

J A E R I - M
90-167

J T - 60 トムソン散乱計測における蒸着
膜形成による観測窓の透過率低下と電子
温度・密度測定値へ及ぼす影響

1990年9月

三浦 良和・吉田 英俊・佐久間 猛
山下 修・長島 章・的場 徹

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）
あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1990

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 日立高速印刷株式会社

J T - 60 トムソン散乱計測における蒸着膜形成による観測窓の
透過率低下と電子温度・密度測定値へ及ぼす影響

日本原子力研究所那珂研究所臨界プラズマ研究部

三浦 良和・吉田 英俊・佐久間 猛

山下 修・長島 章・的場 徹

(1990年8月31日受理)

J T - 60 トムソン散乱計測において、レーザ散乱光を観測する窓がプラズマからのスパッター等で汚れることにより、電子温度及び電子密度の測定値に影響を及ぼすことを明らかにした。本報告書は、1987～1989年の4期に渡る J T - 60 実験期間において、蒸着膜が付着した観測窓の分光透過率測定と蒸着膜の成分分析及び原因調査を行い、電子温度及び電子密度に与える影響を定量的に評価し、実験運転との対応について検討した結果をまとめたものである。

Effect of Coated Window on Electron Temperature and
Density Evaluation in JT-60 Thomson Scattering Diagnostic

Yoshikazu MIURA, Hidetoshi YOSHIDA, Takeshi SAKUMA
Osamu YAMASHITA, Akira NAGASHIMA and Tohru MATOBA

Department of Large Tokamak Research
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received August 31, 1990)

The viewing window of Thomson scattering diagnostic is blurred by discharge cleaning and so on. The transmission of the coated window is then reduced with decreasing wavelength. This wavelength-dependent transmission affects the evaluation of electron temperature and density in Thomson scattering measurement. In this report, based on the transmissions of coated windows measured for 4 periods of JT-60 experiments (1987-1989), the effect of coated window on electron temperature and density evaluation is investigated quantitatively.

Keywords: JT-60, Thomson Scattering, Viewing Window, Coated Films, Taylor Discharge Cleaning, Transmission, Scattering Angle, Spectral Density Function, Electron Temperature, Electron Density

目 次

1. 序	1
2. 観測窓の透過率測定	2
2.1 トムソン散乱計測用観測窓の取付位置と測定視野	2
2.2 透過率の波長依存性	2
2.3 蒸着膜の成分分析	3
3. 評価計算の方法	15
3.1 トムソン散乱のスペクトル密度関数と散乱光子数	15
3.2 処理フロー	16
4. 計算結果	25
4.1 T_e 評価への影響	25
4.2 n_e 評価への影響	25
5. 議論	35
5.1 運転実績と観測窓透過率の減衰特性	35
5.2 運転実績と T_e, n_e 変化率	36
5.3 散乱角と T_e, n_e 変化率	36
5.4 対策	36
6. 結論	43
謝 辞	44
参考文献	44

Contents

1. Introduction	1
2. Spectral Transmission Measurement of Coated Viewing Window	2
2.1 Arrangement of JT-60 Thomson Scattering Diagnostic	2
2.2 Wavelength Dependence of Transmission	2
2.3 Analysis of Coated Films on Viewing Window	3
3. Estimation Method	15
3.1 Spectral Density Function and Photon Numbers of Thomson Scattering	15
3.2 Calculation Procedure	16
4. Calculation Results	25
4.1 Effect on T_e Evaluation	25
4.2 Effect on n_e Evaluation	25
5. Discussion	35
5.1 Relation between JT-60 Operation and Decrease in Transmission of Coated Window	35
5.2 Relation between JT-60 Operation and Effect on T_e and n_e Evaluation	36
5.3 Relation between Scattering Angle and Effect on T_e and n_e Evaluation	36
5.4 Possible Treatments for Improving T_e and n_e Evaluation with Coated Window	36
6. Conclusion	43
Acknowledgement	44
References	44

1. 序

トムソン散乱計測法は、プラズマの電子温度 (T_e) と電子密度 (n_e) の絶対値及びその空間分布を直接測定することが可能であるという点で、電子系計測の中核をなす計測法である^[1]。本計測法は、実用化以来20年以上の実績を有し、また最新の科学技術の導入によって高空間分解能化と高繰り返し計測化がはかられてきた^[2-5]。また、プラズマの閉じ込め性能の評価や電子系輸送の解明に本計測法は不可欠であるため、将来ともプラズマ計測の基幹をなすものと考えられる。JT-60の電子温度測定ではトムソン散乱計測法をはじめとして、電子サイクロotron放射光 (ECE) のフーリエ分光法^[6]やポリクロメータ^[7]、電子の制動放射スペクトルを利用する軟X線波高分析計測法^[8]が整備され、これら測定器間のクロスチェックにより電子温度測定の信頼性や精度を高めている。一方、JT-60の電子密度測定では、他にマイクロ波や遠赤外レーザによる干渉計測法^[9]がある。この方法では、電子密度は線積分の形で測定されるが、トムソン散乱計測法では、 T_e と同様に電子密度を局所的に測定する点に特徴があり T_e 、 n_e の標準計測法として用いられている。

トムソン散乱計測では通常、広い空間測定範囲を確保するために観測窓を大口径にすると共に、測定の S/N 比を良くするために観測窓を極力プラズマに近接した場所に設置する必要がある。このため、観測窓はプラズマ放電やディスラプション、放電洗浄 (TDC 等) 等によって蒸着膜が形成され易い環境下にあると言える。従って、レーリー散乱による絶対較正時以降に観測窓の透過率が低減すると、 n_e は過少評価される。また透過率の減衰に波長依存性があると、 T_e 評価への影響も大きい。JT-60と共に世界の3大トカマクである JET や TFR においても、蒸着膜による T_e 、 n_e の測定データ評価への影響が報告されている^[10,11]。JT-60ではこれまで、トムソン散乱計測用観測窓にはプラズマ側前面にシャッター弁を設置し、TDC 時にはシャッターを閉めて観測窓に蒸着膜が形成されるのを極力防止してきたが、下側ダイバータ実験期 (1988, 1989年) で使用したシャッター弁は、遠隔で実験シーケンスに同期して開閉操作することができない構造であったため、特にヘリウムを用いたショット間 TDC 時には、シャッターを開状態にせざるを得なかった。

本報告書は、過去3年間の4期に渡る JT-60 実験期間において、トムソン散乱計測用観測窓に形成された蒸着膜とそれに伴う透過率減衰特性の蓄積データを基に、それらによる T_e 及び n_e 評価への影響を検討し、併せて JT-60 運転実績との関連や今後の対策について考察したものである。

2章では観測窓の透過率の測定及び蒸着膜の成分分析について述べ、3章では測定した透過率が T_e 及び n_e 評価に与える影響を定量化する評価方法について触れ、4章では評価計算結果についてまとめ、5章では結果に対する議論と考察を行い、6章で今回の調査・検討によって得られた結論をまとめる。

2. 観測窓の透過率測定

1987年6月から1989年10月までの実験運転期間の中で1988年3月、1988年12月、1989年5月、1989年11月の計4回観測窓を取り外し、蒸着膜が付着した状態及びそれを研磨した後の状態での透過率測定を行った。本章では、観測窓の取付位置とJT-60トムソン散乱計測装置の配置、透過率の測定結果及び蒸着膜の成分分析結果について述べる。ここで便宜上、観測窓を使用していたJT-60実験運転期間を各々Ⅰ期（1987年6月～10月）、Ⅱ期（1988年6月～10月）、Ⅲ期（1989年1月～4月）、Ⅳ期（1989年6月～10月）と呼ぶことにする。写真2.1は、Ⅰ期の実験期間終了後に取り外した観測窓に形成された蒸着膜の状態を撮影したものである。

2.1 トムソン散乱計測用観測窓の取付位置と測定視野

観測窓は、直径260mm、厚さ30mmの合成石英（スプラジル2）である。取付場所は図2.1に示されるように斜上ポートで、ルビーレーザの入射光路からレンズ光軸上で2990mmの距離、散乱角62°の角度に位置し、JT-60プラズマの中心部から周辺部に渡るレーザ散乱光測定を可能にしている。空間測定点はA～Hの8点で、周辺用の測定点F、G、Hは当初1点であったものを3点に分割したものである。散乱角は空間測定点AよりHの方に行くに従って大きくなり、散乱長は空間測定点AよりHに行くに従って小さくなる。各空間測定点の位置と散乱長及び散乱角を表2.1に示す。

2.2 透過率の波長依存性

(1) 測定方法

観測窓の透過率測定には、島津製作所製の自記分光光度計(shimadzu UV-3100)を用いた。これは、光源に50Wのハロゲンランプ(長寿命2000H型)を、また測光に光電子増倍管(R-928)を使用したもので、試料を通した時と通さない時の光量の比率で透過率を求めている。今回の透過率測定では、入射角度は0°のみであった。

(2) 測定結果

研磨後の観測窓の透過率の波長特性は、トムソン散乱測定波長域(550～700nm)においては約94%でほぼ一定していた(図2.2)。観測窓は、無反射コーティングをしていないので表面反射のため透過率が約6%減少する。蒸着膜が付着した状態の観測窓の透過率は、図2.3に示すように各期それぞれ特徴のある波長特性を示したが、短波長側に行くに従って透過率の低下が大きくなるのは各期とも共通している。Ⅰ期は、他に比べ全体的に透過率の低下が小さいのが特徴で、450nmにおいても60%以上であった。Ⅱ期、Ⅲ期は、550nmより短波長側での

減衰勾配が大きいのが特徴である。Ⅱ期よりⅢ期の方が全体的に透過率の低下が大きい。Ⅳ期は、全体的に短波長側への減衰勾配が急峻であるのが特徴で、625 nm付近より長波長側ではⅢ期より低下が小さいものの、短波長側では減衰が大きい。

(3) 運転実績の調査結果

前述の透過率測定結果に対応する各期の JT-60運転実績を表2.2に示す。調査した運転実績の内容は、ショット数、全TDC露出時間(回数)、ショット間TDC露出時間(回数)、長時間TDC露出時間(回数)及びディスラプション回数である。ここで露出時間(回数)は、観測窓前面のシャッター弁が開状態のままTDCを実施した時間(回数)を積算したものである。また、ショット間TDC露出時間(回数)と長時間TDC露出時間(回数)を合計したのが全TDC露出時間(回数)である。ショット間TDCは、真空容器の内壁に捕捉された水素を除去し、主放電中の再放出を低減させることによって低リサイクリングのプラズマを生成することを目的とした、ショットとショットの間に行うヘリウム放電による短時間TDC(3~5分間)である。

I期は、真空容器の壁材に炭化チタン(TiC)をコーティングしたモリブデン(Mo)材を使用し、観測窓シャッター弁を開状態で長時間TDCを1回(250分)経験しているのが特徴である。Ⅱ期からは、壁材にC(グラファイト)を使用し、ショット間TDCを実施するようになった。Ⅲ期には、3回の長時間TDC(各々539分、625分、364分)を経験している。Ⅳ期には、4期の中で一番多くの回数(時間)のショット間TDCを経験している。尚、各期に共通して真空容器は300°C前後の高温ベーキングを実験期間中ほぼ全期に渡って実施している。これらの特徴と、 T_e 及び n_e 測定値への影響の関係については、5章で詳細に議論する。

2.3 蒸着膜の成分分析

(1) 軽元素分析

1988年6月から10月(Ⅱ期)の実験で使用した観測窓表面に形成された蒸着膜の軽元素分析を、昭和光機製造(株)に依頼して行い下記の結果が得られた。

1) 分析装置

島津製作所製 ESCA-750

2) 分析方法

観測窓の付着物(写真2.2、写真2.3)を、カーボンテープ(C-Tape)により採取し、電子分光法による化学分析ESCA(Electron Spectroscopy for Chemical Analysis)により膜表面の分析を行った。

3) 分析結果

図2.4にC-Tape上の付着物のESCAワイドスキャンスペクトルを示す。図に示されているように、検出された元素は、酸素(O)、窒素(N)、炭素(C)、珪素(Si)の4元素である。また、膜の付着がないC-Tape上の粘着剤のワイドスキャンスペクトルを図2.5に示す。これにより粘着テープ本体にはNが含まれていないことが判る。さらに

C-Tape上の付着物を2分間Arイオンでエッティングした結果を図2.6に示す。これは試料からテープの粘着剤を差し引いたもので、Si及びOが大幅に減少したことが判る。ワイドスキャンの結果から付着物の主成分はCであると言える。Cについてのナロースキャンによる分析結果を図2.7に示す。

(2) 重元素分析

1989年1月から4月(Ⅲ期)の実験で使用した観測窓に付着した蒸着物の重元素(金属)分析(ICP-AES法)を、東海研化学部分析センターに依頼し実施した結果、次の物質が検出された。検出量の多い順に、Fe(16 μ g), Ca(16 μ g), Zn(15 μ g), Al(10 μ g), Ni(8 μ g), V(8 μ g), Cr(2 μ g), Ti(2 μ g), Mn(1 μ g以下)で、他にCu, Co, Mo, W, Zr, Cdが微量ながら検出された。

表 2.1 測定視野に関連するパラメータ
 (JT-60トムソン散乱計測装置の空間測定点の位置。
 散乱長及び散乱角を示す。)

空間測定点	空間位置Z (mm)	散乱長 (mm)	散乱角 (deg)
A	-272.0	138.0	53.8
B	-16.5	128.0	57.4
C	219.3	117.5	61.0
D	440.0	96.0	64.6
E	646.5	91.0	68.2
F	805.8	36.5	71.1
G	842.8	36.5	71.8
H	879.5	35.0	72.4

表 2.2 観測窓とJT-60運転実績
 (JT-60トムソン散乱計測用観測窓の透過率を測定した各期における
 代表的なプラスマ配位、壁材、ショット数、ディスラッシュ回数及
 びTDC中に観測窓を露出した積算時間と積算回数を示す。)

期間	配位	壁材	ショット数	全TDC		ショット開TDC	長時間TDC	ディスラッシュ回数
				露出時間(分)	回数			
I期	外側ダイバーダ	TiC Coated Mo	1611(回)	240(分)	1(回)	0(回)	240(分)	1(回)
II期	下側ダイバーダ	C	1787	324	56	324	56	0(回)
III期	"	"	1351	2141	131	613	128	1528(回)
IV期	"	"	1905	1202	336	1202	336	0(回)

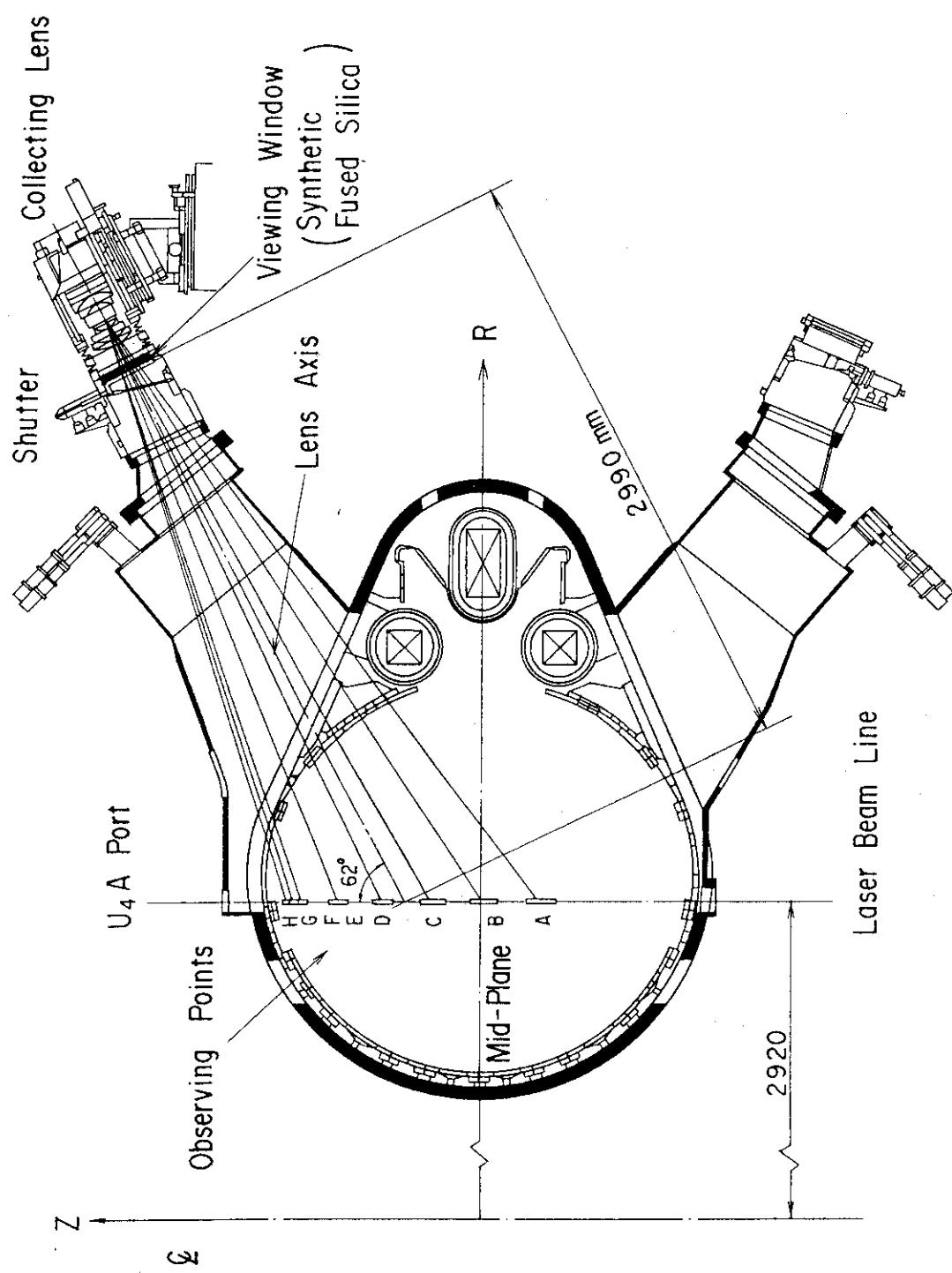


図 2.1 測定視野と観測窓の配置
(JT-60トムソン散乱計測装置の測定視野と観測窓の取付位置を示す。)

