

JAERI - M
93-130

定常トカマク型核融合動力炉(SSTR)
のダイバータの改良検討

1993年7月

森山 幸記^{*1} 西野 徹^{*2} 関 泰・山崎誠一郎^{*3}

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。
入手の間合わせは、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、お申しこしてください。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）で複写による実費領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, 1993

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 いばらき印刷(株)

定常トカマク型核融合動力炉（SSTR）のダイバータの改良検討

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部

森山 幸記*¹・西野 徹*²・関 泰・山崎誠一郎*³

（1993年6月2日受理）

定常トカマク型核融合動力炉（SSTR）のダイバータの改良検討を行なった。本研究で行なった改良は、ダイバータプラズマ周辺にバッフル板を付加したり、ダイバータプレートにスロットを設置するなどの構造上の変更を加えることによってダイバータプラズマをより低温・高密度化し、ダイバータプレートの熱負荷を低減することである。

SSTRに従来から採用されていたダイバータ、バッフル板を付加したダイバータ、下方に排気するダイバータ及びガスを標的とするダイバータについてダイバータ解析コード（UEDA）を用いてダイバータプラズマの特性の評価・比較を行なった。数値解析の結果、バッフル板を付加したダイバータがダイバータプラズマの温度・密度、ダイバータプレートの熱負荷低減の面で優れていることが示された。スロット内のガスを標的とするダイバータや下方に排気するダイバータはダイバータの成立自体が困難であることも示された。

那珂研究所：〒311-01 茨城県那珂郡那珂町大字向山801-1

*1 九州大学工学部応用原子核工学科からの特別研究生（現在 九州電力（株）勤務）

*2 カナザワコンピュータ サービス（株）

*3 川崎重工業（株）

Improvement Study of the Divertor Configuration of
the Steady State Tokamak Reactor (SSTR)

Kouki MORIYAMA^{*1}, Toru NISHINO^{*2}, Yasushi SEKI
and Seichirou YAMAZAKI^{*3}

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

(Received June 2, 1993)

The divertor configuration improvement of the Steady State Tokamak Reactor (SSTR) was studied. In the study, lower temperature and higher density divertor plasma was aimed at to reduce the peak heat flux to the divertor plate, by adding baffle plates near the divertor plasma, or by providing slots to the divertor plates.

The divertor plasmas were simulated for the conventional divertor configuration employed in the SSTR design, the one with baffle plates added, the one with exhaust duct in the bottom direction called the private side pumping, and gas target in slot divertor configuration. The divertor plasma characteristics were analyzed and evaluated using the numerical simulation code, UEDA.

As the result, the divertor configuration with baffle plates is found to be superior in lowering the temperature, increasing the particle density of the divertor plasma and in reducing the peak heat flux. On the other hand, the gas divertor in the slot configuration and private side pumping divertor configuration are both found to have major difficulties.

Keywords: SSTR, Steady State Tokamak Reactor, Fusion Power Reactor,
Divertor, Gas Divertor, Baffle Plates, UEDA Code

*1 Special Research Student to JAERI from Kyushu University, Nuclear Engineering Department, presently at Kyushu Electric Power Co., Ltd.

*2 Kanazawa Computer Service, Ltd.

*3 Kawasaki Heavy Industries, Ltd.

目 次

1. はじめに	1
2. ダイバータの改良設計・評価基準	3
2.1 スクレープオフ層 SOL におけるプラズマ粒子の輸送	3
2.2 ダイバータ・プラズマの冷却過程	3
2.3 ダイバータ構造	5
2.4 ダイバータ・プラズマの評価基準	6
3. ダイバータ・プラズマの数値解析	13
3.1 解析方法	13
3.2 境界条件	14
3.3 解析課題	16
3.4 解析結果	17
4. ダイバータの特性評価	30
4.1 ダイバータ構造	30
4.2 ガスパフ方法	30
4.3 排気能力 (アルベド)	31
4.4 密度分布	31
4.5 バッフルの効果	32
4.6 ダイバータ構造の複合化	32
5. 結論	33
5.1 ダイバータ特性	33
5.2 設計最適化	34
謝 辞	35
参考文献	35
Appendix1 各計算ケースの結果概要	36

Contents

1. Introduction	1
2. Divertor Design Improvement and Evaluation Criteria	3
2.1 Plasma Particle Transport in the Scrape off Layer (SOL)	3
2.2 Cooling Process of Divertor Plasma	3
2.3 Divertor Configuration	5
2.4 Divertor Plasma Evaluation Criteria	6
3. Numerical Analysis of Divertor Plasma	13
3.1 Analysis Method	13
3.2 Boundary Conditions	14
3.3 Analysis Parameters	16
3.4 Analysis Results	17
4. Divertor Design Evaluations	30
4.1 Divertor Configuration	30
4.2 Gas Puffing Method	30
4.3 Evacuation Requirement (Albedo Value)	31
4.4 Density of Divertor Plasma	31
4.5 Effect of Baffle Plate	32
4.6 Improved Divertor Concept	32
5. Conclusions	33
5.1 Divertor Evaluation	33
5.2 Design Optimization	34
Acknowledgment	35
References	35
Appendix 1 Summary Results of Each Calculated Cases	36

1. はじめに

近い将来実現可能な核融合動力炉として既に定常トカマク型核融合動力（SSTR）が原研より提唱されている。[1] SSTRは、定常運転を行う核融合動力炉であり、SSTRは国際熱核融合実験炉ITERよりも小さい炉心寸法で1,000MWの電気出力を有する設計になっている。SSTRの主な設計パラメーターを表1に、炉心プラズマ周辺の概略図を図1に示す。

SSTRの概念設計によると、炉心プラズマから300MW (ion) + 300MW (electron) の熱、 2.5×10^{23} の粒子がSOL(Scrape off layer)に入ってくる。SOLに入った荷電粒子は、磁力線に沿って移動し、プラズマ対向機器の特定の部分（ダイバータ板）に当たる。SOLからダイバータ板に向かう荷電粒子は壁の温度に比べて非常に高温であるので、荷電粒子がダイバータ板に当たる際に、荷電粒子はダイバータ板を加熱し、更にダイバータ板材料中に損傷を与える。ダイバータ板が荷電粒子から受け取った熱はダイバータ板内部を通った冷却ループを介して系外に排出され、ダイバータ板に当たった荷電粒子は中性化されて真空ダクトを通して粒子は系外に排気される。

動力炉級の炉心プラズマからは、大量の熱が発生し、プラズマ粒子の循環量も多いので、現行の核融合装置に設置されているダイバータの方式では対応できない。そこでSSTRの概念設計では、ガスパフによって遠隔放射冷却を促進させるダイバータが採用された。SSTRのダイバータは、ダイバータ板前方のダイバータ・プラズマに中性のガスを噴出し、ダイバータ板へ向かってくる高温の荷電粒子と噴出ガス中の中性粒子の間で電離・励起等を起こさせ、その後続く再結合や電子のエネルギー準位の変化に伴う放射損失によってダイバータ板へ向かってくる熱を低減させるものである。SSTRの概念設計では、Feの放射損失によってガスパフの効果を高めるためにD₂ガスにFeを混入したガスをパフするダイバータが成立することが示され、採用された。[2]

本研究では、さらにダイバータを改良する為に、SSTRを対象にダイバータ・プラズマにバッフル板を設置したり、ダイバータ板にスロットを設置するなどの構造上の変更によって、ダイバータの性能の向上を図ると共に、ダイバータの特性を評価・比較することを目的とする。

表1 SSTRの主な設計パラメーター

Major Radius	R_p	7.0m	Bootstrap Current	$I_{bootstrap}$	9 MA
Minor Radius	a_p	1.75m	Beam Driven		
Elongation	κ	1.8	Current	I_{beam}	3 MA
Triangularity	δ	0.3	NBI Power	P_{NBI}	60 MW
Aspect Ratio	A	4.0	Beam Energy	E_{beam}	2MeV
Plasma Volume	V	760m ³	Fusion Power	P_{fusion}	3000MW
Plasma Current	I_p	12MA	Power Gain	Q	50
Toroidal Field	B_t	9T	Total Thermal Output	P_{th}	3710MW
Safety Factor	$q(95\%)$	5.0	Max. Neutron Wall Load	P_n	5MW/m ²
Safety Factor	$q(0)$		Gross Electric Power	P_{eG}	1280MWe
Toroidal Beta	β_t	2.52%	Net Electric Power	P_{enet}	1080MWe
Poloidal Beta	β_p	2.0			
Troyon Factor	g	3.3			
Average Density	$\langle n_e \rangle$	$1.45 \times 10^{20} m^{-3}$			
Average Temperature	$\langle nT \rangle$				
Effective Charge	$\langle n \rangle$	17keV			
He Concentration	Z_{eff}	1.8			
	$f(He)$	0.05			

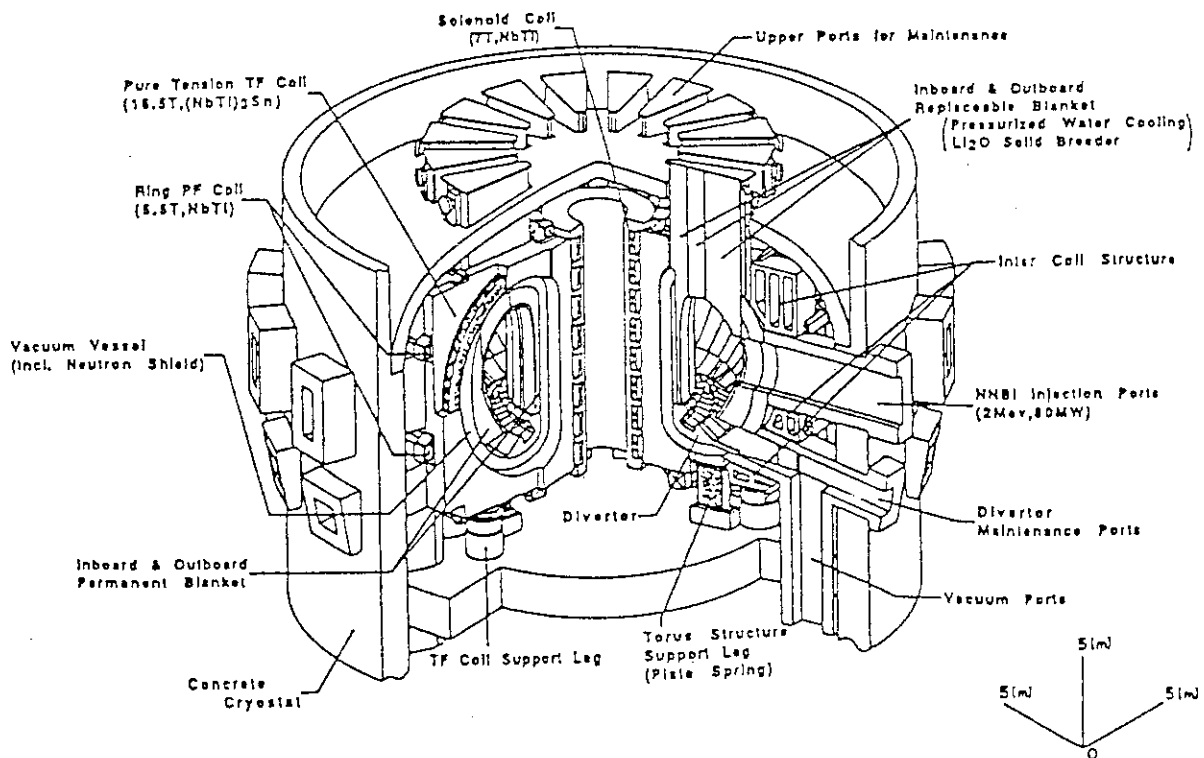


図1 炉心プラズマ周辺の概略図

2. ダイバータの改良設計・評価基準

2.1 スクレープオフ層SOLにおけるプラズマ粒子の輸送

SSTRのトーラス断面を図2に示す。SSTRの磁場は下側シングルヌルダイバータ配位と呼ばれる磁場配位であり、図2の様に磁気面が交差する点が炉心プラズマの下側に一点存在する。磁気面が交差する点をヌル点、ヌル点を通る磁気面をセパトリックスという。本研究では、磁気面が閉じている領域を炉心プラズマとし、磁気面が閉じていない領域をSOL(Scrape off Layer)と呼ぶことにする。SOLの中でもセパトリックスの上側をpublic region、下側をprivate regionという。

粒子の拡散によって、炉心プラズマからSOLに荷電粒子が漏れ出す。荷電粒子は磁場に拘束されて運動するために、巨視的には磁力線に沿った方向にしか移動できない。SOLに入った荷電粒子は磁力線に沿って移動し、磁場配位がダイバータ配位になっている為に磁力線と交差する表面を持つ特定のプラズマ対向機器に誘導され、衝突する。このプラズマ対向機器が、ダイバータ板である。ダイバータ板はプラズマ粒子から受ける熱を除熱し、プラズマ粒子を中性化して真空容器外へ排気する為に設置されている。ダイバータとは、このようにダイバータ配位の磁場によって荷電粒子の移動経路を限定し、プラズマからの熱を除熱し、プラズマ粒子を中性化し排出する一連の機構を指す。

ダイバータ板は、プラズマ粒子の衝突によって高熱流束にさらされる。セパトリックスとダイバータ板の交点をストライク・ポイントというが、特にストライク・ポイントの近傍が熱流束分布のピークになる。ダイバータ板の熱負荷(ダイバータ板の熱負荷)を低減する為に、ダイバータ・プラズマは低温・高密度に保たれる。ダイバータ・プラズマが低温・高密度であれば、SOLからダイバータ板に向かってくる粒子はダイバータ板に当たる前に、低温のダイバータ・プラズマ粒子と衝突し熱緩和がなされる。熱緩和過程自体には熱シンクがないので、直接的にダイバータに向かう熱量を低減することはないが、熱流束分布のピーキングを弱める効果、即ち熱流束のピーク値を下げる効果がある。

また、エロージョン防止の面でも、ダイバータ板表面のダイバータ・プラズマを低温に保つ必要がある。ダイバータ・プラズマの温度が高ければ、プラズマ粒子がダイバータ板に当たった場合、スパッタリング、プリスタリング等の原因となる。

2.2 ダイバータ・プラズマの冷却過程

SOLに入った高温のプラズマ粒子は、ダイバータ・プラズマ領域において荷電交換反応、中性粒子のイオン化、放射冷却、電子-イオン間の熱緩和等の物理過程により冷却される。これらの物理過程は制動放射や、電子のエネルギー準位の変化等による放射損失と、荷電

交換反応、中性粒子のイオン化、電子-イオン間の熱緩和等の粒子同士の相互作用に大別できると考える。

2.2.1 粒子同士の相互作用

2.2.1.a 荷電交換反応[3,4]

SOL中のイオンのほとんどは炉心プラズマから漏れ出てきたものである。また、SOL中の中性粒子のほとんどは、イオンが一度壁に当たって中性化されて再度壁からSOL中に放出されたり、ガスパフによって外部から強制的にSOL中に放出されたものである。その為、SOL中のイオンと中性粒子ではイオンの方が極端に温度が高い。イオンと中性粒子の間で熱緩和がなされると、統計的にイオンの方から中性粒子の方にエネルギーが渡る。従って、荷電交換反応が起きることによって中性粒子が加熱され、その相対としてプラズマ粒子全体としては冷却されたことになる。

2.2.1.b 中性粒子のイオン化

SOLでは中性粒子はイオンに比べ極端に温度が低い。中性粒子がイオン化された場合、まず、電子のエネルギー準位分の熱が冷却される。更に、中性粒子がイオン化すると、高温のプラズマに低温のプラズマ粒子集団を混ぜたと同様の結果になる。熱緩和によって、結果的にプラズマ全体としてみると温度が下がる。

2.2.1.c イオン-電子間熱緩和

イオンと電子の温度が異なる場合、イオン-電子間のクーロン相互作用によって温度が高い方から低い方へ熱が移動する。一般には、電子は熱伝導、放射損失が大きいため冷えやすく、イオンの方が温度が高くなるので、イオンから電子に熱が移動する。

2.2.2 放射損失

制動放射(Bremstrahlung)や、再結合や電子のエネルギー準位の変化に伴う電磁波の放射によって、電子のエネルギーがプラズマ外へ放出される。放射損失によって放出された電磁波のエネルギーは再びダイバータ・プラズマ領域で吸収されることはない。したがって、プラズマから見れば、この電磁波が熱シンクになる。放射損失を増すためにはダイバータ・プラズマを高密度に保つ必要がある。

2.2.3 熱のチャンネル

ダイバータ・プラズマ領域に入ってきた高温のプラズマ粒子は電子-イオン間熱緩和によって電子又はイオンのうち温度が高い方から低い方へ熱が渡る。電子は、放射冷却、熱

伝導によって熱を系外に排出し、ダイバータ・プラズマを冷却する。イオンは荷電交換反応、熱伝導によって熱を系外に排出し系を冷却する。熱のチャンネルを図3に示す。

結局、ダイバータ・プラズマとしての熱シンクは電子の放射冷却、あるいはイオンの荷電交換反応である為に、放射冷却、荷電交換反応、熱緩和のチャンネルを確保することが重要である。

2.3 ダイバータ構造

2.3.1 従来のダイバータ研究

図4は既に概念検討が行なわれたSSTRのダイバータである[1]。真空容器内の構造等は、現行の核融合装置の設計に採用されている炉構造と同様であるが、更に遠隔放射冷却を効果的に行なうための中性ガスの噴出装置・機構が存在する。従来の一般的なダイバータ研究は、パワーが小さかったのでダイバータ板の熱負荷の問題はSSTR程厳しくなかった。それゆえ、ダイバータ板の研究に重点がおかれ、ダイバータ・プラズマの制御が取り上げられる事は比較的少なかった。しかし、ITERをはじめとする現在設計段階にある大型の核融合炉では従来のようなダイバータ板の高性能化だけでは対応できないことが指摘されつつある。

2.3.1 ガスダイバータ

ダイバータ板の性能を補うために現在、(1)プラズマを揺り動かす(2)ダイバータ板を回転させる(3)ダイバータ・プラズマにガスを注入する等の案が検討されている。SSTRの設計では、ダイバータにガスを注入する案が採用された。ダイバータ・プラズマにガスを注入する形式のダイバータをガスダイバータと呼ぶことにする。

ガスダイバータではダイバータ板付近にガスを噴出させて中性粒子の密度の高い層を形成する。ダイバータ板前方に中性ガス層を作ることによって、高温のプラズマ粒子は中性粒子と荷電交換反応を起こし熱の緩和が起こる。中性粒子は磁場に捕捉されないので、比較的容易に真空容器外に出て行く。熱負荷低減の機構はこれだけではなく、注入した中性粒子がイオン化することによってプラズマ粒子密度が増し、制動放射あるいは再結合や電子のエネルギー準位の変化に伴う放射損失によってプラズマの冷却が促進され熱負荷が低減される。ガスパフを行なうことによってガス層の中性粒子密度を高く保ち、以上の反応を活発にする。

更に、通常のパフは、 D_2 のパフを行なうのであるが、放射損失によって冷却の効果を高めるために、原子番号の大きい元素を混入したパフをする概念もある。SSTRの概念検討では、Feを混入したガスパフの成立性が示された。

2.3.4 ダイバータの構造上の改良

ダイバータ・プラズマ領域及びその周辺にバッフル板を設置したり、ダイバータ板にスロットを設置する等のダイバータの構造上の変更によって、ダイバータ板の熱負荷を低減する概念がある。以下に、熱流束を低減するためのダイバータ概念構造とその特徴について示す。

2.3.4.a バッフル型ダイバータ[5]

図5の様に磁力線と交わる方向にバッフル板を配置し、トーラス断面を2つの領域に分離する。バッフルにより隔離されたダイバータ室内のプラズマを低温、高密度に保つ事によって、ダイバータ板のストライク・ポイントに集中的に懸かる熱を広範囲に分散できるものと期待される。

2.3.4.b プライベート方向ポンピング型ダイバータ

図6の様にダクトをプライベート方向に配置する。中心軸方向（下側）に向けて排気する。不純物が炉心プラズマに侵入しにくくなる等、炉心プラズマがダイバータからの悪影響を受けにくくなるものと見られる。そのため、パブリックサイドポンピングに比べ、ガスパフ量や排気能力、プラズマ粒子の密度分布などに懸かる制約が緩和されるものと期待される。

2.3.4.c スロット型ダイバータ

図7の様にセパトリックスラインに沿ってダイバータ板上で高熱流束が予想される部分にスロットを設けスロット内部に向けガスを放出させる。スロット内部を高密度の中性ガスで満たし、スロットの部分だけ固体の標的の代わりにガスの標的を用いる概念である。

2.3.4.d プレナム型ダイバータ

基本的な設計概念は、スロットダイバータと同じである。図4のダクトを上方に移動させれば、図8のようにプレナム型のダイバータ構造となる。スロット型のダイバータ構造に比べ設計が複雑にならない。

2.4 ダイバータ・プラズマの評価基準

本研究では従来のSSTR概念検討よりも更にSSTRダイバータの性能を向上させることを目的とする。ダイバータの性能の向上を図る方法は、ダイバータ板ではなく、ダイバータ・

プラズマ領域の構造上の改良に限定する。

本研究で言うダイバータの性能の向上とは

- a.ダイバータ・プラズマの低温・高密度化
- b.ダイバータ板のピーク熱負荷の低減
- c.ガスパフ循環量の低減
- d.排気の効率化

である。

以上の四点をダイバータ性能の評価基準とする。このうちa.,b.の二点が特に重要な評価の基準であり、c.,d.に優先される。仮に、a.が完全に達成されればb.,c.,d.は自ずと達成されるものと考えられる。

本研究ではSSSTRガスダイバータを対象に

- a.適切なダイバータ構造
- b.適切なガスパフの量と適切なガスパフの位置
- c.適切な排気能力

について検討する。適切なダイバータ条件を明らかにするために異なる解析条件に対する解析結果の比較・検討を行なうが、比較・検討の際の判断基準が4点のダイバータ性能の評価基準である。

