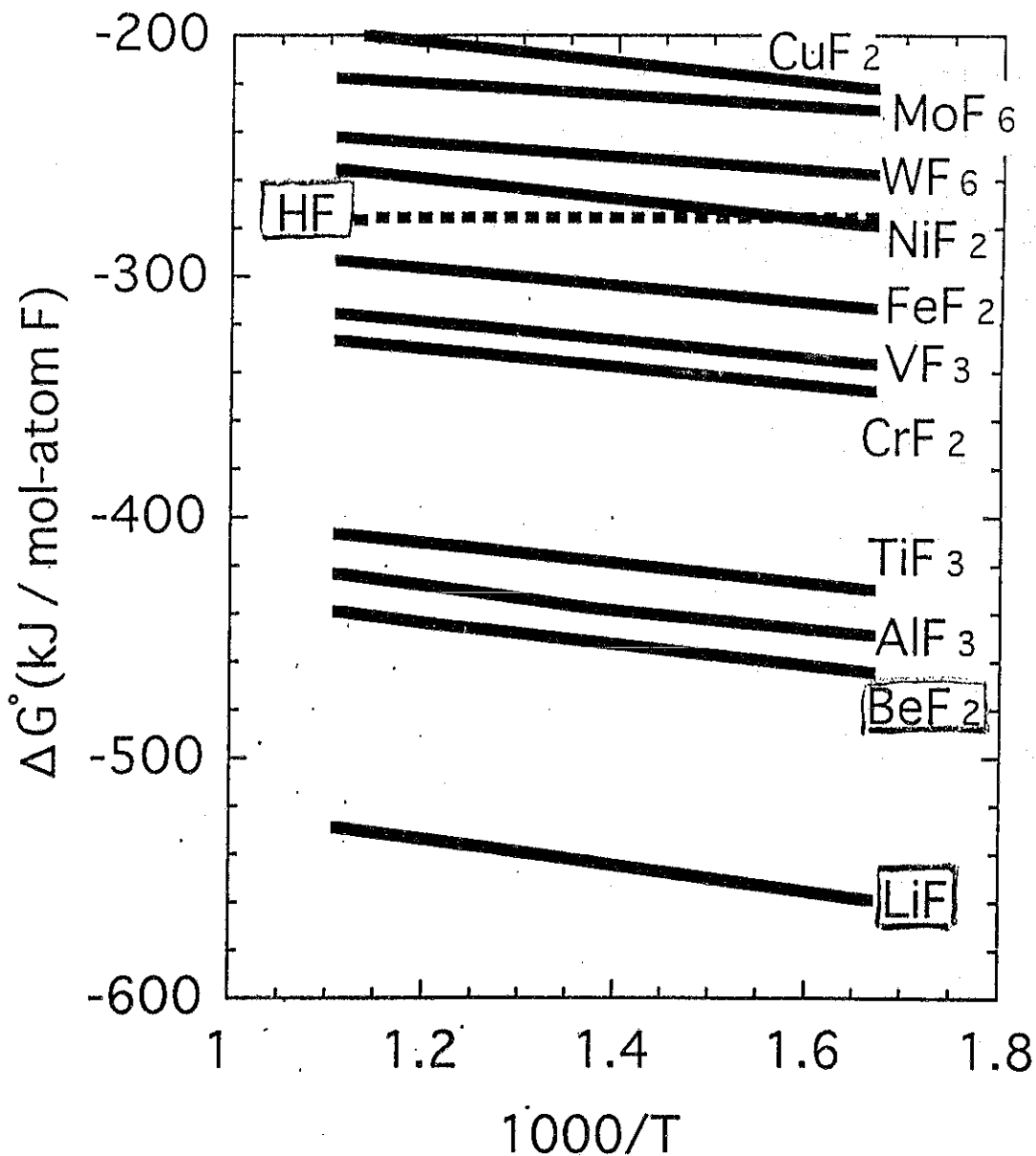
○腐食機構の解明（微量不純物の影響）

○腐食防止方法の検討

実際のブランケット条件（高温・中性子照射・磁場・熔融塩流動下）において Flibe と構造材料との共存性を明らかにする必要があるが、本研究ではそのための基礎研究として、高温・静的条件下における、Flibe と構造材料との共存性や腐食のメカニズムを実験と理論的解析により明らかにすることを目的とする。特に、不純物や雰囲気（酸化・還元条件）の影響に重点をおいて研究を行う。なお本研究の成果は、そのまま FFHR 設計のための基礎データとなるのみならず、次の段階で必要とされる熔融塩化学実験ループを用いた研究の設計に反映される。

各種金属フッ化物の生成自由エネルギー

- 1) 純粋なFlibe中では多くの元素が安定
- 2) 不純物によるHFの発生、また、
LiFの核変換によるTFの発生により
腐食が進行する可能性
- 3) HFが生じても安定な金属は、Mo、W、Ni等



構造材料に対する Flibe の腐食挙動についての 研究の現状とその必要性

(1) Ni 基合金については研究がある程度行われている。ハステロイ N は 600°C で 26000 時間まで腐食はほとんど進まなかったが、深さ 0.1 mm 程度の粒界腐食が認められた。

(2) 腐食については、特に不純物の効果が重要である。Flibe はブランケット中で TF を生成するため、HF(TF) の構造材料に対する腐食挙動を十分に調べておく必要がある。

(3) 鉄基合金 (JFL-1 など) やバナジウムなどが FFHR では想定されているが、これらについての腐食に関するデータはほとんどない。ただし、 FeF_2 や CrF_3 は Flibe に対して大きな溶解度を持つ (NiF_2 の数十倍程度) ため、大きな腐食速度を持つことが予想される。

(4) FFHR で想定されている Be 共存下 (還元性雰囲気) での腐食挙動や酸化還元状態が複雑に関与しあう体系における腐食挙動や MoF_6 の熱分解によるコーティングなどについては不明な点が多い。

FLIBE と構造材料との両立性の改善方法

- 1) TF に対して不活性な材料を選ぶ
- 2) 雰囲気還元性を保つこと
(TF の scavenger を添加する)

具体的には次のものが考えられる

- 1) Redox buffer の添加
たとえば、 $\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$
- 2) Metal scavenger の添加
316SS/Flibe 系への Be の添加など
- 3) Non-metal scavenger の添加
 S^{2-} , I^- など $\rightarrow\text{H}_2\text{S}$, HI が発生
 \rightarrow トリチウム回収に問題
- 4) コーティング法
W, Mo, Ni などの不活性な材料で表面被覆
 $\rightarrow\text{MoF}_6$ 添加による Mo 被膜の生成

具体的な研究実施内容

(1) 雰囲気制御系を備えた熔融塩腐食実験装置を新たに製作する。試験用試料片 (Mo, Ni, W, Fe, V, SUS, etc.) を高温 (470°C, 500°C, 550°C, 600°C) で一定時間熔融 Flibe 中に静的に浸漬したのち取り出して洗浄し、重量変化・断面金相観察 (SEM, XMA, etc.) ・ X線回折測定・RBS 法による元素分布測定を行い、腐食速度の測定と腐食メカニズムの検討を行う。

(2) 腐食に及ぼす体系内の酸化・還元状態 (フッ化水素活量や水素活量) の影響を検討するために、雰囲気ガスを $\text{Ar} + \text{HF}_x + \text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$, etc. と変化させるとともに、共存物質として Be, Li, MoF_6 , etc.などを添加し、これらの共存条件下で腐食がどのように起こるのかを調べる。

(3) MoF_6 等の熱分解による体系内での in-situ コーティングや、Be 添加時の CrF_3 や FeF_2 の分解による自己修復性について予備的に検討する。

年 次 計 画

(平成 9 年度)

- (1) 試験装置の製作
- (2) 予備実験の実施

(平成 10 年度)

- (1) 腐食実験の実施
- (2) 試験後試料の分析
- (3) 腐食メカニズムの検討

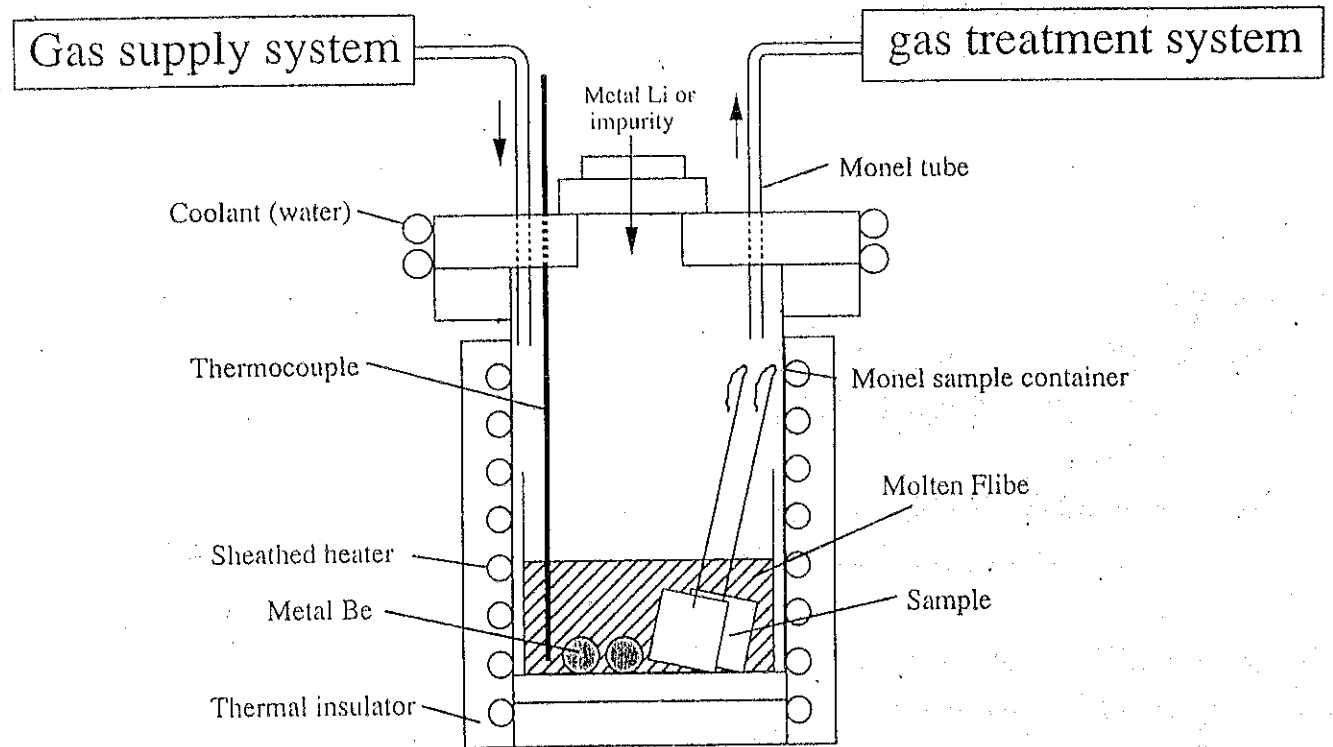
(平成 11 年度)

- (1) 実験装置の改良
- (2) 腐食実験の高度化
- (3) 体系内での in-situ コーティングや溶融塩中酸化還元による構造材料壁の自己修復性についての予備的な検討

本計画共同研究の位置づけ

本研究は LHD の高熱流速機器の高性能化をめざした先進冷却方式（低圧高温運転・低 MHD 圧損・高安全性）開発研究の一環として行うものであり、将来の実用炉における液体ブランケット開発に寄与できる。本研究は、その中でも特に LiF-BeF_2 と構造材料との共存性に関する研究であり、 LiF-BeF_2 の伝熱流動ループに関する研究計画（代表：東北大工学部・戸田三朗教授）と相補的に実施するものである。

実験装置



研究組織

田中 知 (東京大学工学部教授)	全体のとりのまとめ
寺井隆幸 (東京大学工学部助教授)	研究計画および試験結果の検討 腐食試験の実施
米岡俊明 (東京大学工学部助手)	腐食試験の実施
小林知洋 (東京大学工学部助手)	同上
戸田三朗 (東北大学工学部教授)	研究計画および試験結果の検討
松井秀樹 (東北大学金属材料研究所教授)	研究計画および試験結果の検討 試験用試料の調製
本島 修 (核融合科学研究所教授)	研究計画および試験結果の検討
室賀健夫 (核融合科学研究所教授)	同上
相良明男 (核融合科学研究所助教授)	同上・NIFS 内世話人
宇田達彦 (核融合科学研究所助教授)	同上

溶融塩強制循環ループユニットの開発とそれを用いた
ダイバータ高熱流束除熱体及びブランケット溶融塩技術の開発と評価

東北大学大学院工学研究科

戸田 三朗

1. 研究目的：

- (1) 当該研究のツールとなる溶融塩 (FLIBE) 強制循環ループユニットの開発
- (2) ダイバータ高熱流束壁の溶融塩除熱の新技术とそれを応用する高熱流束除熱体の開発
- (3) 溶融塩試験部の開発とそれを用いた熱輸送、制御および材料健全性等のブランケット溶融塩技術を開発と評価

2. 研究・開発の具体的な内容： *：検討ほぼ終了

2-1. 溶融塩 (FLIBE) 強制循環ループユニットの開発

開発スケジュール：

溶融塩 (FLIBE) 強制循環ループユニットの R & D (平成8年～9年)
設計製作 (平成9年～10年)
立ち上げ (平成10年)。

開発項目：

- ・ハステロイ合金又は SUS による構造設計*
- ・ポンプ (液中ベアリングを持たない小型短軸遠心ポンプ) の開発*
- ・バルブ (機械的) および凝固弁、流量調整バルブ、インスタントカップリング等の要素技術*
- ・熱交換器 (冷却) の設計*
- ・その他高温ループに要求される技術の開発
- ・流速、流量等の高温溶融塩に関わる計測技術の開発
- ・接続部 (ダイバータ高熱流束除熱体および溶融塩試験部に接続) の開発

溶融塩 (FLIBE) 強制循環ループユニットの基本性能・条件：

保守と実験を容易にする構造

可搬型

主要仕様：

作動流体：FLIBE

作動温度：500～600℃

供給流量：最大20 l/min

2-2. ダイバーター高熱流束除熱体の開発・研究・評価

溶融塩を用いた高熱流束除熱の新技术（ローフィン、高冷却効率など）の開発
(平成9年～10年)

ダイバーター高熱流束除熱体の開発、及び実験による実証と評価

(平成10年～11年)

2-3. 溶融塩試験部によるブランケット溶融塩技術の開発・研究・評価

溶融塩試験部を開発製作(平成10年～11年)

ブランケットの設計に必要な熱輸送、制御および材料健全性等の技術の開発実験
と評価(平成11年～12年)

3. 研究実施方法

- (1) 本実験装置は共同研究の期間中(平成9～11年度)は東北大学に設置し、研究・
開発項目2-1、2-2、2-3の研究を実施
- (2) LHDの設計、実験計画への反映：研究成果のデータベース

なお、LHDの運転が開始された後の平成12年以降に土岐の開発実験棟に移設し、
定常強磁場高電流プラズマ装置と接続し強磁場下の高温低圧液冷却媒体実験として、上
記の、2-2および2-3の開発、評価実験を継続実施する(平成12年度以降)。

4. 研究組織(平成9年6月現在)

			担当分野：3.
研究代表者：	東北大学工学部	教授 戸田三朗	(1、2、3)
所内責任者：	核融合科学研究所	助教授 相良明男	(1、2、3)
研究分担者：	東北大学工学部	助教授 橋爪秀利	(1、2)
	東北大学工学部	助教授 山崎浩道	(1、3)
	東京大学工学部	教授 田中 知	(3)
	東京大学工学部	助教授 寺井隆幸	(3)
	東北大学金属材料研究所	教授 松井秀樹	(3)
	核融合科学研究所	教授 本島 修	(1、2、3)
	その他		

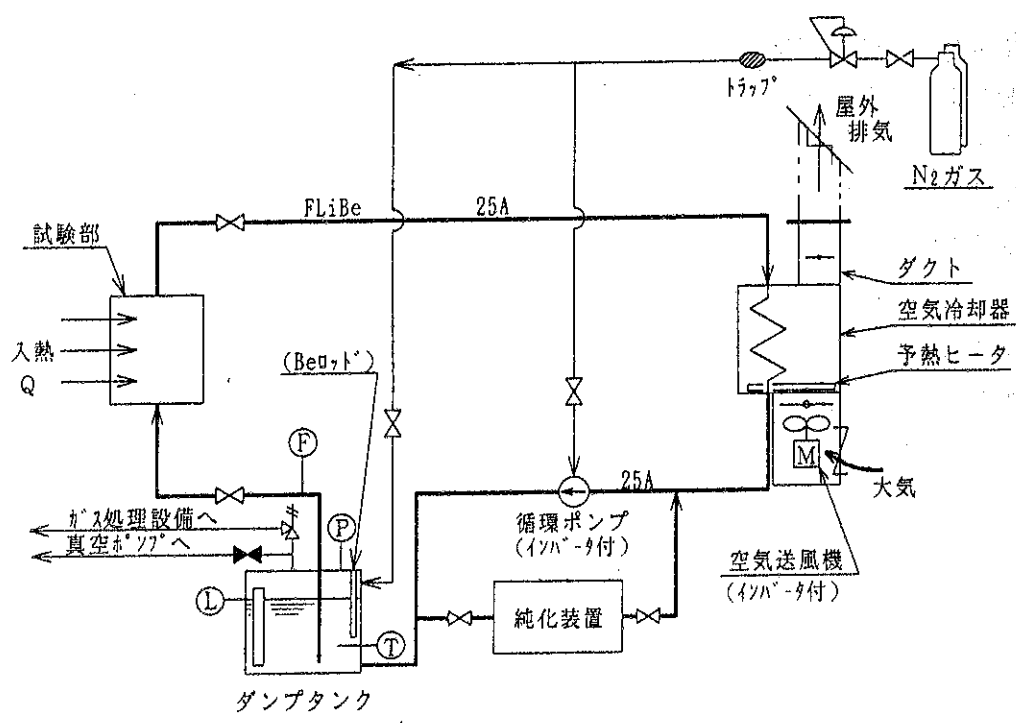
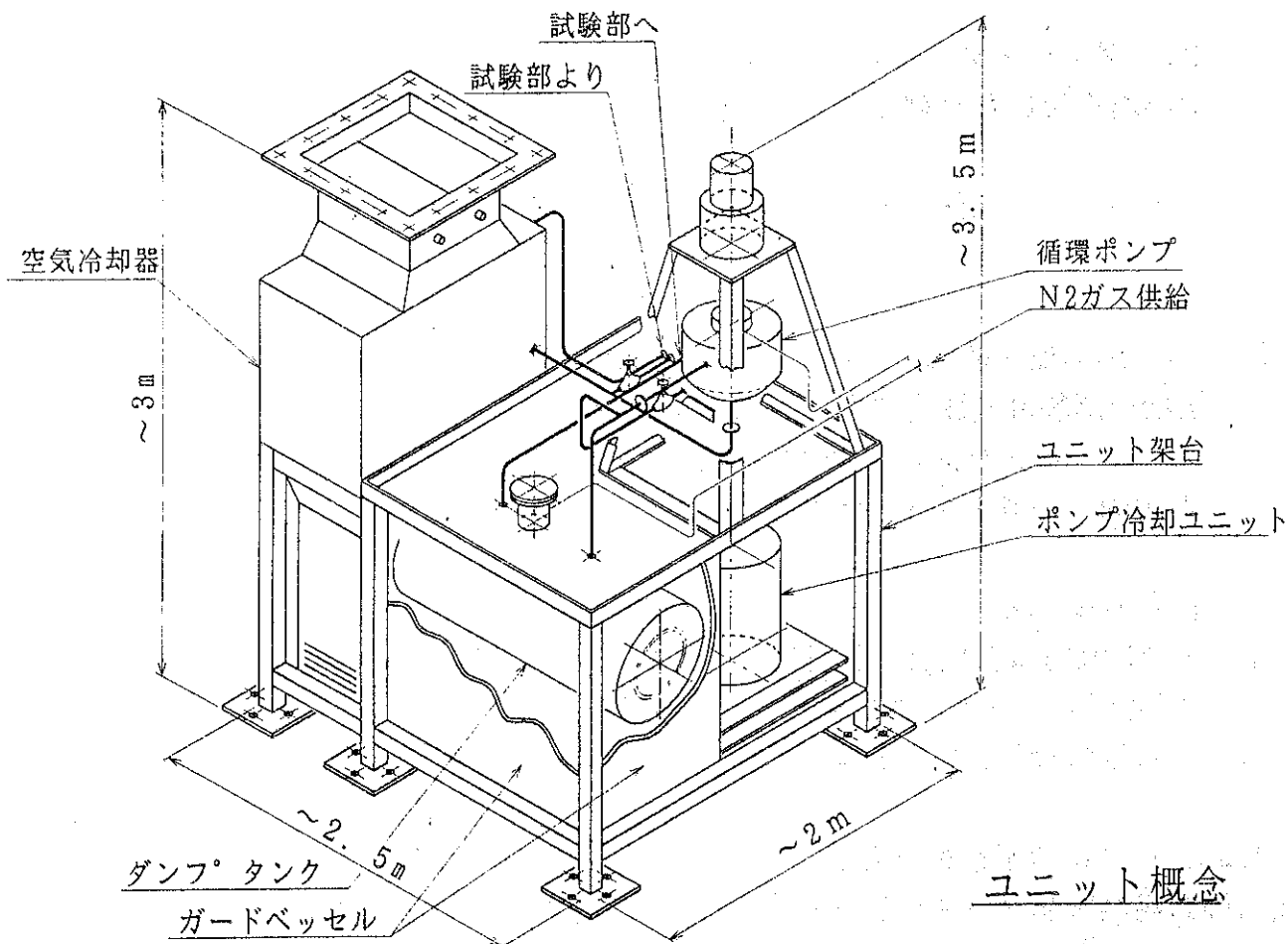
5. 研究経費(単位 千円)

平成9年～12年： 約20,000

主要備品内訳：

平成9年度	溶融塩(FLIBE)強制循環ループユニット
平成10年度	ダイバーター高熱流束除熱体**
平成11年度	溶融塩試験部**

**： 東北大学量子エネルギー工学専攻所属機械工場にて製作



主要目	
流 体	: FLiBe
最大流量	: 20 ℓ/min
最高使用温度	: 600°C
最高使用圧力	: 0.7MPa
材 質	: SUS316L

計測品記号説明	
(P)	: 圧力計
(T)	: 温度計
(F)	: 流量計
(L)	: レベル計

溶融塩強制循環ループ計画系統図

平成9年6月27日

高熱流束によるダイバータ板冷却特性評価

茨城大学工学部

奥 達雄

1. 最近の関連研究の概要

- 1) C/C複合材と無酸素銅との接合材の強度特性
- 2) C/C複合材と無酸素銅との接合材のジュール加熱による衝撃熱サイクル試験

2. LHD計画共同研究計画

- 1) 研究課題 高熱流束による材料損傷とダイバータ板冷却特性評価
- 2) 研究目的
- 3) 研究の具体的内容
設置予定の装置の概要
- 4) 実施方法
- 5) 研究組織

平成9年6月27日

高熱流束によるダイバータ板冷却特性評価

茨城大学工学部
奥 達雄

1. 最近の関連研究の概要

1) C/C複合材と無酸素銅との接合材の強度特性

CX-2002Uと無酸素銅とのチタンのみによる接合材について4点曲げ強度試験を実施した。その結果、良好な接合の場合ほとんど炭素複合材と同じ強度となり、接合部で破断した最低のもので約15MPaとなった。

2) C/C複合材と無酸素銅との接合材のジュール加熱による衝撃熱サイクル試験

核融合装置のプラズマ対向材衝撃熱負荷サイクルを模擬するため、C/C複合材と無酸素銅との接合材についてジュール加熱による熱衝撃サイクル試験を行った。その結果、表面の浸食、炭素繊維の酸化消失等が観察されたが、亀裂、剥離等は見られなかった。

2. LHD計画共同研究計画

1) 研究課題 高熱流束による材料損傷とダイバータ板冷却特性評価

2) 研究目的

本研究は、LHDのダイバータ板が局所的・瞬間的高熱流束を受けるため、その表面損傷の材料学的評価及び水冷却による定常冷却特性評価とバーンアウト熱流束を測定評価することを目的とする。

3) 研究の具体的内容

パルス状高熱負荷の繰り返し及び瞬時高熱負荷による材料表面の損傷評価と耐熱衝撃性及びバーンアウト熱流束の定量的な評価により、LHDのダイバータ板用材料の選定・寿命評価及び接合構造の健全性評価に役立てることができる。

繰り返し高熱負荷試験を可能にする電子ビーム加熱装置（最大出力30kW）を設計・製作し、前記の材料について、最大数75MW/m²（20x20mm²）の高熱負荷試験を行うとともに、種々の冷却条件におけるバーンアウト熱流束を測定評価する。

4) 実施方法

●平成9年度は、LHDにおいて想定される繰り返し高熱負荷及びその熱負荷条件に対応した非定常電子ビーム加熱装置用真空容器の設計及び排気系装置の購入整備を行う。同時に炭素・銅接合部の熱衝撃予備試験をACT等を用いて実施する。

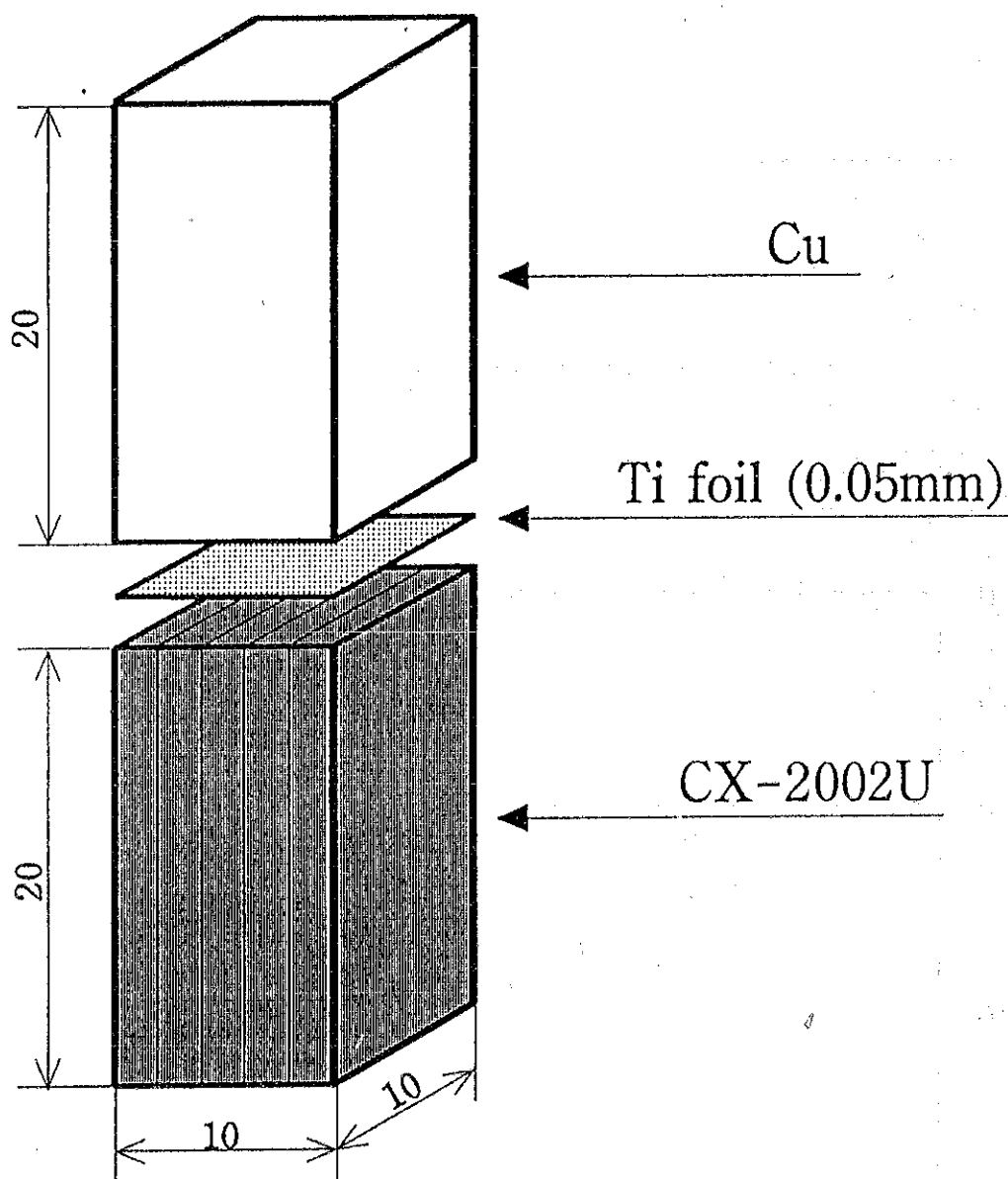
●平成10年度は、非定常電子ビーム加熱装置の設計・製作を行い、接合部を含む各種試験体について熱衝撃疲労試験を実施し、耐久性を評価する。同時に定常熱冷却特性を評価する。

●平成11年度は、バーンアウト試験用冷却系装置を設計製作し、バーンアウト試験を実施する。その装置を用いて、各種試験用材料及び強制冷却構造を有する試験体を製作し、繰り返し高熱負荷試験及びバーンアウト熱流束の測定評価を行う。

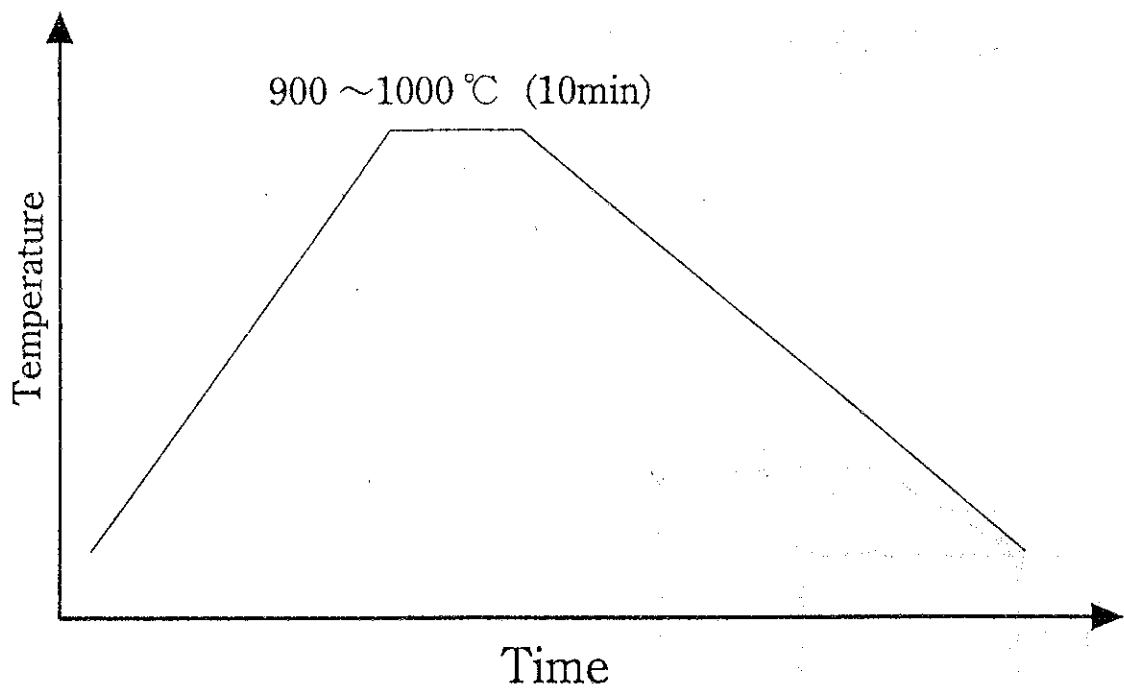
●平成12年度は、必要に応じて追加試験を行うとともに、総合的なプラズマ対向機器の健全性評価法をまとめる。

C/C複合材と無酸素銅との接合材の強度特性

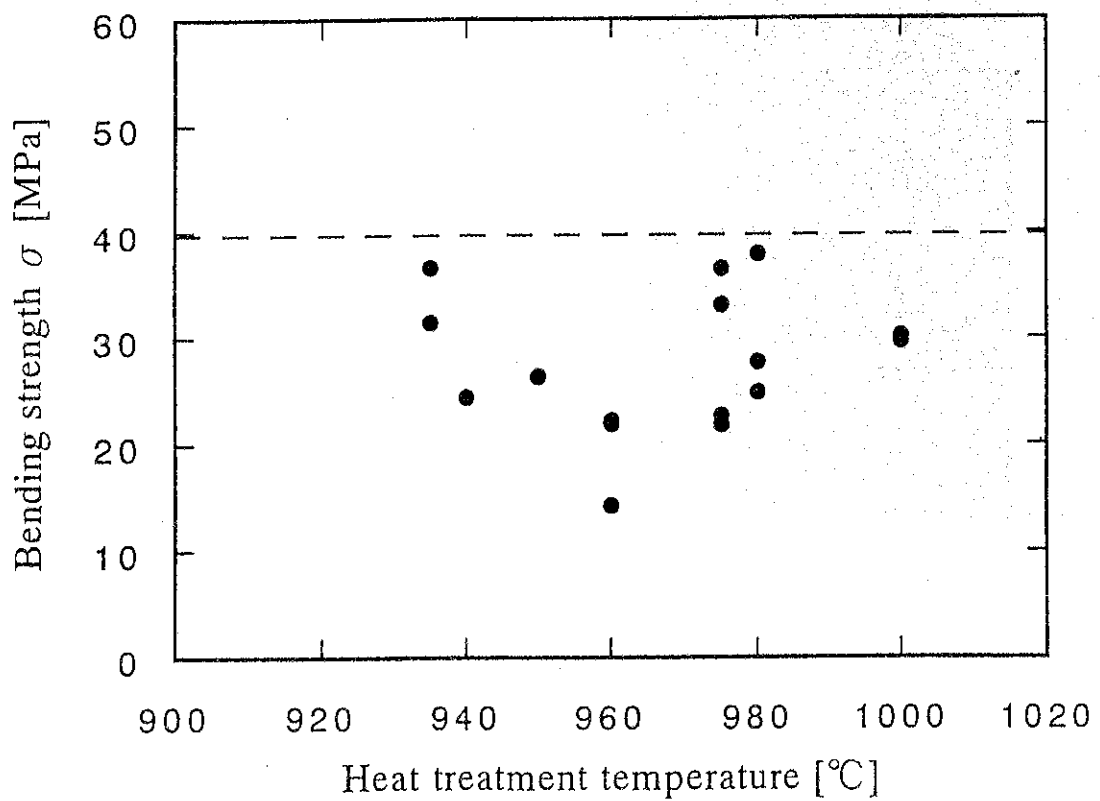
茨城大学工学部



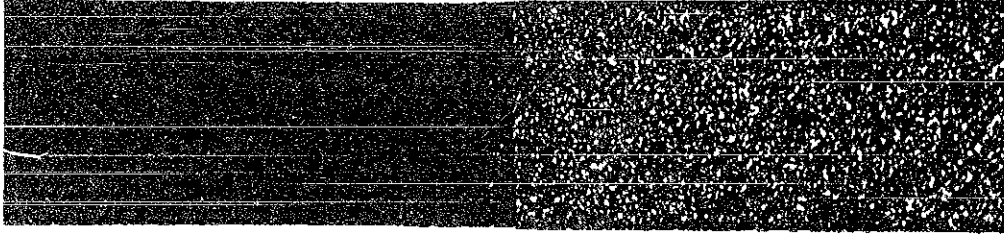
チタンによる接合材



接合材の熱処理過程

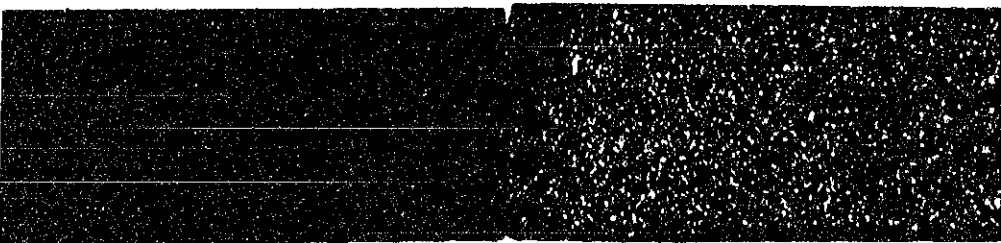
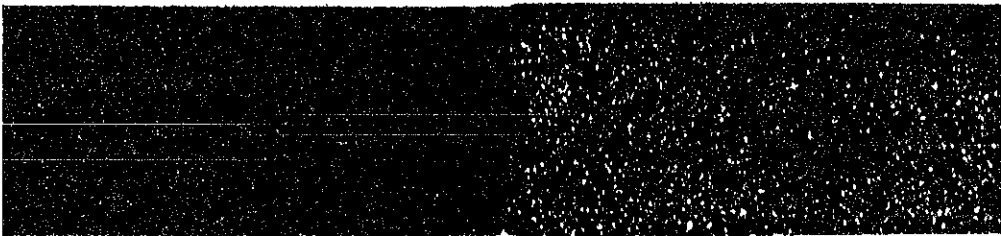


熱処理温度と曲げ強度の関係



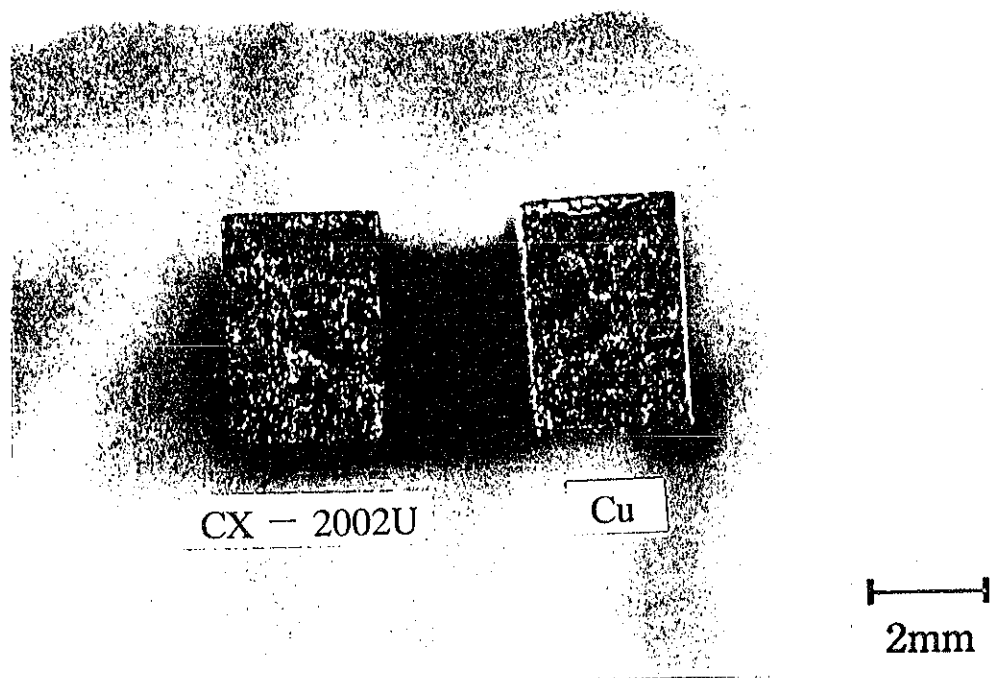
┌───┐
2mm

4点曲げ試験による接合部の破損状況
(母材 CX - 2002U における破損)



┌───┐
2mm

4点曲げ試験による接合部の破損状況
(接合面における破損)



接合面において破損した場合の破断面

C/C複合材と無酸素銅との接合材の ジュール加熱による衝撃熱サイクル試験

茨城大学工学部

核融合装置のプラズマ対向材の衝撃的熱負荷サイクルを模擬するため、C/C複合材と無酸素銅との接合材について、ジュール加熱による熱衝撃サイクル試験を行った。

供試材料：接合部に銅、鋼、銅、モリブデン板、銅、鋼、銀のフィルムをインサートしたC/C複合材と無酸素銅の接合材
(CX-2002U/Cu：東洋炭素（株）製造)

試験片形状：20×20×40 mm

加熱条件：C/C複合材側の表面をφ20 mmの黒鉛電極によりジュール加熱し、無酸素銅側から水冷銅ブロックにより冷却
(流速：φ8 mm, 1.8 m/s)

加熱電力4.5kW (熱負荷：14.3MW/m²) のジュール加熱
加熱周期1min. (5sec加熱後55sec冷却) を100サイクル

C/C複合材の表面近傍 (表面から0.5 mm) の温度 : 117℃~360℃
接合部近傍のC/C複合材側(接合部から0.5 mm)温度 : 117℃~300℃
モリブデン板の温度 : 112℃~194℃
接合部近傍の無酸素銅側 (接合部から0.5 mm) 温度 : 107℃~192℃
無酸素銅の表面近傍 (表面から0.5 mm) 温度 : 103℃~172℃

試験結果：C/C複合材の表面にジュール加熱によるエロージョンを観察
加熱中心部のフレーク状の再付着炭素を観察
加熱周辺部の炭素繊維の酸化消耗を観察
接合部の熱応力き裂及び剥離き裂は観察されず
接合部の微細組織の変化は観察されず

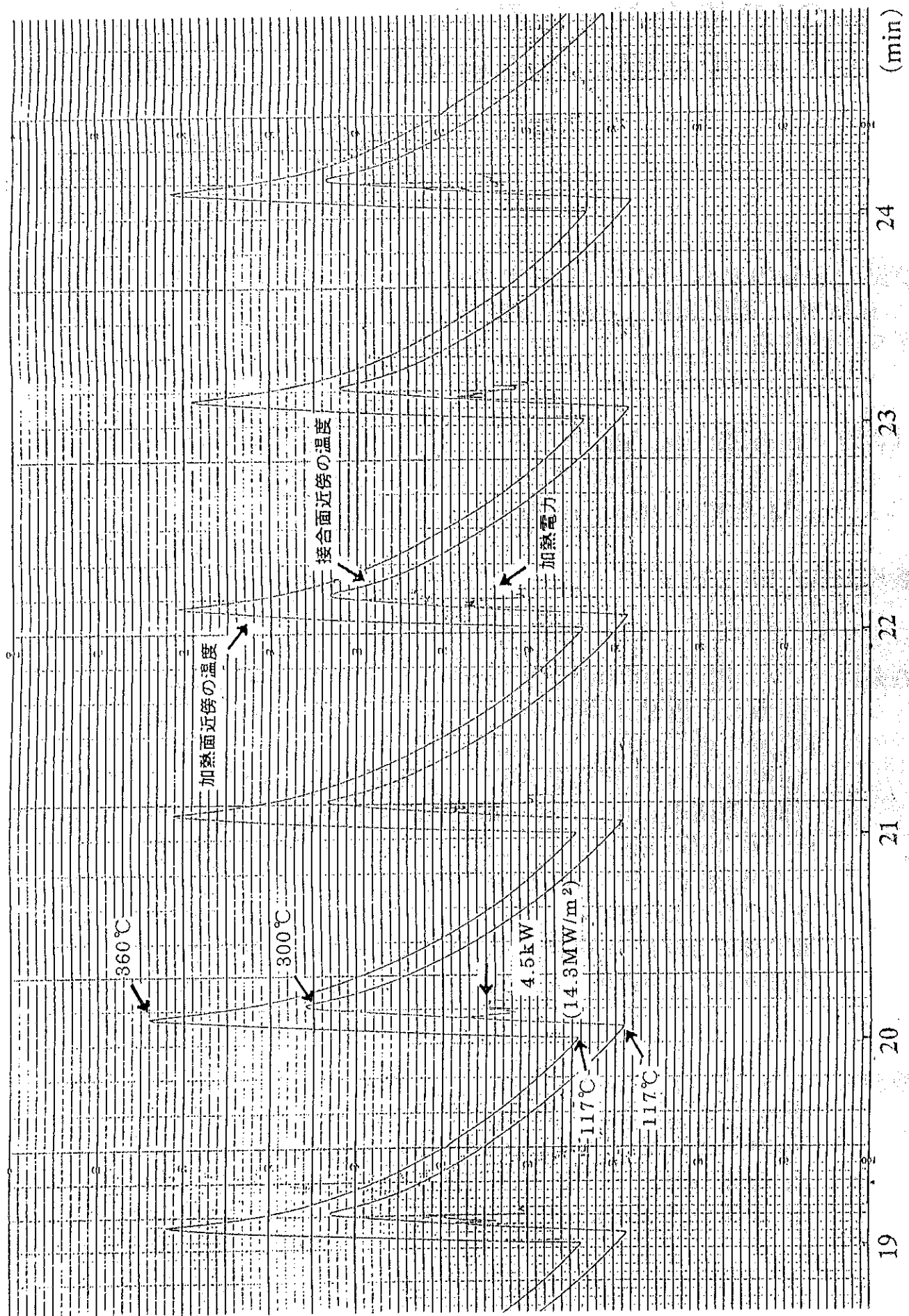


図 ジュール加熱による熱衝撃サイクル試験

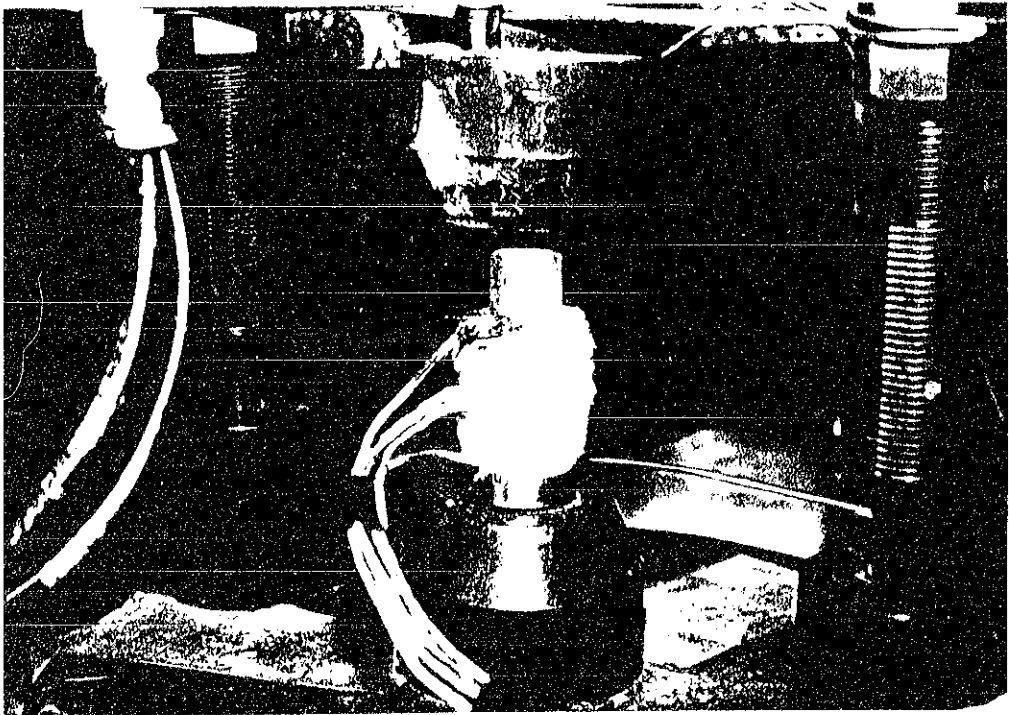
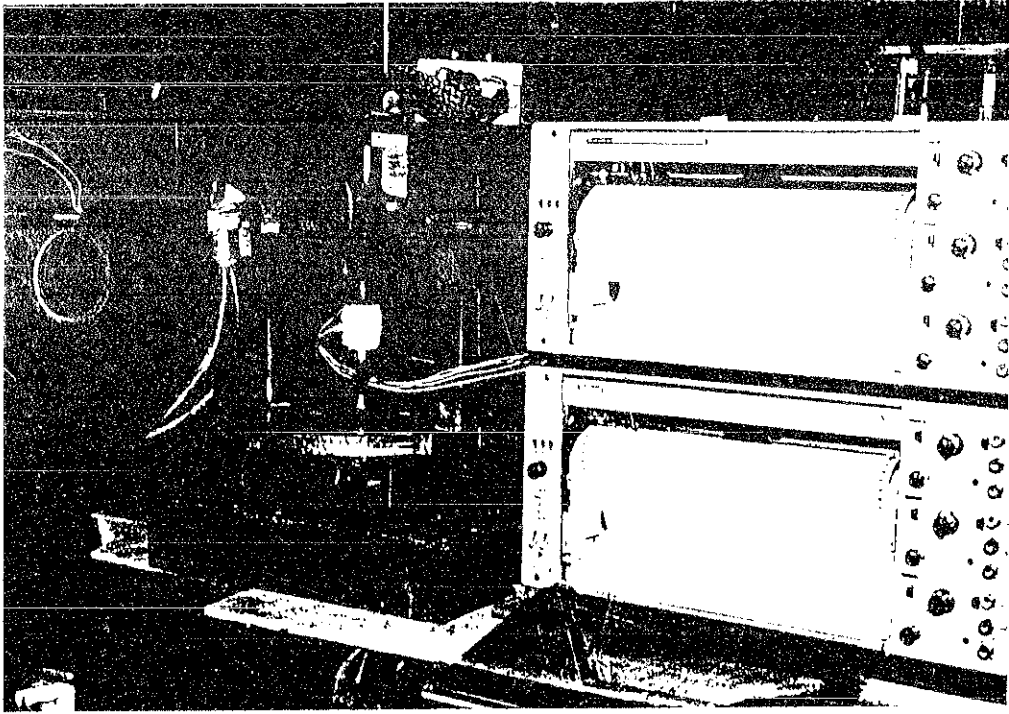


写真 ジュール加熱による熱衝撃サイクル試験.

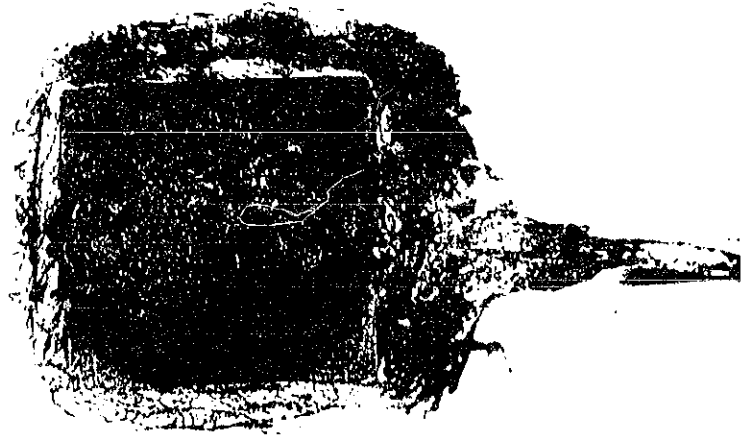
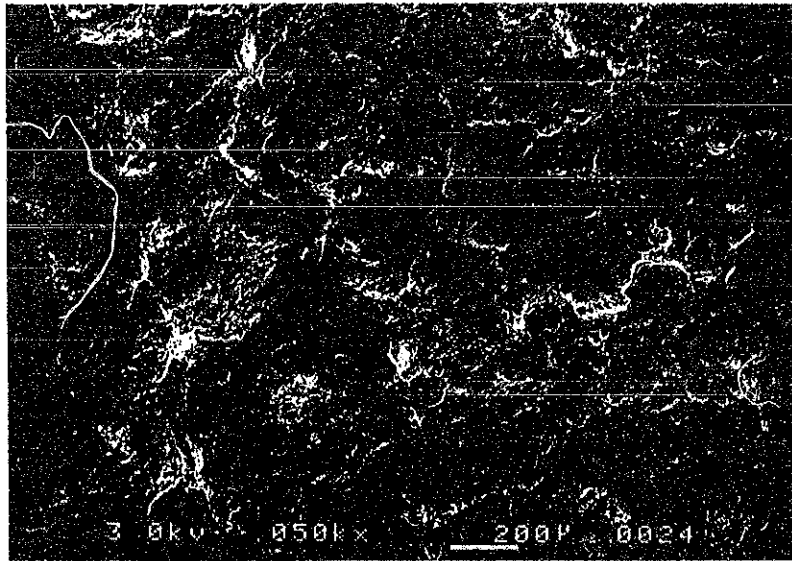
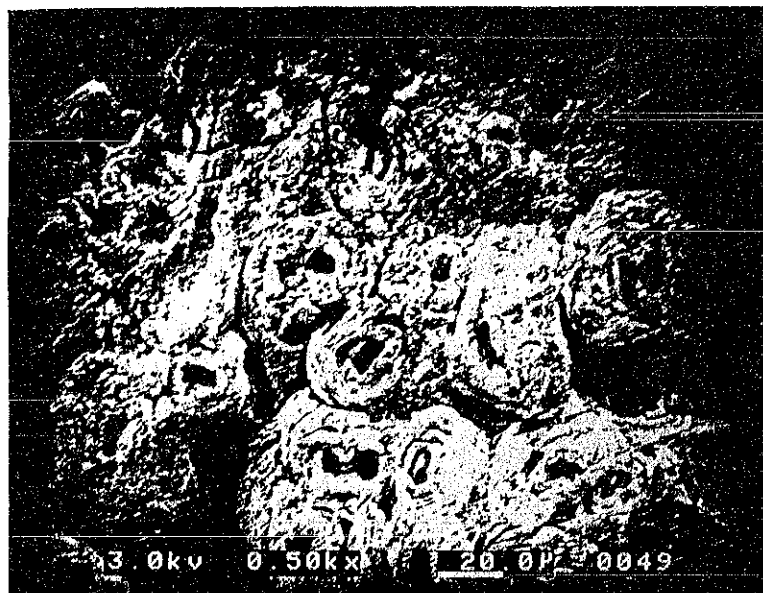


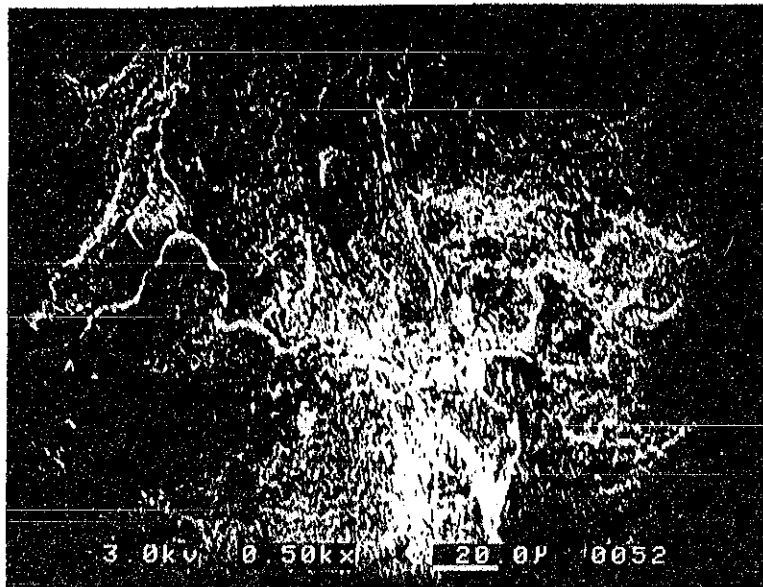
写真 熱衝撃サイクル試験後のC/C複合材表面.