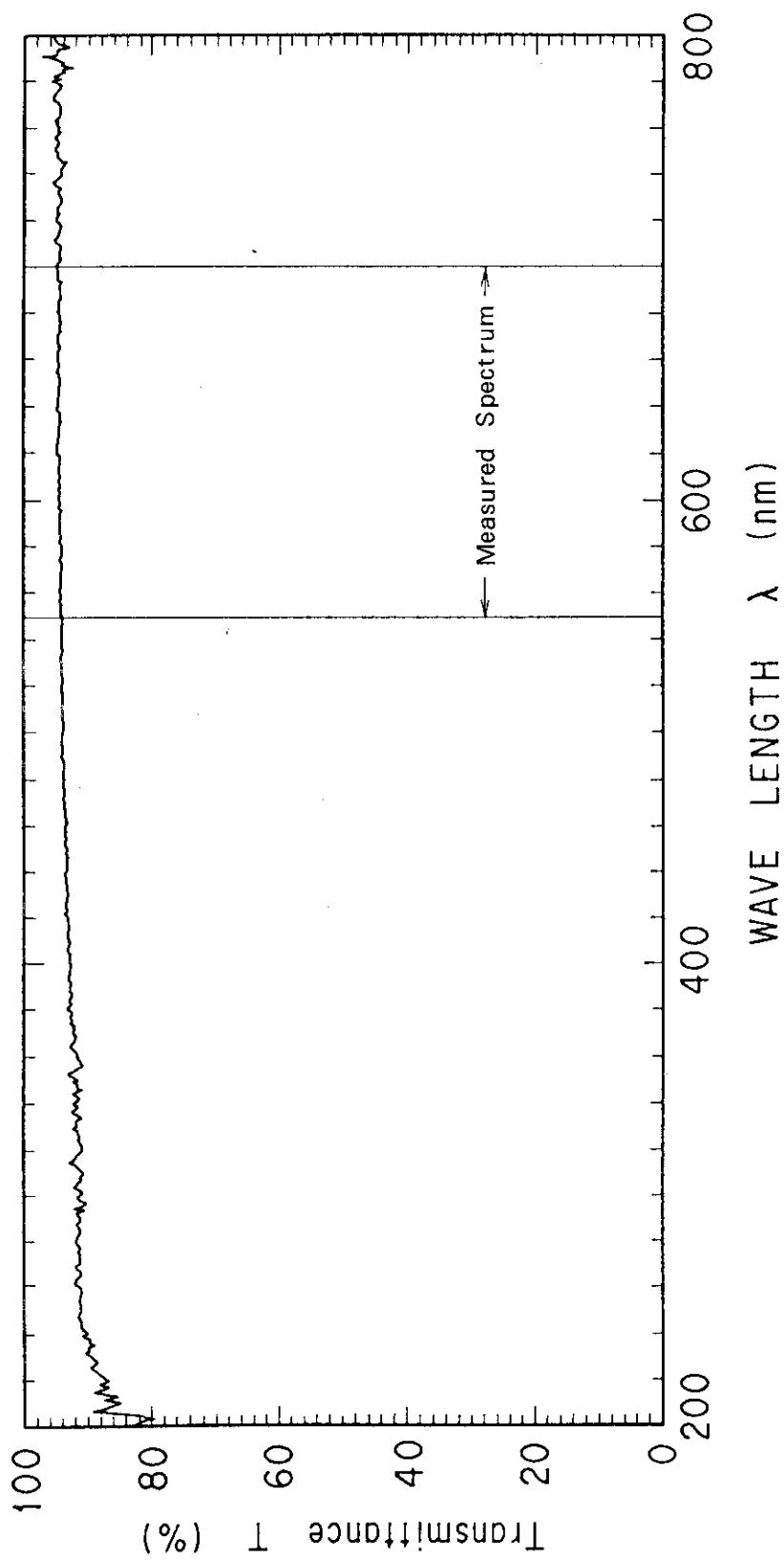


図 2 窓透過程率の波長特性（研磨後）
(I 期 (1987年6月～10月) に使用した観測窓の蒸着膜を研磨した後に測定)
(定した透過率の波長特性)

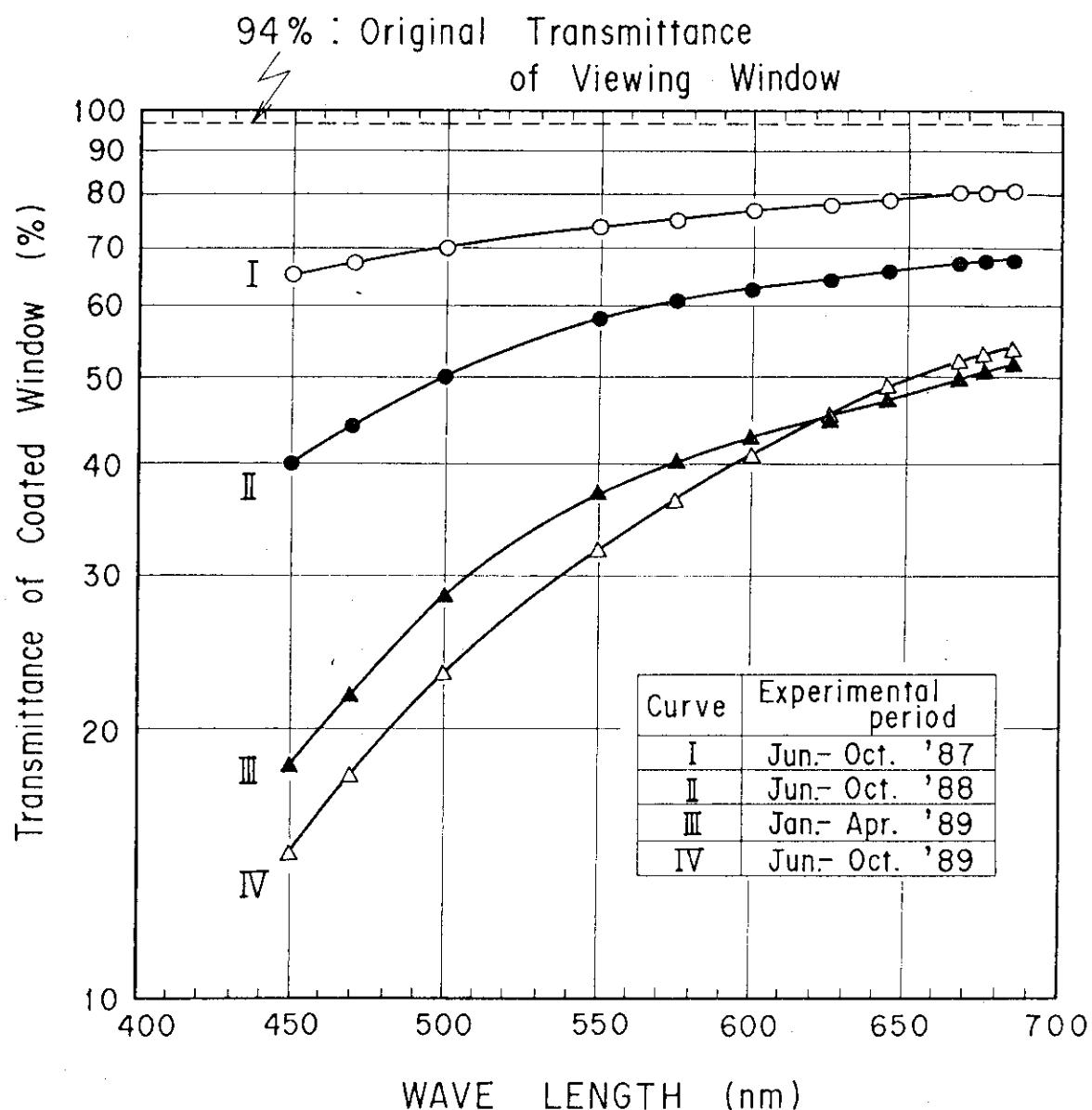


図 2.3 観測窓透過率の波長特性（蒸着膜が有る場合）
 （実験期間中に形成された蒸着膜によって減衰した観測窓透過率の）
 波長特性を各期で比較した。

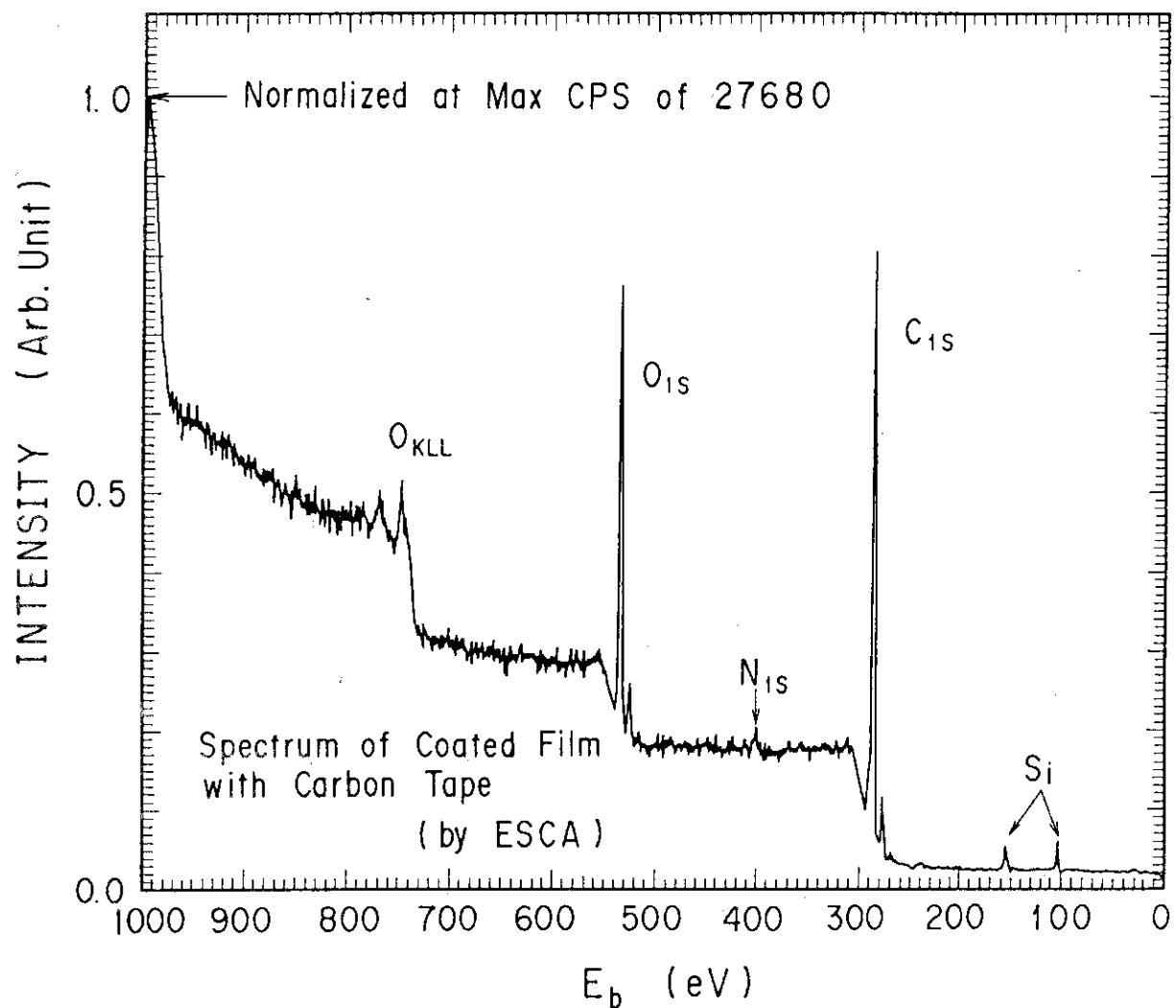


図 2.4 蒸着膜のワイドスキャンスペクトル（C-Tape 上の粘着剤成分を含む付着物）

観測窓の付着物をカーボンテープ（C-Tape）により採取し、E
(SCA (電子分光法による化学分析) で得られたワイドスキャン
スペクトルである。)

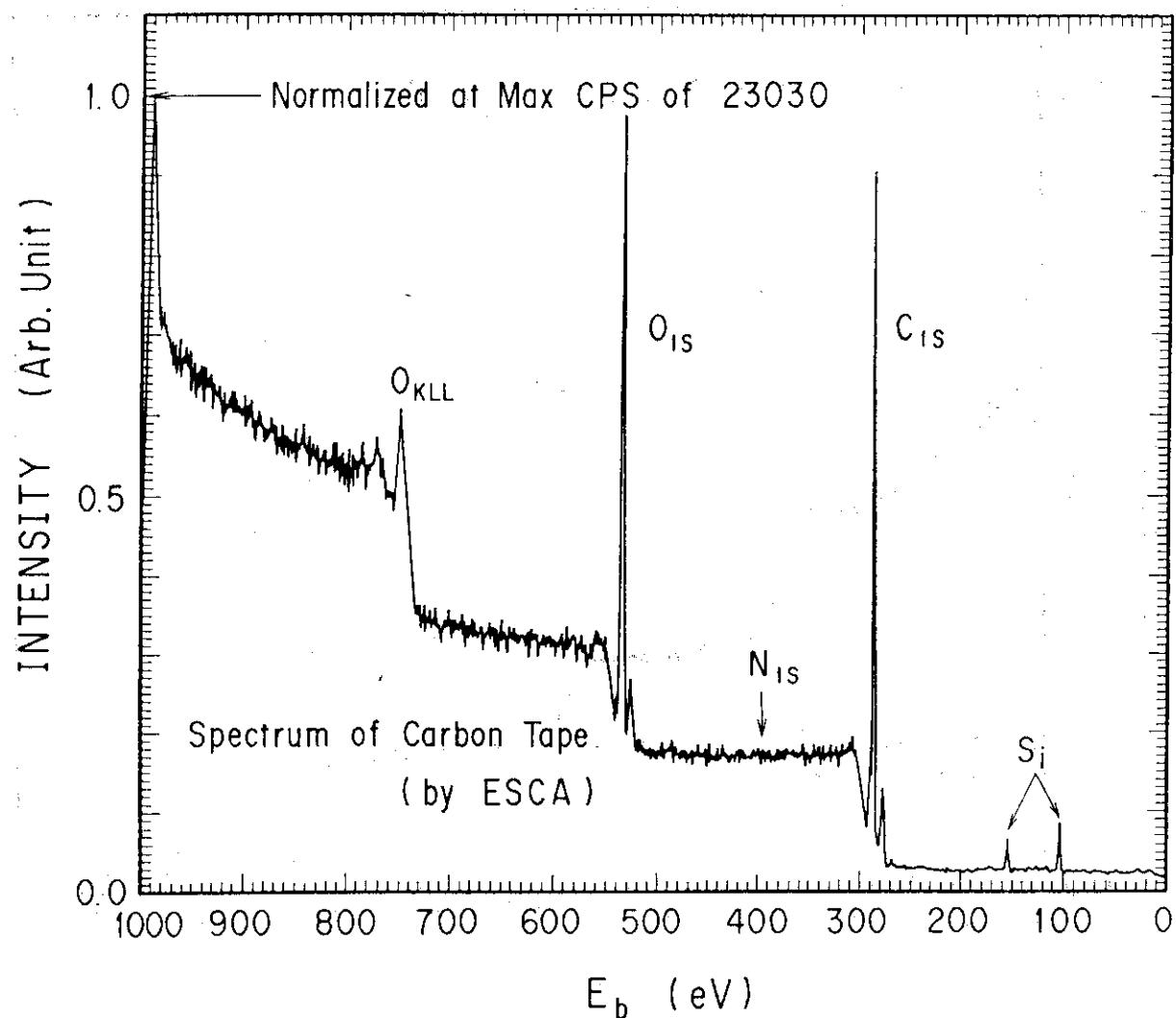
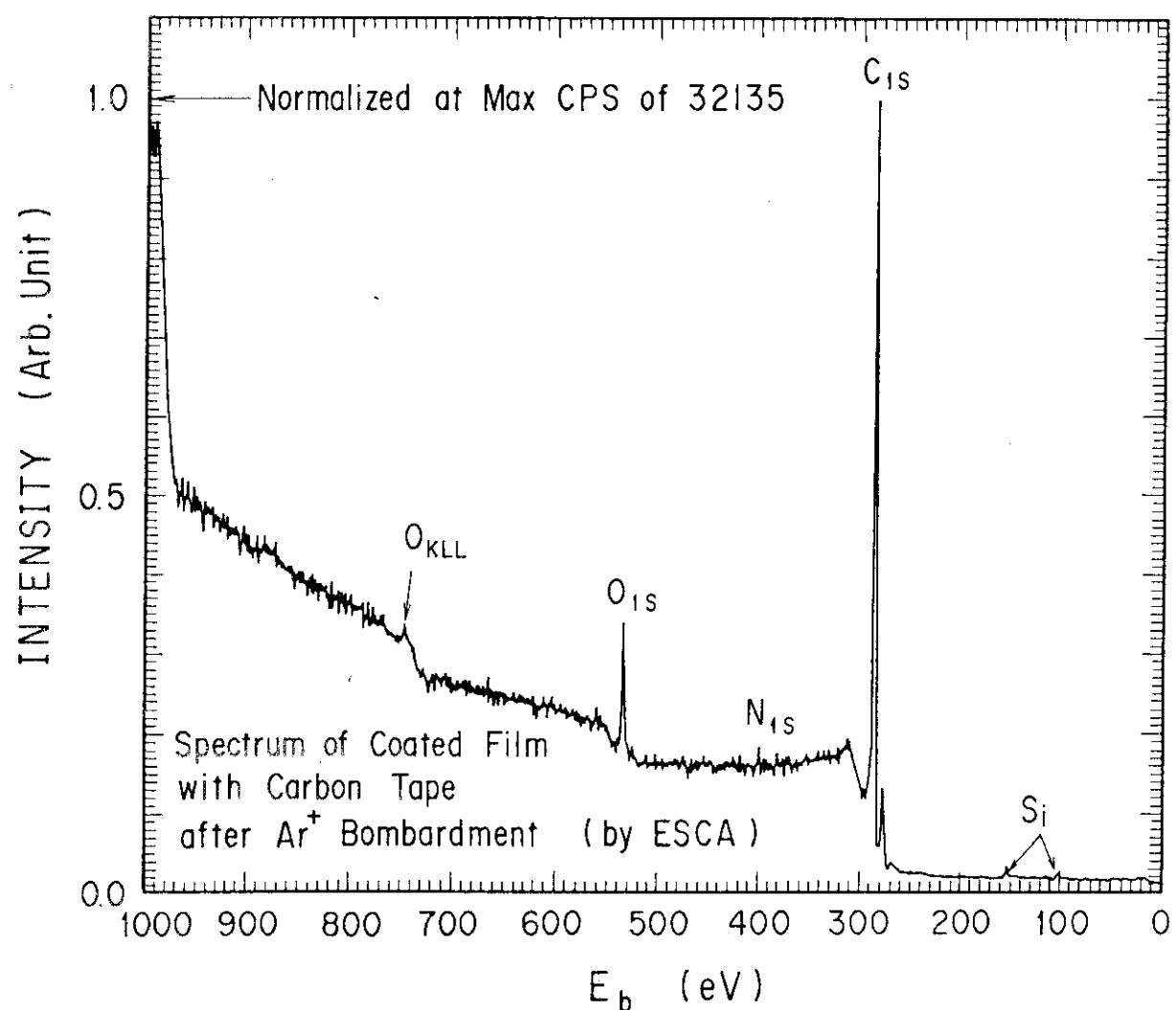