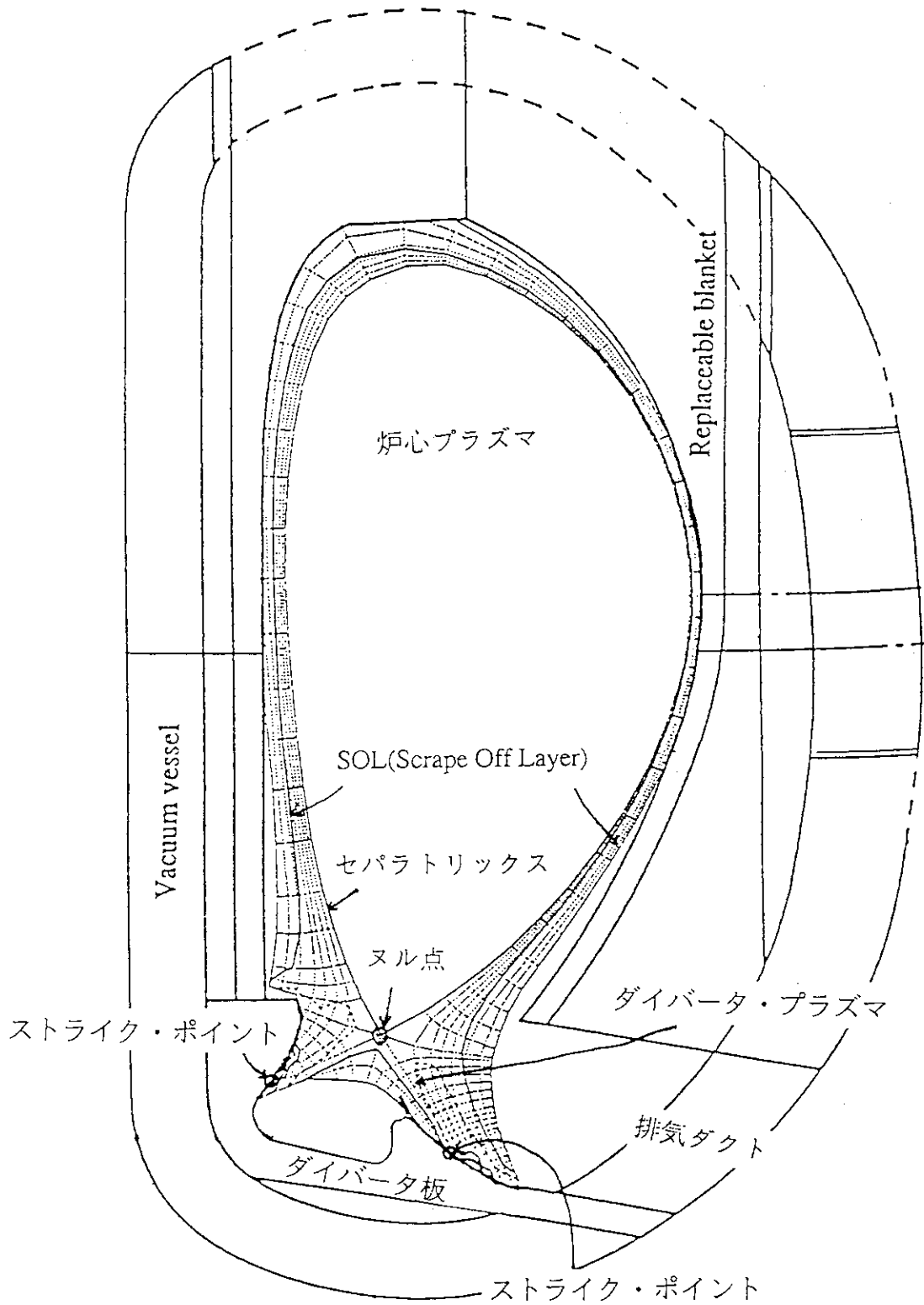


図2 SSTR トーラス断面

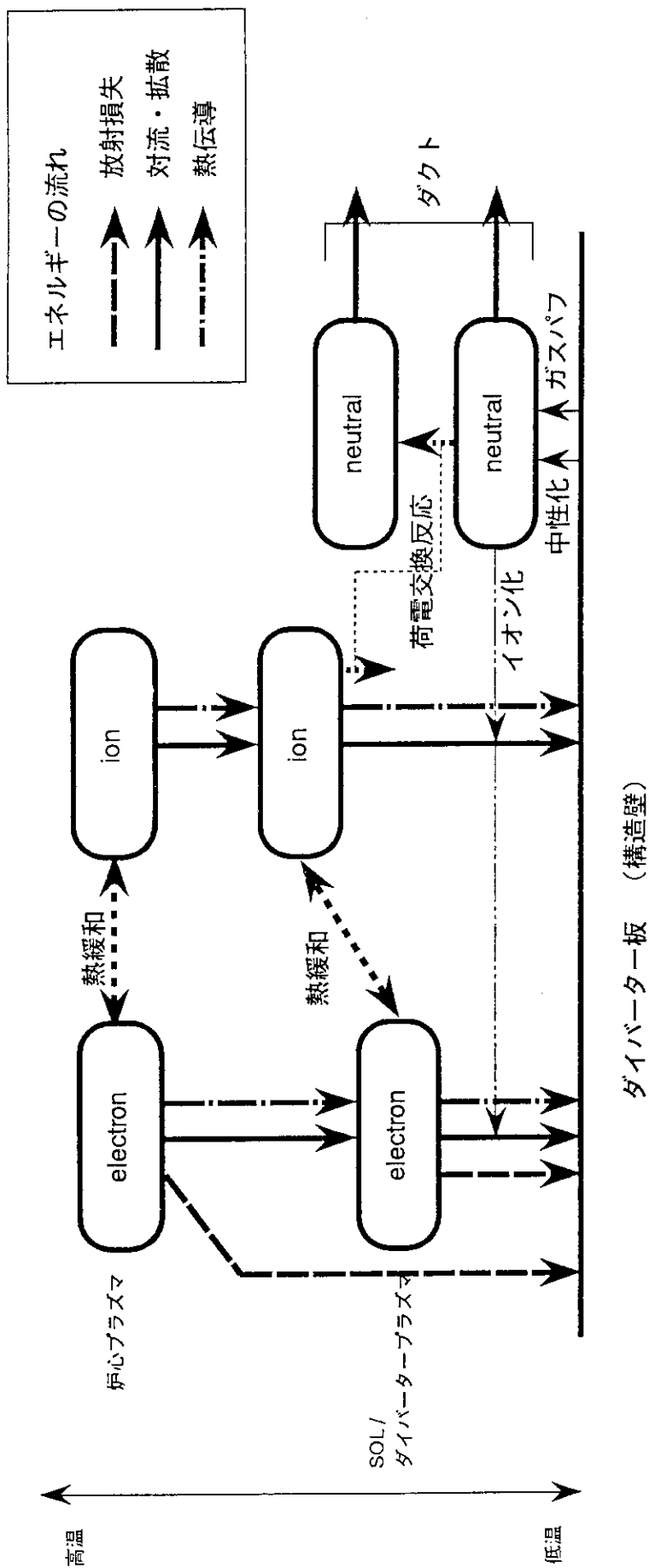


図3 熱のチャンネル

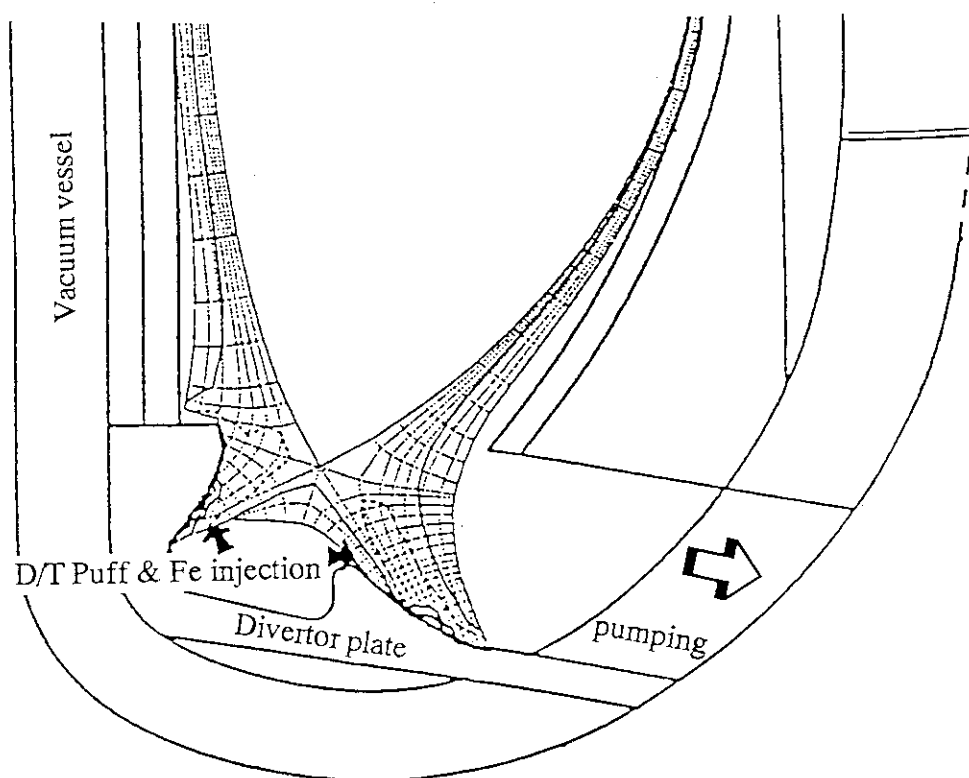


図4 従来型ダイバータ

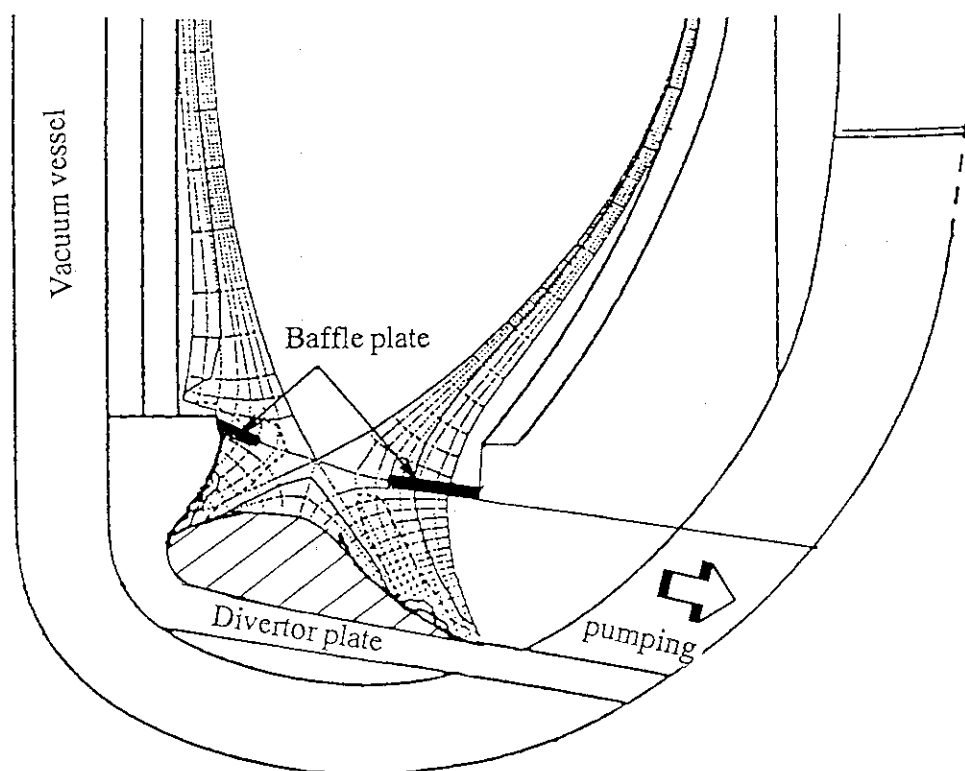


図5 バッフル型ダイバータ

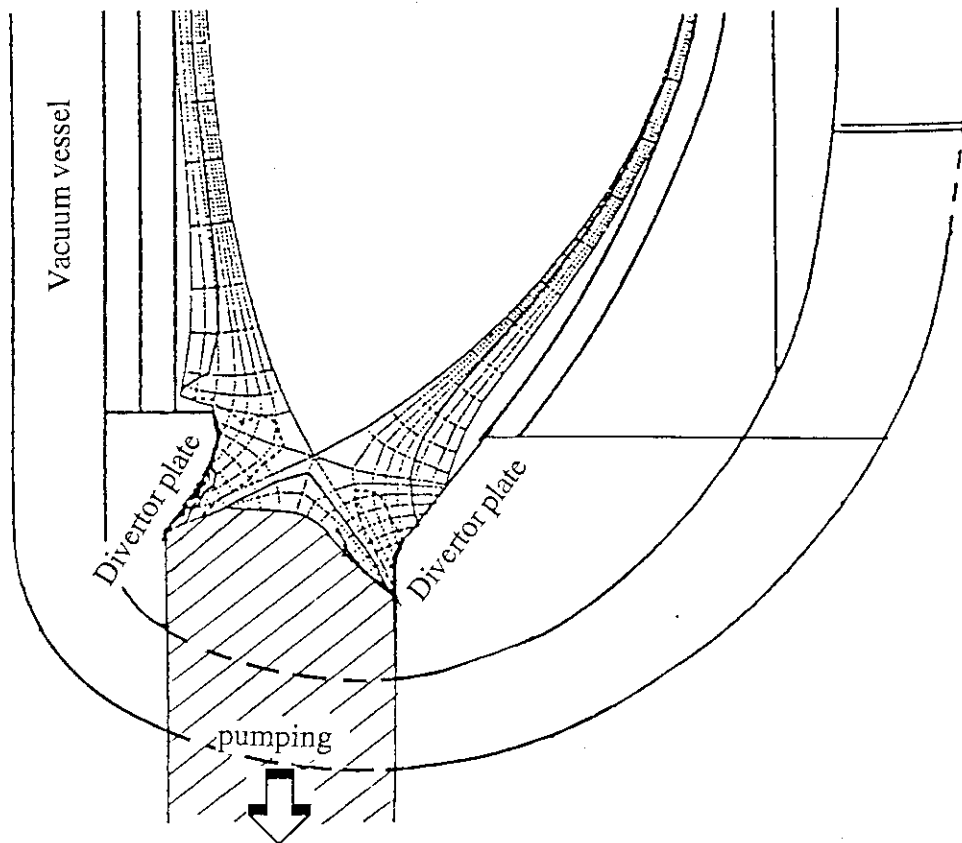


図6 プライベート方向ポンピング型ダイバータ

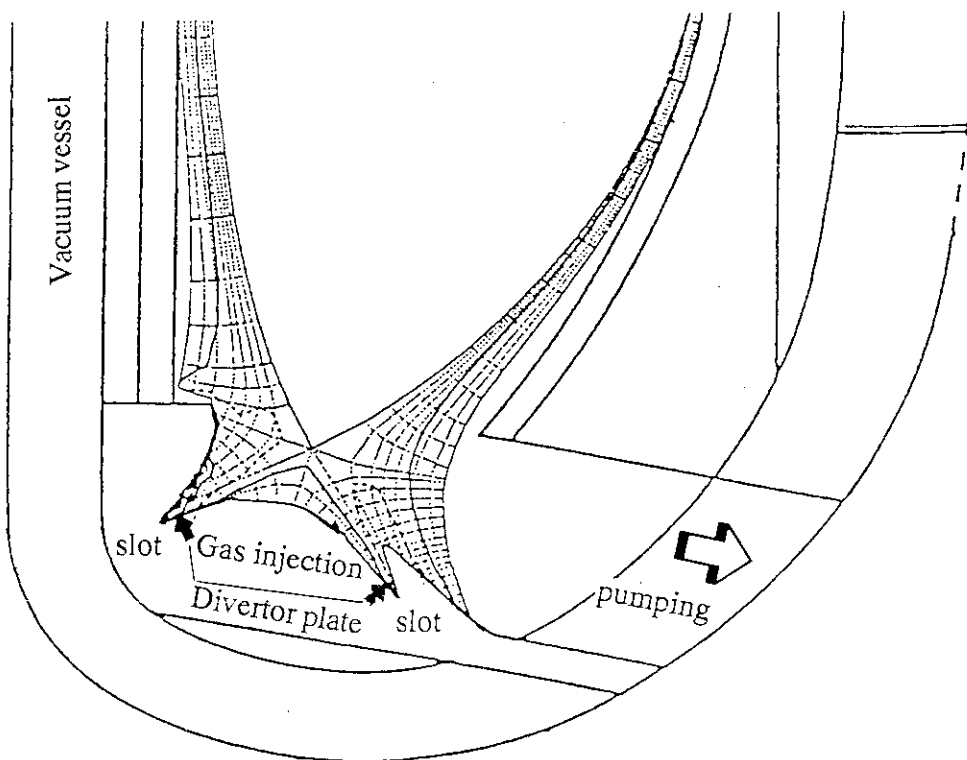


図7 スロット型ダイバータ

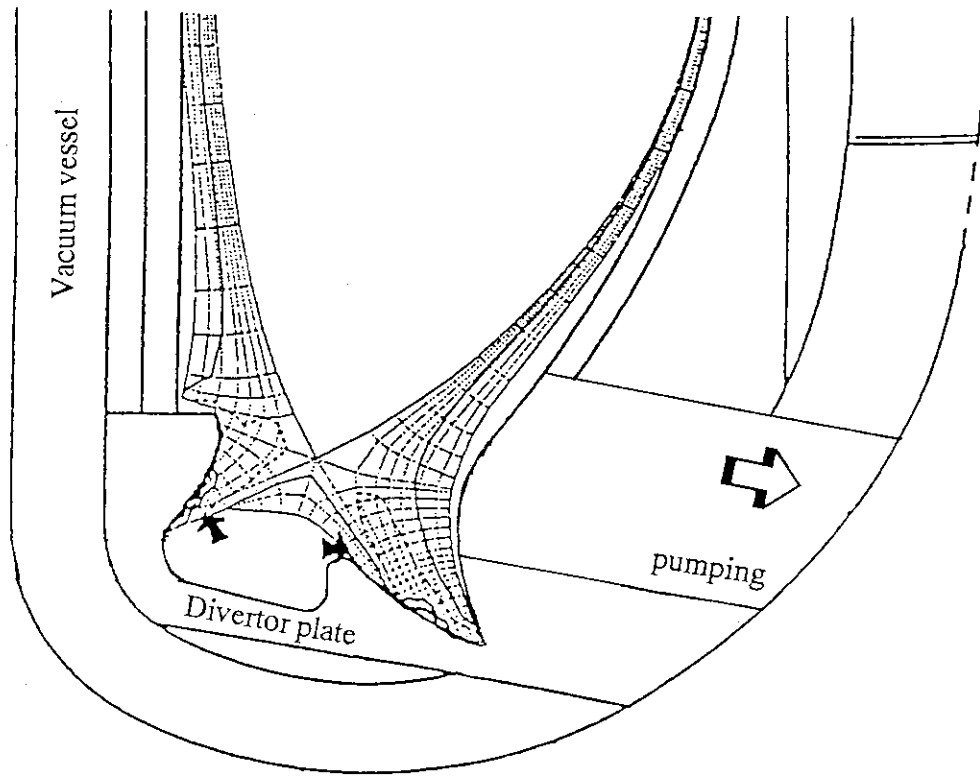


図8 プレナム型ダイバータ

3. ダイバータ・プラズマの数値解析

3.1 解析方法

ダイバータ・プラズマの数値解析を行なうのにUEDAコードを用いた。UEDAコードでは、トロイダル方向について均質であると仮定して、トーラス断面についての2次元空間上で二流体方程式を粒子解法によって解いている。[6]

ダイバータ・プラズマの解析を行なうために、まず平衡計算の結果から磁場の形状を表わす座標データを準備する。この座標データを基にUEDAコードの計算に用いるための、トーラス断面に対応した空間適合格子を構築する。空間適合格子は、直交化されており、メッシュの一方の平行曲線群は磁気面に平行である。

UEDAコードでは、プラズマを1流体2温度の流体モデルで扱っている。連続の式は

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = S_n \quad (1)$$

磁力線方向の運動量保存の式は、

$$\rho \left(\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \right) v_{\parallel} = - \frac{B_{\theta}}{B} \frac{1}{h_z} \frac{\partial P}{\partial z} - S_n v_{\parallel} \quad (2)$$

エネルギー保存の式はイオン、電子についてそれぞれ

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \right) \left(\frac{3}{2} \frac{kT_i}{m_i} + \frac{1}{2} \mathbf{v} \cdot \mathbf{v} \right) \\ &= - \nabla \cdot \left(\frac{\rho kT_i}{m_i} \mathbf{v} \right) - \mathbf{v} \cdot \nabla \left(\frac{\rho_e kT_e}{m_e} \right) \\ & \quad + \nabla \cdot \kappa^i \nabla (kT_i) - E_s S_n + Q_{ei} - Q_{CX} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \rho_e \left(\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \right) \left(\frac{3}{2} \frac{kT_e}{m_e} + \frac{1}{2} \mathbf{v} \cdot \mathbf{v} \right) \\ &= - \nabla \cdot \left(\frac{\rho_e kT_e}{m_e} \mathbf{v} \right) + \mathbf{v} \cdot \nabla \left(\frac{\rho_e kT_e}{m_e} \right) \\ & \quad + \nabla \cdot \kappa^e \nabla (kT_e) - E_s S_n - Q_{ei} - Q_{rad} \end{aligned} \quad (4)$$

トロイダル方向の拡散則は、

$$v_{\psi} = - \frac{1}{h_{\psi} n_i} \frac{D \partial n_i}{\partial \psi} \quad (5)$$

UEDAコードではプラズマ粒子についてはPIC(Particle In Cell)法、中性粒子についてはモ

ンテカルロ法を用いて解析を行なっている。[7] PIC法のシーケンスは3段階あり、step.1で各セルを代表する速度、電子温度、イオン温度を決定する。セルの切り方を図9に示す。step.2でセル内の粒子をセルの頂点の速度で決まる速度分布にしたがって動かす。step.3で各セルについて粒子の収支を取りセルの質量、速度、内部エネルギーを更新する。このstep.1-step.3を繰り返す。

計算結果として、各セルにおける温度、圧力、速度、ダイバータ板面における熱流束等が出力される。ポスト処理を行なうことによって、指定したセルの温度履歴、密度履歴や、トーラス断面のSOL領域の密度分布、温度分布、荷電交換反応のエネルギー分布等が出力可能である。

本研究では定常解を得ることを目的とする為、時間依存の解が定常に到るまで解く必要がある。SOL領域（解析領域）に入ってくる粒子と出ていく粒子の収支をとって、つり合いがとれた段階で平衡に達したと判断した。

有意の定常解を得るまでの手順は次の通り。

- #1. 入力条件（パフ量、アルベド）を決め、解が定常になるのを待つ。
- #2. 解が定常にならないものは解が定常になる方向に入力条件を修正し定常解を得る。
- #3. 解が定常になったもののうちダイバータの成立条件を満たさないものは満たす方向に入力条件を修正する。
- #4. ダイバータたる条件を満たしているものは粒子循環量が少なくなる方向に入力条件を修正する。

3.2 境界条件

3.2.1 解析の面で必要な条件

UEDAコードはSOLを解析領域としているために、炉心プラズマ-SOL、構造物-SOL、ダクトの排気面-SOLの境界上で、境界条件が設定される。また、中性粒子のソース条件がガスパフ位置に於いて設定される。

3.2.1.a 排気モデル

真空ダクトの排気を模擬するために、排気に関わる境界条件にはアルベド面という概念が解析コードに採用されている。アルベドは端的に言うと壁面における粒子の反射率であり、[0,1]の値をとる。アルベドが設定された壁面をアルベド面という。例えば、アルベド係数= α とするとアルベド面に当たった粒子のうち α の確率で粒子はアルベド面から反射され、残りの $(1-\alpha)$ の割合で粒子が排出される。排気を行なう境界面としてアルベド面を

用いると、実際の真空ダクト内でポンプに向かった粒子のほとんどが何処かで反射されてプラズマの方に戻ってくる状況が再現できる。

アルベドが大きいほど、排気速度が小さいことを意味する。

3.2.1.b ガスパフのモデル

ガスパフを行なう壁面を解析メッシュのセグメント単位で指定し、コサイン分布でSOLに粒子を噴出させる。パフされる中性粒子の励起過程は、水素原子については H_2, H, H^+ の励起過程を全て解く。不純物については価電子が多く励起過程は非常に複雑であるのでAverage ion modelを用いたコロナ平衡モデルが導入されている。

そのモデルでは、統計的分布のある不純物イオンの電荷を、平均量で代表する事によってモデル化している。同様に、Feイオンの温度に対してFeイオンの平均的なPower Loss Rateが決められる。Power Loss Rateは単位体積、単位時間当たりのエネルギー損失である。

3.2.1.c 炉心プラズマ境界条件

解析上、プラズマ粒子の上流側の条件を決めるために炉心プラズマ表面にセルを仮定し、炉心プラズマの表面に沿ったセルの密度、温度、拡散係数が一様であると仮定する。予め炉心プラズマからSOLに単位時間当たりに入ってくる全熱量、全粒子数を決めると、仮定によって炉心プラズマからSOLへの熱流束分布、粒子束分布が決まる。

3.2.1.d 構造壁のモデル

プラズマ粒子（イオン）が壁に当たった場合、0.5の確率で重水素の単原子分子が、0.5の確率で重水素の2原子分子が発生するものと仮定している。水素の場合は、リサイクル率は100%であると仮定している。

不純物（鉄）イオンが壁に当たった場合は、壁に吸着されるのとしている。即ち、リサイクル率は0%である。

3.2.2 工学上満たすべき条件

ダイバータ・プラズマが成立するためには工学上の要求から以下の条件を満たさなければならない。

ダイバータの成立条件

ダイバータ板の健全性を確保するために、ダイバータ板表面上のプラズマ温度、ダイバータ板の熱負荷は次のように制限されるものとした。

ダイバータ板表面上で

プラズマ温度 20eV以下

熱流束 10.0MW/m²以下

プラズマ温度の制限値は、ダイバータ板材料のエロージョンを防止する為に決められる。熱流束の制限値は水冷却の場合の除熱の限界である。ガス冷却の限界は2-3MW/m²とされている。

また、低温・高密度ダイバータとはいえ、炉心プラズマ境界で炉心プラズマよりSOLの方のプラズマ密度が高いことはありえない。炉心プラズマが成立するためにはセパトリックスライン上のプラズマ密度は次の様に制限される。

セパトリックスライン上で

プラズマ粒子密度 5.0-10.0x10¹⁹(個/m³)以下

プラズマ密度の限界は炉心プラズマ平均密度が1.4x10²⁰(個/m³)であることから、粒子拡散によって炉心プラズマの粒子をSOLに排出するためには、セパトリックス付近でプラズマ粒子密度を低くして密度勾配を確保する必要があるためである。

3.3 解析課題

本研究の解析課題は主に次の3点である。

ダイバータ構造の適性

ガスパフの方法

アルベド面粒子反射率（排気能力）

それぞれについて以下に示す。

3.3.1. ダイバータ構造の適性

従来型のダイバータ構造を比較の基準として、その他のダイバータ構造が従来型に比べどのような特性を持つのかを調べる。

ダイバータ構造上の特性の比較を行なうために、それぞれのダイバータ構造を代表して以下の5つの解析格子を準備し、解析を行なった。

- | | |
|-------------------|------------------|
| a. 従来型ダイバータ | 図A-1-(a),A-2-(a) |
| b. バッフル型 | 図A-3-(a),A-4-(a) |
| d. プライベート方向ポンピング型 | 図A-5-(a),A-6-(a) |
| c. スロット型 | 図A-7-(a) |
| e. プレナム型 | 図A-8-(a) |

ダイバータ構造以外の解析条件（ガスパフ、アルベド等）を同様の条件で解析を行なうことによって、それぞれのダイバータの特性を把握する。但し、それぞれのダイバータ構造の特質のみを抽出するために、それぞれのダイバータ構造の特徴的な部分のみ変えて、

特徴を代表しない部分については5つの条件の間でできるだけ共通の構造となるようにした。

それぞれのダイバータ構造についても部分的な構造、例えばバッフル板の幅等を変えて解析を行ない、傾向を調べた。

3.3.2 ガスパフの方法

a. ガスパフ位置による冷却性能の差異

ヌル点よりダイバータ板側のセパトリックスに着目すると、ダイバータ・プラズマの密度分布はセパトリックスに対して必ずしも対称であるとは考えられない。密度分布が非対称であれば、セパトリックスのどちら側から中性ガスを注入するかによってダイバータの性能に違いが見られると考えられる。

ダイバータ性能のガスパフ位置に対する依存性を調べるために従来型ダイバータとプライベート方向ポンピング型ダイバータについてガスパフの位置をセパトリックスラインの上側領域からの噴出と下側領域からの噴出の二通りで解析を行なった。ガスパフ位置に対するダイバータ・プラズマ特性の傾向をできるだけ抽出するために、敢て中間的な位置にあたるセパトリックス隣接セルからはパフを行なわなかった。

b. D_2 パフ量、不純物パフ量

工学的な側面から考えると D_2 パフ量は抑えねばならない。 Fe パフは、用いないことを目標にしなければならない。不純物パフの限度を D_2 のパフ量の1%以下とした。

3.3.3 アルベド面粒子反射率（排気能力）

アルベドが大きいことは排気能力への要求が少ないことになる。従来のSSTR概念設計に用いられたアルベド=0.96より大きなアルベドでのダイバータの成立を目標とした。

3.4 解析結果

代表的な解析結果を簡単にまとめたものを表2に示す。解析を行なった中で、バッフル型ダイバータが電子密度分布、温度分布、ダイバータ板の熱負荷の面で優れていた。比較の対象として従来型の解析例を図10(a)-(d)に、バッフル型の解析例を図11(a)-(d)に簡単に示す。ダイバータ板の熱負荷を図12,13に示す。太実線が図11のバッフル型の解析例に、細実線が図10の従来型の解析例に対応する。バッフルの熱負荷を図14に実線で示す。図12-14にある上記以外の線は、ガス噴出位置をセパトリックスの上側にするとガスパフの効果が現われにくくなる領域ができること、及びバッフル幅を短くすると、温度分布や

密度分布の面でダイバータの成立性を犠牲にすることなくバッフルの熱負荷が低減されることを示す結果である。

代表的な解析結果を解析条件と共にAPPENDIX 1の表A-1から表A-8に示す。ガスパフ方法の記述のなかでガスパフ量の単位は Γ となっているが、炉心プラズマからSOLに毎秒当たり拡散してくる粒子数である $\Gamma=2.5 \times 10^{23}$ (molecules/sec)を基準とした。Commentには結果を得るまでの傾向や結果を得た後に行なった試みなどについて、あるいはその他の関連する解析例について簡単に述べてある。SOLの2次元分布を図示したものを図A-1から図A-8(表の番号と対応)に示す。

電子温度分布図、イオン温度分布図の見方を説明する。縦軸は温度、横軸はpoloidal indexである。Poloidal indexの取り方は図9に示してある。複数の曲線は、磁力線方向に連なる一連のメッシュを代表する複数の磁気面に対応する。最も高温の曲線が炉心プラズマに隣接する磁気面に対応し、最も低温の曲線が構造壁に隣接する磁気面に対応する。ダイバータ板表面上のプラズマ温度は曲線の両端に相当する。

表2 各計算ケースの代表的な解析結果

Run No.	形式	ガスバフ方法			アルベド	ダイバータプレート		その他
		噴出口の位置	D ₂ バフ量*1	Fe ⁺ バフ量*1		表面温度最高値(eV)*2	熱負荷最高値(MW/m ²)*2	
NORM-L	従来型	Private region	2Γ+1.5Γ	0.02Γ+0.01 5Γ	0.98	20以上	5	この解析条件ではエロージョンが問題になる。
NORM-U	従来型	Public region	4Γ+3Γ	0.04Γ+0.03 Γ	0.96	200以上	20	セバトリックス沿いが冷却不十分にな。
BFLE-W	バッフル型	Private region	2Γ+1.5Γ	0.02Γ+0.01 5Γ	0.98	10(10)未満	0.3 (10)	ダイバータが成立するための条件を満たしている。
BFLE-N	バッフル型	Private region	2Γ+1.5Γ	0.02Γ+0.01 5Γ	0.98	20(20)未満	3.5 (6)	ダイバータが成立するための条件を満たしている。
PRIV-F	プライベート方向ポンピング型	Public region	2Γ+1.5Γ	無し	0.96	30以下	—	炉心プラズマ境界の密度が高くなり過ぎる。
PRIV-S	プライベート方向ポンピング型	Public region	2Γ+1.5Γ	無し	0.99	50以上	—	炉心プラズマ境界の密度が高くなり過ぎる。
SLOT	スロット型	Private region	2Γ+1.5Γ	無し	0.96	200以上	—	排気が困難である。
PRNU	プレナム型	Private region	2Γ+1.5Γ	無し	0.96	20以上	—	排気が困難である。

*1 $\Gamma=2.5 \times 10^{20}$ (molecules/s)

*2 ()内はバッフルの表面温度と熱負荷の最高値

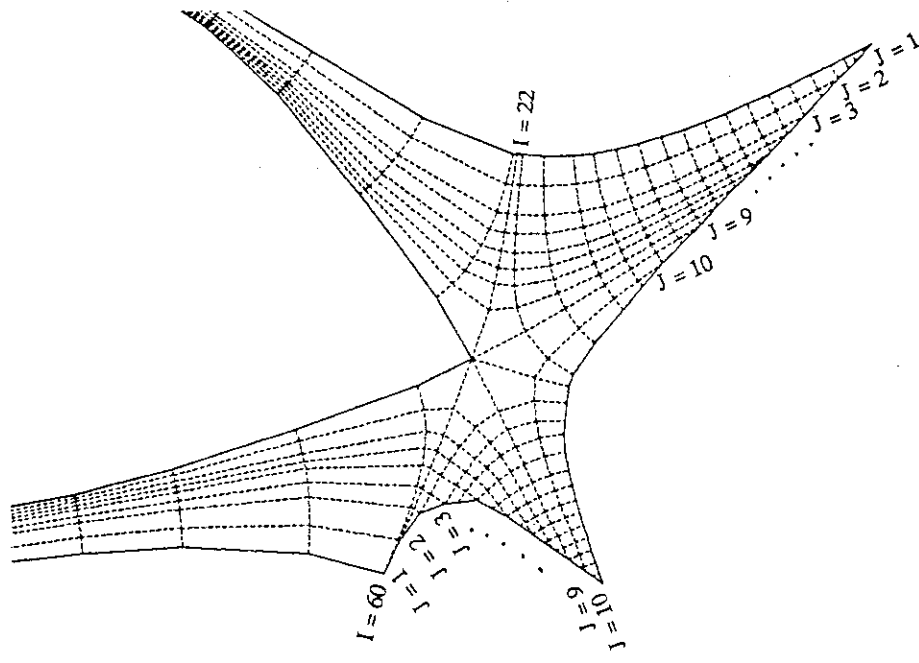


図9 (c) index(I, J)と格子の対応

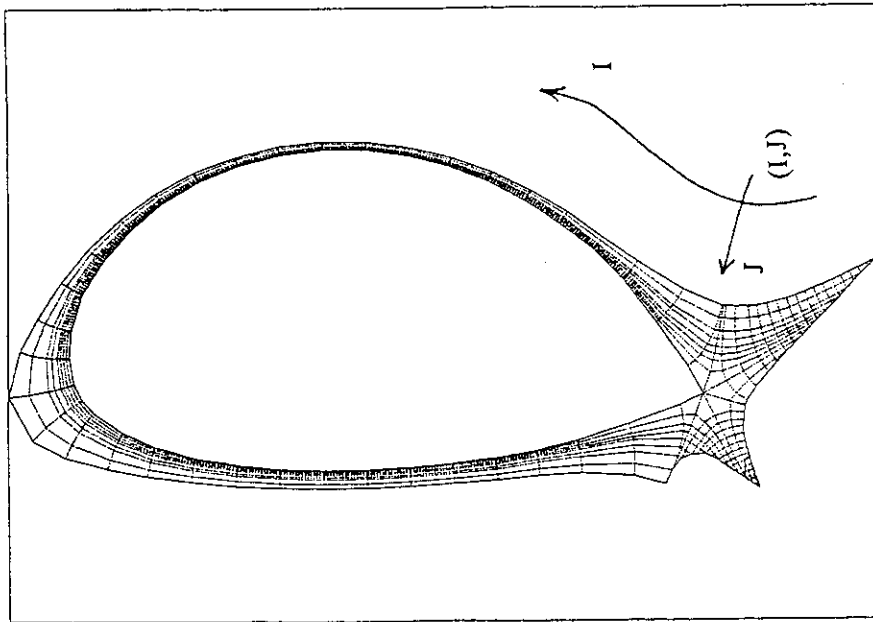


図9 (b) 解析に用いた格子

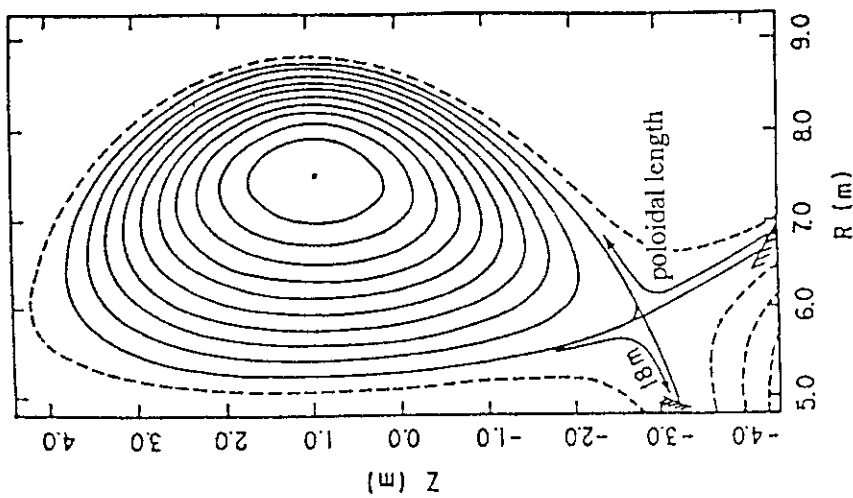


図9 (a) Poloidal lengthの取り方
(矢印方向)

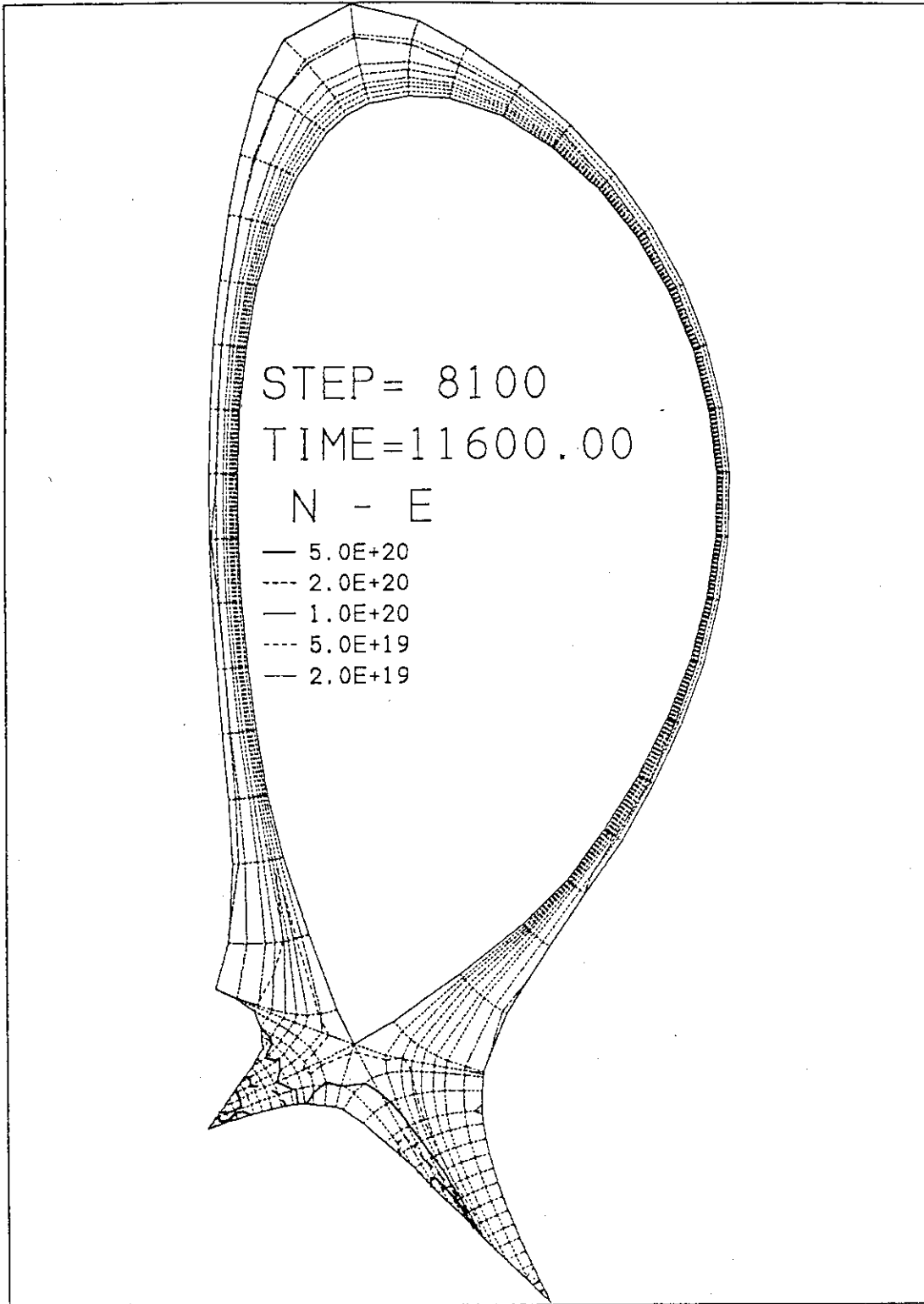


図10 電子密度分布

解析条件

従来型

D₂パフ量

(内側,外側)=(5.00x10²¹/s,3.75x10²¹/s)