(a) general view.

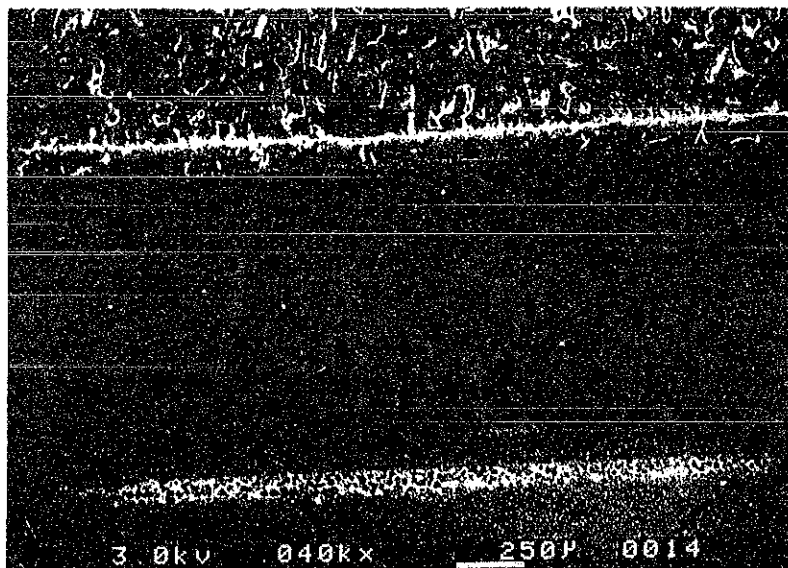


(b) circumferential part of heating area.

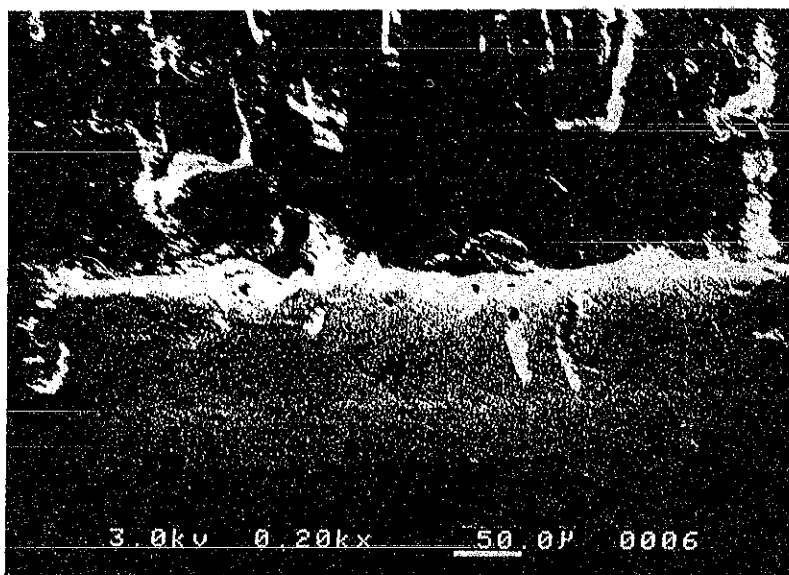


(c) center of heating area.

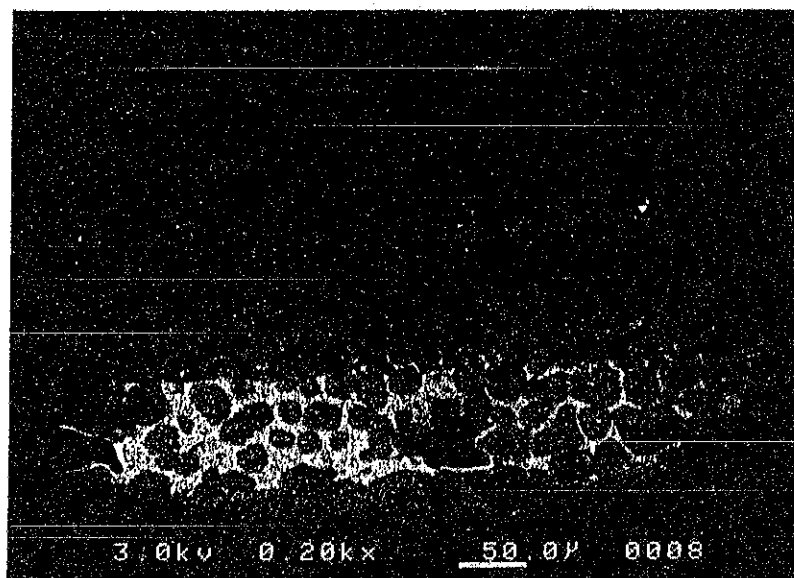
写真 ジュール加熱による熱衝撃サイクルを受けた面の組織



(a) general view.



(b) joining part of C/C composite and molybdenum.



(c) joining part of molybdenum and copper.

写真 ジュール加熱による熱衝撃サイクル後の接合部

LHD計画共同研究

高温プラズマ熱粒子制御法

高熱流束・冷却（茨城大学工学部：奥 達雄）(H9-H12)

1.研究課題

高熱流束による材料損傷とダイバータ板冷却特性評価

2.研究目的

本研究は、LHDのダイバータ板が局所的・瞬間的高熱流束を受けるため、その表面損傷の材料学的評価及び水冷却による定常冷却特性評価とバーンアウト熱流束を測定評価することを目的とする。特に、Active Cooling Teststand (ACT) では実施できない2点照射高熱負荷疲労試験及びバーンアウト熱流束の測定評価を行う。また、各種プラズマ対向材料の表面の性状及び力学特性の変化を測定評価し、それら特性変化とバーンアウト熱流速との関連を究明することにより、ダイバータ板の寿命評価に役立てる。

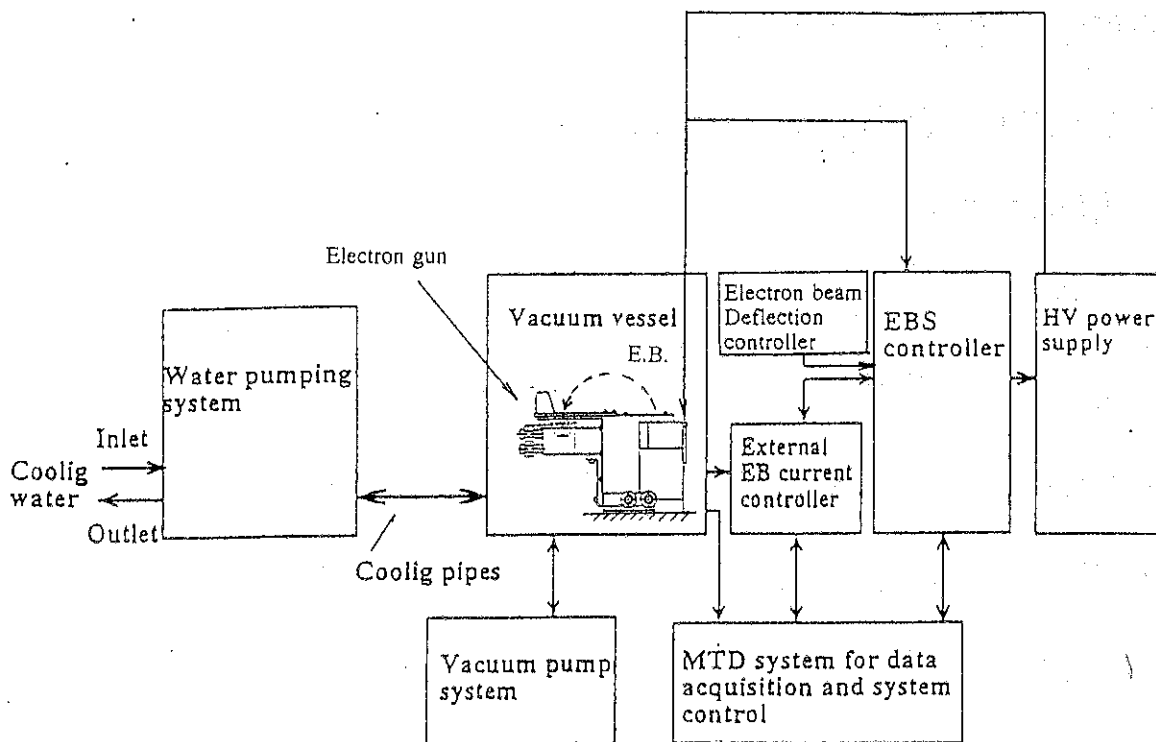
装置概要

非定常電子ビーム加熱装置の主な仕様

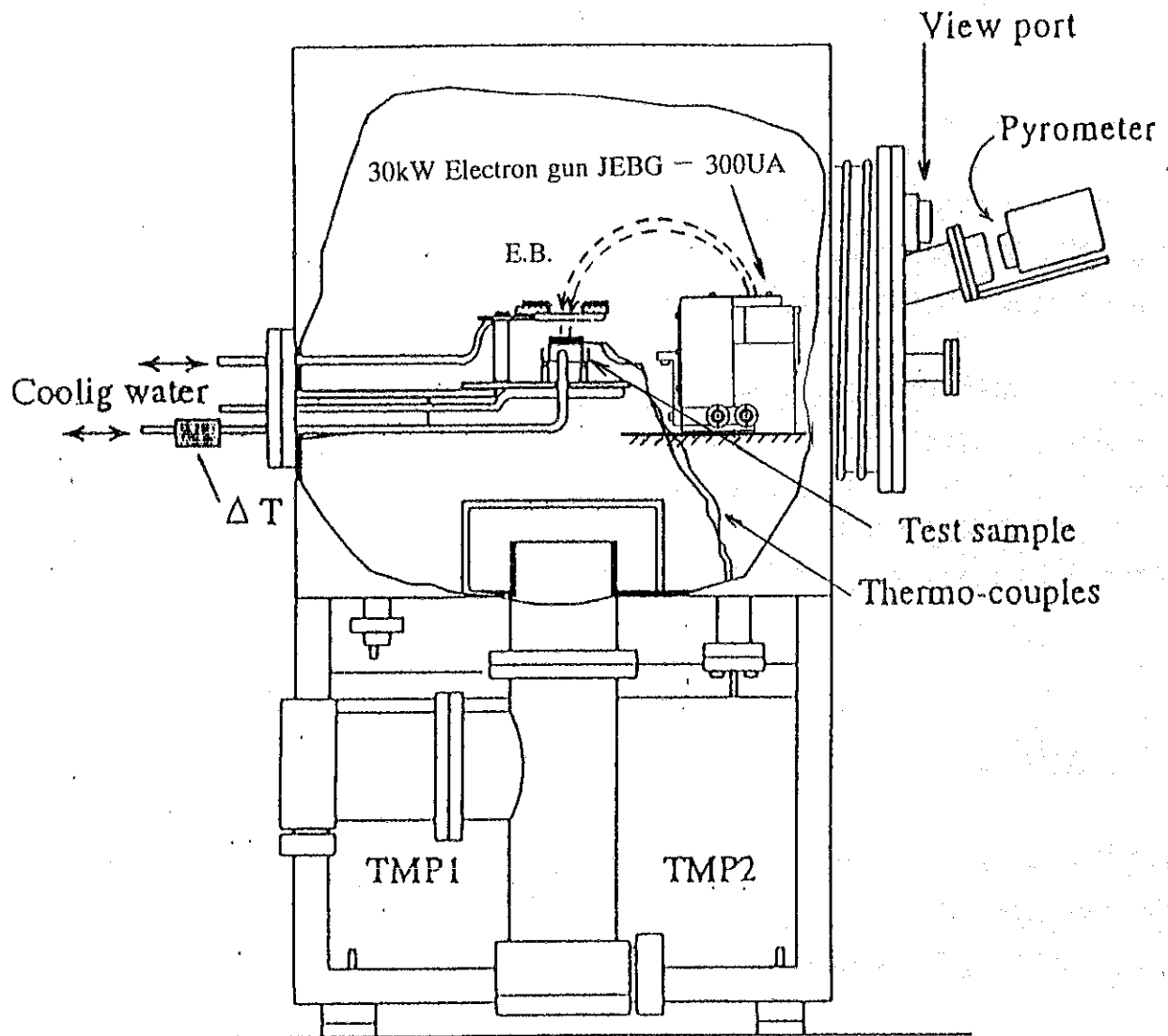
- ・出力：最大30kW(15kV, 2A)
- ・電子ビーム走査幅：最大振幅±25mm
- ・走査周波数：最大50 (X) x 500 (Y) Hz
- ・ビームの照射面積：50 X 50mm²
- ・2点間に熱負荷を与えることができる。
- ・A点からB点までの移動時間：50m s e c
- ・A点からB点までの移動距離：160mm (中心～中心)
- ・照射時間：外部信号及び設定時間 (5～60秒) に設定が可能。
- ・加熱部の温度計測及び熱負荷エネルギーを計測できる。(～3000℃)
- ・各種形状の冷却構造物について電子ビーム照射を可能にする構造。

ACTとの相違点：

- ①附属の電子ビーム偏向制御装置により、2点位置に、2点照射及び高熱負荷繰り返し試験が可能。
- ②独自の冷却系の設計・製作により、バーンアウト熱流束が測定可能。
- ③EBパワーの立ち上がり時間が早い。(30 kWまで約3秒/ACTは約20秒)



熱衝撃用電子ビームシステムブロック図



熱衝撃用電子ビームシステム概観図

3.研究の具体的内容

●パルス状高熱負荷の繰り返し及び瞬時高熱負荷による材料表面の損傷評価と耐熱衝撃性及びバーンアウト熱流束の定量的な評価により、LHDのダイバータ板用材料の選定・寿命評価及び接合構造の健全性評価に役立てることができる。

●対象材料は微粒等方性黒鉛材料、炭素繊維／炭素複合材料、炭素／銅複合材料、炭素／炭化ケイ素複合材料などの炭素系材料及びその複合材料、ならびに炭化ケイ素／炭化ケイ素複合材料を取り上げる。また、ダイバータの構造はロウ付及び機械的接合構造等が考えられるため、両接合方法の比較検討を行うとともに、接合部の健全性評価及び接合層の物性変化の測定評価を行う。

●繰り返し高熱負荷試験を可能にする電子ビーム加熱装置（最大出力30 kW）を設計・製作し、前記の材料について、最大数 $75\text{MW}/\text{m}^2$ ($20 \times 20\text{mm}^2$) の高熱負荷試験を行うとともに、種々の冷却条件におけるバーンアウト熱流束を測定評価する。さらに、冷却構造を有するプラズマ対向機器の試験体を作製し、冷却構造及び冷却条件を総合的に検討し、プラズマ対向機器の健全性を評価する。

4.実施方法

●平成9年度は、LHDにおいて想定される繰り返し高熱負荷及びその熱負荷条件に対応した非定常電子ビーム加熱装置用真空容器の設計及び排気系装置の購入整備を行う。同時に炭素・銅接合部の熱衝撃予備試験をACT等を用いて実施する。

●平成10年度は、非定常電子ビーム加熱装置の設計・製作を行い、接合部を含む各種試験体について熱衝撃疲労試験を実施し、耐久性を評価する。同時に定常熱冷却特性を評価する。

●平成11年度は、バーンアウト試験用冷却系装置を設計製作し、バーンアウト試験を実施する。その装置を用いて、各種試験用材料及び強制冷却構造を有する試験体を製作し、繰り返し高熱負荷試験及びバーンアウト熱流束の測定評価を行う。

●平成12年度は、必要に応じて追加試験を行うとともに、総合的なプラズマ対向機器の健全性評価法をまとめる。

5.研究組織（メンバーについては変更の可能性有り）

研究代表者：茨城大学工学部	教授	奥 達雄
所内責任者：核融合科学研究所	助手	久保田雄輔
研究分担者：茨城大学工学部	教授	友田 陽
茨城大学工学部	講師	今村 好男
茨城大学工学部	助手	車田 亮
九州大学応用力学研究所	助手	徳永 和俊
九州大学応用力学研究所	教授	吉田 直亮
北海道大学工学部	助手	藤田 一郎
北海道大学工学部	教授	山科 俊郎
北海道大学工学部	教授	日野 友明
京都大学原子エネルギー研	教授	塩津 正博
京都大学原子炉実験所	助教授	三島嘉一郎
核融合科学研究所	助手	坂本 隆一
核融合科学研究所	助教授	相良 明男
核融合科学研究所	教授	野田 信明
核融合科学研究所	助教授	小森 彰夫
核融合科学研究所	教授	本島 修

定常強磁場中の第一壁 コンディショニング法の研究

名古屋大学 工学部 豊田浩孝

研究代表者 名大工 菅井秀郎、高村秀一
所内責任者 鈴木肇、相良明男、大藪修義

はじめに

LHDにおけるPSI関連の諸問題

- ・ダイバータ領域中での粒子・熱の輸送過程や原子分子過程の解明
- ・強磁場中で作動する高効率の水素排気装置開発
- ・定常磁場中でのコンディショニング法の開発

周辺プラズマ、ダイバータプラズマと壁との相互作用の模擬実験

LHDの特徴

超伝導による定常磁場・定常プラズマ

定常・強磁場・高密度のテストプラズマ装置の必要性



定常強磁場プラズマ発生装置(SPP)

概要

定常強磁場プラズマ発生装置(SPP)

- ・装置概要
- ・準備状況
- ・予定研究内容

壁コンディショニング技術の基礎実験

磁場中におけるボロニゼーション
リチウムコンディショニング

定常強磁場中の第一壁コンディショニング法の研究

研究代表者 名大工

菅井秀郎、高村秀一

所内責任者

鈴木肇、相良明男、大藪修義

定常超伝導磁場による閉じ込めを行うLHDでは、定常プラズマであることや超伝導磁場を用いることに起因するプラズマ・表面相互作用に関連する問題や課題がある。一つの例として、定常プラズマに耐えることのできるダイバータ材料の開発や、ダイバータ領域中での粒子・熱の輸送や原子分子過程の解明があげられる。また、強磁場中で作動する高効率の水素排気装置の開発や、定常磁場中でのコンディショニングの開発もテーマとなっている。これらの問題や課題を実験的に調べるために、周辺プラズマやダイバータプラズマと壁との相互作用を模擬する実験装置が計画されている。本講演では、現在準備を行っている新しいプラズマ・壁相互作用実験装置「定常強磁場プラズマ発生装置；Steady State High Field Plasma Production Device 略してSPP」の概要と現在の準備状況について報告する。また、この装置を用いて実験が計画されている定常磁場中でのコンディショニング実験について、現在の研究の状況を報告する。

1. 定常強磁場プラズマ発生装置(SPP)の概要と準備状況

SPPはダイバータプラズマを模擬した直線型プラズマ発生装置であり、定常強磁場(1T)で高密度プラズマ($5 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$)をヘリコン波プラズマで発生させることを特徴としている。この装置の開発は4年計画であり、96-97年度をR&Dに、99年度までを設計製作および立ち上げに予定している。これまでに、定常1T強磁場の実現可能性の検討をおこない、またプラズマ発生用のRF電源(13.56MHz, 10kW)の準備、プラズマ生成部(RFアンテナおよび発生部プラズマ容器)の製作を完了している。まもなく、プラズマ生成の実験が開始される。

2. 定常磁場中でのコンディショニング実験

LHDでのボロナイゼーションなどの壁コンディショニングにおいては、定常磁場とコンディショニングの簡便性の両立が重要であり、これを念頭に置いた磁場中コンディショニングの基礎実験が進められている。ここではヘリウム希釈したデカボランを材料ガスとして、ECRプラズマを用いた磁場中ボロナイゼーションをおこなっている。容器内部でのボロン膜厚の分布測定を行った結果、膜堆積に寄与する粒子には中性及びイオンの活性粒子があることが示された。また、中性粒子による寄与がガス導入口近傍に局在しているのに対しイオンは磁力線に沿ってプラズマ下流方向に運ばれるため、ガス導入口より遠く離れた場所においても膜堆積が認められることが判った。これは、LHDにおける磁化プラズマを用いたボロナイゼーションがダイバータ領域の選択的なコンディショニングに有効であることを示唆している。

さらにリチウムを用いたコンディショニングの基礎実験も進められており、講演においてはリチウムの水素吸収および脱離特性についても言及する。

定常強磁場プラズマ発生装置(SPP)の装置概要

SPP : Steady state high field Plasma Production device

- (1) ダイバータを模擬した、直線型プラズマ発生装置
- (2) 定常強磁場 (最大 1 T)
- (3) ヘリコン波によるプラズマ生成
水素プラズマにおいて $n_e > 5 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$
- (4) プローブ付ターゲット

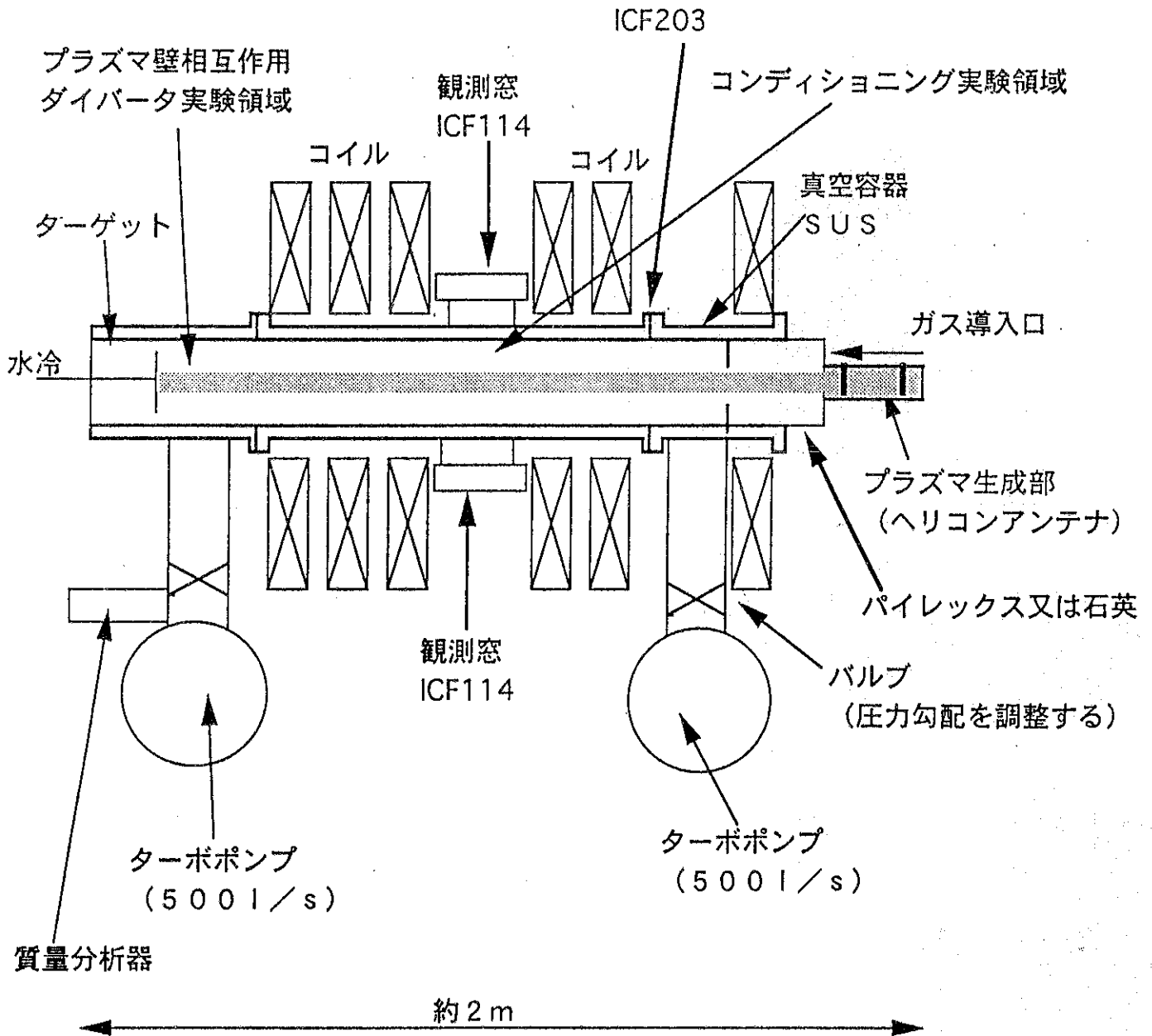
立ちあげ計画

- R&D (1996-1997年度) :
プラズマ生成部(TPDを利用)
- 設計製作 (1996-1999年度) :
放電管と強磁場コイル
- 立ちあげ (1998-1999年度)

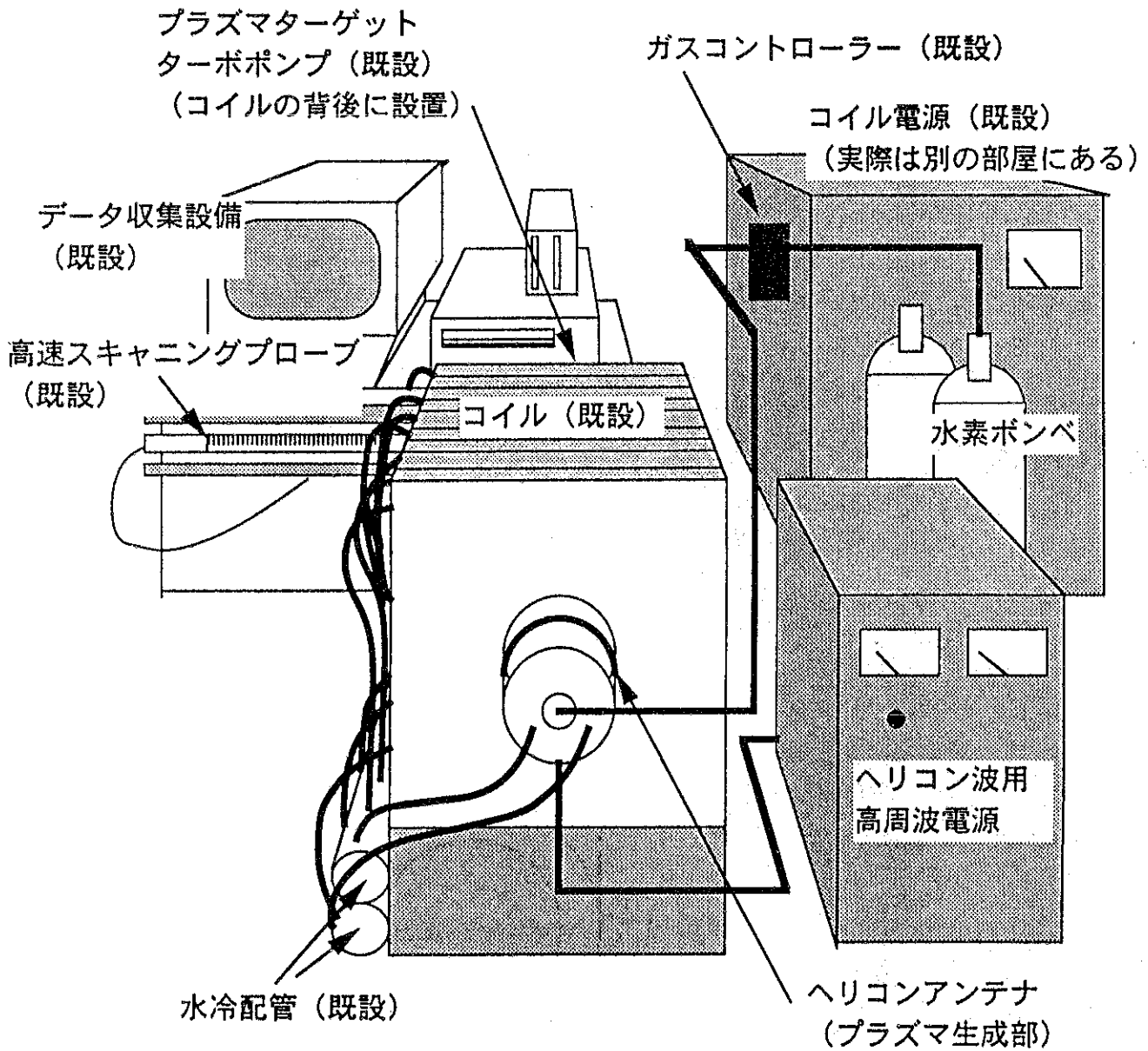
平成 8 年度の実施状況

- (1) 定常 1 T 磁場の実現可能性の検討
水冷式銅コイルにより実現可能を確認
- (2) プラズマ生成部の製作
(ガラス管、ヘリカルアンテナ $m=0$)
- (3) プローブ付ターゲットの製作
- (4) RF電源の購入
電源 13.56MHz 10kW、整合器付

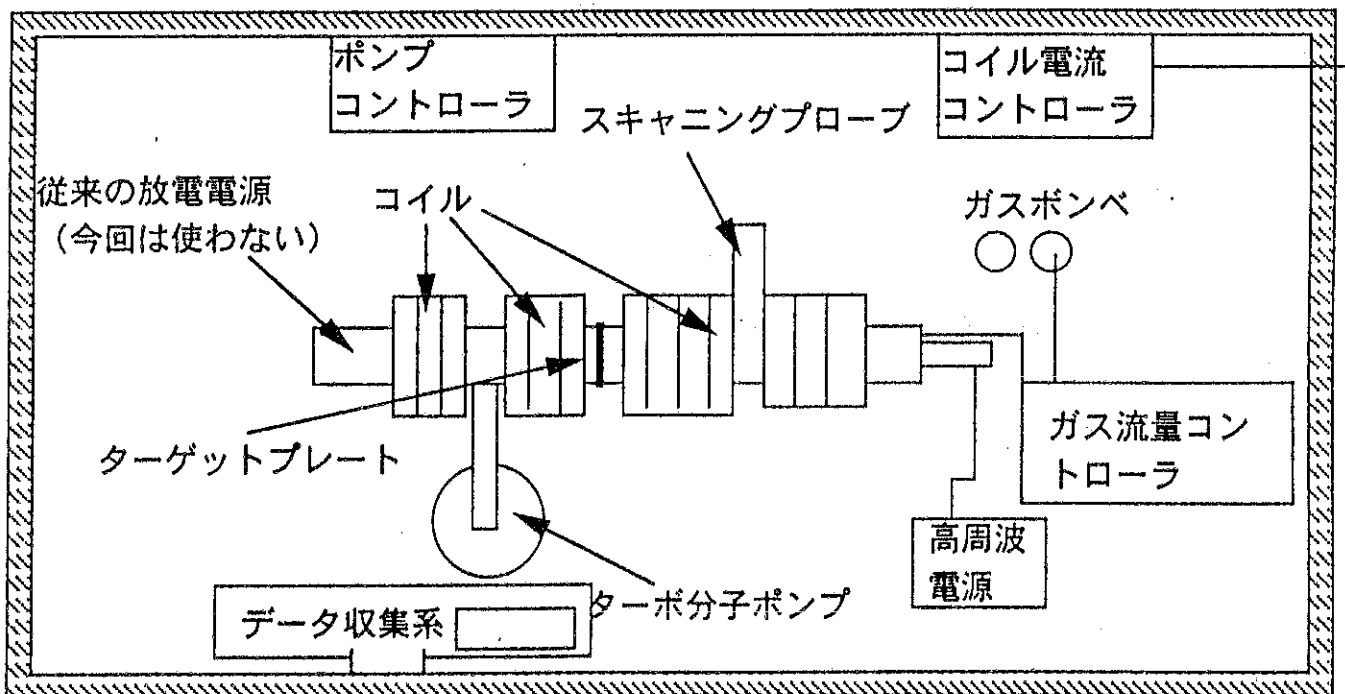
定常強磁場プラズマ発生装置案

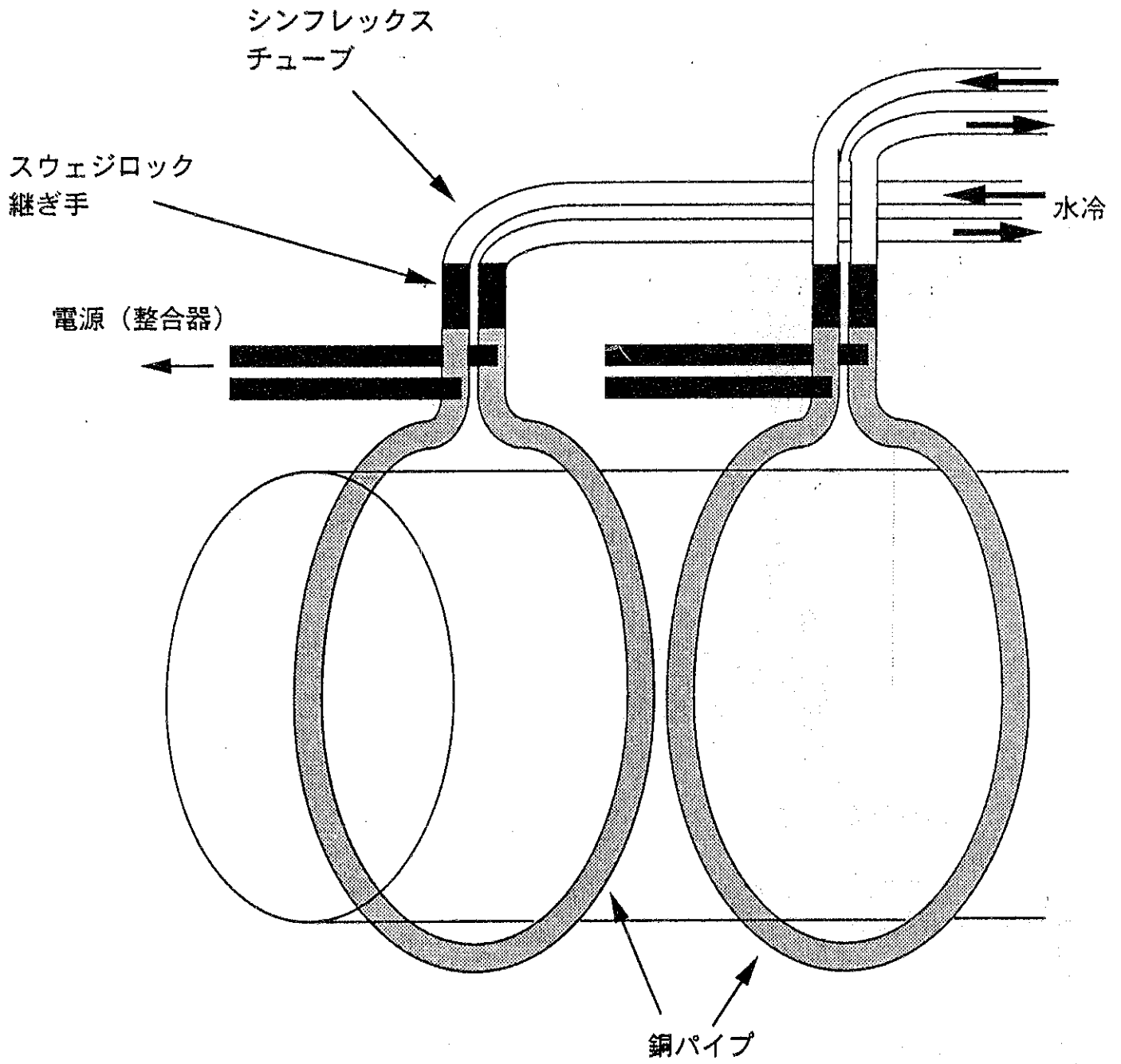


- ・ 磁場はコンディショニング実験領域で約 1 T
- ・ ガスは水素、ヘリウム、アルゴン等
- ・ コイルの数、真空容器、最大加熱パワーは、後の増強を考慮する。
- ・ 標準的な計測器は、真空系と質量分析器を備える。
- ・ 真空度は、 10^{-7} Torr を目指す。コンフラットフランジの使用によって、ベーキングを可能とする
- ・ 二台のポンプを使うことで、圧力勾配をつけることを可能とする。
- ・ その他、様々な実験に対応できるように、柔軟性を持った装置にデザインする。



TPD-Iを用いたヘリコン型水素プラズマR&Dシステム





水冷式ヘリコンアンテナ ($m=0$)

壁コンディショニングの基礎実験

1. 磁場中におけるボロナイゼーション実験

LHDにおけるボロナイゼーション



超伝導磁場

コンディショニングの簡便性

の両立

磁化プラズマによるコンディショニング

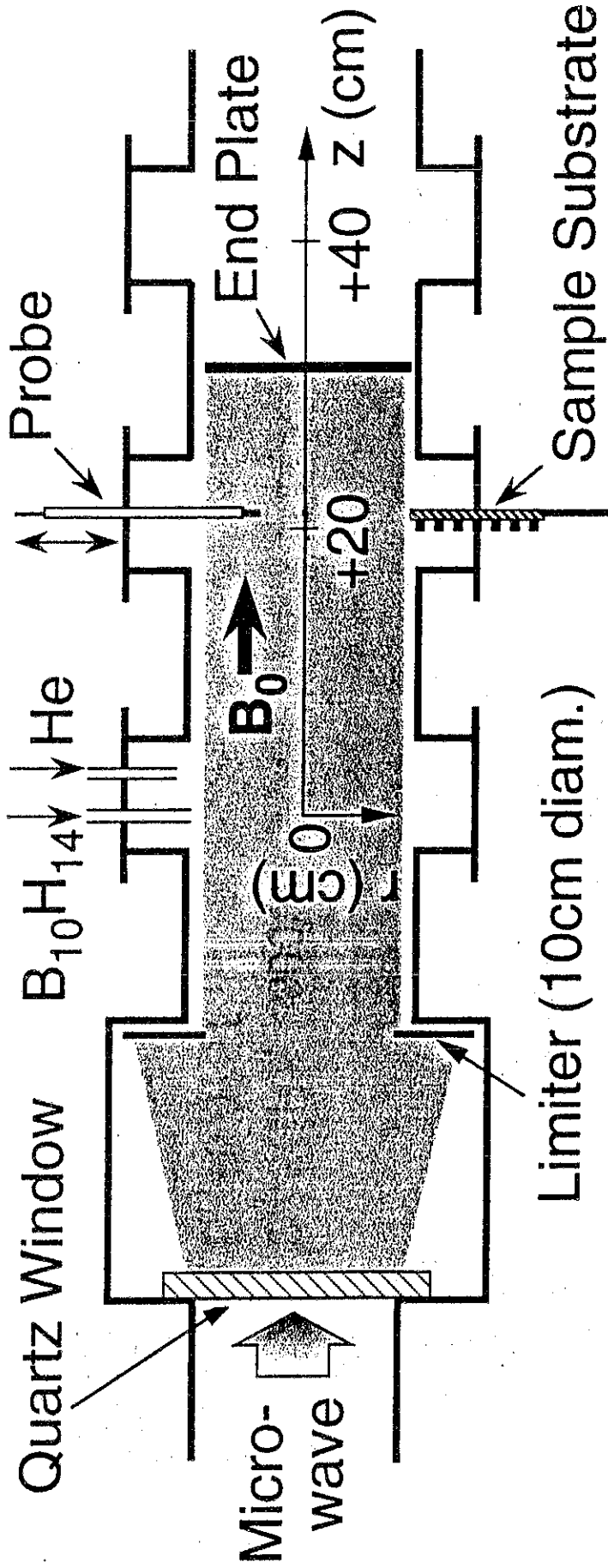
高密度プラズマによるガスの解離過程
イオン種の輸送・膜堆積への寄与
膜質への影響

直線磁化プラズマ装置を用いた基礎実験

磁場の影響 ?

膜の分布

ECRプラズマ装置



実験条件

マイクロ波 : 2.45GHz, <600W

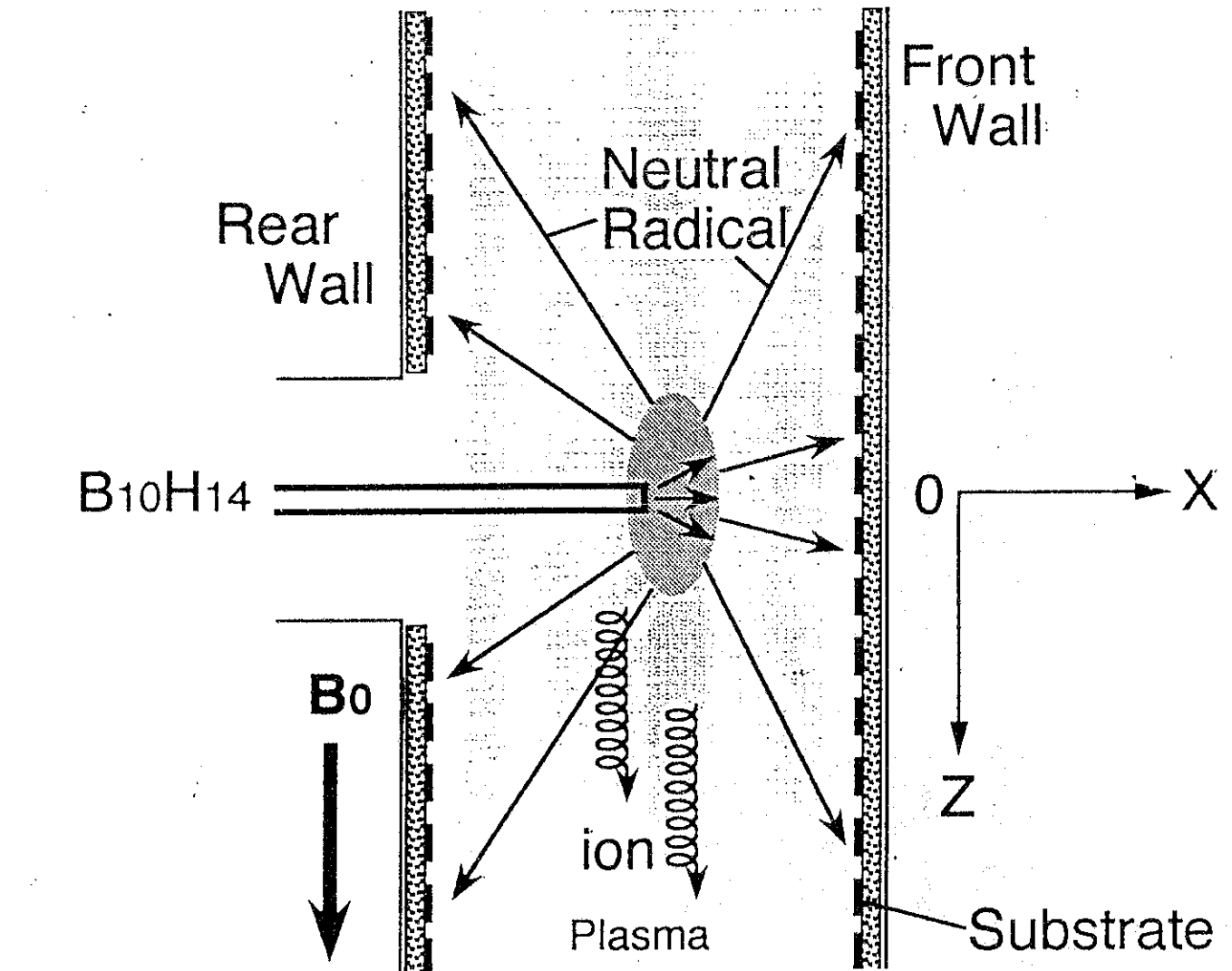
磁場 : $B_0 = 0.075T$

ガス : He 0.21Pa, $B_{10}H_{14}$ 0.015Pa

プラズマ・パラメータ

$n_e = 2 \sim 3 \times 10^{17} m^{-3}$

$T_e < 6eV$



Ionic species

- transported along B_0

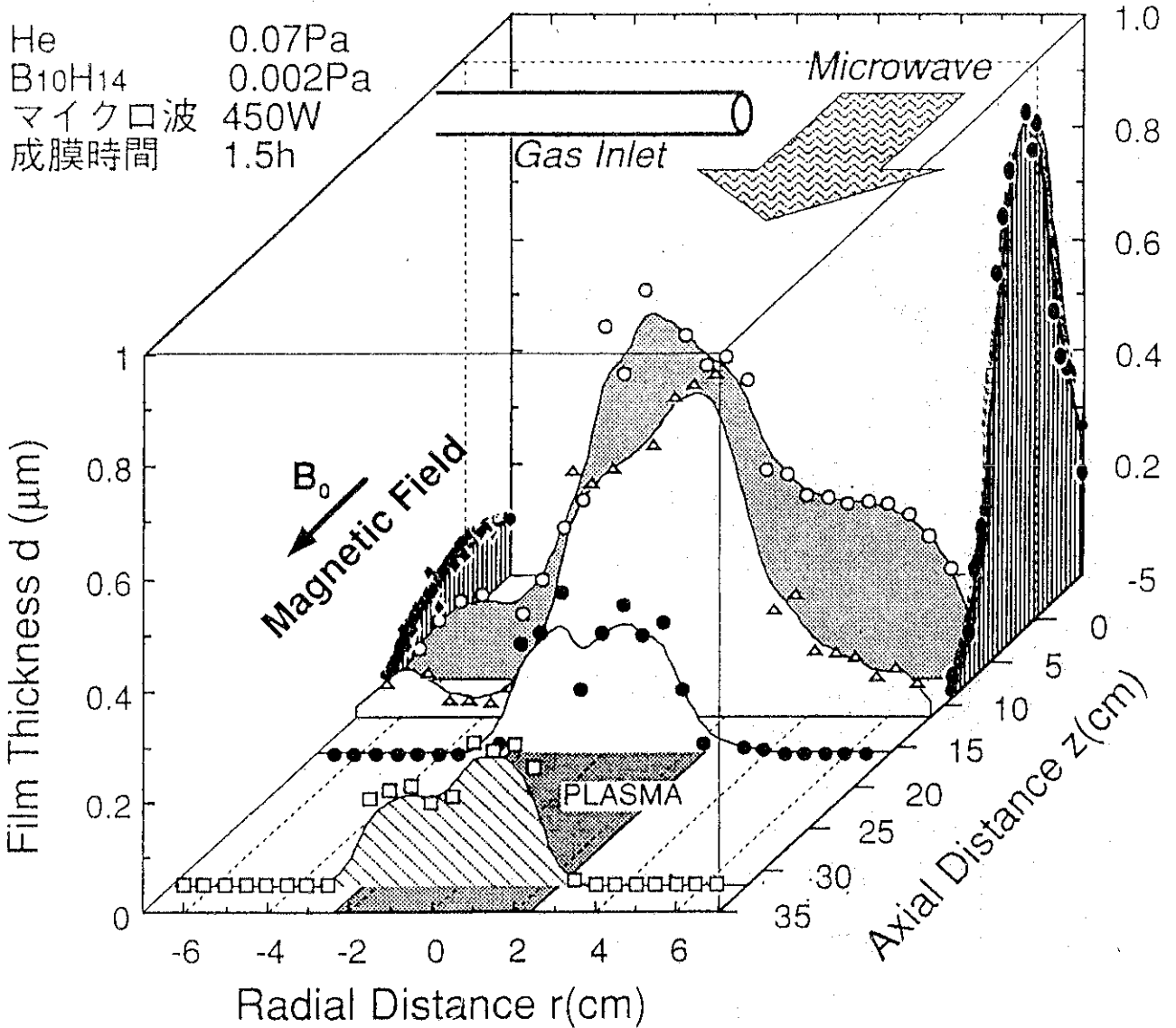
→ *slow decrease*
in Z direction

Neutral species

- diffuse isotropically

→ *strong decrease*
in Z direction

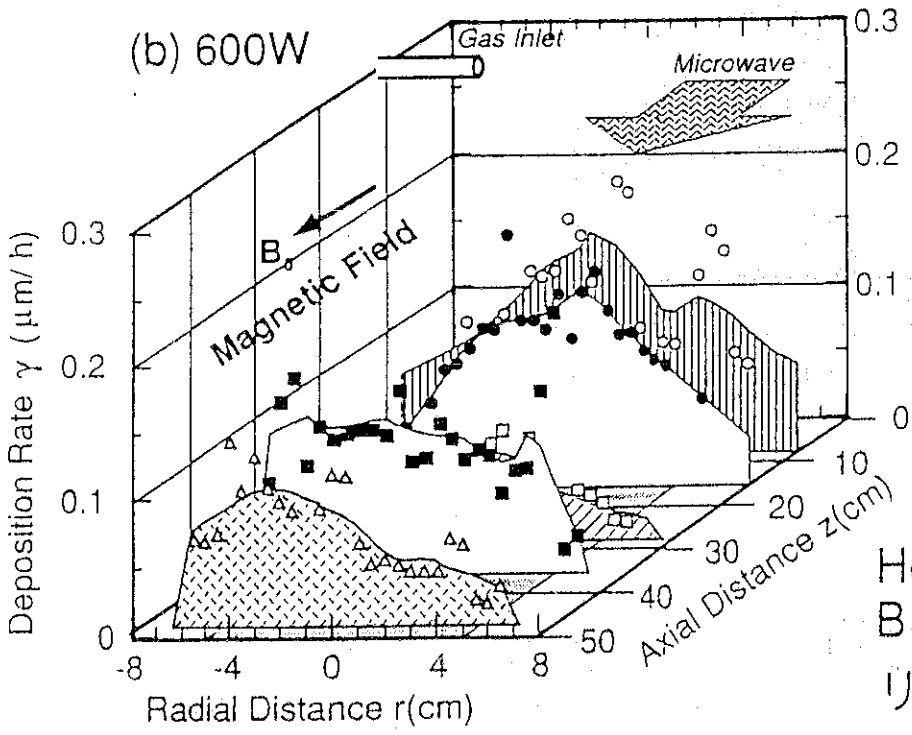
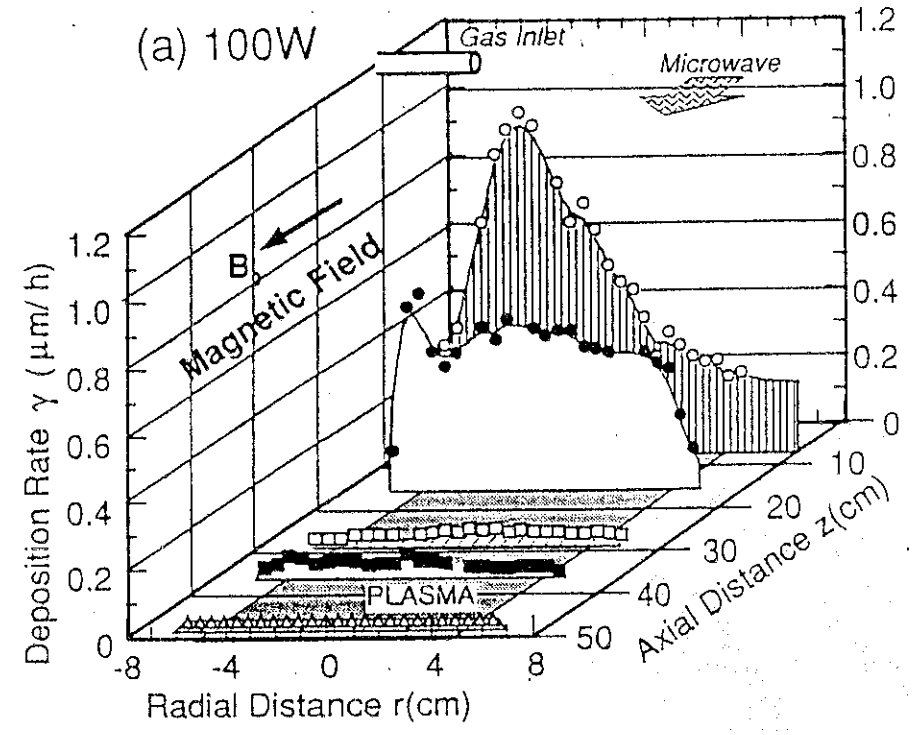
膜厚の空間分布