図 2.5 C-Tape 粘着剤成分のワイドスキャンスペクトル
 (蒸着物が付着していない C-Tape (C-STD) 自身に含まれる元)
 素のワイドスキャンスペクトルである。

図 2.6 蒸着膜のワイドスキャンスペクトル (Ar^+ エッチング後)

蒸着物が付着した C-Tape を 2 分間 Ar^+ エッチングした後に測定
 (したワイドスキャンスペクトルで、C-STD のスペクトルを差し引いた蒸着物のみのワイドスキャンスペクトルに対応する。)

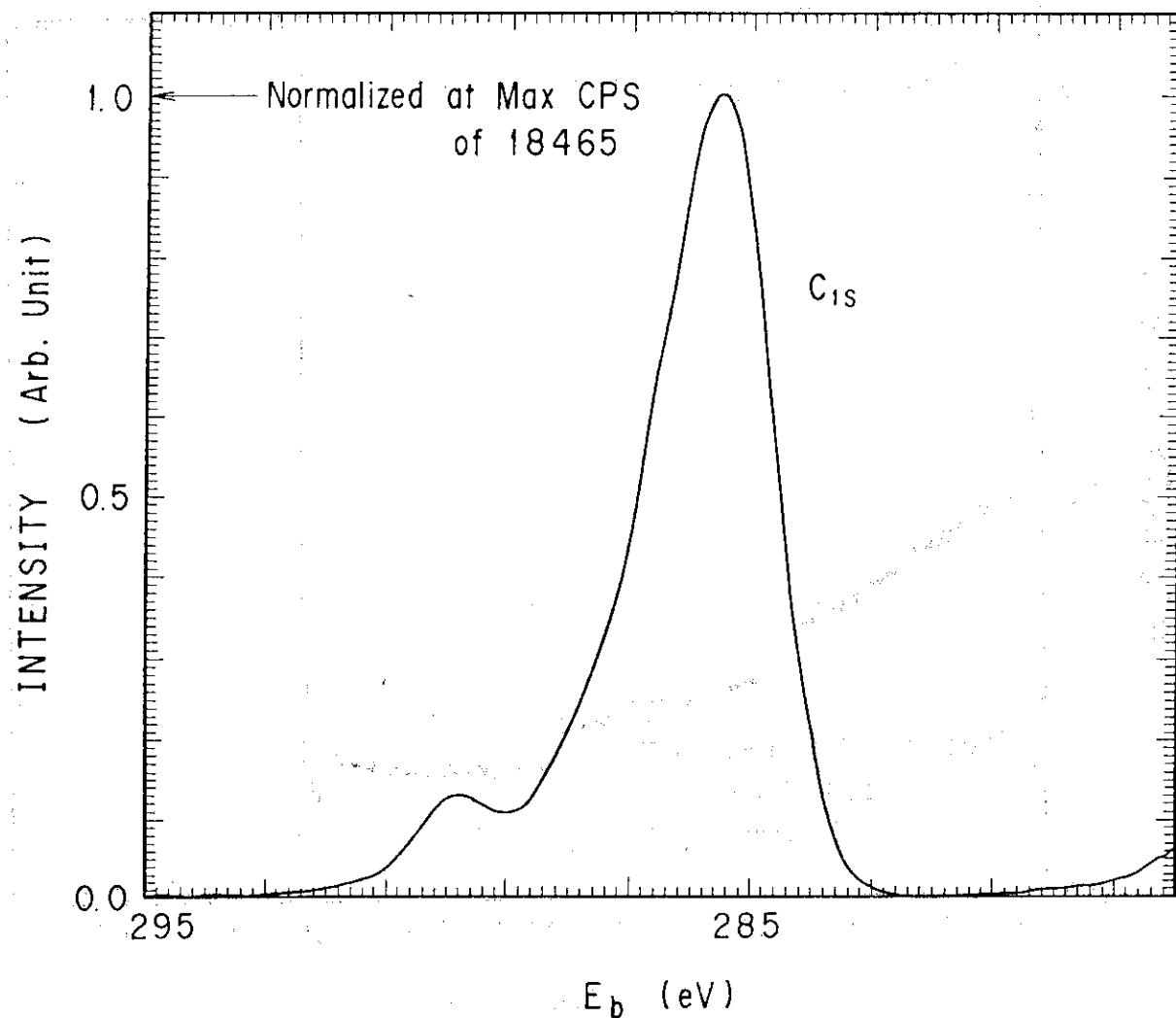


図 2.7 C-Tape 上の C_{1s} のナロースキャンスペクトル
(蒸着物の主成分である C_{1s} を拡大抽出したスペクトルである。)

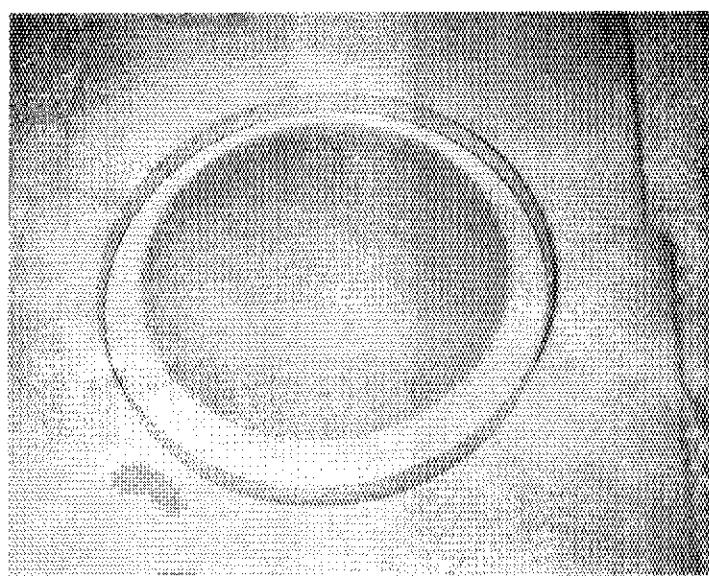


写真 2.1 蒸着膜が形成された観測窓（Ⅰ期）
(Ⅰ期(1987年6月～10月)に使用した観測窓に形成された蒸着膜(茶褐色)を示す写真。)

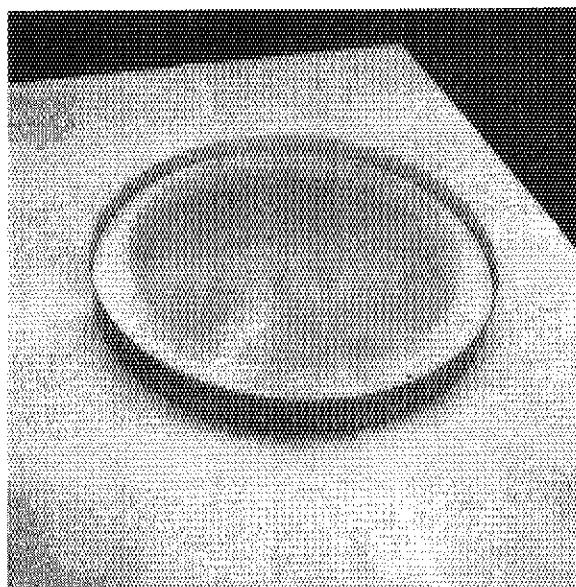


写真 2.2 蒸着膜が形成された観測窓
(Ⅱ期)
（Ⅱ期（1988年6月～10月）
に使用した観測窓に形成され
た蒸着膜（写真1より濃い茶
褐色）を示す写真。）

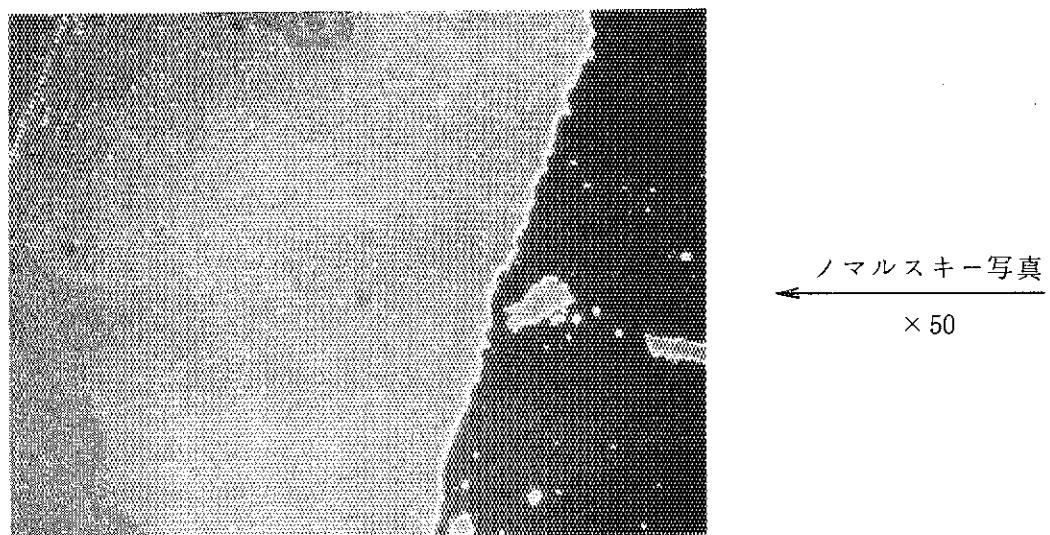
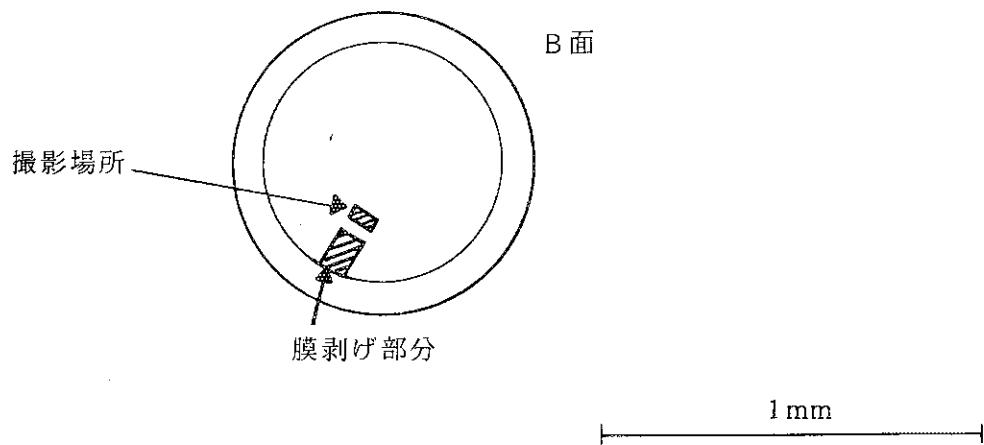


写真 2.3 蒸着膜のノマルスキー写真
(Ⅱ期（1988年6月～10月）に使用した観測窓に形成された蒸
着膜のノマルスキー顕微鏡による拡大写真。)

3. 評価計算の方法

前章で述べたように、各期に共通して観測窓の透過率は短波長側で減衰が大きいことが判明した。トムソン散乱計測法では、散乱光子数から n_e を、またそのスペクトル分布から T_e を求める。このため、蒸着膜が形成された観測窓をトムソン散乱光が通過すると光子数の減衰とスペクトル分布の変化を生じ、真値とは異なった T_e 及び n_e の値を測定することになる。本章では、測定すべき本来の T_e 及び n_e の値に対して、蒸着膜形成による観測窓の透過率減衰が T_e 及び n_e 測定値に与える影響を調べる評価計算の方法について述べる。

3.1 トムソン散乱のスペクトル密度関数と散乱光子数

トムソン散乱の単位立体角、単位規格化変位波長当りの散乱パワー $P_{sc}(R, \varepsilon)$ は、良く知られているように一般に次式で示される。

$$P_{sc}(R, \varepsilon) d\varepsilon d\Omega = n_e L P_i r_0^2 S(\varepsilon) d\varepsilon d\Omega \quad (1)$$

ここで、 ε は規格化波長で散乱波長 λ_s と入射レーザ波長 λ_i に対し、 $\varepsilon = (\lambda_s - \lambda_i)/\lambda_i$ と定義される。また $d\varepsilon$ は規格化変位波長、 $d\Omega$ は集光立体角、 n_e は電子密度、 L は散乱長、 P_i はレーザの入射パワー、 r_0 は古典電子半径である。 $S(\varepsilon)$ はスペクトル密度関数で、プラズマの電子温度が高い領域では相対論効果の影響を強く受けるため、10 keV 程度まで精度良く適用するには T_e について 2 次の項まで展開近似した次式を用いる必要がある^[12]。

$$\begin{aligned} S(\varepsilon) = & S_N(\varepsilon) \left[1 - \frac{7}{2} \varepsilon + \frac{\alpha \varepsilon^3}{2(1-\cos\theta)} - \frac{1}{8\alpha} \left(\frac{39}{4} - 5 \cos\theta \right) \right. \\ & + \frac{1}{8} \left(29 + \frac{5}{1-\cos\theta} \right) \varepsilon^2 - \frac{1}{16(1-\cos\theta)} \left(28 - \frac{1}{1-\cos\theta} \right) \alpha \varepsilon^4 \\ & \left. + \frac{\alpha^2 \varepsilon^6}{8(1-\cos\theta)^2} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

上式で右辺の [] 内が相対論的効果を表す項で、 $S_N(\varepsilon)$ は非相対論的スペクトル密度関数、

$$S_N(\varepsilon) = \left(\frac{\alpha}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{\sqrt{2(1-\cos\theta)}} \exp \left\{ \frac{-\alpha \varepsilon^2}{2(1-\cos\theta)} \right\}, \quad (3)$$

である。ここで、 k はボルツマン定数、 θ は散乱角、 $\alpha = \frac{m_e c^2}{2kT_e}$ 、 m_e は電子の静止質量、 c は光速である。

(1)式において、散乱パワー $P_{sc}(R, \epsilon)$ を散乱光子数 N に、またレーザの入射パワー P_i を入射エネルギー E_i に変換することにより下式を得る。

$$N d\epsilon d\Omega = n_e L E_i r_0^2 S(\epsilon) \frac{\lambda_i}{hc} (1 + \epsilon) d\epsilon d\Omega \quad (4)$$

ここで、 h はプランク定数である。(2)式と(4)式から次の点が理解できる。

- 1) 散乱光子数 N は n_e に比例する。
- 2) T_e が高くなるとドップラー効果でスペクトルが拡がるだけでなく、相対論効果のためスペクトルのピークも入射波長より短波長側にシフトする。 T_e の違いによるスペクトル密度関数の変化を図 3.1 に示す。
- 3) 散乱角が大きくなると、スペクトルは拡がりピークも入射波長より短波長側にシフトする。散乱角の違いによるスペクトル密度関数の変化を図 3.2 に示す。

このようにトムソン散乱のスペクトル密度関数や散乱光子数に関する理論的背景を考慮すると、蒸着膜が形成された観測窓を通過することによって測定すべき散乱光子数が低下した場合には、 n_e 測定値に直接影響を及ぼし、更に透過率の短波長側への減衰勾配が大きい場合には、 T_e や散乱角が大きくなる程 T_e 測定値に影響を強く与えることが理解される。

3.2 処理フロー

蒸着膜形成のため波長依存性を有して透過率が減衰した観測窓をトムソン散乱光が通過することによって T_e 及び n_e の測定値がどの程度の影響を受けるかをみる評価計算は、図 3.3 に示す処理フローに基づき行った。以下にその手順を述べる。

- (1) トカマク装置本体に装着する前（または蒸着膜研磨後）の透過率が 550~700 nm の波長帯域で 94% の観測窓の使用を基準に考える。JT-60 トムソン散乱計測では透過率 94% の観測窓に対して電子温度及び電子密度の真値が求まるようにレーリ散乱較正を実施している。
- (2) JT-60 トムソン散乱計測での散乱角、集光立体角、散乱長をもとに、真値 T_{eo} , n_{eo} での単位波長、単位パワー当たりの散乱光子数を理論式から、各空間測定点について波長チャネル毎の散乱光子数を求める。波長チャネルの割付数は、空間測定点 A ~ E では 8 点、空間測定点 F ~ H では 5 点である。 T_{eo} の相違による散乱光子数の波長特性の変化を、空間測定点 B（プラズマの中心付近）について図 3.4 に、空間測定点 F（プラズマの周辺部）について図 3.5 に示す。
- (3) この散乱光子数に、蒸着膜が形成された観測窓の透過率実測値を乗じて、それを散乱光子数の観測量として模擬する。散乱光子数の減衰の様子を IV 期を例にとって、空間測定点 B については図 3.6 に、空間測定点 F については図 3.7 に示す。
- (4) 前ステップで模擬した散乱光子数をもとに非線形最小二乗近似により T_{ei} , n_{ei} を求める。JT-60 トムソン散乱計測では Gauss - Newton 法を用いて、各波長チャネルの散乱光子数の観測量に対し(4)式を線型展開した近似解を逐次近似し、 T_e と n_e の収束精度が 10^{-4} 以

下になるまで繰返し計算している。評価計算でもこれと同じ手法を用いる。

(5) 前ステップで求めた見かけ上の測定値 T_{e1} , n_{e1} を基準値 T_{eo} , n_{eo} と比較する。

この処理フローに基づき、 T_{eo} , n_{eo} の値を変えて(2)～(5)を繰り返す。 T_{eo} は JT-60実験での実績を考慮して空間測定点 A～E については、1 keV, 3 keV, 5 keV, 10 keV, 空間測定点 F～H については、0.1 keV, 0.3 keV, 0.5 keV, 1.0 keV のそれぞれの値を用いた。 n_{eo} はここではショットノイズの影響がほぼ無視できる $5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ とした。各期の結果を比較するため、(3)で透過率の実測値を変えて更に(2)～(5)を繰り返す。