Feパフ量

(内側,外側)=(5.00x10²¹/s,3.75x10²¹/s)

排気能力

アルベド = 0.98

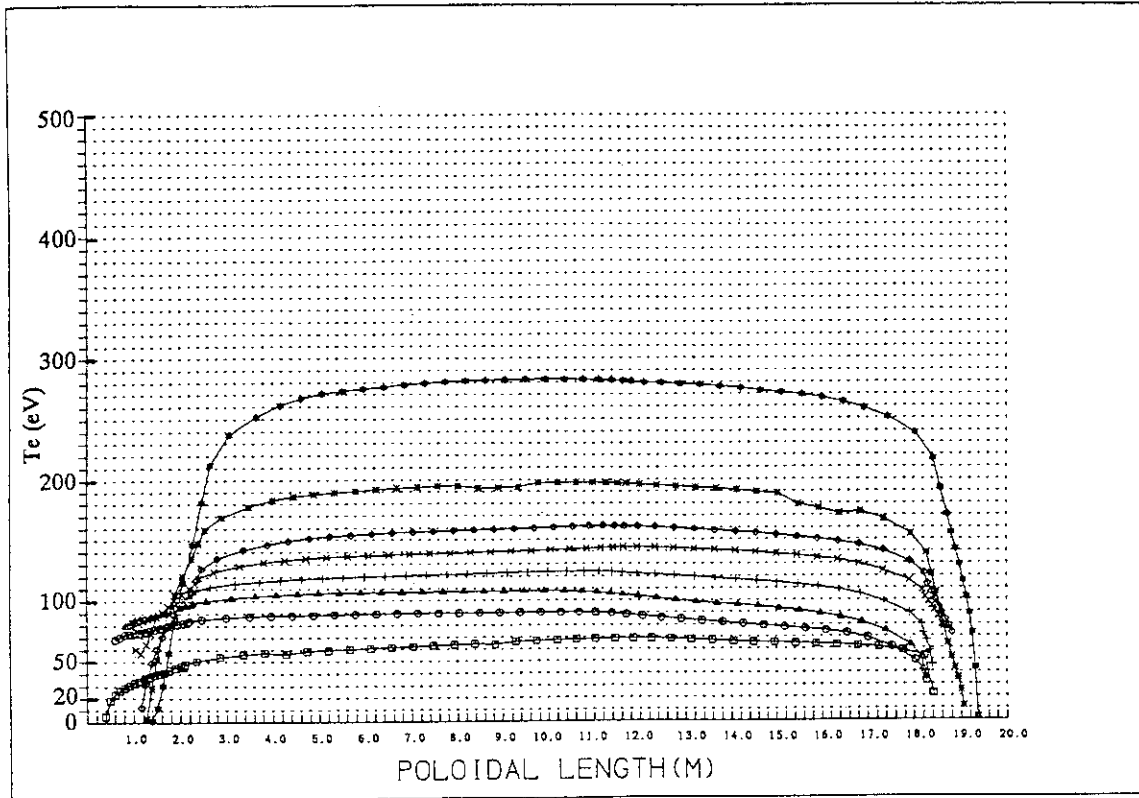


図10-(b) 電子温度分布

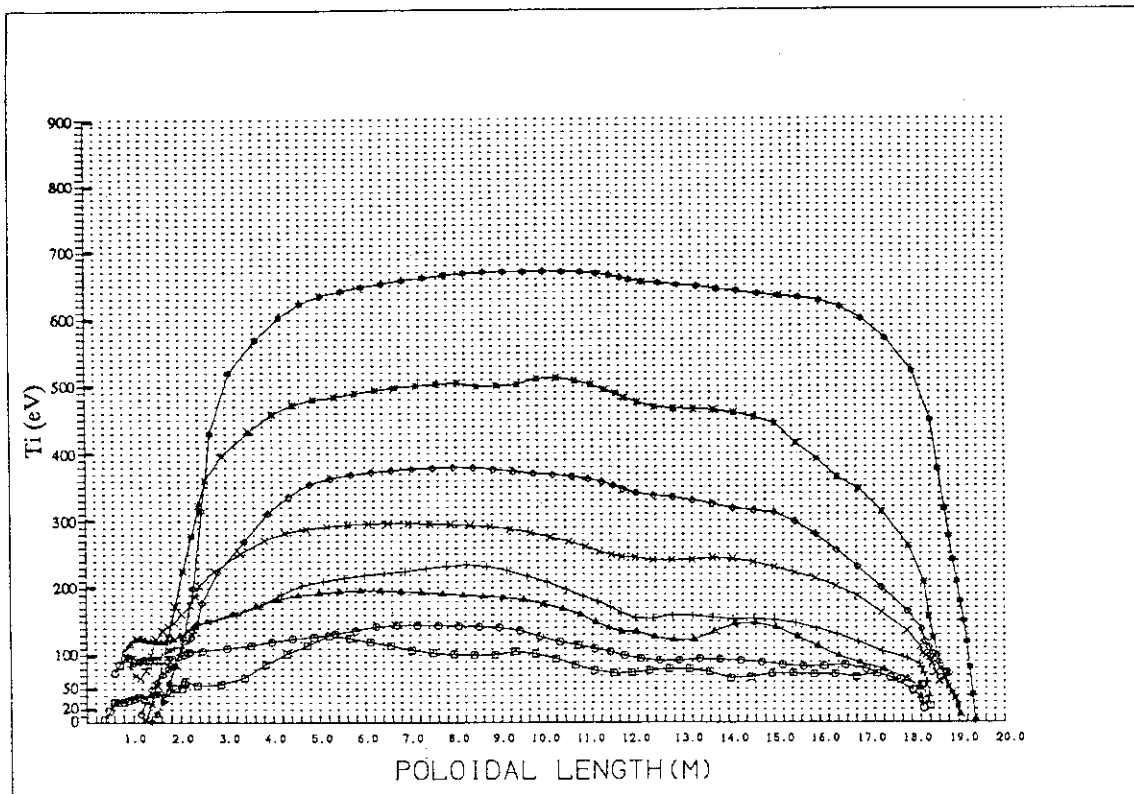


図10-(c) イオン温度分布

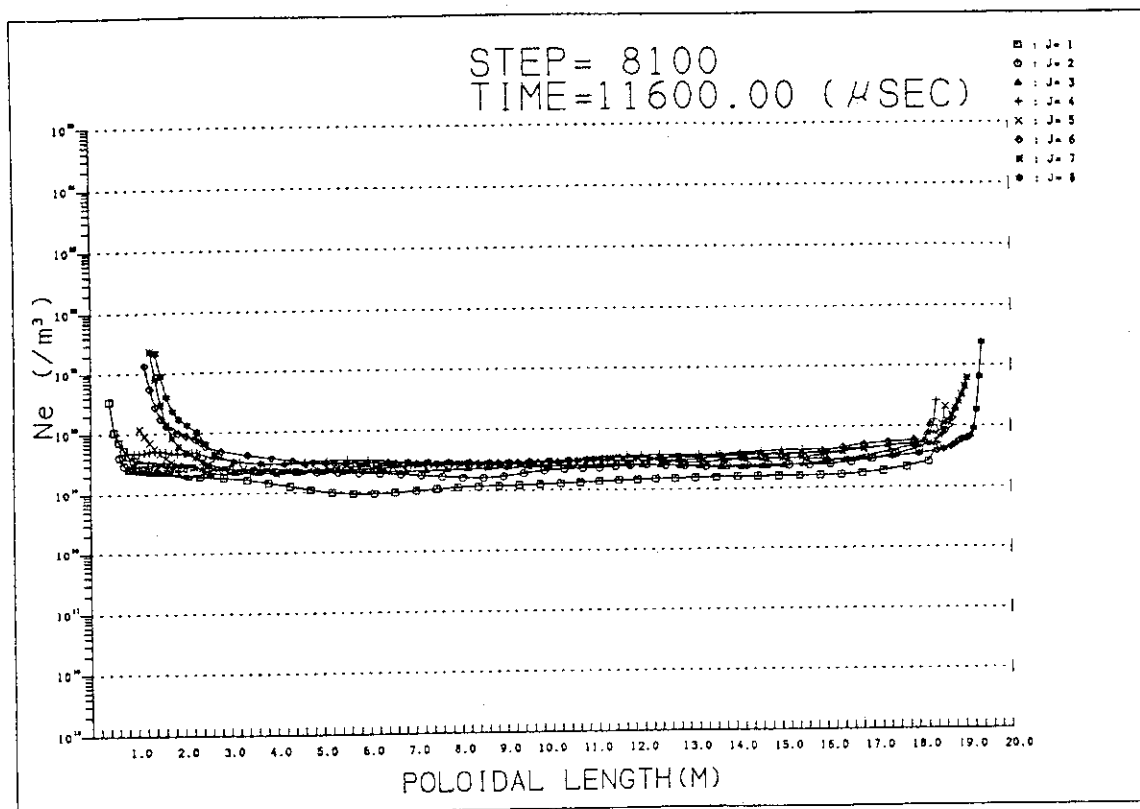


図10-(d) 電子密度分布

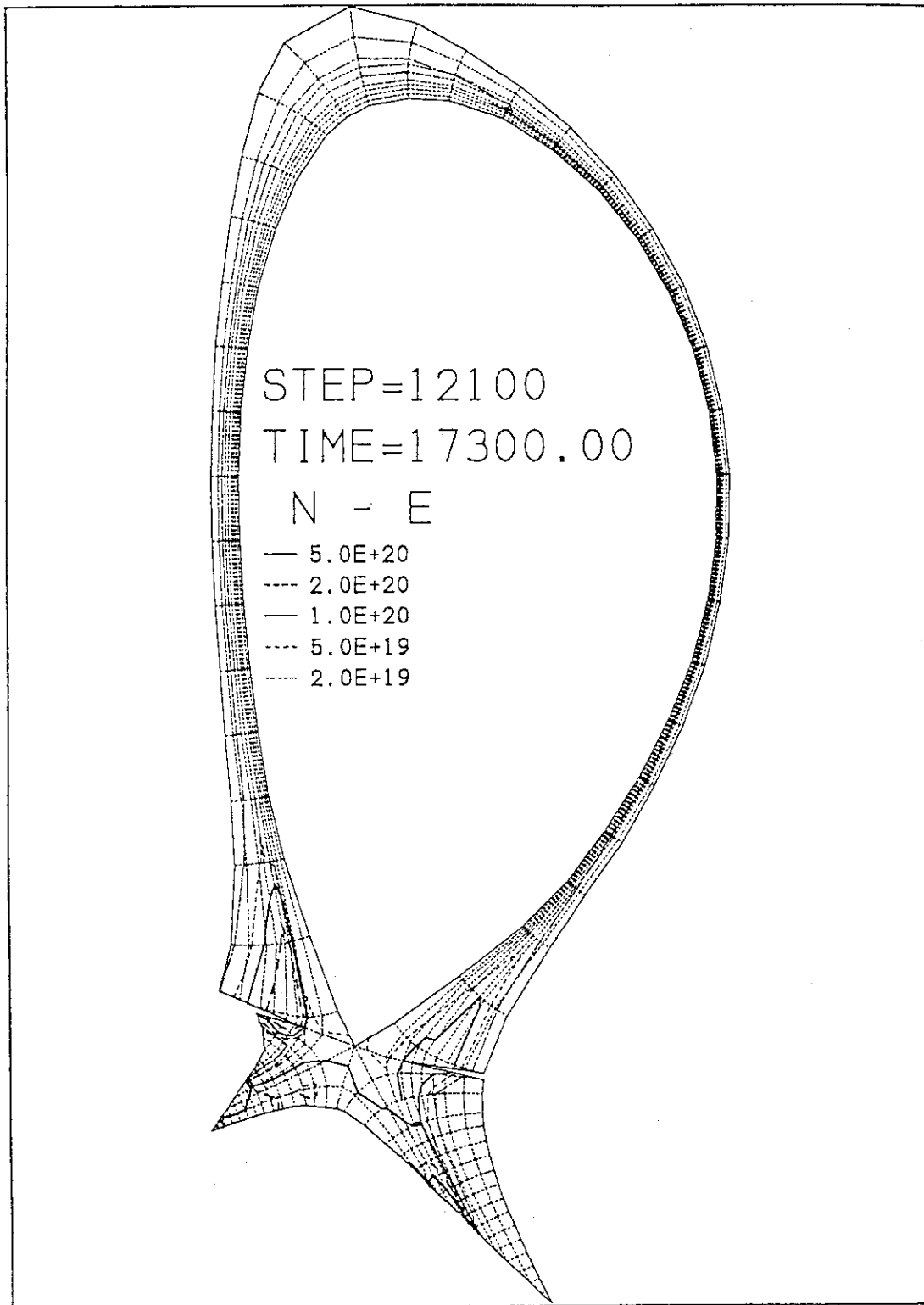


図11-(a) 電子密度分布

解析条件	
バップル型	(バップル幅:J=1-6)
D ₂ パフ量	(内側,外側)=(5.00x10 ²³ /s,3.75x10 ²³ /s)
Feパフ量	(内側,外側)=(5.00x10 ²¹ /s,3.75x10 ²¹ /s)
排気能力	アルベド = 0.98

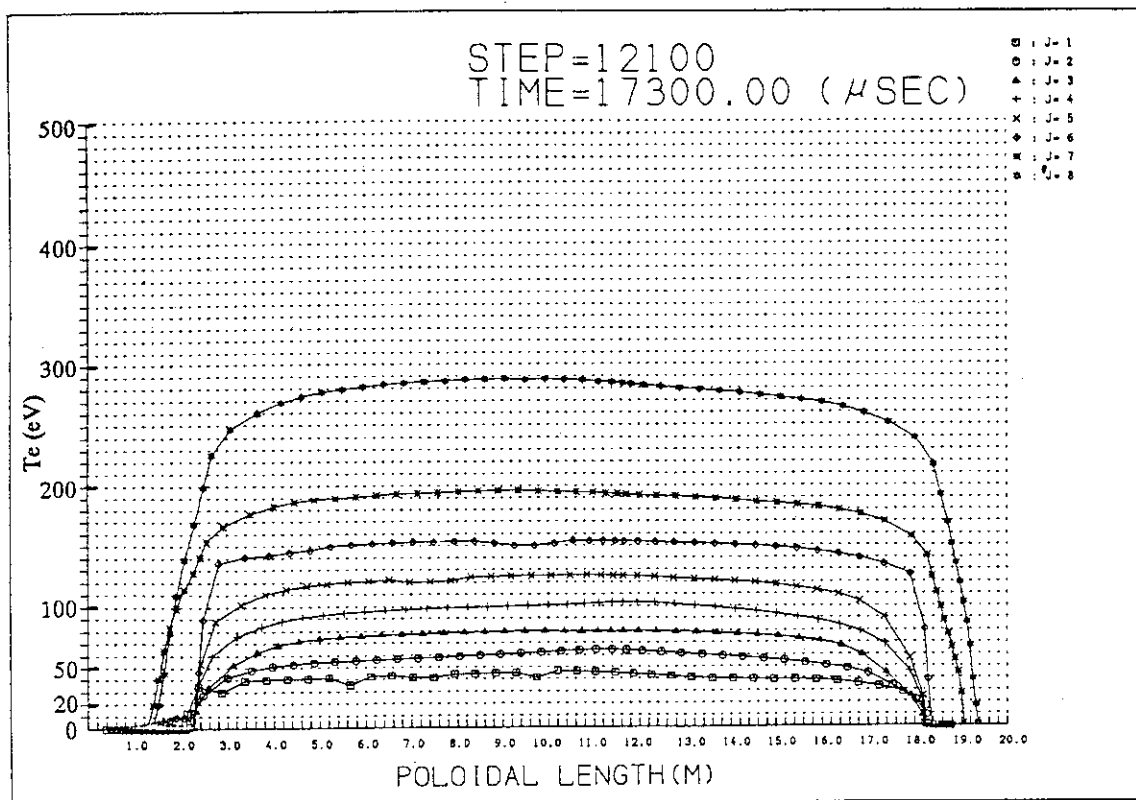


図11-(b) 電子温度分布

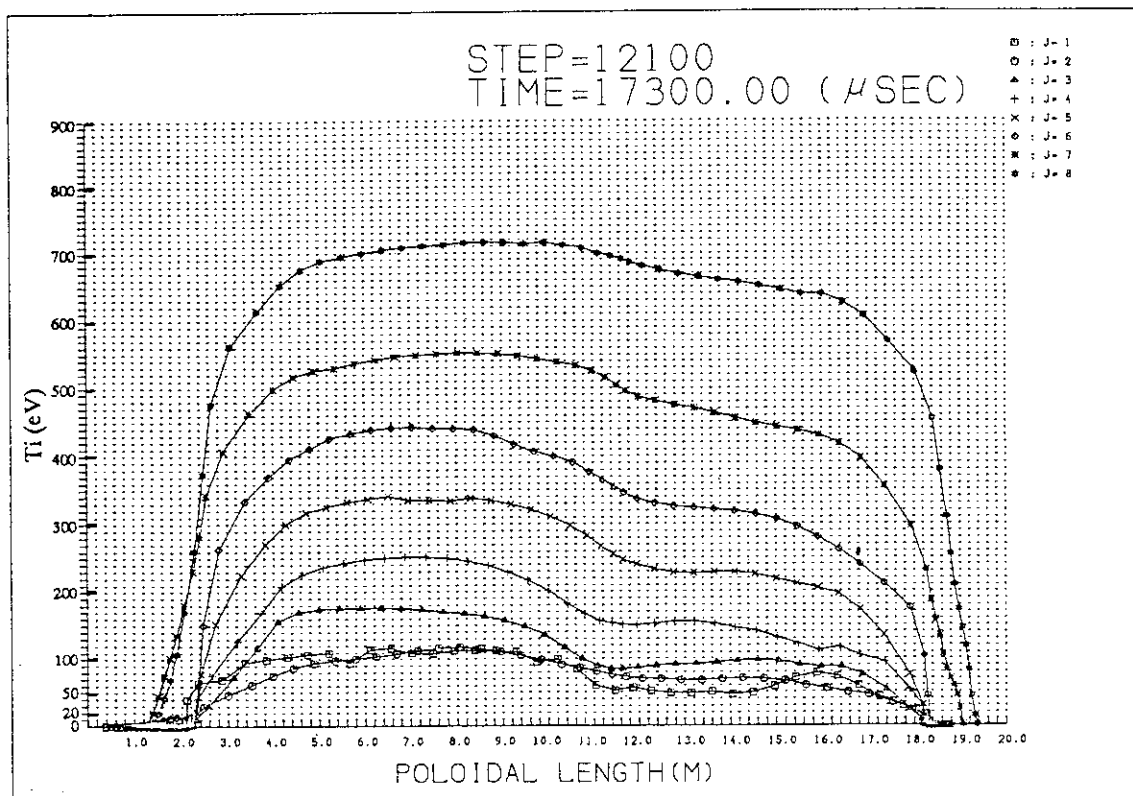


図11-(c) イオン温度分布

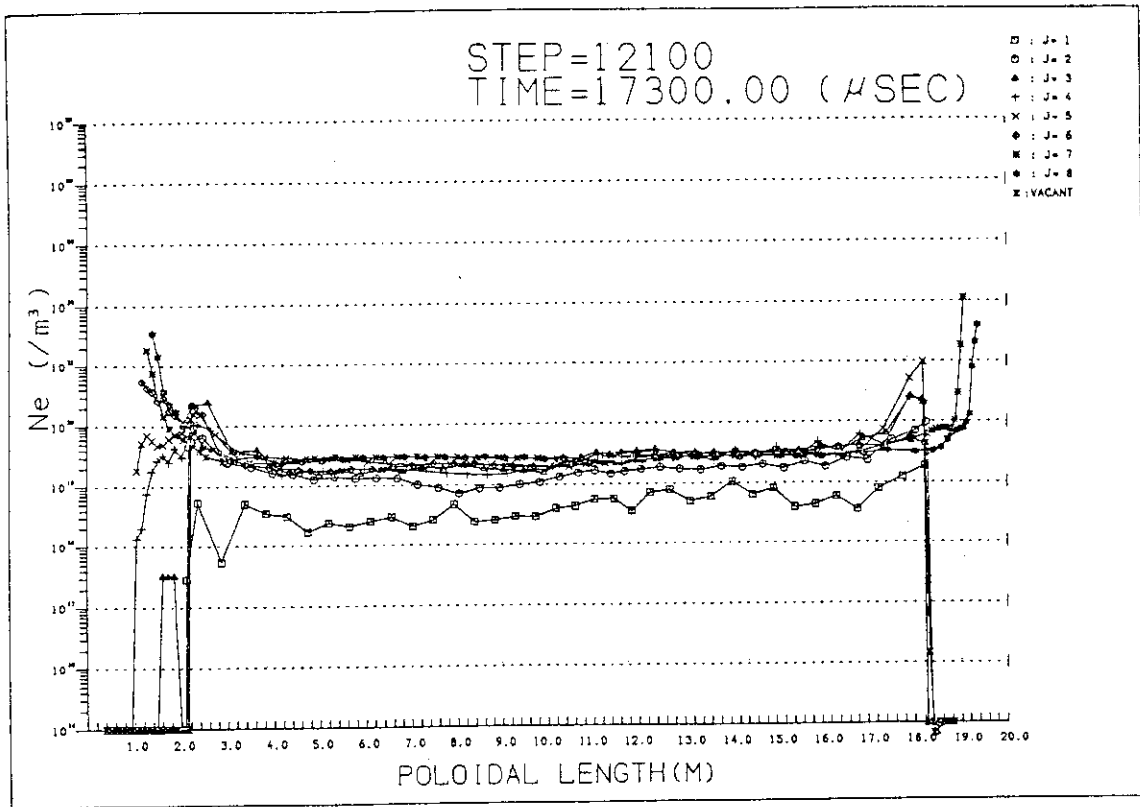


図11-(d) 電子密度分布

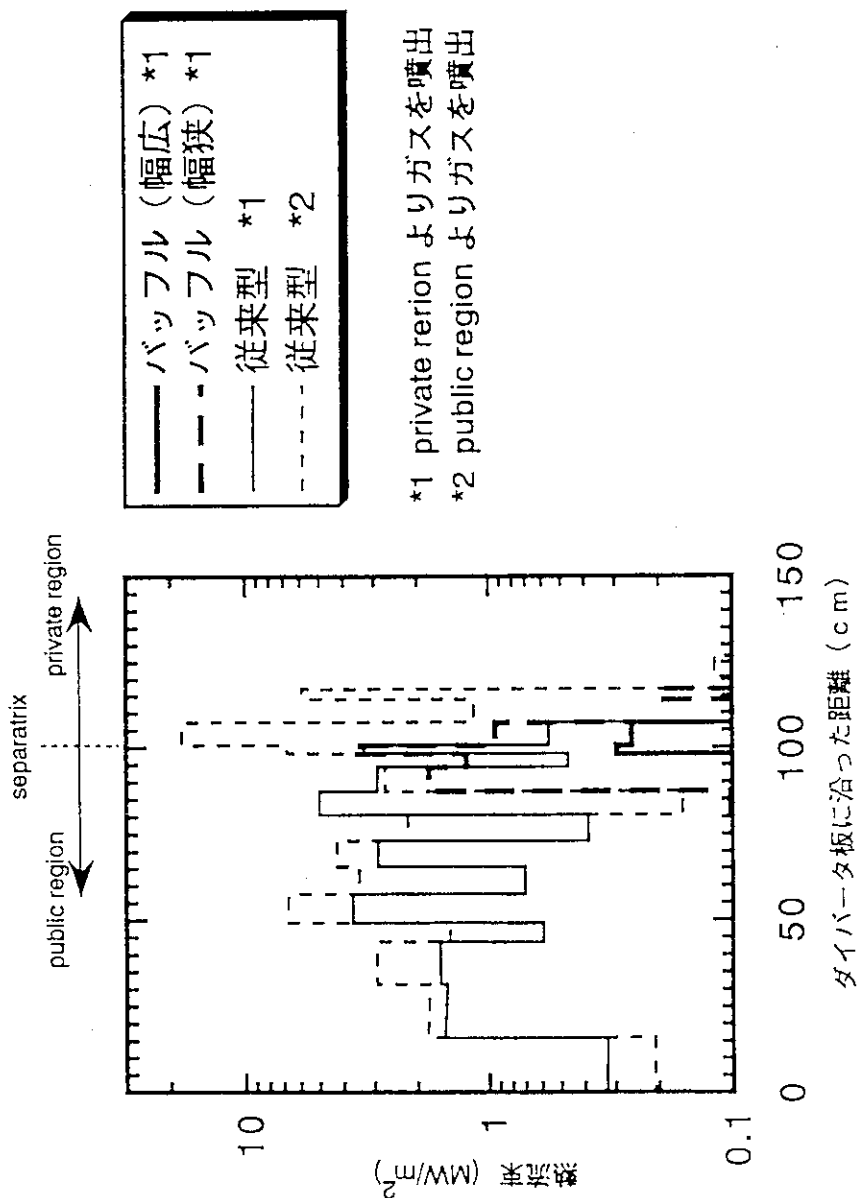


図12(a) 内側ダイバータ板の熱流束分布

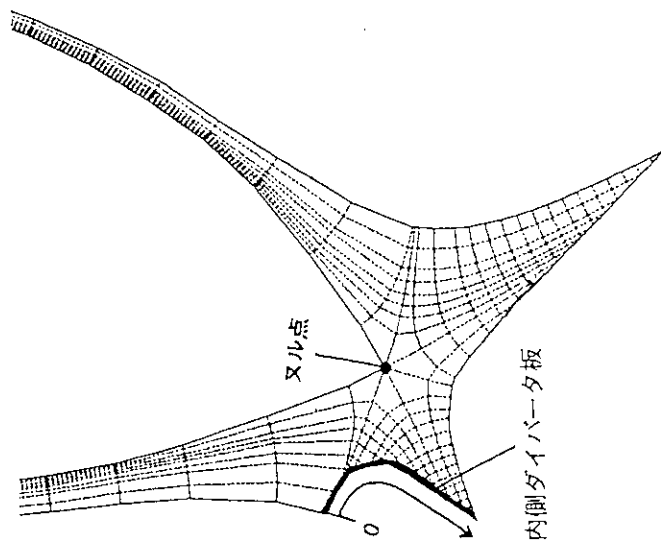


図12(b) 横軸の取り方

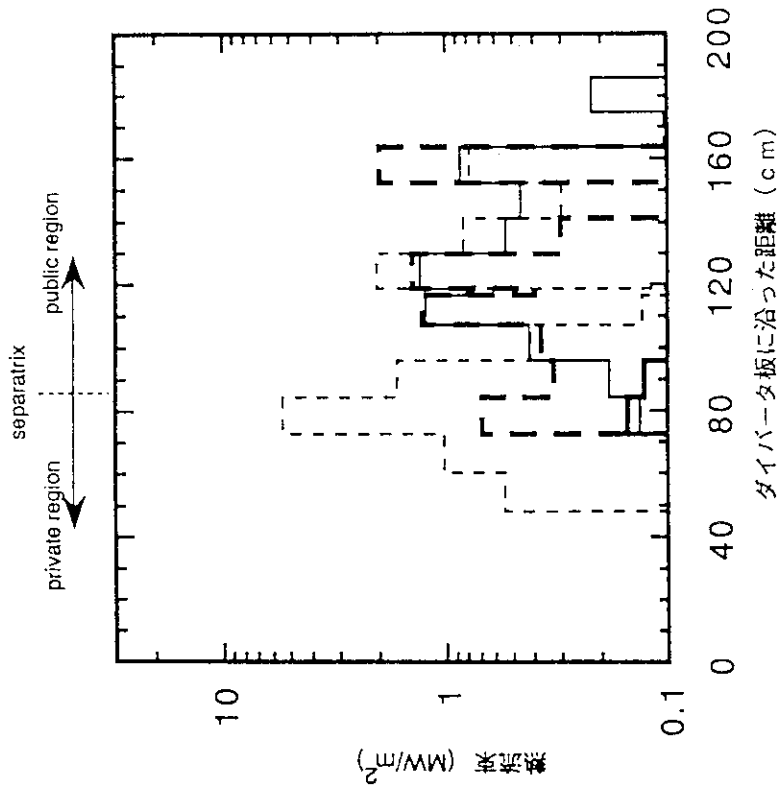


図13(a) 外側ダイバータ板の熱流束分布

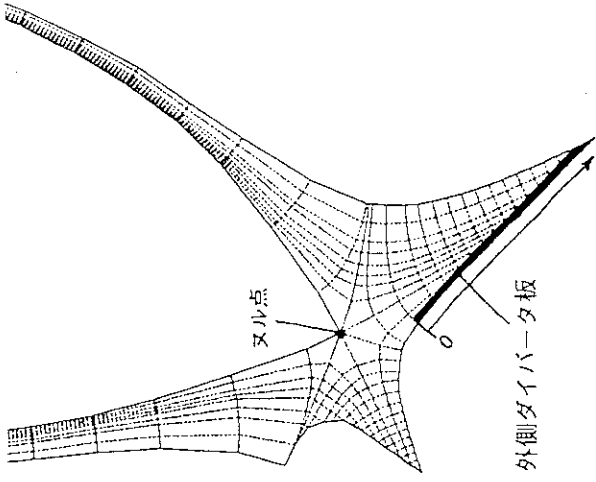
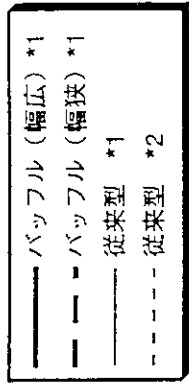