ガス導入口付近 . . . 急激な減衰
 ➔ 中性ラジカルが主に成膜に寄与

磁力線方向 . . . ゆっくりと減衰
 ➔ イオンが主に成膜に寄与

成膜速度空間分布の マイクロ波パワー依存



マイクロ波パワー増加

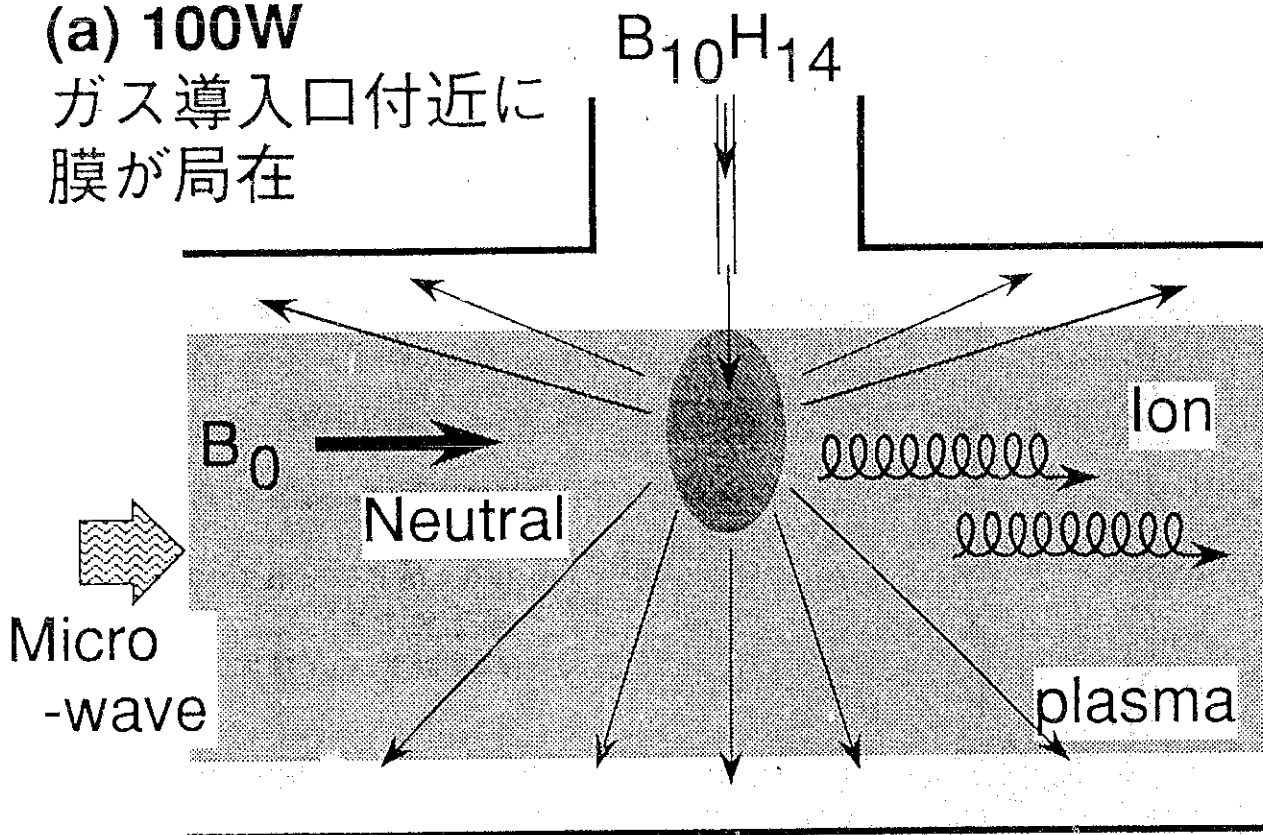


イオンによる磁力線方向の成膜速度の増加

解離・イオン化モデル図

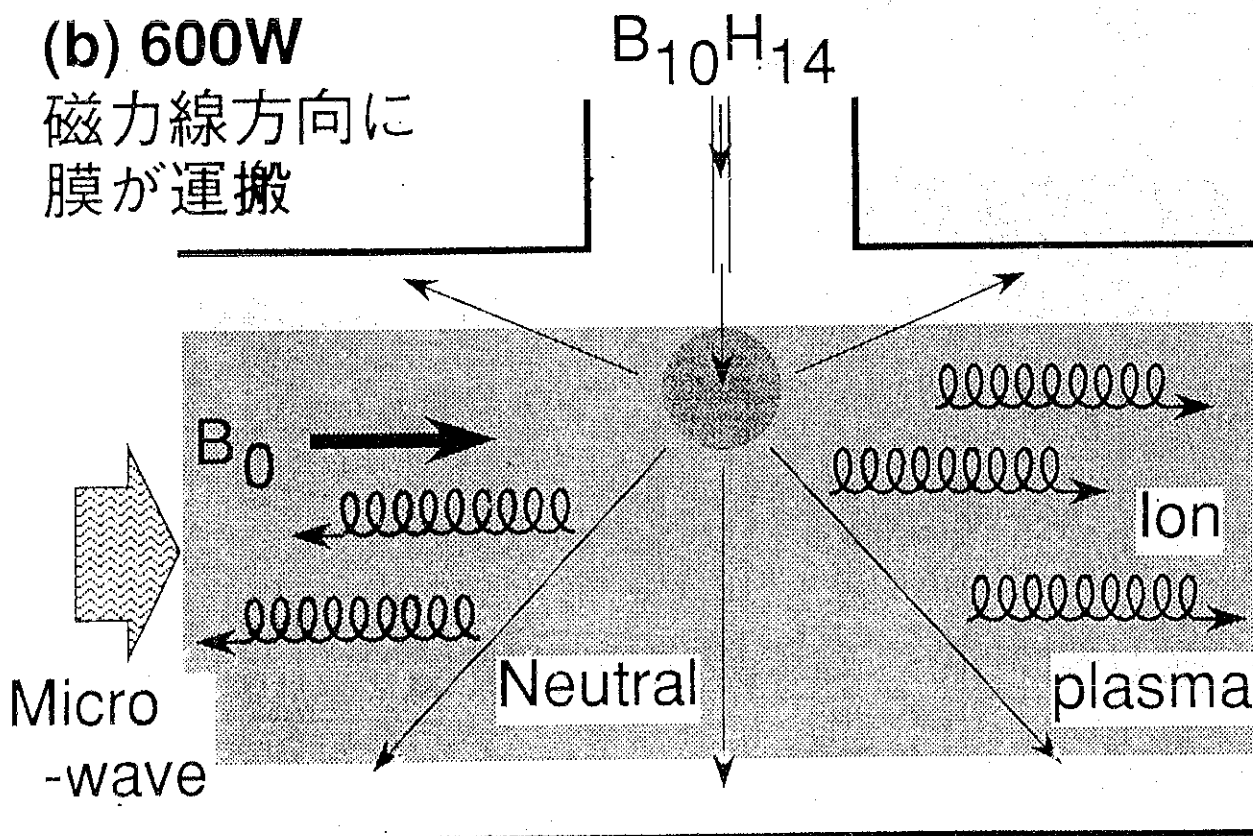
(a) 100W

ガス導入口付近に
膜が局在



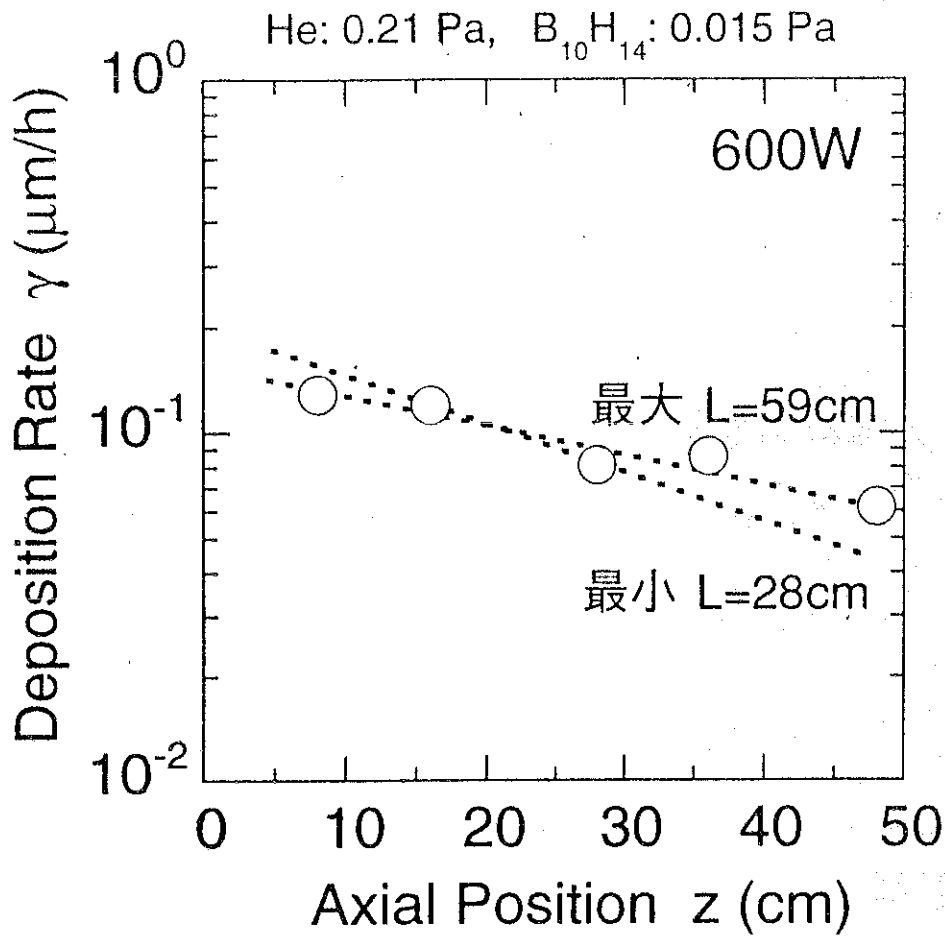
(b) 600W

磁力線方向に
膜が運搬



電子衝突の増加 ➡ イオン化率上昇

ボロンの膜厚分布 (磁力線方向)



イオンの拡散束

$$nv = -D_{//}\nabla_{//}n - D_{\perp}\nabla_{\perp}n$$

粒子保存

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\nabla \cdot (nv)$$

定常状態において

$$n = n_0 J_0(k_{\perp}r) e^{-z/L}$$

磁力線方向への膜厚分布の特性長

$$L = \sqrt{\frac{D_{//}}{D_{\perp}}} \left(\frac{a}{2.40} \right)$$

研究課題

第一壁における燃料粒子のリサイクリングと不純物の発生・輸送

(研究代表者 名古屋大学工学 森田健治)

研究目的

プラズマ対向壁の材料を換えれば、壁から放出される粒子のエネルギー分布やそのエネルギー状態が大きく変化する。壁からプラズマへ放出あるいは侵入する粒子として、燃料粒子および、スパッタリング等により発生する不純物粒子があるが、それらはいずれもエネルギーをもっており、場合によっては高い励起状態(例えばイオン)であったりする。それ故、これらの粒子がどのようなエネルギー状態にあり、またどのような速度分布で放出されてくるかによって、その後の運動については周辺プラズマに大きな影響を与えるはずである。しかし実際にプラズマ装置でこのような壁からの放出粒子の速度分布や、エネルギー状態はほとんど測定されていないだけでなく、周辺プラズマでのその後の燃料および不純物粒子の運動を空間的広がりをもって検出した例は皆無に近い。特に高Z材については実験室レベルでのイオン・固体相互作用あるいはプラズマ・表面相互作用においてすらこのような研究あるいは基礎的なデータが不足しており、ITERダイバータの設計を難しくしている。

本共同研究ではまず実験室レベルで粒子がどのようなエネルギー状態にあり、またどのような速度分布で放出されてくるか測定できるようにし、基礎的データを蓄積した後、実際にLHDにおいてそのような測定研究を行い、ヘリカルシステムに於けるプラズマ・壁相互作用を明らかにすると共に、高Z材がLHDに適応可能かどうかについての検討を行うものである。

研究組織

研究代表者：名古屋大学工学部	教授	森田健治		
所内責任者：核融合科学研究所	教授	室賀健夫		
研究分担者：名古屋大学工学部	助教授	曾田一雄	助手	柚原淳司
		名古屋大学理工科学総合研究センター		
	教授	田辺哲朗	助教授	武藤俊介
	助手	吉田朋子		
徳島大学工学部	助手	大宅 薫		
福岡教育大学	助教授	大後忠志		
核融合科学研究所	教授	本島 修	教授	野田信明
	助手	井上徳之	助手	増崎 貴

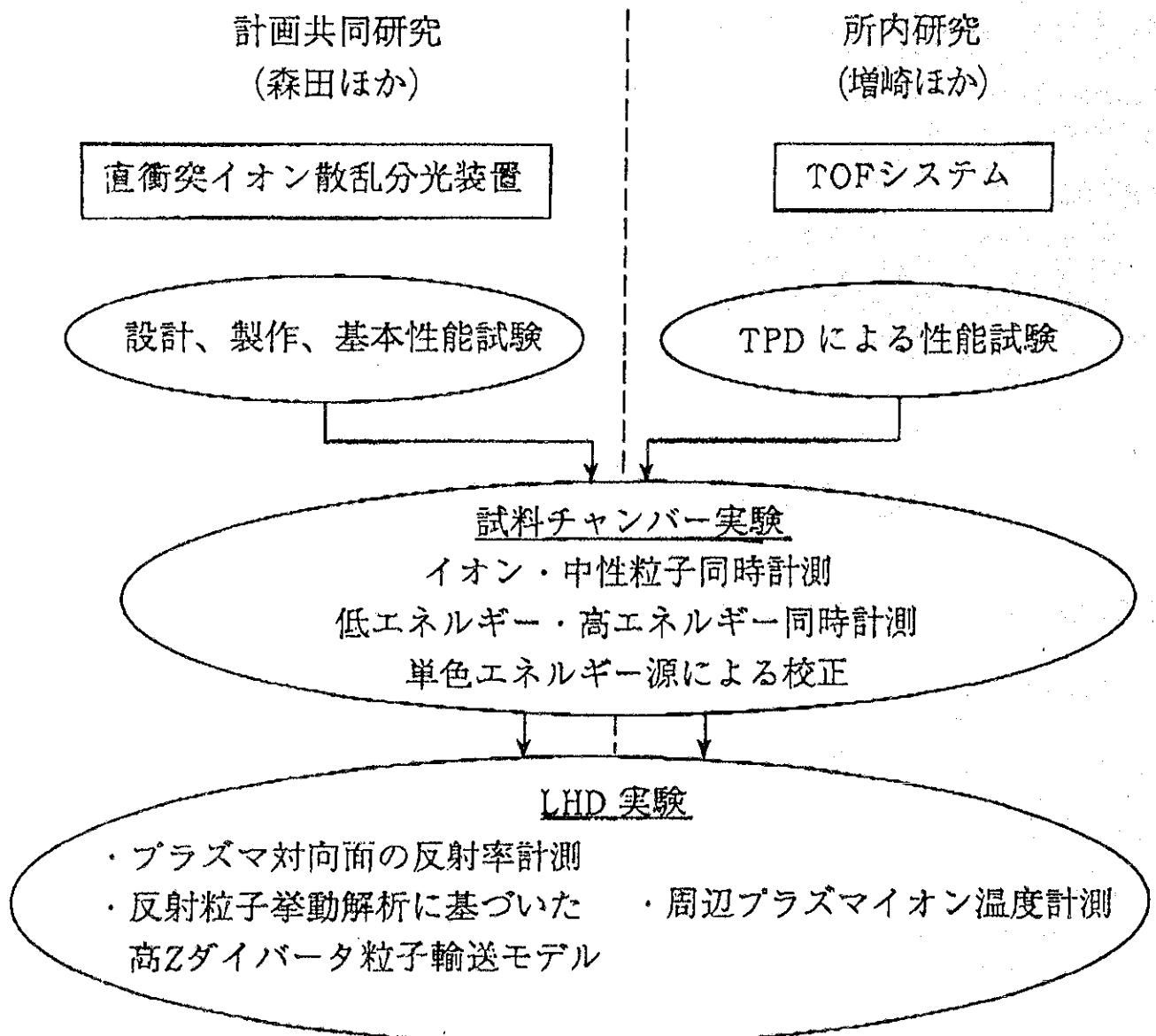
主要設備：直衝突イオン散乱分光装置：反射イオンおよび中性粒子のエネルギー分布をTOFにより測定する装置

年度別実施計画

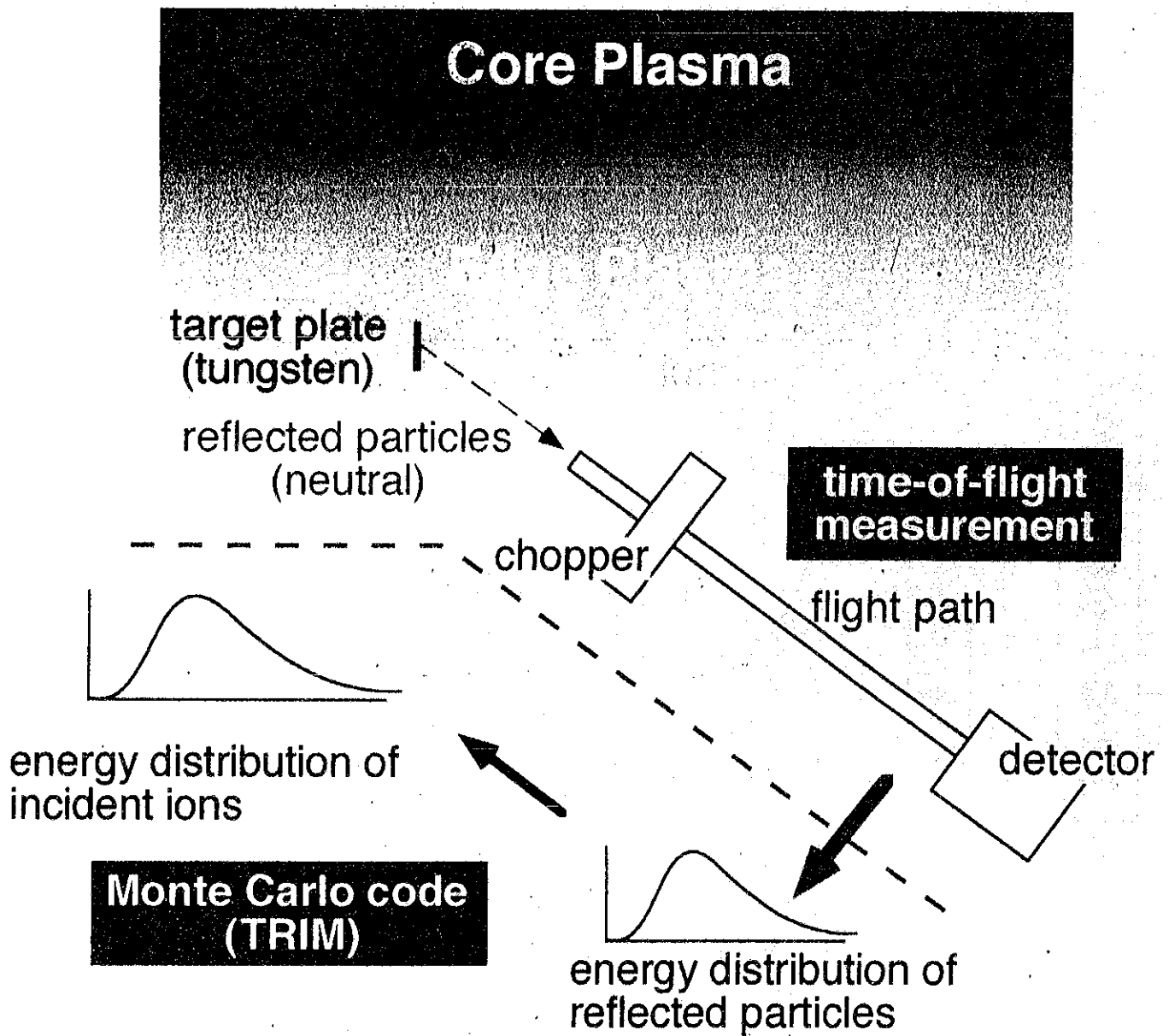
1. 装置の設計と製作 (平成9、10年度)
2. 試料チャンバーを用いた実験 (平成10年度)
(反射粒子のエネルギー分布と表面組成との関係)
3. LHD設備のTOFシステムと同時計測実験 (平成11年度)
イオン反射と中性粒子反射の同時測定
(エネルギー分布、再放出分布の差)
単色源によるTOFシステムの校正
4. LHD実験への参画 (平成12年)
TOFシステムによる周辺プラズマ温度測定
反射粒子挙動解析に基づいた高Zダイバータ粒子輸送モデルの構築
LHD炉内材料表面のキャラクタリゼーション

研究計画

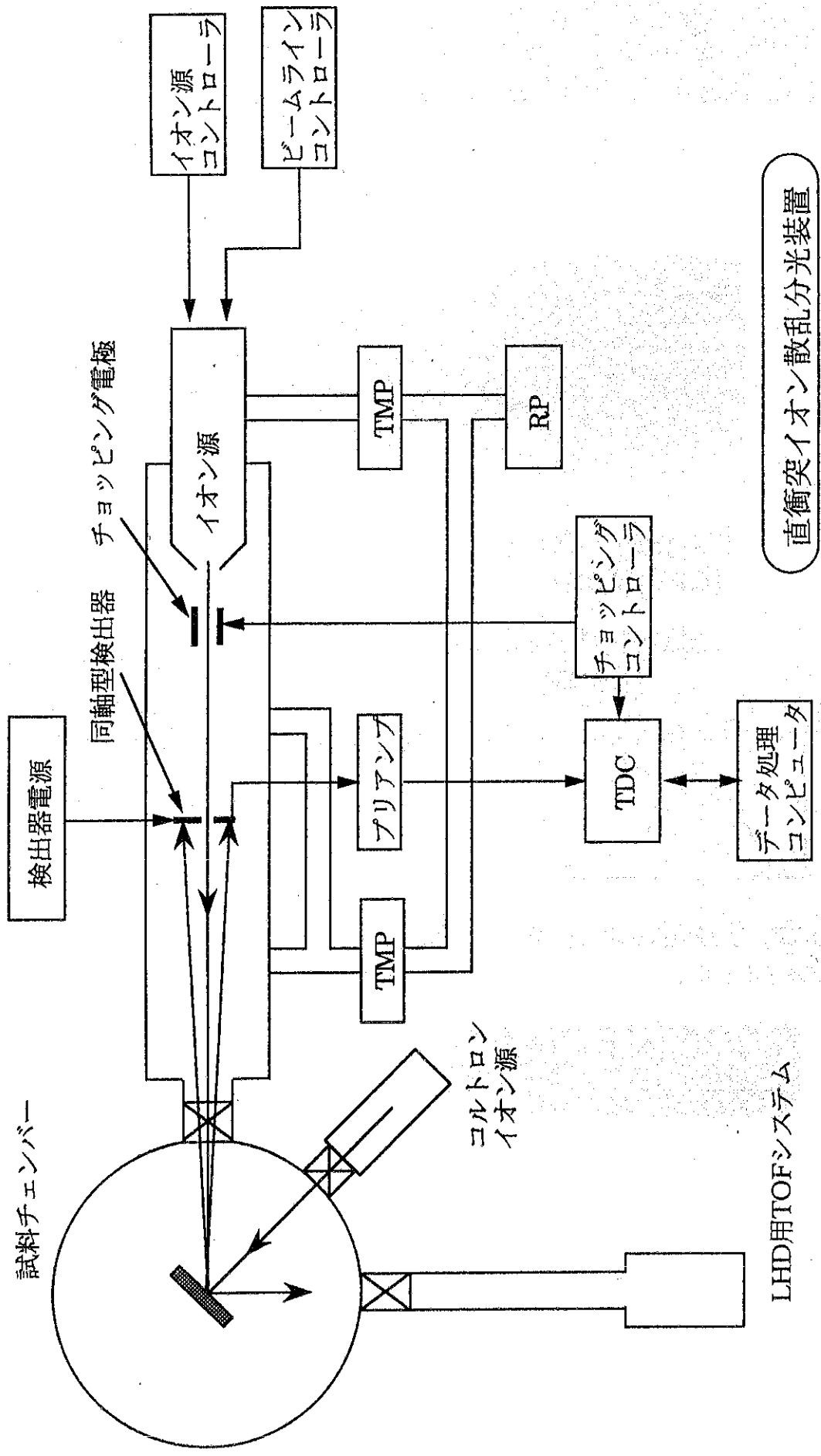
1. 装置の設計と製作 (平成9、10年度)
2. 試料チャンバーを用いた実験 (平成10年度)
3. TOF システムとの同時計測実験 (平成11年度)
 - イオン反射と中性粒子反射の同時測定
 - 低エネルギー・高エネルギー同時計測
 - 単色源による TOF システムの校正
4. LHD 実験への参画 (平成12年度)
 - プラズマ対向面の反射率計測
 - 反射粒子挙動解析に基づいた高Zダイバータ粒子輸送モデル
 - TOF システムによる周辺プラズマ温度計測



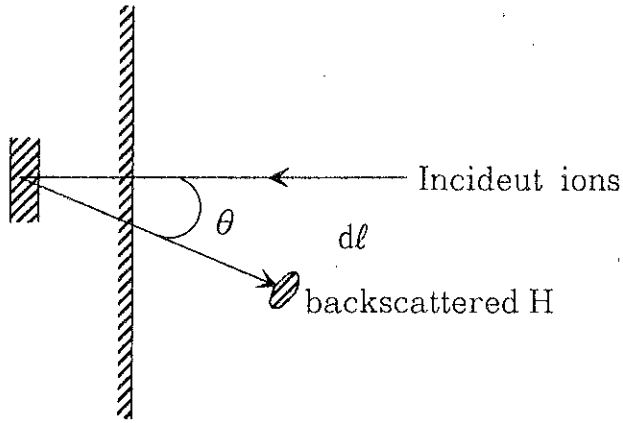
A new ion energy distribution measurement using the ion reflection phenomenon on a solid surface



反射粒子挙動解析装置



Backscattering Energy Spectrum of Monoenergetic Hydrogen Ions from Elemental Targets



$$dI(x) = d\Omega N_0 dx \sigma(E_0, \theta)$$

$$\frac{dI}{dE} = d\Omega \frac{\sigma(E_0, \theta)}{\varepsilon} \left(\frac{dE}{dX}\right) = N_0 \bar{\varepsilon}$$

$$k = \frac{(M_1 \cos \theta + \sqrt{M_2^2 - M_1^2 \sin^2 \theta})^2}{(M_1 + M_2)^2}$$

$$\theta = 160^\circ$$

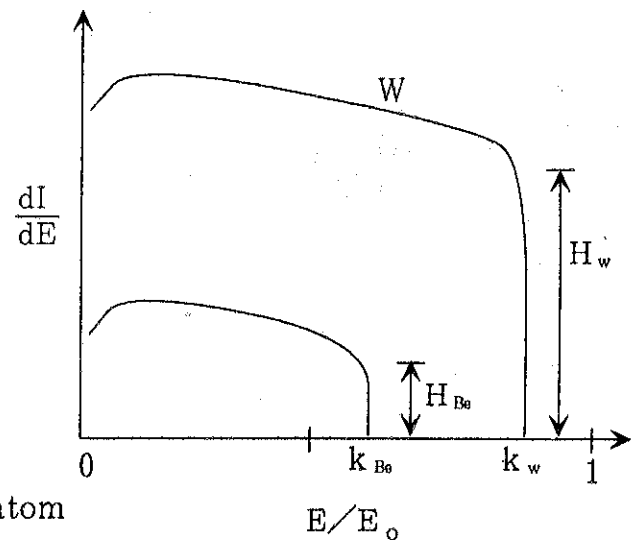
$$k_w = 0.98, \quad k_{Be} = 0.65$$

$$\sigma(E_0, \sigma) \propto Z_2^2$$

$$\bar{\varepsilon} \approx z \varepsilon(E_0) \quad \text{for } 1 \text{ keV}$$

$$\varepsilon(E_0)_{Be} = 2.7 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{cm}^2 / \text{atom}$$

$$\varepsilon(E_0)_W = 5.0 \times 10^{-16} \text{ eV} \cdot \text{cm}^2 / \text{atom}$$



$$H_w : H_{Be} = \frac{74^2}{5.0} : \frac{4^2}{2.7} \approx 1095 : 6$$

for 100eV

W ($Z_2=74$, $M_2=184$)

Be ($Z_2=4$, $M_2=9$)

$$\varepsilon = \frac{E_0 \left(\frac{M_2}{M_2 + M_1} \right)}{Z_1 Z_2 e^2 a}$$

$$a = \frac{0.8853 a_0}{(Z_2^{\frac{1}{2}} + Z_1^{\frac{1}{2}})^{\frac{1}{2}}}$$

$$t = \varepsilon^2 \cdot T / T_m$$

$$= \varepsilon^2 \cdot \sin^2 \frac{\theta_0}{2}$$

$$\varepsilon_w (H \rightarrow W) = 0.856$$

$$a_w = 0.109 \text{ \AA}$$

$$\varepsilon_{Be} (H \rightarrow Be) = 6.25$$

$$a_{Be} = 0.250 \text{ \AA}$$

$$\frac{d\sigma}{d\omega} (180^\circ) = \frac{a^2}{8} \frac{f(t^{\frac{1}{2}})}{\varepsilon}$$

$$f\left(\frac{\theta_c}{2} = \frac{\pi}{2}\right)_w \cong 0.3, \quad f\left(\frac{\theta_c}{2} = \frac{\pi}{2}\right)_{Be} \cong 0.1$$

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_w = 5.2 \times 10^{-4} \quad \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{Be} \approx 1.25 \times 10^{-4}$$

$$H_w : H_{Be} = 3 : 1$$

プラズマ対向機器・PSI・熱・粒子制御合同研究会

「LHDにおける材料中のトリチウム計測とインベントリー評価」
(富山大・水素同位体研 松山政夫)

1. 研究目的

★大型ヘリカル実験装置(LHD)によるD-D実験：所定量のトリチウム生成

★一部はLHD内の材料(ダイバーター, 第一壁及び構造材等)に吸着・溶解、
残りは排気系を經由してLHD外に排出：回収システムの性能

★今後の課題

- ・装置内の材料中に分布・残存するトリチウムを評価
- ・大型装置におけるトリチウムマスマバランスの把握

★具体的な検討項目

① 材料中の残留トリチウム量の非破壊計測法

② 残留トリチウムの除去(除染)方法

等に関する基礎的検討を行い、LHDで発生するトリチウムの量・分布及びインベントリー低減化対策に対するデータを取得することが目的である。

2. 研究の具体的内容

LHD内の材料中のトリチウム計測法並びにインベントリー評価及びトリチウム除染法の検討

(1) 計測：表面領域＝二次電子計測法，バルク領域＝制動X線計測法及び加熱法

★計測対象材料：黒鉛材料，ボロン被覆材(第一壁)；モリブデン，銅

★計測方法：β線計測(二次電子増倍管)，制動X線計測，液体シンチレーション計測

★ヘリカル開放時のトリチウム放出挙動

(2) 除染：プラズマ放電法，水蒸気置換法，オゾン酸化法，紫外線誘起オゾン酸化法，加熱法等

★プラズマ放電法(He/O₂, H₂, etc.)

★水蒸気置換法

★オゾン酸化法(紫外線誘起，マイクロ波誘起)

3. 研究計画

3. 1 トリチウム計測(富山大，核融合研)

★材料中トリチウムの計測：低エネルギーX線検出器を基本とする制動X線計測システムの構築
(測定感度，エネルギー依存性及びノイズレベルの安定性等の基本的性能に関するデータ取得)

★試験材料のトリチウム暴露：本システムの測定効率及び測定深さ等に関する性能を検討・評価

3. 2 インベントリー評価及び除染(富山大，東大，九大，核融合研)

★既存の設備を用いて試験材料に対するトリチウム吸着量・吸着速度の測定及び吸着・脱離機構の検討

★吸着トリチウムを除去するために各種除染法を適用し，それぞれの方法の除染効果を評価

プラズマ対向機器・PSI・熱・粒子制御合同研究会

「LHDにおける材料中のトリチウム計測とインベントリー評価」
(富山大・水素同位体研 松山政夫)

1. 研究目的

★大型ヘリカル実験装置（LHD）によるD-D実験：所定量のトリチウム生成

★一部はLHD内の材料（ダイバーター，第一壁及び構造材等）に吸着・溶解、
残りは排気系を経由してLHD外に排出：回収システムの性能

★今後の課題

- ・装置内の材料中に分布・残存するトリチウムを評価
- ・大型装置におけるトリチウムマスバランスの把握

★具体的な検討項目

① 材料中の残留トリチウム量の非破壊計測法

② 残留トリチウムの除去（除染）方法

等に関する基礎的検討を行い，LHDで発生するトリチウムの量・分布及びインベントリー低減化対策に対するデータを取得することが目的である。

2. 研究の具体的内容

LHD内の材料中のトリチウム計測法並びにインベントリー評価及びトリチウム除染法の検討

(1) 計測：表面領域＝二次電子計測法，バルク領域＝制動X線計測法及び加熱法

★計測対象材料：黒鉛材料，ボロン被覆材（第一壁）；モリブデン，銅

★計測方法： β 線計測（二次電子増倍管），制動X線計測，液体シンチレーション計測

(2) 除染：プラズマ放電法，水蒸気置換法，オゾン酸化法，
紫外線誘起オゾン酸化法，加熱法等

★プラズマ放電法（He/O₂, H₂, etc.）

★水蒸気置換法

★オゾン酸化法（紫外線誘起，マイクロ波誘起）

3. 研究計画

3. 1 トリチウム計測（富山大，核融合研）

★材料中トリチウムの計測：低エネルギーX線検出器を基本とする制動X線計測システムの構築

（測定感度，エネルギー依存性及びノイズレベルの安定性等の基本的性能に関するデータ取得）

★試験材料のトリチウム暴露：本システムの測定効率及び測定深さ等に関する性能を検討・評価

3. 2 インベントリー評価及び除染（富山大，東大，九大，核融合研）

★既存の設備を用いて試験材料に対するトリチウム吸着量・吸着速度の測定及び吸着・脱離機構の検討

★吸着トリチウムを除去するために各種除染法を適用し，それぞれの方法の除染効果を評価

4. 関連研究及び準備状況

4. 1 計測

- (1) 各種材料へのトリチウム暴露システム
- (2) セラトロン等の二次電子増倍管を用いた表面層のトリチウム計測
- (3) 制動X線計測法による有機材料中のトリチウム計測（表面から数mm）
- (4) 制動X線計測法による金属材料中のトリチウム計測を検討中

4. 2 除染

- (1) トリチウムの紫外線誘起オゾン酸化反応に関する反応機構
- (2) 水蒸気置換法の動的解析
- (3) トリチウム吸着機構の検討

5. 年次計画

(平成9年度)

試験材料：黒鉛，SS-316及び無酸素銅 等

試験材料特性：表面構造の観察

トリチウム暴露：吸着・脱離速度の測定及び除染効果の検討

トリチウム計測： β 線計測法（二次電子増倍管）及び制動X線計測法による表面及び内部の測定

(平成10年度)

前年度と同様のトリチウム暴露試験体による各種除染法の性能試験

トリチウムのインベントリー評価

(平成11年度以降)

LHDの建設及び運転状況に応じ、トリチウム計測及び残留トリチウムの除染法の適用性を模擬試験材料で実証

6. 研究組織

研究代表者：松山 政夫(富山大)
所内責任者：本島 修／宇田 達彦(核融合研)
研究分担者：渡辺 国昭(富山大)
：芦田 完(富山大)
：舒 衛民(富山大)
：田中 知(東 大)
：小野 双葉(東 大)
：西川 正史(九 大)
：宗像 健三(九 大)
：野田 信明(核融合研)
：相良 明男(核融合研)
：佐久間洋一(核融合研)

共同研究課題：プラズマ中の静電場形成による熱・粒子輸送制御法の開発

研究代表者： 犬竹正明（東北大学大学院工学研究科電気・通信工学専攻）

計画共同研究担当者： 長山好夫（核融合科学研究所）

1 研究目的

プラズマ中の静電場は、低周波揺動抑制による閉じ込め改善やダイバータ部などへの熱粒子輸送の低減に重要な役割を果たしていることが、最近の実験により明らかになってきた。

本研究の目的は、1) 磁力線に垂直方向の電場（電場シア）と低周波揺動の関係を基礎実験的に明らかにすること、2) 磁力線に平行方向の電場発生の物理過程を明らかにすること、3) これらの成果を大型装置における高温高密度プラズマの閉じ込め改善やダイバータ部の熱粒子輸送制御に適用する方法を開発することである。

2 平成8年度の研究成果

1) 磁力線に垂直方向の電場（電場シア）と低周波揺動の制御

QT-U装置（直径21 cm、長さ500 cm）において、6 GHzのマイクロ波放電によりほぼ一様な磁場中にアルゴンプラズマを生成した。端部に設置した分割エンドプレートとリミターに直流バイアスを印加し、磁力線の垂直方向（径方向）の電場を制御した。径方向電場を変化させ、低周波揺動の周波数スペクトル解析から揺動の種類をフルートモードとドリフト波モードと同定した。重要な結果として、フルートモードは電場が大きくなると揺動振幅が増大するが、ドリフト波モードは符号にかかわらず、電場が大きくなると抑制されることが分かった。今後は、ドリフト波モードの抑制には電場が効いているのか、電場のシアが効いているのかを実験的に明らかにしていく予定である。また、より高密度のプラズマを生成し、マイクロ波反射法などを用いて電場（電場シア）と低周波揺動の関係を明らかにしていく予定である。

2) 磁力線に平行方向の電場発生機構の解明

QT-U装置で、接触電離法により完全電離、無衝突のカリウムプラズマを生成した。収束型、発散型、ミラー型等、種々の不均一磁場配位で、局所マイクロ波共鳴加熱を行い、磁力線に沿った電位構造の形成機構解明の基礎実験を行った。局所マイクロ波共鳴加熱による電子の加速、減速に伴い、プラズマの準中性条件を満たすように自己無撞着な電場が形成されること、同時に、イオンはその電場により加速、減速されることが明らかになった。この結果はサーマルバリア型タンデムミラーの電位形成機構解明に寄与するとともに、ダイバータ部における熱粒子制御法にも適用できる重要な知見である。

平成8年度の研究成果

1) 垂直方向電場（シア）と低周波揺動の制御

E C R円柱プラズマ中の分割型エンドプレートにより径方向電位分布を制御し、低周波揺動と電場との相関を調べた結果、

フルートモードは負の垂直電場領域で弱く、正の垂直電場領域で強く励起されること、

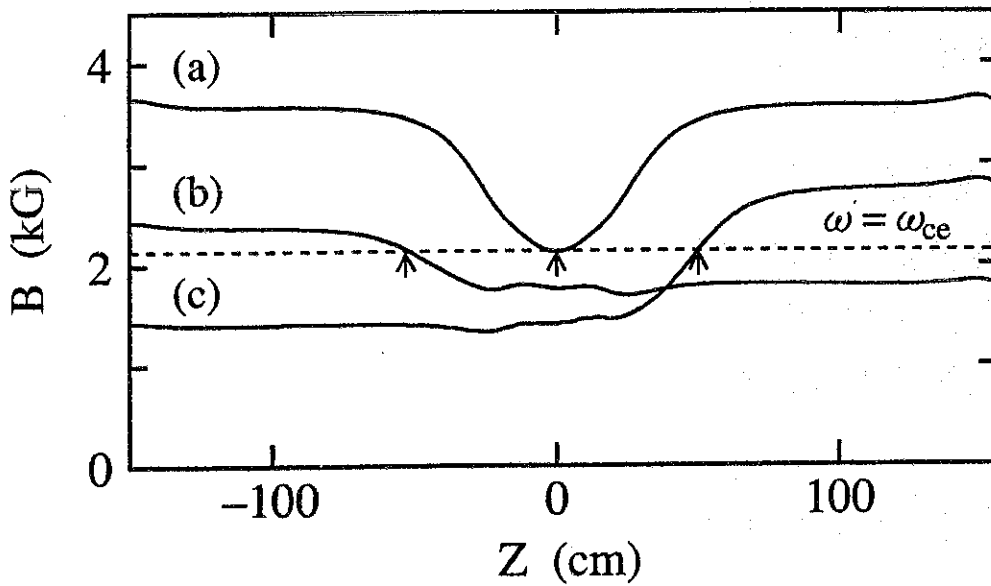
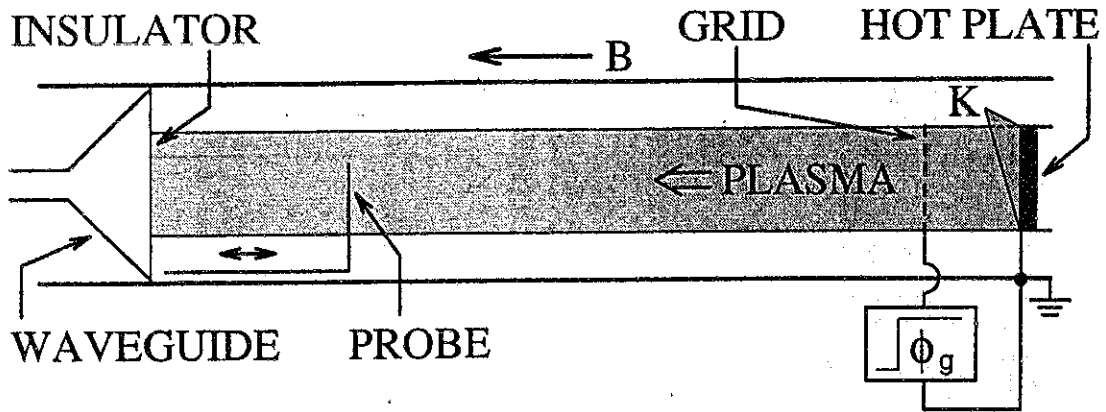
ドリフトモードは符号に拘わらず、電場が大きくなると抑制されることが分かった。

今後は、電場と電場シアの効果の詳細を解明するために、分割型ホットプレートを設計製作し、高電離プラズマ中の現象との比較実験を行う予定である。

2) 平行方向電場の発生機構の解明

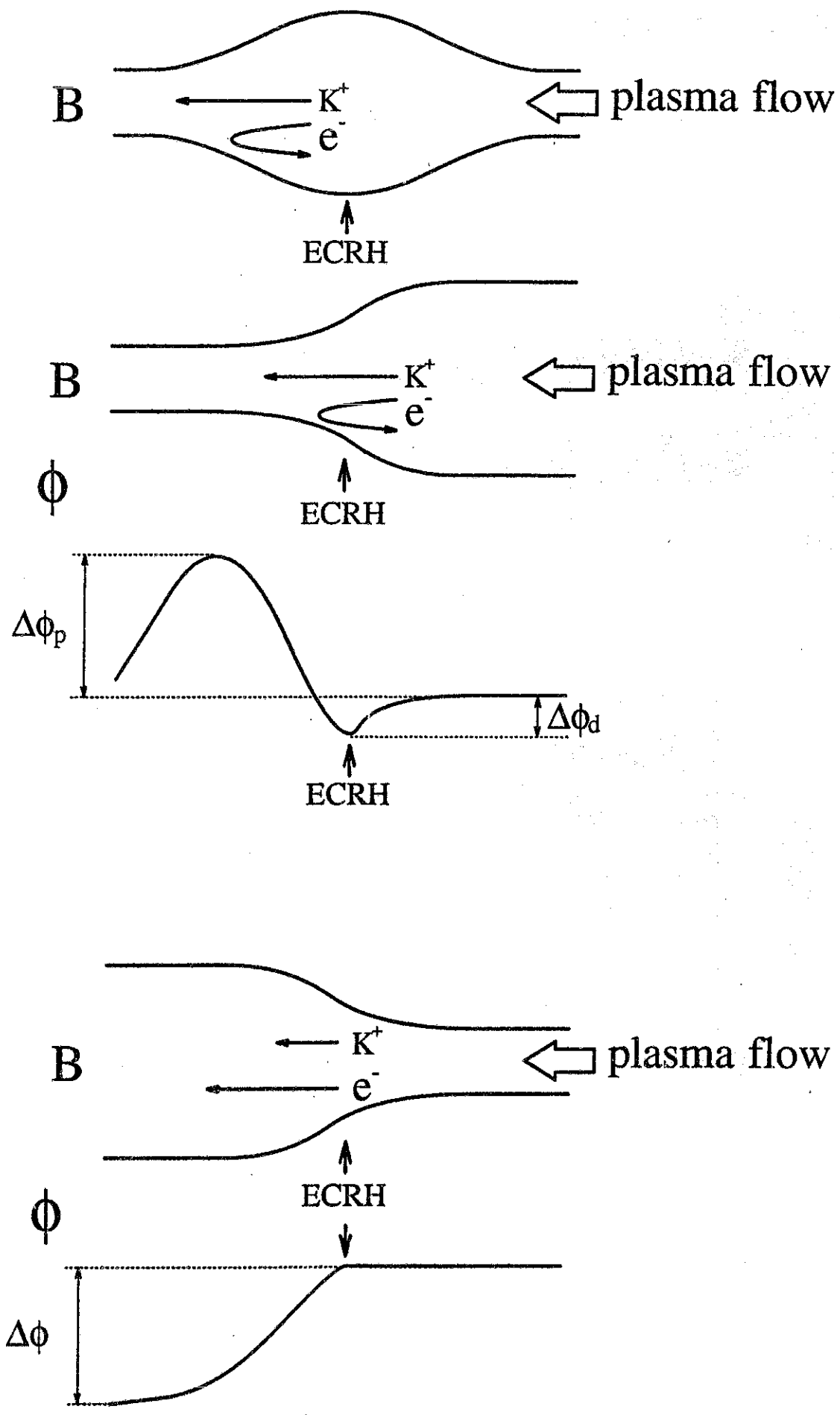
典型的不均一磁場配位中の完全電離無衝突プラズマ流に対し局所E C R加熱を行った結果、電子の選択的加速・減速に伴い、プラズマ準中性条件の要請により自己無撞着な電場が形成されること、同時に、イオンはその電場により減速（反射）・加速されることが明らかになった。

この結果は、サーマルバリア付きタンデムミラーの電位形成機構解明に寄与するとともに、ダイバータ部における熱粒子制御法にも適用できる重要な知見である。

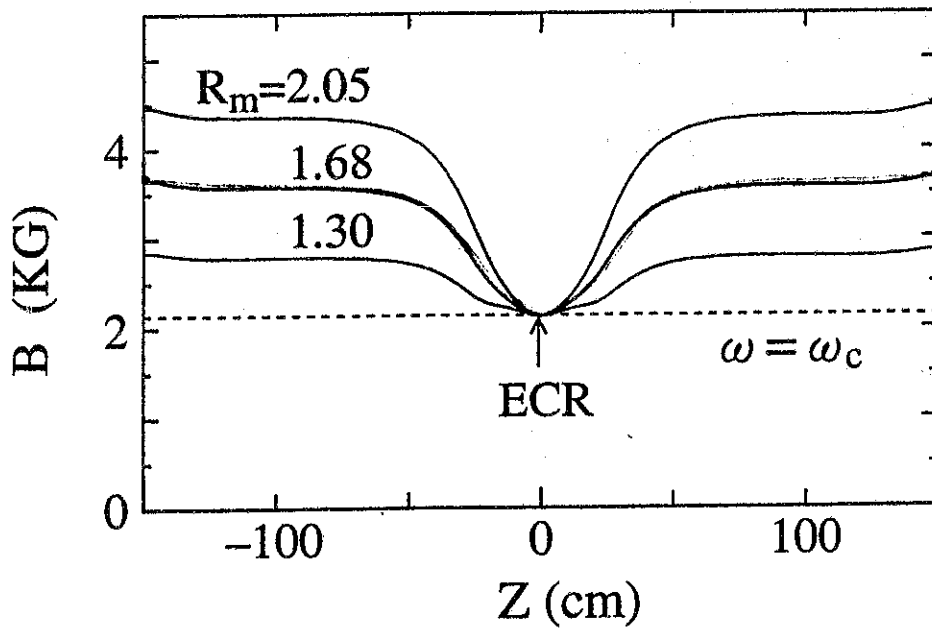
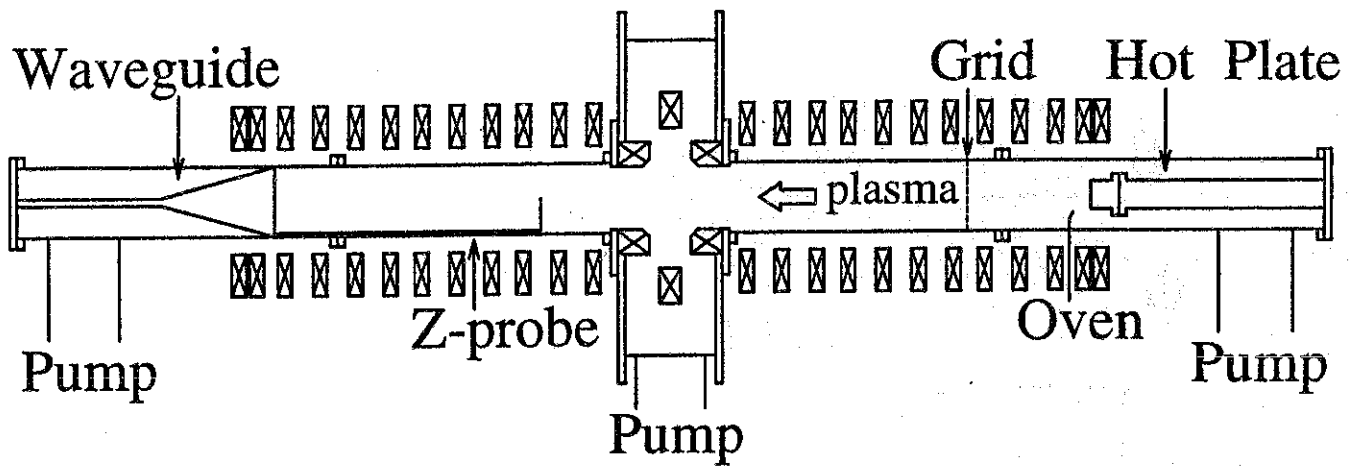


Plasma Parameter

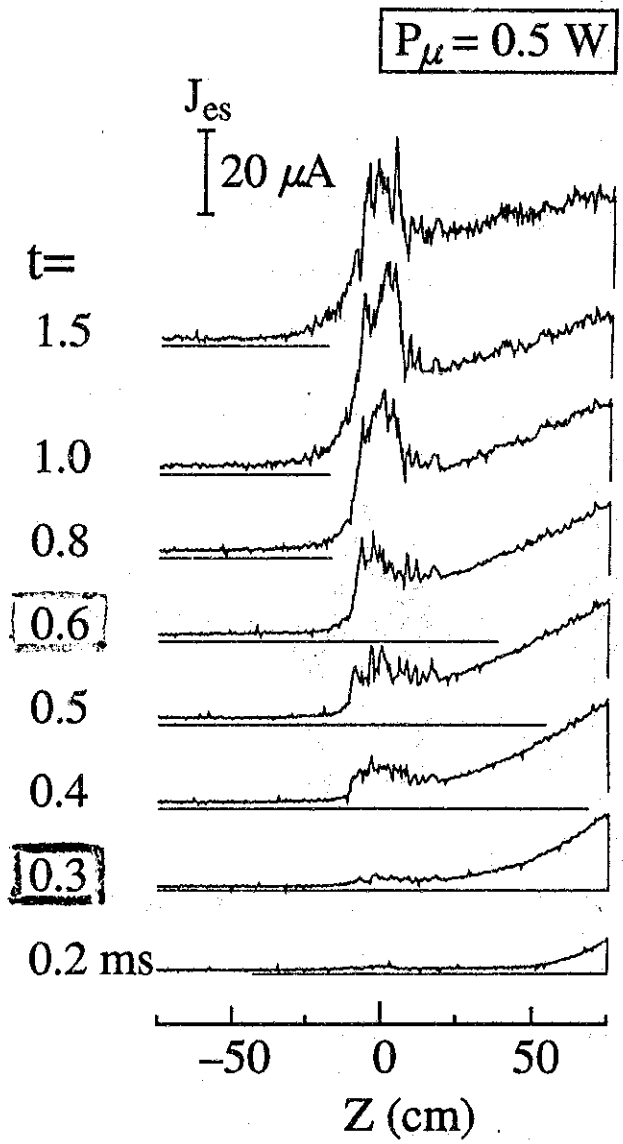
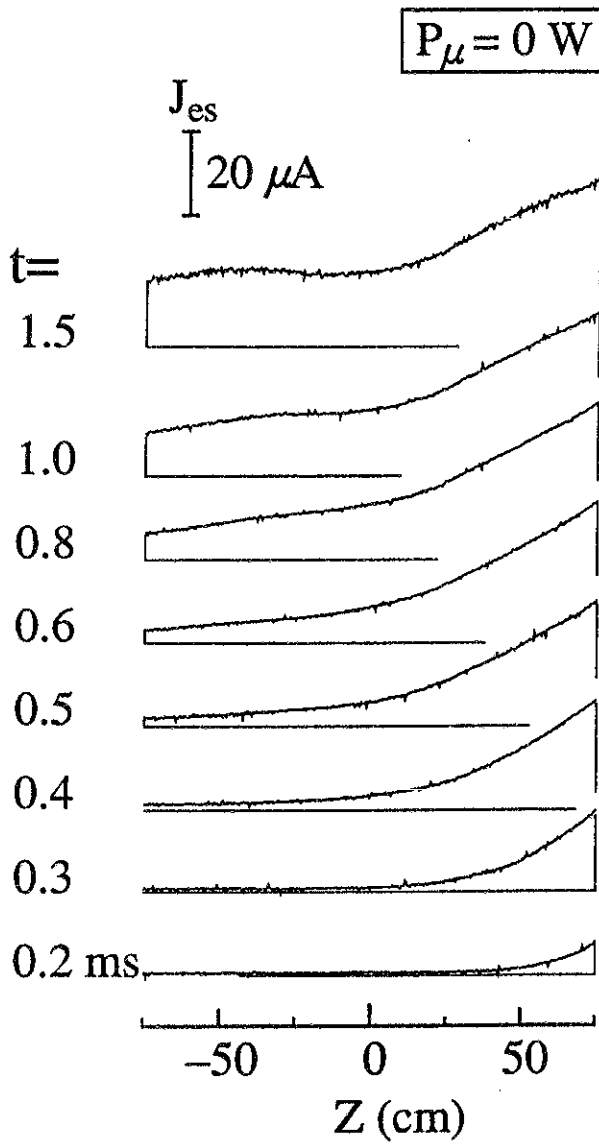
Plasma Density	$n_0 = 10^8 \sim 10^9 \text{ cm}^{-3}$
Ion · Electron Temperature	$T_{i0} \leq T_{e0} \simeq 0.2 \text{ eV}$
Plasma (ion) Flow Energy	$E_{i0} = 1 \sim 2 \text{ eV}$
μ -Wave Frequency	$\omega/2\pi = 6 \text{ GHz}$
μ -Wave Injected Power	$P_\mu = 0 \sim 1 \text{ W}$
Background Pressure	$P \leq 5 \times 10^{-5} \text{ Pa}$



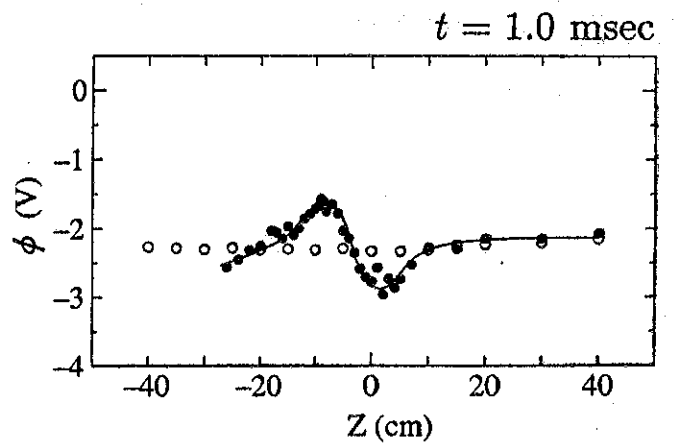
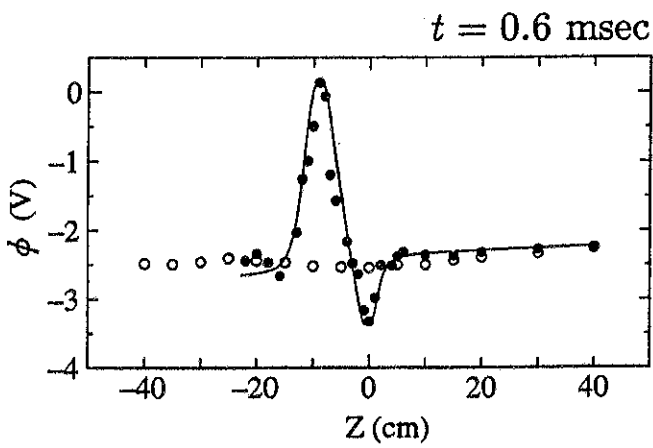
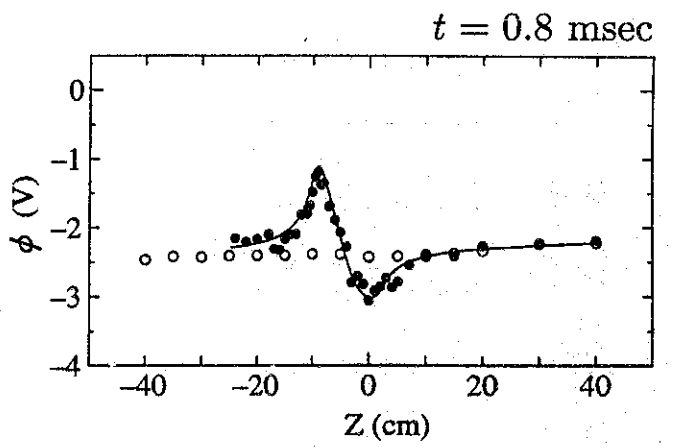
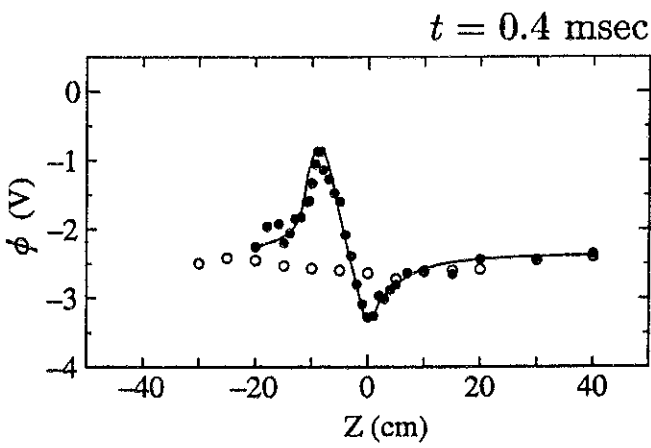
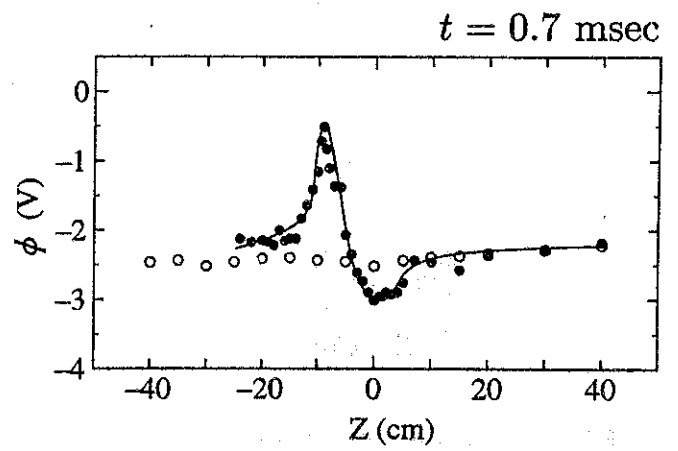
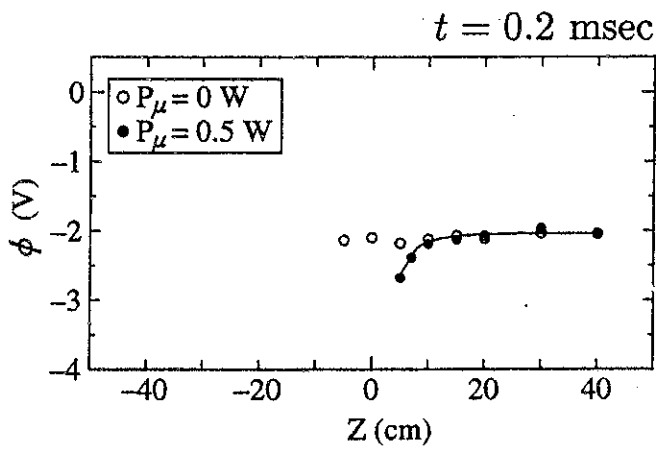
Magnetic-Well Configuration