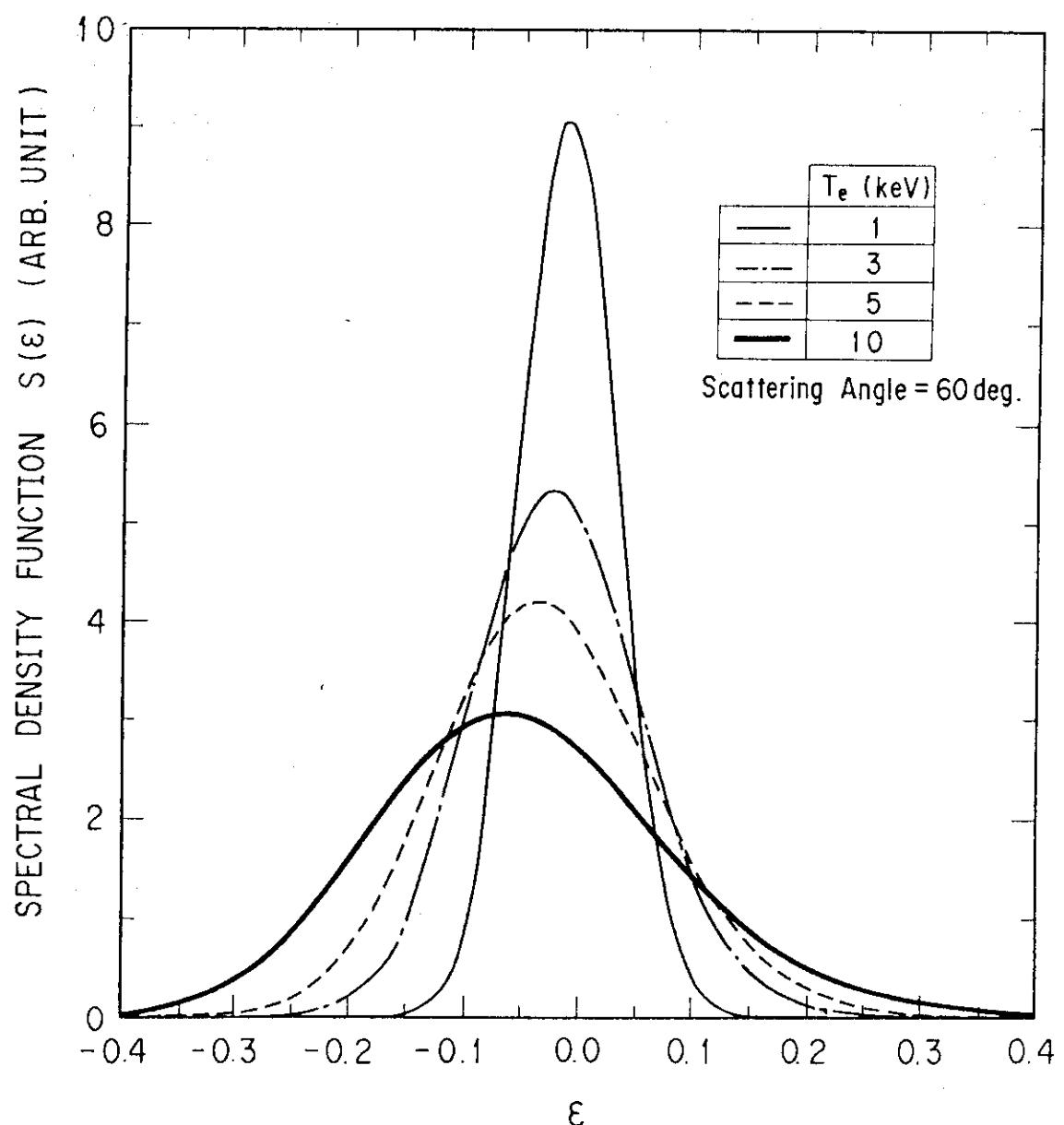


図 3.1 T_e の相違によるスペクトル密度関数の変化
 (T_e が 1 keV, 3 keV, 5 keV, 10 keV のときの規格化変位波長に対するスペクトル密度関数の変化を示す。)

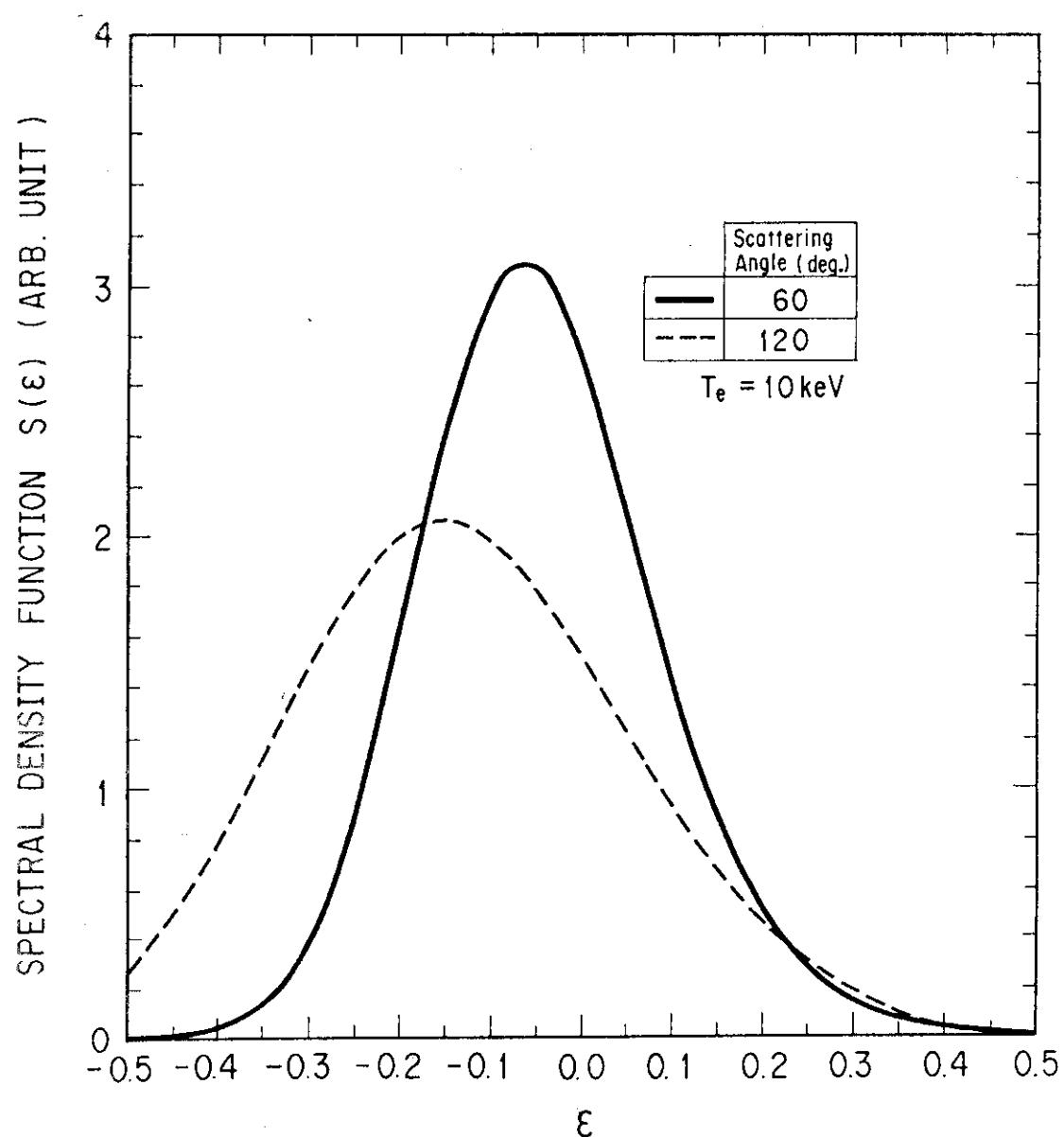


図 3.2 散乱角の相違によるスペクトル密度関数の変化
 (散乱角が 60° と 120° のときの規格化変位波長に対するスペクトル
 密度関数の分布の変化を示す。)

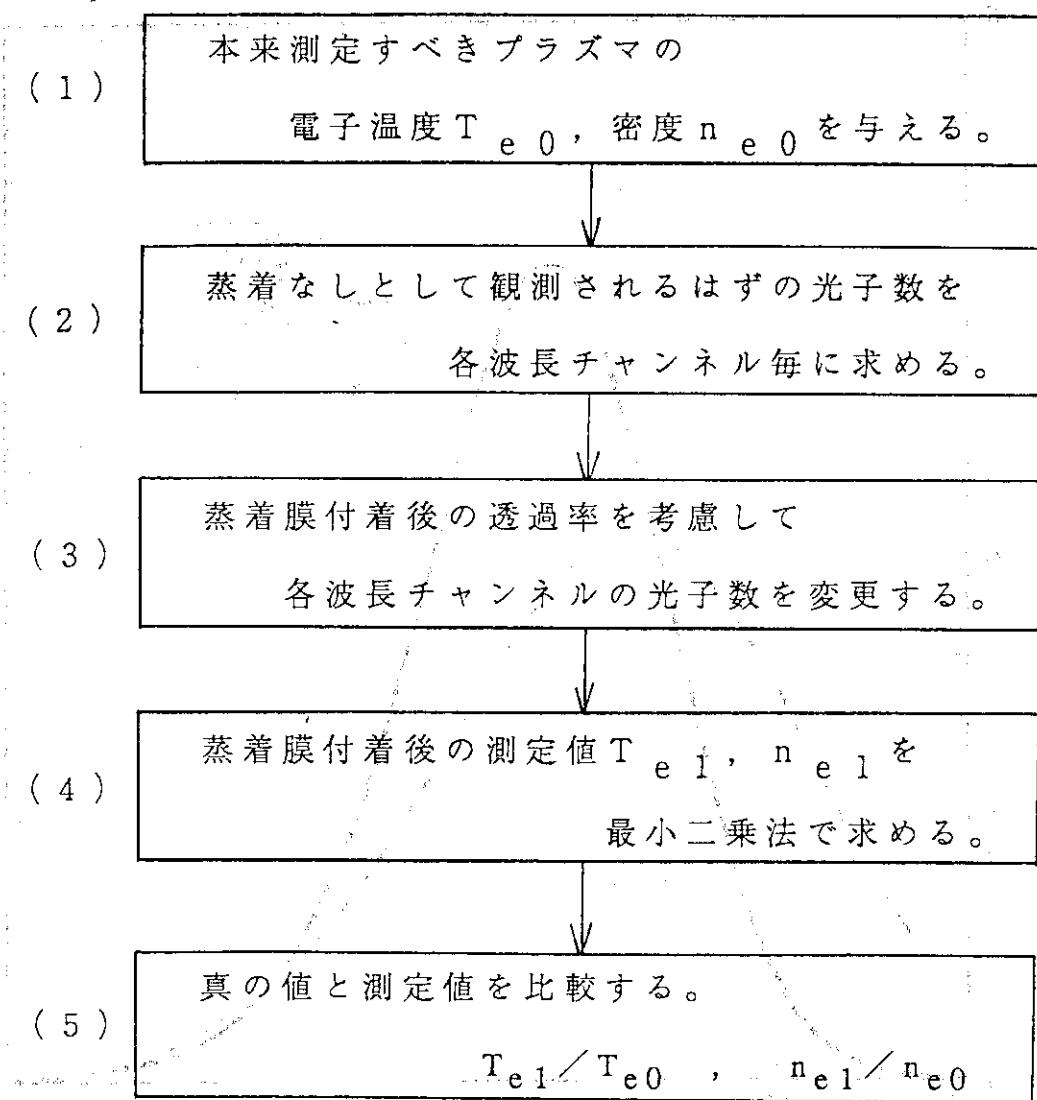


図 3.3 処理フロー
 (蒸着膜形成による観測窓透過率減衰が T_e , n_e 測定へ与える影響)
 を定量化するための評価計算の処理フローを示す。

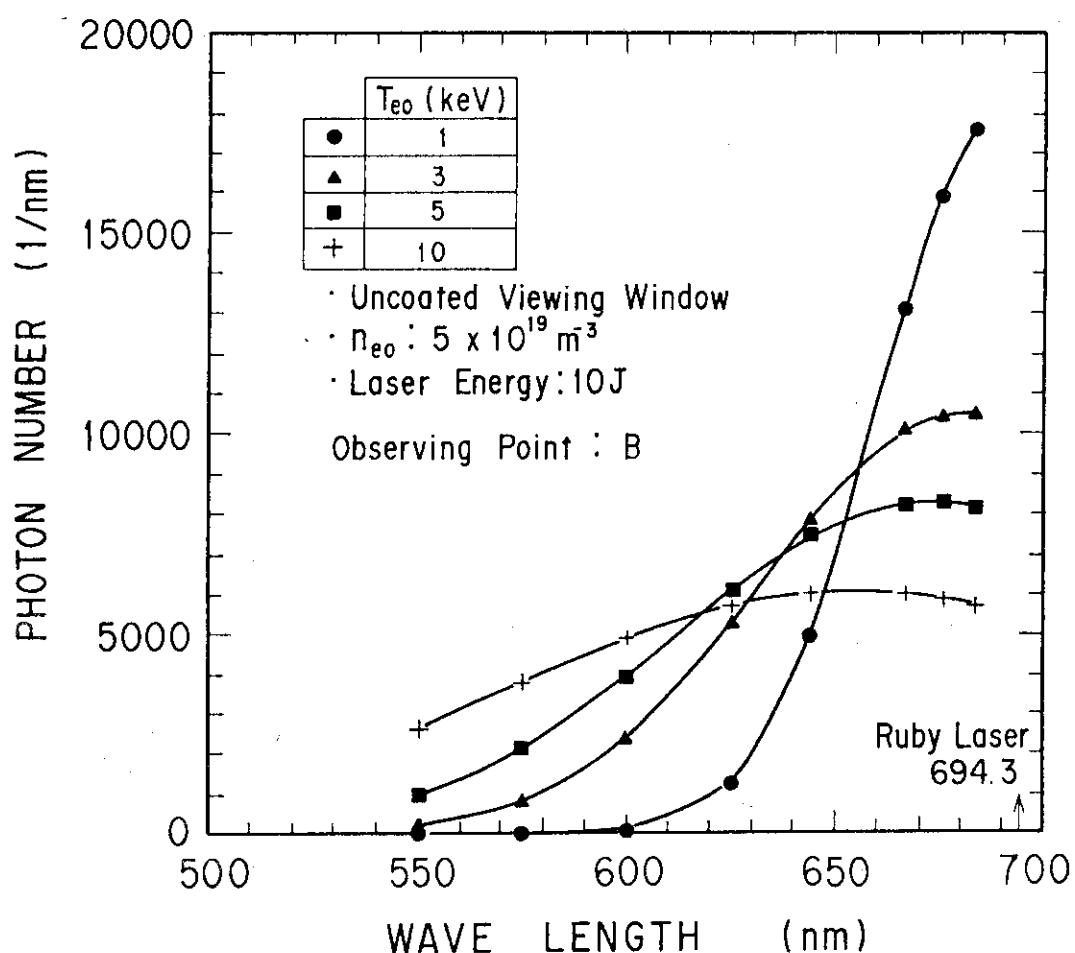


図 3.4 散乱光子数の波長特性（蒸着膜無し、空間測定点 B）
 (蒸着膜付着前（研磨直後）で $n_{e0} = 5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、レーザーエネルギー $= 10 \text{ J}$ 時の空間測定点 B における単位波長当りの散乱光子数の波長特性（トムソン散乱測定波長域）を、 $T_{e0} = 1, 3, 5, 10 \text{ keV}$ について示す。)

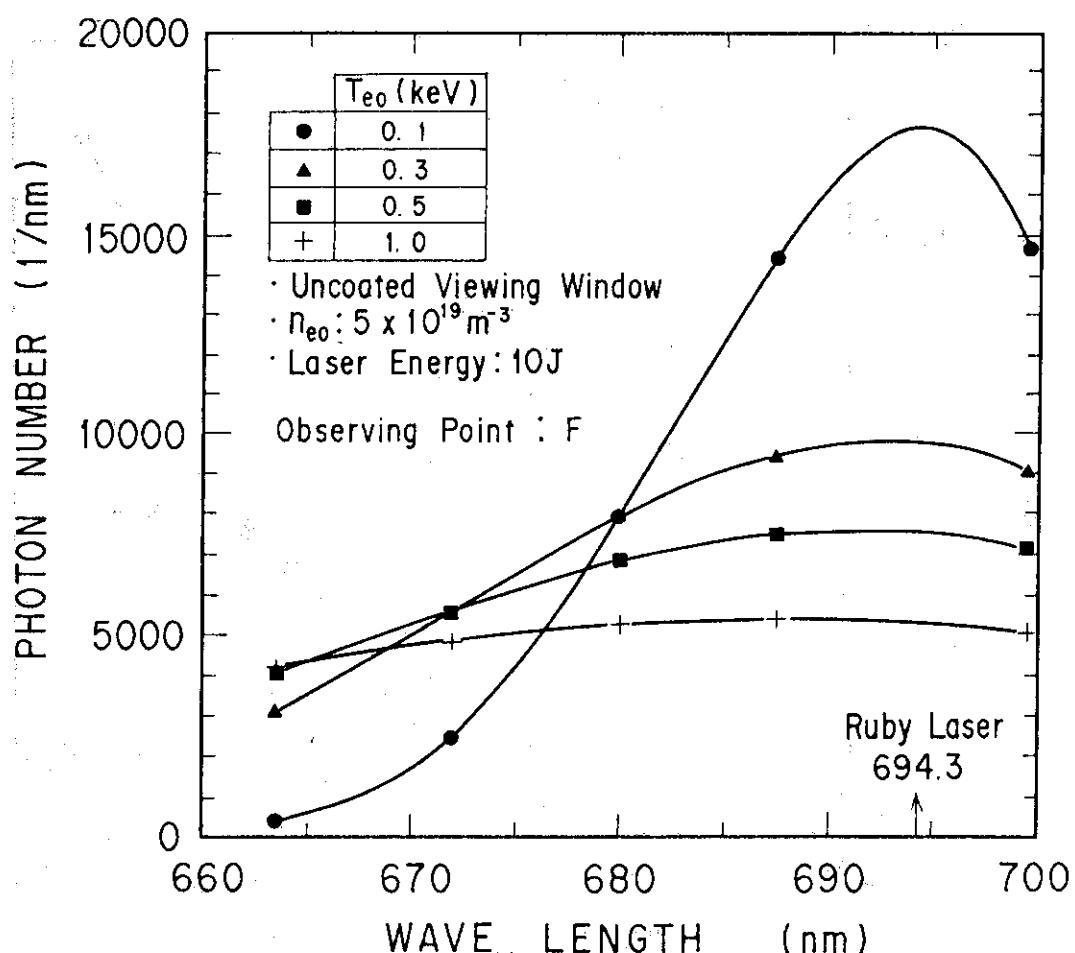


図 3.5 散乱光子数の波長特性（蒸着膜無し、空間測定点 F）

（蒸着膜付着前（研磨直後）で $n_{e0} = 5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、レーザーエネルギー
- 10 J 時の空間測定点 F における単位波長当たりの散乱光子数の波
長特性（トムソン散乱測定波長域）を、 $T_{e0} = 0.1, 0.3, 0.5, 1.0$
keVについて）