図13(b) 横軸の取り方



*1 private region よりガスを噴出

*2 public region よりガスを噴出

図13(b) 横軸の取り方

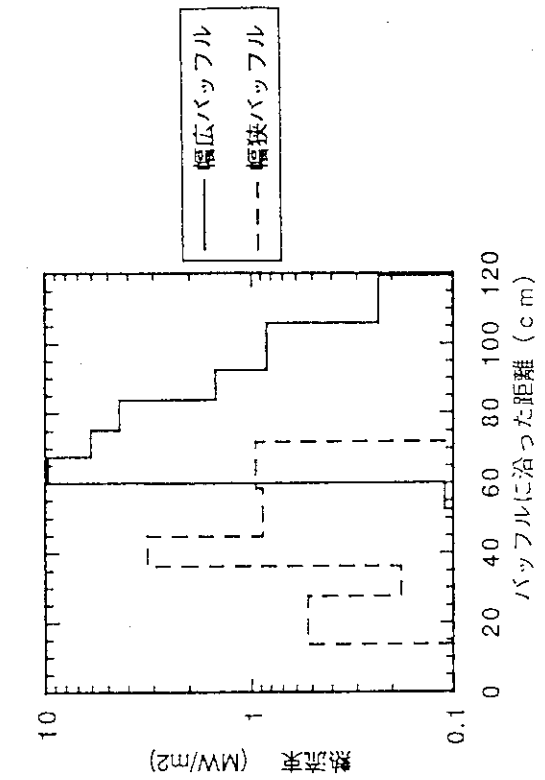


図14(a) 内側バブルの熱流束分布

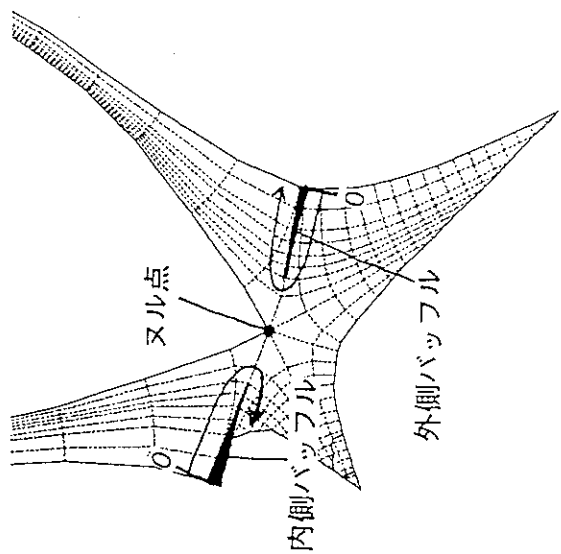


図14(b) 横軸の取り方

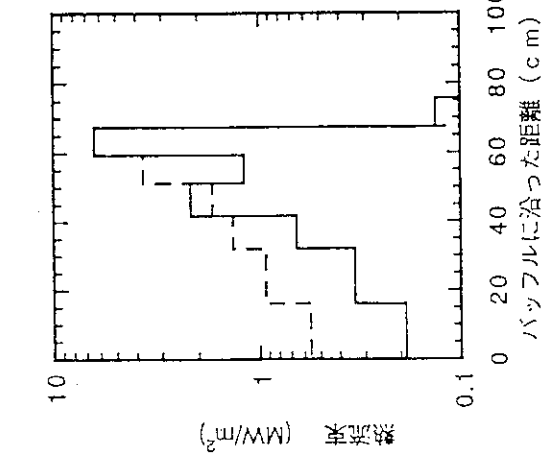


図14(c) 外側バブルの熱流束分布

4. ダイバータの特性評価

4.1 ダイバータ構造

ダイバータ性能を比較すると、ダイバータの構造毎に特性の違いが顕著にみられた。従来型のダイバータを基準にすると、バッフル型は図11(a)に示されるように、炉心プラズマ周辺 SOL に比べバッフルによって隔てられたダイバータ室内のプラズマがダイバータ室内全域にわたって低温・高密度であるためにダイバータ・プラズマの性能がよく、図12,13の熱流束分布図に示されているようにダイバータ板上の熱流束も1/10程度に低減されている。

プライベート方向ポンピング型は、APPENDIXの図 A-5(a),A-6(a)に示されるように SOL のプラズマ密度が高くなり、炉心プラズマ境界でプラズマ粒子の拡散に支障がしやすい傾向にある。

スロット型やプレナム型は、APPENDIXの図 A-7(a),A-8(a)に示されるように凹型の領域からヌル点にかけて密度が高くなる反面、排気に支障がしやすい傾向がある。

4.2 ガスパフ方法

SSTRの概念設計のガスパフ量に比べ、本研究のバッフル型ダイバータのガスパフ量は1/2になっている。しかも、ダイバータ板の熱負荷には余裕があるので更にパフ量の低減を行なうことは可能である。よって、 D_2 のガスパフは、例えばバッフル型ダイバータの様に、ダイバータ構造を改良することによってガスパフの量を軽減できる。

従来型ダイバータやプライベート方向ポンピング型ダイバータでガスの噴出口の位置を変えた場合の解析結果の比較（APPENDIXのA-1対A-2、A-6対A-6のガス噴出口の位置を変えたもの…結果は載せていないが、表A-6下に記述）から、中性ガス噴出口と真空ダクトでセパトリックスラインを挟むように配置した方がダイバータ・プラズマを冷却する効果が高いことがわかった。そのほうが、ダクトから噴出された中性粒子が排気されるまでにプラズマ粒子と相互作用する機会が多いためであると考えられる。

本研究の範囲では構造の変更によって不純物のガスパフを不要にすることはできなかった。不純物のガスパフを用いない条件でのダイバータの成立を試みたが、本研究の結果から判断すると、 D_2 ガスだけでダイバータ板周辺を十分に冷却するためにはヌル点付近や SOL は炉心プラズマ密度以上のプラズマ密度が必要になる。したがって、 D_2 ガスパフのみでのダイバータ実現は難しいと考えられる。

4.3 排気能力（アルベド）

SSTRの設計検討ではアルベド=0.96でダイバータの成立性が示されていたが、APPENDIX中の表A-3,A-4に示される本研究のバッフル型ダイバータの結果などから、アルベド=0.98でもダイバータの設計が可能であることが解かった。しかも、ダイバータ・プラズマ温度、密度の限界にまだ余裕があるのでこの値は更に大きくとることが可能である。

従来型ダイバータではダクトの下半部分付近の中性粒子密度が高いことや、従来型のダクトの取付け位置を上方に移動させたプレナム型の場合は排気量が減ることから排気の大半はダクトの下半部分のダイバータ板（構造壁）と近接した部分が支配的であると思われる。

ダイバータ板面上での荷電粒子の中性化が十分に効果をあげない（中性化されてもすぐにイオン化されて排気口付近で中性粒子が欠乏気味になる）場合、スロット（プレナム）型のようにダイバータ・プラズマの高密度化が容易に実現（APPENDIX A-7-(a),A-8-(a)参照）できても、ダイバータ・プラズマ領域で中性粒子が欠乏する（APPENDIX A-7-(d),A-8-(d)参照）様になる。このような場合、結果的に排気が困難になる傾向が見られた。

アルベド面モデルを用いるとプラズマ粒子や中性粒子の圧力がいかに低くとも一定のアルベド割合で排気が行なわれる。そのため、ほぼダイバータ成立条件を満たした従来型のダイバータにバッフル板を設置して解析を行なった場合にはバッフル板によって隔てられたガス室の粒子の密度が低くなることがあった。その結果、ガスダイバータとしての性格がなくなり、ダイバーター性能が低下した。

4.4 密度分布

ダイバータ・プラズマの冷却の上では、最も高温になりやすいヌル点から磁力線に沿ってストライク・ポイントに至る領域のプラズマ密度を高くする事が効果的であるという傾向が見られた。特にヌル点は内側ダイバータに向かうプラズマ粒子と外側ダイバータに向かうプラズマ粒子に共通の輸送経路になっているのでヌル点周辺もダイバータ・プラズマのように低温・高密度になるようにすればダイバータ・プラズマ冷却の効果が大きいと考えられる。この分布に反する解析例（APPENDIX 表A-2,図A-2）では、図14に示されるように熱負荷が突出している。

スロット（プレナム）型ダイバータは、スロット（プレナム）の密度が高くなり過ぎる傾向があるが、スロット（プレナム）型ダイバータの解析の過程で、定常になるまでのダクトからの粒子総排出量と解析領域への粒子総供給量の差が他の型のダイバータの場合に比べ格段に大きかったので～#1.スロット内部のプラズマ密度が高密度になる → #2.スロット内に中性粒子が噴出される → #3.中性粒子がイオン化される → #4.更にスロット内

部のプラズマ密度が高くなる～といった悪循環が起こっていると考えられる。スロット(プレナム)型ダイバータをSSTRのダイバータに採用するためには、プラズマ粒子の中性化を強化するための対策が必要である。

4.5 バッフルの効果

バッフル板は磁力線に対しほぼ垂直に突き出ており、しかもバッフル板自体を保護する設備はない。それにも拘わらず、図11(b),(c)に示されるようにバッフル板表面の温度が10eV以下と低く抑えられているのは、図11(a)に示されるようにバッフル板の炉心プラズマ側にはバッフル板に当たって中性化された粒子が再びイオン化され、滞留している高密度の領域が出現するためだと考えられる。

図14のバッフルの熱流束分布図を見ると傾き=一定の階段状になっていることから、バッフル板に懸かる熱流束分布は、ほぼ指数関数分布しているものと考えられる。図14の実線のグラフは図11(a)のバッフル型ダイバータ対応するのだが、外側のバッフルの幅を約半分にして解析を行なったものが図14の破線になる。この2本のグラフの比較から、バッフルの幅を狭くすればバッフルに懸かる熱流束も低減できる事が解かる。

4.6 ダイバータ構造の複合化

バッフル、スロット(プレナム)、プライベート方向ポンピングの構造を複合して用いることを考える。バッフルとプライベート方向ポンピングを複合して使えば、バッフルによって中性ガスが噴出される領域とSOLを遮断することになり、プライベート方向ポンピング型ダイバータの欠点であるSOLの高密度化を予防できると考えられる。バッフルとスロット(プレナム)を併用する場合は、両者の性質が強め合ってダイバータ・プラズマ密度が更に高くなるものと考えられる。スロット(プレナム)をプライベート方向ダイバータに設置した場合はSOLのプラズマ密度が高くなり過ぎると考えられる。

5. 結論

5.1 ダイバータ特性

(i).ダイバータ構造の適性

SSTRのダイバータに適しているのはバッフル型ダイバータである。バッフル型ダイバータの場合、図12,13のダイバータ板の熱流束分布に示されるように、ダイバータ成立条件の下で十分なダイバータ・プラズマ冷却性能を実現する。しかも、図14に示されるように、バッフルの幅を適当に選ぶことによってダイバータ板とバッフルの熱負荷の分配が可能であるので、目的に合わせたダイバータの設計が可能である。

プライベート方向ポンピング型ダイバータは、APPENDIX 図.A-5-(a),A-6-(a)に示されるように炉心プラズマ境界で密度が過大になる傾向が見られた。また、ガス標的型であるスロット型、プレナム型は、APPENDIX 図.A-7-(a),A-8-(a)に示されるようにダイバータ・プラズマの密度が高くなる半面、APPENDIX 図.A-7-(d),A-8-(d)に示されるように中性粒子が欠乏気味になり、結果的に排気に困難を生じるという傾向が見られた。どちらのダイバータ形式も、本検討条件の範囲内に限って言えば、ダイバータの成立は難しい。しかし、SOLやダイバータ・プラズマの密度が高くなること自体は、ダイバータ板の熱負荷低減の面で有利である。よって、プラズマ密度が高くなり過ぎないように設計の最適化さえ行なえば、これらようなダイバータ形式でも高性能のダイバータの成立があり得る。

(ii).ガスパフ方法

噴出口の位置は、噴出口からダクトまでの経路上にプラズマ密度の高い領域即ちセパトリックスが位置するような位置関係がよいと考えられる。その様にした方が、噴出された粒子がダクトから排出されるまでに、プラズマ冷却のための相互作用をする機会が多いと考えられるためである。

(iii).排気方法

従来のSSTRの概念設計ではアルベド=0.96であった。今回の解析で従来型はアルベド=0.98では成立せず、バッフル型ならばアルベド=0.98でもまだ余裕をのこす結果となった。このことから、バッフル型の場合は従来型に比べ排気能力が小さくすることが可能であると考えられる。

5.2 設計最適化

ガスの噴出口はSOLへの干渉を少なくするために、private region領域に配置したほうが望ましいと思われる。ガスパフを有効に利用するためには、ガスの噴出口からダクトまでの経路上にセパトリックスが位置するような配置にするべきであると考えられる。従って、ダクトはガスの噴出口とは反対側のpublic regionに設置する方が望ましいものと思われる。

SSTRのダイバータにバッフル型ダイバータを用いると仮定する。冷却材に水を用いるとするならば限界熱流束は 10MW/m^2 程度であるので、図12,13に示されるRun No. = BFLE-Wの結果ではダイバータ板への熱負荷にまだ十分な余裕がある事になる。この余裕は、更にガスパフの量を絞ったり、アルベドを絞る（大きくする）などの改善ができる事を意味するものと受け取ることができる。冷却材に固気混相強制対流を用いるとするならば、限界熱流束は $2-3\text{MW/m}^2$ となるので、Run No. = BFLE-Wの結果とほぼ同等の設計条件か、さらに少し熱流束の低減の為の努力をするだけで固気混相冷却のダイバータが実現可能になる。

今後の設計課題としては、バッフル、スロット（プレナム）、プライベート方向ポンピングの構造を複合して用いることが考えられる。バッフルとプライベート方向ポンピングを複合して使えば、バッフルによって中性ガスが噴出される領域とSOLを遮断することになり、プライベート方向ポンピング型ダイバータの欠点であるSOLの高密度化を予防できると考えられる。それによって、ダイバータ実現に道が開ける。また、バッフルとスロット（プレナム）を併用する場合は、両者の性質が強め合ってダイバータ・プラズマ密度が更に高くなるものと考えられる。

謝辞

本研究を実施するに当たり、核融合炉システム研究室、ITER開発室、川崎重工業（株）の方々から多くの有意義な助言をいただいたことに感謝します。また、三菱原子力工業（株）の鈴木 優氏、上田憲照氏の助言に対し謝意を表します。さらに、熱利用システム研究室の功刀資彰氏、炉心プラズマ第1実験室の菊池 満氏と細金隆治氏、炉心プラズマ第2実験室の嶋田道也氏と清水勝宏氏、プラズマ理論解析研究室の滝塚知典氏及び炉心プラズマ解析室の辻俊二氏には技術的に有益な議論を頂いたことに感謝いたします。

そして本研究を進めるに当たり、多くのご支援をいただいた核融合工学部 島本 進部長に深く感謝します。

参考文献

- [1] Fusion Reactor System Laboratory. :JAERI-M ,91-081
- [2] UEDA, N. , TANAKA, M. , KIKUCHI, M., SEKI, Y.:*Nucl. Fusion.* 32 (1992) 1037
- [3] A.C.Riviere. :*Nucl. Fusion.* 11 (1971) 363
- [4] JANEV, R.K. , POST, D.E. , LANGER, W.D. , EVANS, K. , HEIFETZ, D.B. , WEISHEIT, J.C. :*J.Nucl. Mater.* 121 (1984) 10
- [5] YANG, T.F. , LUAN, G.S. , BROMBERG, L. , COHN, D.R. :*Fusion Technol.* 19 (1991) 857
- [6] UEDA, N. , KASAI, M. , TANAKA, M. , SUGIHARA, M. , SENGOKU, S. :*Nucl. Fusion.* 28 (1988) 1183
- [7] SEKI, Y. , SHIMOMURA, Y. , MAKI, K. , AZUMI, M. , TAKIZUKA, T. :*Nucl. Fusion.* 20 (1980) 1213

謝辞

本研究を実施するに当たり、核融合炉システム研究室、ITER開発室、川崎重工業（株）の方々から多くの有意義な助言をいただいたことに感謝します。また、三菱原子力工業（株）の鈴木 優氏、上田憲照氏の助言に対し謝意を表します。さらに、熱利用システム研究室の功刀資彰氏、炉心プラズマ第1実験室の菊池 満氏と細金隆治氏、炉心プラズマ第2実験室の嶋田道也氏と清水勝宏氏、プラズマ理論解析研究室の滝塚知典氏及び炉心プラズマ解析室の辻俊二氏には技術的に有益な議論を頂いたことに感謝いたします。

そして本研究を進めるに当たり、多くのご支援をいただいた核融合工学部 島本 進部長に深く感謝します。

参考文献

- [1] Fusion Reactor System Laboratory. :JAERI-M ,91-081
- [2] UEDA, N. , TANAKA, M. , KIKUCHI, M., SEKI, Y.:*Nucl. Fusion.* 32 (1992) 1037
- [3] A.C.Riviere. :*Nucl. Fusion.* 11 (1971) 363
- [4] JANEV, R.K. , POST, D.E. , LANGER, W.D. , EVANS, K. , HEIFETZ, D.B. , WEISHEIT, J.C. :*J.Nucl. Mater.* 121 (1984) 10
- [5] YANG, T.F. , LUAN, G.S. , BROMBERG, L. , COHN, D.R. :*Fusion Technol.* 19 (1991) 857
- [6] UEDA, N. , KASAI, M. , TANAKA, M. , SUGIHARA, M. , SENGOKU, S. :*Nucl. Fusion.* 28 (1988) 1183
- [7] SEKI, Y. , SHIMOMURA, Y. , MAKI, K. , AZUMI, M. , TAKIZUKA, T. :*Nucl. Fusion.* 20 (1980) 1213

APPENDIX 各計算ケースの結果概要

このAPPENDIXにおいては、検討の対象としたダイバータ構造の各計算ケースについての結果概要を表 A-1から表A-8にしめすとともに各ケースのプロッター出力結果を示す。

表 A-1

Run No.	NORM-L
ダイバータ構造	従来型
ガスパフ方法	private region 領域よりガスを噴出 D_2 パフ量 (内側,外側)=($2\Gamma, 1.5\Gamma$) Fe^+ パフ量 (内側,外側)=($0.02\Gamma, 0.015\Gamma$) $\Gamma=2.5 \times 10^{23}$ (molecules/sec)
アルベド	0.98
プラズマ断面分布図	図 A-1
熱流束分布図	図12,13
結果	<p style="text-align: center;">ダイバータ性能</p> <p>ダイバータ板表面のプラズマ温度 20eV以上 ダイバータ板の熱負荷 5MW/m²以下</p> <p style="text-align: center;">詳細</p> <p>ダイバータ板表面上のプラズマ温度は一部の領域で20eVを上回り、ダイバータの健全性を損なう結果となった。 炉心プラズマ境界上のプラズマ密度はダイバータ・プラズマの成立条件を満たしている。 熱流束分布は、内側ダイバータ板で5MW/m²程度で、外側ダイバータ板では2MW/m²の熱流束が広範囲に懸かる結果になった。</p>

Comment.

ダイバータ板表面上のプラズマ温度が20eVを超えているが、ガスの噴出量分布を調整することによってダイバータの成立は可能である。

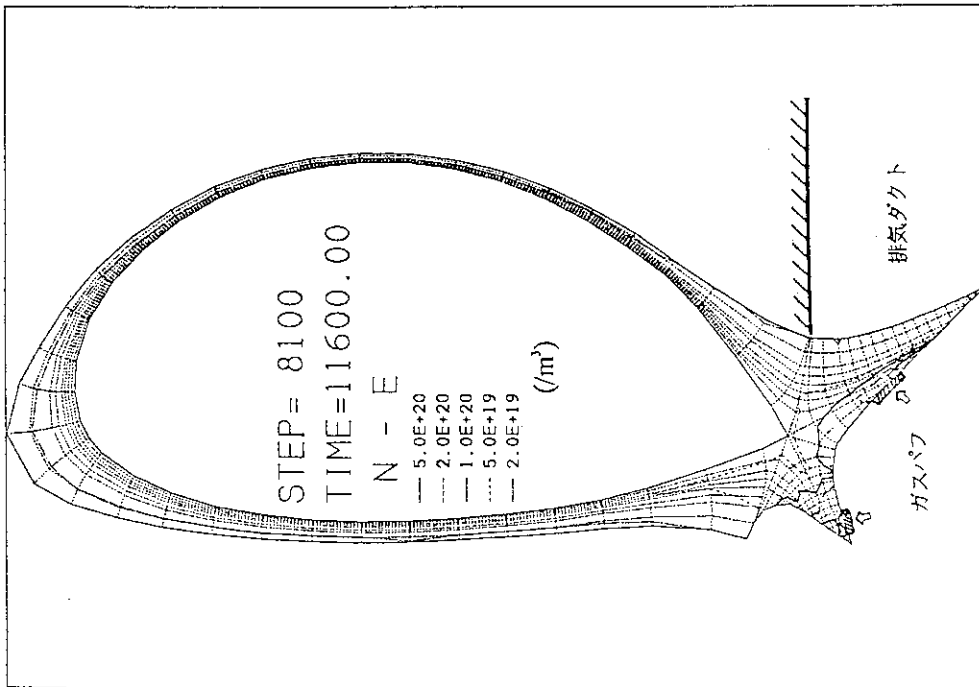


図. A-1-(a) 電子密度分布

解析条件 セパラトリックス下側領域よりパフ
従来型 排気能力
 D_2 パフ量 (内側, 外側)=($5.00 \times 10^9/s, 3.75 \times 10^9/s$)
Feパフ量 (内側, 外側)=($5.00 \times 10^9/s, 3.75 \times 10^9/s$)
排気能力 アルベド = 0.98