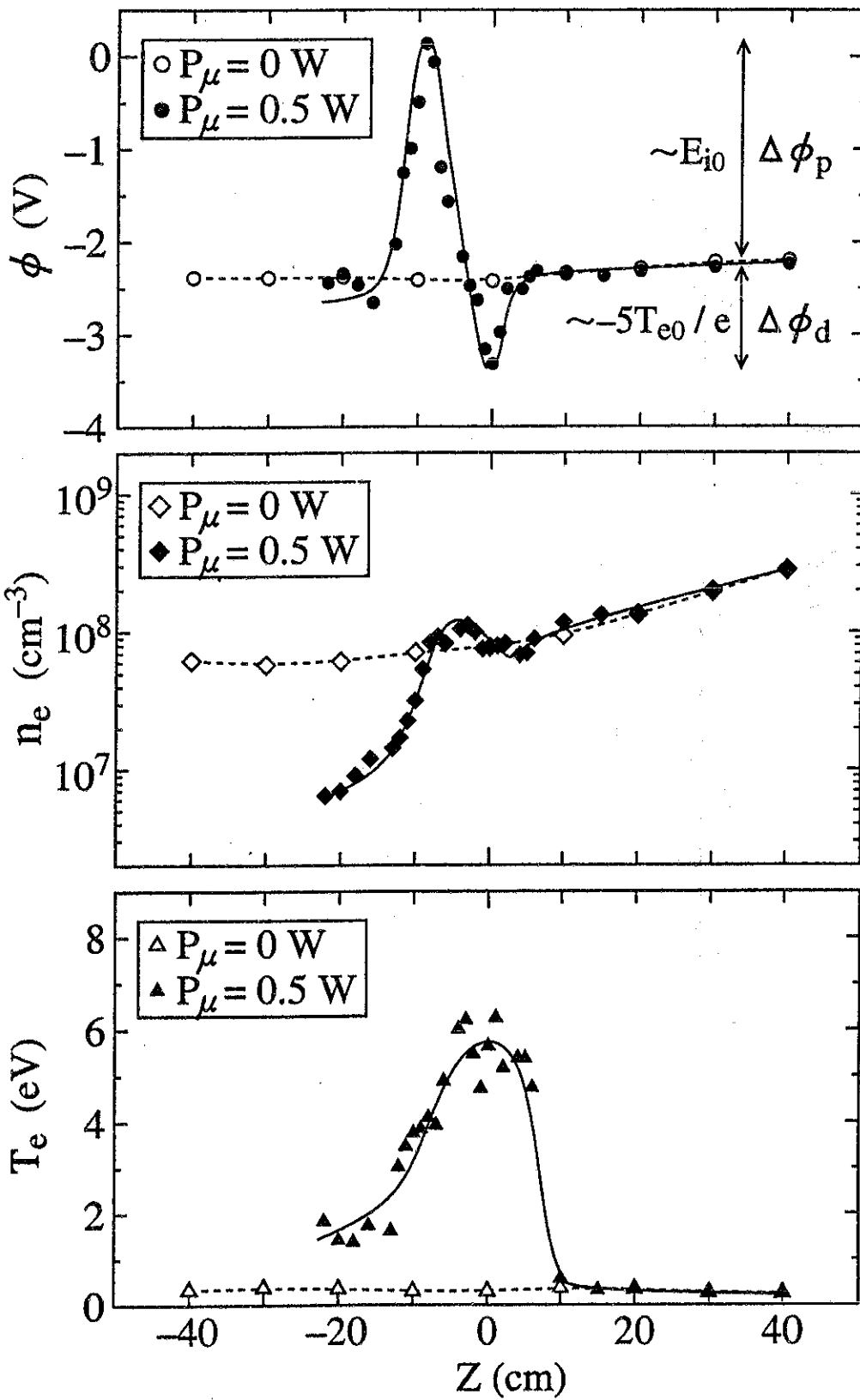
$R_m = 1.68.$



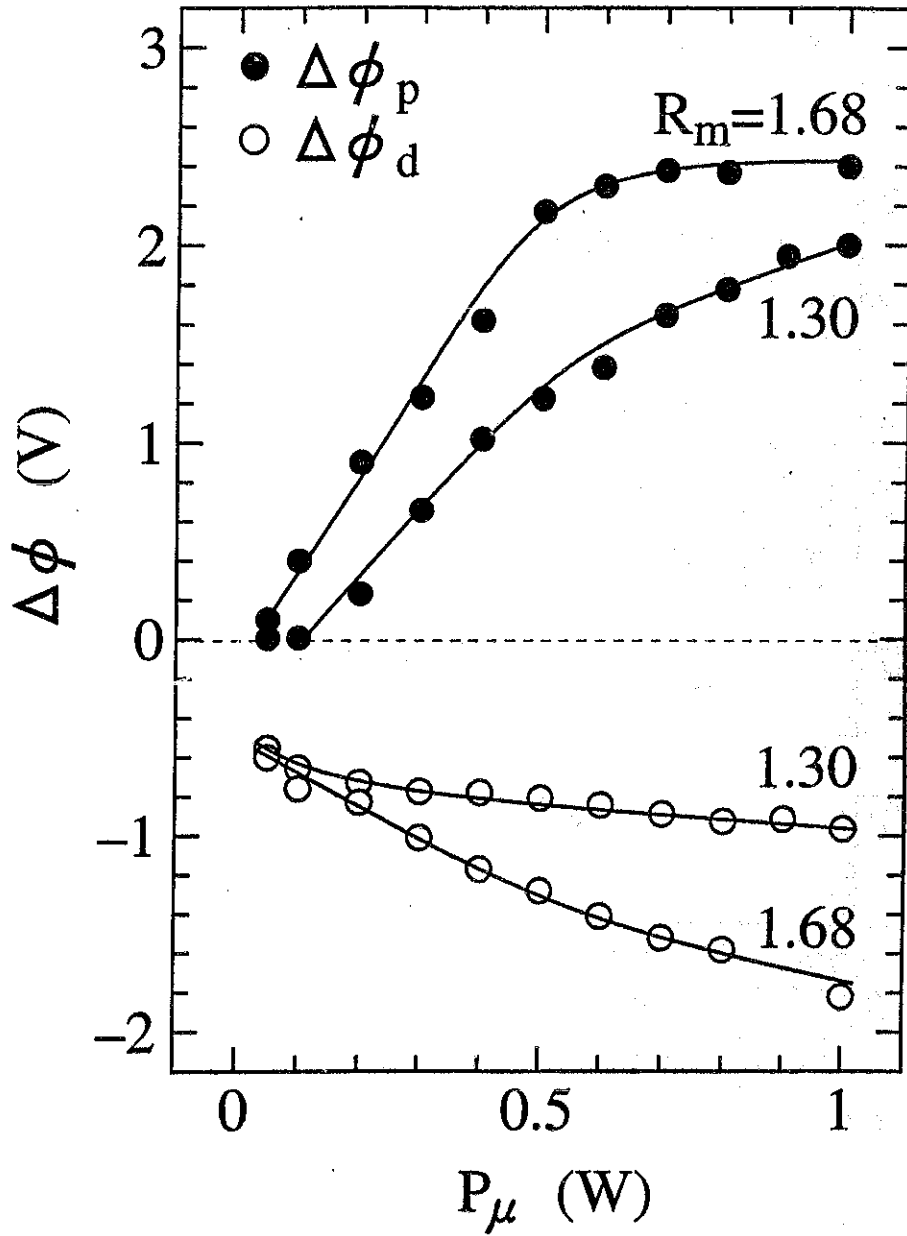
$R_m = 1.68.$



$t = 0.6$ msec. $R_m = 1.68$.



$t = 0.6$ msec.



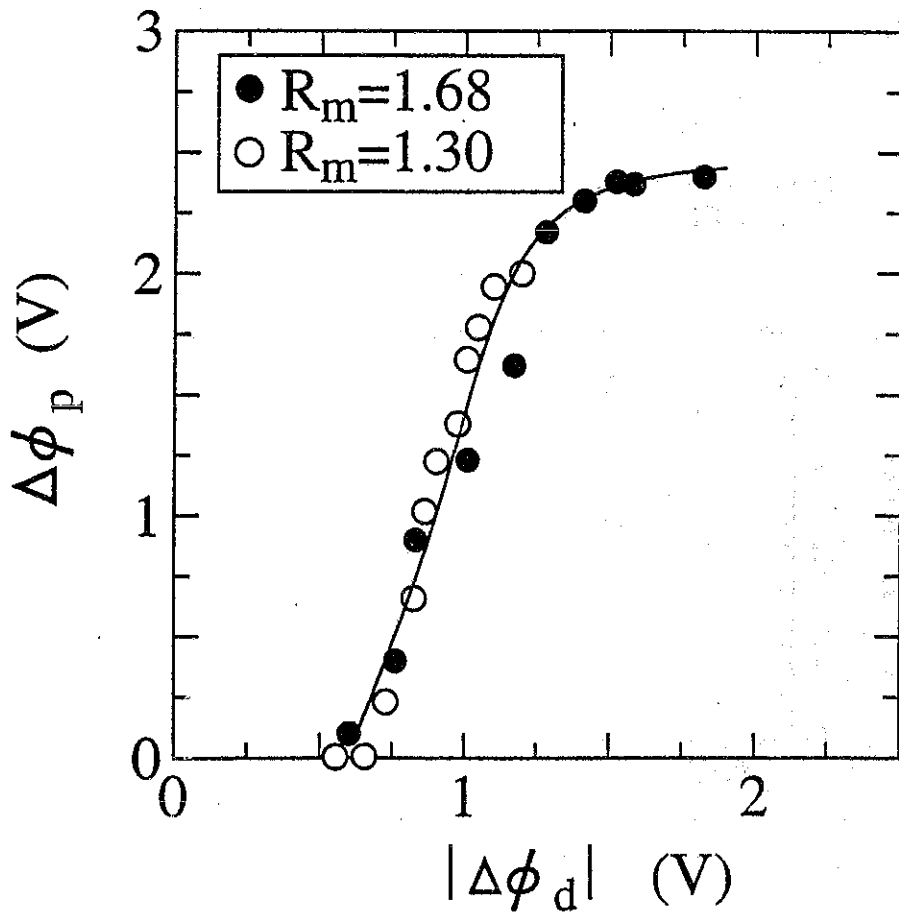
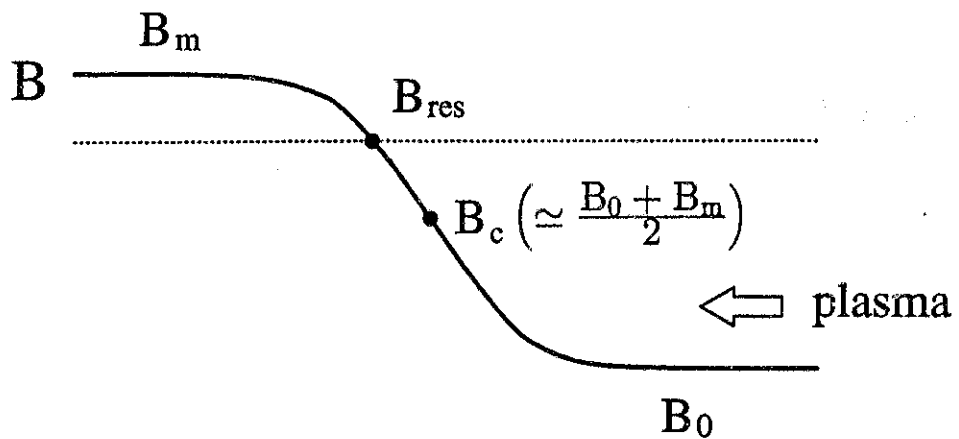
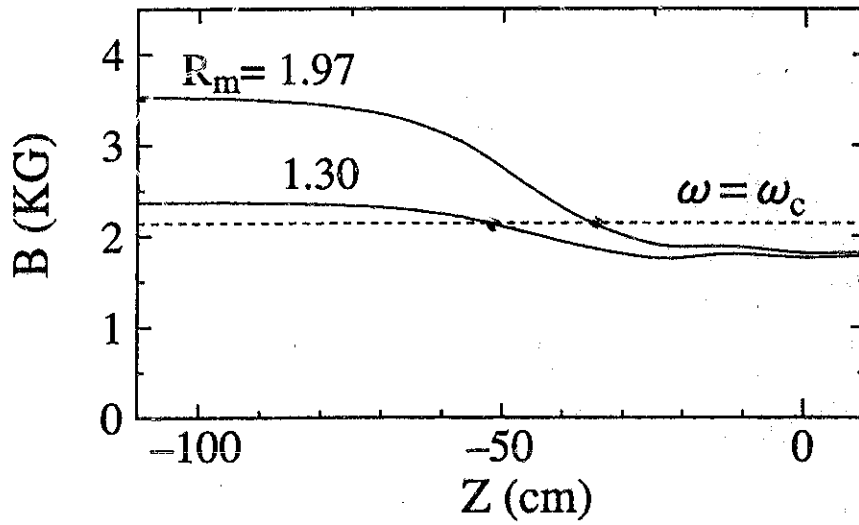
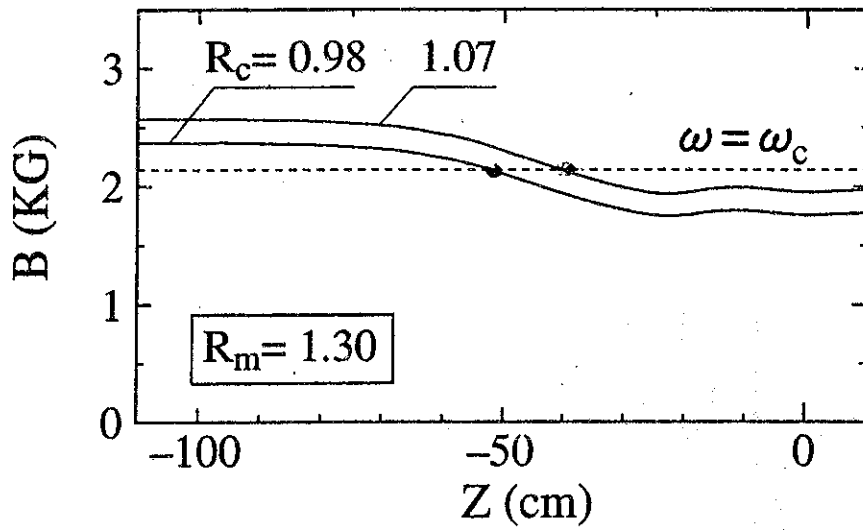


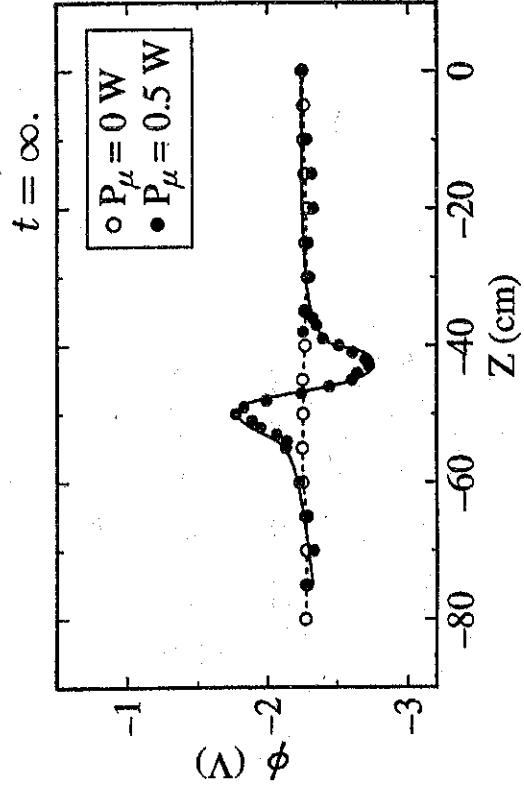
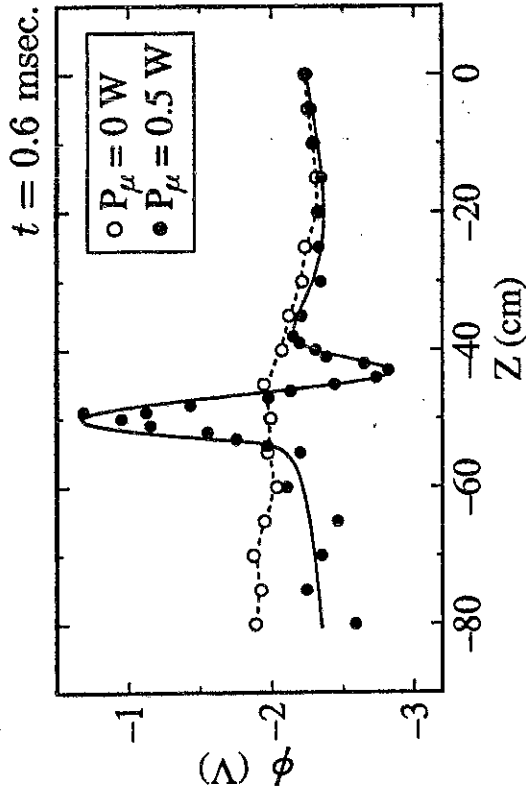
図 4-15 : 空間電位差 $|\Delta\phi_d|$ に対する 空間電位差 $\Delta\phi_p$. $t = 0.6$ msec.

Converging-Field Configuration

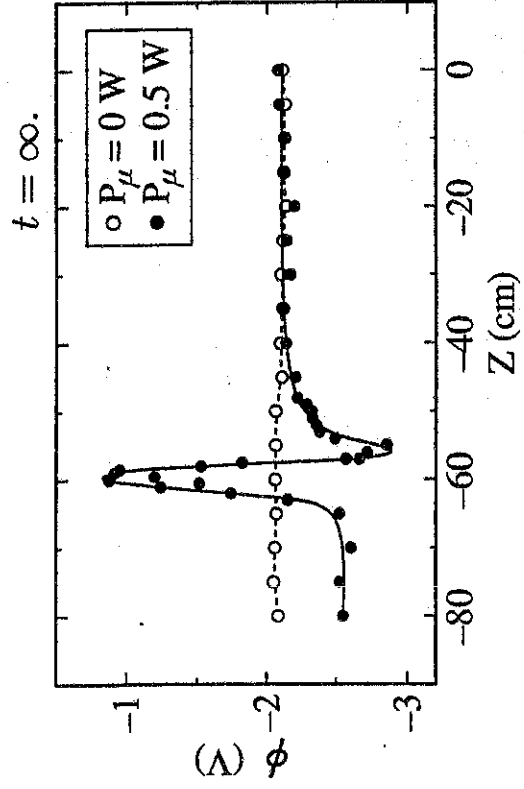
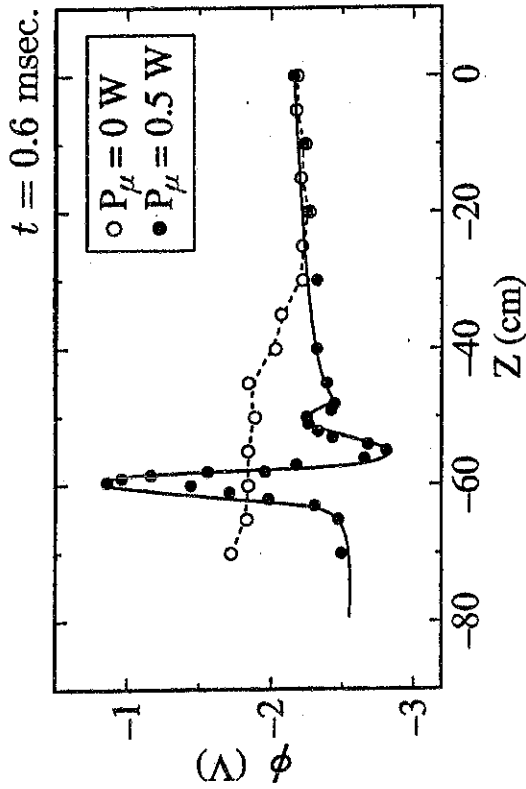


$R_c = B_c / B_{res}$	
$R_c < 1$	→ Good Curvature
$R_c > 1$	→ Bad Curvature

$P_\mu = 0.5 \text{ W}$. $R_m = 1.30$.

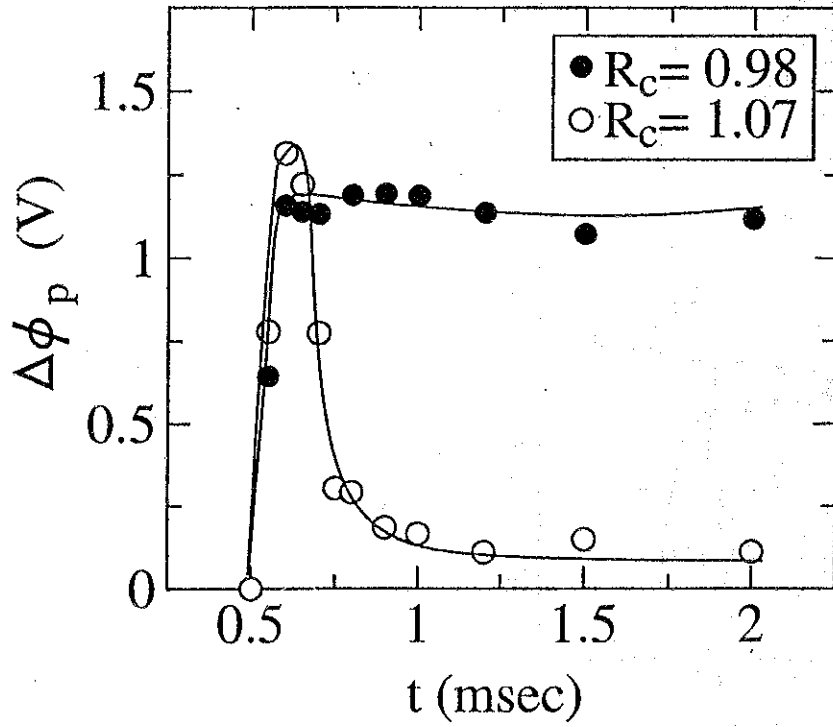


$R_c = 1.07$

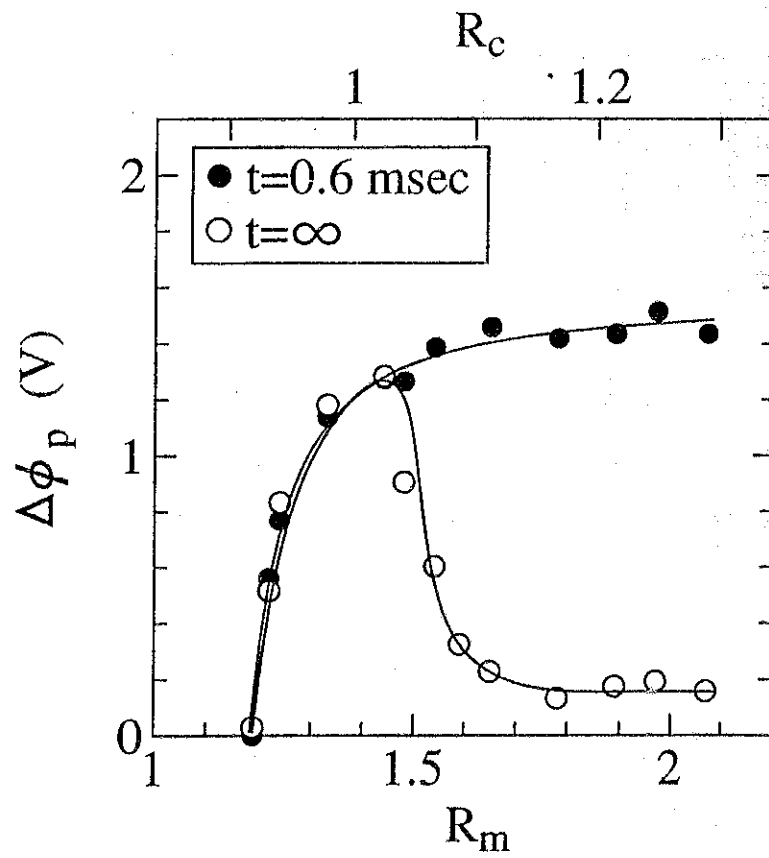


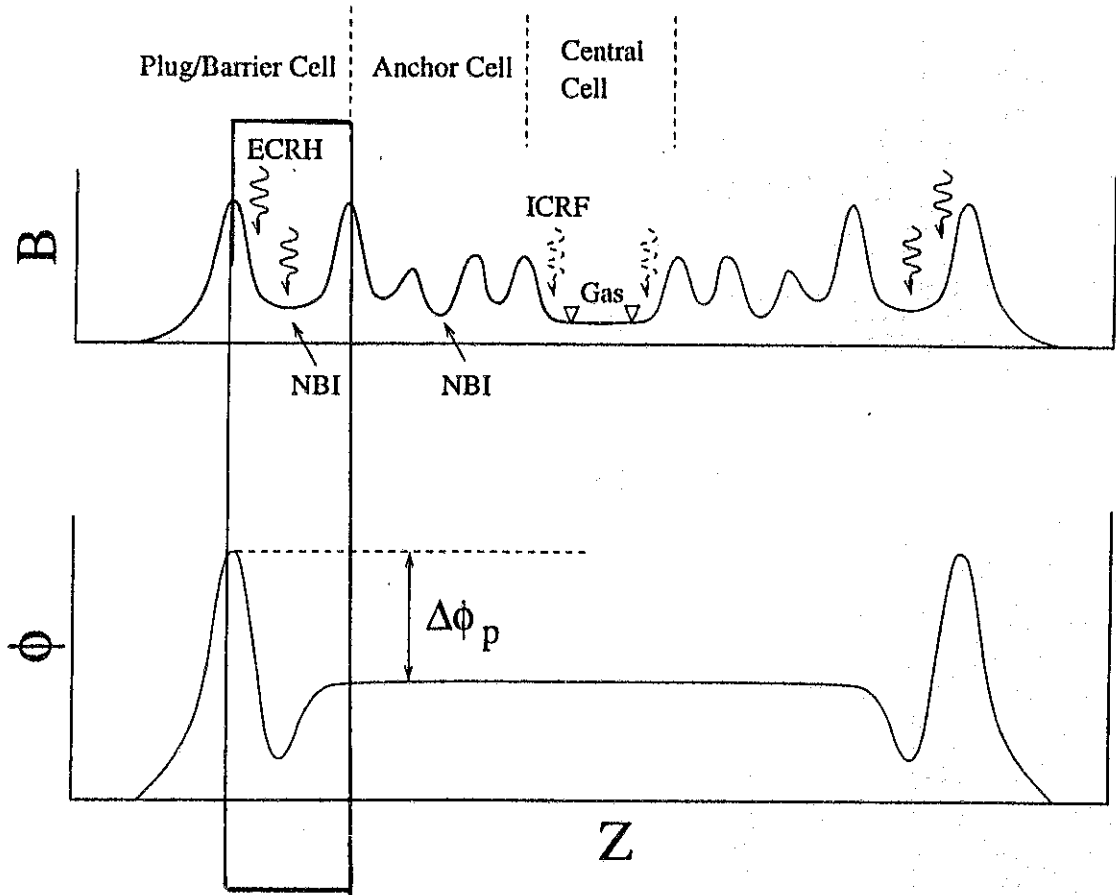
$R_c = 0.98$

$P_\mu = 0.5 \text{ W. } R_m = 1.30.$

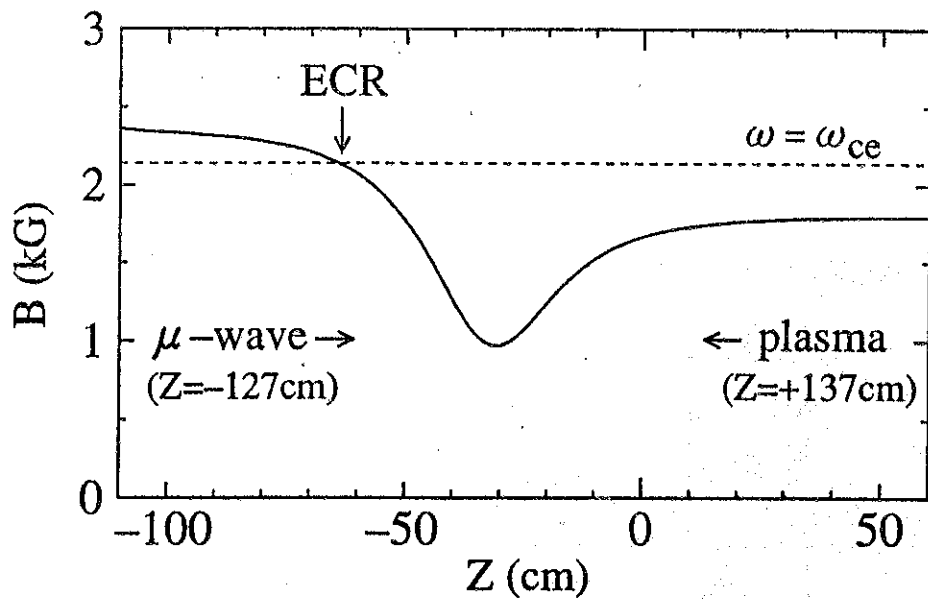


$P_\mu = 0.5 \text{ W.}$

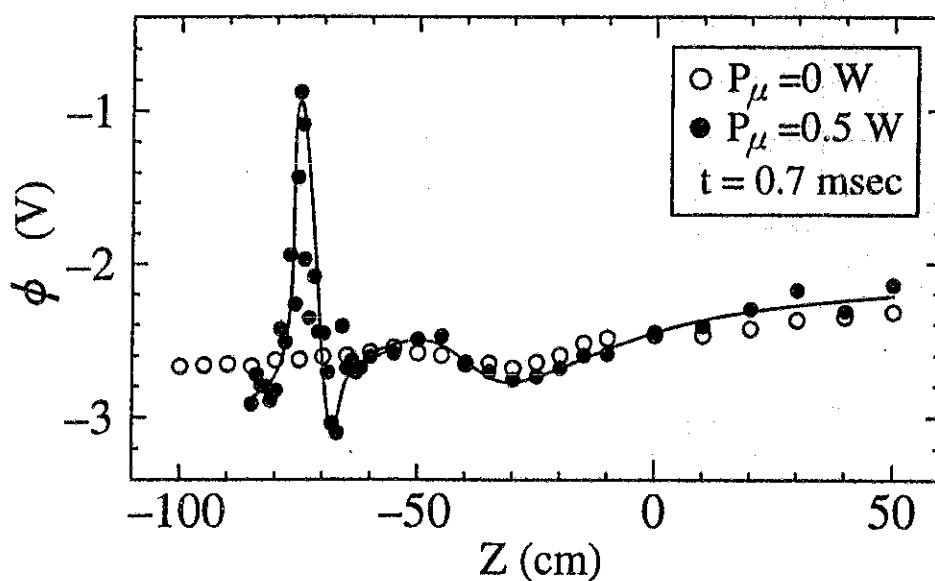




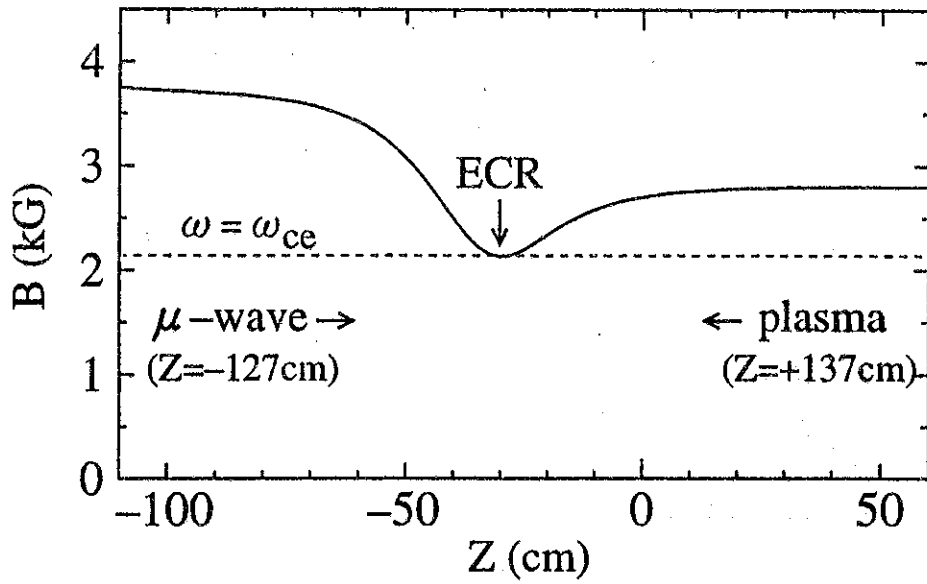
Tandem Mirror (Gamma 10)



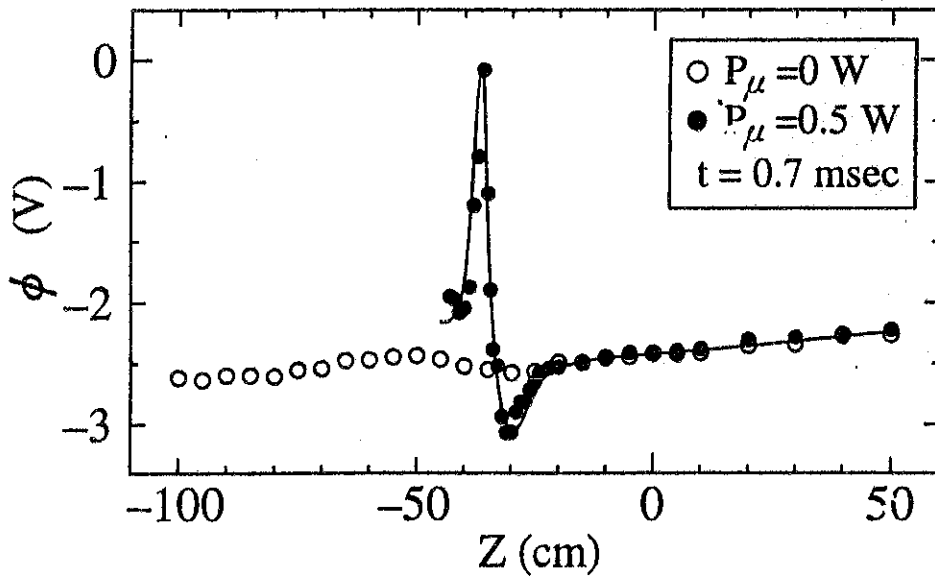
収束ルート型磁場配位. $R_m = 2.40$.



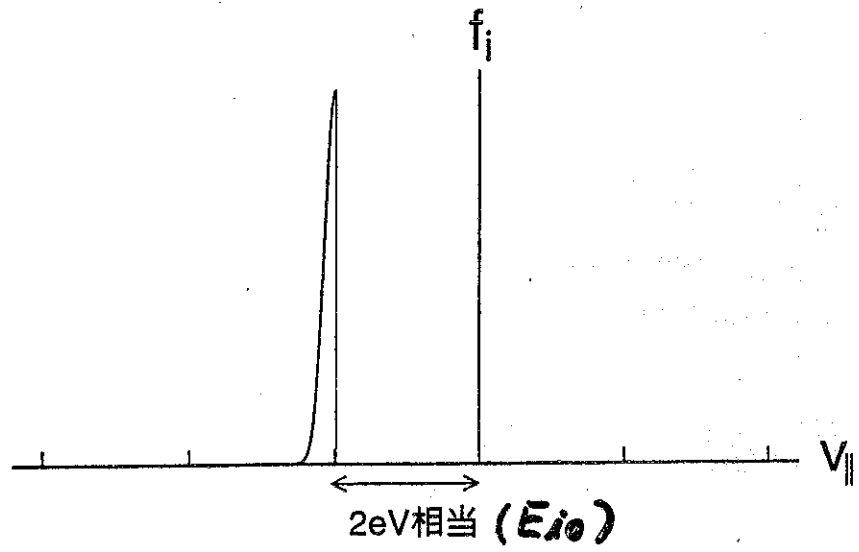
磁力線方向空間電位 ϕ 分布. $R_m = 2.40$.



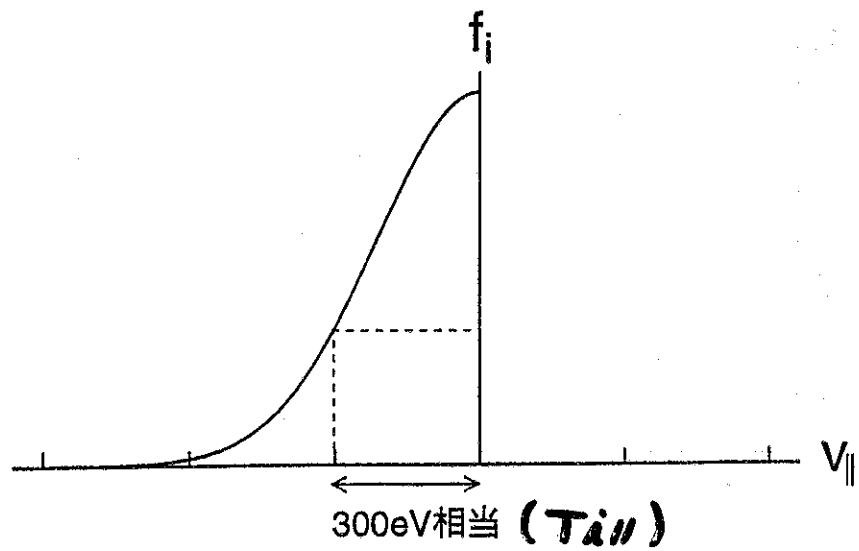
井戸ルート型磁場配位. $R_m = 1.75$.



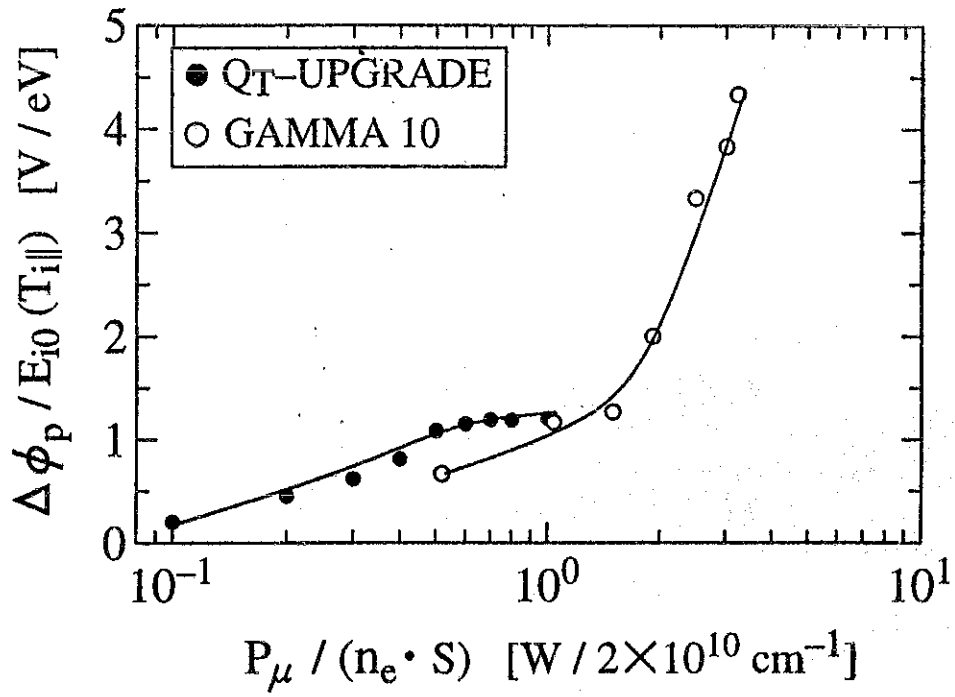
磁力線方向空間電位 ϕ 分布. $R_m = 1.75$.



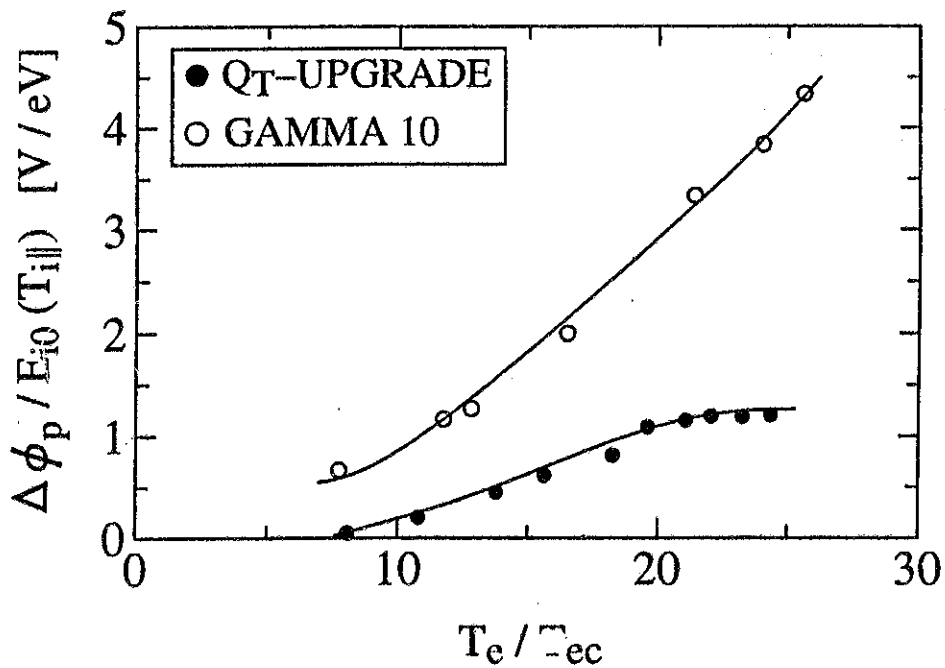
Q_T-UPGRADE MACHINEにおけるイオン分布関数 f_i .



GAMMA 10におけるイオン分布関数 f_i .

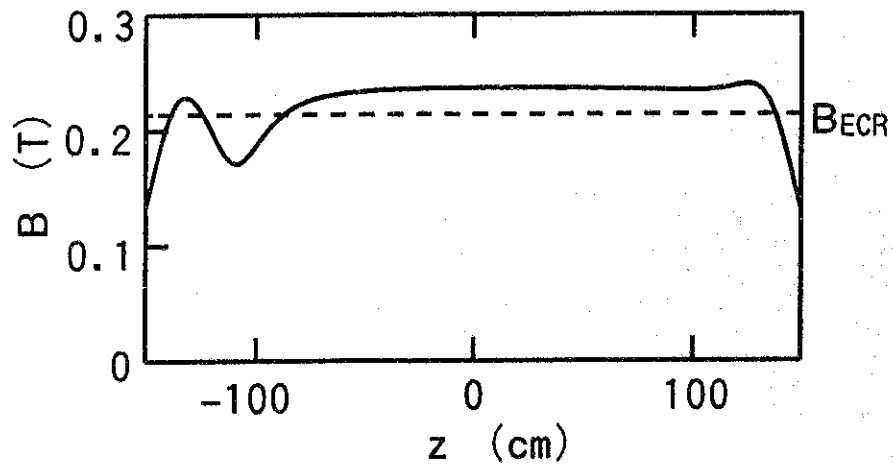
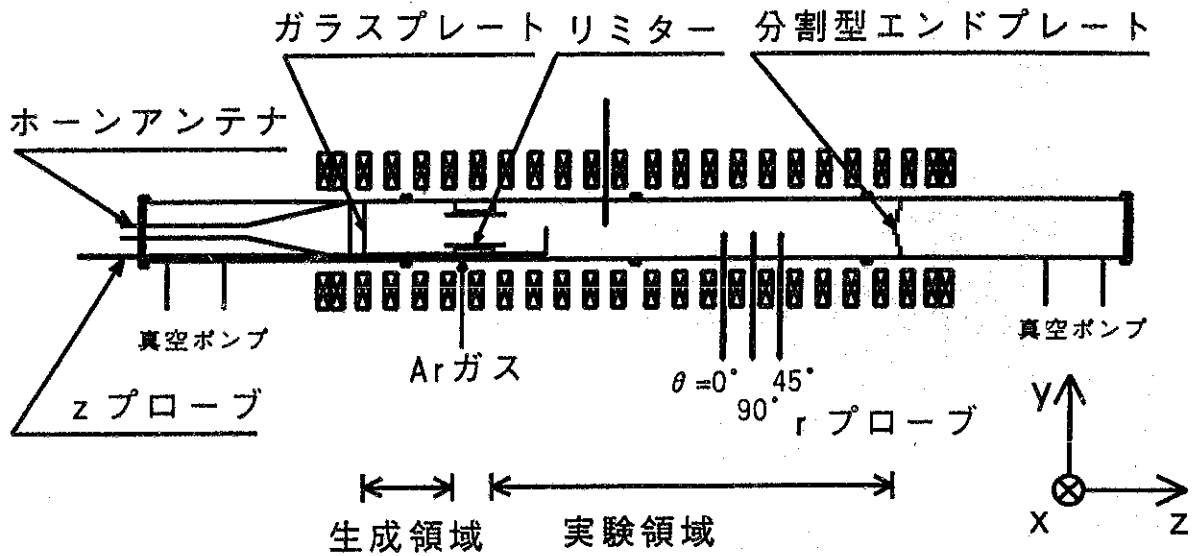


プラグ電位差 $\Delta\phi_p$ のマイクロ波入射パワー P_μ 依存性.

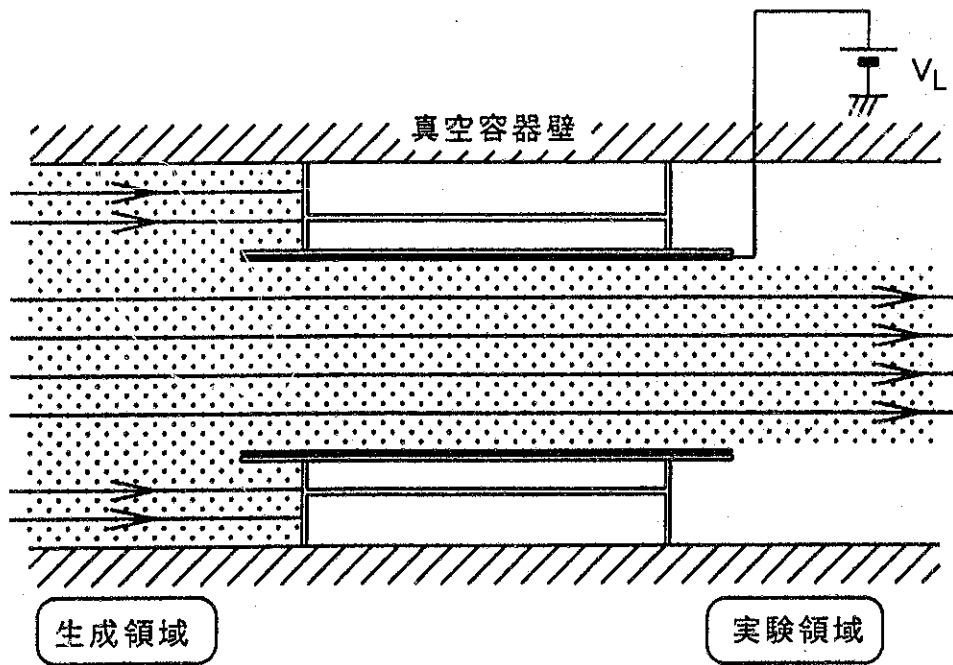
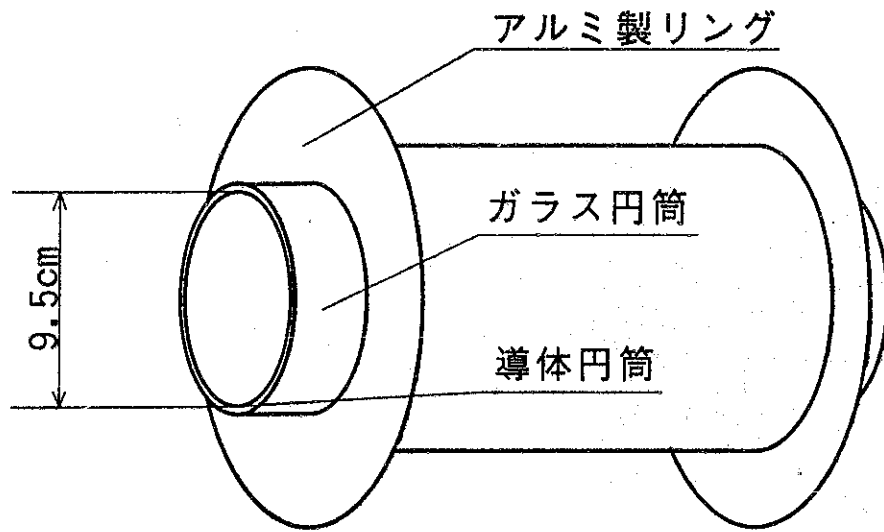


プラグ電位差 $\Delta\phi_p$ の電子温度 T_e 依存性.