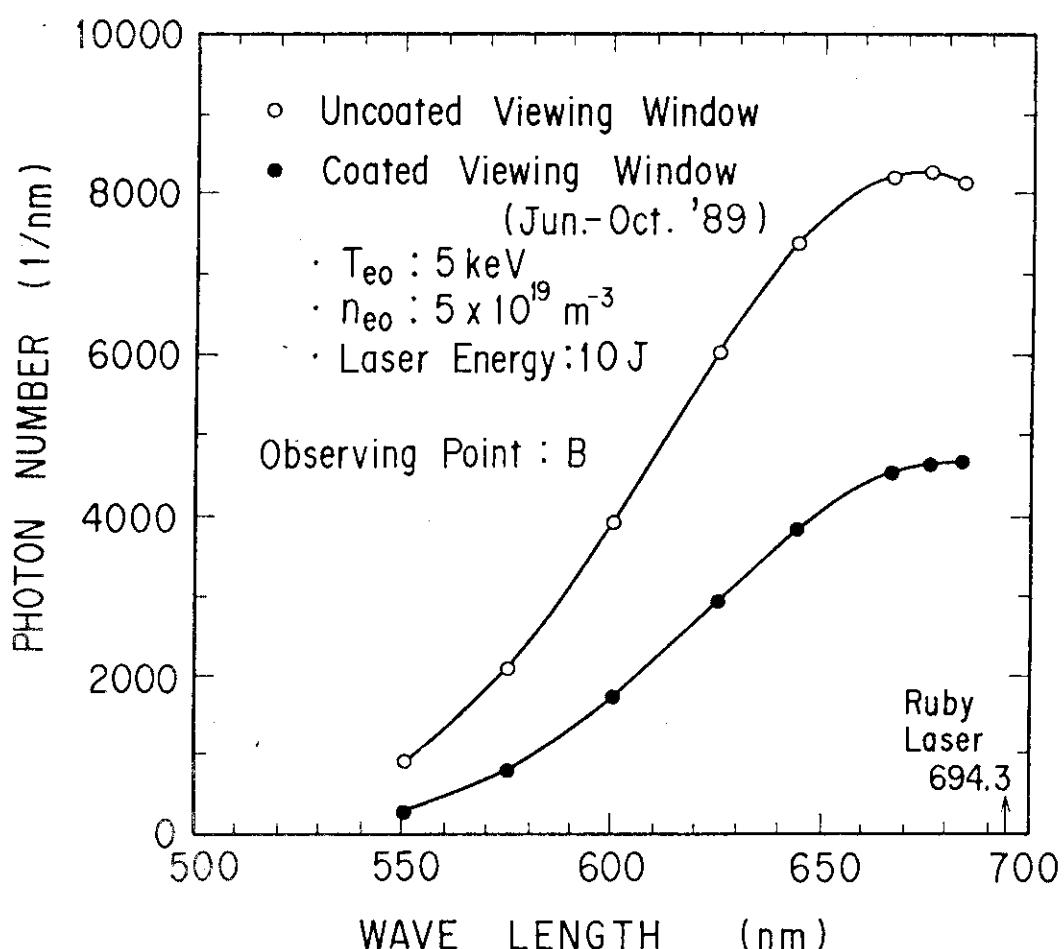


図 3.6 蒸着前と蒸着後の散乱光子数の変化（空間測定点 B）
 （空間測定点 B における蒸着物付着前（研磨直後）と蒸着物付着後（IV期）の散乱光子数の変化を $T_{e0} = 5 \text{ keV}$ について示す。）

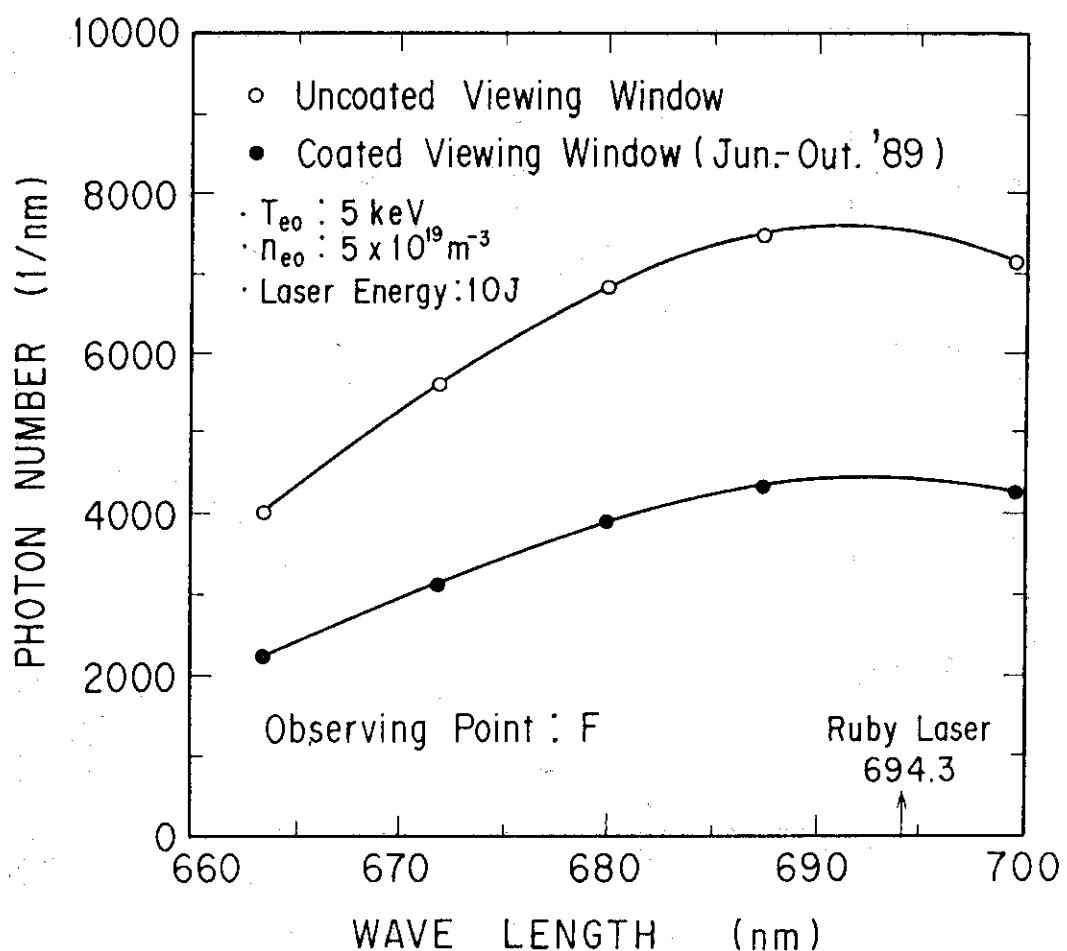


図 3.7 蒸着前と蒸着後の散乱光子数の変化（空間測定点 F）
 （空間測定点 F における蒸着物付着前（研磨直後）と蒸着物付着後（IV期）の散乱光子数の変化を $T_{e0} = 0.5 \text{ keV}$ について示す。）

4. 計 算 結 果

4.1 T_e 評価への影響

プラズマ中心付近の空間測定点Bについて T_{e0} を1keV, 3keV, 5keV, 10keVとした場合に、観測窓の透過率減衰が T_e 測定値に及ぼす影響を各期で比較した(図4.1参照)。また、IV期を例にとって散乱角が異なる空間測定点A～Eでの T_e 測定値に対する影響の相違を比較した(図4.2参照)。同様に、プラズマ周辺部の空間測定点Fについて、 T_{e0} を0.1keV, 0.3keV, 0.5keV, 1.0keVとした場合の T_e 測定値に及ぼす影響を各期で比較した結果を図4.3に、またIV期における空間測定点F～Hでの T_e 測定値に対する影響の相違の比較を図4.4に示す。これらの結果から以下のことが判る。

- (1) 図4.1に示すように、高 T_e になる程(1→10keV) T_e を低く評価する。これは3.1節で述べたように高温になる程、真の散乱スペクトルのピークは短波長側に相対論的効果のためシフトしつつ、ドップラー効果のためスペクトル幅も拡がる結果、観測窓の透過率が短波長側でより大きく減衰する効果を強く受けるためである。従って、観測窓透過率の短波長側への減衰勾配が大きい程(IV期、図2.3参照)、 T_e は更に低く評価されることも図4.1は示している。
- (2) 図4.2に示すように、散乱角の小さい空間測定点A(53.8°)よりも、大きい空間測定点E(68.2°)のほうが T_e を低く評価する。理由は3.1節で述べたように、 T_e だけでなく散乱角についてもその値が大きい程、真の散乱スペクトルはピークが短波長側へシフトしスペクトル幅も拡がるためである。
- (3) 周辺部の空間測定点F, G, Hは、低温(約1keV以下)のため、観測窓の蒸着膜形成による T_e 評価への影響は小さいが、同じ1keVを比較した場合、散乱角が大きい(71.1°～72.4°)分だけ空間測定点A～Eに比べ影響は大きいと言える。

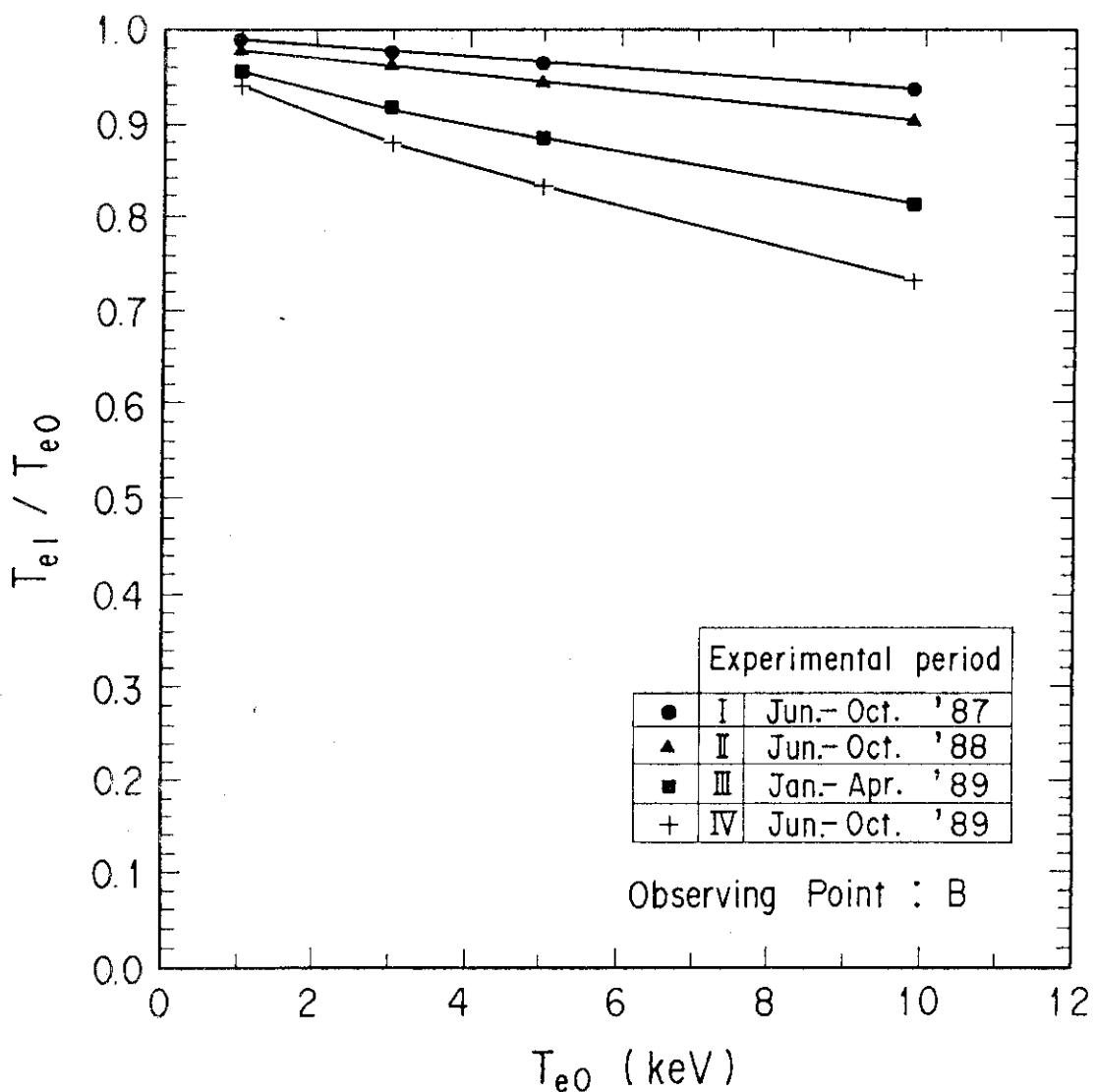
4.2 n_e 評価への影響

蒸着膜形成による観測窓透過率減衰が n_e 測定値へ与える影響を定量的にみるために空間測定点Bを例にして、 n_{e0} に対する見かけ上の測定値 n_{e1} の比 n_{e1}/n_{e0} を T_{e0} を横軸にして各期で比較した(図4.5参照)。また、散乱角が異なる空間測定点A～Eでの n_e 測定値に対する影響の相違をIV期を例に比較した(図4.6参照)。同様に、プラズマ周辺部の空間測定点Fについて n_e 測定値に対する影響の各期の比較を図4.7に、またIV期における空間測定点F～Hでの n_e 測定値に対する影響の相違の比較を図4.8に示した。この結果から以下のことが判る。

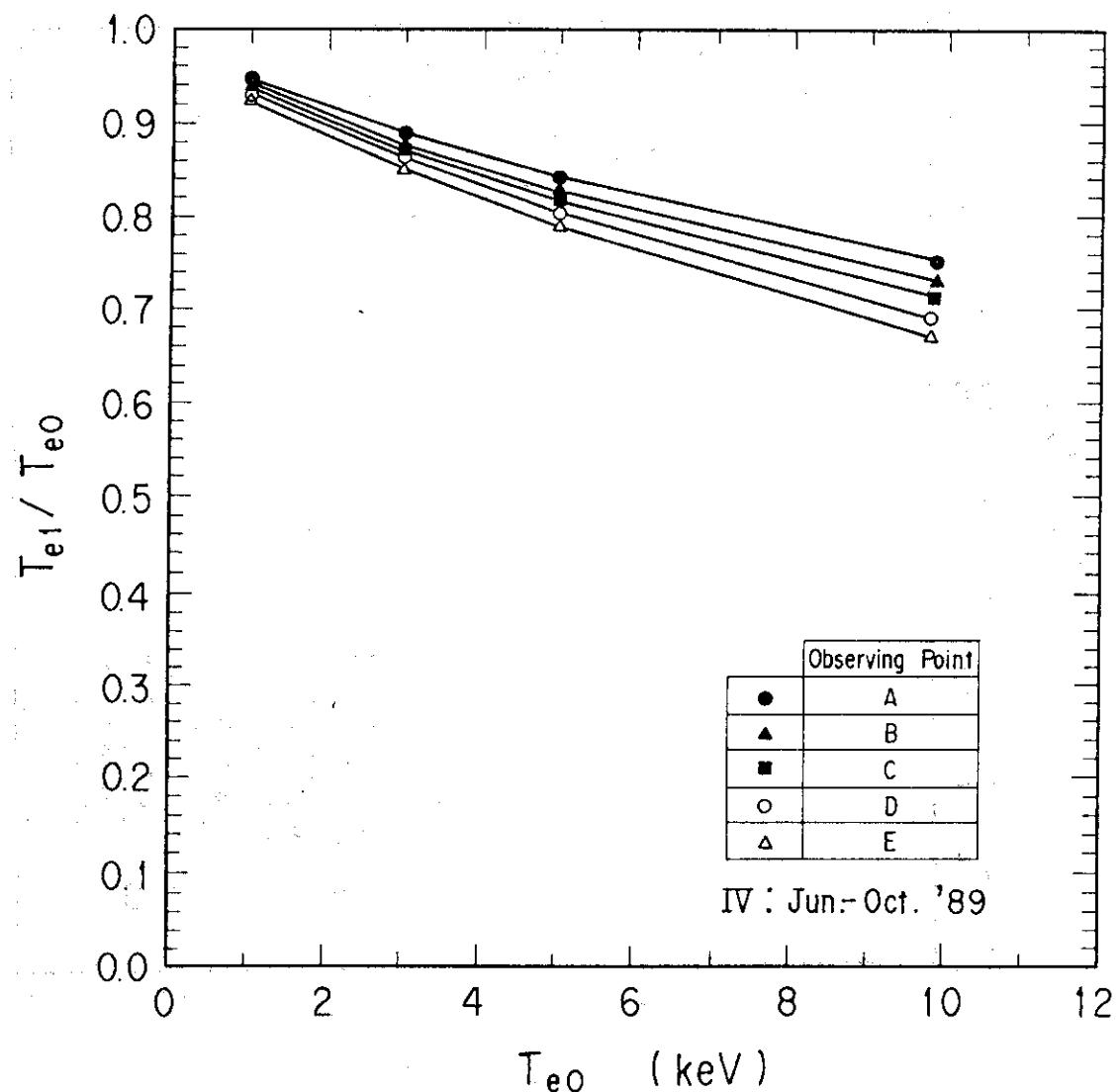
- (1) 図2.3と図4.5及び図4.7の比較から明らかなように、観測窓透過率の減衰の大きさは光量低下として直接 n_e 測定値の評価に影響を及ぼす。このことは空間測定点A～Hについて言える。また高 T_e になる程 n_e 測定値を低く評価する傾向を持つが、 T_e 測定値に対する

影響に比べて充分小さい。従って、10keV 以下のプラズマの n_e 評価に対しては、短波長側への観測窓透過率の減衰勾配の大きさよりも、例えば波長が 650 nm 前後の減衰の大きさ自身がより強く影響する（図 2.3 参照）。