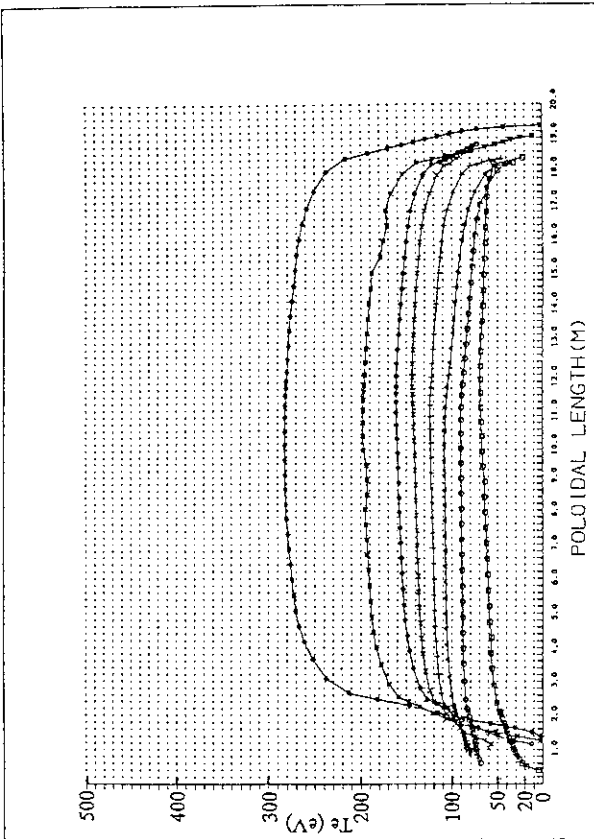


図. A-1-(b) 電子温度分布

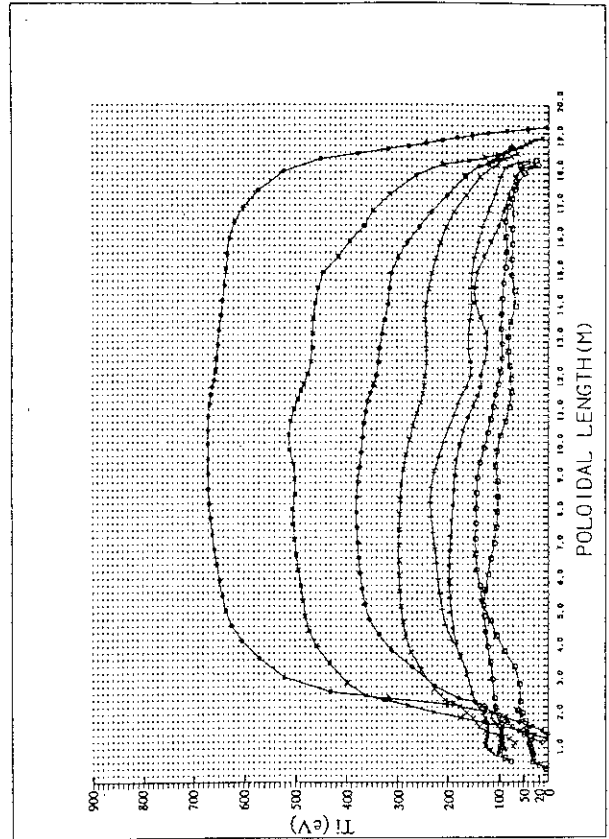


図. A-1-(c) イオン温度分布

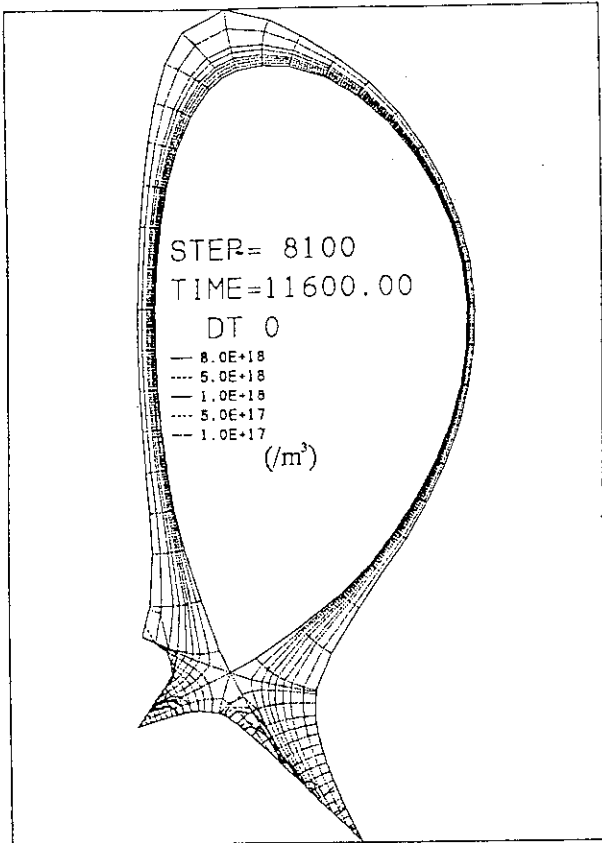


図. A-1-(d)中性粒子密度分布

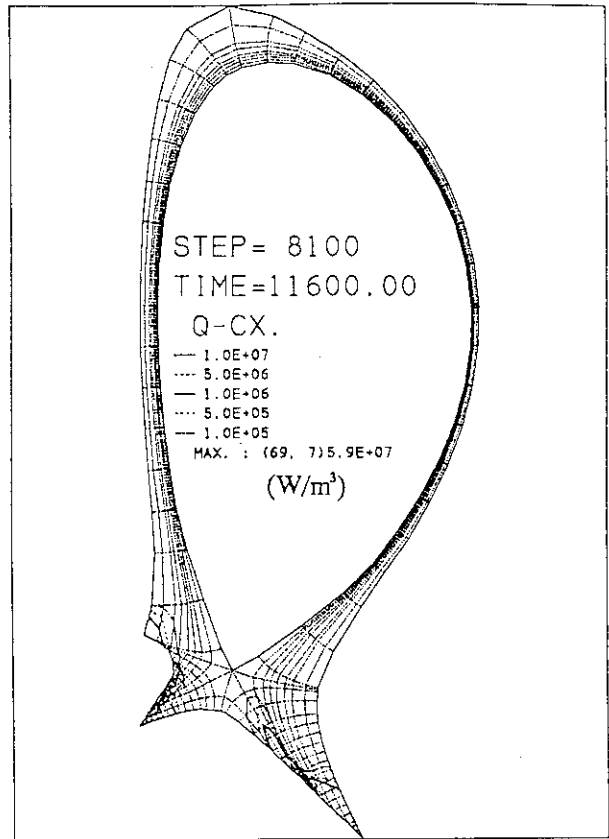


図. A-1-(e)荷電交換損失

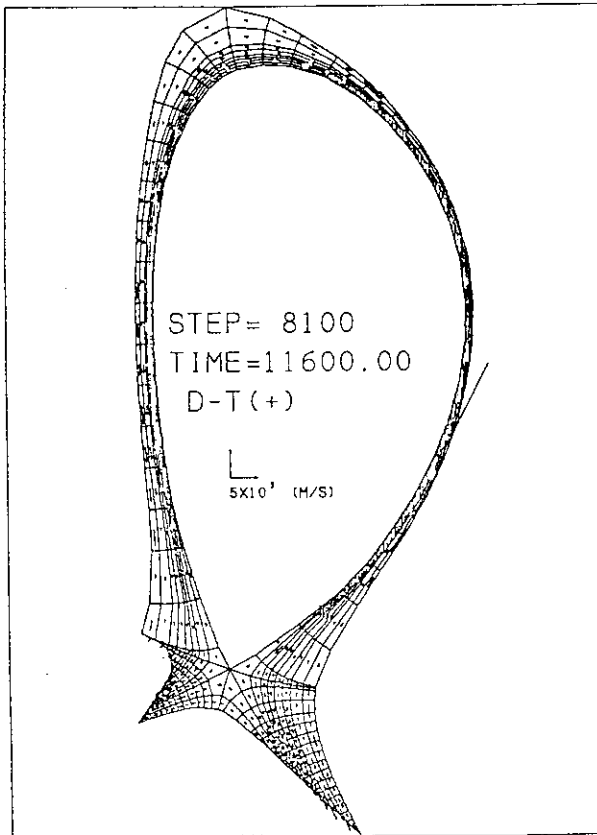


図. A-1-(f)D-T速度分布

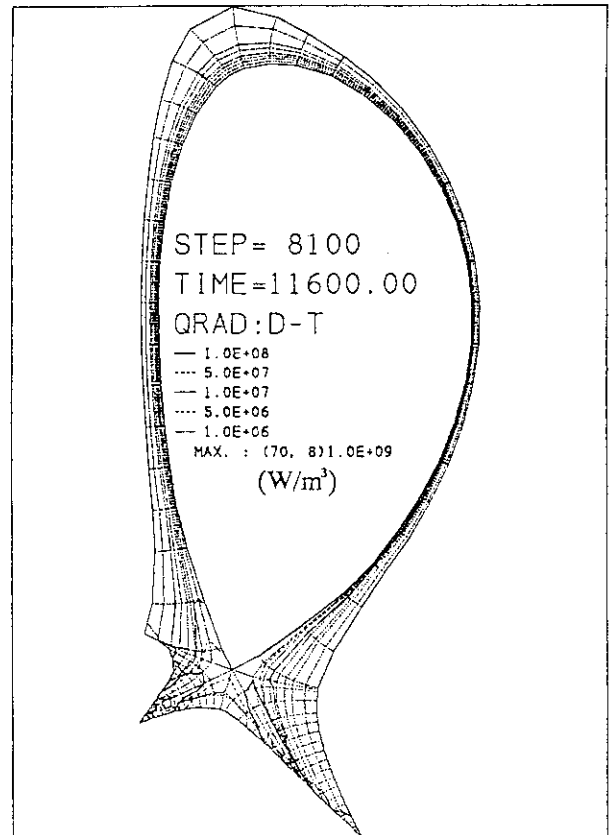


図. A-1-(g)放射損失

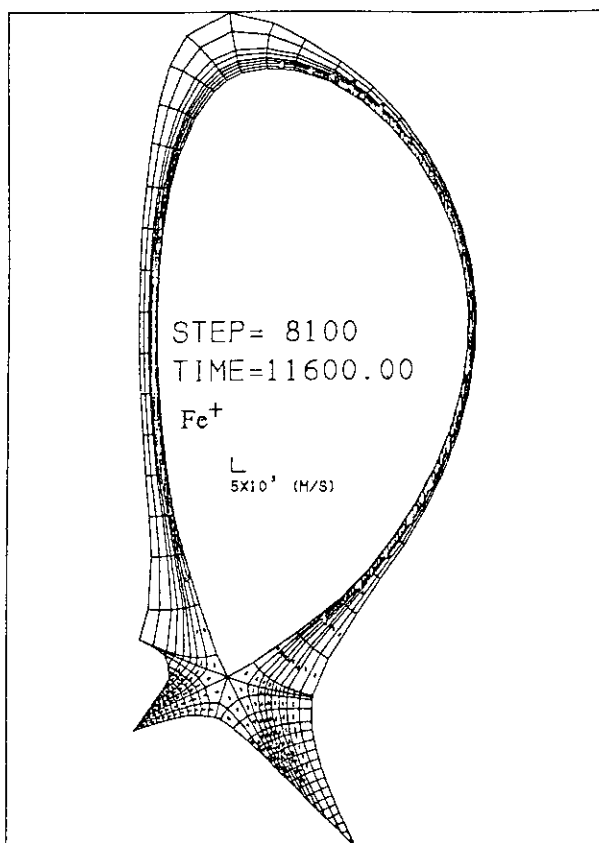


図. A-1-(h) Fe⁺速度分布

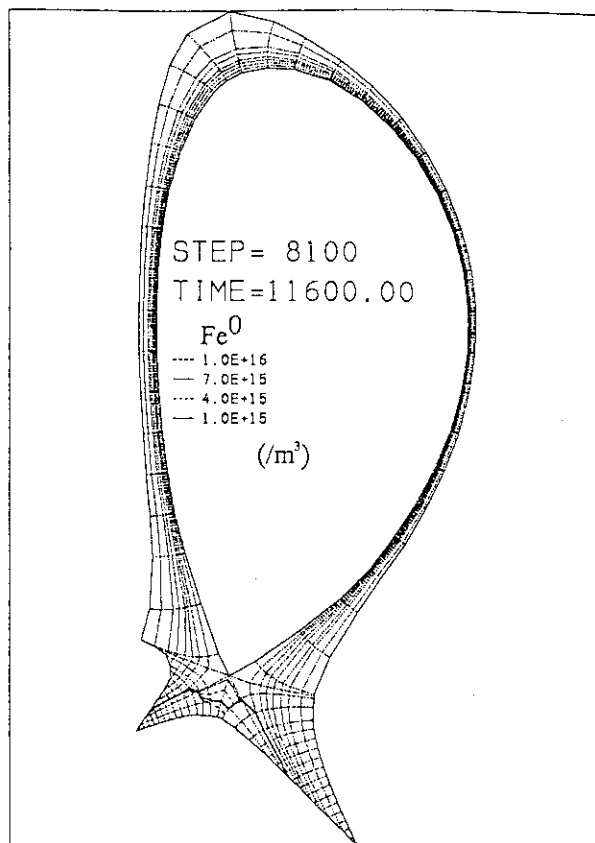


図. A-1-(i) Fe⁰密度分布

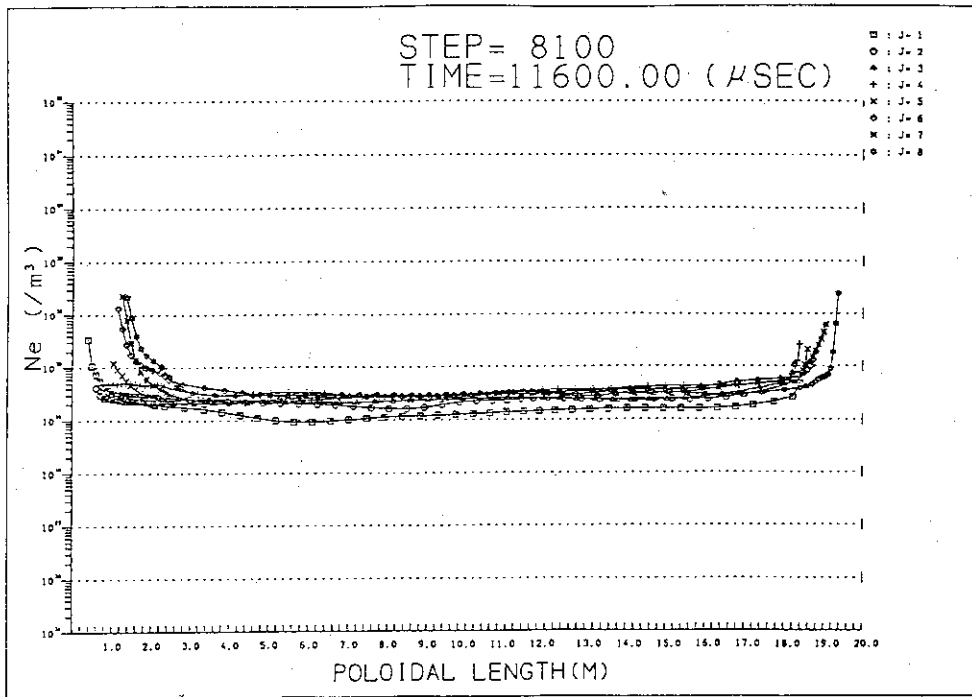


図. A-1-(j) 電子密度分布

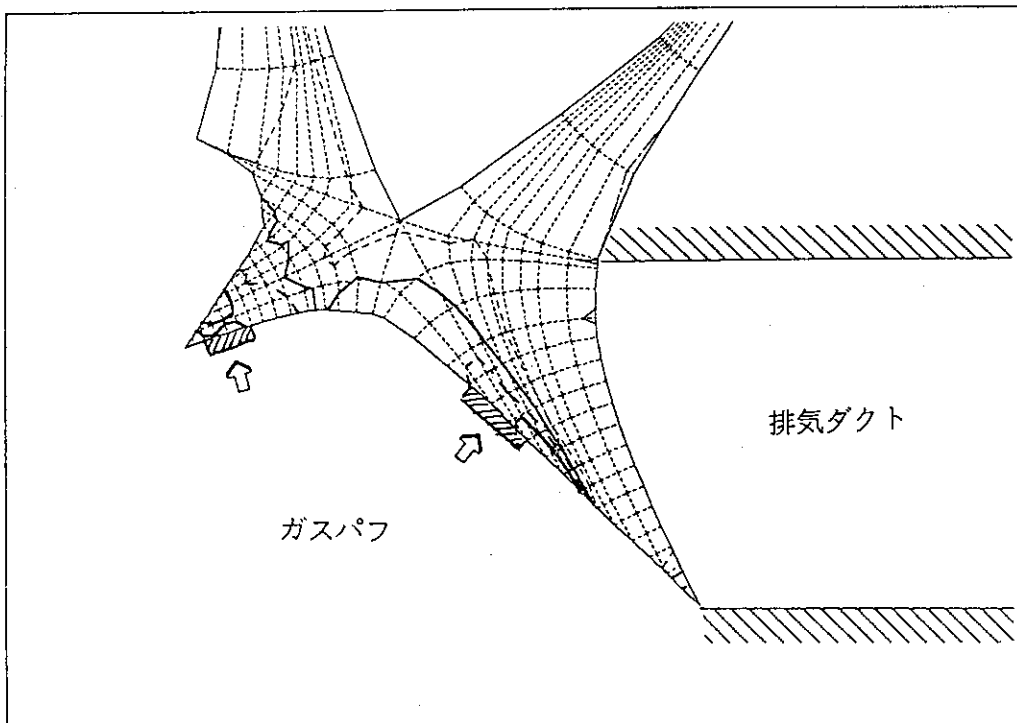


図. A-1-(k) ダイバータ部分拡大図

表 A-2

Run No.	NORM-U
ダイバータ構造	従来型
ガスパフ方法	public region 領域よりガスを噴出 D ₂ パフ量 (内側,外側)=(4Γ,3Γ) Fe ⁺ パフ量 (内側,外側)=(0.04Γ,0.03Γ) Γ=2.5×10 ²³ (molecules/sec)
アルベド	0.96
プラズマ断面分布図	図 A-2
熱流束分布図	図12,13
結果	<p style="text-align: center;">ダイバータ性能</p> <p>ダイバータ板表面のプラズマ温度 20eV以上 ダイバータ板の熱負荷 20MW/m²以下</p> <p style="text-align: center;">詳細</p> <p>炉心プラズマ境界付近のダイバータ・プラズマ密度が低くなっているのに対応して、ストライク・ポイント付近でダイバータ表面のプラズマ温度が非常に高くなる。</p> <p>外側ダイバータのガスパフは、セパトリックス付近ではほとんど効いておらずセパトリックス付近のプラズマ密度は低い。外側ダイバータ板のセパトリックス付近でダイバータ・プラズマは低温・高密度が達成されないために熱流束分布も内側ダイバータ板のピークで20MW/m²程度、外側ダイバータ板のピークでも6MW/m²程度となった。その為、熱流束の面でもダイバータが成立しないことを示す結果となった。</p> <p>外側のガスパフはダクトの方に流されている傾向が見られる。そのため、中性ガスは噴出されてもプラズマと相互作用しないうちにダクトに吸い込まれる傾向がある。</p>

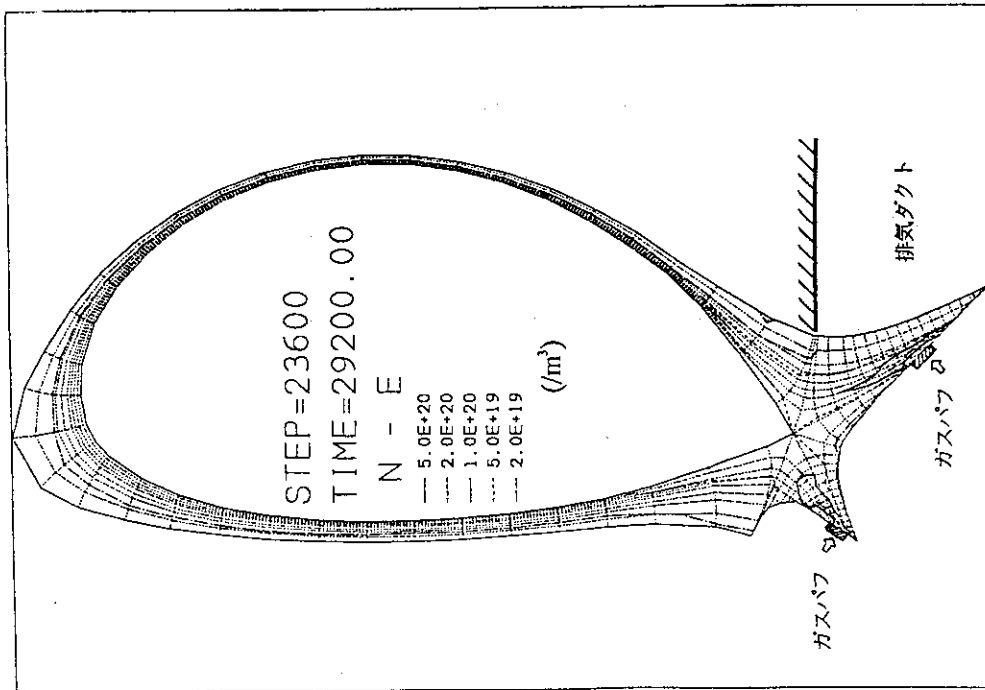


図. A-2-(a) 電子密度分布

解析条件 センバトロトリックス上側領域よりバワ
従来型 D_2 バワ量 (内側,外側)=(10.0×10^{20} /s, 7.50×10^{20} /s)
 Fe バワ量 (内側,外側)=(10.0×10^{20} /s, 7.50×10^{20} /s)
排気能力 アルベド = 0.96

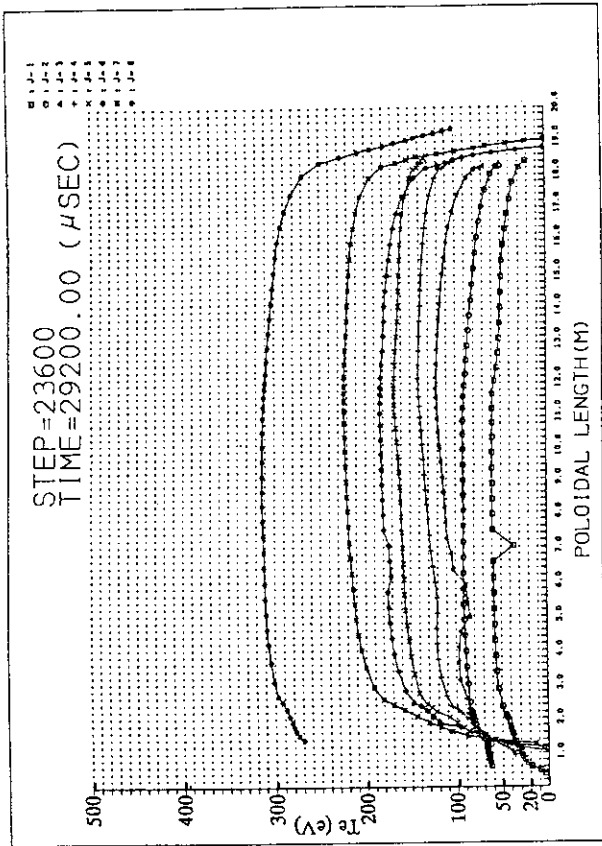


図. A-2-(b) 電子温度分布

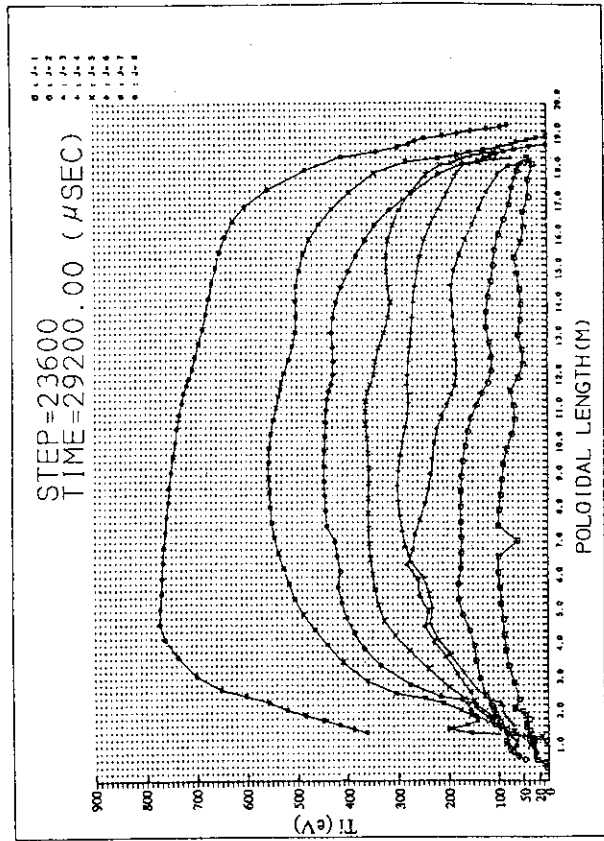


図. A-2-(c) イオン温度分布

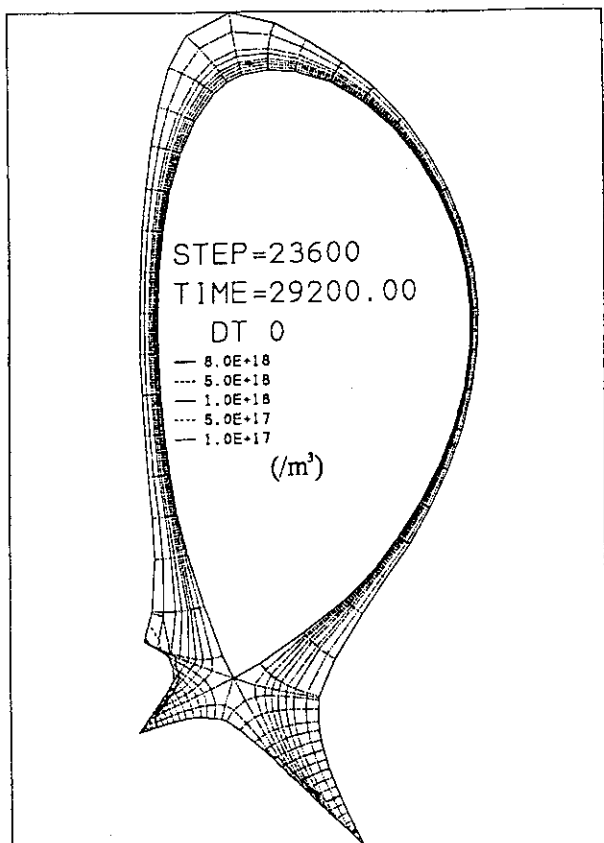


図. A-2-(d)中性粒子密度分布

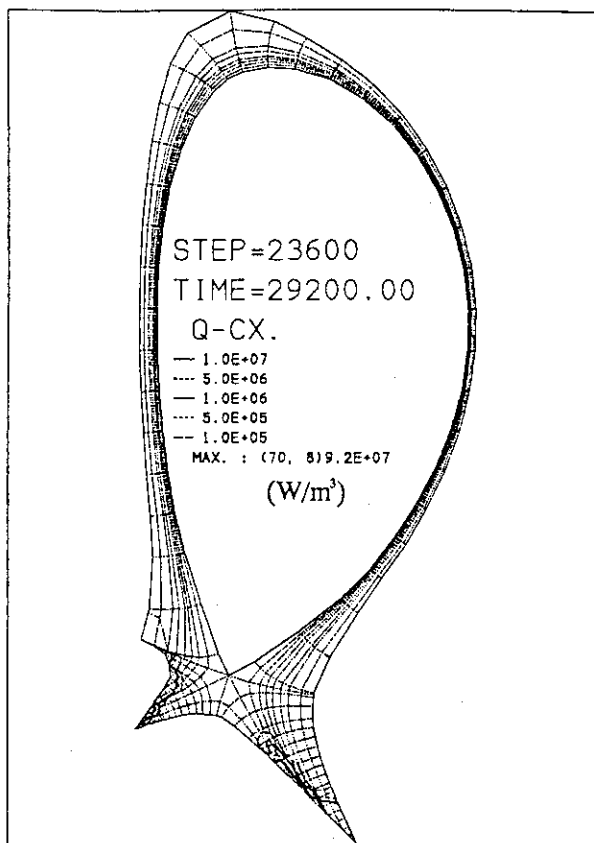


図. A-2-(e)荷電交換損失

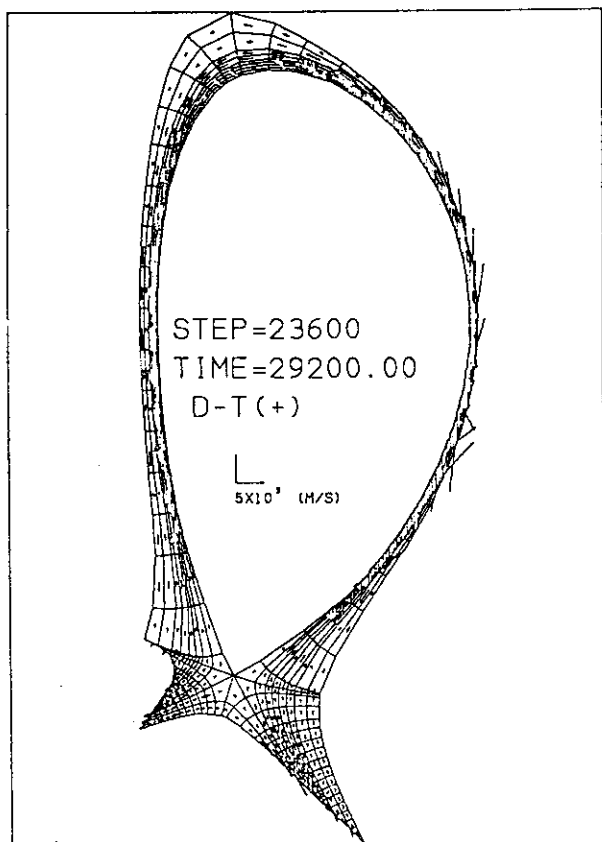


図. A-2-(f) D-T速度分布

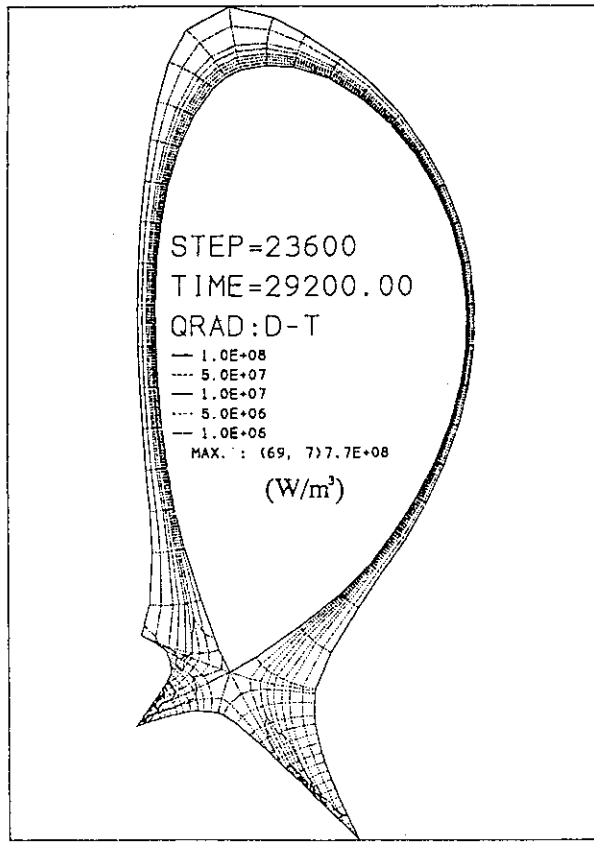


図. A-2-(g)放射損失

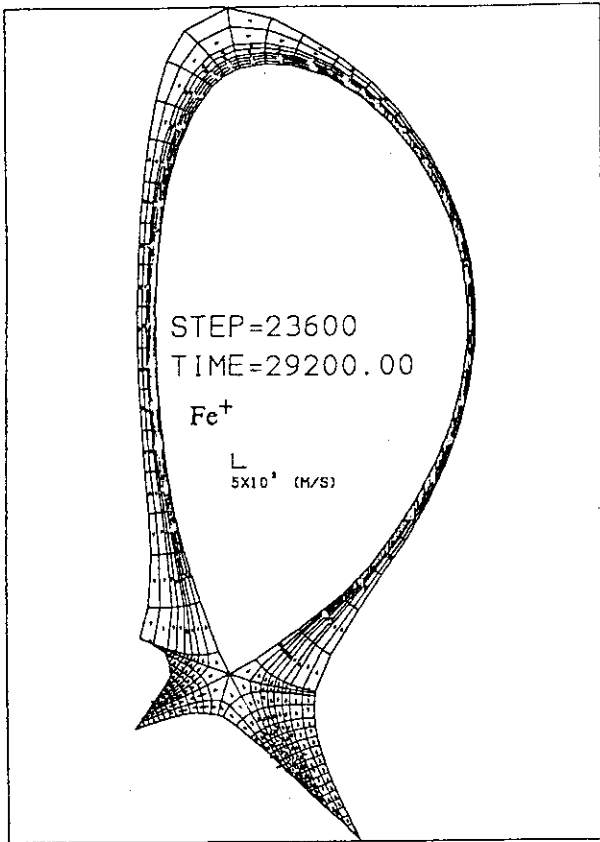


図. A-2-(h) Fe^+ 速度分布

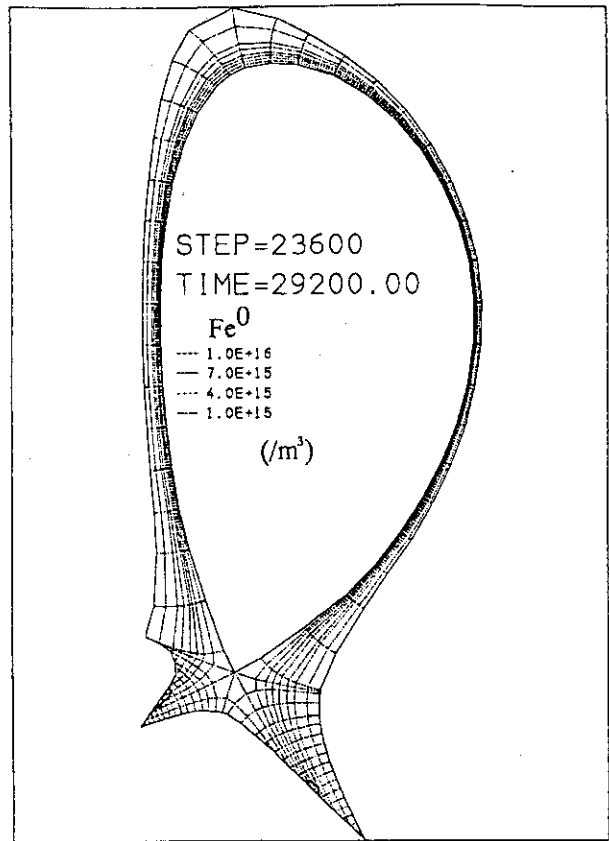


図. A-2-(i) Fe^0 密度分布

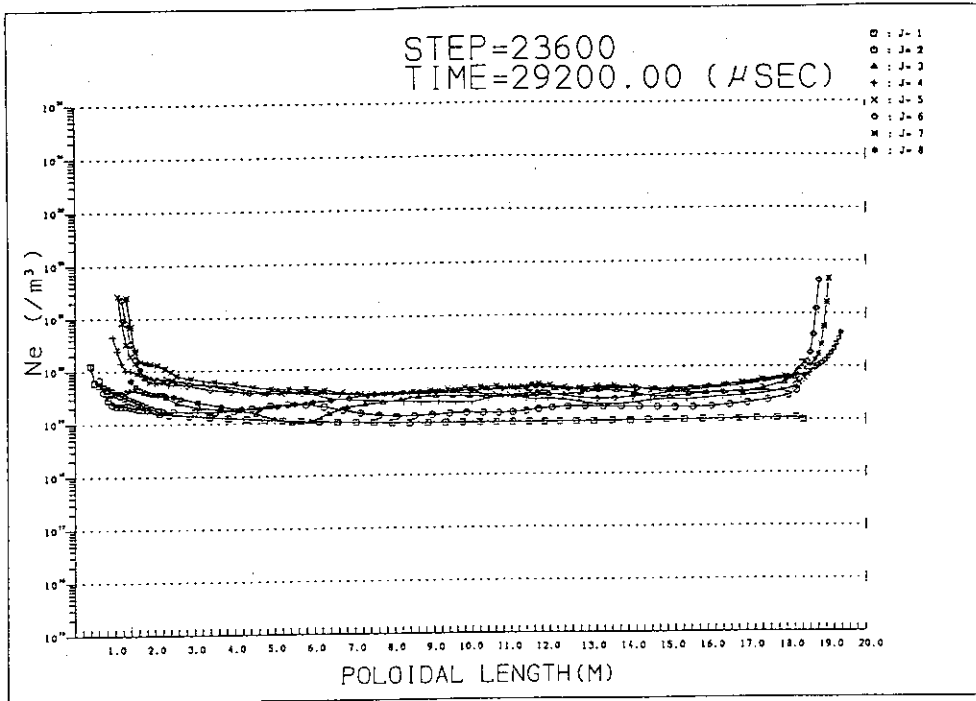


図. A-2-(j) 電子密度分布

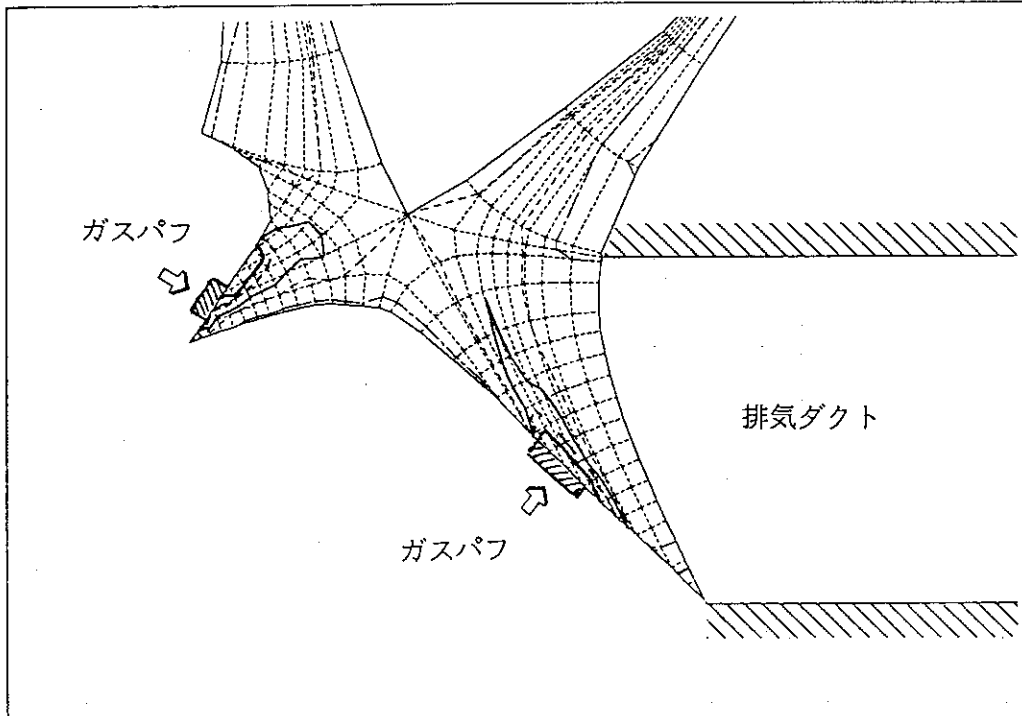


図. A-2-(k) ダイバータ部分拡大図

表 A-3

Run No.	BFLB-W
ダイバータ構造	バッフル型 (幅広バッフル,内側外側ともに6セグメント)
ガスパフ方法	private region 領域よりガスを噴出 D ₂ パフ量 (内側,外側)=(2Γ,1.5Γ) Fe ⁺ パフ量 (内側,外側)=(0.02Γ,0.015Γ) Γ=2.5×10 ²³ (molecules/sec)
アルベド	0.98
プラズマ断面分布図	図 A-3
熱流束分布図	図12,13,14
結果	<p style="text-align: center;">ダイバータ性能</p> <p>ダイバータ板表面のプラズマ温度 10eV以下 ダイバータ板の熱負荷 0.3MW/m²以下 バッフル表面のプラズマ温度 10eV以下 バッフルに懸かる熱流束 10MW/m²以下</p> <p style="text-align: center;">詳細</p> <p>ダイバータ板表面上でのプラズマ温度は10eV以下であるので、エロージョンの問題はない。バッフル板表面上でのプラズマ温度も10eV以下に抑えられているのでエロージョンによる問題は発生しない。</p> <p>ダイバータ板の熱負荷は0.3MW/m²以下と熱流束は極端に小さい。バッフル表面に懸かる熱流束は、プラズマ対向面 (上面) での最高熱流束が10MW/m²未満、ダイバータ対向面 (下面) での最高熱流束が0.2MW/m²未満であった。限界熱流束を超えることはなかったが、余裕は少ない。</p> <p>バッフルの設置によって、バッフルのプラズマ対向面側のSOLにはプラズマ密度が高い領域ができた。同じ領域で中性粒子密度も高くなっている。密度分布に対応して、荷電交換反応や放射損失のエネルギー分布が高い領域ができた。このプラズマ粒子密度、中性粒子密度が高い領域は炉心プラズマを避けるように分布しているため、炉心プラズマ境界におけるプラズマ密度は十分に低く維持され、炉心プラズマからSOLへのプラズマ粒子の拡散に障害を及ぼすことはない。</p>