Q_T-U装置 (ダイバータコイル無し) と磁場配位

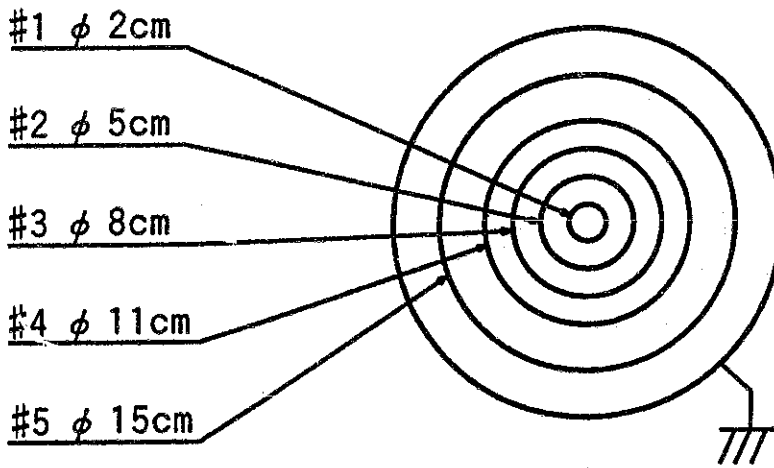


リミター

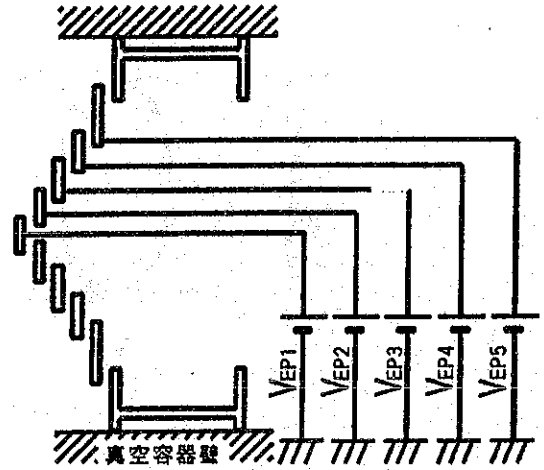


磁力線: \longrightarrow

分割型エンドプレート



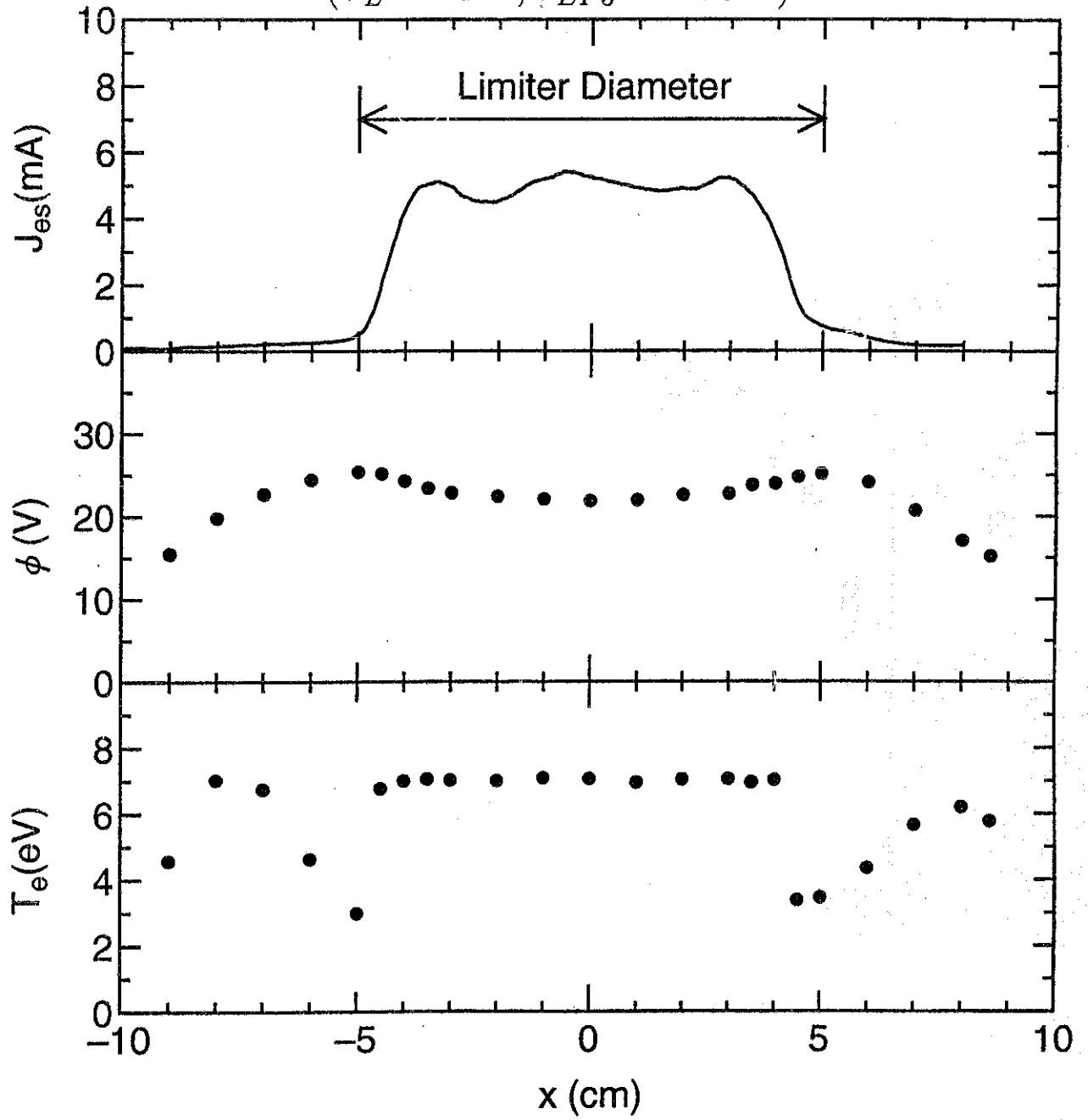
軸方向から見た図



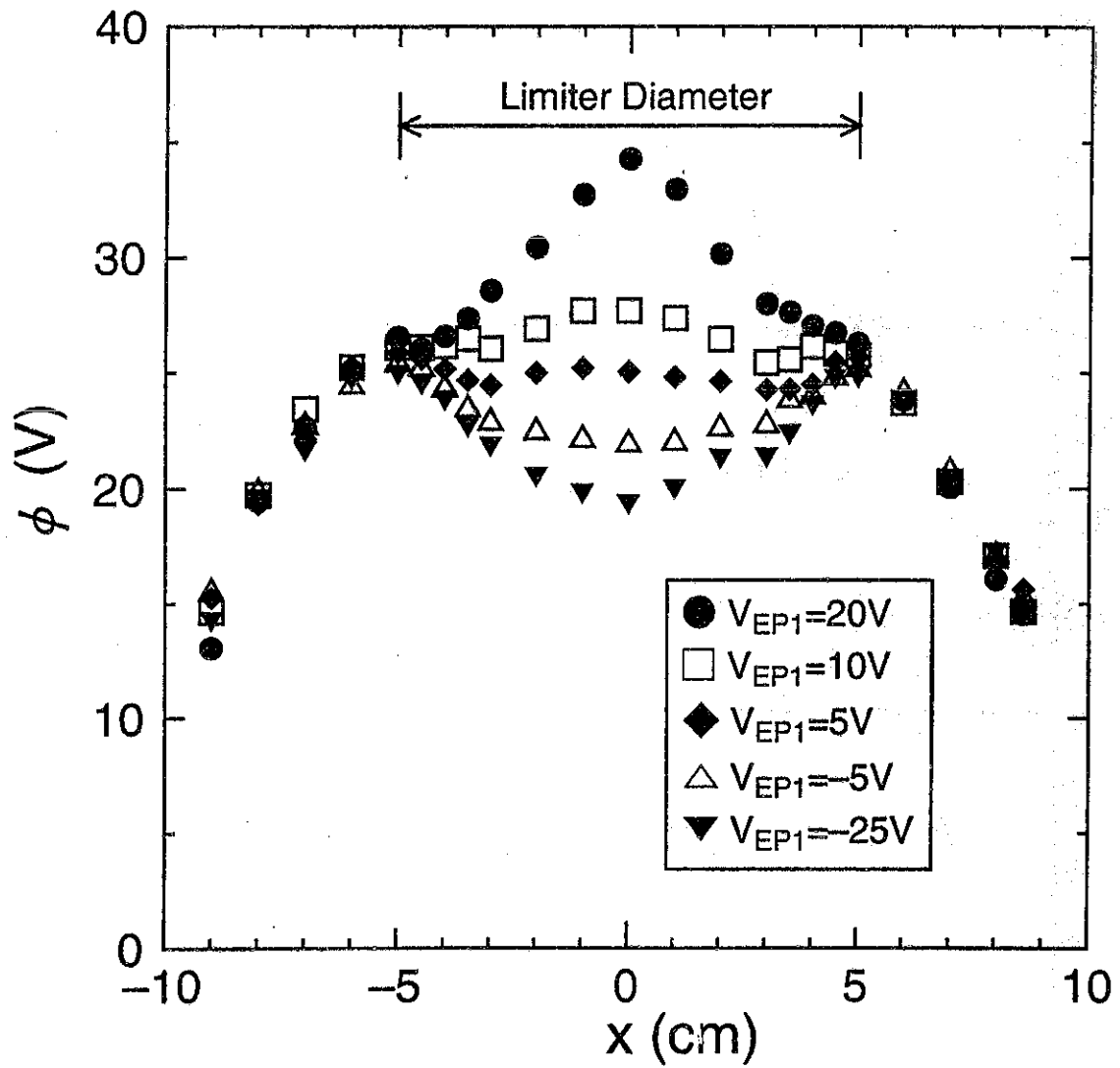
径方向から見た図

典型的プラズマの径方向分布

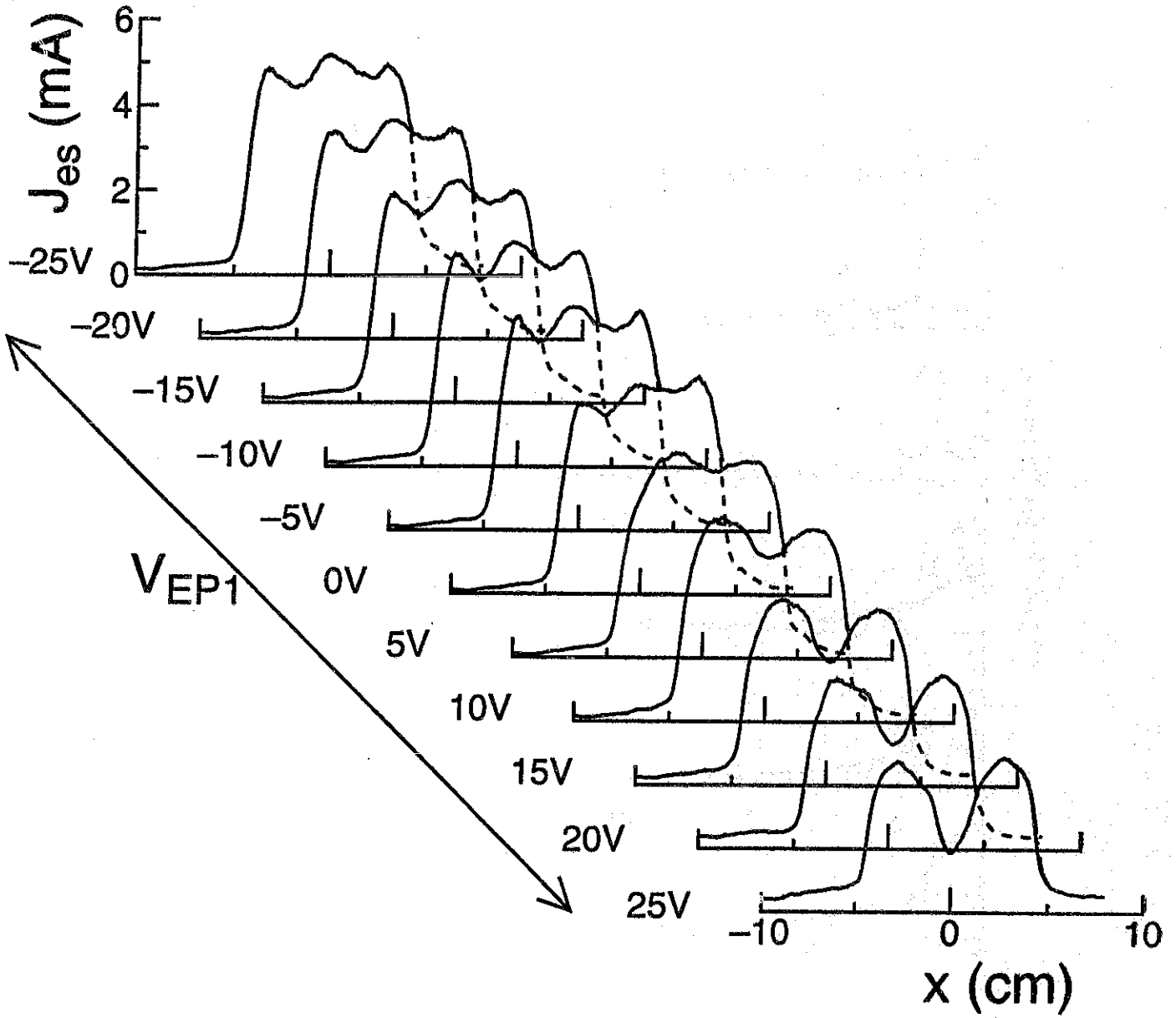
($V_L = 20 \text{ V}$, $V_{EP3} = -10 \text{ V}$)



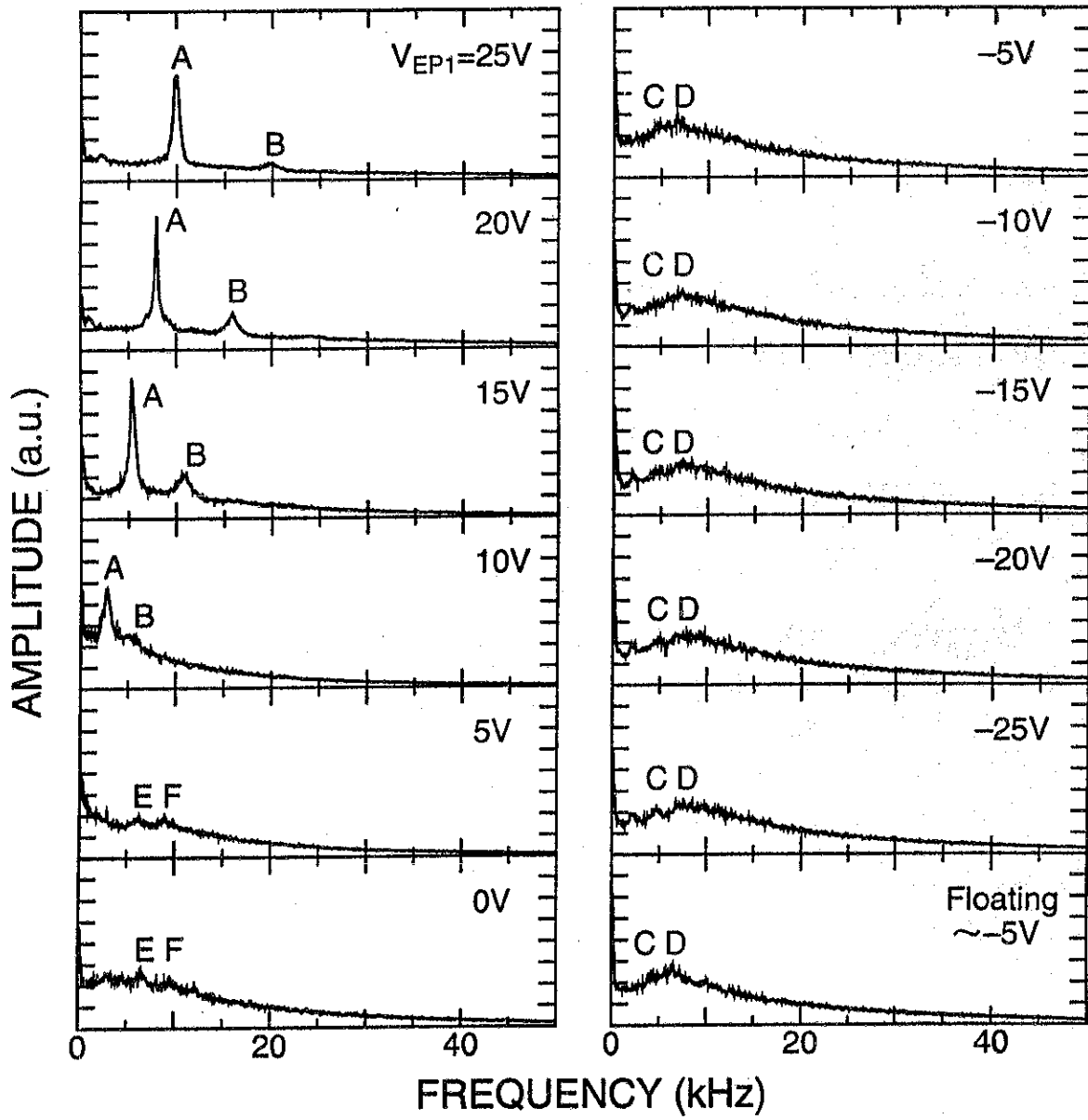
エンドプレートバイアスによる空間電位分布制御
($V_L = 20 \text{ V}$, $V_{EP3} = -10 \text{ V}$)



電子飽和電流の径方向分布の変化

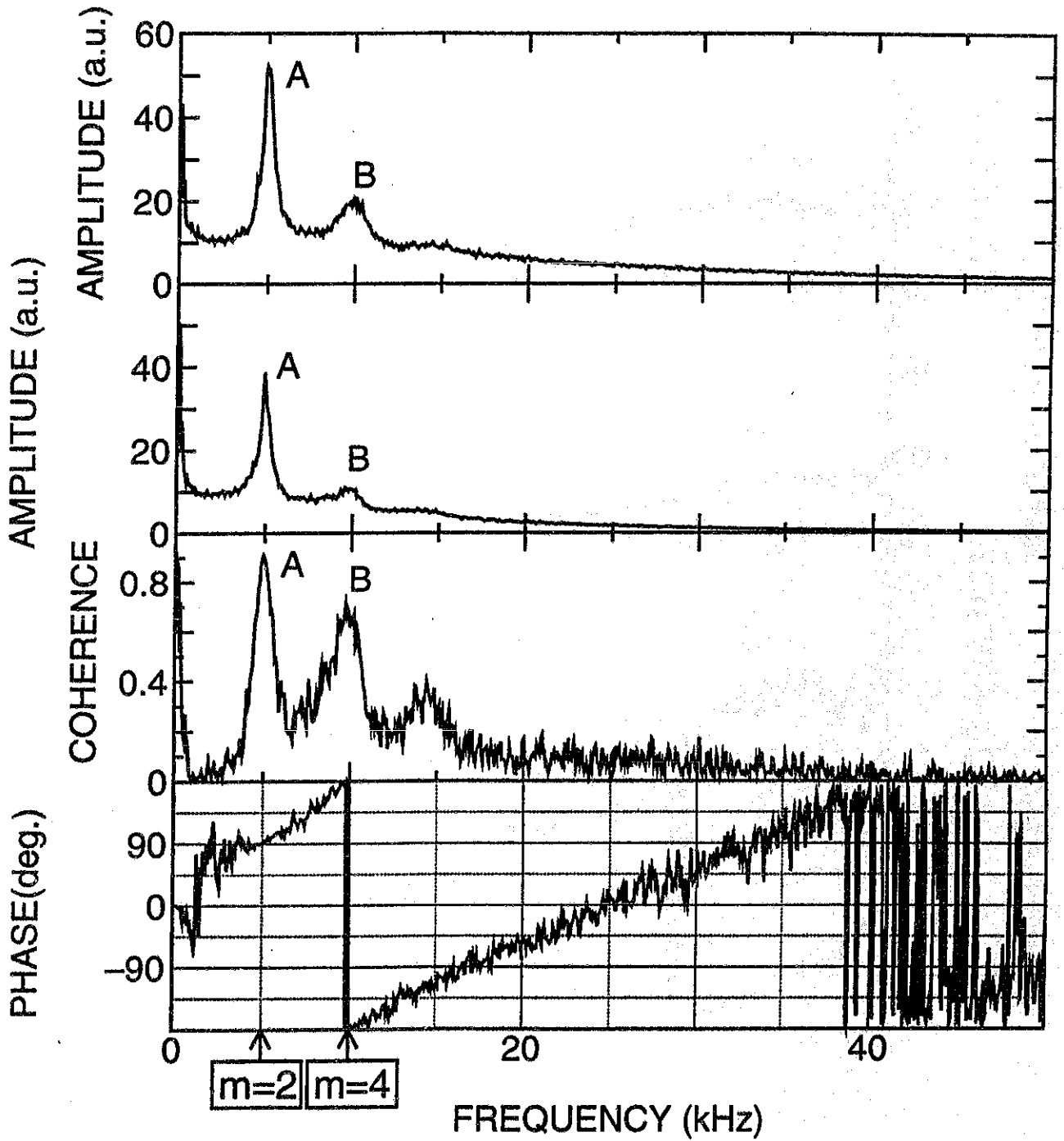


電子飽和電流揺動スペクトルのバイアスによる変化



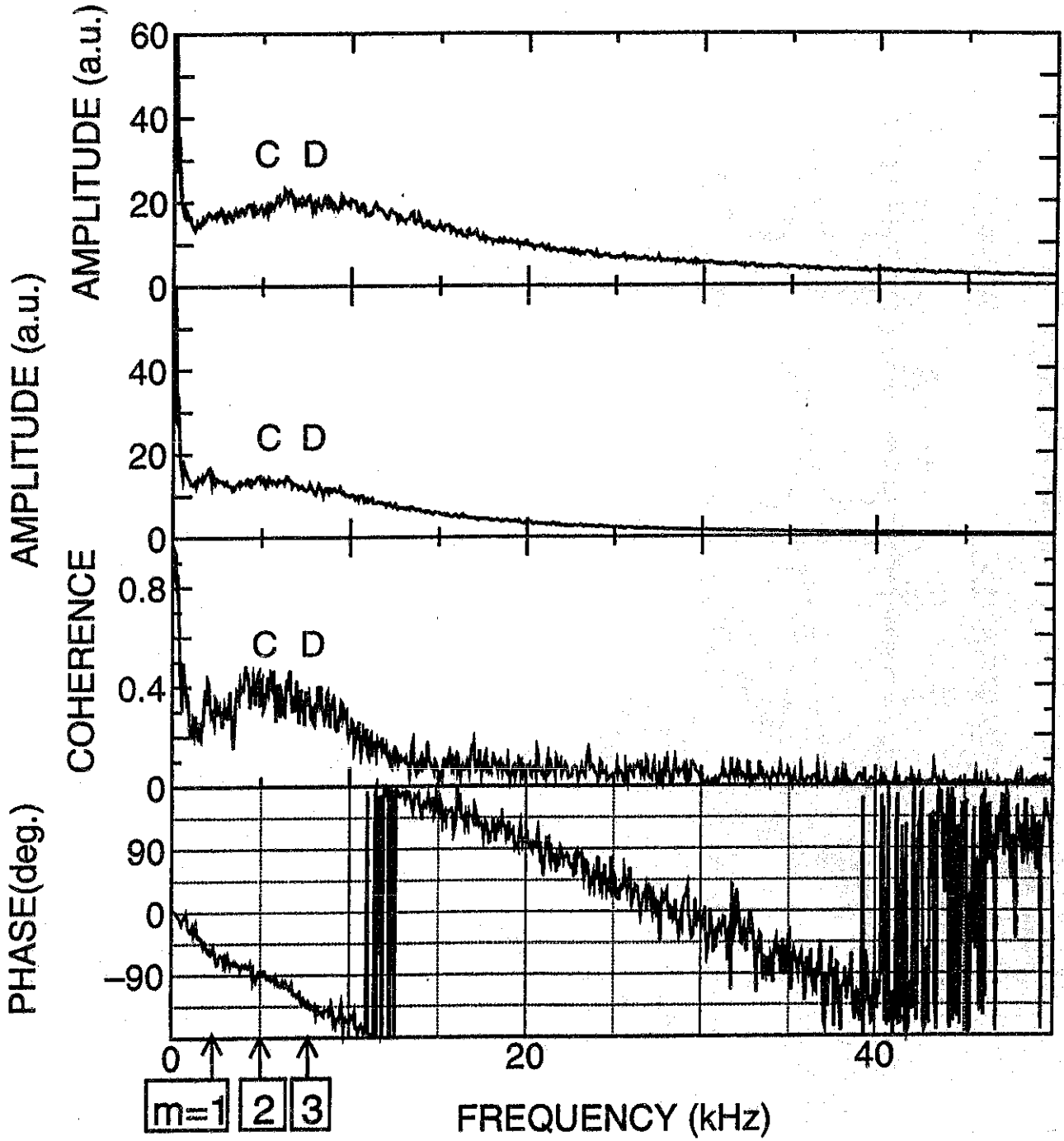
山型の電位分布の場合

($V_L = 20V$, $V_{EP1} = 13V$, $V_{EP3} = -10V$)

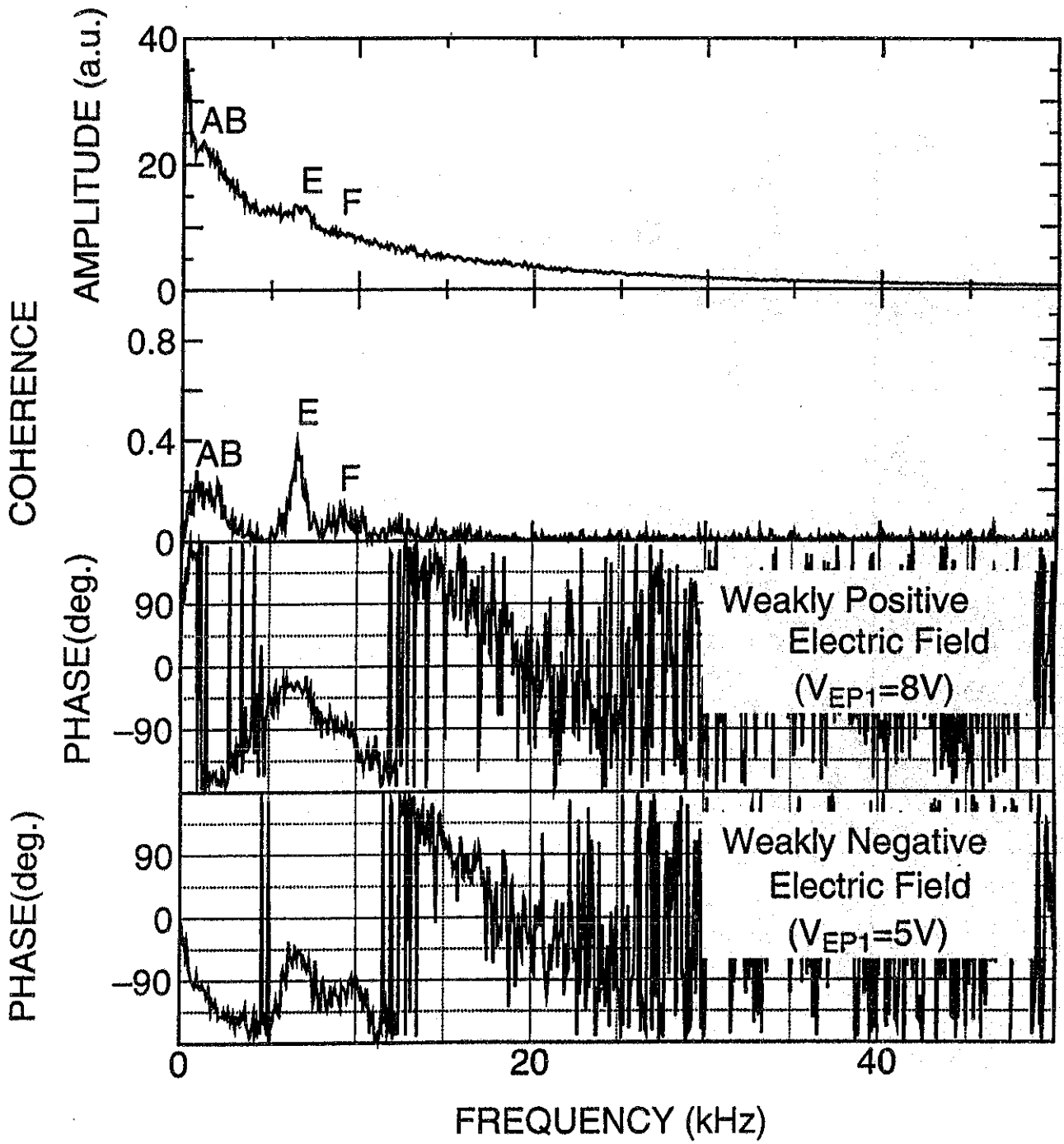


谷型の電位分布の場合

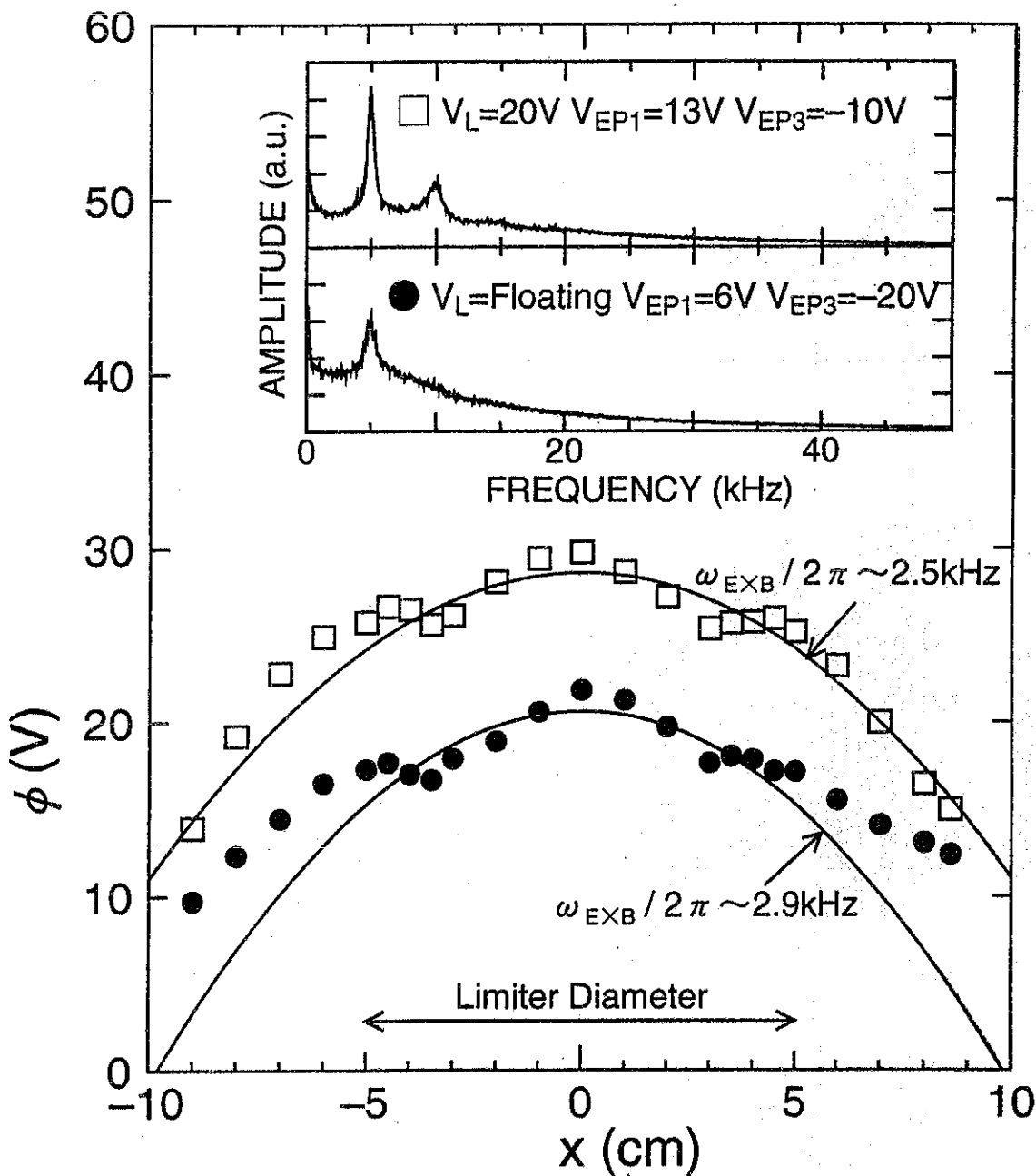
$(V_L = 20V, V_{EP1} = -20V, V_{EP3} = -10V)$



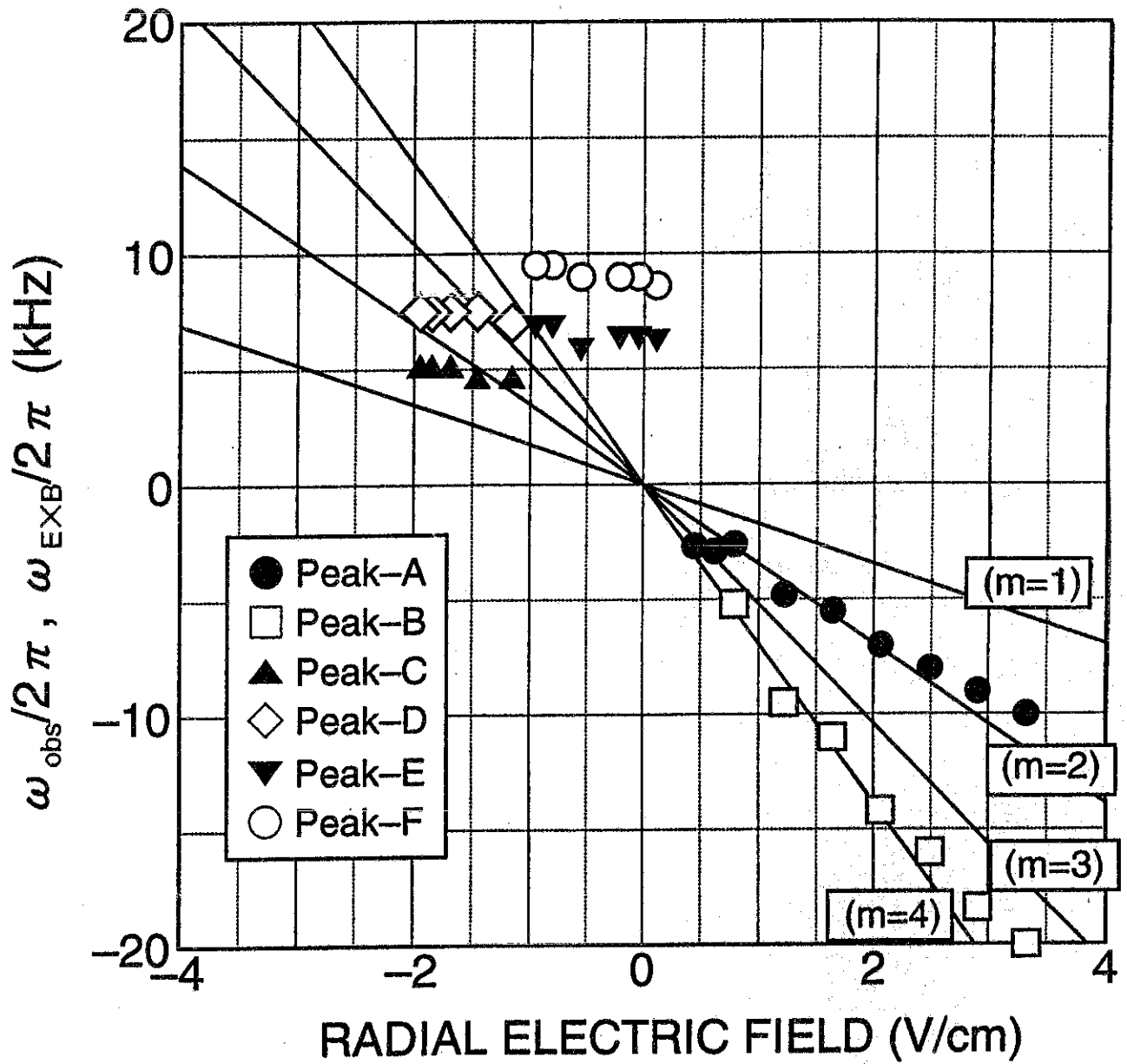
フラット型の電位分布の場合
 ($V_L = 25V, V_{EP3} = -10V$)



近い揺動周波数をもつ2つの電位分布の比較

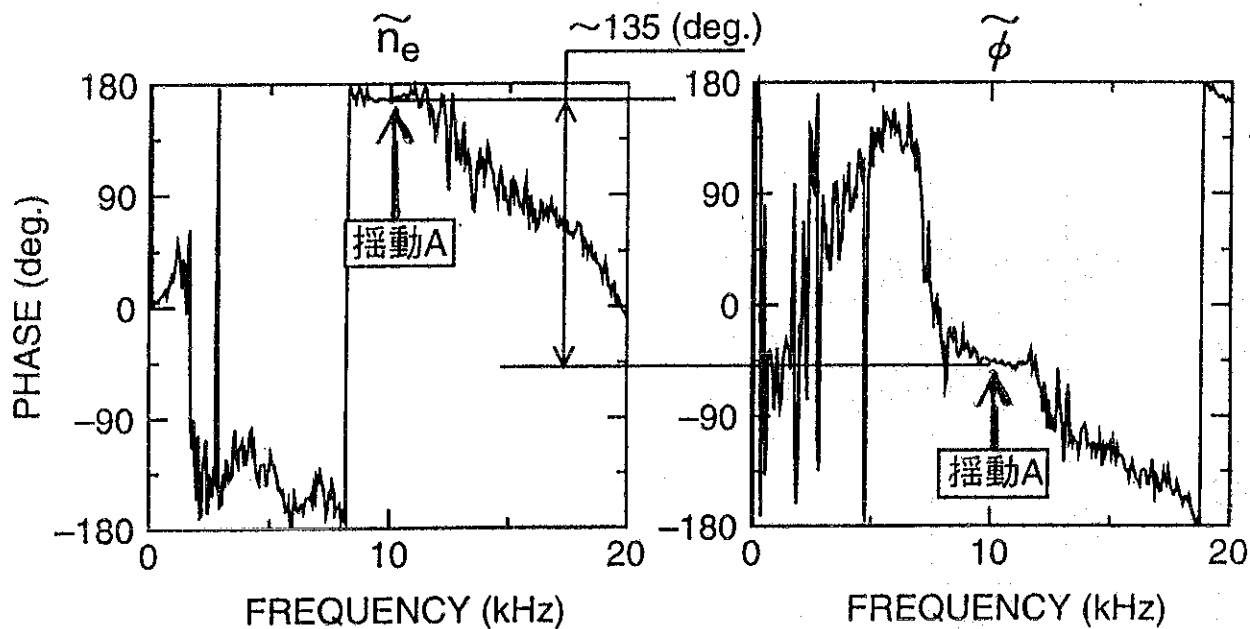


観測周波数と径方向電場の関係



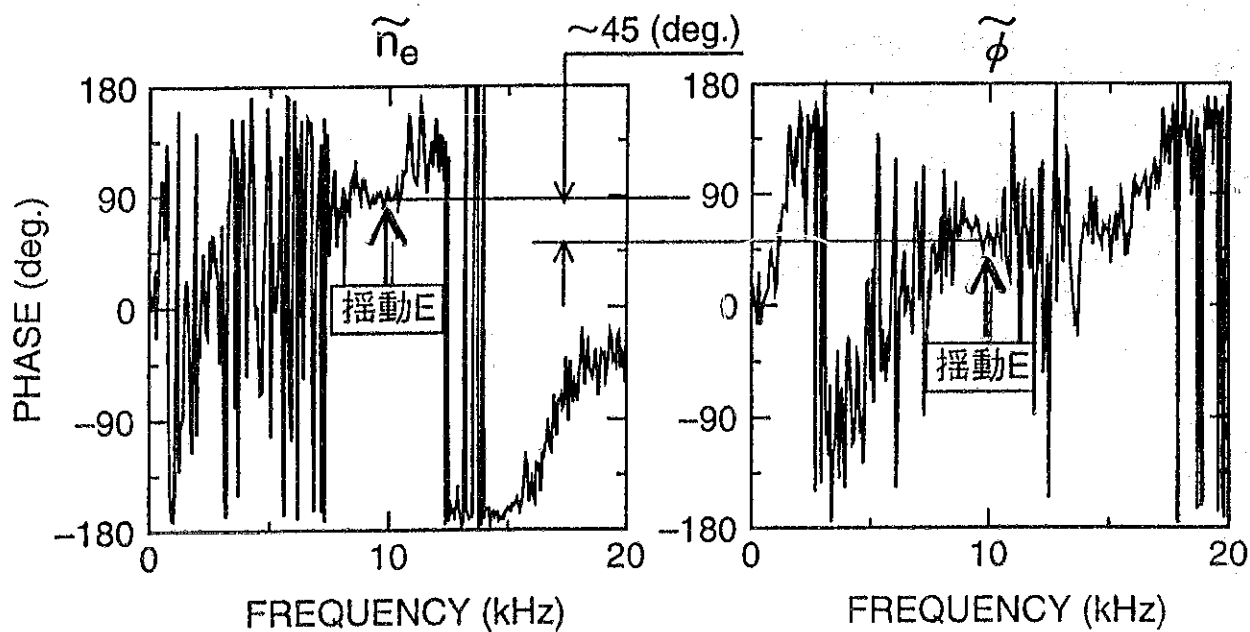
電子密度変動と空間電位変動との位相差測定

揺動 A (フルートモード) の場合



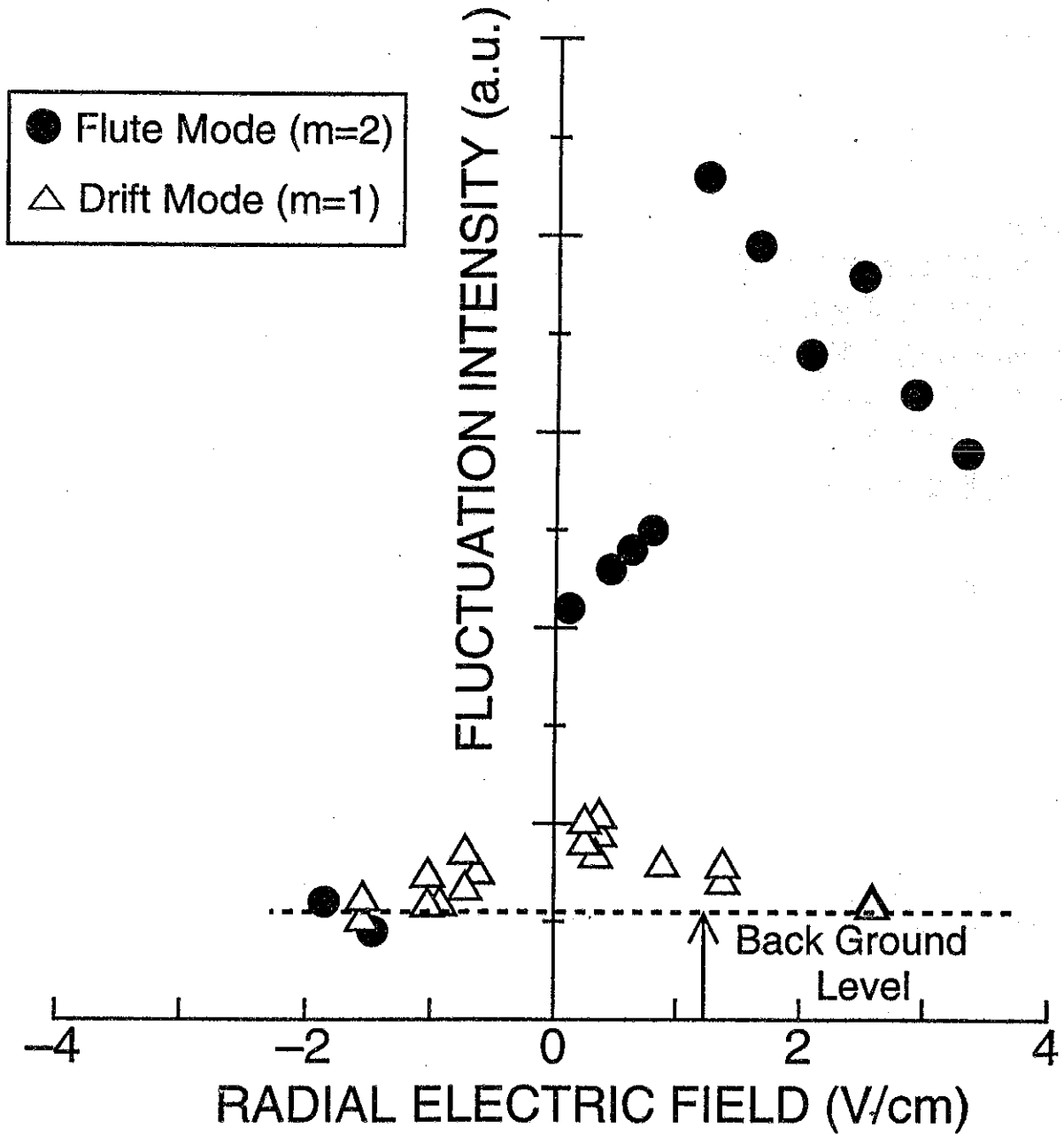
位相差 $\sim 135^\circ$

揺動 E (ドリフトモード) の場合



位相差 $\sim 45^\circ$

揺動強度の径方向電場依存性



高熱流シートプラズマによるダイバータ模擬実験

研究代表者 東海大学 河村 和孝

1. 研究課題

高温プラズマ熱粒子制御法
—高熱流シートプラズマによるダイバータ模擬実験—

2. 目的

本研究の目的は、東海大学で考案した高熱流シートプラズマ装置を利用し、核融合炉開発にとって緊急かつ本質的な問題になっているダイバータ領域の粒子輸送と熱流制御の基礎的・応用的研究を行うことである。特にLHDのダイバータ領域で発生する空間的に不均一なシート状水素プラズマのターゲットに及ぼすプラズマ粒子及び熱の輸送過程を解明し、LHDの研究に適用可能なダイバータ制御の開発を中心とした研究を行う。

1. 研究課題：高温プラズマ熱粒子制御法

－高熱流シートプラズマによるダイバータ模擬実験－

2. 目的：本研究の目的は、東海大学で考案した高熱流シートプラズマ装置を利用し、核融合炉開発にとって緊急かつ本質的な問題になっているダイバータ領域の粒子輸送と熱流制御の基礎的・応用的研究を行うことである。特にLHDのダイバータ領域で発生する空間的に不均一なシート状水素プラズマのターゲットに及ぼすプラズマ粒子及び熱の輸送過程を解明し、LHDの研究に適用可能なダイバータ制御の開発を中心とした研究を行う。

3. 研究の具体的内容

(1) 傾斜ターゲット板への熱負荷とプラズマへの影響

－高熱流シートプラズマ模擬実験及び理論解析－

(均一・不均一シートプラズマによる高温輝点の発生とシース構造の解明)

(2) 接触ガス方向の違いによるプラズマ冷却過程の解明

－ガスダイバータ模擬実験及び理論解析－

(ラジカル・負イオンを考慮したプラズマ冷却過程)

(3) 高熱流プラズマ照射による耐熱材料開発（次年度以降）

(ラジカル・負イオンなど活性粒子を含む高熱流プラズマの材料への影響)

4. 講演概要

(1) 傾斜ターゲット板への熱負荷とプラズマへの影響

この研究の目的は、ダイバータ部の熱負荷及び高温輝点の発生問題を解決するために、シートプラズマを用いた傾斜ターゲット近傍の粒子・熱の輸送過程を解明することである。今回はシートプラズマ終端部に配置した傾斜ターゲット前面のマグネティックプレシースの構造、傾斜ターゲットでの電流分布測定とプラズマへの影響を調べた。結果として(1)傾斜ターゲット全面ではマグネティックプレシースが形成され、(2)マグネティックプレシースの深さは電子温度の数倍程度、その長さはイオンのラーマ半径の数倍程度である。また(3)ターゲット板の電流分布は、中心では電子電流、周辺ではイオン電流であり、ターゲットを傾斜させることにより電流分布に不均一が生じ、電子密度・温度に影響を与えることが分かった。

今後として傾斜ターゲット前面のシース構造と熱負荷の関係を明らかにしていく予定である。

(2) 接触ガス方向の違いによるプラズマ冷却過程の解明

ダイバータ部の熱負荷を軽減するため、冷却用ガスを接触させプラズマを急激に冷却するガスダイバータが考えられている。しかしその際発生するDetached Plasmaの物理機構や冷却ガスの逆流対策など未解決な問題がある。ここでは高熱流シートプラズマに局所的にガスを接触させ、Detached Plasmaを安定化させるとともに、その物理機構の解明を目的としている。今回はシートプラズマ・ガス直交システムを用いオプトガルパノ法により酸素負イオンの計測を行った。結果として(1)電子温度の低いシートプラズマの周辺に酸素負イオンが生成された。また(2)プラズマの上部と下部ではOGシグナル波形が異なり、ガスを接触させるプラズマの下部では、解離性付着による原子の負イオンの生成が、一方、プラズマを通過した上部では、電子付着による分子の負イオンの生成が主に起こっていると考えられる。今後は水素ガスを用い水素負イオンにおいて同様な実験を行う予定である。

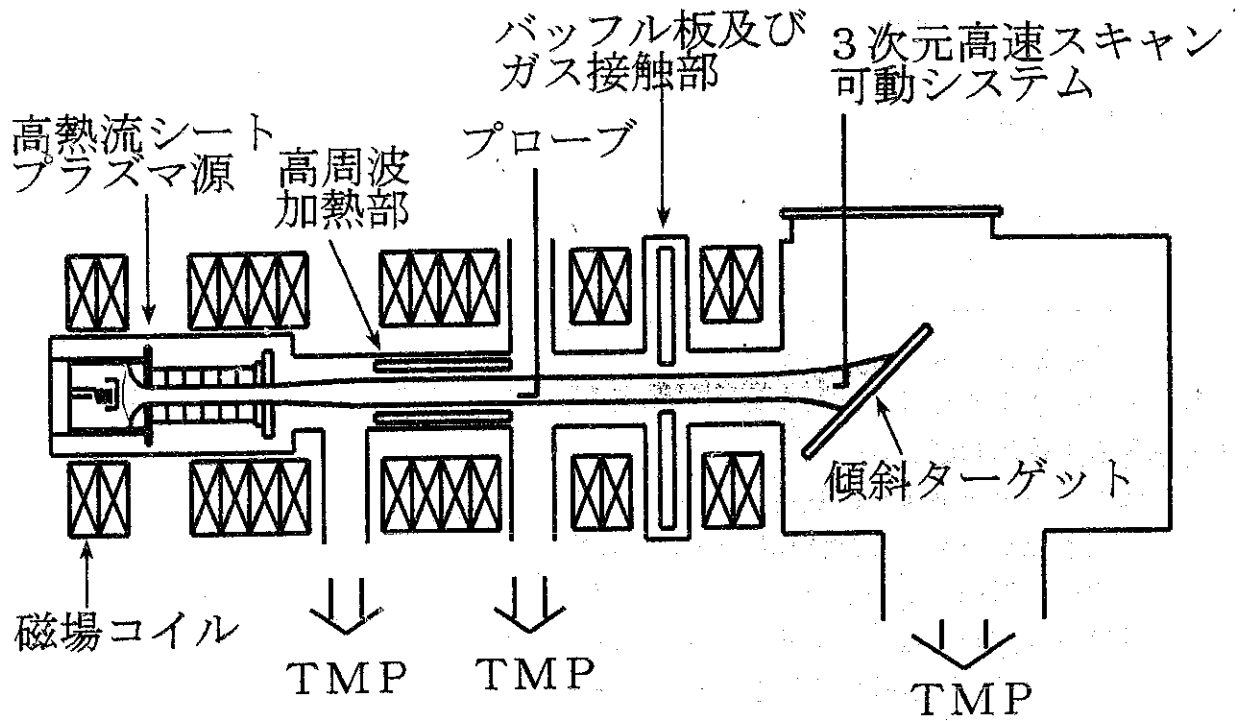


図1. 高熱流シートプラズマ装置の概略図

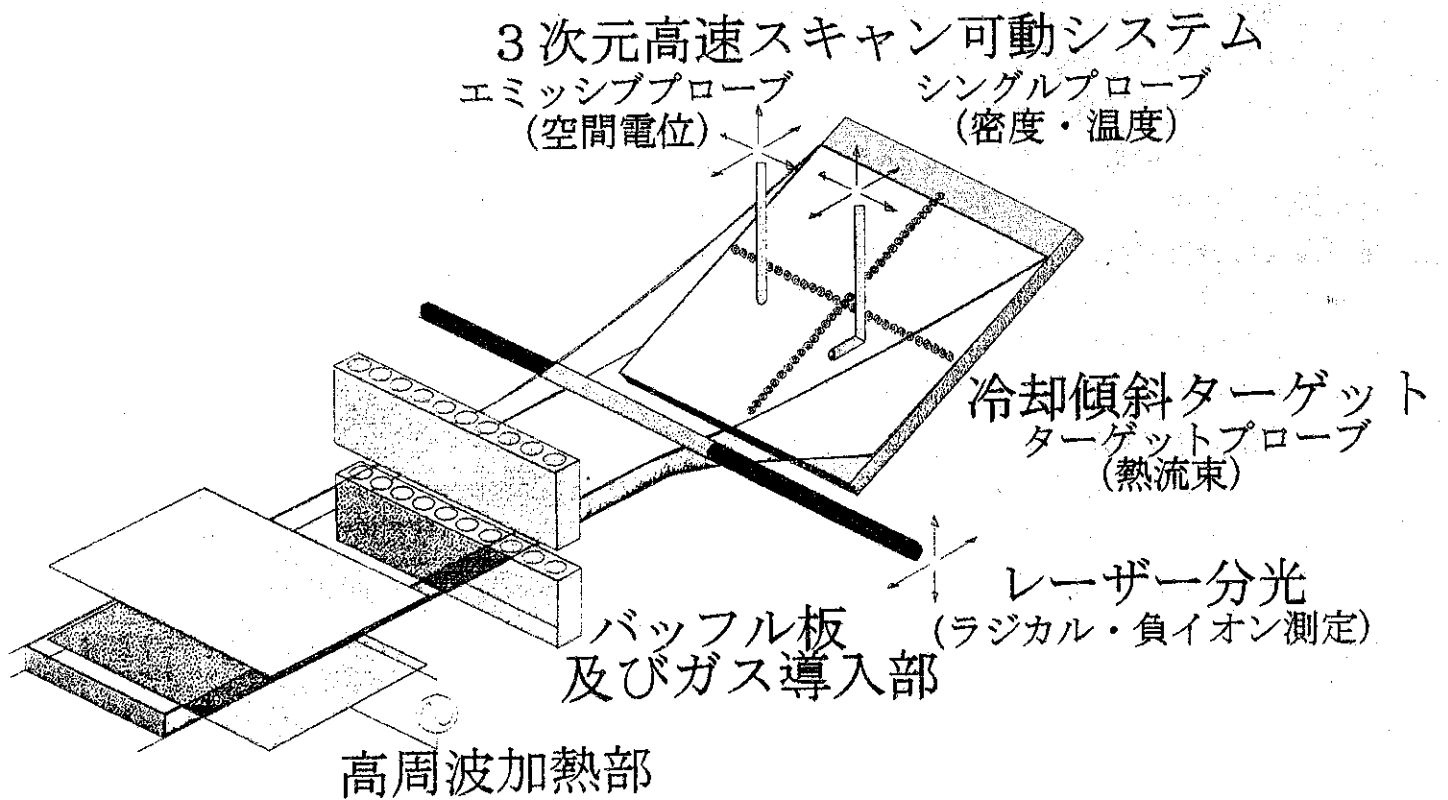
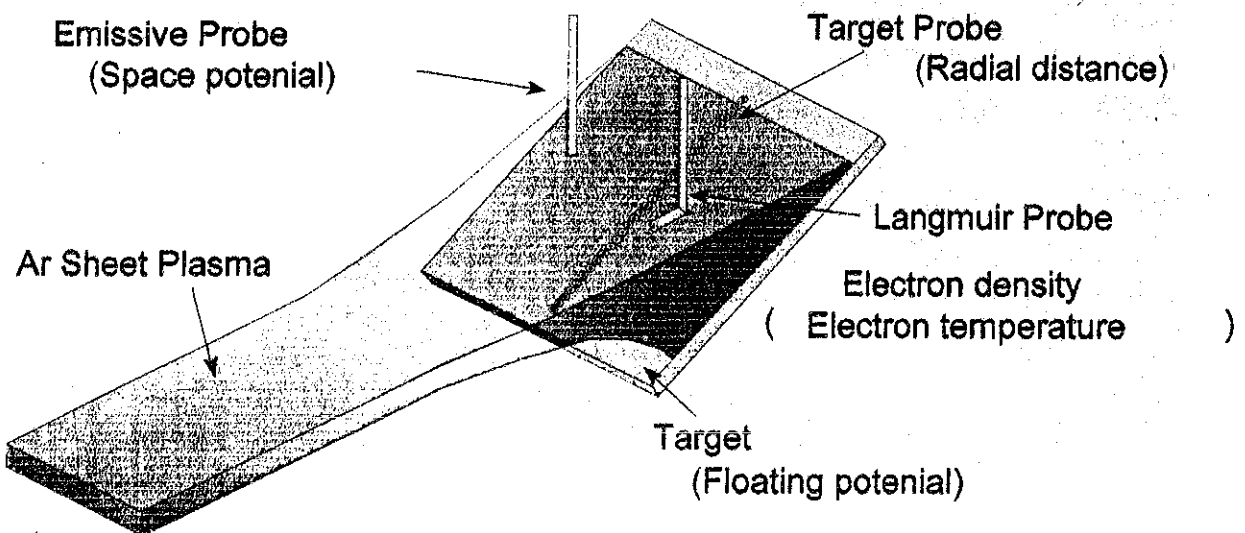
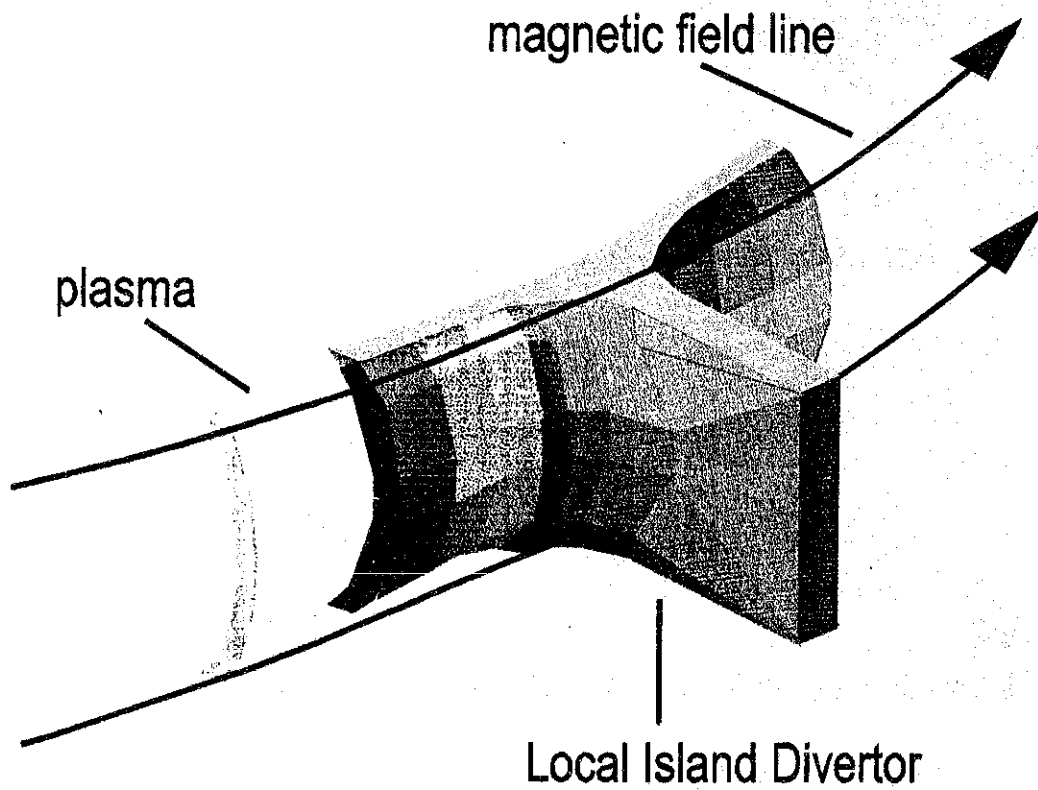
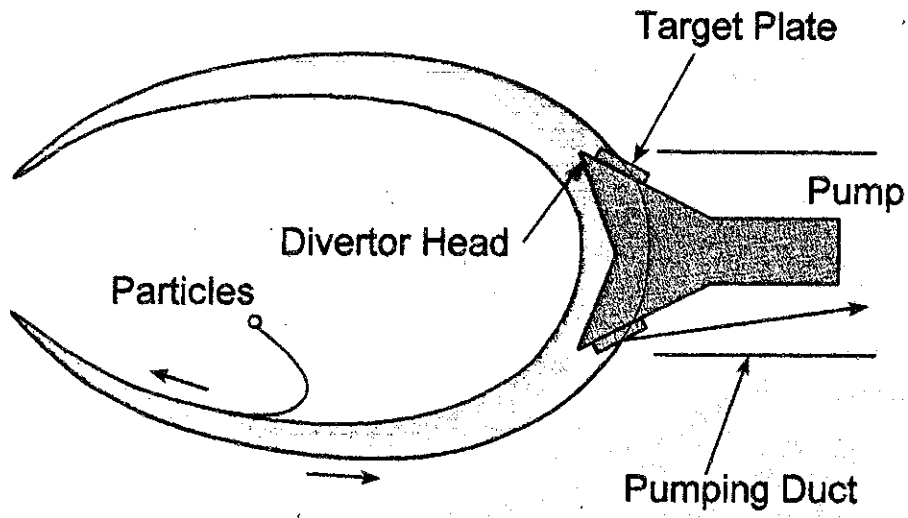