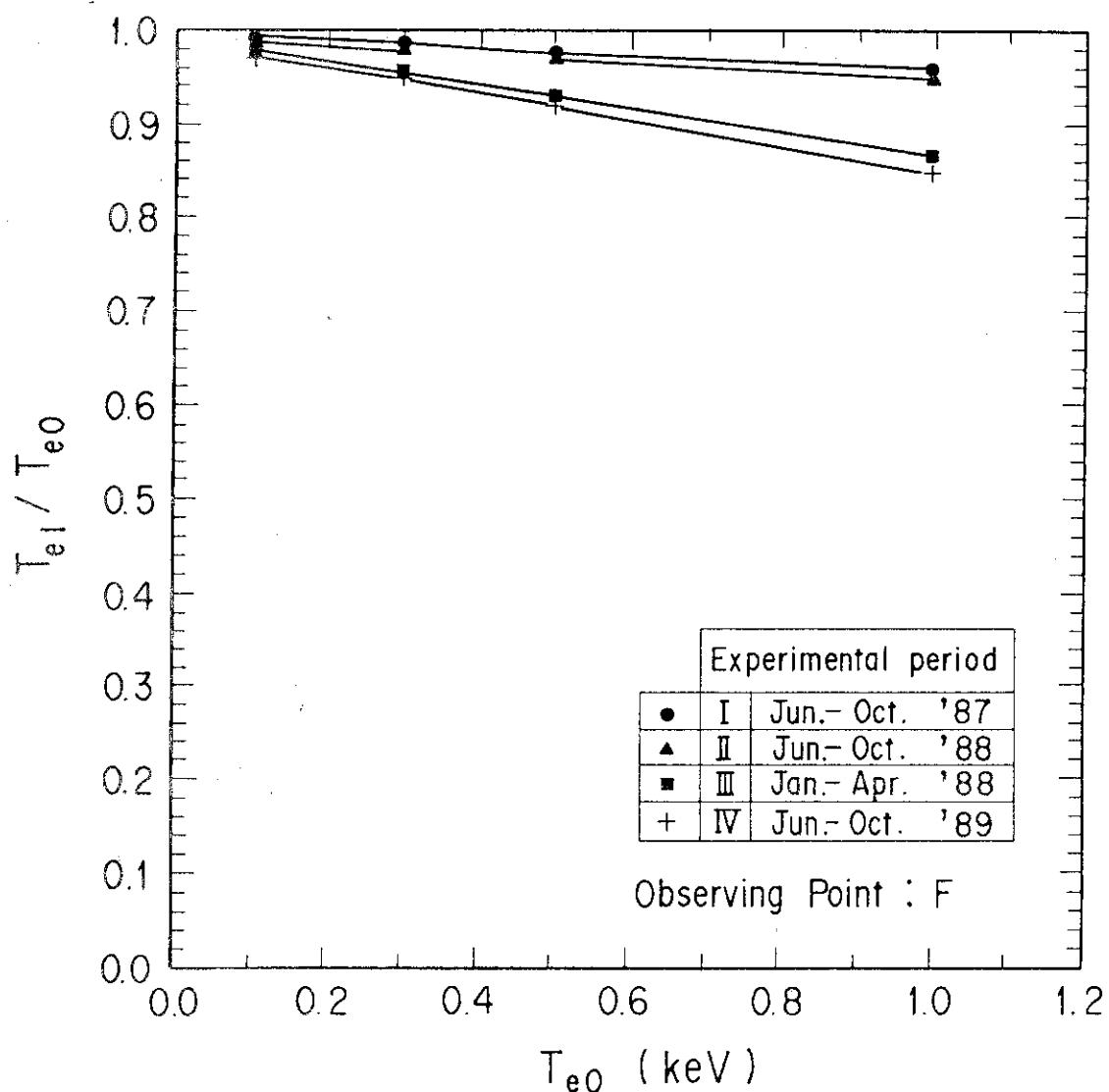
- (2) 図 4.6 及び図 4.8 に示すように、散乱角の相違による n_e 測定値への影響が見られるが、その度合は T_e 測定値への影響に比べ充分小さい。

図 4.1 T_e 測定値への影響（空間測定点B）

蒸着膜形成による観測窓透過率減衰が T_e 測定値へ与える影響を定量的にみるため空間測定点Bを代表例にして、 T_{e0} に対する見かけ上の測定値 T_{e1} の比 T_{e1} / T_{e0} を各期で比較した。IV期が最も T_e を低く評価している。

図 4.2 空間測定点 A ~ E における T_e 測定値への影響 (IV 期)

蒸着膜形成による観測窓透過率減衰が T_e 測定値へ与える影響を定量的にみるため IV 期を代表例にして、 T_{e0} に対する見かけ上の測定値 T_{e1} の比 T_{e1} / T_{e0} を散乱角が異なる空間測定点 A ~ E で比較した。散乱角が大きい E 点が最も T_e を低く評価している。

図 4.3 T_e 測定値への影響（空間測定点 F）

（プラズマ周辺部の空間測定点 F を代表例にして、 T_{e0} に対する見かけ上の測定値 T_{e1} の比 T_{e1} / T_{e0} を各期で比較した。IV期が最も T_e を低く評価している。）

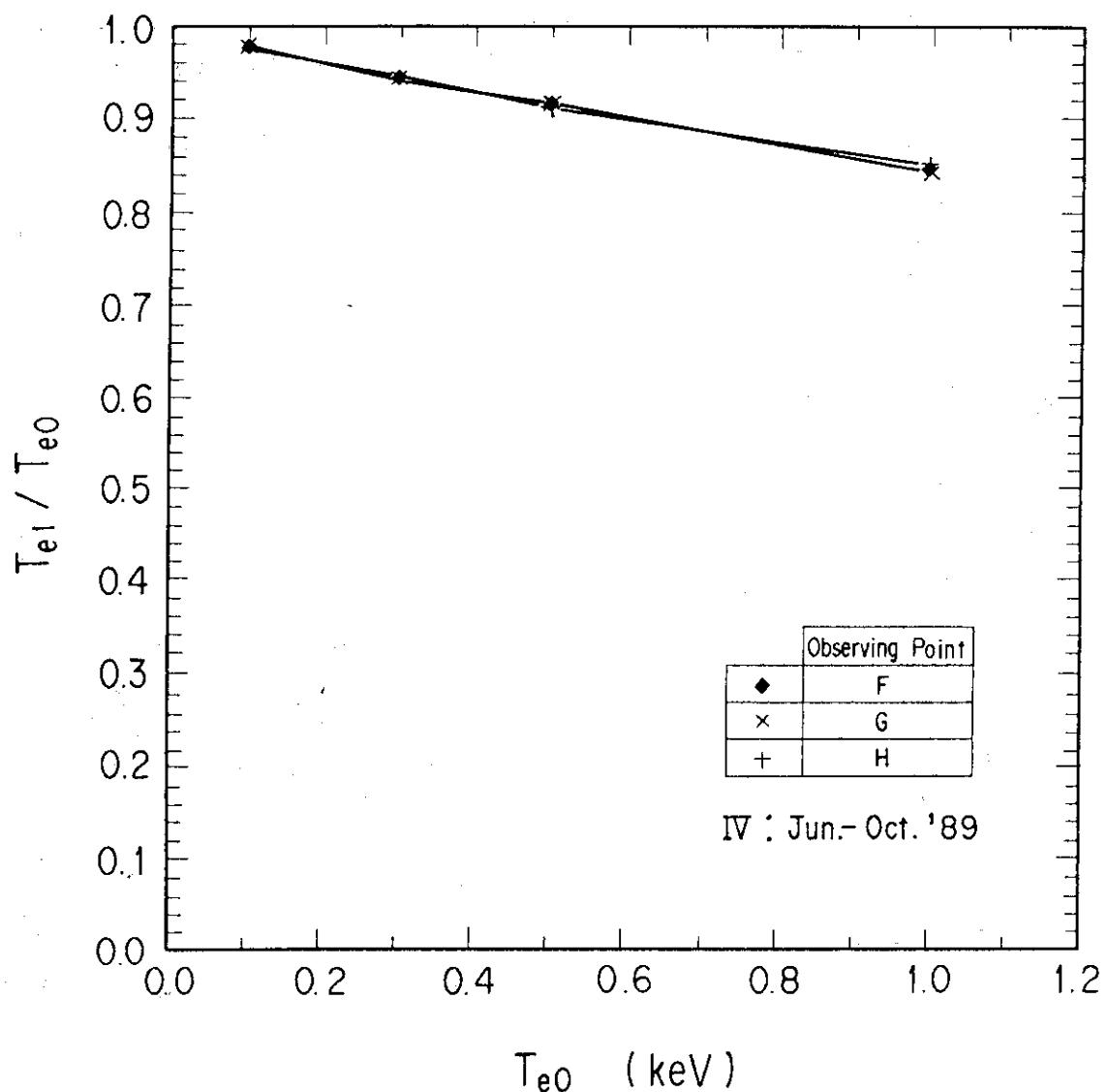
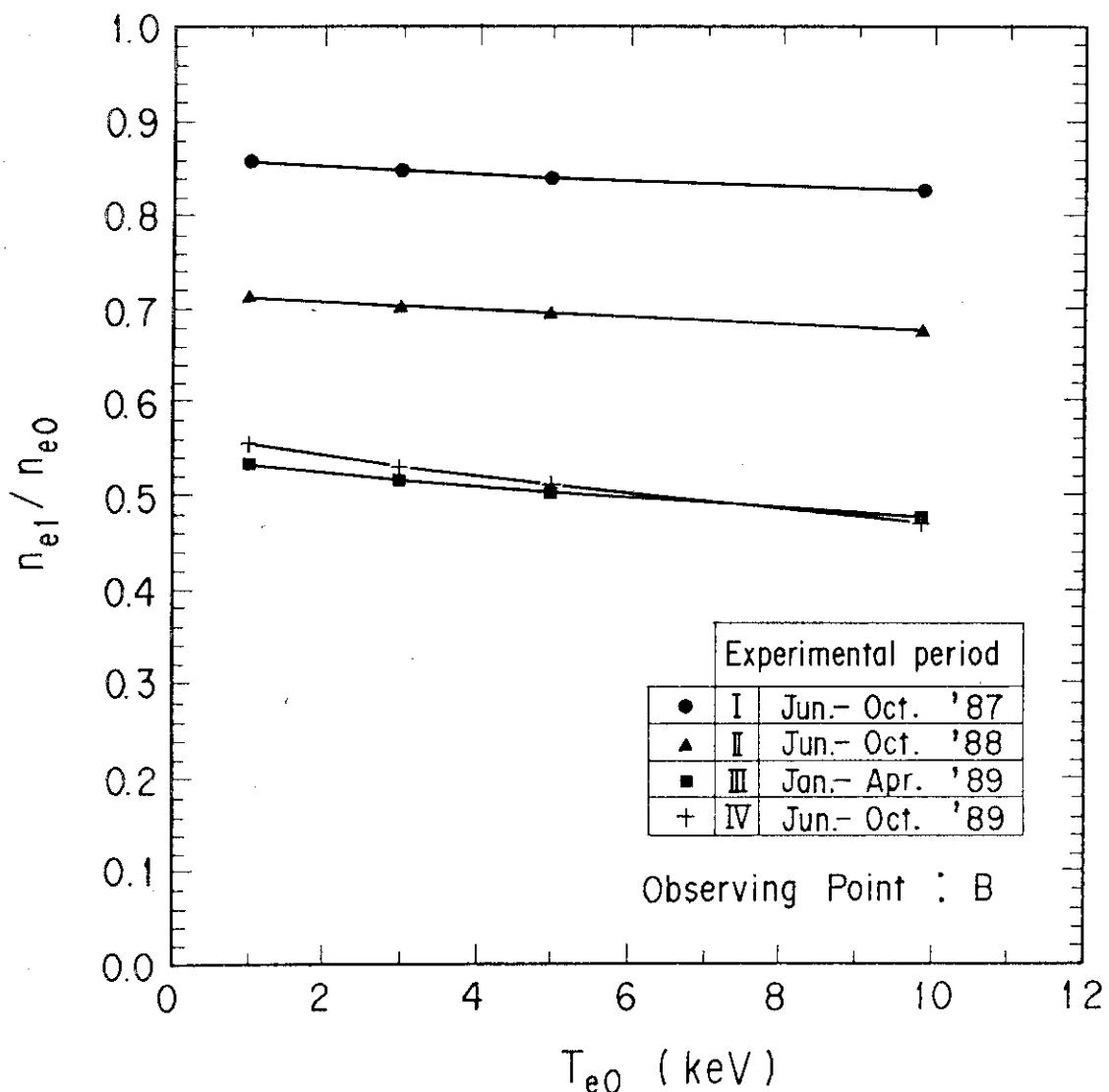
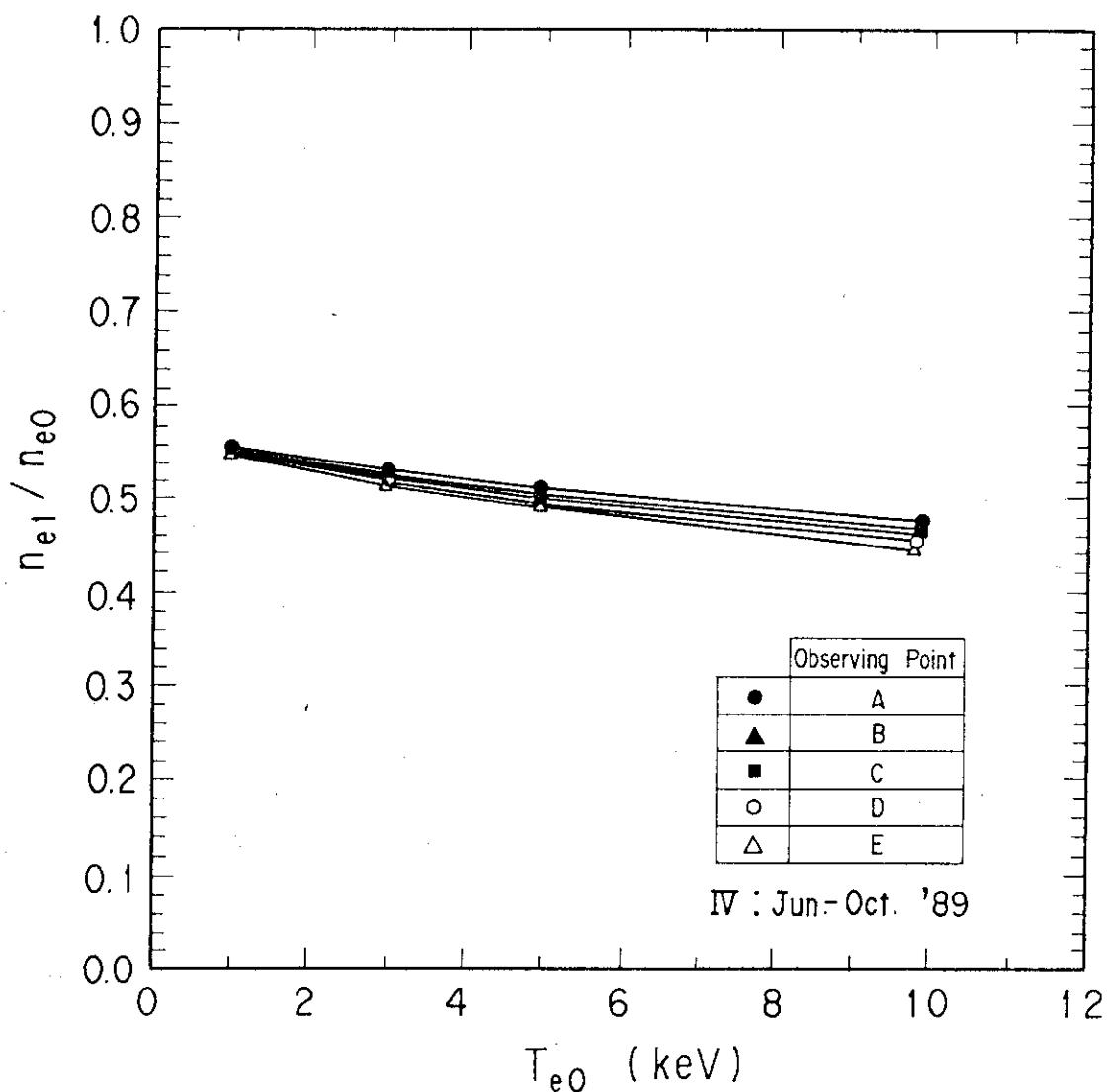


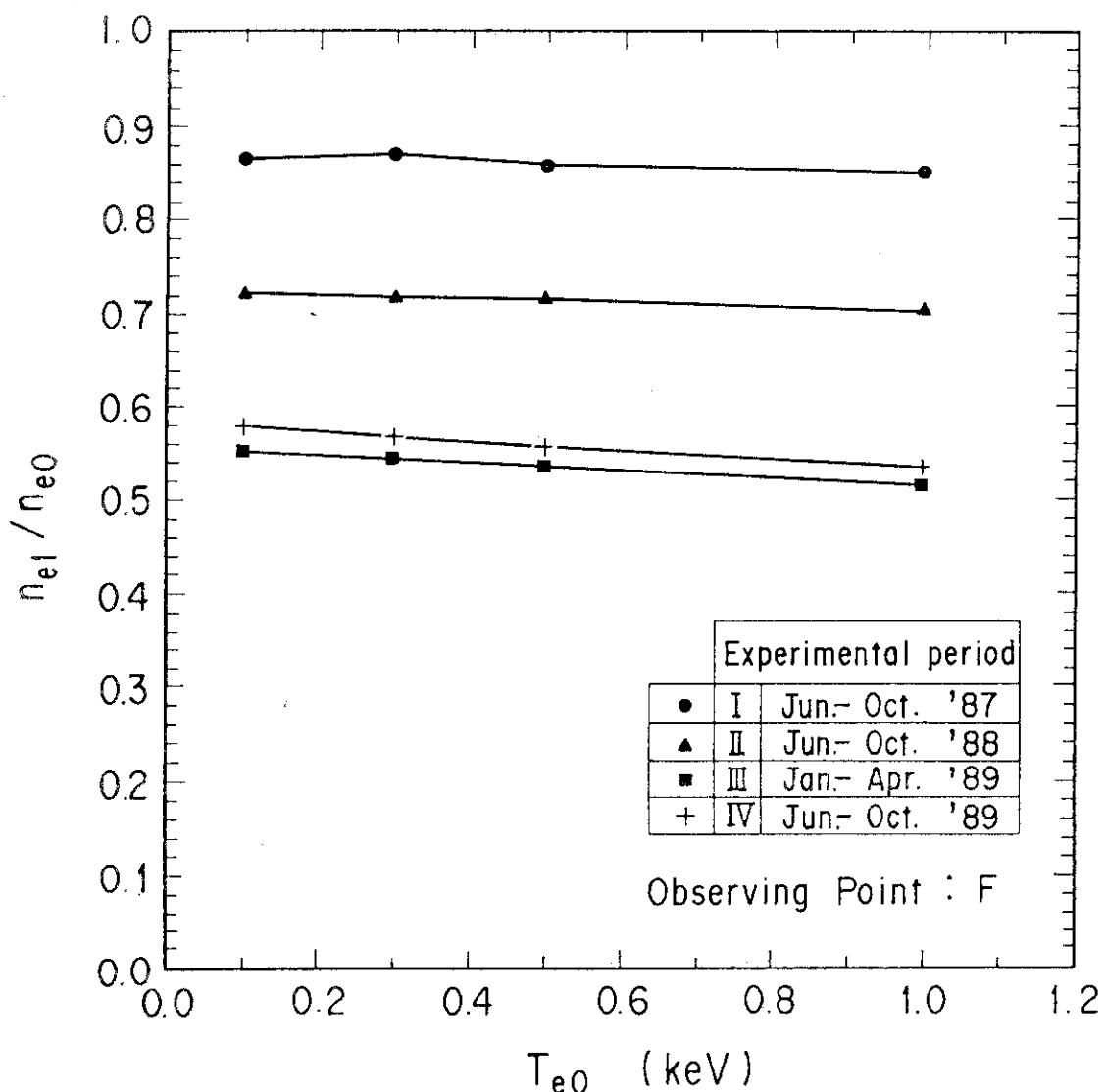
図 4.4 空間測定点 F ~ H における T_e 測定値への影響 (IV 期)
 (IV 期を代表例にして、 T_{e0} に対する見かけ上の測定値 T_{e1} の比)
 (T_{e1} / T_{e0}) を散乱角が異なる空間測定点 F ~ H で比較した。)