Comment: アルベド=0.96とした場合は、ダイバータ・プラズマ密度が低くなり過ぎた。

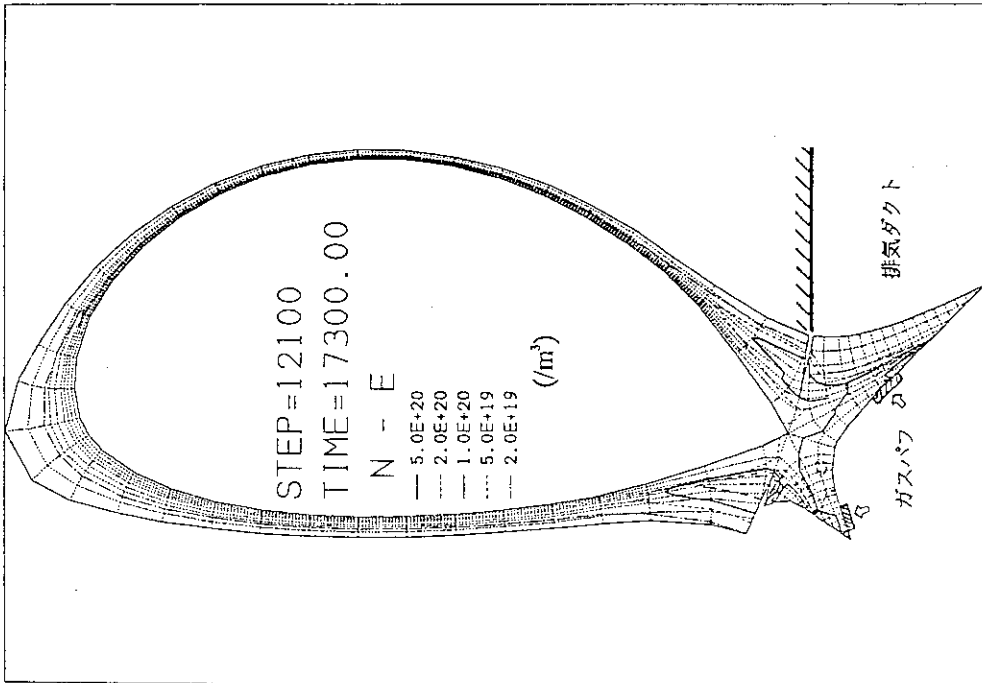


図. A-3-(a) 電子密度分布

解析条件
バップル型
 D_2 バフ量
Fバフ量
排気能力
(バップル幅: $\Gamma=1-6$)
(内側, 外側) = $(5.00 \times 10^{21} / s, 3.75 \times 10^{21} / s)$
(内側, 外側) = $(5.00 \times 10^{21} / s, 3.75 \times 10^{21} / s)$
アルベド = 0.98

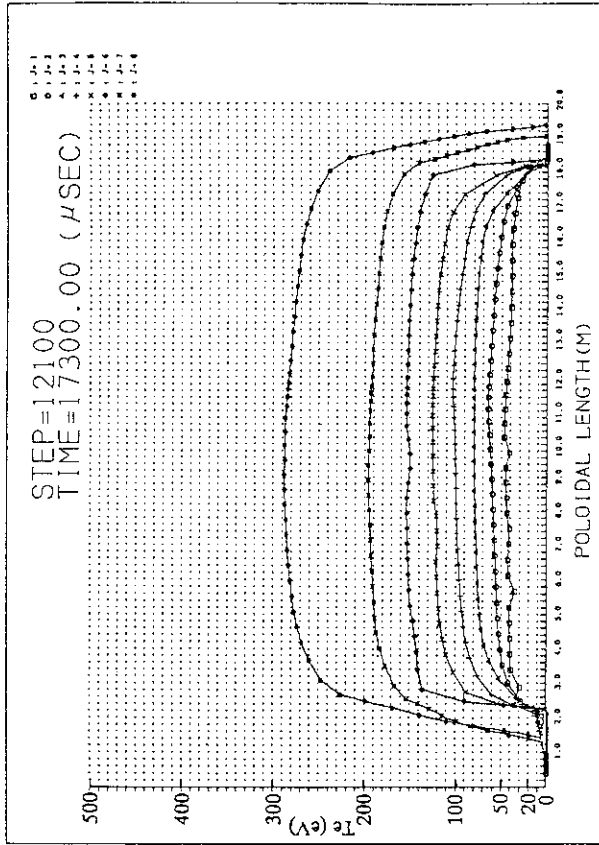


図. A-3-(b) 電子温度分布

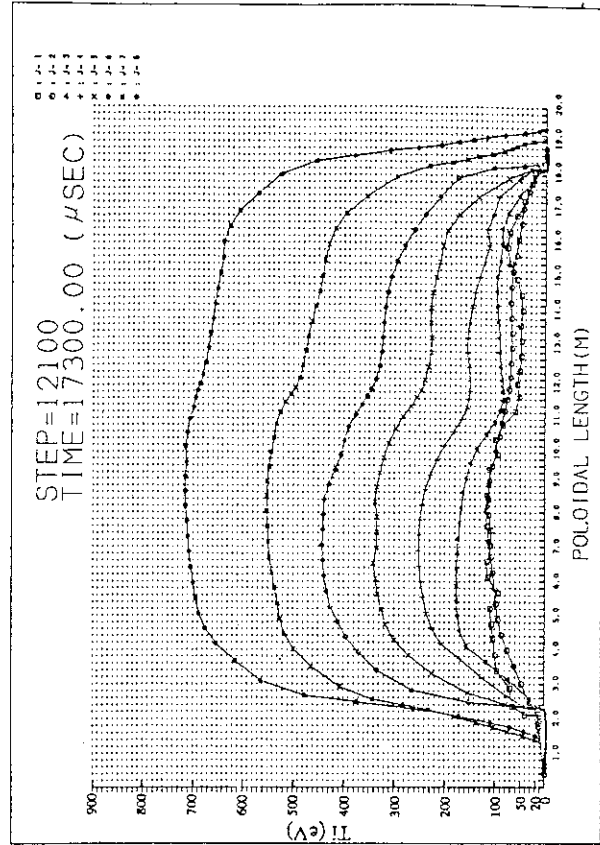


図. A-3-(c) イオン温度分布

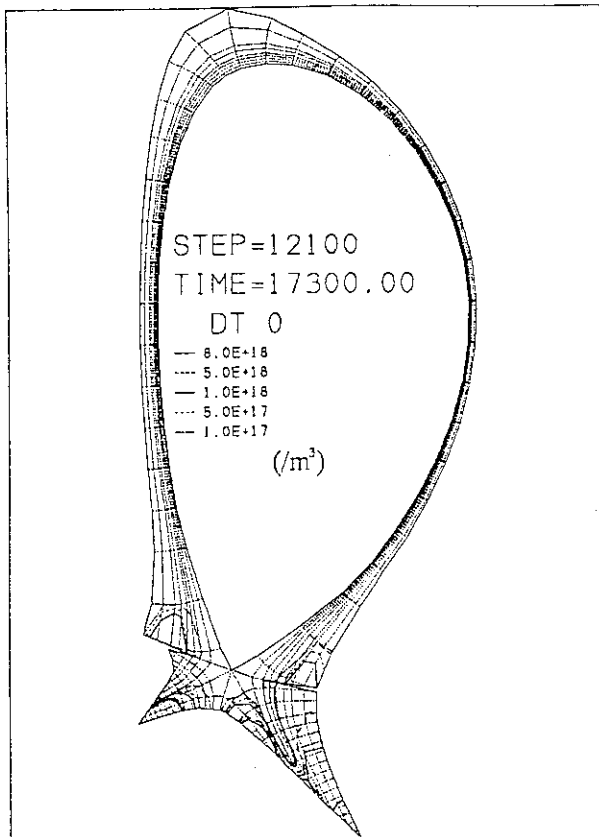


図. A-3-(d)中性粒子密度分布

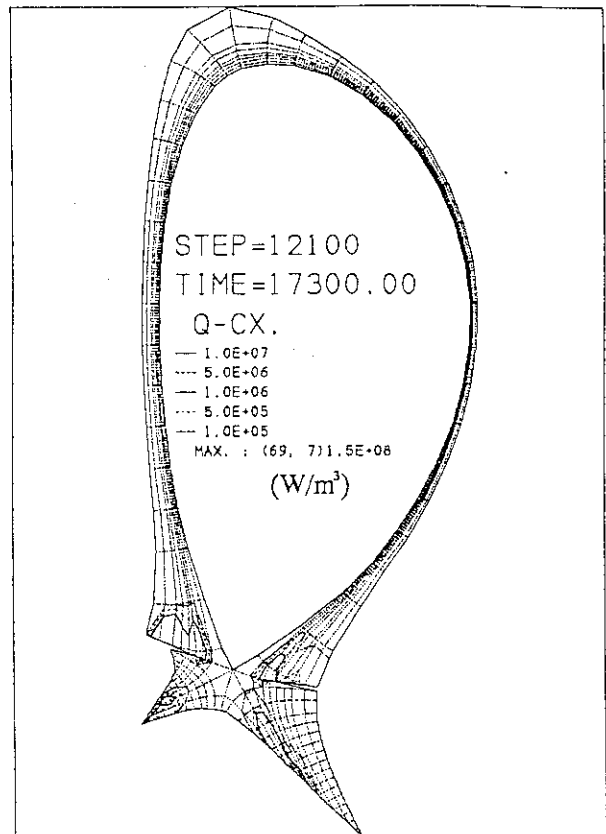


図. A-3-(e)荷電交換損失

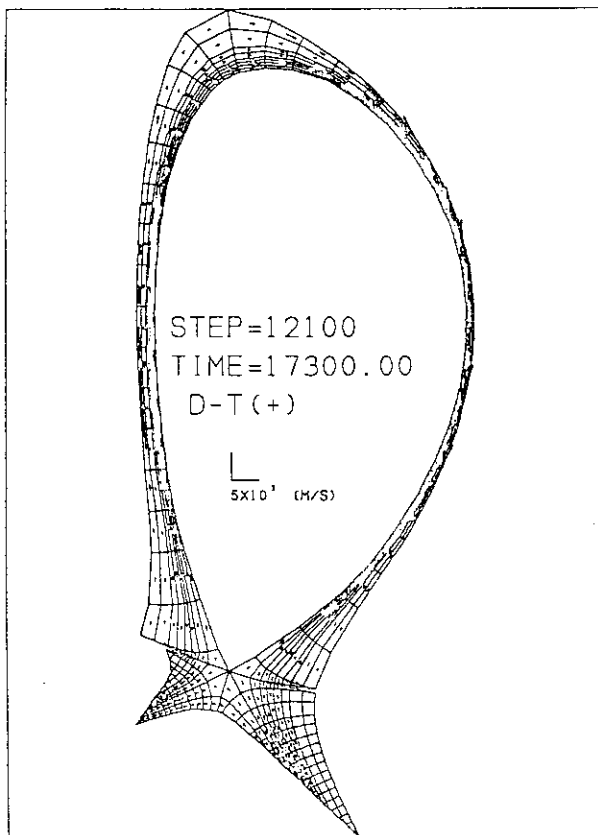


図. A-3-(f)D-T速度分布

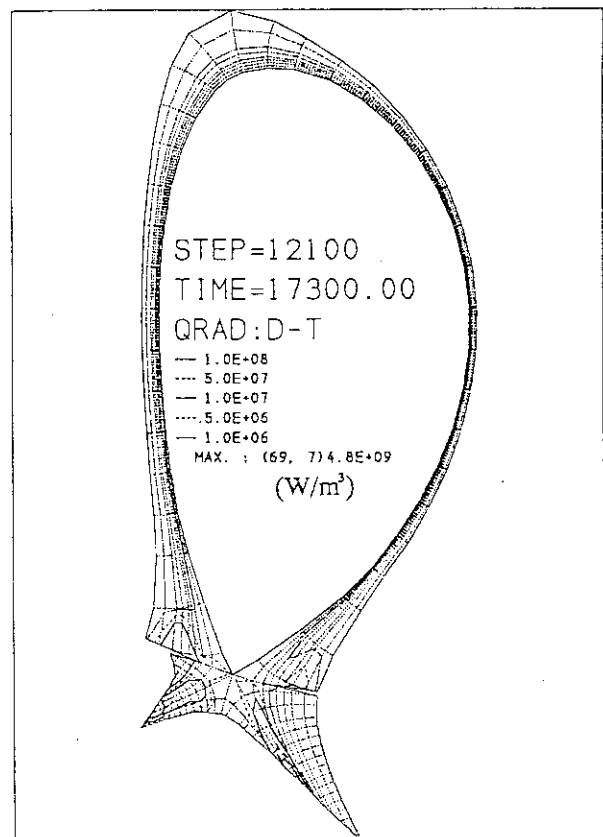


図. A-3-(g)放射損失

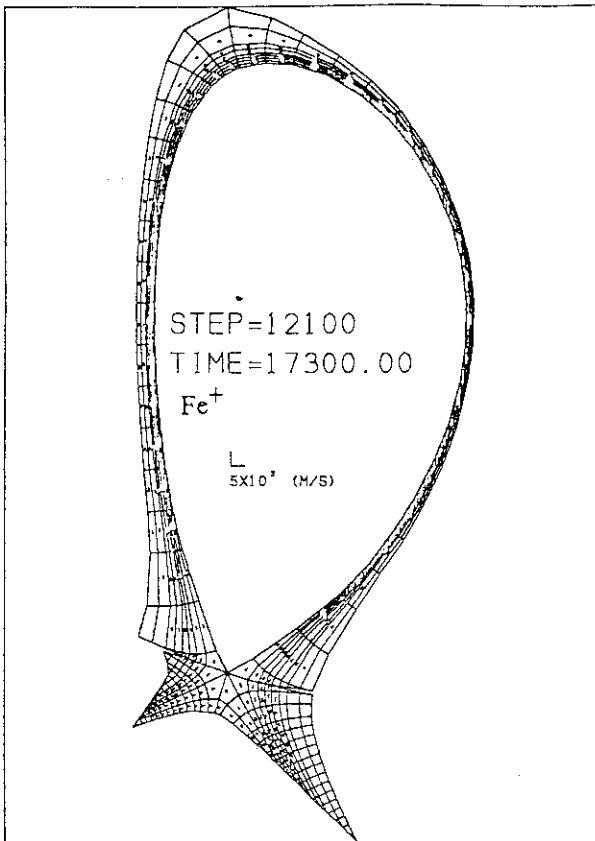


図. A-3-(h) Fe⁺速度分布

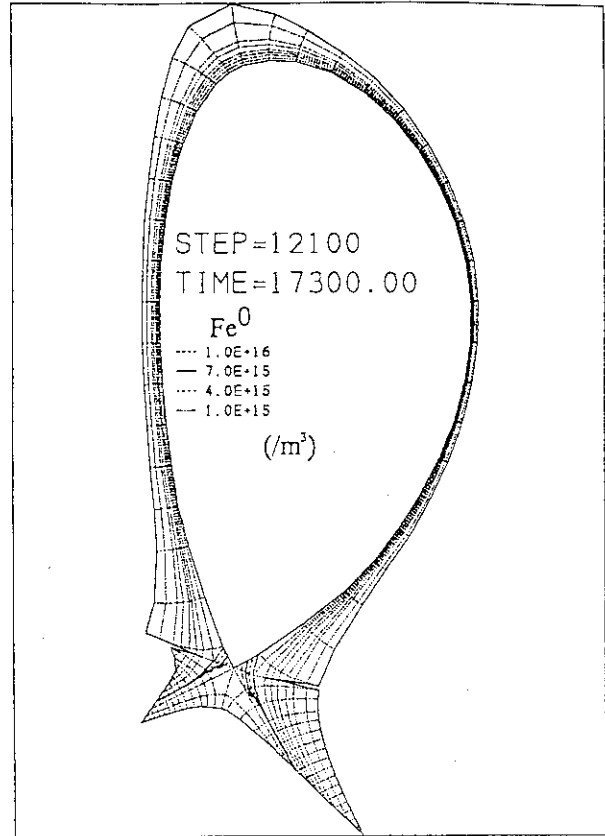


図. A-3-(i) Fe⁰密度分布

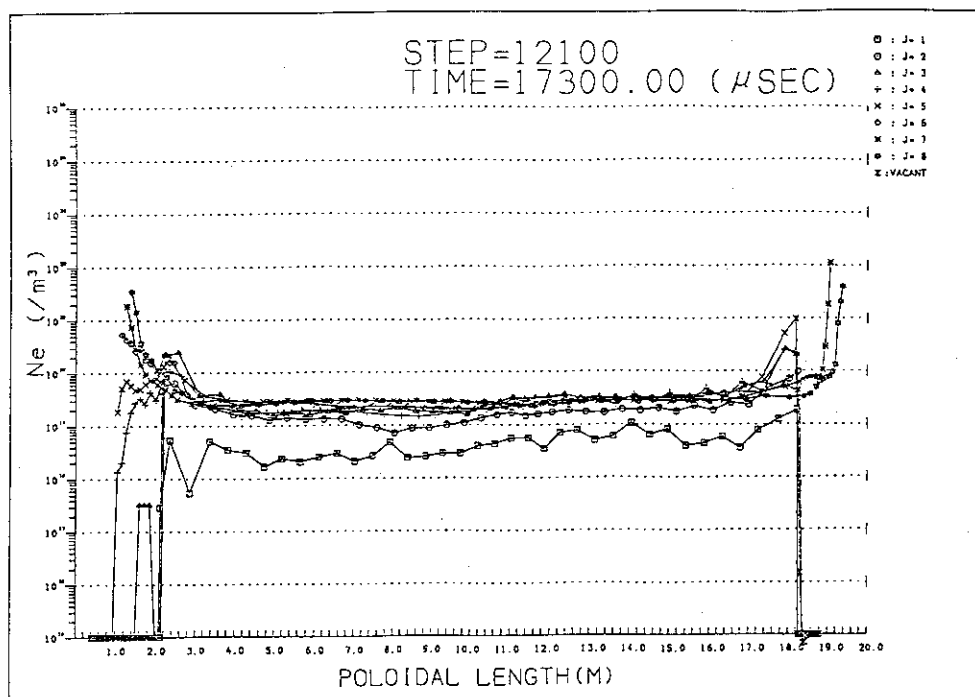


図. A-3-(j) 電子密度分布

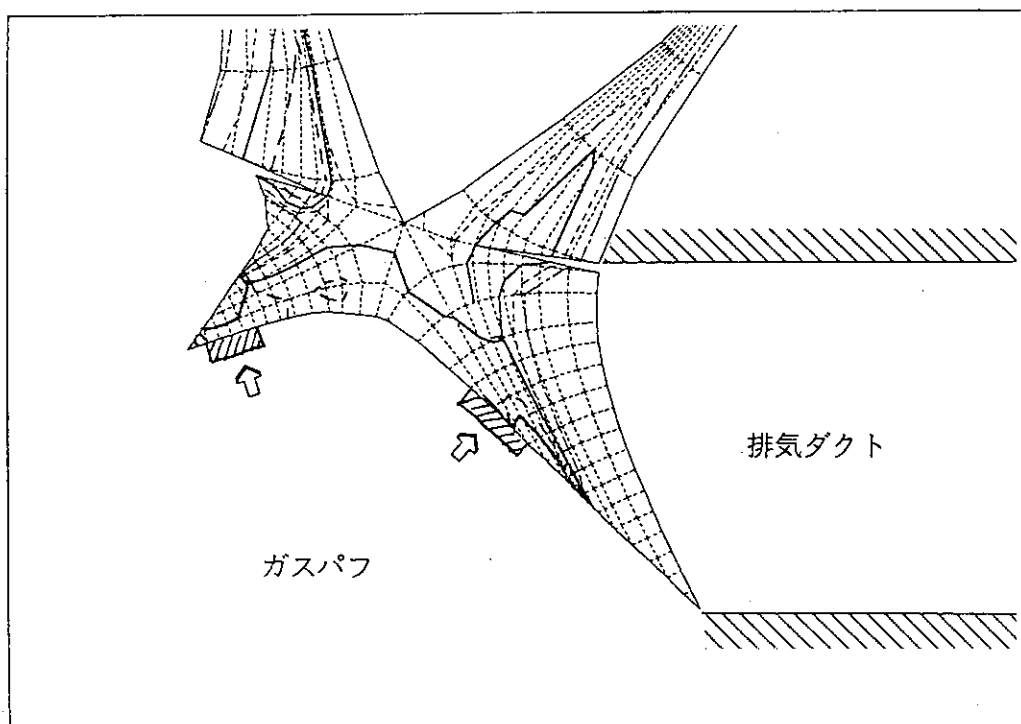


図. A-3-(k) ダイバータ部分拡大図

表 A-4

Run No.	BFLB-N
ダイバータ構造	バッフル型 (幅広バッフル,内側3セグメント/外側6セグメント)
ガスパフ方法	private region 領域よりガスを噴出 D ₂ パフ量 (内側,外側)=(2 Γ ,1.5 Γ) Fe ⁺ パフ量 (内側,外側)=(0.02 Γ ,0.015 Γ) $\Gamma=2.5 \times 10^{23}$ (molecules/sec)
アルベド	0.98
プラズマ断面分布図	図 A-4
熱流束分布図	図12,13,14
結果	<p style="text-align: center;">ダイバータ性能</p> <p>ダイバータ板表面のプラズマ温度 20eV以上 ダイバータ板の熱負荷 3.5MW/m²以下 バッフル表面のプラズマ温度 20eV以上 バッフルに懸かる熱流束 6MW/m²以下</p> <p style="text-align: center;">詳細</p> <p>ダイバータ板表面上のプラズマ温度は20eV以下となった。バッフル板表面上のプラズマ温度も20eV以下となった。</p> <p>ダイバータ板の熱負荷の最大値は内側ダイバータ板で2.0MW/m²、外側ダイバータ板で3.5MW/m²程度となった。一方、バッフル板に懸かる熱流束の最大値は内側バッフルで6MW/m²、外側バッフルで3MW/m²程度である。水冷却の熱流束限界に対し十分な余裕がある</p> <p>バッフルのプラズマ対向面の前面にプラズマ密度が高い領域ができた。また、炉心プラズマ境界上のプラズマ密度は、炉心プラズマからSOLへのプラズマ粒子の拡散を維持できる密度であった。</p>

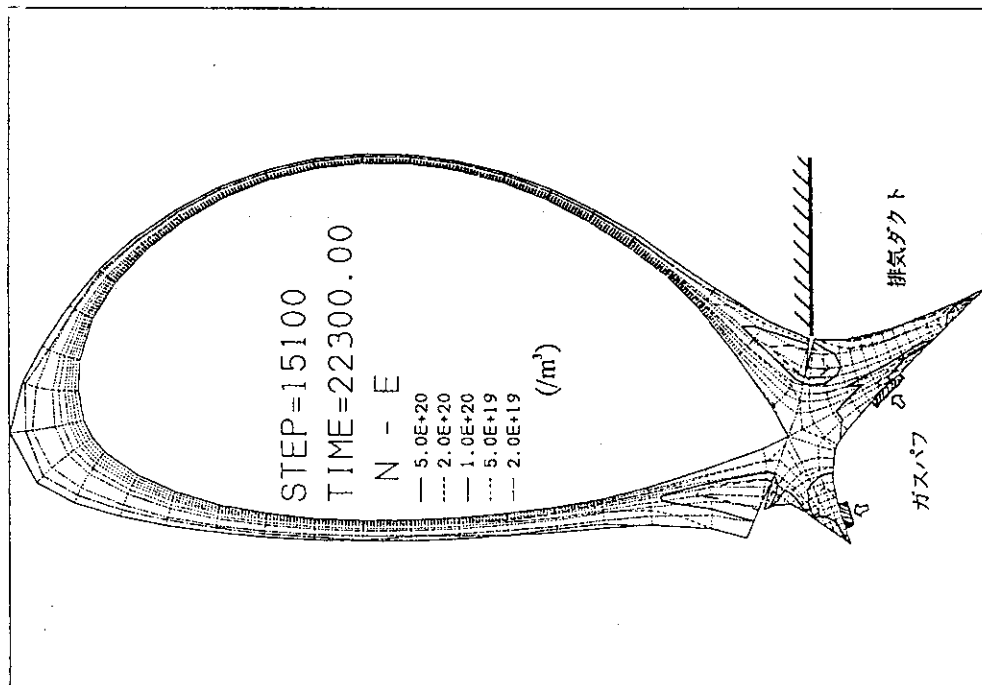


図. A-4-(a) 電子密度分布

解析条件
バッフル型
D₂ガス量
Feガス量
排気能力

(バッフル幅;J=1-3)
(内側,外側)=(5.00x10²/s,3.75x10²/s)
(内側,外側)=(5.00x10²/s,3.75x10²/s)
アルベド = 0.98