図2. ダイバータ模擬実験概念図



研究の指針・評価[高山・大藪]

理論解析 [渡辺・佐藤]

3次元高速スキャン可動システム

エミッシブプローブ (空間電位)
[利根川]

シングルプローブ (密度・温度)
[利根川]

逆流測定
バッフル板
及びガス導入部
[河村・利根川]

耐熱材料開発
[石野・西・松下]
ダストプラズマ
[進藤]

冷却用傾斜ターゲット
ターゲットプローブ (熱流束)
[鈴木・利根川]

周辺プラズマ・レーザー分光
(ラジカル・負イオン測定)
[進藤・利根川]

高周波加熱部 [矢部・三重野]

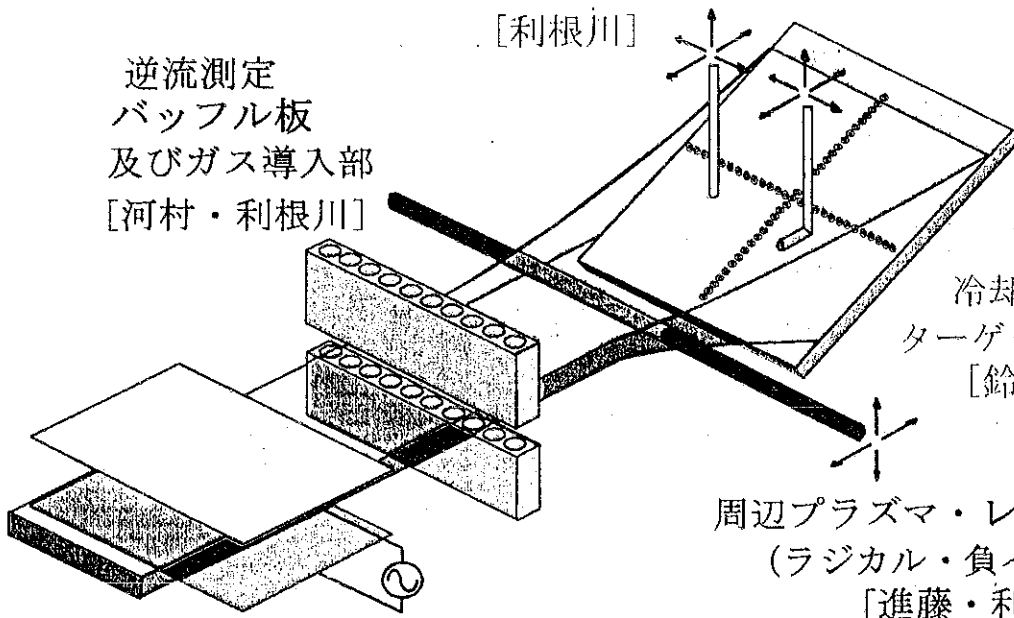


図. ダイバータ模擬実験概念図

4. 研究組織

(合計13名: nifs 3名、東海大 8名、姫路工大 1名、静大 1名)

河村和孝	東海大学	開発技術研究所・教授	研究の総括
高山一男	東海大学	名誉客員教授・教授	研究の指針
大藪修義	核融合科学研究所	・教授	研究の評価
渡辺二太	核融合科学研究所	・教授 (世話人)	ダイバータ領域の理論解析
鈴木 肇	核融合科学研究所	・助手	模擬実験装置の設計
佐藤邦弘	姫路工大	工学部・助手	シース構造の理論解析
矢部栄二	東海大学	開発技術研究所・教授	荷電粒子計測、分光
進藤春雄	東海大学	応用物理学科・教授	ラジカル・負イオン計測
三重野哲	静岡大学	理学部物理学科・助教授	高周波加熱、熱流速測定
利根川昭	東海大学	理学部物理学科・講師	高熱流シートプラズマ生成
西 義武	東海大学	金属材料工学科・教授	材料開発
松下純一	東海大学	工業化学科・講師	材料開発、熱流束測定
石野 栞	東海大学	原子力工学科	材料開発・評価

3. 研究の具体的内容

- (1) 傾斜ターゲット板への熱負荷とプラズマへの影響
—高熱流シートプラズマ模擬実験及び理論解析—
(均一・不均一シートプラズマによる高温輝点の発生と
シース構造の解明)
- (2) 接触ガス方向の違いによるプラズマ冷却過程の解明
—ガスダイバータ模擬実験及び理論解析—
(ラジカル・負イオンを考慮したプラズマ冷却過程)
- (3) 高熱流プラズマ照射による耐熱材料開発 (次年度以降)
(ラジカル・負イオンなど活性粒子を含む高熱流プラズマの
材料への影響)

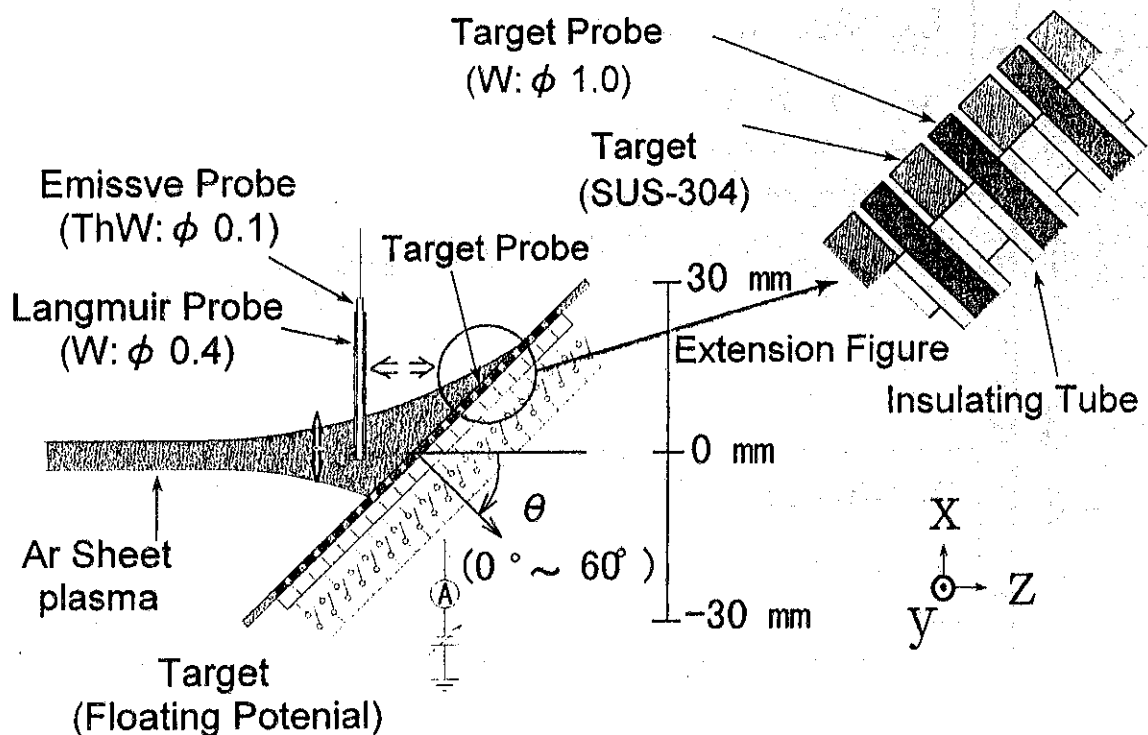


図 測定システムの概略図

マグネティックプレシースの形成

$I_d=16A, X=0mm$

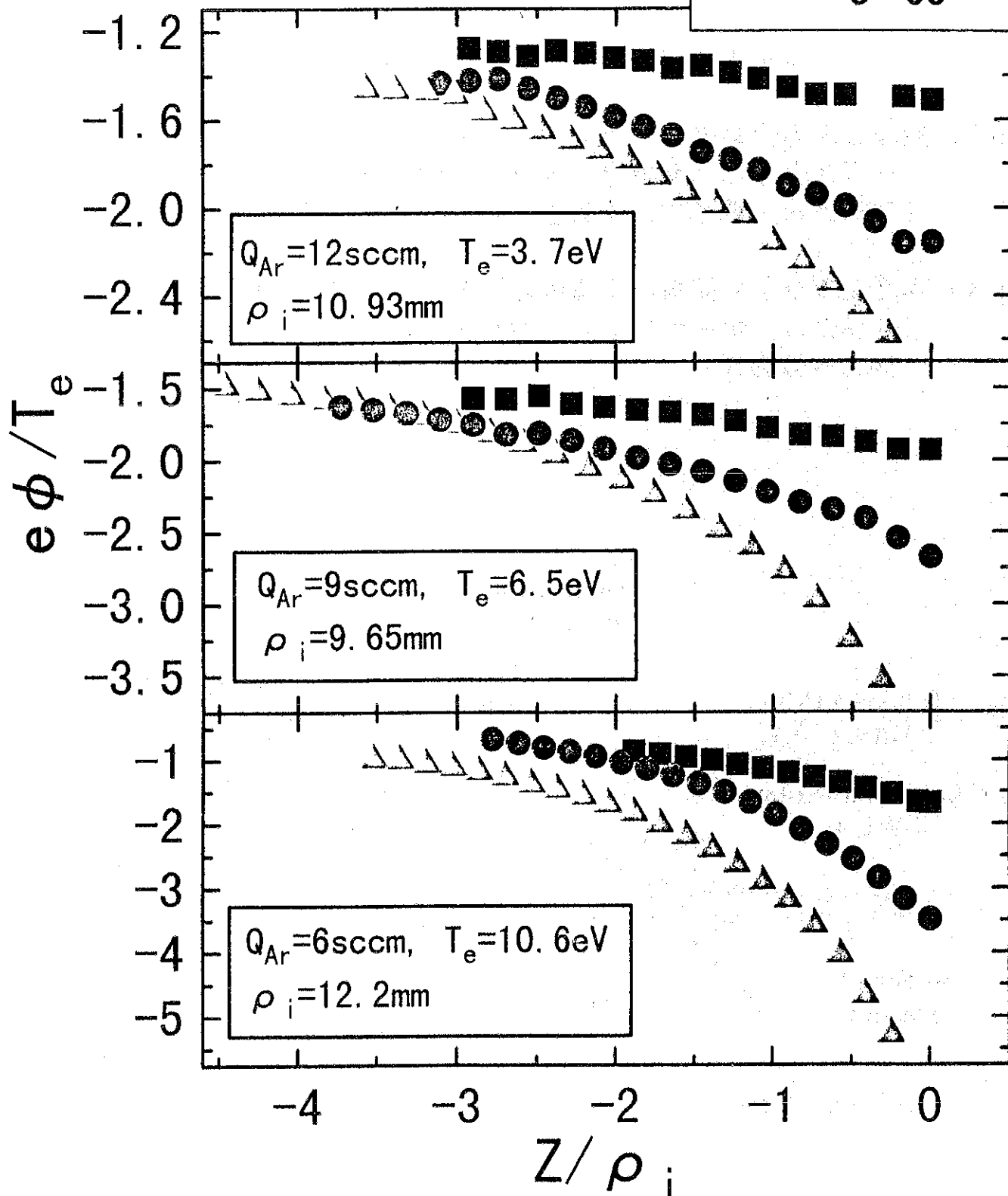
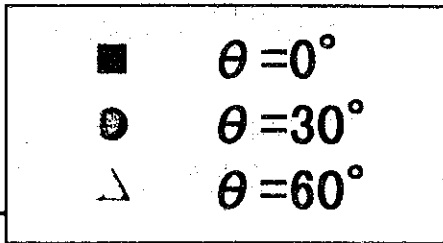
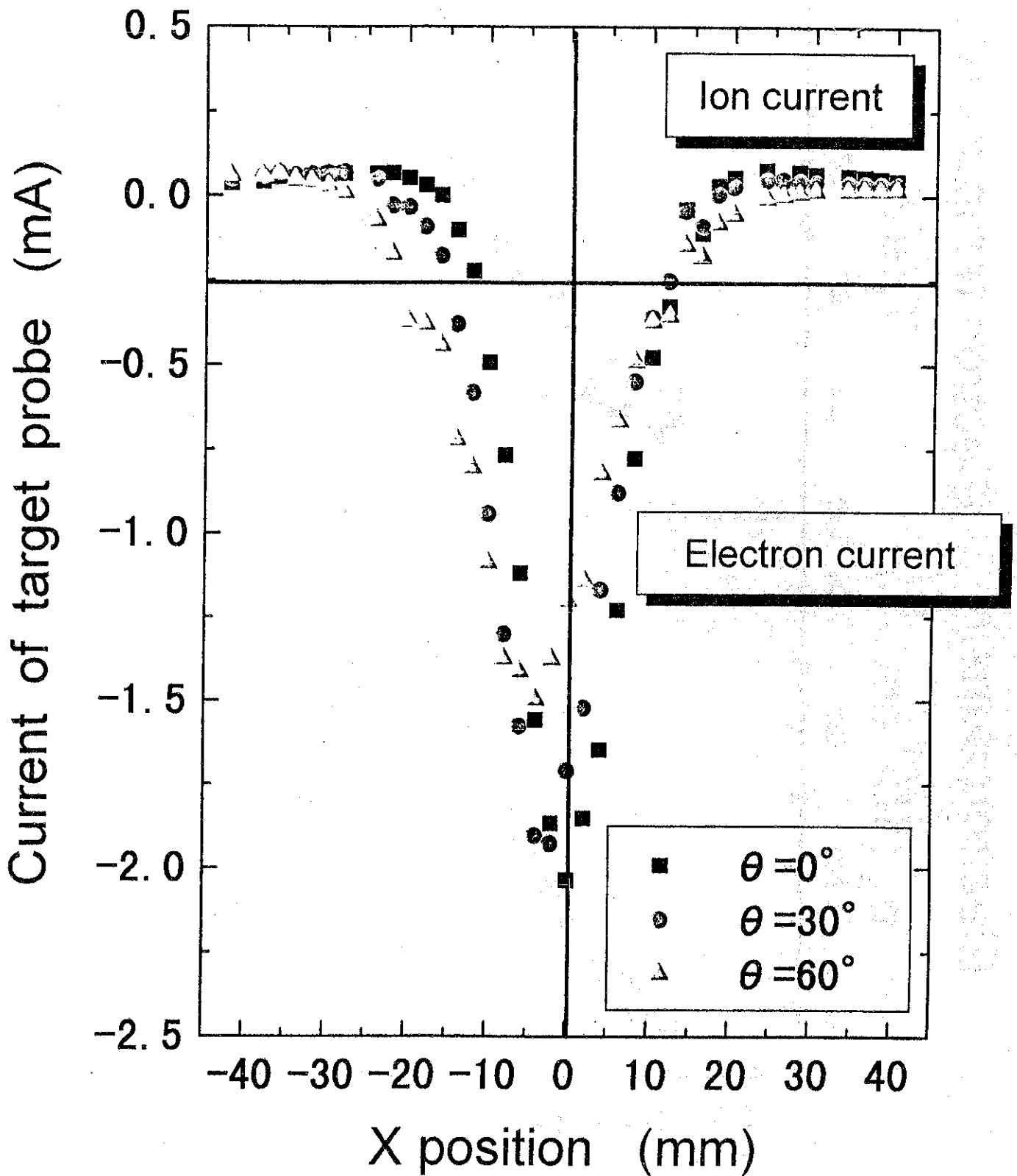


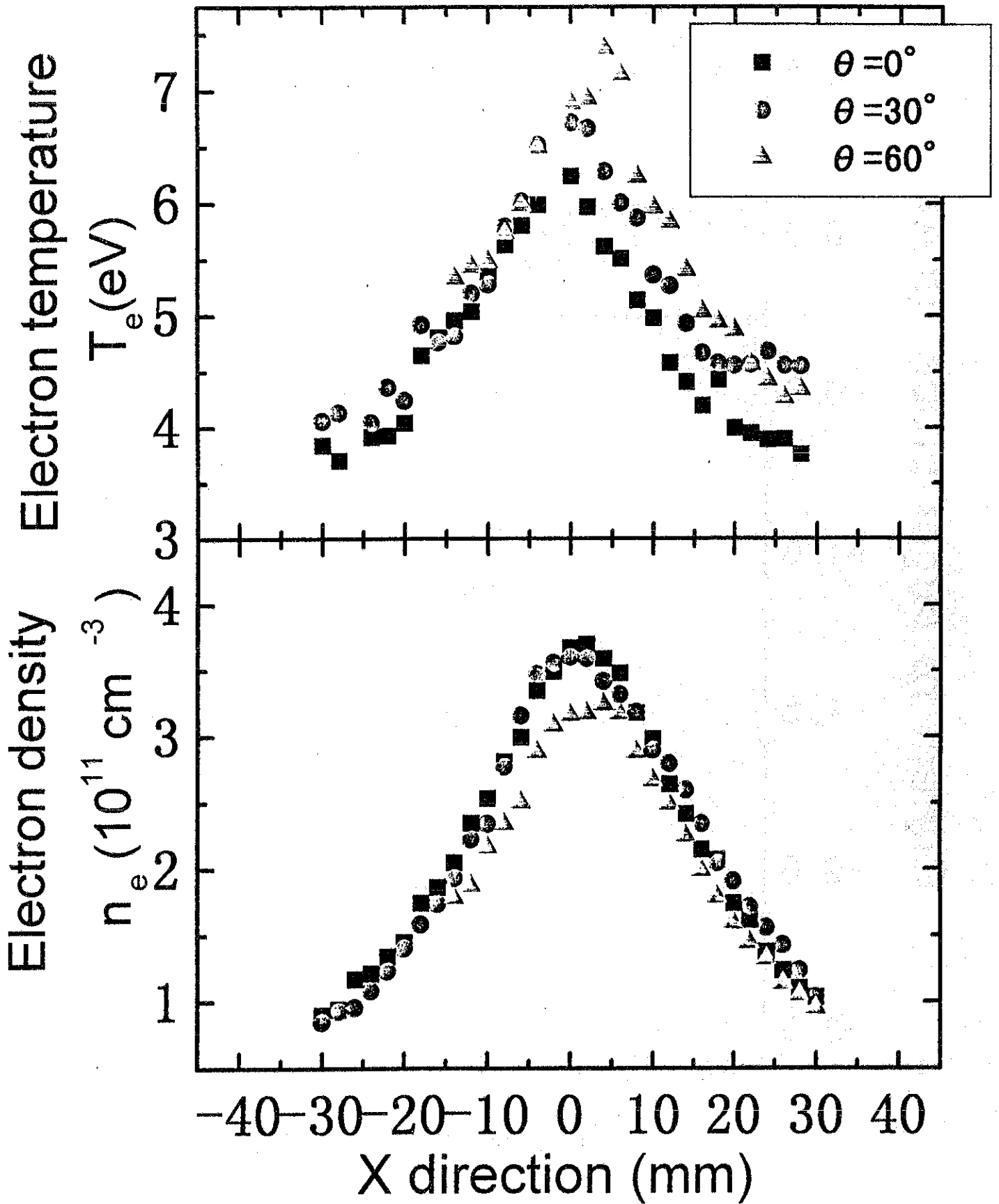
図 Z方向に対する電位分布

$I_d = 16A, Q_{Ar} = 12sccm$



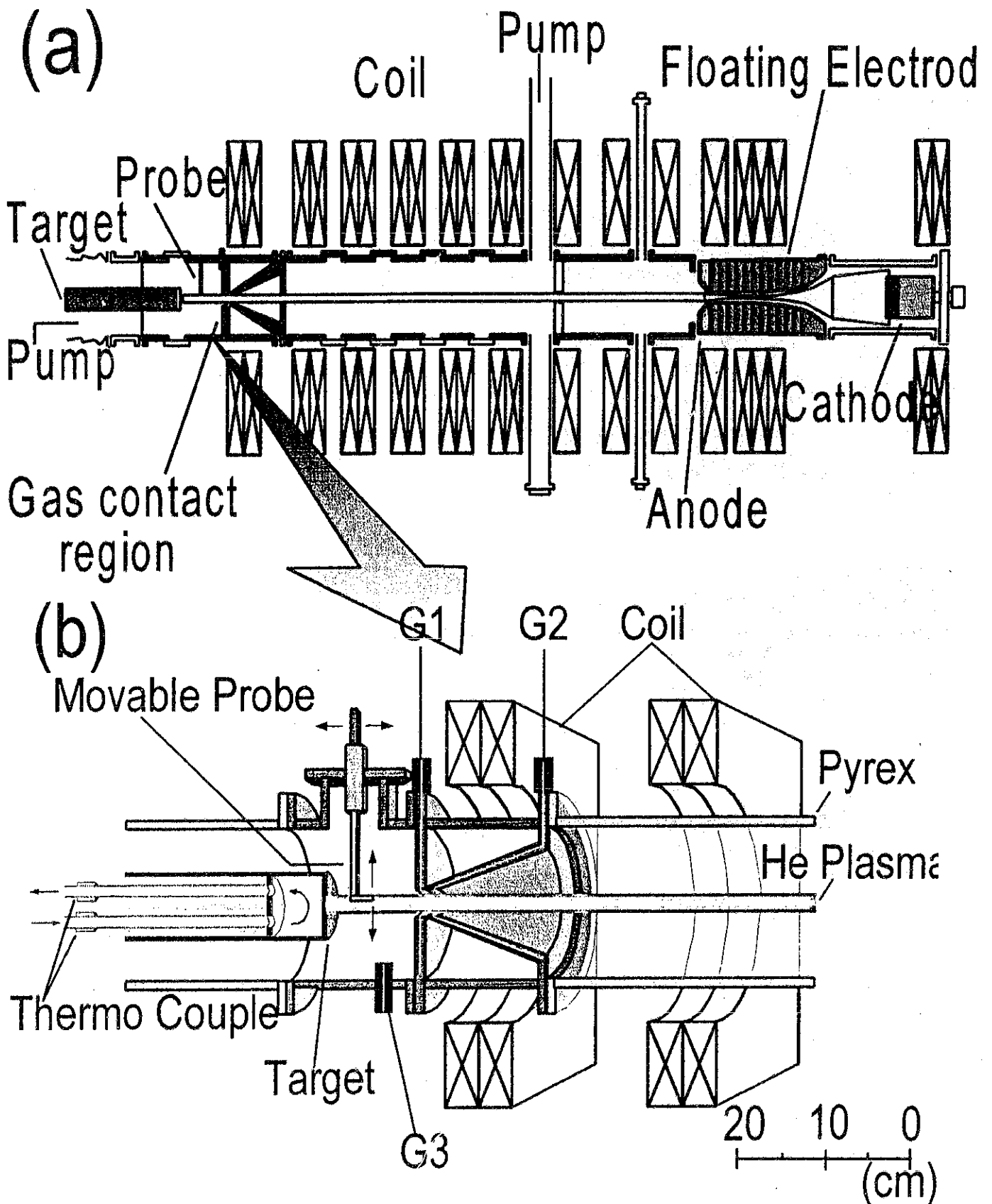
ターゲットに流れる電流分布

$I_d=16A, Q_{Ar}=12sccm, Z=-55mm$



Z=-55mmにおけるシートプラズマの厚さ方向の電子密度、電子温度分布

TPD共同研究（核融合科学研究所）



(1) 傾斜ターゲット板への熱負荷とプラズマへの影響

ダイバータ部の熱負荷及び高温輝点の発生問題



シート状プラズマを用いた傾斜ターゲット近傍の粒子・熱の輸送過程



傾斜ターゲット前面のマグネティックプレシースの測定

ターゲット上での電流分布測定とプラズマへの影響

[まとめ]

(1) 傾斜ターゲット全面ではマグネティックプレシースが形成

(2) マグネティックプレシースの深さは電子温度の数倍程度

長さはイオンのラーマ半径の数倍程度

(3) ターゲット板の電流分布は、中心が電子電流、周辺はイオン電流

傾斜させると電流分布に不均一、電子密度・温度に影響



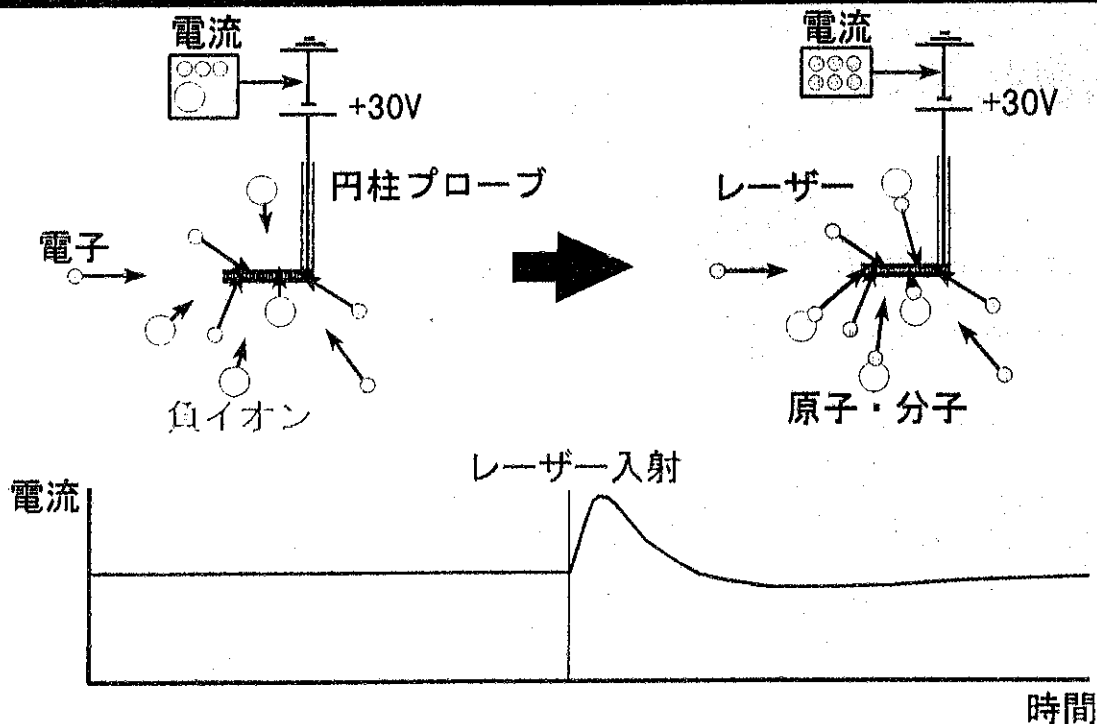
ターゲットの熱負荷に影響

(1) 一様磁場中での、マグネティックプレシースの形成機構の解明

(分極ドリフト効果、イオンのラーマ半径効果)

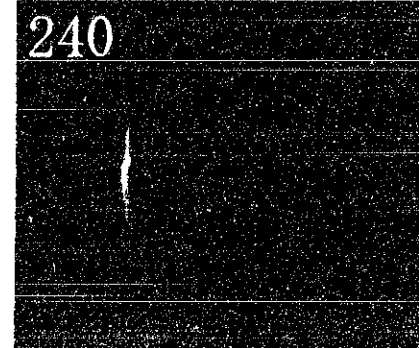
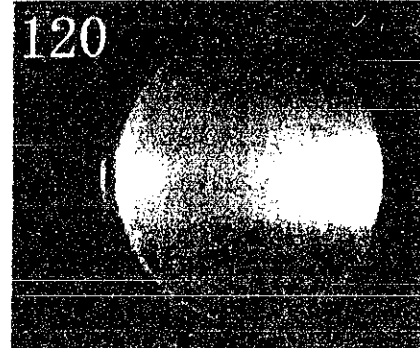
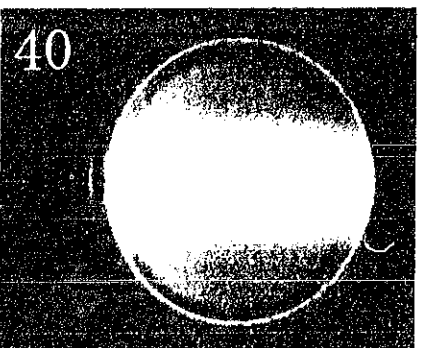
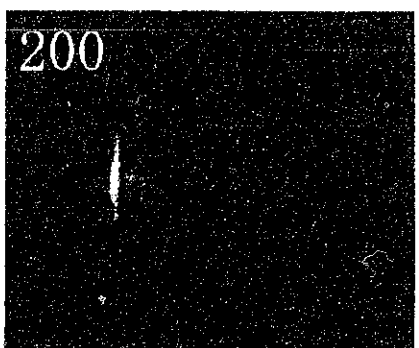
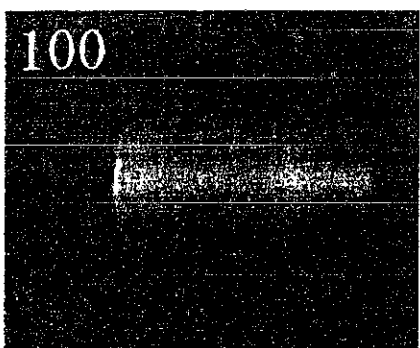
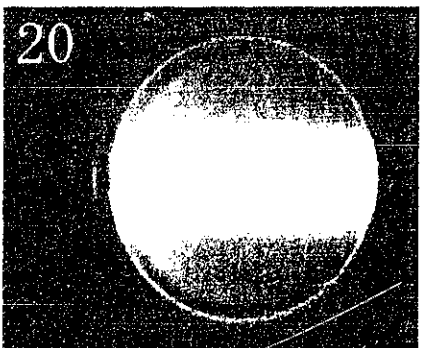
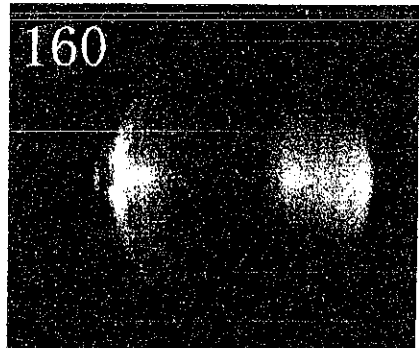
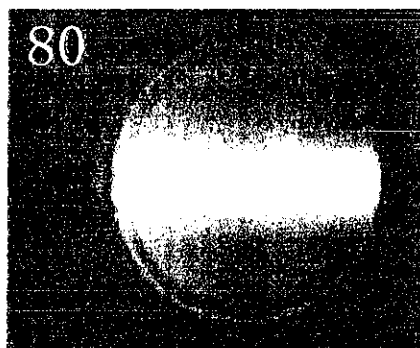
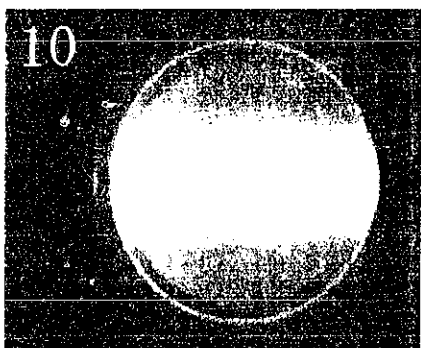
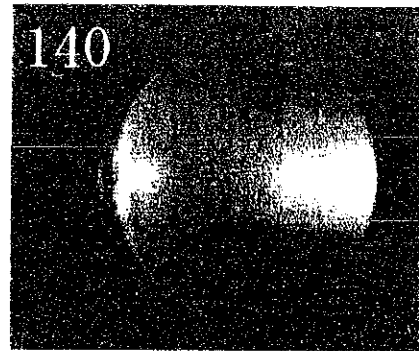
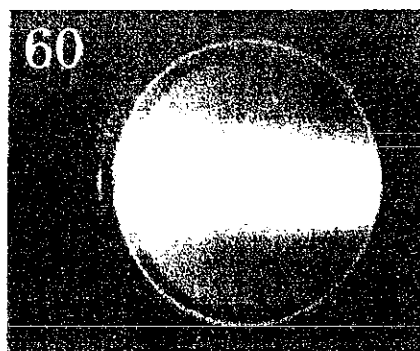
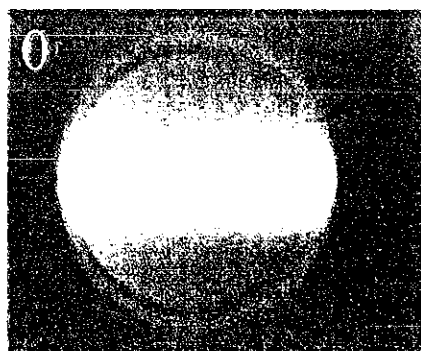
(2) ターゲット付近のプラズマの熱流分布測定

パルスレーザーを用いた負イオン計測の原理

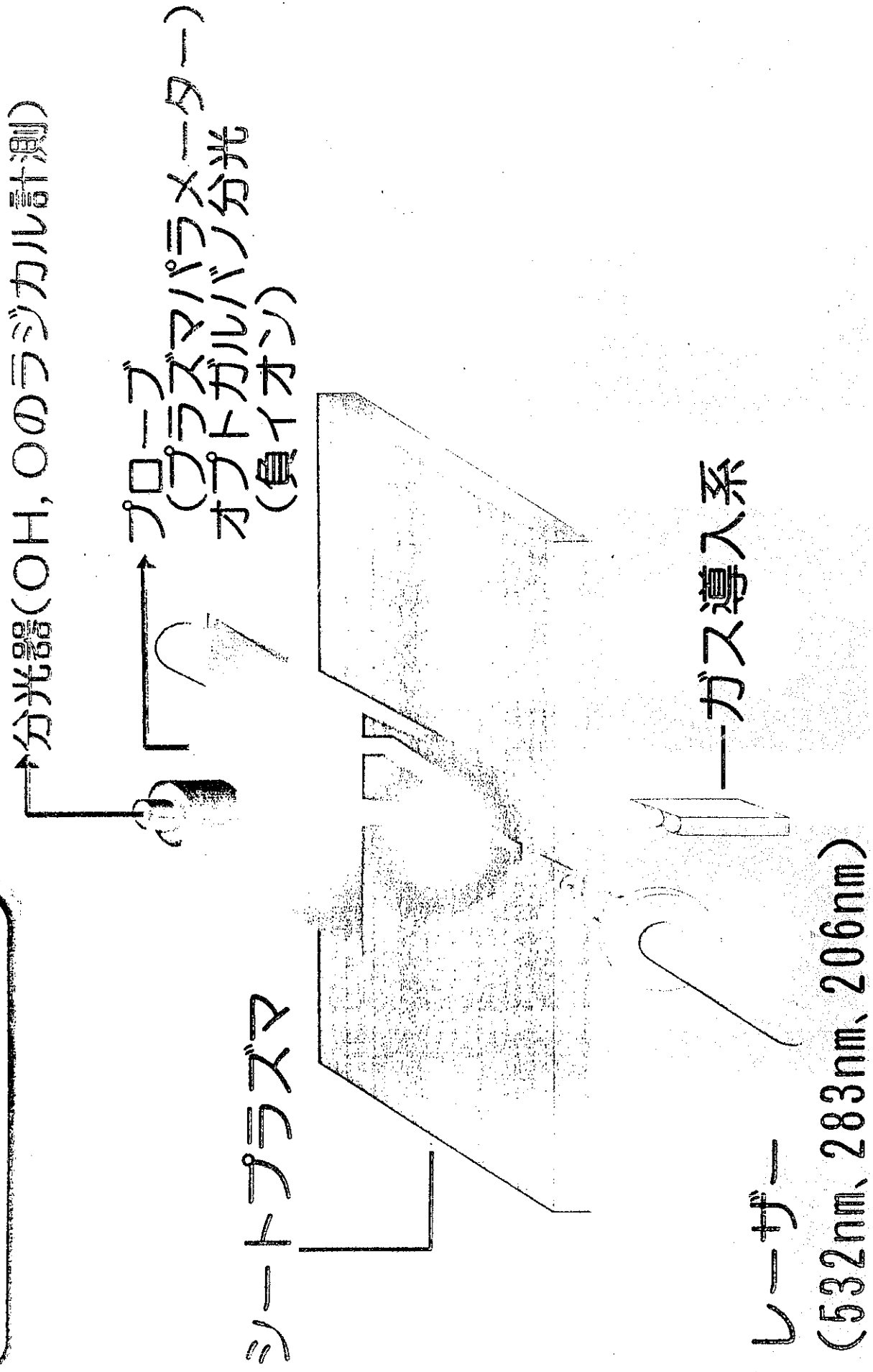


負イオンから電子が脱離し、動き易い電子が早くプローブに到達
プローブ電流の増加分が、負イオンの数に対応

He cooled gas collided at $\theta=90^\circ$ in G1
Id=30A



計測システム



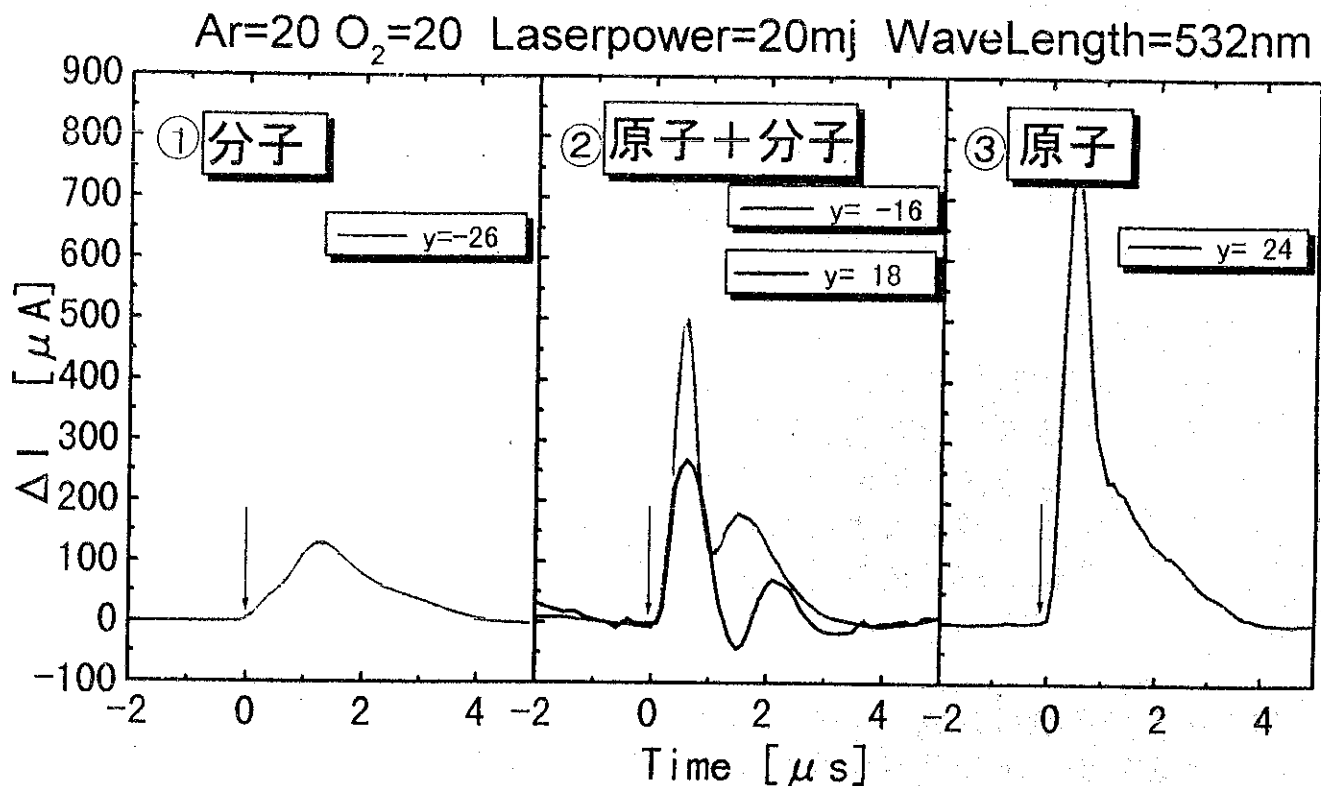


図. オプトガルバノ信号 (電流値) の時間的变化

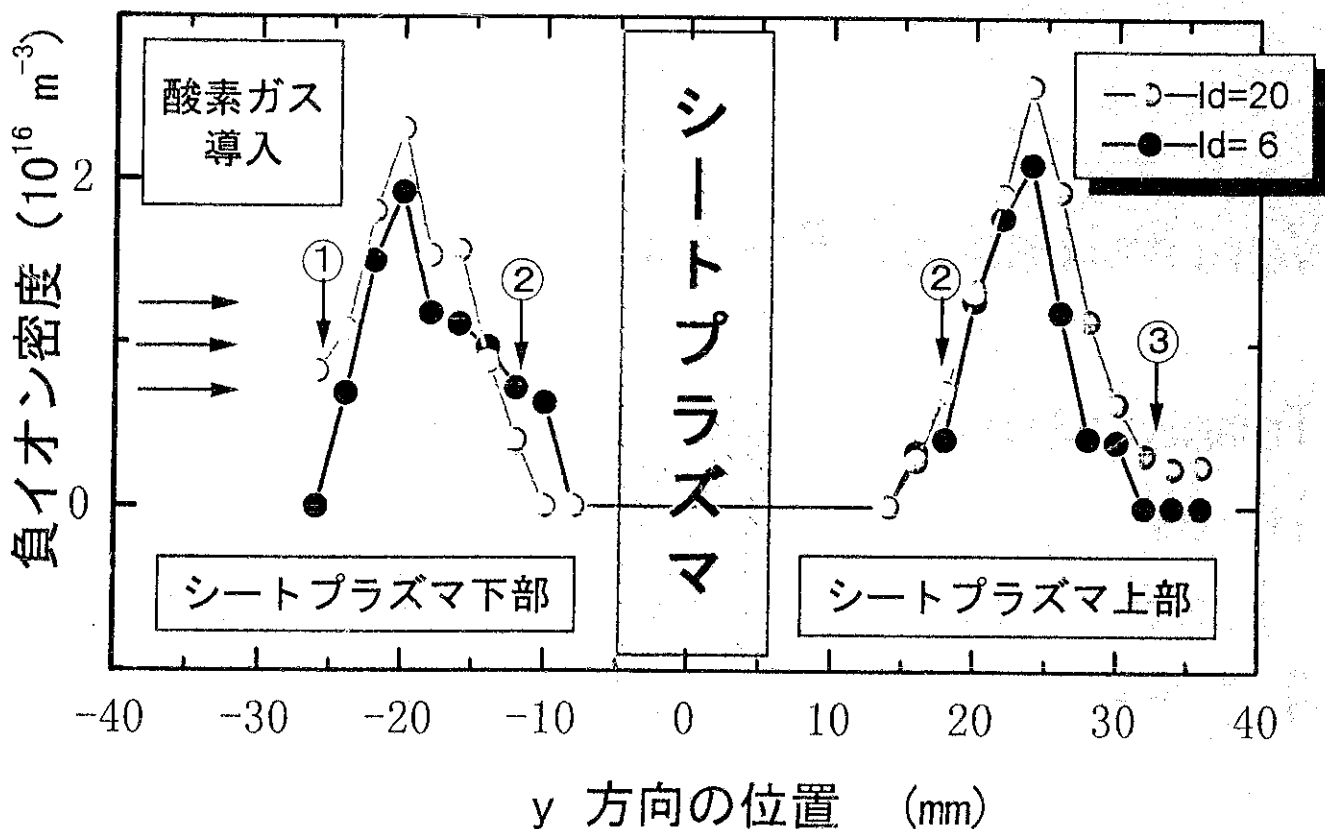


図. プローブの位置変化における負イオン密度分布

(2) 接触ガス方向の違いによるプラズマ冷却過程の解明

Detached Plasmaの物理機構の解明



負イオン、ラジカルを考慮したプラズマ冷却過程



シートプラズマガス直交系での負イオン計測系の確立 (酸素)

[まとめ]

(1) 電子温度の低いシートプラズマの周辺に酸素負イオンが生成

(2) プラズマの上部と下部ではOGシグナル波形が異なる

(プラズマ下部から垂直にガスを接触)

上部：電子付着による分子の負イオンの生成

下部：解離性付着による原子の負イオンの生成

(1) 今後は水素負イオン計測を行う予定

(2) シートプラズマを用いた局所ガス接触による

Detached plasmaの観測 (TPD共同研究で確認済み)

Variations of Pressure with temperature

Temperature

10 eV

1 eV

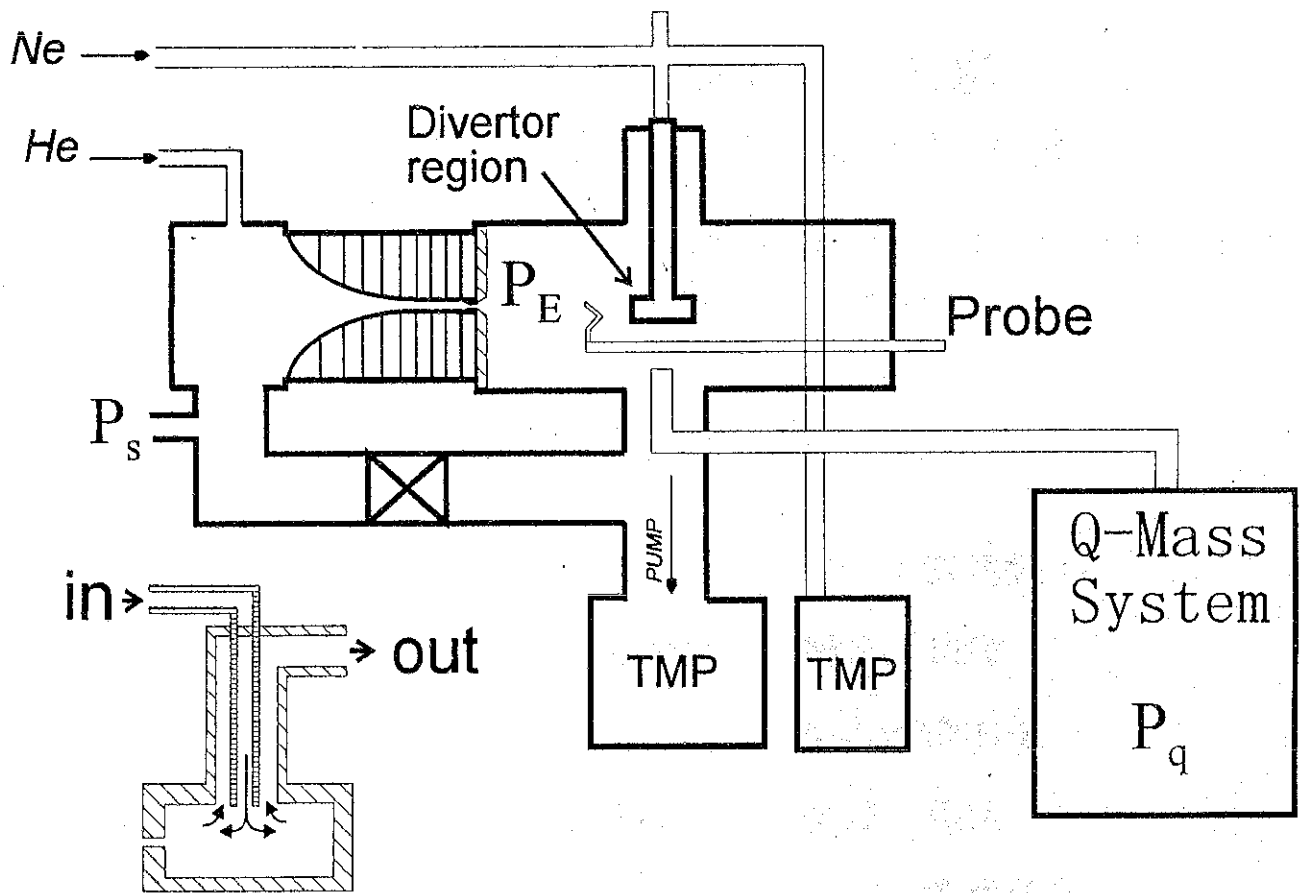
0.1 eV

Pressure

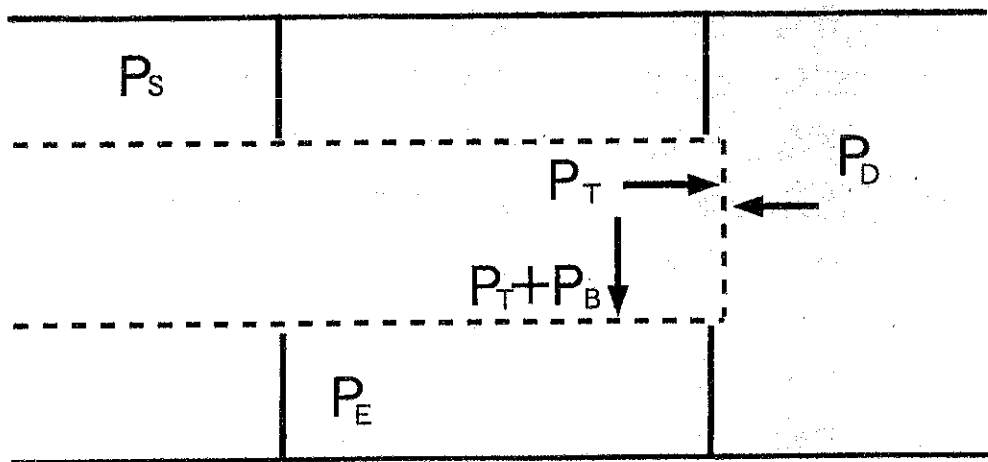
1.2×10^{-4} Torr

1.2×10^{-5} Torr

1.2×10^{-6} Torr



Test Divertor



Kinetic Theory of Gases
 Configuration Space
 (One Direction)

One Particle Maxwell Distr.

$$P = nkT$$

$$= nm\bar{v}^2 / 2$$

Fluid Mechanics
 Phase Space
 (One Direction)

Boltzmann Equation

$$P = nm\bar{v}^2$$

磁化プラズモイド入射法による 高温プラズマ熱粒子制御の試行実験

Experiments on Control of High Temperature Plasma Particles
by Magnetized Plasmoid Injection

研 究 組 織

<代表者>

宇山 忠男 姫路工業大学・工学部

<所内世話人>

山田 弘司 核融合科学研究所

<分担者>

永田 正義	姫路工業大学・工学部
福本 直之	姫路工業大学・工学部
後藤 誠一	大阪大学・工学研究科
岡田 成文	大阪大学・工学研究科
雨宮 尚之	横浜国立大学・工学部
桂井 誠	東京大学・工学研究科
粥川 尚之	北海道大学・エネルギー 先端工学研究センター
本島 修	核融合科学研究所
須藤 滋	核融合科学研究所
林 隆也	核融合科学研究所
大藪 修義	核融合科学研究所
山崎 耕造	核融合科学研究所
坂本 隆一	核融合科学研究所
渡邊 智彦	核融合科学研究所
宮澤 順一	核融合科学研究所
鈴木 喜雄	学術振興会・特別研究員

磁化プラズモイド入射法による高温プラズマ熱粒子制御の試行実験

研究代表者 姫路工業大学工学部 宇山 忠男

<研究目的>

スフェロマック型コンパクトトラス（CT）等の導電性磁化プラズモイドを、同軸型加速装置を用いて200 km/s以上の超高速に加速してLHDに入射し、LHDプラズマの粒子供給及び密度分布制御を行い、その高温プラズマ熱粒子の制御を行う。また、他のペレット入射等による燃料注入技術と組み合わせることにより、前例のない熱粒子制御法を試みる。

<研究概要>

本研究では、CTをLHDに入射し、真空磁場及びプラズマ磁場を横切ってプラズマ中心部に到達させる。ここで、磁気リコネクションに伴ってCT磁場の殻が壊れ、CTプラズマが解かれてLHDプラズマ中に拡がっていくというシナリオである。このため、CTを200 km/s以上に加速してLHDプラズマに入射する。本実験は、LHDに閉じ込められている粒子総数の5～20%の粒子をCTで補給するものとして企画設計している。実験に用いる装置は全てパルス運転であり、駆動電力はコンデンサーバンクによって供給される。