図 4.5 n_e 測定値への影響（空間測定点 B）

蒸着膜形成による観測窓透過率減衰が n_e 測定値へ与える影響を定量的にみるため空間測定点 B を代表例にして、 n_{e0} に対する見かけ上の測定値 n_{e1} の比 n_{e1} / n_{e0} を T_{e0} を横軸にして各期で比較した。透過率の減衰が大きい III, IV 期が n_e をより低く評価している。高 T_{e0} での n_e 測定値の低下は小さい。

図 4.6 空間点 A ~ E における n_e 測定値への影響 (IV 期)

蒸着膜形成による観測窓透過率減衰が n_e 測定値へ与える影響を
定量的にみるため、IV期を代表例にして T_{e0} を横軸に、 n_{e0} に
対する見かけ上の測定値 n_{e1} の比 n_{e1}/n_{e0} を散乱角が異なる
空間測定点 A ~ E で比較した。散乱角が大きい E 点では他に比
べて若干 n_e を低く評価している。

図 4.7 n_e 測定値への影響（空間測定点 F）

（プラズマ周辺部の空間測定点 F を代表例にして、 n_{e0} に対する見かけ上の測定値 n_{e1} の比 n_{e1}/n_{e0} を各期で比較した。650 nm 前後の波長領域で透過率減衰が大きいⅢ期が最も n_e を低く評価している。）

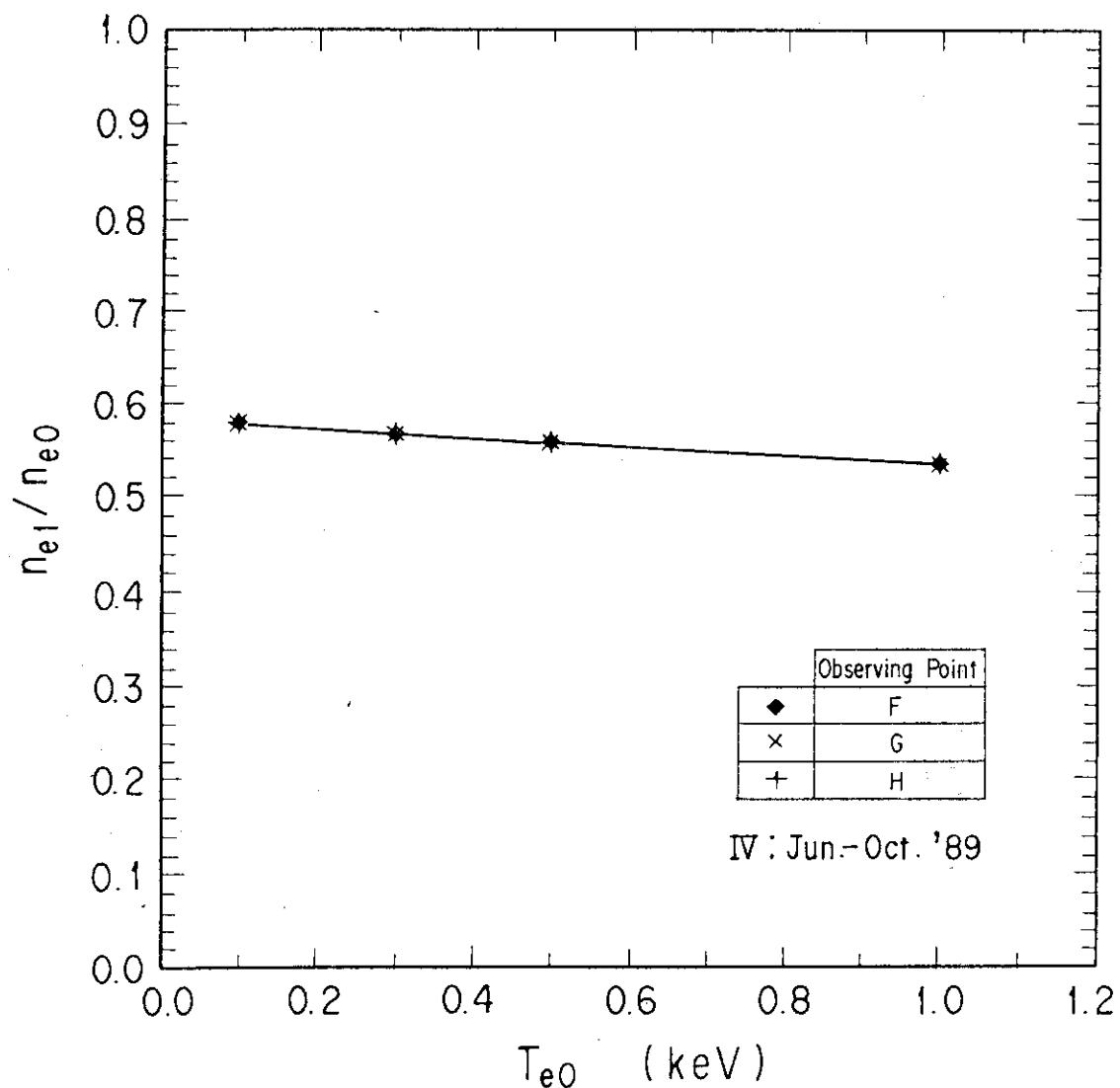


図 4.8 空間測定点 F ~ H における n_e 測定値への影響 (IV期)
 (IV期を代表例にして、 n_{e0} に対する見かけ上の測定値 n_{e1} の比)
 (n_{e1}/n_{e0}) を空間測定点 F ~ H で比較した。)

5. 議論

運転実績表（表 2.2 参照）からショット間 TDC と長時間 TDC の積算露出時間及び全 TDC 露出回数の各期毎の変化を、観測窓透過率の減衰特性と、さらに T_e 変化率及び n_e 変化率と比較し、それらとの相関を調べた。本章では、その結果を中心に議論し、併せてショット数やディスラプション回数との関連、更に今後の考慮すべき観測窓への蒸着防止策や対応方法について述べる。

5.1 運転実績と観測窓透過率の減衰特性

観測窓透過率の減衰特性を各期で比較し、その特徴と原因について述べる。蒸着膜の減衰率 α と膜厚 t 透過率 $T(\lambda)$ と次式の関係にある。

$$\alpha(\lambda) \cdot t = \ln 0.94 - \ln T(\lambda) \quad (5)$$

図 5.1 に各期の $\alpha \cdot t$ の波長特性を示す。減衰率 α はⅡ期とⅢ期ではほぼ等しく、散乱スペクトルの測定波長領域（550～700 nm）ではⅣ期の減衰率 α が4期の中で最も大きい。

(1) I期とⅡ期の比較

図 2.3 をみると 550～700 nm に渡って I 期よりも II 期の透過率のほうがより減衰している。 $\lambda = 625 \text{ nm}$ でみると、I 期の透過率は蒸着がない時に比較して 15% 減衰であるのに対し、II 期では 30% 減衰と倍増している。また図 5.1 に示すように、I 期と II 期とでは減衰率 α の波長特性が異なるため、蒸着膜を形成する物質は別のものと考えられる。このため膜厚 t を両者で厳密に比較することはできないが、II 期の方が I 期より 2 倍程度厚い膜である可能性が高い。蒸着膜の性質が違う理由として、壁材の変更 ($\text{TiC} \rightarrow \text{C}$) やショット間 TDC 露出時間の相違（0 分と 300 分）との関連が考えられる。

(2) Ⅱ期とⅢ期の比較

III 期の $\lambda = 625 \text{ nm}$ で透過率は図 2.3 に示すように約 50% と大きく減衰している。また、図 5.1 に示すように減衰率 α の波長特性が等しいため、蒸着膜を形成する物質は同じものと考えられる。従って、III 期の膜厚は II 期の約 2 倍であると言える。これは、II 期に比べ TDC 露出時間が約 7 倍に増していることとの関連が深いものと考えられる。

(3) Ⅲ期とⅣ期の比較

測定波長が 625 nm での III 期及び IV 期の透過率は約 50% で両者等しいが、短波長側への透過率の減衰勾配は IV 期のほうが急峻である。また、減衰率 α の波長特性は図 5.1 のように III 期と IV

期では異なるため、蒸着膜を形成する物質は別のものと考えられる。これは、ショット間TDC露出時間で比較するとⅣ期はⅢ期の2倍であることに起因しているのではないかと推測される。

(4) その他

ショット数に対するディスラップション数の割合は図5.2に示すように各期ともほぼ同じで、各期のディスラップション数と観測窓の透過率の低下には特に相関が認められない。

5.2 運転実績と T_e , n_e 変化率

ショット間TDCのように短時間に行う場合と、長時間TDCの場合では、蒸着のしかたに違いがあると思われる。ショット間TDCの場合、真空容器の内壁の不純物がHeによって叩き出され観測窓に付着する割合が高いものと考えられる。これに対し長時間TDCでは、最初は真空容器内の不純物が飛び散り窓に付着するが、その後長時間に渡って少しづつ蒸着膜が形成されるものと考えられる。この相違が、 T_e , n_e 各々の変化率にどのような影響を与えるかを調べた。

(1) T_e 変化率

図5.3と図5.4の比較から、全TDCの露出回数（長時間TDCの回数も含むが大半はショット間TDCの回数である）及びショット間TDCに対する窓の積算露出時間が T_e 変化率と非常に相関があることが判る。これは、これらの回数（時間）が増すと、特に短波長側での観測窓透過率がより急峻に減衰する傾向を持つためであると考えられる。

(2) n_e 変化率

図5.3と図5.5の比較から、全TDC（長時間TDCとショットとTDCの合計）に対する観測窓の積算露出時間と n_e 変化率が強い相関を持つことが判る。これは、TDC積算時間が長い程蒸着膜の厚さが増し、その結果透過率を低下させる傾向を持つためであると考えられる。

5.3 散乱角と T_e , n_e 変化率

4章で述べたように散乱角が大きい程、 T_e , n_e の変化率も増すが、 n_e への影響は T_e に比べ約半分である。 T_e への影響の原因としては、この他に蒸着膜透過率の角度依存性による効果も考えられる。本報告書では、観測窓透過率の入射角による違いや蒸着膜の層の形成における角度依存性等の調査が不充分なため、今後、角度依存性のデータベースも整備し、その影響の度合を定量的に把握していく必要がある。

5.4 対策

今回の調査・検討によって、観測窓に蒸着膜が形成されると、 T_e , n_e の測定値を真の値より

低く評価し、それは透過率自身の低下の大きさだけでなく短波長側への減衰勾配にも強く依存することが判った。これらの結果を踏まえ、トムソン散乱計測による T_e 及び n_e 測定の精度や信頼性を保つために必要な対策として以下のことが考えられる。

- (1) 遠隔操作可能なシャッター弁を観測窓に用意して、長時間 TDC だけでなく実験運転時のショット間 TDC 等による蒸着膜形成を極力防止する。
- (2) 支配的な蒸着要因をより詳細に把握して対処するだけでなく、従来のデータを含め観測窓の透過率に関するデータベースの充実をはかって、例えば観測窓の TDC に対する露出時間や露出回数から透過率の波長特性を予測できるようにする。
- (3) 400 ~ 700 nm 帯で 2 ~ 3 波長点の透過率を実測できるシステムを観測窓周辺に用意し、(2) の予測値の精度をより高める。
- (4) 上記透過率データを基に T_e , n_e の測定値を補正するデータ処理法を確立し、データベース用 T_e , n_e データの精度確保をはかる。
- (5) JET での LIDAR システムで実施しているように蒸着膜が形成された観測窓の一部をレーザー・プローフで除去し、その部分とコーティングされた状態の部分との特性線 (H_α , H_β , ...) を測定し、その強度の比から、透過率の波長特性を隨時得られるようにする。

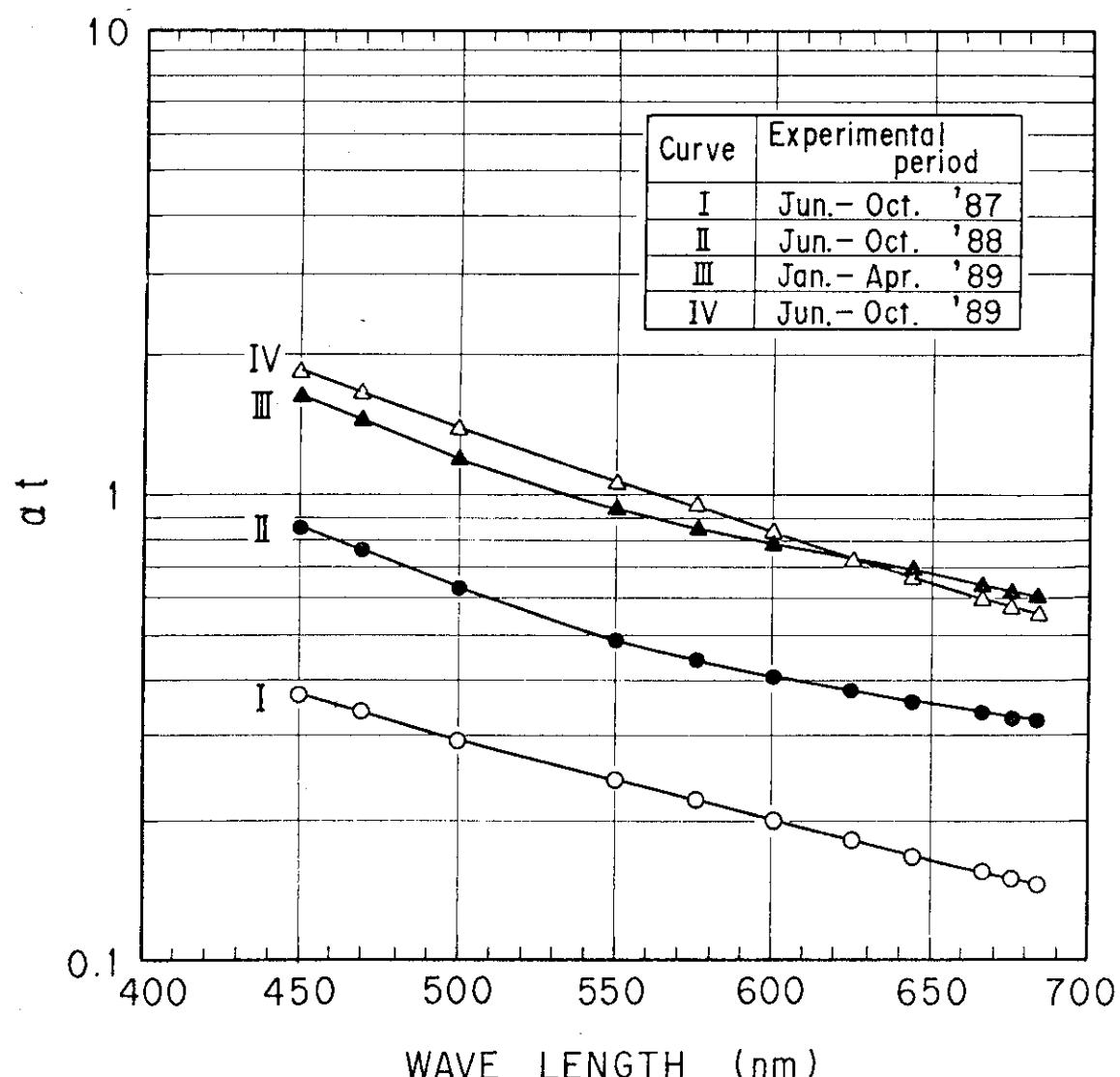


図 5.1 蒸着膜の減衰率と膜厚の波長特性

各期における蒸着膜の減衰率 α と膜厚 t の波長特性を示す。減衰率 α はⅡ期とⅢ期がほぼ等しく、散乱スペクトルの測定波長領域（550～700 nm）ではⅣ期の減衰率 α が4期の中で最も大きい。Ⅱ期とⅢ期の蒸着膜構成物質は同成分であるが、Ⅰ期及びⅣ期の蒸着膜構成物質は別の成分であると考えられる。また減衰率 α がほぼ等しいことから、Ⅲ期の膜厚はⅡ期に比べ2倍近いものと考えられる。