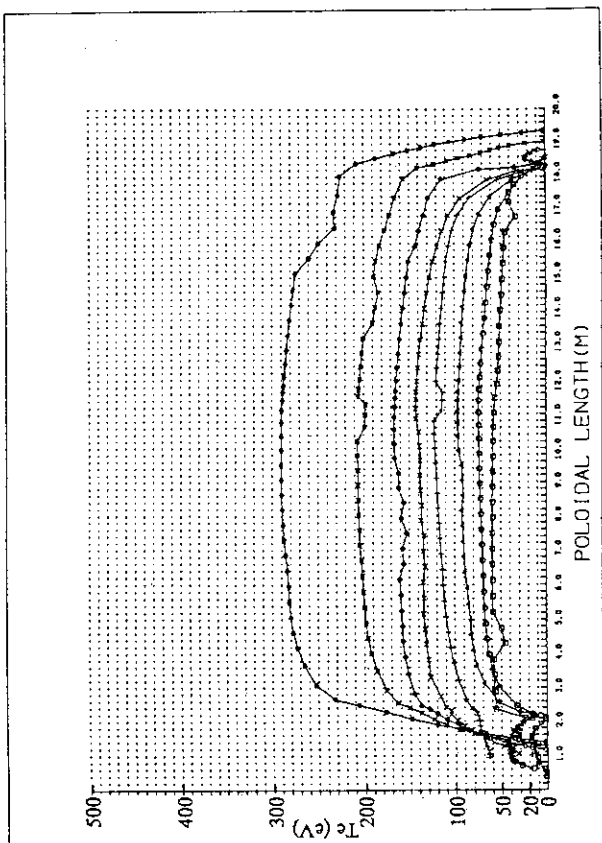


図. A-4-(b) 電子温度分布

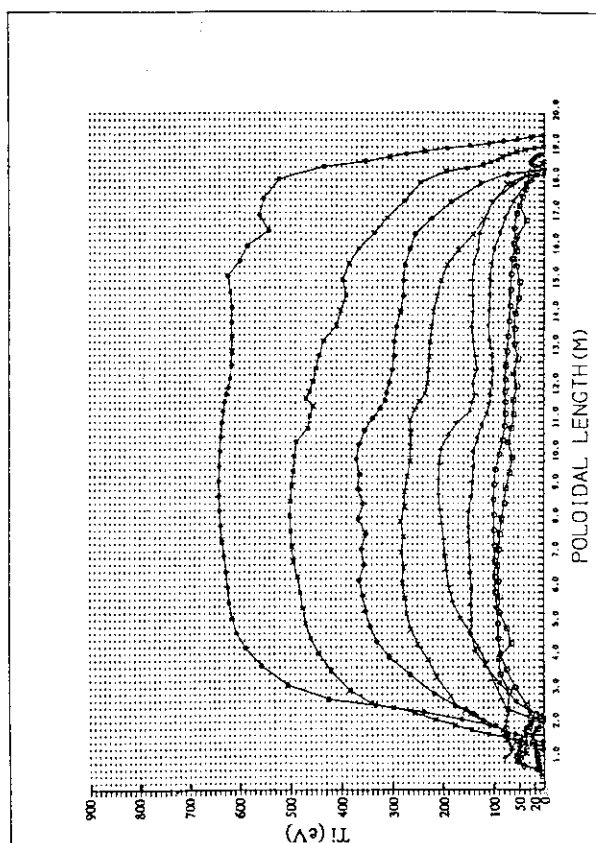


図. A-4-(c) イオン温度分布

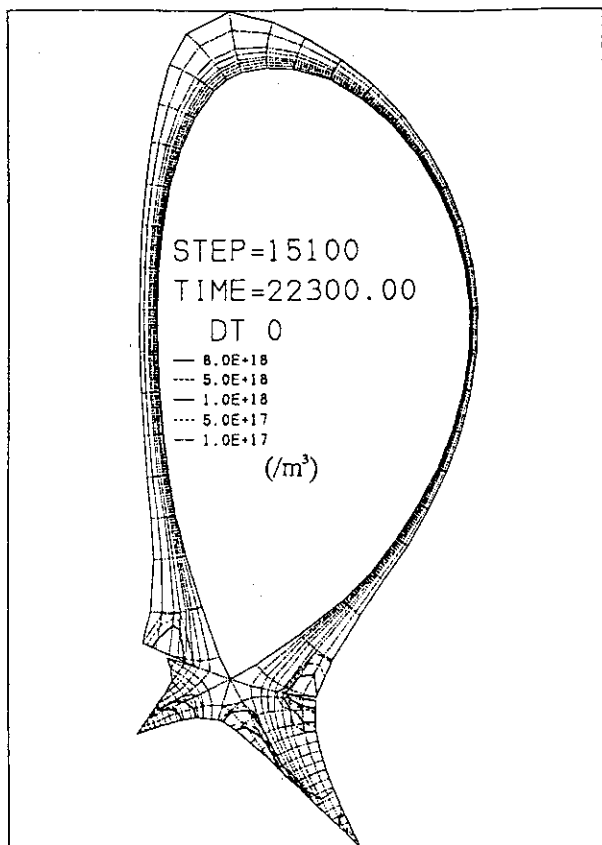


図. A-4-(d)中性粒子密度分布

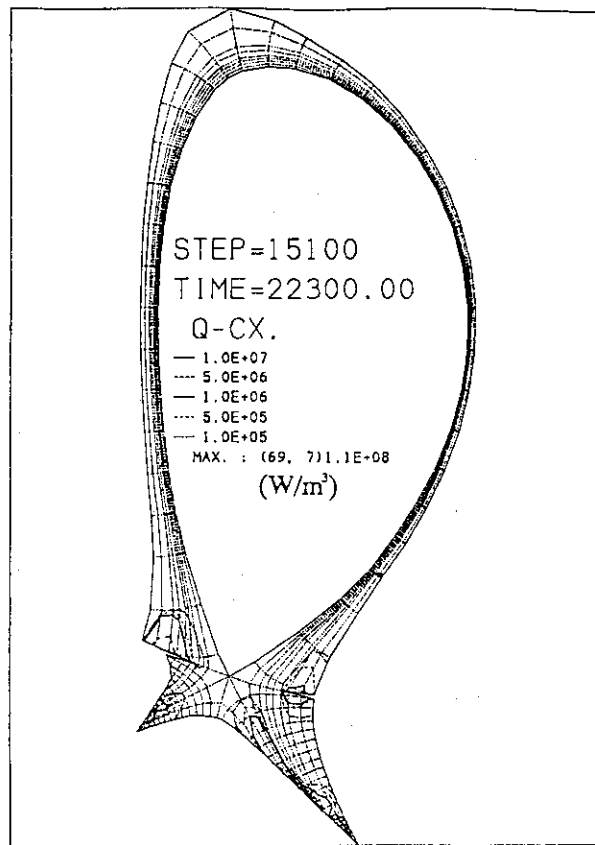


図. A-4-(e)荷電交換損失

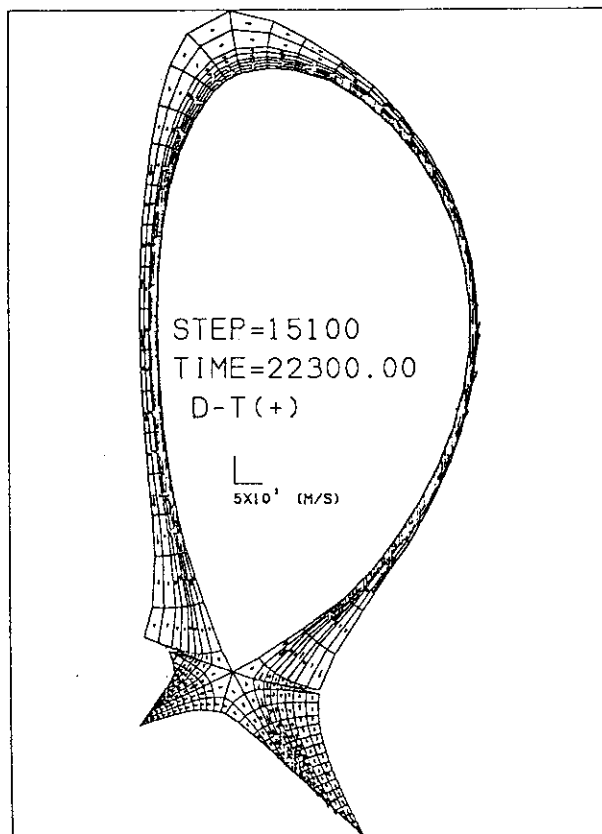


図. A-4-(f) D-T速度分布

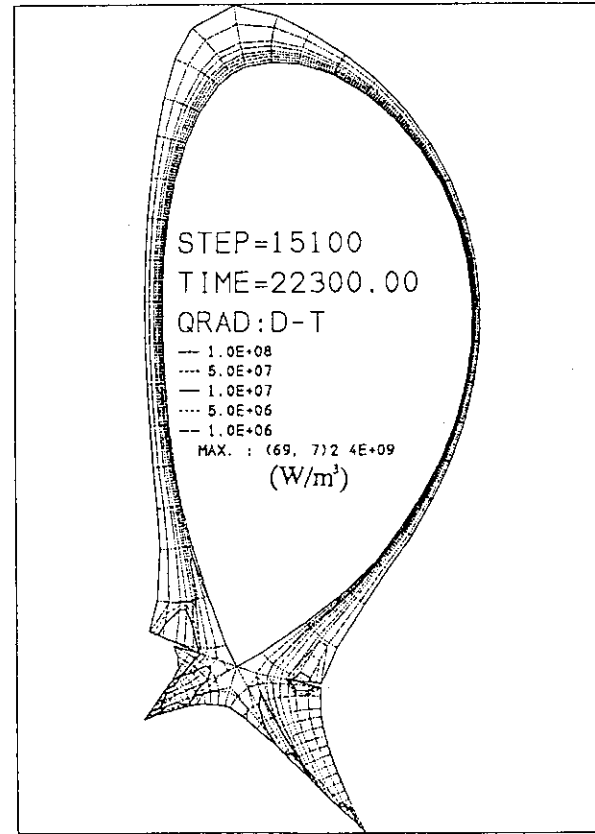


図. A-4-(g)放射損失

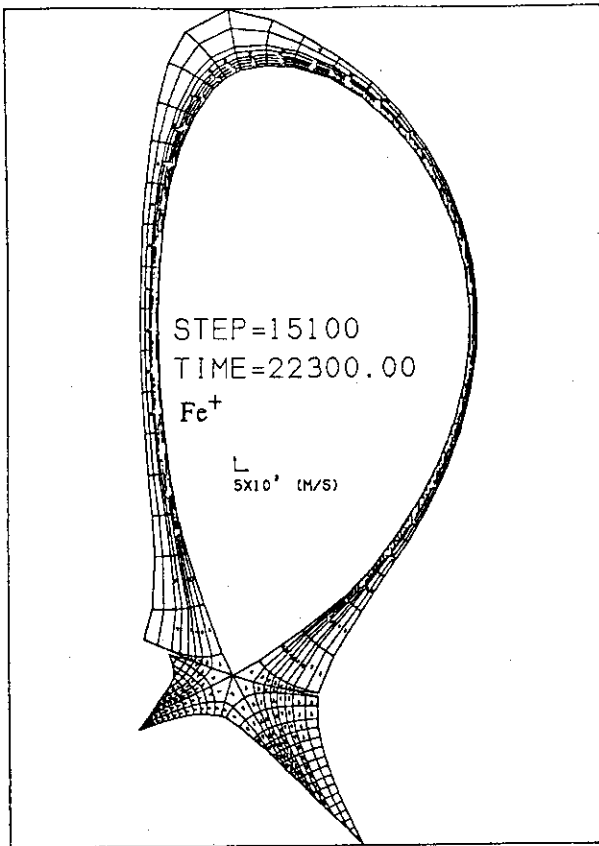


図. A-4-(h) Fe⁺速度分布

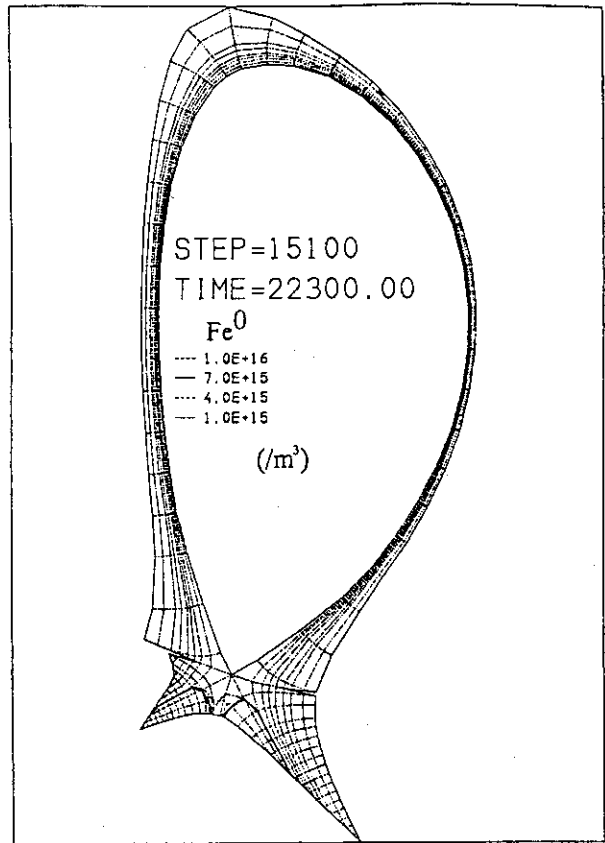


図. A-4-(i) Fe⁰密度分布

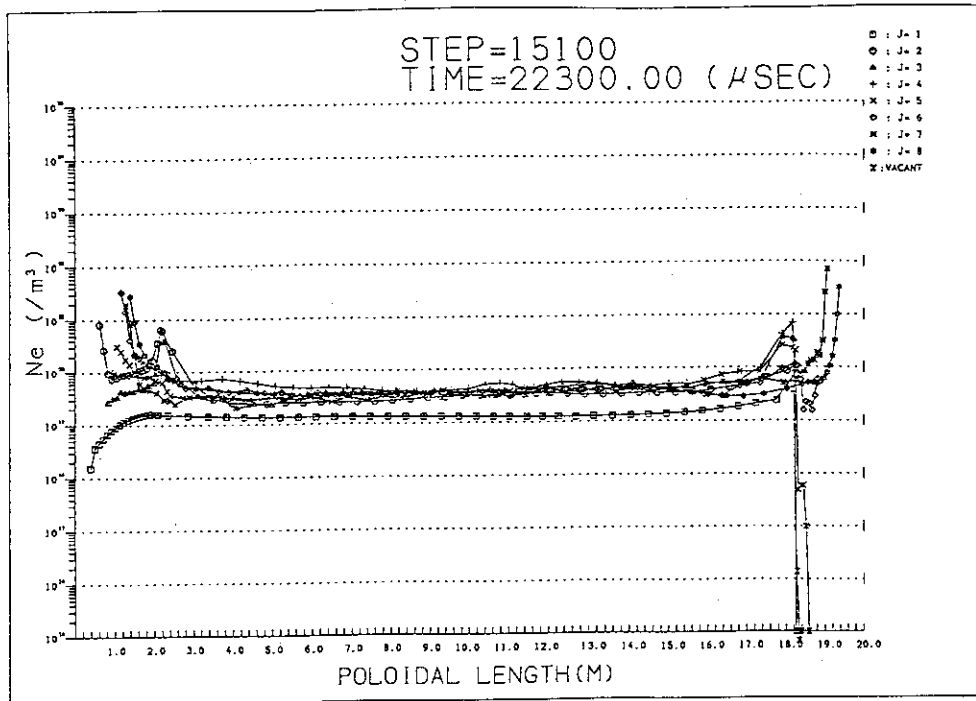


図. A-4-(j) 電子密度分布

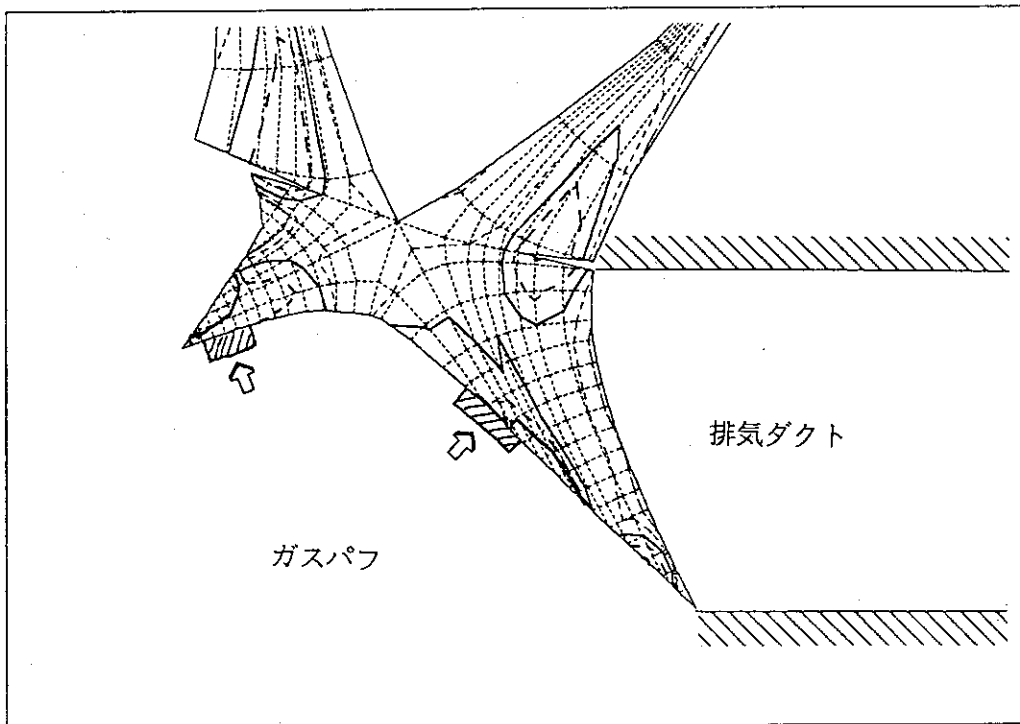


図. A-4-(k) ダイバータ部分拡大図

表 A-5

Run No.	PRIV-F
ダイバータ構造	プライベート方向ポンピング型
ガスパフ方法	public region 領域よりガスを噴出 D ₂ パフ量 (内側,外側)=(2Γ,1.5Γ) Fe ⁺ パフ 無し $\Gamma=2.5 \times 10^{23}(\text{molecules/sec})$
アルベド	0.96
プラズマ断面分布図	図 A-5
熱流束分布図	無し
結果	<p style="text-align: center;">ダイバータ性能</p> <p>ダイバータ板表面のプラズマ温度 30eV以下 ダイバータ板の熱負荷 - ※プラズマ密度分布に問題が生じた</p> <p style="text-align: center;">詳細</p> <p>ヌル点付近を中心にダイバータ・プラズマの密度が高くなり過ぎて炉心プラズマからSOLへの粒子の拡散に問題を生じる結果となった。密度分布の傾向は比較的平坦なものとなった。</p> <p>不純物(Fe⁺)の噴出が中断されているのにも拘わらず、ダイバータ表面上のプラズマ温度は、ダイバータ成立のための制限値以内の低温に抑えられた。</p> <p>SOLのプラズマ密度が全周にわたって高密度になる傾向が見られた。そのため、炉心プラズマ境界におけるプラズマ密度が高くなり過ぎて炉心プラズマからSOLへのプラズマ粒子の拡散に支障をきたす。この原因は、public regionにあるガスの噴出口がSOLと磁気面を共有しており、噴出されたガスがイオン化されてpublic region沿いのSOLのプラズマ密度を高める為である。</p>

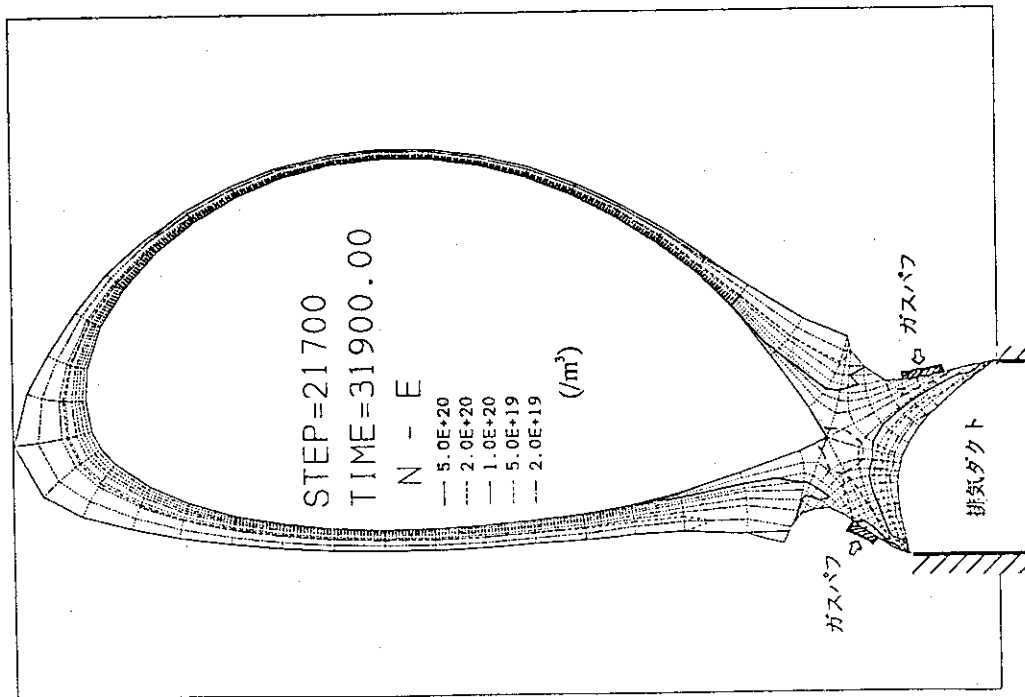


図. A-5-(a) 電子密度分布

解析条件
 軸方向排気型
 D_2 バフ量 (内側,外側)=($5.00 \times 10^{21}/s, 3.75 \times 10^{21}/s$)
 Fe バフ量 (内側,外側)=($0.00 \times 10^{21}/s, 0.00 \times 10^{21}/s$)
 排気能力 アルベド = 0.99

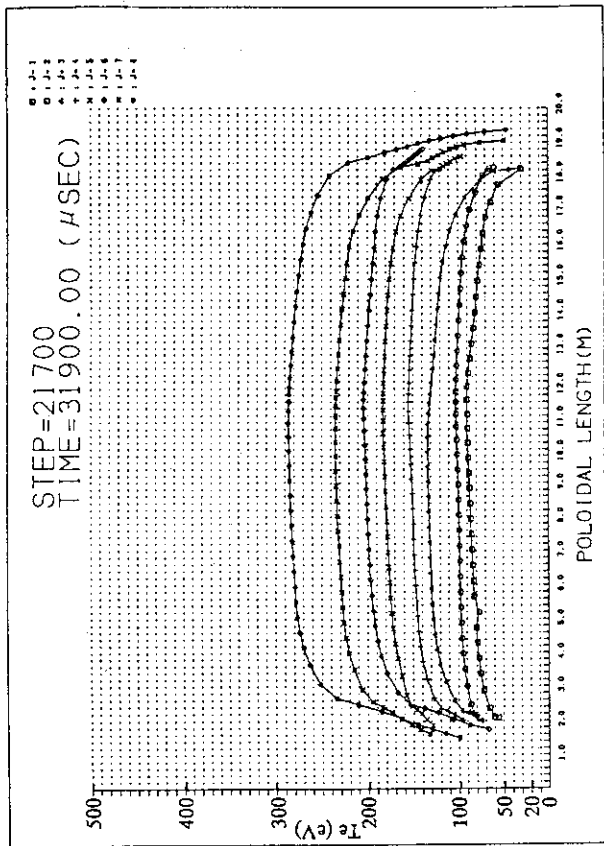


図. A-5-(b) 電子温度分布

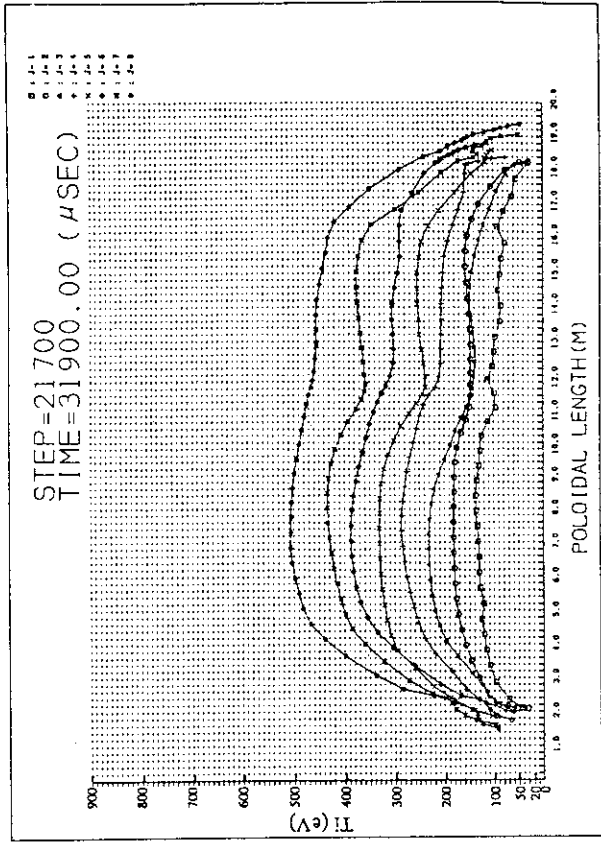


図. A-5-(c) イオン温度分布

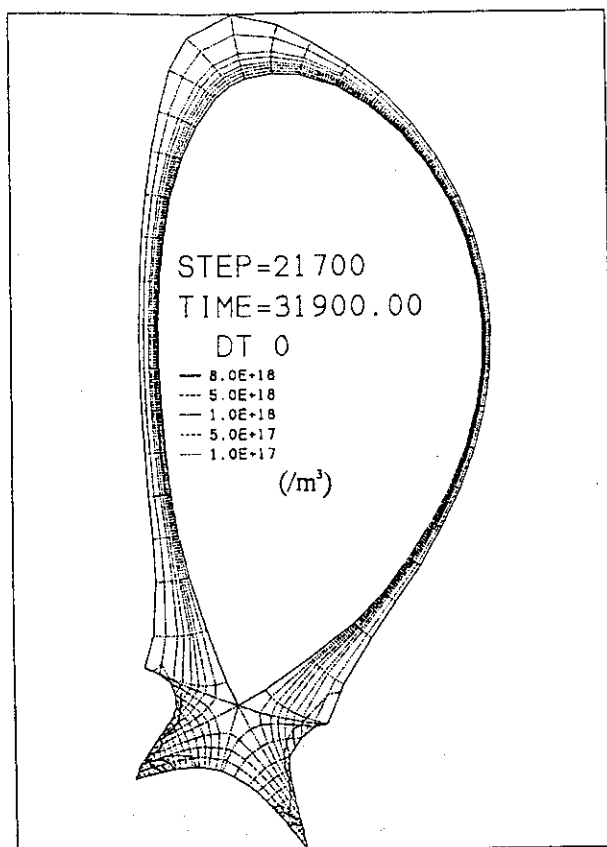


図. A-5-(d)中性粒子密度分布

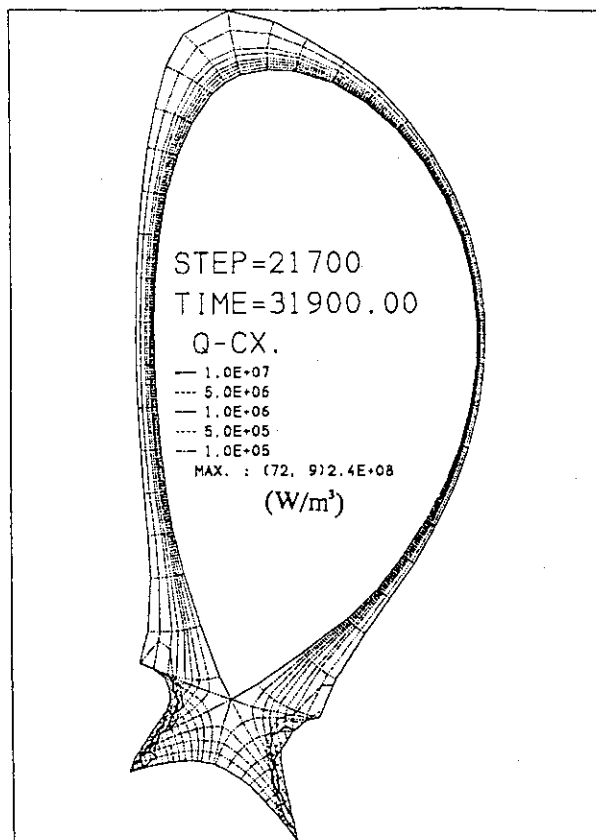


図. A-5-(e)荷電交換損失

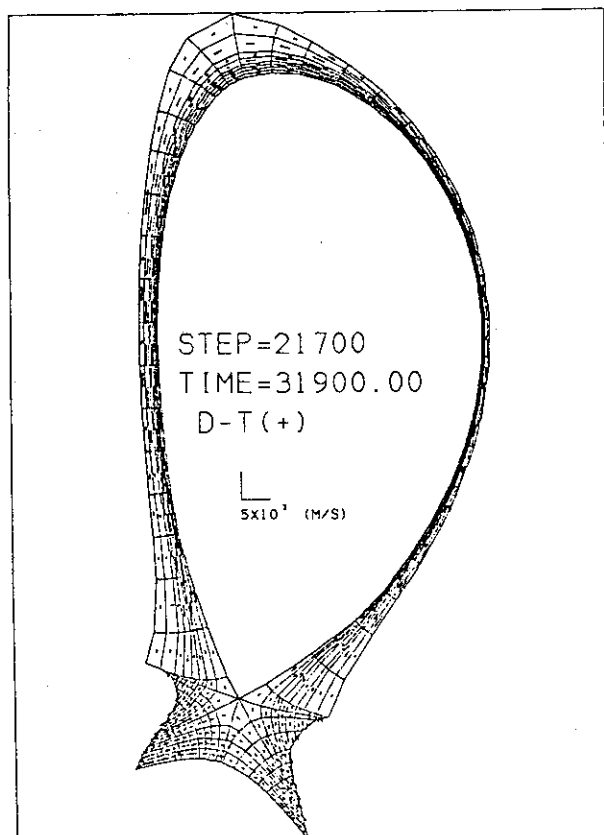


図. A-5-(f) D-T速度分布

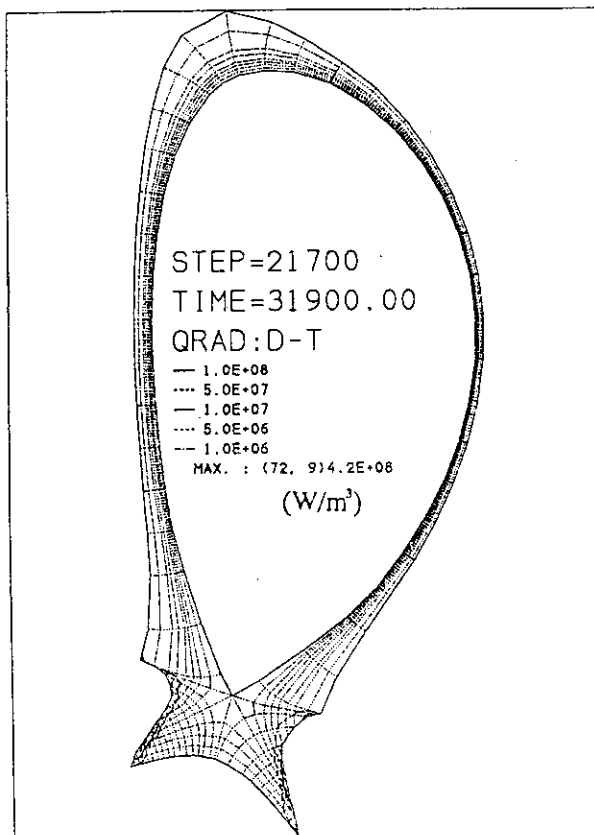


図. A-5-(g)放射損失

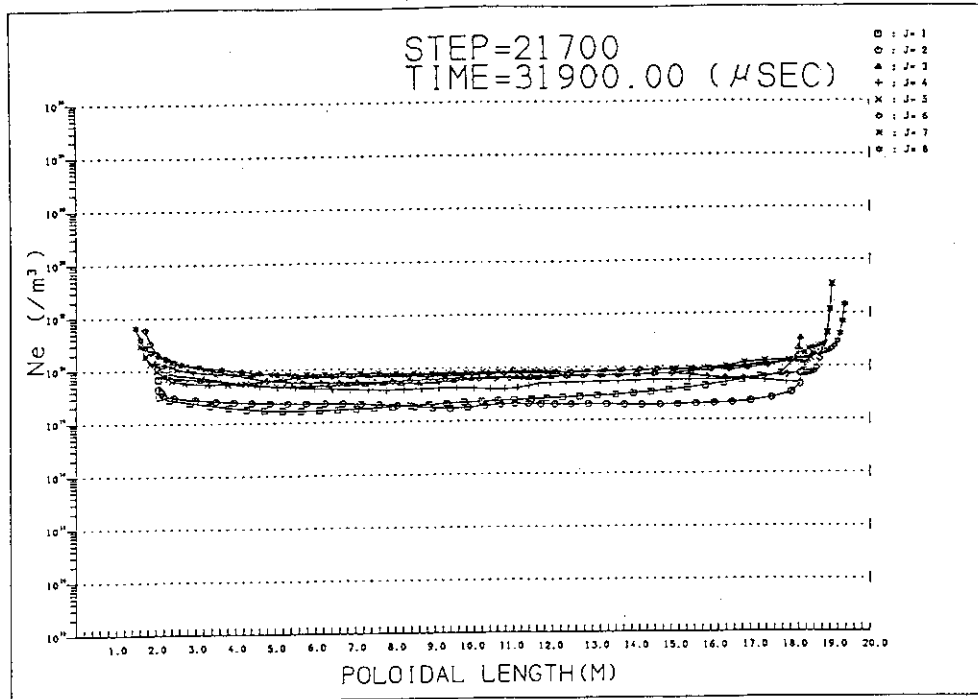


図. A-5-(h) 電子密度分布

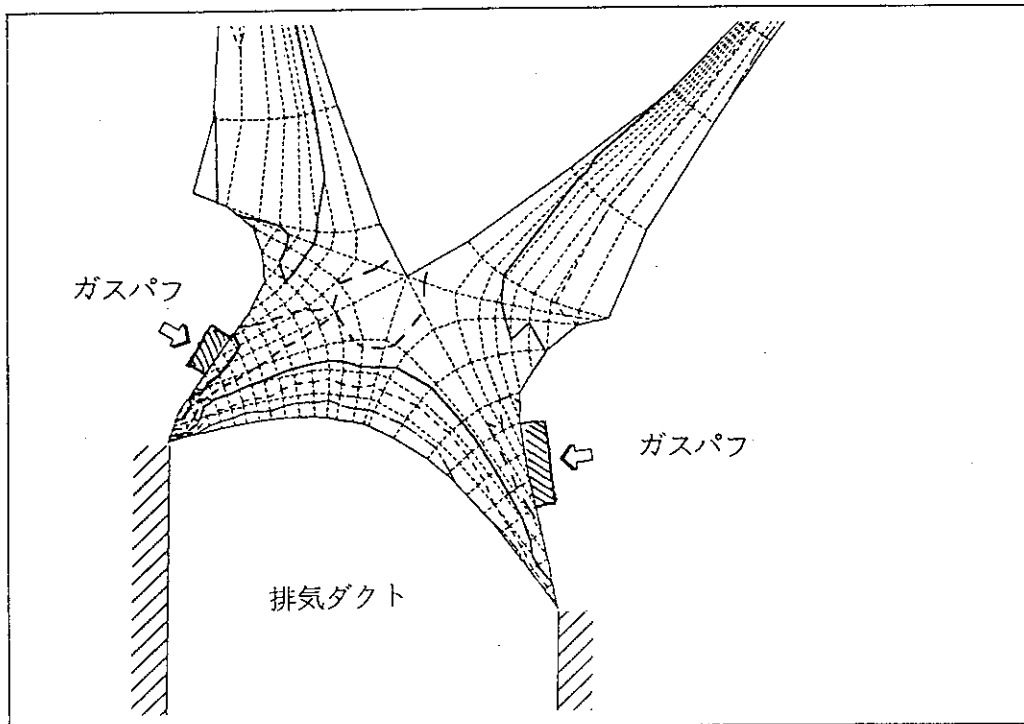


図. A-5-(i) ダイバータ部分拡大図

表 A-6

Run No.	PRIV-S
ダイバータ構造	プライベート方向ポンピング型
ガスパフ方法	public region 領域よりガスを噴出 D ₂ パフ量 (内側,外側)=(2 Γ ,1.5 Γ) Fe ⁺ パフ 無し $\Gamma=2.5 \times 10^{23}$ (molecules/sec)
アルベド	0.99
プラズマ断面分布図	図 A-6
熱流束分布図	無し
結果	<p style="text-align: center;">ダイバータ性能</p> <p>ダイバータ板表面のプラズマ温度 50eV以上 ダイバータ板の熱負荷 - ※プラズマ密度分布に問題が生じた</p> <p style="text-align: center;">詳細</p> <p>ヌル点付近をピークとしてにSOLのプラズマ密度が高くなり過ぎて炉心プラズマからSOLへの粒子の拡散に問題を生じる結果となった。密度分布の傾向は比較的平坦なものとなった。 ダイバータ表面上のプラズマ温度は高く、ダイバータ成立のための制限値を越えた。</p>

Comment.