<平成8年度に実施した研究>

- (1) LHD/CTI装置製作のための先行研究として、姫路工大の既設装置を用いて予備実験を実施した。
- (2) 姫路工大の既設装置で得られた成果を踏襲し、LHDへのCT入射装置設計のために必要な基本的要素の検討を行った。
- (3) 磁場に突入するCTの挙動に関する計算機シミュレーションを行った。
- (4) グループ全体の「研究打ち合わせ会」を平成8年7月19日と平成9年1月28日に実施した。また、設計のための少人数による検討会を数回行った。

<平成9年度の実施計画>

- (1) LHD/CTI装置製作のための先行研究として姫路工大既設装置を用いて、①入射装置の電極構造及び電極材質についての最適化を行い、②電極表面付着物の除去のための放電洗浄、ベーキングを実施し、CT入射に伴う不純物混入の軽減手法を確立する。
- (2) 現在、姫路工大と日本原子力研究所JFT-2Mグループでは、JFT-2MへのCT入射実験を平成9年度秋季から実施するための準備を行っているが、この実験から得られた知見、経験、及び成果を基に、LHD/CT装置の詳細設計を行う。
- (3) LHD装置への適用のために、予備実験としてLHD漏洩磁場によるCT加速装置への影響を調べる。そのため、CT装置に鞍型コイルを設置して外部磁場を与え、模擬実験を実施する。
- (4) 磁場に突入するCTの挙動に関する計算機シミュレーションを継続して行う。

<平成10年度以降の実施計画>

- (1) LHD/CTI装置の製作を開始する。
- (2) 計測装置として、①CTプラズマ密度測定のためのレーザ干渉装置、②CTプラズマ混入不純物量測定のため真空紫外分光器及び可視分光器、③入射CTの性能評価のため各種測定群（多チャンネル磁気短針など）を準備する。
- (3) LHD/CTIの予備実験として、①CT加速用電源を増強してCTの加速を増大し目標値である速度200 km/s以上を達成する。また、②LHD適用のための模擬実験（漏洩磁束環境、遠距離搬送など）を実施し、③LHDへの据え付け準備（遠隔操作、保守機能の充実など）を完了する。さらに、④LHD/CTIをLHDへ搬送し、据え付けを完了する。

<研究目的>

スフェロマック型コンパクトトラス（CT）等の導電性磁化プラズモイドを，同軸型加速装置を用いて200 km/s以上の超高速に加速してLHDに入射し，LHDプラズマの粒子供給及び密度分布制御を行い，その高温プラズマ熱粒子の制御を行う。また，他のペレット入射等による燃料注入技術と組み合わせることにより，前例のない熱粒子制御法を試みる。

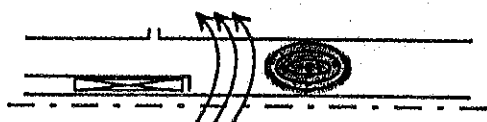
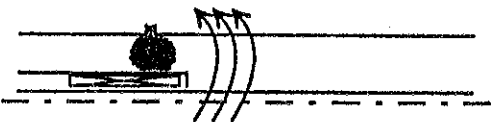
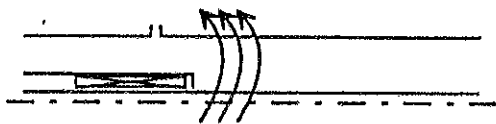
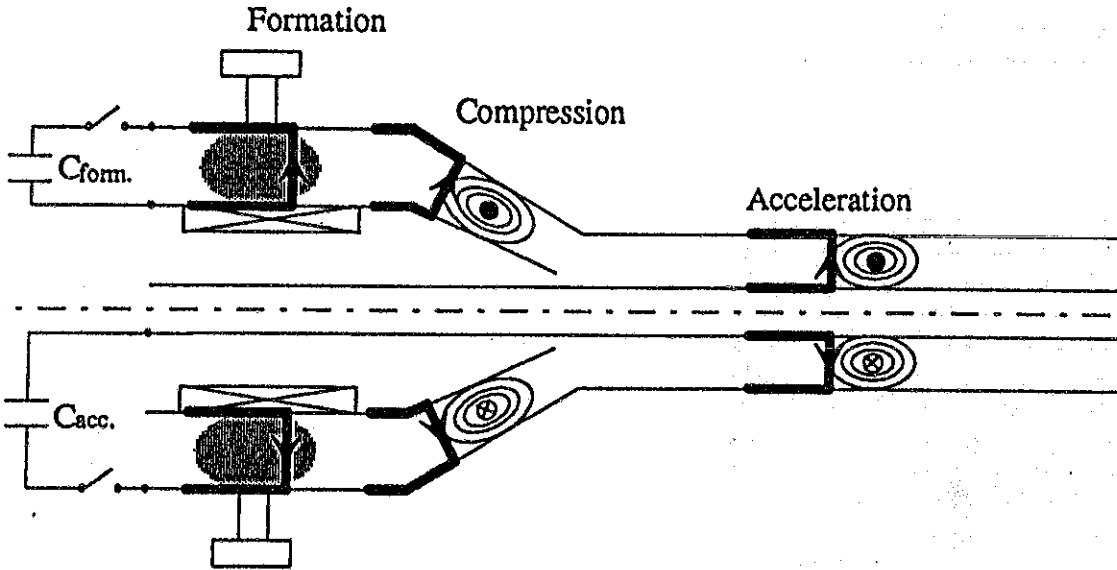
<全体概要>

本研究では，CTをLHDに入射し，真空磁場及びプラズマ磁場を横切ってプラズマ中心部に到達させる。ここで，磁気リコネクションに伴ってCT磁場の殻が壊れ，CTプラズマが解かれてLHDプラズマ中に拡がっていくというシナリオで，このCTを200 km/s以上に加速してLHDプラズマに入射する。本実験は，LHDに閉じ込められている粒子総数の5～20%の粒子をCTで補給するものとして設計している。実験に用いる装置は全てパルス運転であり，駆動電力はコンデンサーバンクによって供給される。

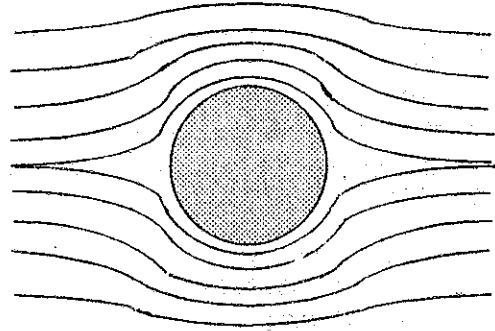
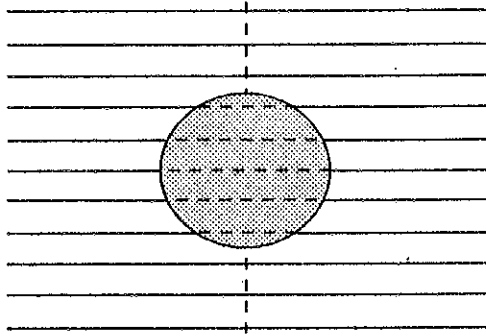
CT入射装置の概要

CT入射装置 (CTI)

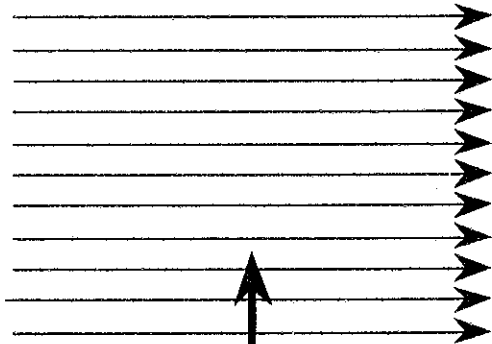
磁化同軸プラズマガン (MCPG) の電極を2段化することでプラズマ生成・圧縮部と加速部を設け、強磁界、高密度のCTプラズマリングを高速でトカマク装置に入射する装置。



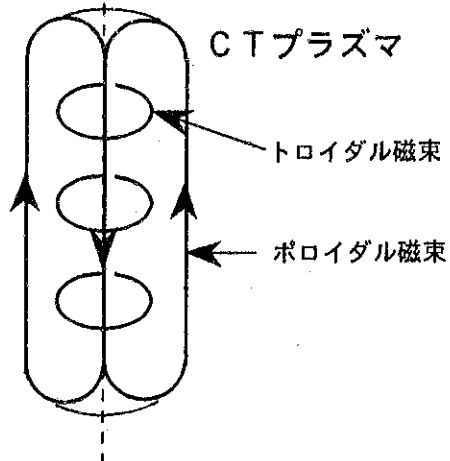
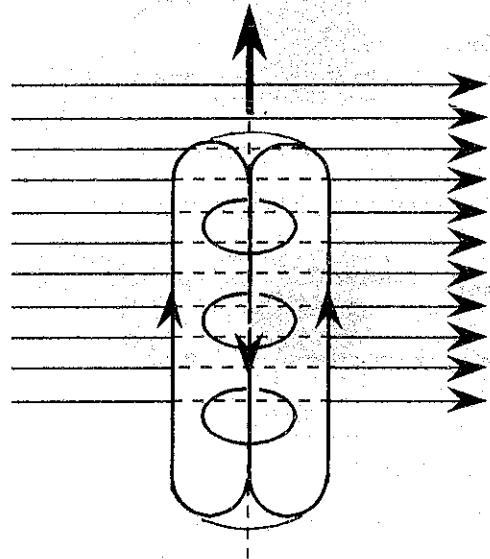
磁場閉じ込めプラズマへのCT入射



CTによる閉じ込め磁場の排除



CT入射



(磁場閉じ込めプラズマへのCT入射)

(磁場閉じ込めプラズマに突入するCT)

CT入射条件

CT磁場のプラズマ電気抵抗による減衰

(1) CTが閉じ込め磁場の中に入射する条件

CTの運動エネルギー > CTが磁場を排除するために必要な仕事

$$\frac{1}{2} \rho v^2 V_{CT} > \frac{B_0^2}{2\mu} V_{CT}$$

ρ : CTプラズマ密度
 v : CTプラズマ速度
 V_{CT} : CTプラズマ体積
 B_0 : 閉じ込め磁場

(2) CTが変形 (圧縮あるいは膨張) しない条件

$$B_{CT} \approx B_0$$

(3) 圧力駆動型不安定性の抑制条件

$$P_{CT} \ll \frac{B^2}{2\mu}$$

(4) CT磁場の抵抗性減衰より早い走行条件

$$\tau = \frac{\mu_0}{\eta\alpha^2} \leq \frac{L}{v}$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\nabla \times \mathbf{E}$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \alpha \mathbf{B}$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\frac{\alpha^2 \mathbf{B}}{\sigma \mu_0} = -\frac{\mathbf{B}}{\tau}$$

$$\tau = \frac{\sigma \eta_0}{\alpha^2} = \frac{\mu_0}{\eta \alpha^2}$$

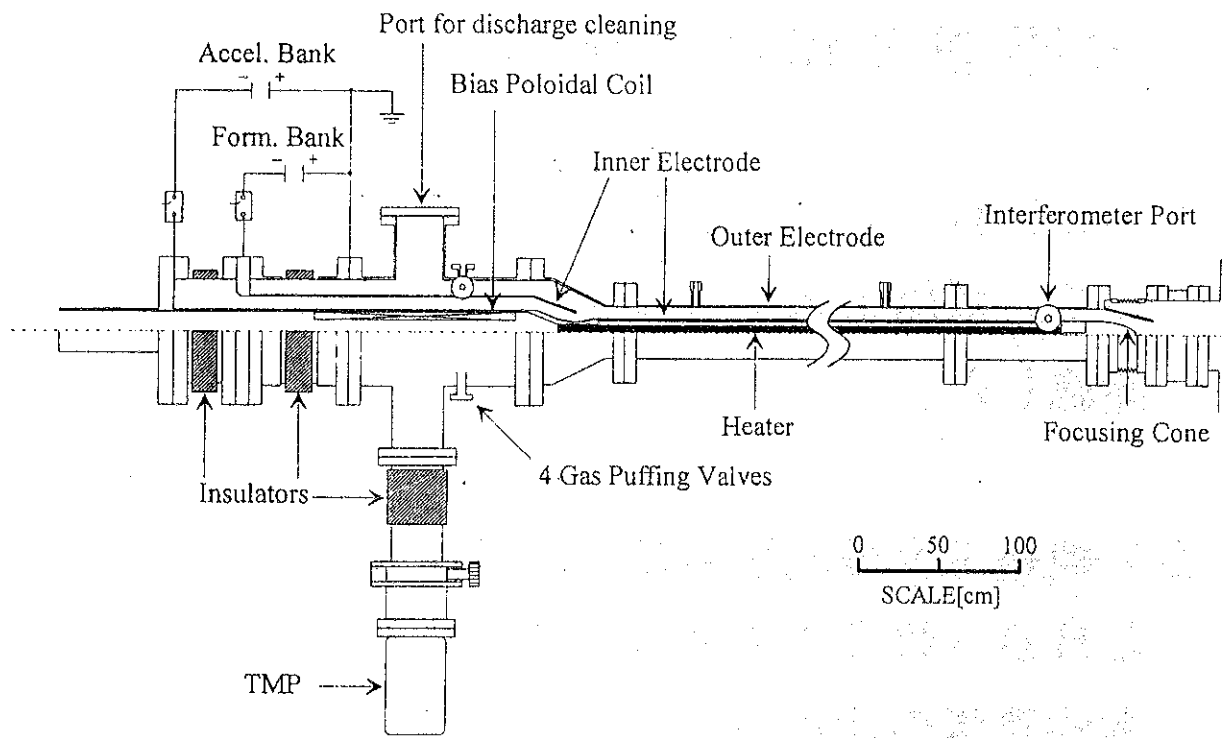
$$\alpha \approx 40 \text{ m}^{-1} \quad \text{for LHD/CTI}$$

$$\eta = 4 \times 10^{-5} \Omega \text{ m} \quad \text{at } T_e = 10 \text{ eV}$$

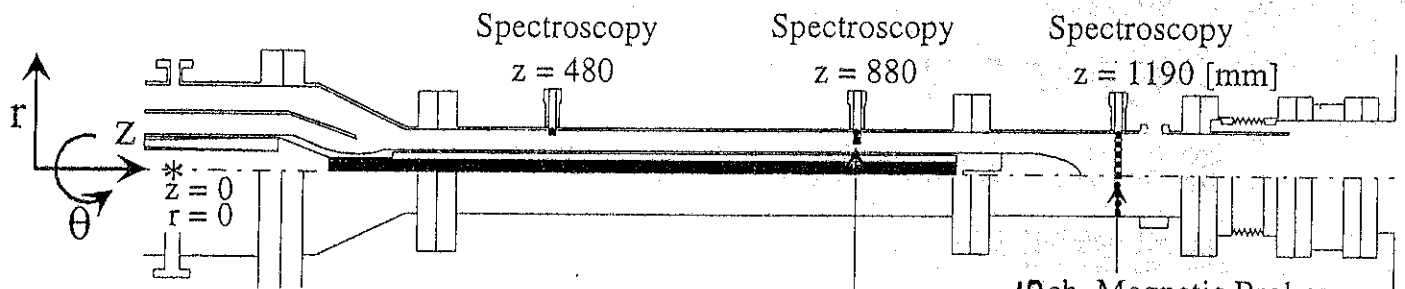
$$\tau \approx 20 \mu\text{s}$$

LHD / CTI 装置の CT パラメータ

入射 CT 粒子総数, N_{CT}	$1.5 \times 10^{19} \sim 6.0 \times 10^{19}$
LHD 粒子総数, N_{LHD}	3.0×10^{20}
粒子供給比 (%)	5 to 20
加速部管中プラズマ密度, n_{CT1}	$9.0 \times 10^{20} \sim 3.5 \times 10^{21} \text{ (m}^{-3}\text{)}$
噴射後プラズマ密度, n_{CT2}	$3.6 \times 10^{21} \sim 1.4 \times 10^{22} \text{ (m}^{-3}\text{)}$
CT 質量, m_{CT}	15 to 100 (μg)
加速部電極外径, r_{out}	0.150 (m)
加速部電極内径, r_{in}	0.066 (m)
加速部長さ, L_{CT}	0.30 (m)
加速部管中 CT 体積, V_{CT1}	$1.7 \times 10^{-2} \text{ (m}^3\text{)}$
噴射後 CT 体積, $V_{CT2} \text{ (m}^3\text{)}$	$4.3 \times 10^{-3} \text{ (} V_{CT2} / V_{CT1} = 1/4 \text{)}$
入射 CT 速度, $v_{CT} \text{ (} m_{CT} = 100 \mu\text{g} \text{)}$	200 (km/s)
$v_{CT} \text{ (} m_{CT} = 15 \mu\text{g} \text{)}$	500 (km/s)
CT 電子温度, $T_{e,CT}$	$< 20 \text{ (eV)}$
CT の運動エネルギー, W_k	2.0 (kJ)
CT の運動エネルギー密度, w_k	$470 > B_{LHD}^2 / 2 \mu_0 \text{ (kJ/m}^3\text{)}$
(LHD 平均磁場, $\langle B_{LHD} \rangle \approx 1 \text{ (T)}$ の時)	
入射 CT の平均磁場, $\langle B_{CT} \rangle$	0.5 ~ 1.0 (T)
入射 CT の磁場エネルギー, $W_{B,CT}$	1.7 to 6.8 (kJ)



LHD/CTI 装置概略図



10ch. Magnetic Probes
at intervals of 13mm
($r = 0 - 52$ [mm])

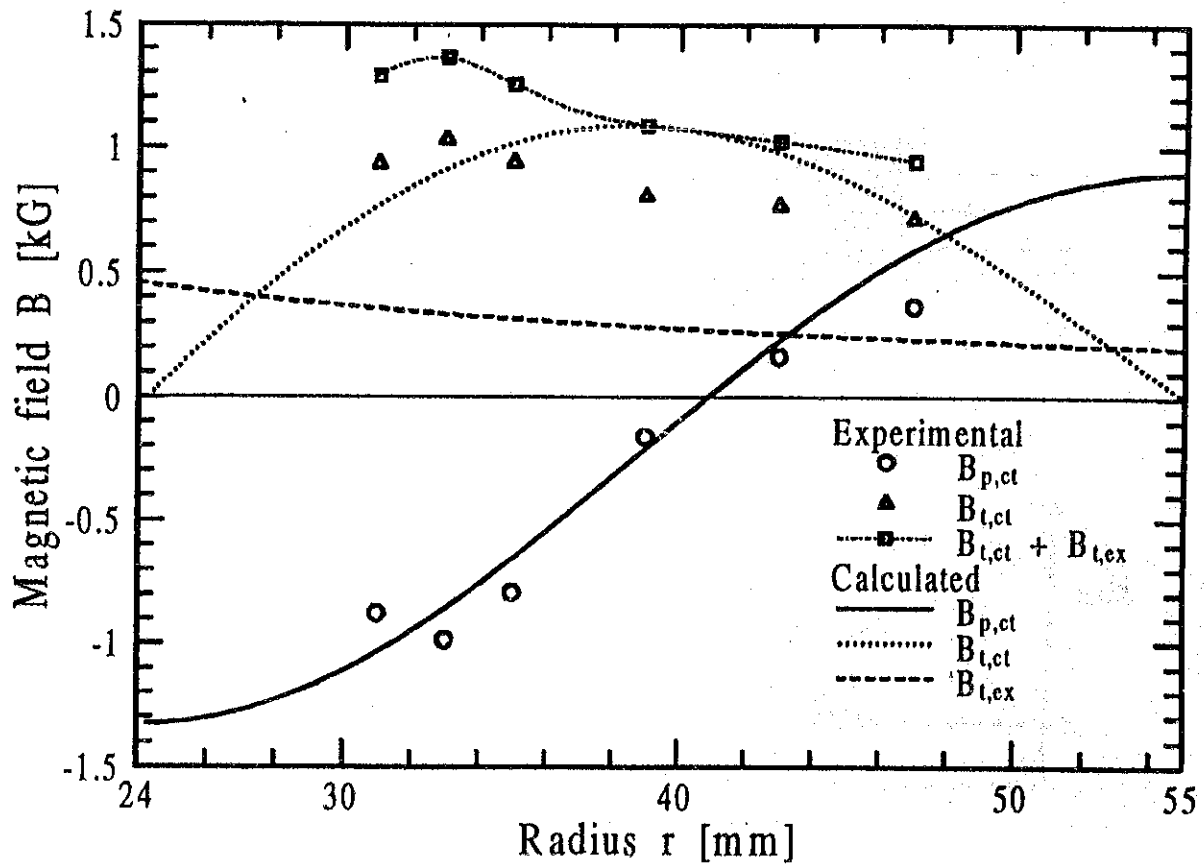
2ch. Magnetic probes (2 axes)
($\theta : r = 45, z : r = 52$ [mm])

* Spectroscopy ----- $H\beta : 4861.3 \text{ \AA}$, $O II : 4414.9 \text{ \AA}$, $O IV : 3063.5 \text{ \AA}$
 $C III : 4647.4 \text{ \AA}$, $Cr II : 3132.0 \text{ \AA}$

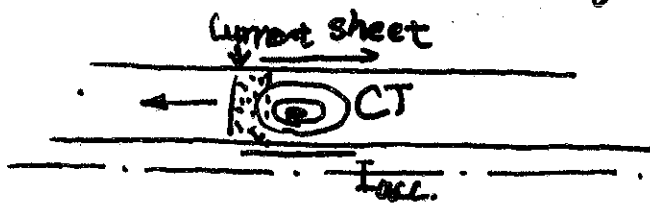
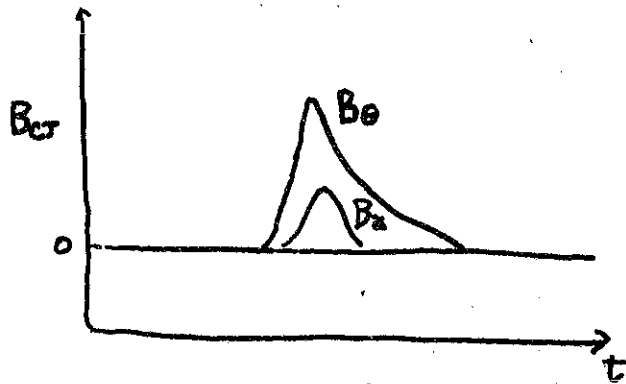
Measurement system

<平成8年度に実施した研究>

- (1) LHD / CTI 装置製作のための先行研究として、姫路工大の既設装置を用いて予備実験を実施した。
- (2) 姫路工大の既設装置で得られた成果を踏襲し、LHDへのCT入射装置設計のために必要な基本的要素の検討を行った。
- (3) 磁場に突入するCTの挙動に関する計算機シミュレーションを行った。
- (4) 研究グループ全体の「研究打ち合わせ会」を平成8年7月19日と平成9年1月28日に実施した。また、設計のための少人数による検討会を数回行った。

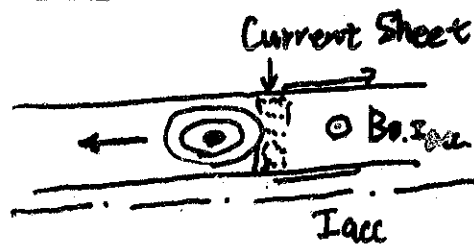
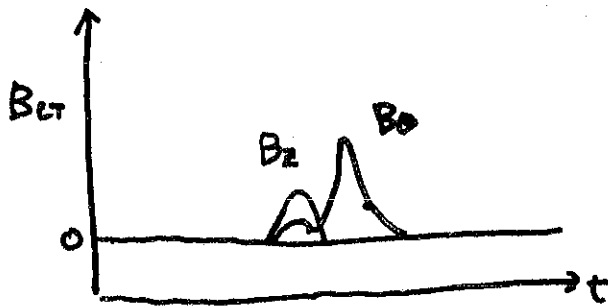


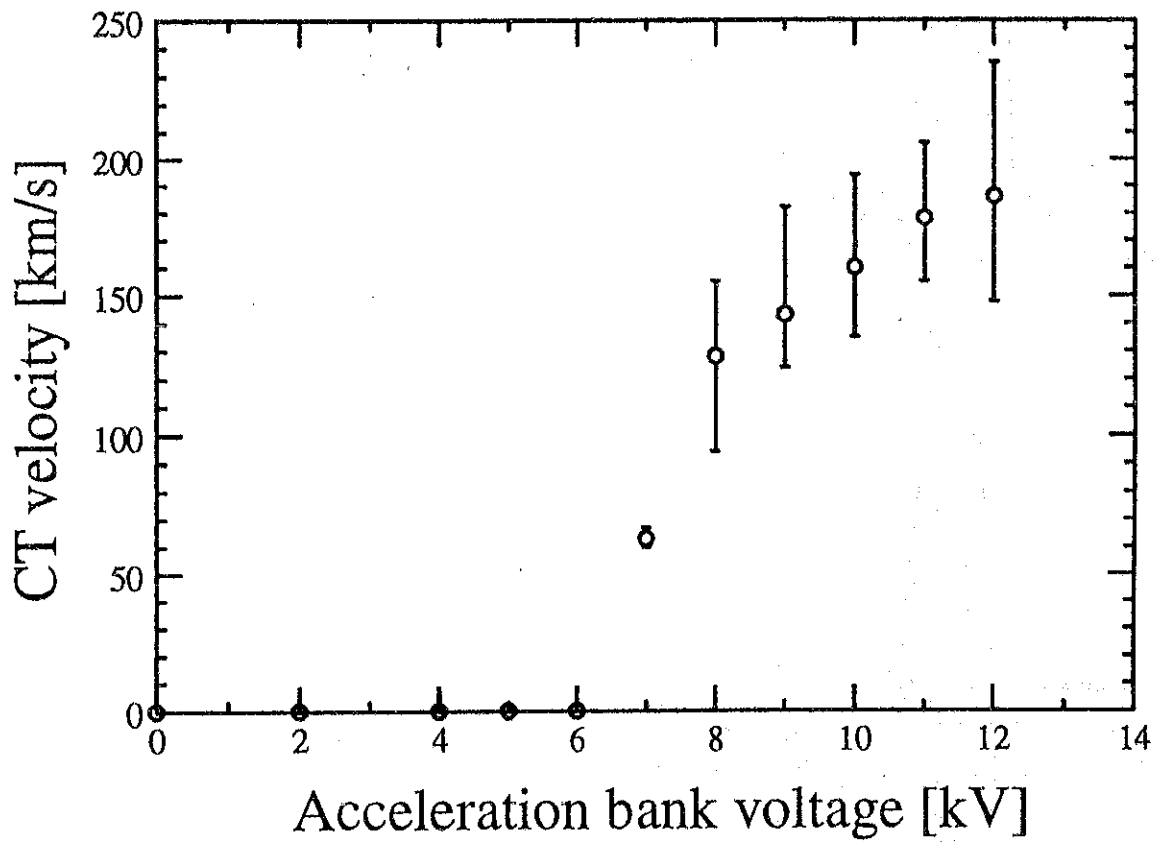
Magnetic field profile of compressed CT



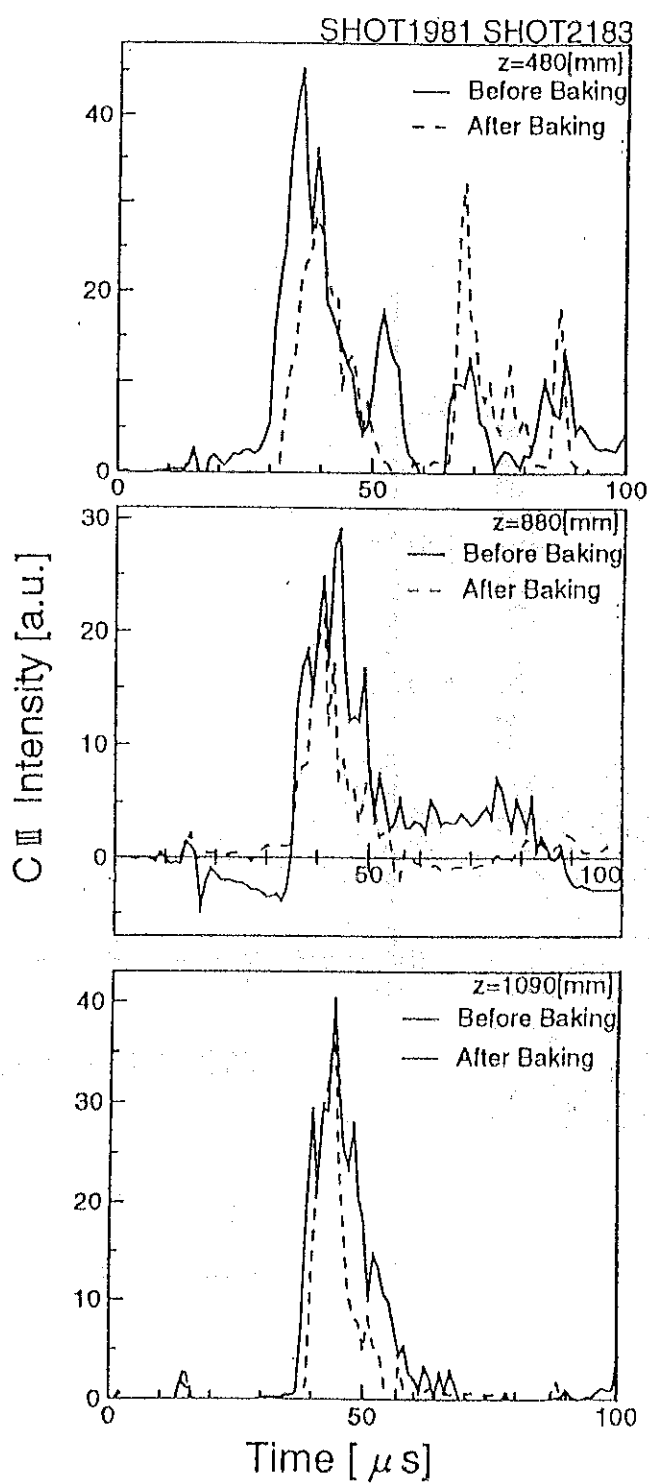
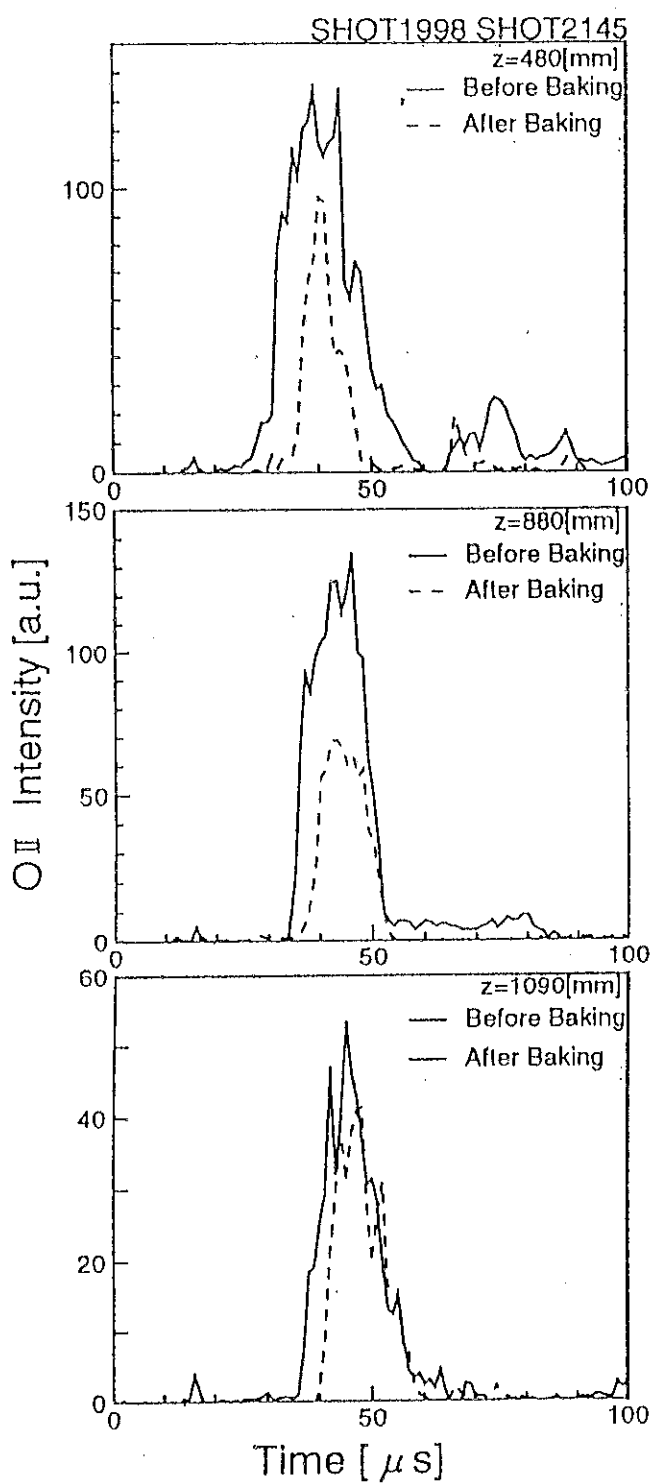
$$F_{acc} = j_{acc} \times B_0$$

$$B_0 = B_{0,CT} + B_{0,I_{acc}}$$

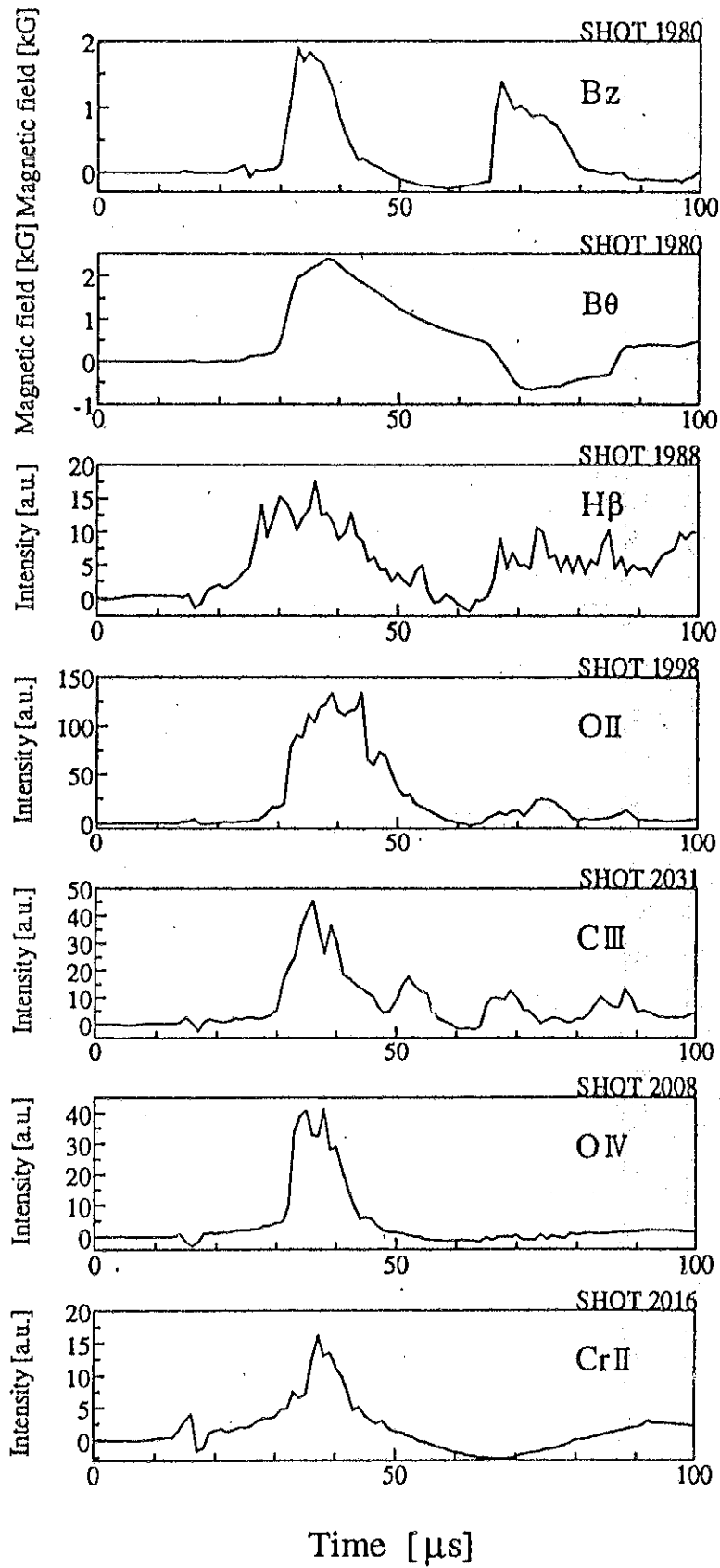




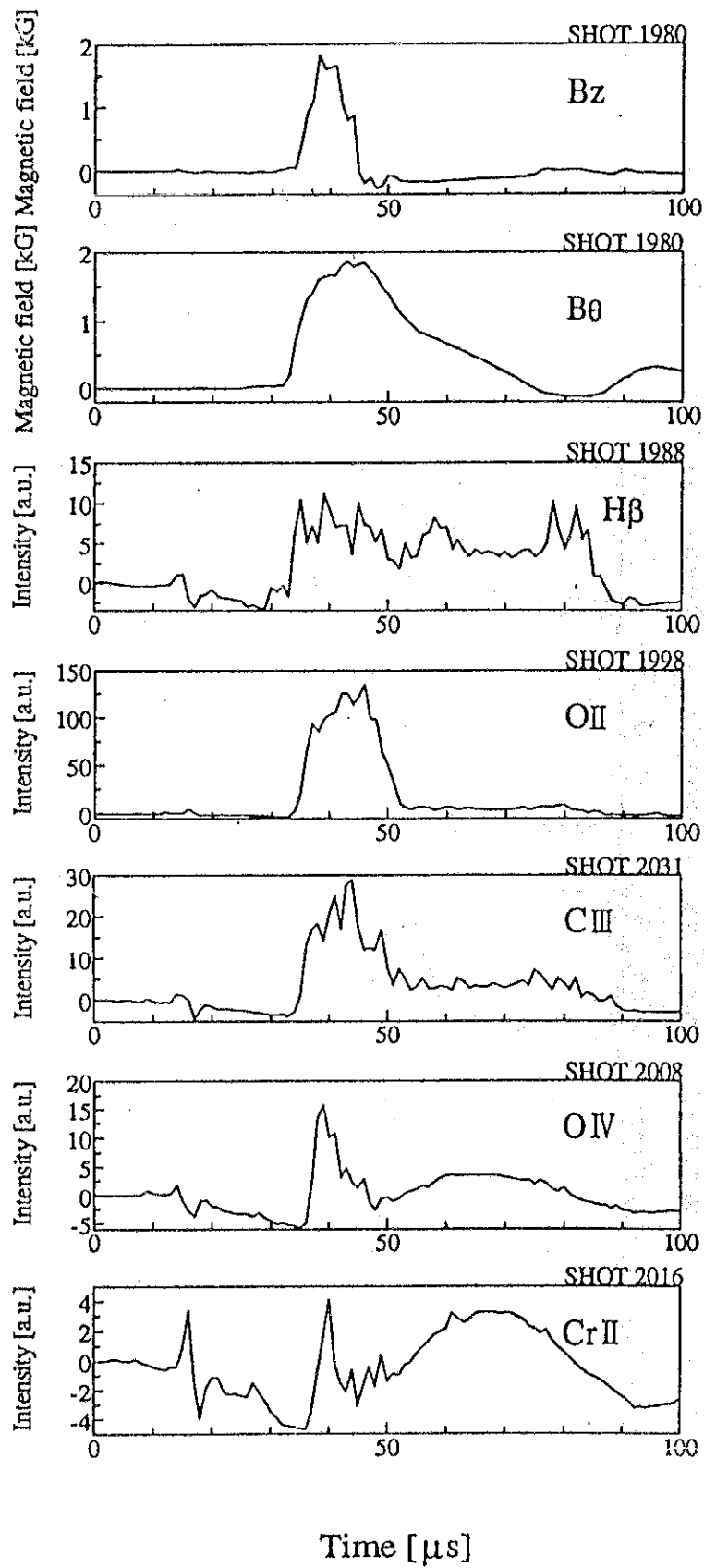
CT velocity control



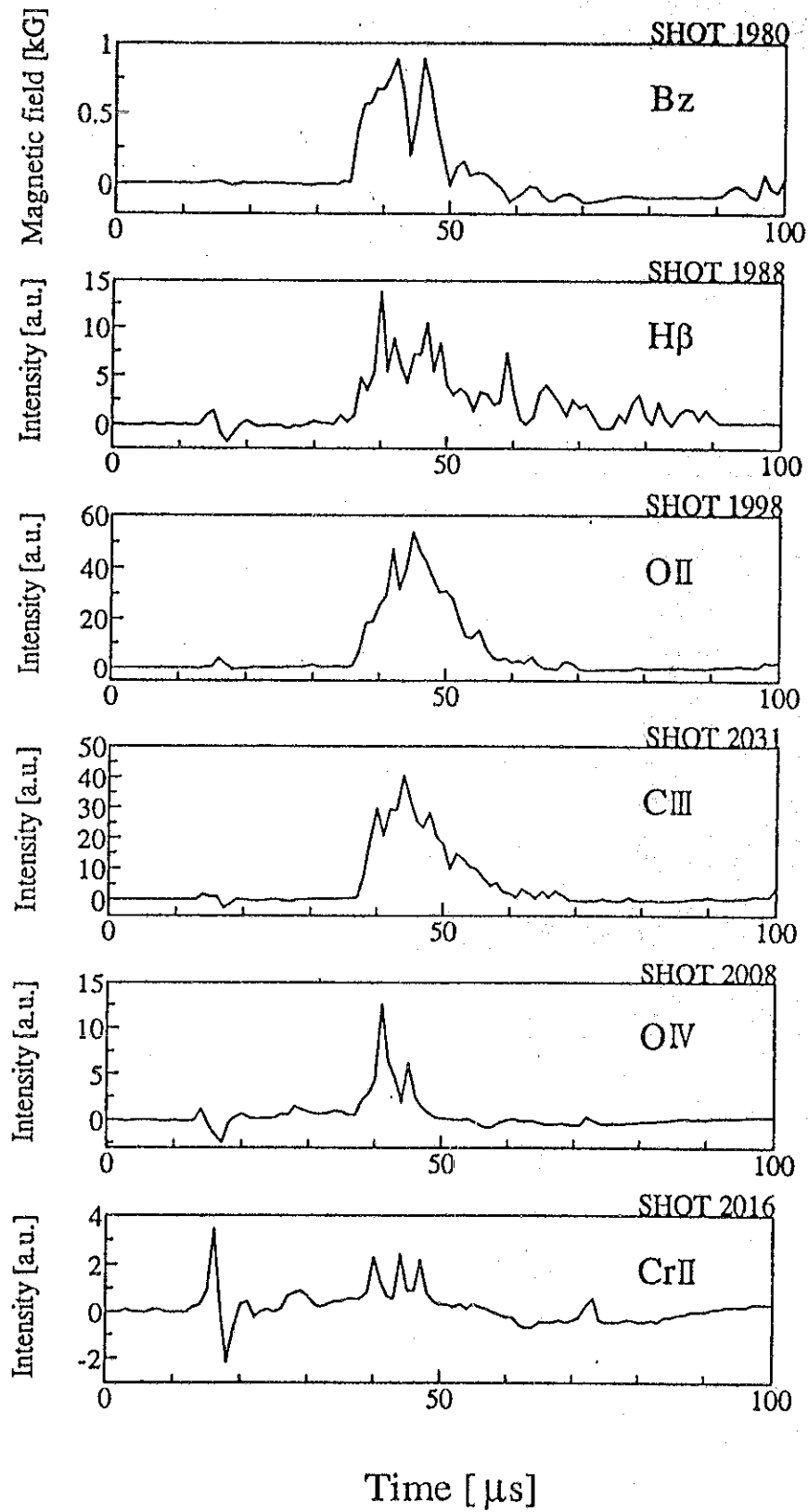
Time evolution of O II and C III spectrum



Time evolution of Bz and B θ
 and, H β , OII, CIII, OIV and CrII spectrum
 (z=480[mm])



Time evolution of Bz and B θ
 and, H β , OII, CIII, OIV and CrII spectrum
 (z=880[mm])



Time evolution of Bz and,
H β , OII , CIII , OIV and CrII spectrum
(z=1090[mm])

- CTは入射前から外部コイル周辺部 (CTドリフト管内) で磁気リコネクションを起こしている。
- CTは磁場中でチルトしながら入射される。

基礎方程式

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -\rho \nabla \cdot \vec{V} \vec{V} + \vec{J} \times \vec{B} - \nabla \cdot \Pi,$$

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\nabla \times \vec{E},$$

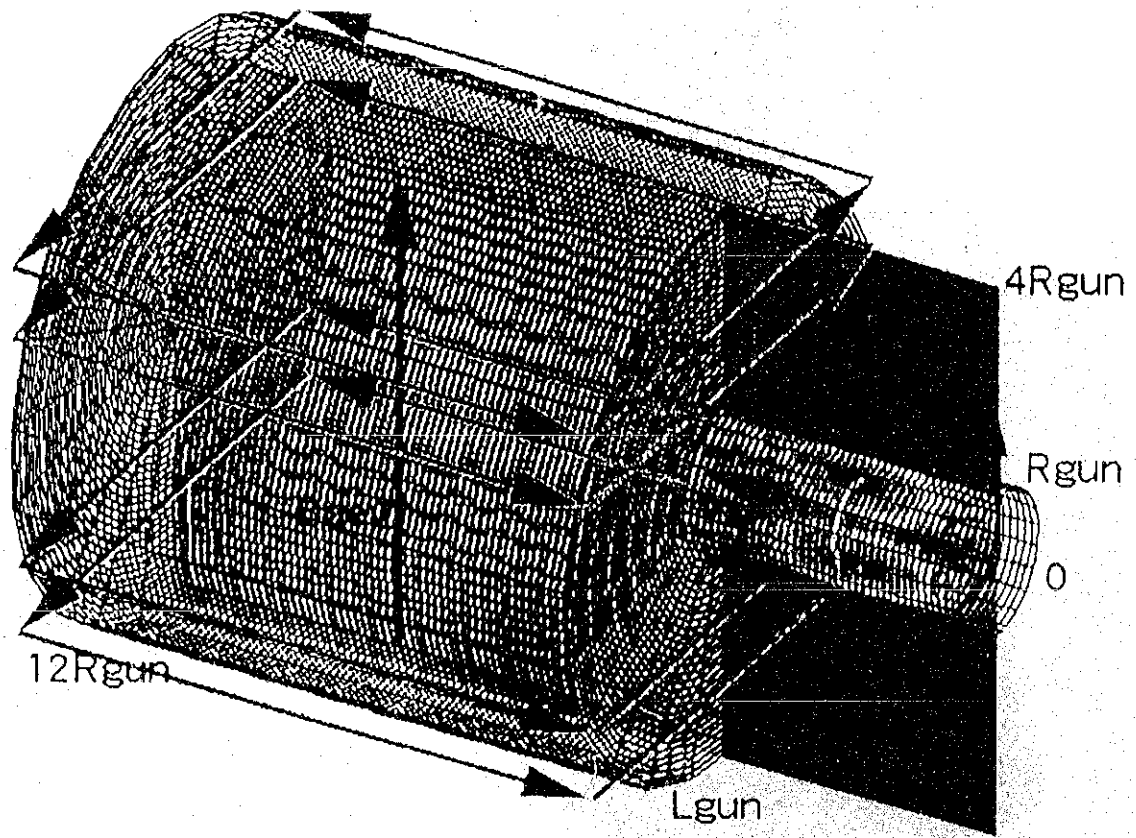
$$\vec{E} = -\vec{V} \times \vec{B} + \eta \vec{J},$$

$$\vec{J} = \nabla \times \vec{B},$$

$$\Pi = \nu \left[\frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{V}) \hat{I} - \nabla \vec{V} - {}^t (\nabla \vec{V}) \right].$$

規格化	
速度	$V_A (\equiv B_0 / \sqrt{\mu_0 \rho})$
長さ	R_{gun}
時間	$R_{\text{gun}} / V_A (\equiv \tau_A)$
磁場	$B_0 = B_{\text{sph max}}$

パラメータ					
case	$B_{\text{dev max}}$	V_z	L_{gun}	η	ν
0	0.0	0.0	4.0	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-2}
1	0.0	2.0	4.0	-	-
2	0.38	2.0	4.0	-	-
3	0.38	1.0	4.0	-	-
4	0.38	0.5	4.0	-	-
5	0.38	2.0	8.0	-	-



○ 境界条件 … 完全導体壁

○ 初期条件

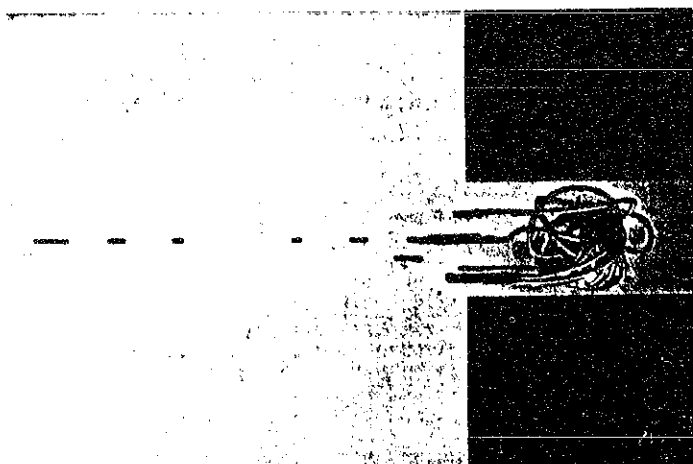
- 炉磁場 …………… コイル電流により形成
- スフェロマク磁場 … 円筒スフェロマク解
(Finn & Manheimer)
のトロイダル電流 J_θ より計算

$$J_\theta = \mu^2 J_1(k'r) \sin(\pi(z - z_0)/L_z)$$

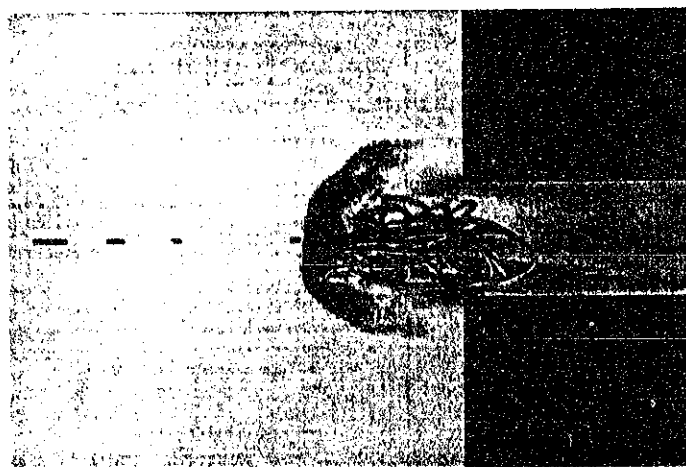
$$k'a = j_{1l}$$

j_{1l} … J_1 の l 番目の零点
($l = 1$ のとき 3.83171)

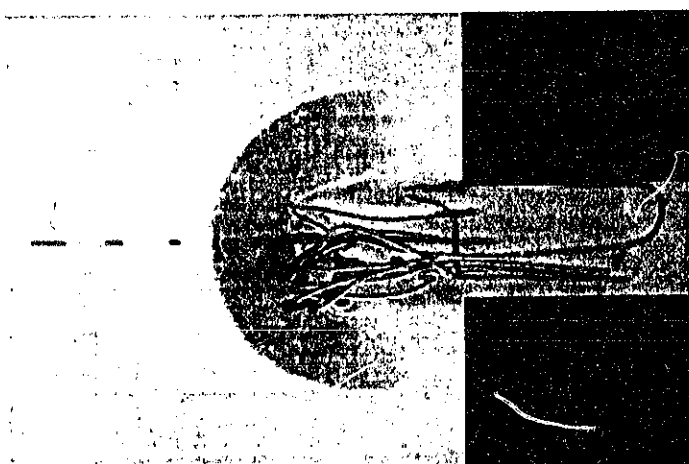
B_{\perp} case 2 ($B_{dev} = 0.38, V_z = 2$)



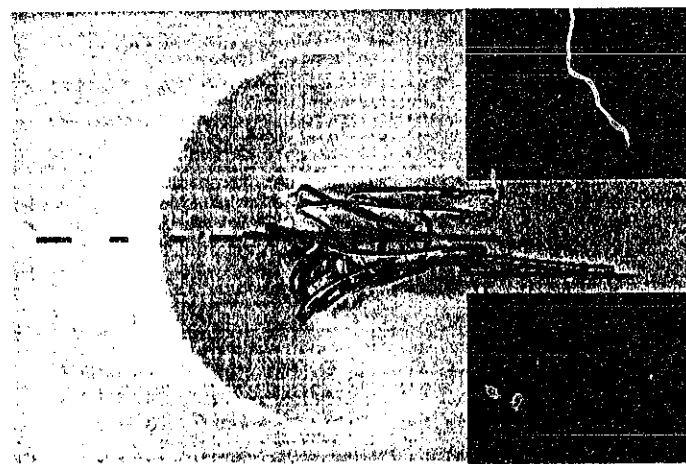
$t = 0 \tau_A$



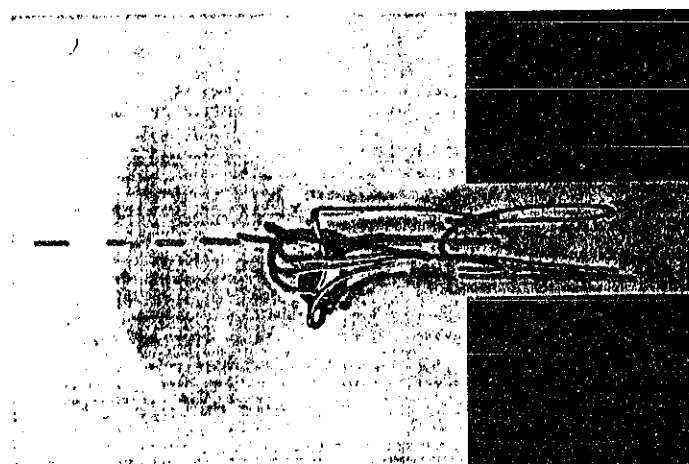
$t = 2 \tau_A$



$t = 4 \tau_A$

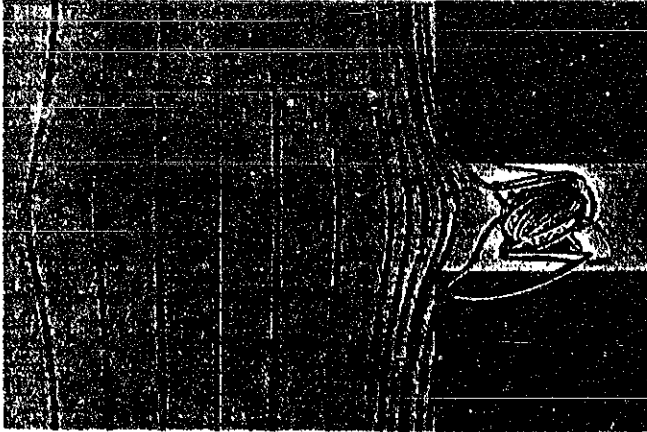


$t = 6 \tau_A$

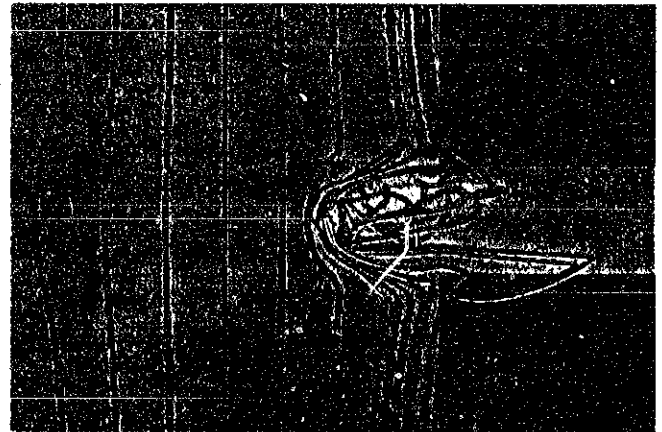


$t = 8 \tau_A$

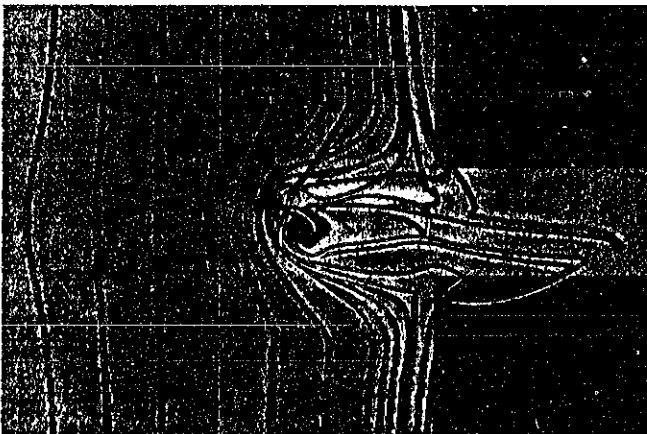
B_{\perp} case 2 ($B_{dev} = 0.38, V_z = 2$)