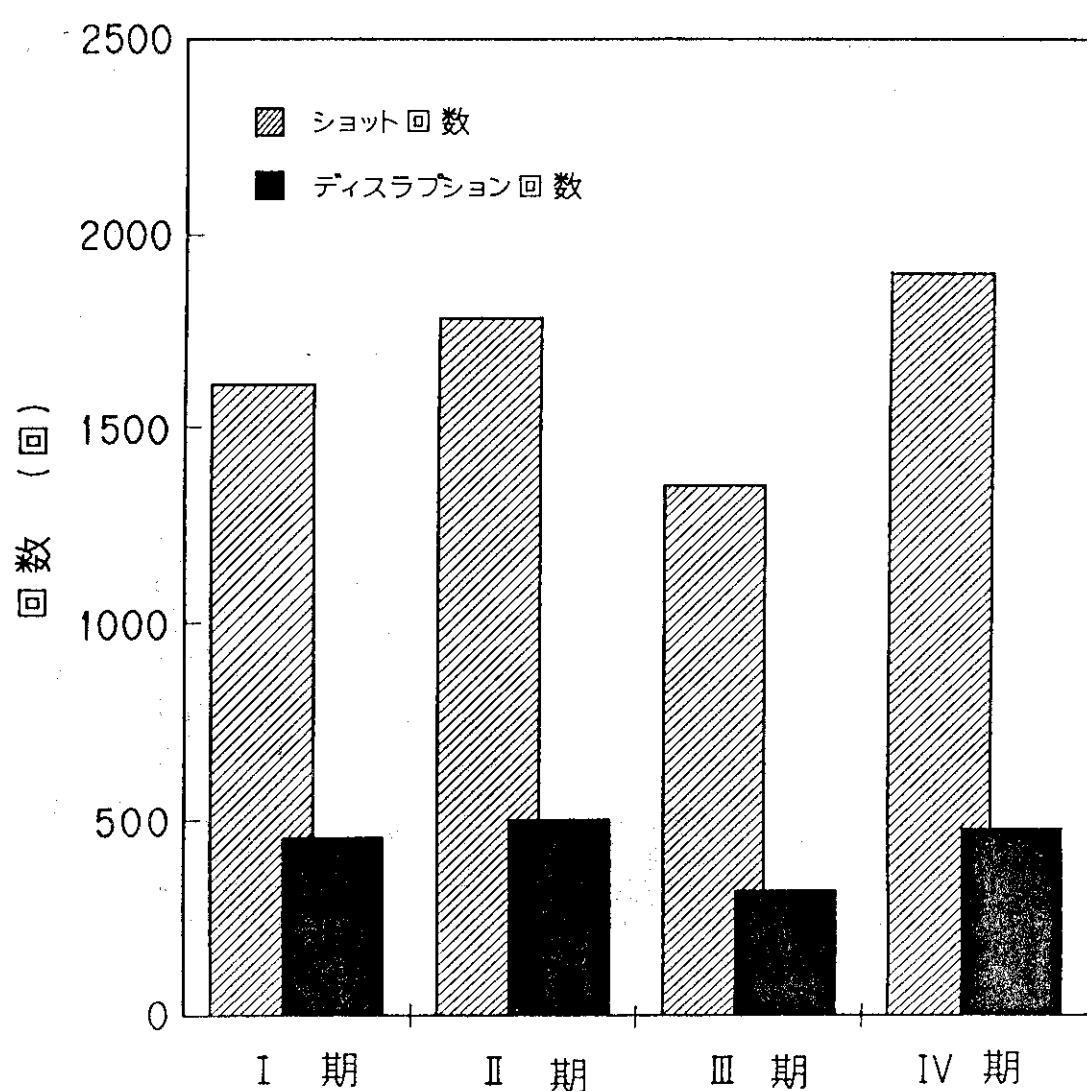


図 5.2 各期毎のショット数とディスラプション回数

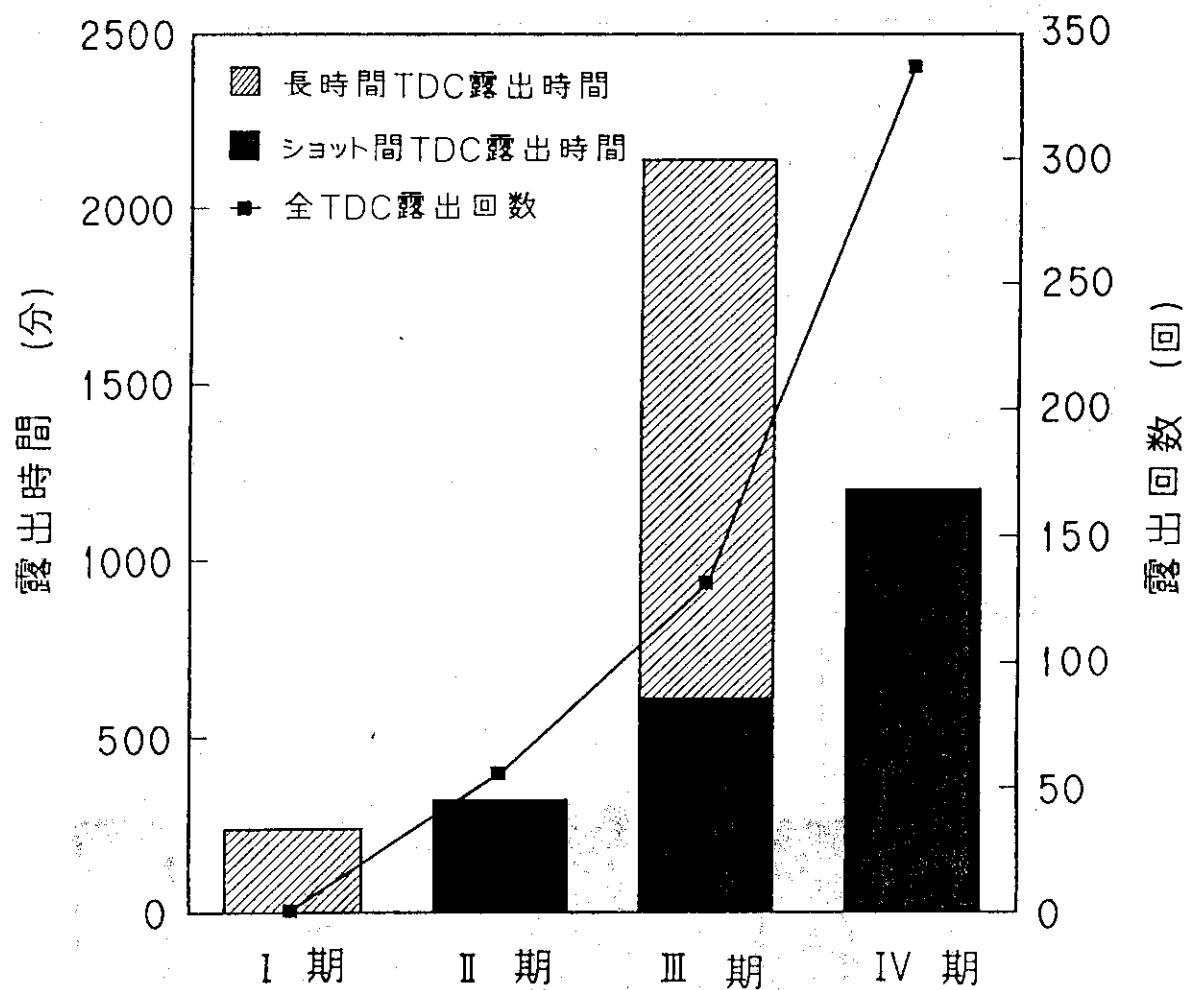


図 5.3 各期毎の TDC 積算露出時間と積算露出回数
 (各期の長時間TDC及びショット間TDCの積算露出時間と全TDC露出回数を示す。)

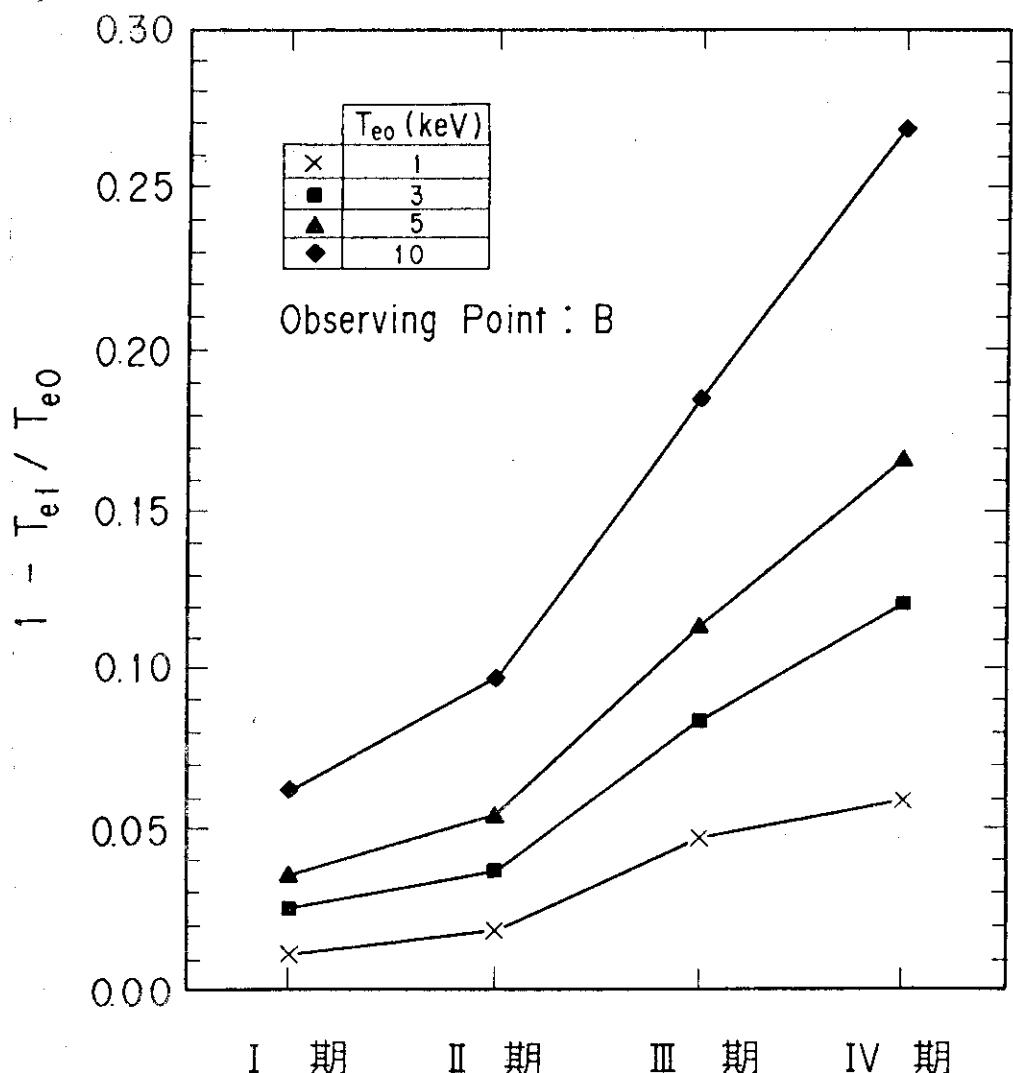


図 5.4 各期毎の T_e の変化率 (空間測定点 B)
 (空間測定点 B における各期の T_e 変化率 T_{e1}/T_{e0} を T_{e0} をパラメータにして比較した。IV 期の変化率が最も大きい。)

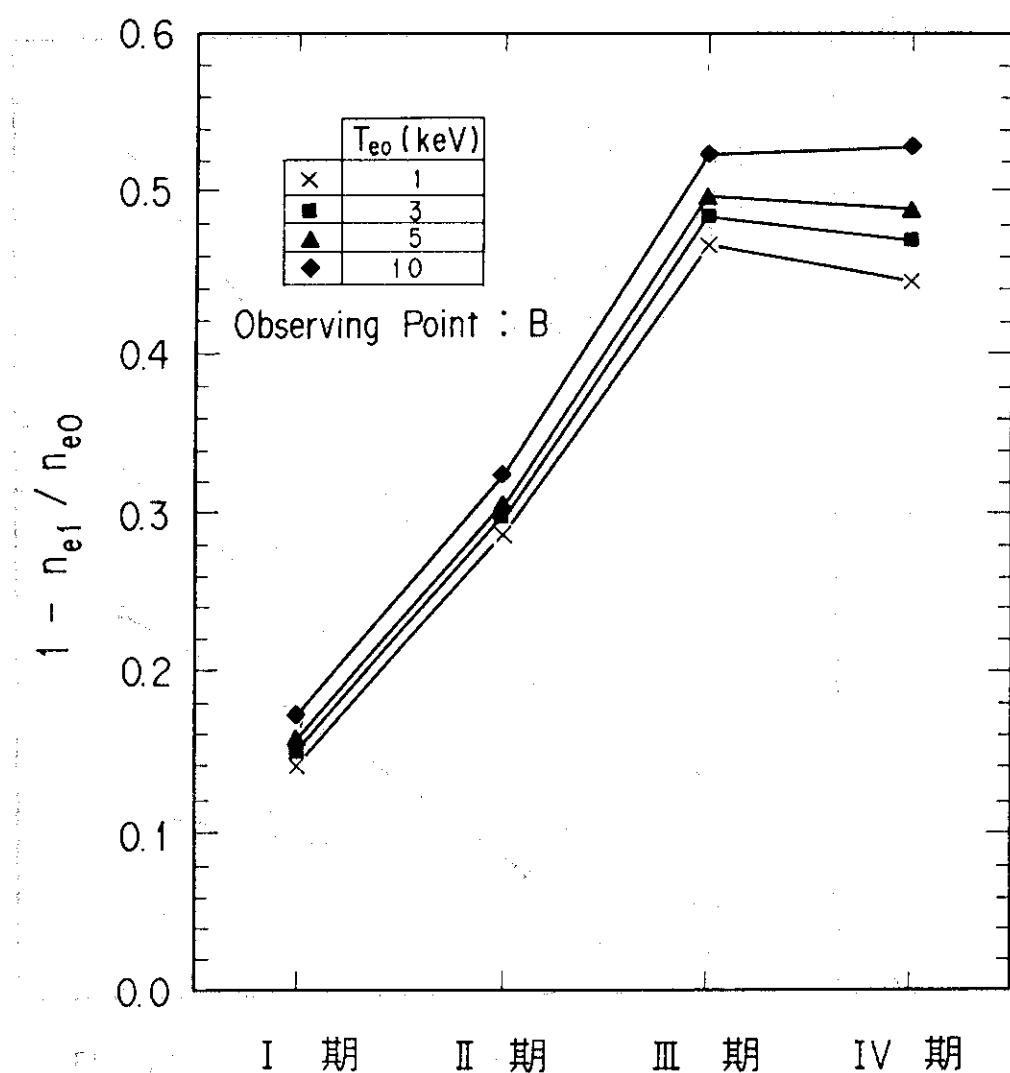


図 5.5

各期毎の n_e の変化率（空間測定点 B）

(空間測定点 B における各期の n_e 変化率 n_{e1}/n_{e0} を T_{e0} をパラメータにして比較した。II 期と IV 期の変化率が大きい。)

6. 結 論

1987～1989年の4期（Ⅰ期，Ⅱ期，Ⅲ期，Ⅳ期）に渡るJT-60実験運転期間において、トムソン散乱計測用観測窓に形成された蒸着膜が電子温度や電子密度の測定値に及ぼす影響を評価することを目的として、観測窓の透過率測定と蒸着膜の成分分析、透過率減衰を考慮した T_e , n_e の評価計算、JT-60運転実績と形成された蒸着膜との関連や T_e , n_e 評価との関連の検討等を行い以下の結論を得た。

まず観測窓の透過率測定及び蒸着膜の成分分析から得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 研磨後の観測窓透過率はトムソン散乱測定波長域ではほぼ一定の94%であるが、実験運転に伴う蒸着膜の形成によって透過率は低下し、特に短波長側になる程大きく減衰する。蒸着膜の主成分元素は炭素と考えられる。
- (2) Ⅰ期からⅣ期においての透過率の波長特性に違いがみられる。特にⅣ期（1989年の実験ではショット間TDC時の観測窓露出回数が他期に比べ多かった）では、短波長側への減衰勾配が他に比べて大きい。これは蒸着膜を形成する物質が他の期と異なるためと考えられる。

次に蒸着膜形成による観測窓の透過率低下が T_e , n_e 測定値に与える影響は以下のとおりである。

- (3) T_e は、透過率の短波長側への減衰勾配が大きい程、また測定対象の電子温度や散乱角が大きい程、本来測定されるべき値よりも低く測定される。
- (4) n_e は、透過率自身の低下が大きい程、本来測定されるべき値よりも低く測定される。最後に透過率減衰とJT-60運転実績の関連の調査により以下のことが結論として得られた。
- (5) 透過率の短波長側への減衰勾配が大きくなる、即ち T_e への影響が大きくなる原因として関連が深いのは、ショック間TDCに対する露出積算回数（時間）である。
- (6) 透過率自身の低下が大きくなる、即ち n_e への影響が大きくなる原因として関連が深いのは、全TDC（ショット間TDCと長時間TDCの合計）に対する露出積算時間である。今後の課題として以下のことを念頭に置く必要がある。
- (7) 遠隔操作可能なシャッター弁を用意して観測窓への蒸着膜の付着防止を強化する。
- (8) データベースの充実をはかり、TDC等に対する観測窓の露出時間（露出回数）から蒸着膜の形成状態、即ち観測窓の透過率を予測し、随時測定データの補正を可能にする。また、透過率を実測できるシステムを観測窓周辺に用意して予測値の精度をより高める。
- (9) 散乱角による T_e , n_e の変化率への影響に関して、蒸着膜透過率の角度依存性に関するデータベースも整備し、その影響の度合を定量的に把握していく。

謝 辞

本研究を遂行するに際し、終始激励頂いた飯島勉那珂研究所所長、田村早苗臨界プラズマ研究部部長に感謝致します。また、終始ご指導頂いた船橋昭昌室長をはじめ、有益な議論及び技術的支援を頂いた臨界プラズマ計測室の諸氏に感謝致します。観測窓の蒸着膜形成に関し有益な議論を頂いた村上義夫室長をはじめ炉心工学研究室の諸氏に感謝致します。蒸着物成分の元素分析については化学部分析センター、昭和光機製造㈱及び三井造船㈱のご協力を頂き、ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 横溝英明他, 核融合研究, 第59巻別冊 (1988) 72.
- (2) D. Johnson et al., Rev. Sci. Instrum., 56 (1985) 1015.
- (3) H. Salzmanneet al., Rev. Sci. Instrum., 59 (1988) 1451.
- (4) General Atomics, F Y89 DIII-D Research Operations Annual Report, GA-A19922 (1990) 5 - 2.
- (5) H. Yoshida et al., "Beam Combiner for Transient Phenomena Measurement by Thomson Scattering System in JT-60", to be published.
- (6) 佐藤正泰他, 核融合研究, 第59巻別冊 (1988) 47.
- (7) S. Ishida et al., "Twenty - Channel Grating Polychromator Diagnostic System for Electron Cycotron Emission Measurement in JT-60", to be published in Rev. Sci. Instrum..
- (8) 永島圭介他, 核融合研究, 第59巻別冊 (1988) 202.
- (9) 福田武司他, 核融合研究, 第59巻別冊 (1988) 16.
- (10) C. Gowers and H. Salzmann, private communication (1988, 1989).
- (11) D. H. McNeill, Rev. Sci. Instrum., 61 (1990) 1263
- (12) T. Matoba et al., Jpn. J. Appl. Phys., 18 (1979) 1127.

謝　　辞

本研究を遂行するに際し、終始激励頂いた飯島勉那珂研究所所長、田村早苗臨界プラズマ研究部部長に感謝致します。また、終始ご指導頂いた船橋昭昌室長をはじめ、有益な議論及び技術的支援を頂いた臨界プラズマ計測室の諸氏に感謝致します。観測窓の蒸着膜形成に関し有益な議論を頂いた村上義夫室長をはじめ炉心工学研究室の諸氏に感謝致します。蒸着物成分の元素分析については化学部分析センター、昭和光機製造㈱及び三井造船㈱のご協力を頂き、ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 横溝英明他, 核融合研究, 第59巻別冊 (1988) 72.
- (2) D. Johnson et al., Rev. Sci. Instrum., 56 (1985) 1015.
- (3) H. Salzmanneet al., Rev. Sci. Instrum., 59 (1988) 1451.
- (4) General Atomics, F Y89 DIII-D Research Operations Annual Report, GA-A19922 (1990) 5 - 2.
- (5) H. Yoshida et al., "Beam Combiner for Transient Phenomena Measurement by Thomson Scattering System in JT-60", to be published.
- (6) 佐藤正泰他, 核融合研究, 第59巻別冊 (1988) 47.
- (7) S. Ishida et al., "Twenty - Channel Grating Polychromator Diagnostic System for Electron Cycotron Emission Measurement in JT-60", to be published in Rev. Sci. Instrum..
- (8) 永島圭介他, 核融合研究, 第59巻別冊 (1988) 202.
- (9) 福田武司他, 核融合研究, 第59巻別冊 (1988) 16.
- (10) C. Gowers and H. Salzmann, private communication (1988, 1989).
- (11) D. H. McNeill, Rev. Sci. Instrum., 61 (1990) 1263
- (12) T. Matoba et al., Jpn. J. Appl. Phys., 18 (1979) 1127.