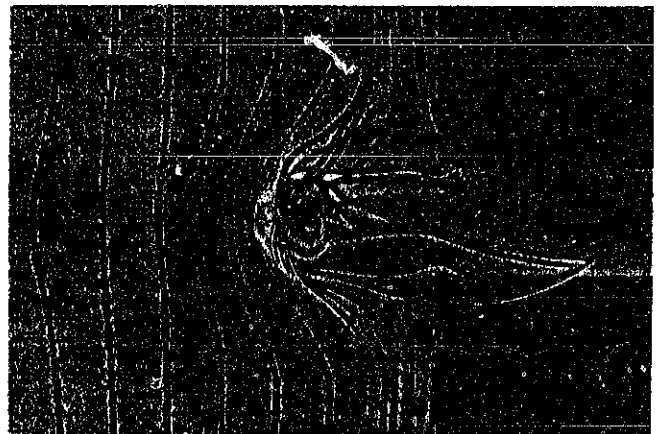
$t = 0\tau_A$



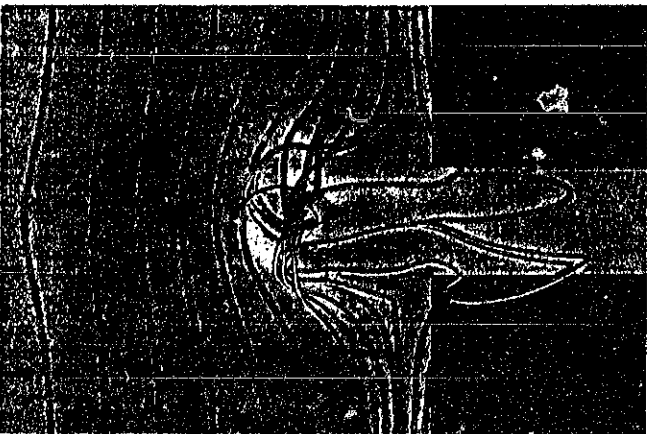
$t = 2\tau_A$



$t = 4\tau_A$

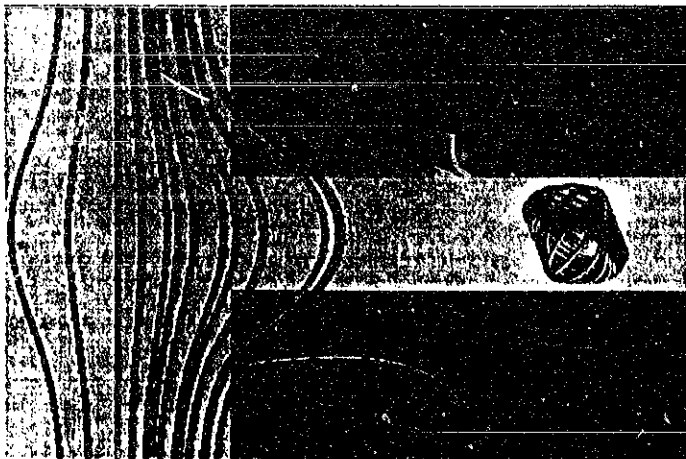


$t = 6\tau_A$

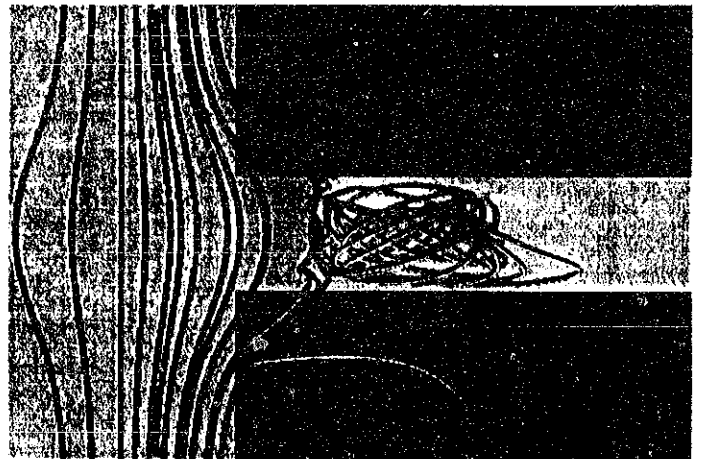


$t = 8\tau_A$

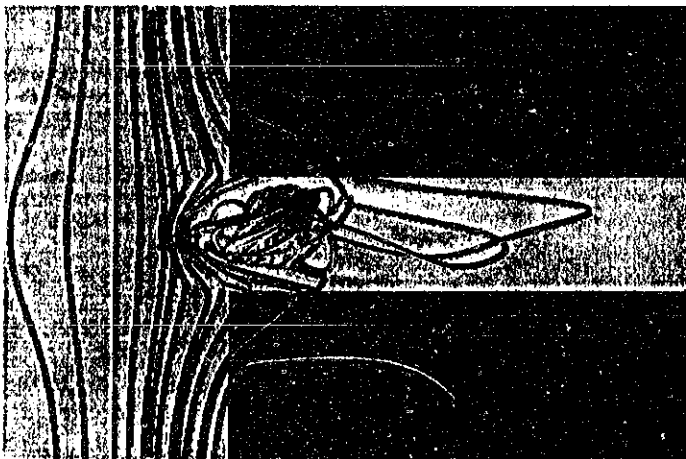
B_{\perp} case 6 ($B_{dev} = 0.38, V_z = 2$)



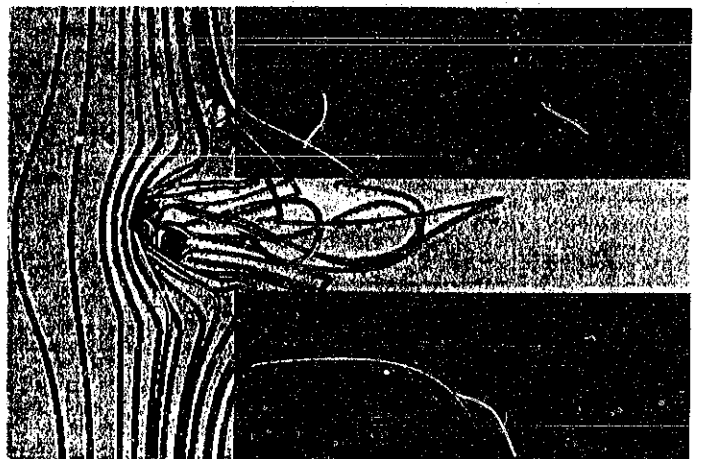
$t = 0\tau_A$



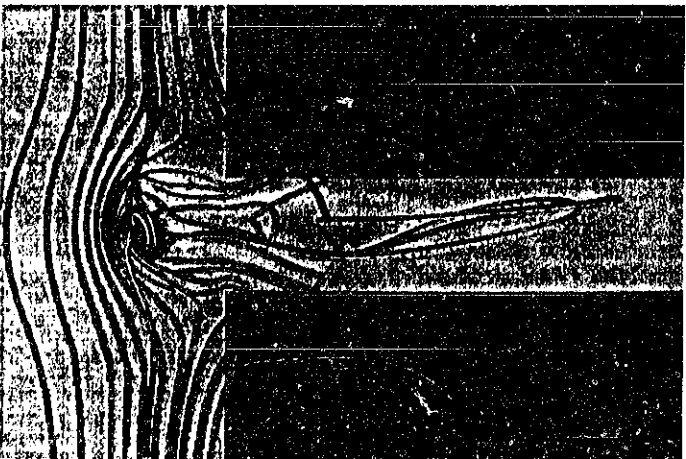
$t = 2\tau_A$



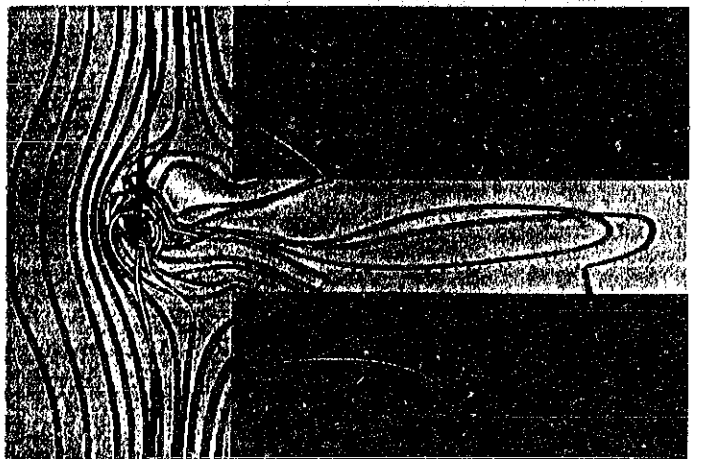
$t = 4\tau_A$



$t = 6\tau_A$

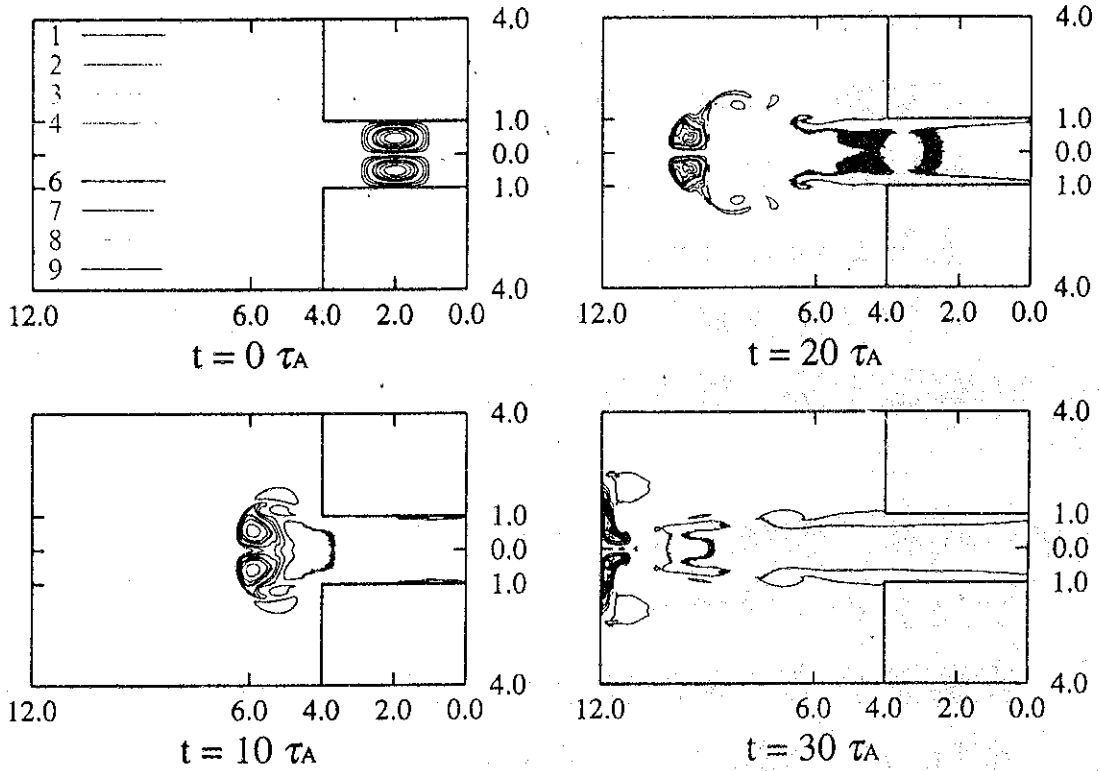


$t = 8\tau_A$

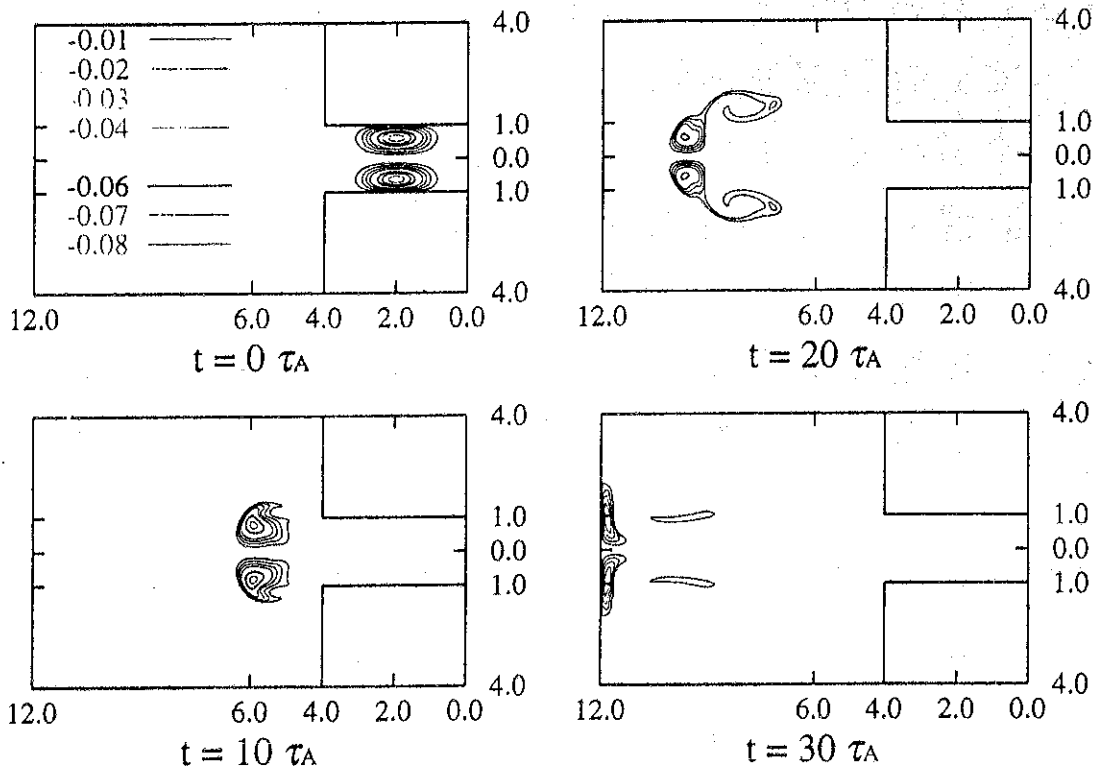


$t = 10\tau_A$

ρ ($V_{\max} = 0.5, B_{\text{dev}} = 0.0$)



ψ_{pol} ($V_{\max} = 0.5, B_{\text{dev}} = 0.0$)



<平成9年度の実施計画>

- (1) LHD/C T I装置製作のための先行研究として姫路工大既設装置を用いて、①入射装置の電極構造及び電極材質についての最適化を行い、②電極表面付着物の除去のための放電洗浄、ベーキングを実施し、C T入射に伴う不純物混入の軽減手法、等を確立する。
- (2) 現在、姫路工大と日本原子力研究所J F T - 2 Mグループでは、J F T - 2 MへのC T入射実験を平成9年度秋季から実施するための準備を行っているが、この実験から得られた知見、経験、及び成果を基に、L H D / C T装置の詳細設計を行う。
- (3) L H D装置への適用のために、予備実験としてL H D漏洩磁場によるC T加速装置への影響を調べる。そのため、C T装置に鞍型コイルを設置して外部磁場を与え、模擬実験を実施する。
- (4) 磁場に突入するC Tの挙動に関する計算機シミュレーションを継続して行う。
- (5) 研究グループ全体の「研究打ち合わせ会」を平成9年6月6日（実施済）と平成9年12月（予定）に実施する。また、設計のための少人数による検討会を数回行う。

CT Parameters

Particle inventory	$8.5 \times 10^{18} - 1.7 \times 10^{19}$
Plasma density (Mass density)	$5 \times 10^{21} - 1 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$ (8.4 - 17 mg/m ³)
Fueling of JFT-2M inventory	4.3 - 8.6 %
Mass	14 - 28 μg
Outer radius	0.055 m
Inner radius	0.024 m
Length	0.18 m
Volume	$1.7 \times 10^{-3} \text{ m}^3$
Average magnetic field	1 T
Magnetic energy	680 J
velocity	200 - 600 km/s
Electron temperature	20 eV

JFT-2M Machine and Plasma Parameters

Major radius	1.31 m
Minor radius	0.35 m (D-shape, k=1.4) 0.28 m (Divertor Configuration)
Plasma volume	4 m^3
Average density (n_e)	$5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$
Peak density ($n_{e,\text{peak}}$)	$1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$
Particle inventory (N_{total})	2×10^{20}
Toroidal field on axis	1.2 - 2.2 T
Electron temperature	1keV (H-mode), 2.2keV (ECH)
Z_{eff}	2 - 3
Plasma thermal energy	30 kJ (H-mode)
Plasma current	0.5 MA (D-shape) 0.3 MA (Divertor Configuration)

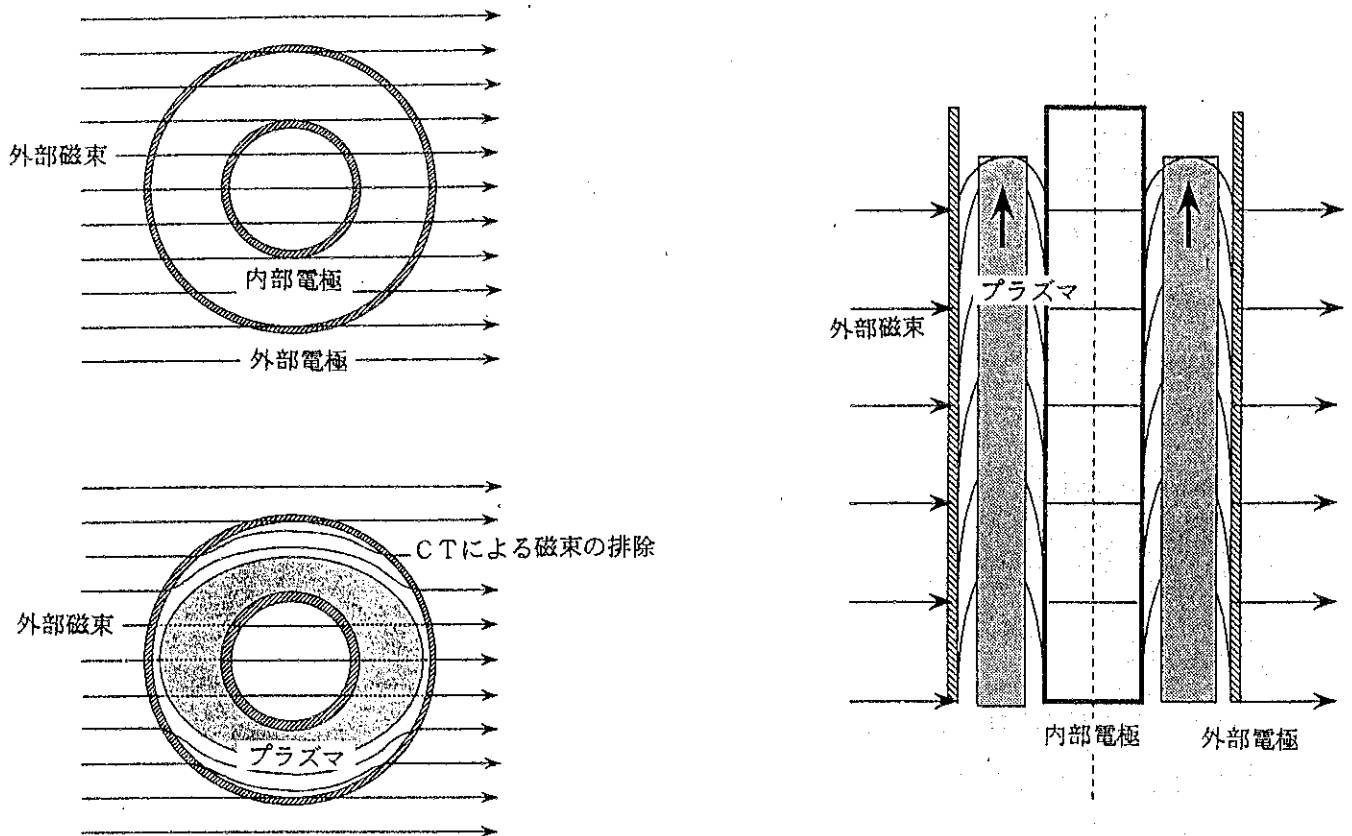


図1. 同軸の外部電極と内部電極から構成される加速領域に外部磁場 (LHD磁場) が侵入し、この磁束が両電極と鎖交している場合のCTの振る舞い (予測イメージ)。

LHD/CTI 装置設計に関する課題

- (1) LHD装置からの漏れ磁場によるLHD/CTI動作への影響について、その調査と対策
- (2) 既存のCT入射装置 (姫路工大装置) 結果を基にLHD/CTIを設計するときのスケールファクターの調査研究
 - ① 電源容量
 - ② 供給粒子総数
 - ③ 装置構造
 - ④ 不純物 (中性粒子を含む) 対策

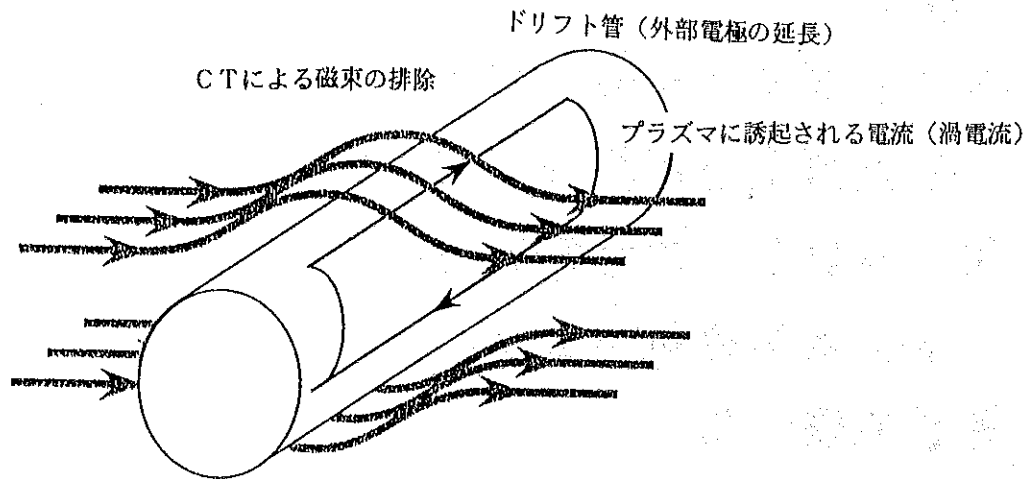
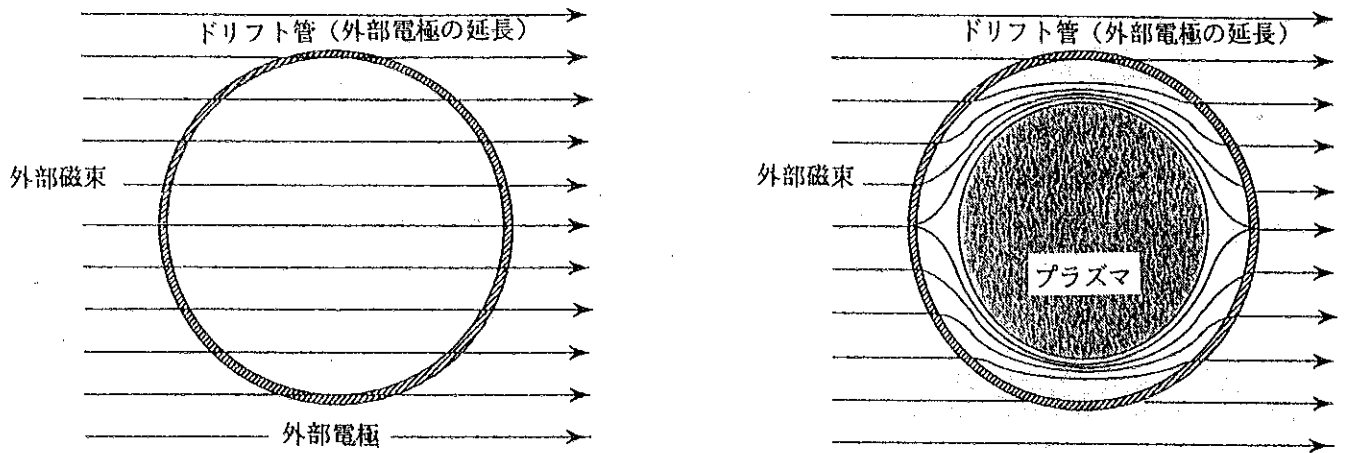


図2. ドリフト管 (外部電極の延長) からのドリフト領域に外部磁場 (LHD磁場) が侵入し、この磁束がドリフト管と鎖交している場合のCTの振る舞い (予測イメージ)。

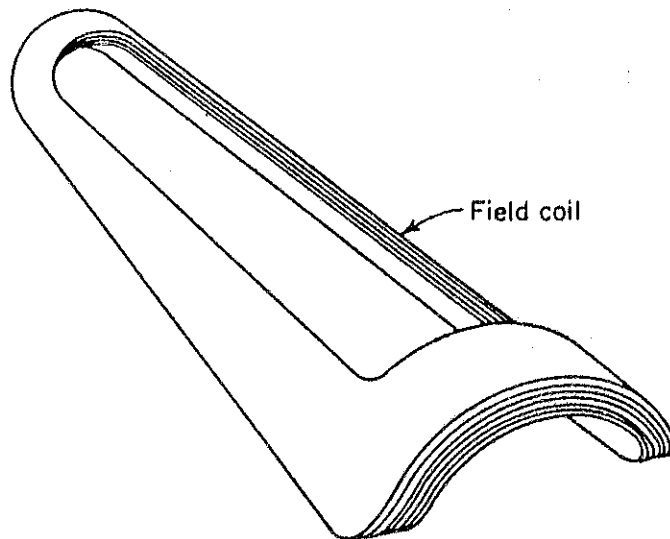


図3. 模擬実験用鞍型 (サドル) コイル上半部概略

<平成10年度以降の実施計画>

- (1) LHD/C T I装置の製作を開始する。
- (2) 計測装置として,
 - ① C Tプラズマ密度測定のためのレーザ干渉装置
 - ② C Tプラズマ混入不純物量測定のため真空紫外分光器及び可視分光器
 - ③ 入射C Tの性能評価のため各種測定群（多チャンネル磁気短針など）等を準備する。
- (3) LHD/C T Iの予備実験として以下の項目を実施する。
 - ① C T加速用電源を増強してC Tの加速を増大し、目標値である速度 200 km/s 以上を達成する。
 - ② LHD適用のための模擬実験（漏洩磁束環境、遠距離搬送など）を実施する。
 - ③ LHDへの据え付け準備（遠隔操作、保守機能の充実など）を完了する。
 - ④ LHD/C T IをLHDへ搬送し、据え付けを完了する。

コメント及び連絡

山科俊郎

- プラズマ対向機器・P S I・熱粒子制御合同研究会

- L H D計画共同研究
96年度より5年間
大学間「ネットワーク」の活用
L H Dに関わる大学間共同研究（公募ではない）

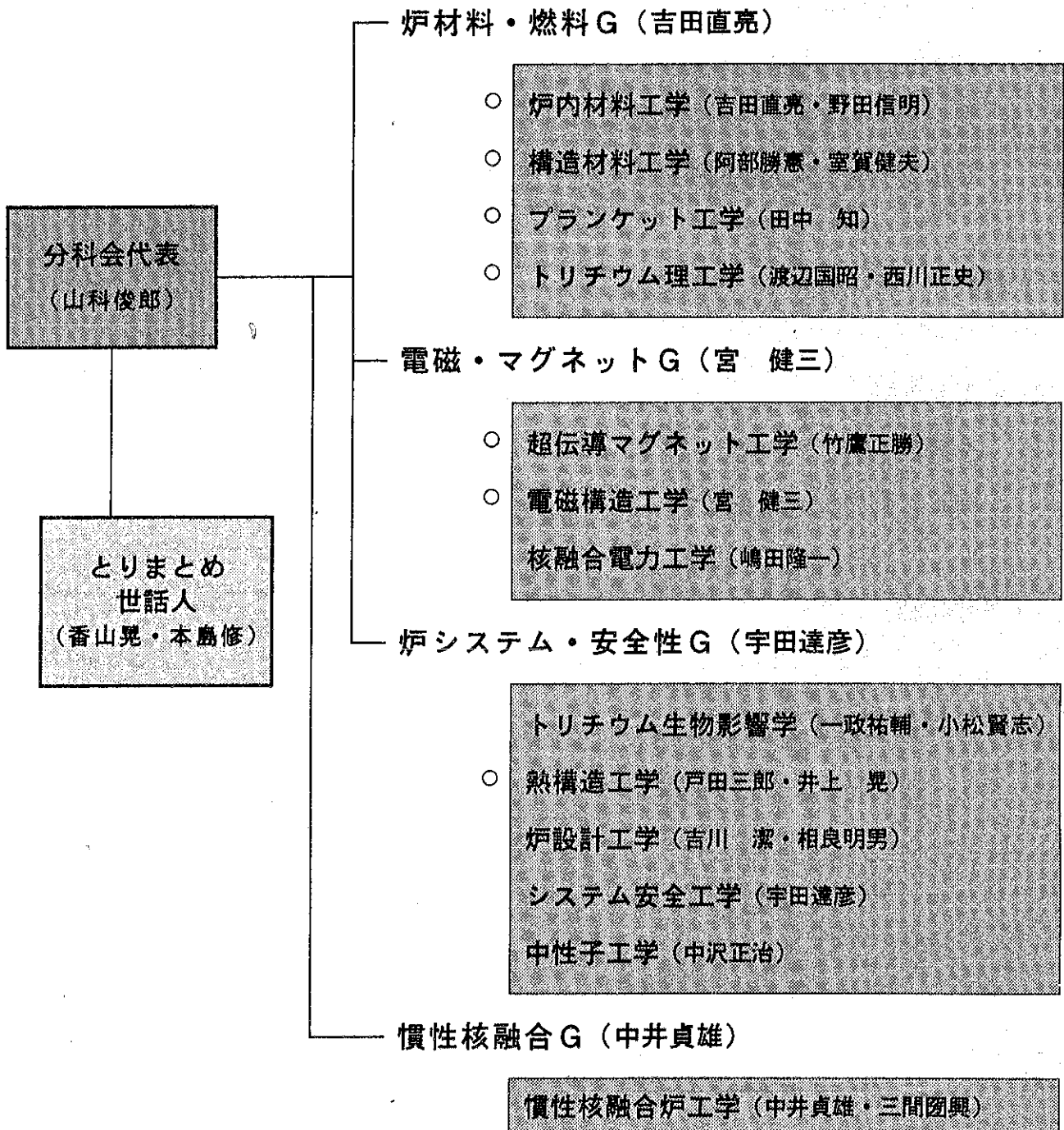
- 炉心プラズマ分野

- 炉工学分野
熱粒子制御グループ
電磁マグネットグループ

- 予算削減

- 成果の評価

炉工学分科会の構成



「プラズマ壁相互作用と炉内材料に関する研究会」

N I F S 共同研究

原子力学会・プラ核学会専門委員会

未来エネルギー研究協会

4回／年 開催

今年度の予定

1997年6月27日 今回の研究会（計画共同研究・紹介）

9月11日～12日 P S I と炉内材料研究会（札幌・北大）

12月8日～10日 日米ワークショップ（San Diego）

1998年2月中旬 P S I と炉内材料研究会（九大）

3月中旬 計画共同研究成果報告会（N I F S）

評価委員会2次年度計画

プラズマ対向機器・P S I・熱・粒子制御合同研究会議事録

日 時： 平成9年6月27日（金）9：00～16：20

場 所： 核融合科学研究所・管理棟4F第1会議室

出席者： 別 紙

開会に先だち、核融合研・本島主幹よりあいさつがあり、平成9年度のLHD計画共同研究の状況と、10年度以降の展望等について説明があった。

以下に講演題目、講演者、主な質疑応答、コメントを記す。講演内容は別添の資料参照。

1. LHDダイバータ材料の損耗と損傷の評価 吉田直亮 (九大応力研)
 - (質) 磁性材料をとりつけて実験することは可能か？
 - (答) 非常に磁場が強く磁性体を入れることは難しい。
 - (質) 電位をかけることは可能か？
 - (答) ヘッド部分は電氣的に絶縁されており可能な構造になっている。
 - (質) 試料温度を制御できるか？
 - (答) 現時の設計では加熱は織り込まれていないが、ヒーター等を組み込むことは可能である。
 - (質) TRIAM 実験タングステンサンプル損傷は水素によるものか？
 - (答) 水素放電であり、水素によると考えている。
 - (質) 真空のまま試料の移送はできるか？
 - (答) 現在は考えていないが、改造により、可能にできる。

2. 定常高粒子束イオンビームによる
対向材料スパッタリングの評価 西川雅弘 (阪大工)
 - (質) スパッターででてくる粒子のエネルギー分布は測定できるか？
 - (答) 今はそこまで考えていない。
 - (質) どんな材料を標的に考えているか？
 - (答) 炭素や、タングステン等の重金属などである。

3. 溶融塩トリチウム増殖材料FLIBEと構造材料の共存性 寺井隆幸
田中 知 (東大工)
 - (質) MHD効果についてはどのくらいか？
 - (答) ブランケットにおける流速条件に依存するが、数mV程度以上の起電力が、溶融塩-配管材料間に生じ、腐食が促進される可能性がある。
 - (質) ループを形成して実験を行うことの必要性和意義は？
 - (答) 実際の体系における腐食速度を予測するためには、腐食に伴う物質移動の効果を流動条件下で定量的に調べる必要がある。静的な腐食実験においては、平衡論

に立脚した腐食の傾向が明らかにされるのみであることから、ループを用いた動的な腐食実験を実施することがぜひ必要である。

(質) 外国ではどのくらい研究が行われているか？

(答) 現在では全く行われていない。ずっと以前、ORNLでMSREというフッ化物溶融塩原子炉の実験が行われた。国内では、原研で硝酸塩を用いた研究が行われたことがある。

(質) 磁場下での腐食は？

(答) 原研での硝酸塩を使ったループ実験では、磁場下で誘起される電位は数mV程度であったと思う (答・河村)

4. 溶融塩強制循環ループユニットの開発と

それを用いたダイバータ高熱流除熱体

及びブランケット溶融塩技術の開発と評価

戸田三朗 (東北大工)

(質) 熱媒体としての実績は？

(答) 硝酸塩についてはあるが、FLiBeについてはない。FLiBeは別として、溶融塩は金属熱処理や燃料電池(流れはないが)などで広く使われている。本研究で使用するポンプは商業生産されており、ポンプの需要があるということは、実際に一般高温融体用に使用されていることを示している。

(質) ステンレス鋼の腐食試験は？

(答) ORNLで行われており、weight lossのデータはある。当面の実験では問題ないが、炉では要検討。

(質) ポンプは実際にできているのか？

(答) ステンレス鋼のもの設計は完了しており、いつでもつくれる状況にある。 Hastelloyのものは開発から始める必要がある。

(質) 温度コントロールの精度は？

(答) よい。プラスマイナス数度以内。

(質) ダイバータ熱付加はどのくらいを目標としているか？

(答) 数MW/m²程度以下。プラントル数が高く、水に比べると押し込み圧力を高くする必要があり、そこで限界が決まってくる。

5. 高熱流束による材料損傷とダイバータ板冷却特性評価

奥 達雄 (茨城大工)

(質) 共同研究受入れ体制を紹介して欲しい。

(答) 共同開発研究センター1階に部屋を確保。当面、職員4名、学生1名で運転保守体制を組む。

(質) 電子ビームを2点間で振ることのメリットは？

(答) 1個所での立ち上がりを速くできる。2個の試料を並行して照射できる。

(質) ACTとドッキングできるか？

(答) 電子源を共通の真空容器に入れることは可能。

(質) エッジの欠陥の原因は？

(答) 接合状態の乱れによる応力集中と思われる。

6. 定常強磁場中の第一壁コンディショニング法の研究

菅井秀郎

豊田浩孝 (名大工)

(質) プラズマの流速はどのくらいか?

(答) 流速は遅いが、流れは両方向であり、流速の影響は少ない。

(質) 磁場依存性は?

(答) ECRの共鳴周波数の関係から磁場を変える実験はやっていない。

(質) ヘリコン波による生成の証明は? 効率はどうか?

(答) カップリングは良く、大きな損失はない。

(質) 測定手段の準備が重要。

(答) 検討します。

(質) 均一な膜生成のためには、ガス導入は1個所でよいか?

(答) デカボランの場合は複数必要。パルス/間欠運転というやりかたも有効。

7. 第一壁における燃料粒子リサイクリングと

不純物の発生・輸送

森田健治 (名大工)

(質) 質量差が大きいという近似が入っているが、ベリリウムで問題はないか?

(答) 2乗できいてくるので問題ない。

(質) オプティカルな分光は考えていないのか?

(答) 光が弱く、ドップラー広がりをとるのは技術的、コスト的に難しい。

(質) 反射係数と2次電子放出係数と2個所にエネルギー依存のある係数が出てくる。

(答) 単色エネルギービームで2つの係数を込みで校正することになる。

8. LHDにおける材料中のトリチウム計測

とインベントリ評価

松山政夫 (富山大)

(質) どの深さからの寄与かは判別できるか?

(答) 炭素では1mmくらいの深さまで測定できる。ジルコニウムでは30~40 μ m

(質) コンプトン散乱の重なりはうまく処理できるか?

(答) 問題ない。

(質) 実際のもものとエネルギーに違いがあることについてどう考えるか?

(答) 当面はサーマルを対象。高エネルギーについてはシミュレーションで補う。

9. プラズマ中の静電場形成による

畠山力三,

熱・粒子輸送制御法の開発

犬竹正明 (東北大工)

・井戸型磁場配位では、定常的なプラズマ流れ障壁電位は障壁電位は小さくなる。

・プラズマの流れにおいて、上流と下流で段差ができる。

(質) LHD(ダイバータ板に向かい磁場が弱くなる)に適應できるか?

(答) コールドプラズマをコアに行かせないことはできる。原理的には流れはなくてよい。

・LHD計画共同研究で行われたのは、垂直電場(シア)と低周波揺動の制御に関する研究である。

- ・マイクロ波パワーはポテンシャルをつくるための局所加熱である。
- ・トラスではエネルギー収支を明確にしたい。局所加熱とプラズマ加熱のバランス評価が必要。
- ・密度勾配は変えないように工夫している。
(リミター, エンドプレート, 壁との距離等)

10. 高熱流シートプラズマによる

ダイバータ模擬実験

河村和孝 (東海大)

- (質) ダイバータは装置にdependすると云われている。スケーリングにあうか？
- (答) 基礎的には本装置での電離の mean free path は 10 m 程度なので無衝突である。
- ・ Maxwell-Boltzman 分布にしたがうことは、スペクトルをとり、確認している。
 - ・ プラズマ流は無衝突なので、統計的に、ガスダイバータ部は流体力学的に解析する必要がある。
 - ・ スケーリングを視野に入れ、シミュレーションを始めたばかりであるが、コンピューターシミュレーションができるようにしたい。

11. 磁化プラズモイド入射法による

高温プラズマ熱粒子制御の試行実験

宇山忠男 (姫路工大)

- (質) 鞍形コイルによりCT入射の部分の磁場をキャンセルする案であるが、LHD装置への誤差磁場としての影響はないのか。
- (答) これから定量的評価を進める必要があるが、CTを発生・加速する0.1ms程度の時間のみこの磁場が必要であり影響は少ないと考えている。
- (質) 不純物対策として電極をタングステンにすることが提案されているが、高Z不純物が新たに悪影響を及ぼさないか、電極からの不純物の軽減には他の方法もあるのでは？
- (答) タングステン溶射を施した電極については他の装置で実績がある。外部電極をメッシュ構造にする考えなども有効かもしれない。高Z不純物は質量が大きいため加速中にCT本体から取り残され分離が可能であることが実験的にも観測されている。
- (質) 現在200 km/s までの加速が実現されており、さらに速度を上げることが期待されているが、電源容量と実現速度のグラフから見ると飽和する傾向があるように見えたのだが。
- (答) グラフの表示の仕方のためで、そういう飽和は観測されておらず、電源容量を大きくすることによってさらに速度を上げることはできるはずだ。

最後に、山科俊郎北大教授より、本研究会全体に関するコメントが述べられ、研究会と日米ワークショップなどに関する今年度の今後の計画の説明があった。とくに、9月に札幌で開催予定の、「プラズマ・壁相互作用と炉内材料に関する研究会」について詳しく紹介された。

以上

研究会参加者名簿

氏名	所属	電話	ファックス	E-MAIL
渥美寿雄	近畿大学 理工学部	06-721-2332 ex. 4367	06-723-2721	atsumi@ned.kindai.ac.jp
稲垣滋	核融合科学研究所	0572-58-2143	0572-58-2618	inagaki@LHD.nifs.ac.jp
井上徳之	核融合科学研究所	0572-58-2147	0572-58-2618	inoue@LHD.nifs.ac.jp
上田良夫	大阪大学 工学部	06-879-7236	06-879-7867	yueda@ppl.eng.osaka-u.ac.jp
宇田達彦	核融合科学研究所	0572-58-2083	0572-58-2610	udat@seblue.nifs.ac.jp
宇山忠男	姫路工業大学 工学部	0792-67-4864	0792-67-4864	uyama@elnics.eng.himeji-tech.ac.jp
奥達雄	茨城大学 工学部	0294-38-5020 029-228-8410	0294-38-5020	oku@mech.ibaraki.ac.jp
奥野健二	静岡大学 理学部	054-238-4802	054-238-3989	srkokun@sci.shizuoka.ac.jp
加藤雄大	京都大学 エネルギー理工学研究所	0774-38-3461	0774-38-3467	kato@iae.kyoto-u.ac.jp
河村和孝	東海大学 総合科学技術研究所	0463-58-1211 ex. 5300, 5519	0463-58-1203	
久保田雄輔	核融合科学研究所	0572-58-2129	0572-58-2616	kubota@LHD.nifs.ac.jp
桑原竜弥	名古屋大学 大学院 工学研究科	052-789-3144	052-789-3144	t-kuwaba@echo.nuee.nagoya-u.ac.jp
小林政弘	名古屋大学 大学院 工学研究科	052-789-3144	052-789-3944	m-kobaya@echo.nuee.nagoya-u.ac.jp
小森彰夫	核融合科学研究所	0572-58-2165	0572-58-2618	komori@LHD.nifs.ac.jp
坂本隆一	核融合科学研究所	0572-58-2142	0572-58-2618	sakamoto@LHD.nifs.ac.jp
相良明男	核融合科学研究所	0572-58-2155	0572-58-2618	sagara@LHD.nifs.ac.jp
都筑和泰	核融合科学研究所	0572-58-1221	0572-58-2618	tuzuki@nifs.ac.jp
寺井隆幸	東京大学 工学部	03-3812-2111 ex. 7688	03-5800-6824	tera@starling.t.u-tokyo.ac.jp
徳永和俊	九州大学 応用力学研究所	092-583-7708	092-583-7690	tokunaga@riam.nifs.ac.jp
戸田三朗	東北大学 工学研究科	022-217-7901	022-217-7904	stoda@hll.nucle.tohoku.ac.jp
利根川昭	東海大学 理学部	0463-58-1211	0463-58-1812	tone@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp
豊田浩孝	名古屋大学 工学部	052-789-4698	052-789-3150	toyota@nuee.nagoya-u.ac.jp
中村幸男	核融合科学研究所	0572-58-2164	0572-58-2618	ynakamu@LHD.nifs.ac.jp
西川雅弘	大阪大学 工学部	06-879-7234	06-879-7235	nshikawa@ppl.eng.osaka-u.ac.jp
野田信明	核融合科学研究所	0572-58-2152	0572-58-2618	noda@LHD.nifs.ac.jp
畠山力三	東北大学 工学研究科	022-217-7113	022-263-9373	hatake@ecei.tohoku.ac.jp
原淳一郎	名古屋大学 大学院 工学研究科	052-789-3144	052-789-3944	j-hara@echo.nuee.nagoya-u.ac.jp
藤田一郎	北海道大学 工学研究科	011-706-6661	011-706-7885	ichiro@hune.hokudai.ac.jp
舟場久芳	核融合科学研究所	0572-58-2144	0572-58-2618	funaba@LHD.nifs.ac.jp
増崎貴	核融合科学研究所	0572-58-2145	0572-58-2618	masuzaki@LHD.nifs.ac.jp
松山政夫	富山大学 水素同位体機 能研究センター	0764-45-6926	0764-45-6931	masao@hrc.toyama-u.ac.jp
室賀健夫	核融合科学研究所	0572-58-2133	0572-58-2616	muroga@LHD.nifs.ac.jp
本島修	核融合科学研究所	0572-58-2140	0572-58-2617	motojima@LHD.nifs.ac.jp
森田健治	名古屋大学 工学部	052-789-4686	052-789-3791	k-morita@nucl.nagoya-u.ac.jp
山科俊郎	北海道大学 工学部	011-706-6659	011-747-9366	yamasina@hune.hokudai.ac.jp
吉田直亮	九州大学 応用力学研究所	092-583-7716	092-583-7690	yoshida@riam.kyushu-u.ac.jp
渡辺二大	核融合科学研究所	0572-58-2283	0572-58-2630	wata@LHD.nifs.ac.jp

Publication List of NIFS-PROC Series

- NIFS-PROC-1 "U.S.-Japan on Comparison of Theoretical and Experimental Transport in Toroidal Systems Oct. 23-27, 1989", Mar. 1990
- NIFS-PROC-2 "Structures in Confined Plasmas –Proceedings of Workshop of US-Japan Joint Institute for Fusion Theory Program– "; Mar. 1990
- NIFS-PROC-3 "Proceedings of the First International Toki Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion –Next Generation Experiments in Helical Systems– Dec. 4-7, 1989" Mar. 1990
- NIFS-PROC-4 "Plasma Spectroscopy and Atomic Processes –Proceedings of the Workshop at Data & Planning Center in NIFS–"; Sep. 1990
- NIFS-PROC-5 "Symposium on Development of Intensed Pulsed Particle Beams and Its Applications February 20 1990"; Oct. 1990
- NIFS-PROC-6 "Proceedings of the Second International TOKI Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion , Nonlinear Phenomena in Fusion Plasmas -Theory and Computer Simulation-"; Apr. 1991
- NIFS-PROC-7 "Proceedings of Workshop on Emissions from Heavy Current Carrying High Density Plasma and Diagnostics"; May 1991
- NIFS-PROC-8 "Symposium on Development and Applications of Intense Pulsed Particle Beams, December 6 - 7, 1990"; June 1991
- NIFS-PROC-9 "X-ray Radiation from Hot Dense Plasmas and Atomic Processes"; Oct. 1991
- NIFS-PROC-10 "U.S.-Japan Workshop on "RF Heating and Current Drive in Confinement Systems Tokamaks" Nov. 18-21, 1991, Jan. 1992
- NIFS-PROC-11 "Plasma-Based and Novel Accelerators (Proceedings of Workshop on Plasma-Based and Novel Accelerators) Nagoya, Japan, Dec. 1991"; May 1992
- NIFS-PROC-12 "Proceedings of Japan-U.S. Workshop P-196 on High Heat Flux Components and Plasma Surface Interactions for Next Devices"; Mar. 1993
- NIFS-PROC-13 『NIFS シンポジウム
「核燃焼プラズマの研究を考えるー現状と今後の取り組み方」
1992年7月15日、核融合科学研究所』
1993年7月

NIFS Symposium

"Toward the Research of Fusion Burning Plasmas -Present Status and Future strategy-", 1992 July 15, National Institute for Fusion Science"; July 1993 (in Japanese)

NIFS-PROC-14 *"Physics and Application of High Density Z-pinchs", July 1993*

NIFS-PROC-15 岡本正雄、講義「プラズマ物理の基礎」
平成5年度 総合大学院大学
1994年2月
M. Okamoto,
"Lecture Note on the Bases of Plasma Physics"
Graduate University for Advanced Studies
Feb. 1994 (in Japanese)

NIFS-PROC-16 代表者 河合良信
平成5年度 核融合科学研究所共同研究
研究会報告書
「プラズマ中のカオス現象」
"Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences"
Report of the meeting on Chaotic Phenomena in Plasma
Apr. 1994 (in Japanese)

NIFS-PROC-17 平成5年度 NIFS シンポジウム報告書
「核融合炉開発研究のアセスメント」
平成5年11月29日-30日 於 核融合科学研究所
"Assessment of Fusion Reactor Development"
Proceedings of NIFS Symposium held on November 29-30,
1993 at National Institute for Fusion Science" Apr. 1994
(in Japanese)

NIFS-PROC-18 *"Physics of High Energy Density Plasmas Produced by Pulsed Power" June 1994*

NIFS-PROC-19 K. Morita, N. Noda (Ed.),
"Proceedings of 2nd International Workshop on Tritium Effects in Plasma Facing Components at Nagoya University, Symposium Hall, May 19-20, 1994", Aug. 1994

NIFS-PROC-20 研究代表者 阿部 勝憲 (東北大学・工学部)
所内世話人 野田信明
平成6年度 核融合科学研究所共同研究 [研究会]
「金属系高熱流束材料の開発と評価」成果報告書
K. Abe and N. Noda (Eds.),
"Research and Development of Metallic Materials for Plasma Facing and High Heat Flux Components" Nov. 1994
(in Japanese)

NIFS-PROC-21 世話人：森田 健治 (名大工学部)、金子 敏明 (岡山理科大学理学部)
「境界プラズマと炉壁との相互作用に関する基礎過程の研究」

研究会報告

K. Morita (Nagoya Univ.), T. Kaneko (Okayama Univ. Science)(Eds.)
"NIFS Joint Meeting "Plasma-Divertor Interactions" and
"Fundamentals of Boundary Plasma-Wall Interactions"
January 6-7, 1995 National Institute for Fusion Science"
Mar. 1995 (in Japanese)

NIFS-PROC-22

代表者 河合 良信
プラズマ中のカオス現象
Y. Kawai,
"Report of the Meeting on Chaotic Phenomena in Plasma, 1994"
Apr. 1995 (in Japanese)

NIFS-PROC-23

K. Yatsui (Ed.),
"New Applications of Pulsed, High-Energy Density Plasmas";
June 1995

NIFS-PROC-24

T. Kuroda and M. Sasao (Eds.),
"Proceedings of the Symposium on Negative Ion Sources and Their
Applications, NIFS, Dec. 26-27, 1994" , Aug. 1995

NIFS-PROC-25

岡本 正雄
新古典輸送概論 (講義録)
M. Okamoto,
"An Introduction to the Neoclassical Transport Theory"
(Lecture note), Nov. 1995 (in Japanese)

NIFS-PROC-26

Shozo Ishii (Ed.),
"Physics, Diagnostics, and Application of Pulsed High Energy
Density Plasma as an Extreme State"; May 1996

NIFS-PROC-27

代表者 河合 良信
プラズマ中のカオスとその周辺非線形現象
Y. Kawai ,
"Report of the Meeting on Chaotic Phenomena in Plasmas and
Beyond, 1995", Sep. 1996 (in Japanese)

NIFS-PROC-28

T. Mito (Ed.),
"Proceedings of the Symposium on Cryogenic Systems for Large Scale
Superconducting Applications", Sep. 1996

NIFS-PROC-29

岡本 正雄
講義「核融合プラズマ物理の基礎 - I」
平成 8 年度 総合研究大学院大学 数物科学研究科 核融合科学専攻
1996年 10月
M. Okamoto
"Lecture Note on the Fundamentals of Fusion Plasma Physics - I"
Graduate University for Advanced Studies; Oct. 1996 (in Japanese)

- NIFS-PROC-30 研究代表者 栗下 裕明 (東北大学金属材料研究所)
所内世話人 加藤 雄大
平成8年度核融合科学研究所共同研究
「被損傷材料の微小体積強度評価法の高度化」研究会
1996年10月9日 於：核融合科学研究所
H. Kurishita and Y. Katoh (Eds.)
NIFS Workshop on Application of Micro-Indentation Technique to Evaluation of Mechanical Properties of Fusion Materials, Oct. 9, 1996, NIFS
Nov. 1996 (in Japanese)
- NIFS-PROC-31 岡本 正雄
講義「核融合プラズマ物理の基礎 - II」
平成8年度 総合研究大学院大学 数物科学研究科 核融合科学専攻
1997年4月
M. Okamoto
"Lecture Note on the Fundamentals of Fusion Plasma Physics - II"
Graduate University for Advanced Studies; Apr. 1997 (in Japanese)
- NIFS-PROC-32 代表者 河合 良信
平成8年度 核融合科学研究所共同研究
研究会報告「プラズマ中のカオスとその周辺非線形現象」
Y. Kawai (Ed)
Report of the Meeting on Chaotic Phenomena in Plasmas and Beyond, 1996; Apr. 1997 (mainly in Japanese)
- NIFS-PROC-33 H. Sanuki,
Studies on Wave Analysis and Electric Field in Plasmas; July 1997
- NIFS-PROC-34 プラズマ対向機器・PSI・熱・粒子制御合同研究会報告
平成9年6月27日(金) 9:00~16:20
核融合科学研究所・管理棟4F第1会議室
1997年10月
T. Yamashina (Hokkaido University)
Plasma Facing Components, PSI and Heat/Particle Control
June 27, 1997, National Institute for Fusion Science
T. Yamashina (Hokkaido University)
Oct. 1997 (in Japanese)