アルベドを0.96-0.99の間で変えて何通りか解析を行なったが、傾向はどれも同じでSOL全般にわたって比較的密度の偏差が少なく、SOLの密度が高くなる傾向にあった。不純物イオンのSOLへの侵入もプライベート方向ポンピング型が最も顕著に見られた。

ガス噴出口をこれとは逆のprivate region領域から行なうと、噴出されたガスはプラズマとは相互作用せずにそのままダクトに吸入される傾向が見られた。

どちらかと言えば、プライベート方向ポンピング型ダイバータは概ねダイバータ表面温度が低くなる傾向にあった。

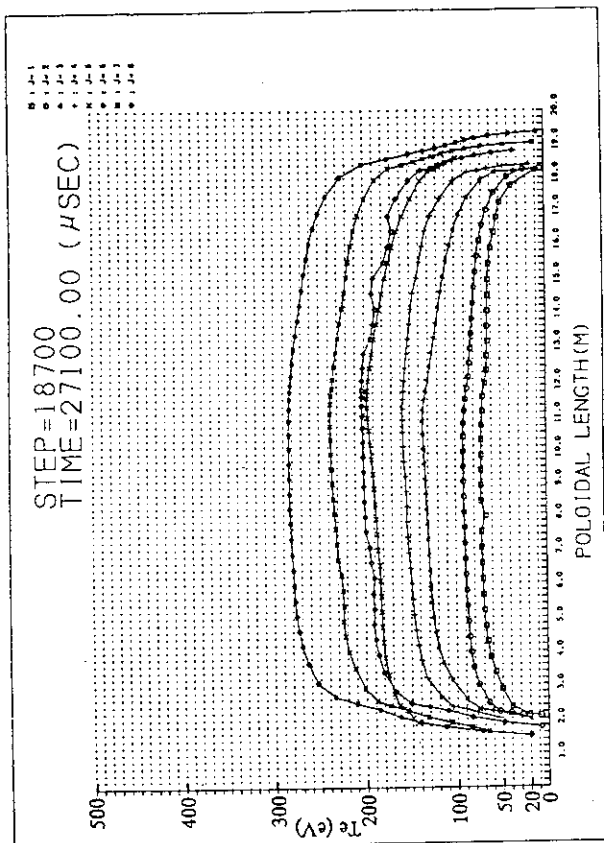


図. A-6(b) 電子温度分布

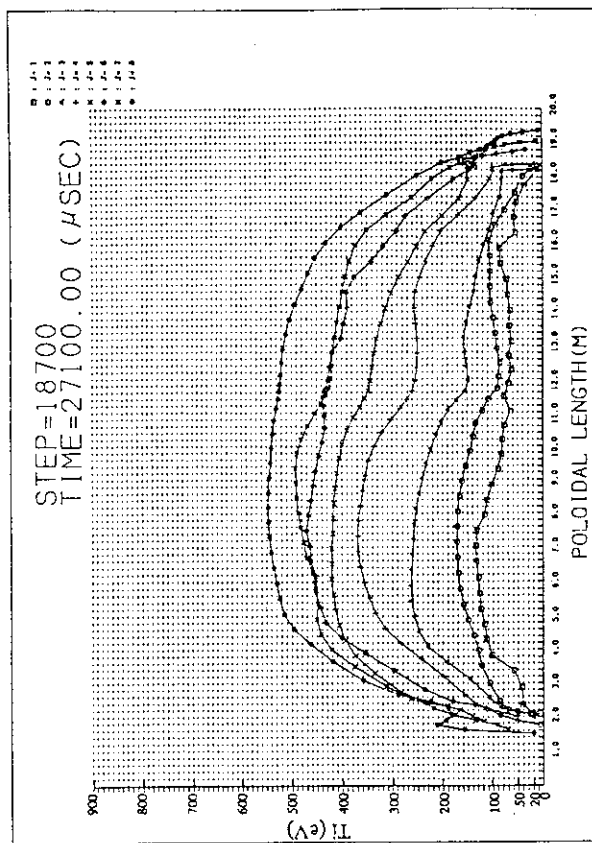


図. A-6(c) イオン温度分布

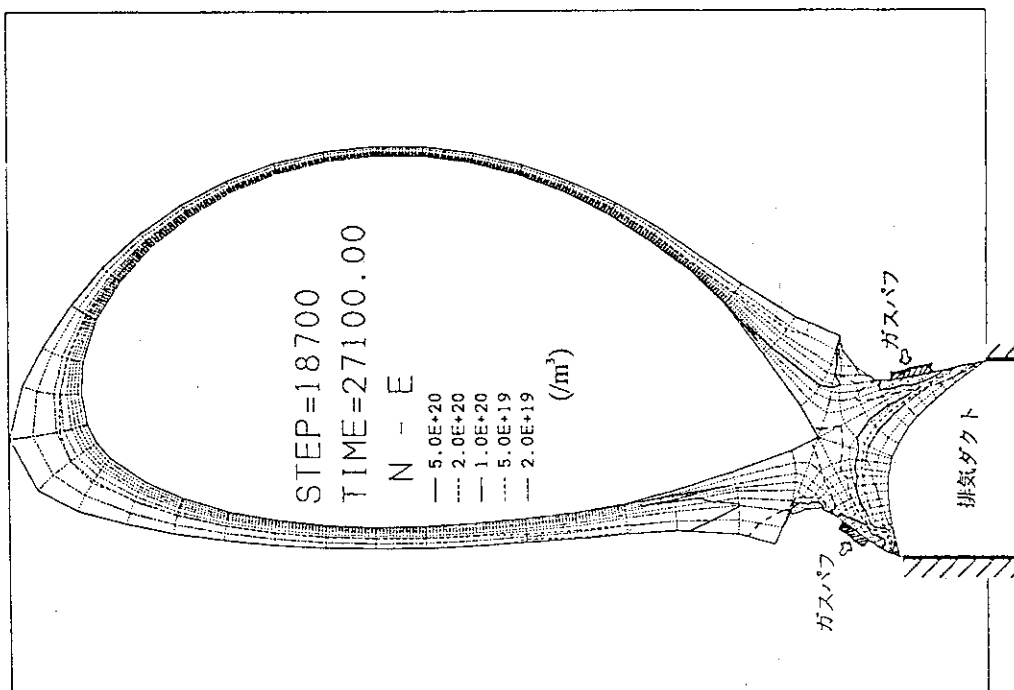


図. A-6(a) 電子密度分布

解析条件
軸方向排気型
 D_2 バフ量 (内側, 外側) = $(5.00 \times 10^{27} / s, 3.75 \times 10^{27} / s)$
 Fe バフ量 (内側, 外側) = $(0.00 \times 10^{27} / s, 0.00 \times 10^{27} / s)$
排気能力 アルベド = 0.96

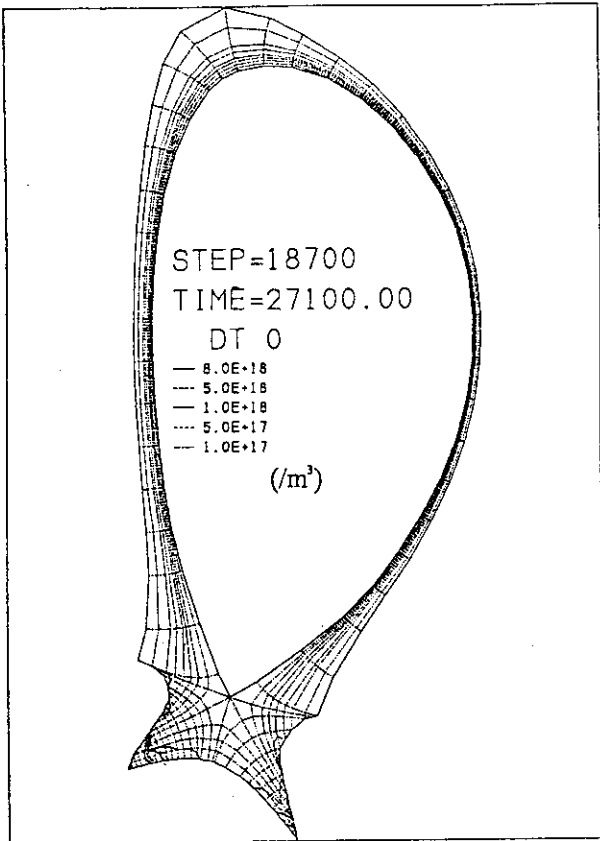


図. A-6-(d)中性粒子密度分布

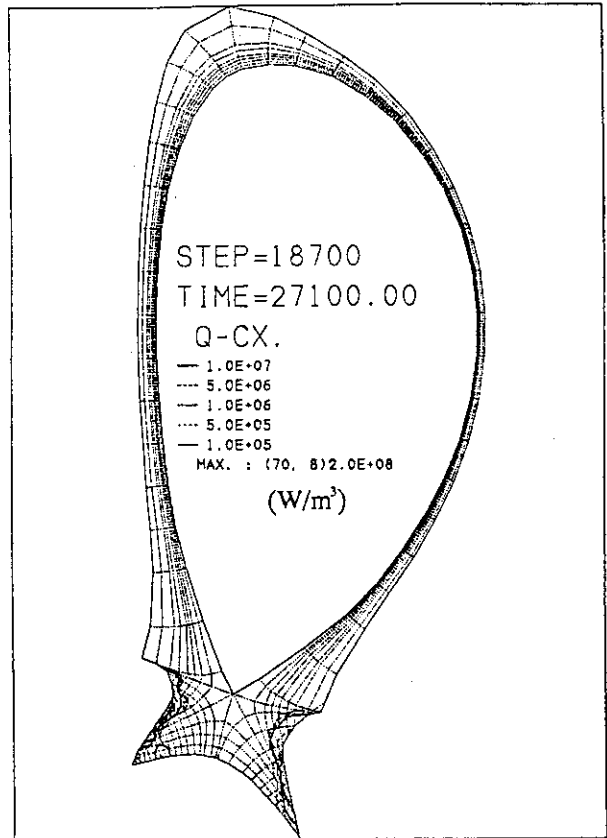


図. A-6-(e)荷電交換損失

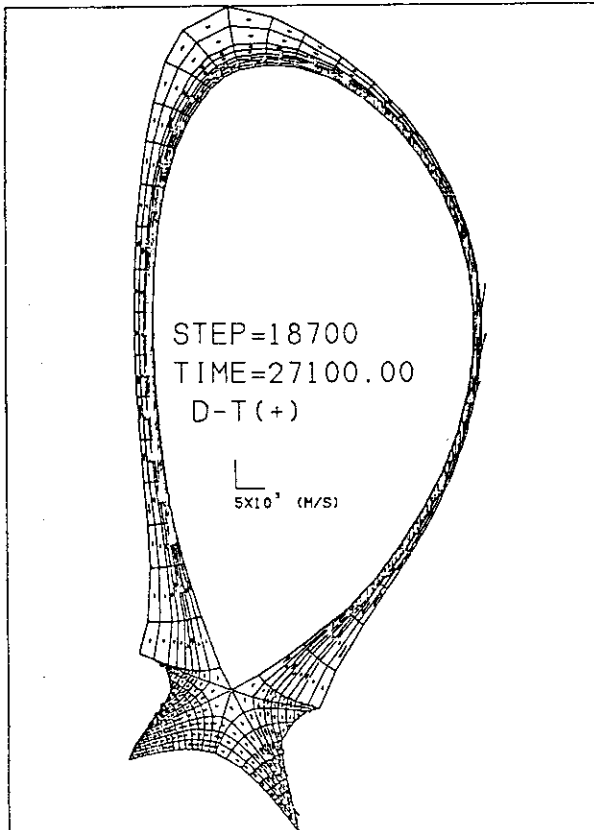


図. A-6-(f) D-T速度分布

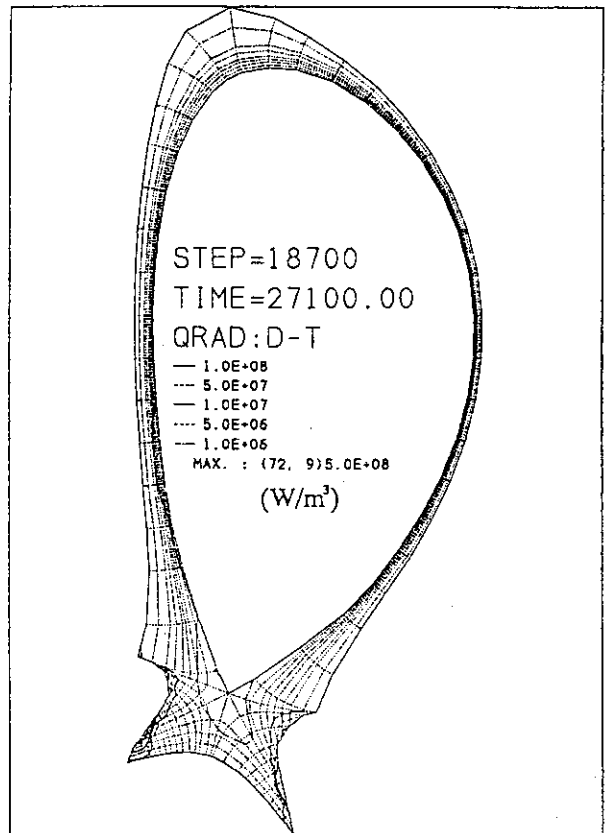


図. A-6-(g)放射損失

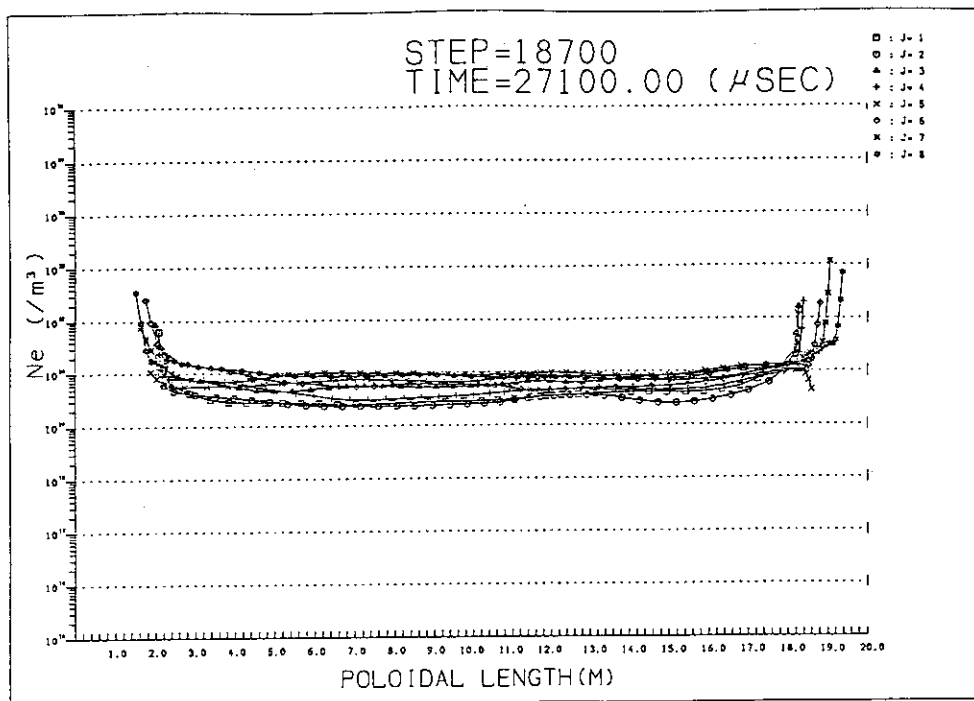


図. A-6-(h) 電子密度分布

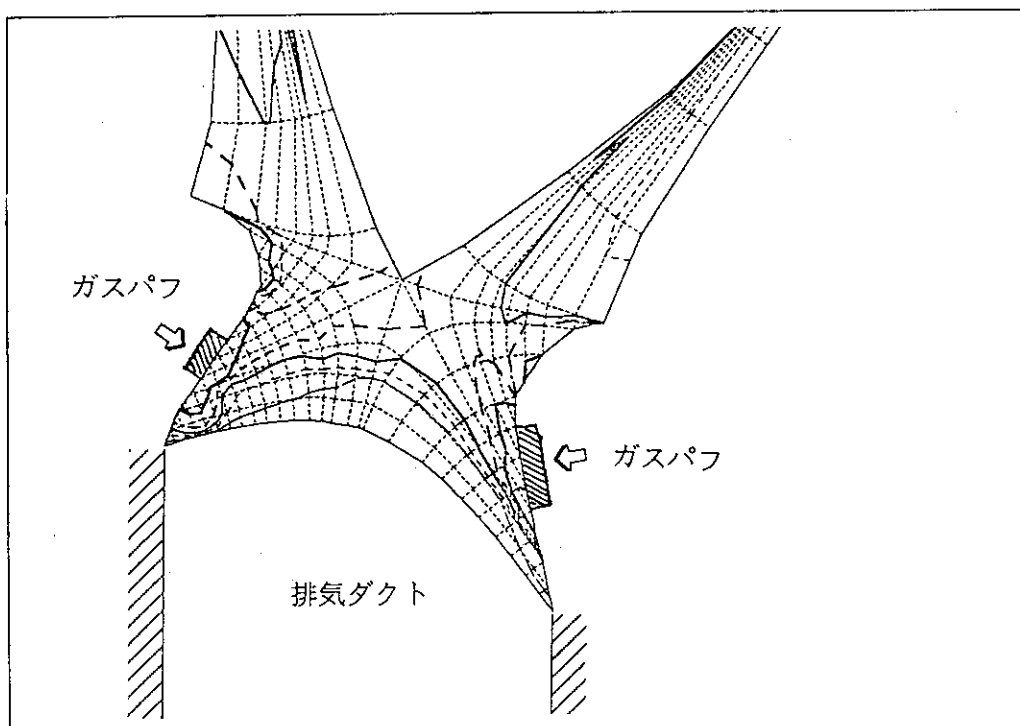


図. A-6-(i) ダイバータ部分拡大図

表 A-7

Run No.	SLOT
ダイバータ構造	スロット型
ガスパフ方法	スロット内面の全面よりガスを噴出 D ₂ パフ量 (内側,外側)=(2Γ,1.5Γ) Fe ⁺ パフ 無し。但し、以前のRunで注入したFeが滞留中 Γ=2.5×10 ²³ (molecules/sec)
アルベド	0.96
プラズマ断面分布図	図 A-7
熱流束分布図	無し
結果	<p style="text-align: center;">ダイバータ性能</p> <p>ダイバータ板表面のプラズマ温度 200eV以上 ダイバータ板の熱負荷 — ※プラズマ密度分布に問題が生じた</p> <p style="text-align: center;">詳細</p> <p>スロット部分が余りにも高密度になり過ぎた。高密度の部分が周辺にも拡大していった為にSOLの密度も高くなり過ぎて、炉心プラズマからSOLへの粒子に拡散に支障をきたす。 プラズマ粒子は、スロット部分に滞留していてダクトから排出されにくい傾向がある。 中性粒子密度が他の結果に比べ少ない。スロットにプラズマ粒子が滞留してスロット内部が高密度になる。その結果スロットに注入されたガスはプラズマ粒子と相互作用し、イオン化される。ますますプラズマ密度は高くなり、中性粒子は希薄になる。磁場に拘束されない中性粒子が希薄になるので粒子の排気が困難になり、粒子は系内に滞留するといった悪循環が起きている。</p>

Comment.

スロット内の中性粒子ガス標的はイオン化されて実質的に蒸発し、高密度プラズマの塊になっている。

ガスパフを全量カットしてもスロット内部が高密度になる傾向が見られた。

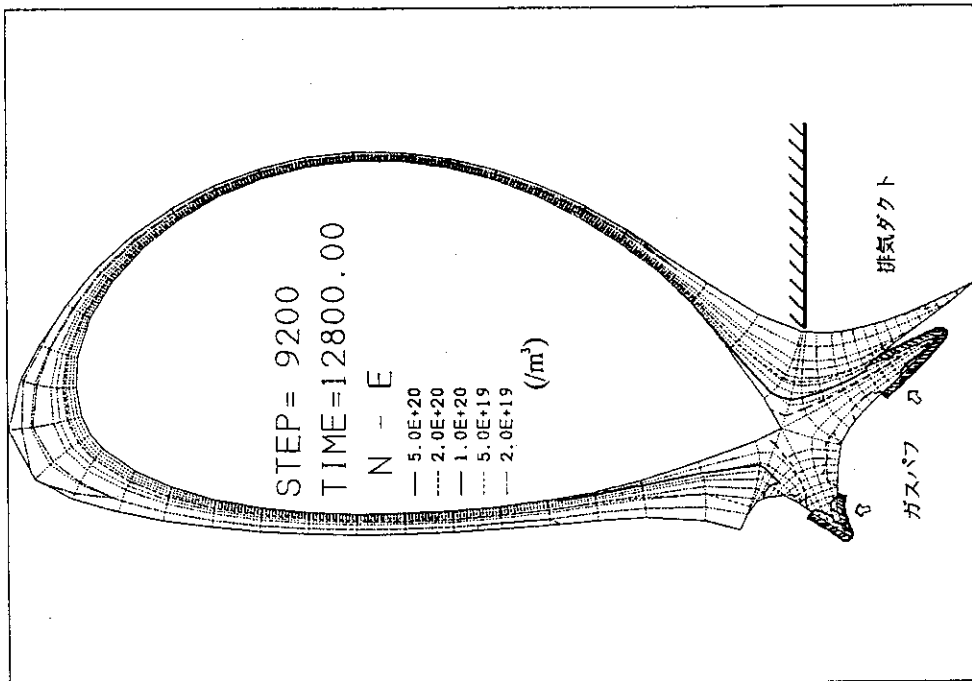


図. A-7-(a) 電子密度分布

解析条件
 スロット型
 D_2 パフ量 (内側,外側)=($5.00 \times 10^9/s, 3.75 \times 10^9/s$)
 Fe パフ量 (内側,外側)=($0.00 \times 10^9/s, 0.00 \times 10^9/s$)
 排気能力 アルベド = 0.96

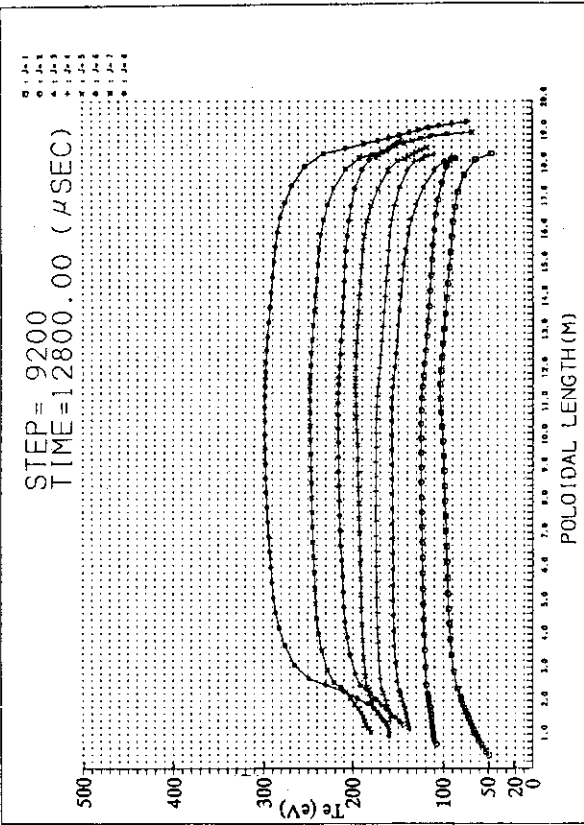


図. A-7-(b) 電子温度分布

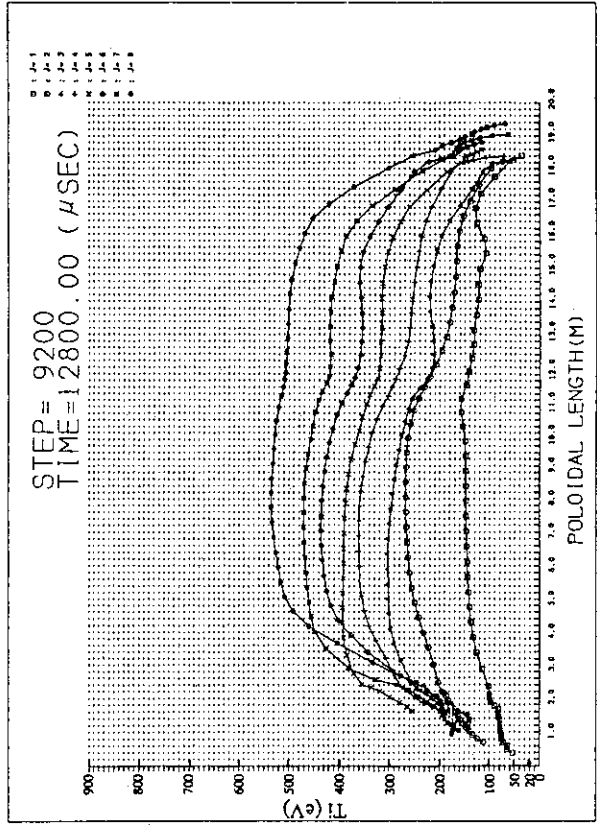


図. A-7-(c) イオン温度分布

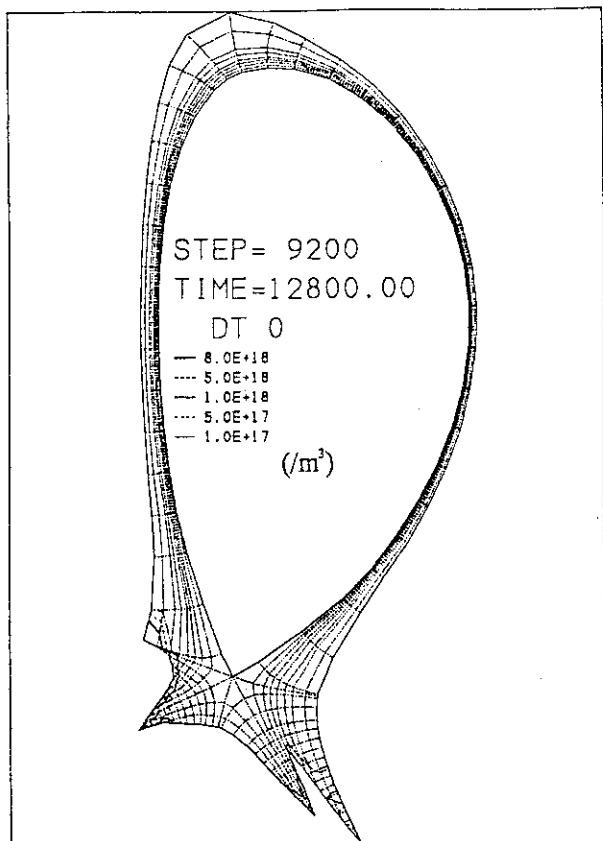


図. A-7-(d)中性粒子密度分布

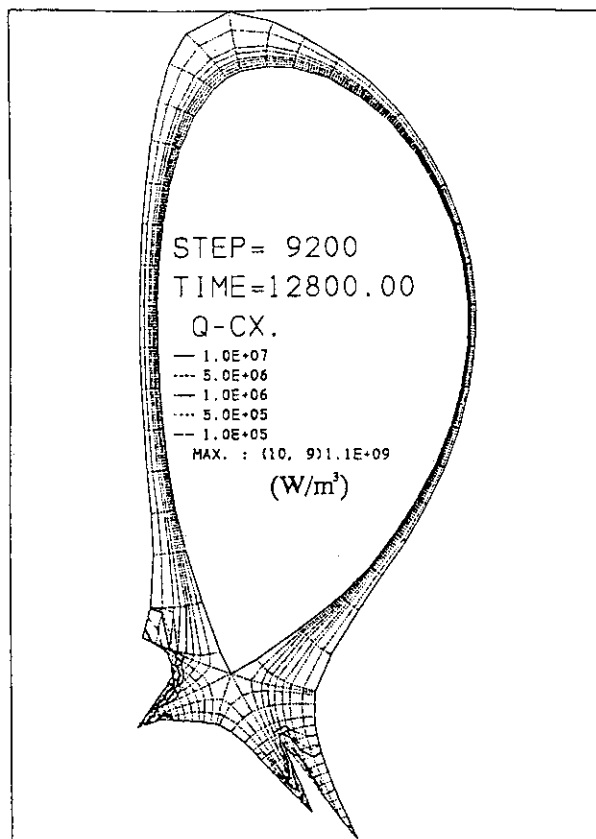


図. A-7-(e)荷電交換損失

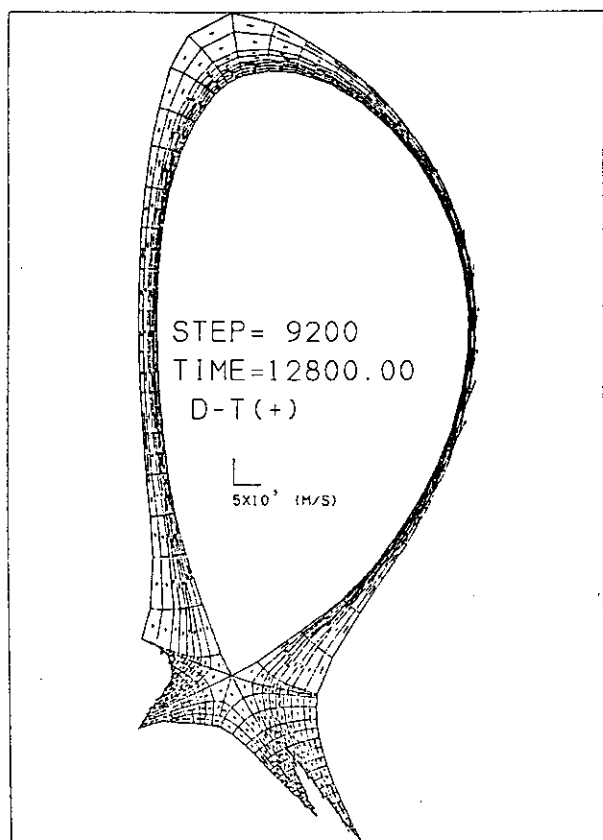


図. A-7-(f) D-T速度分布

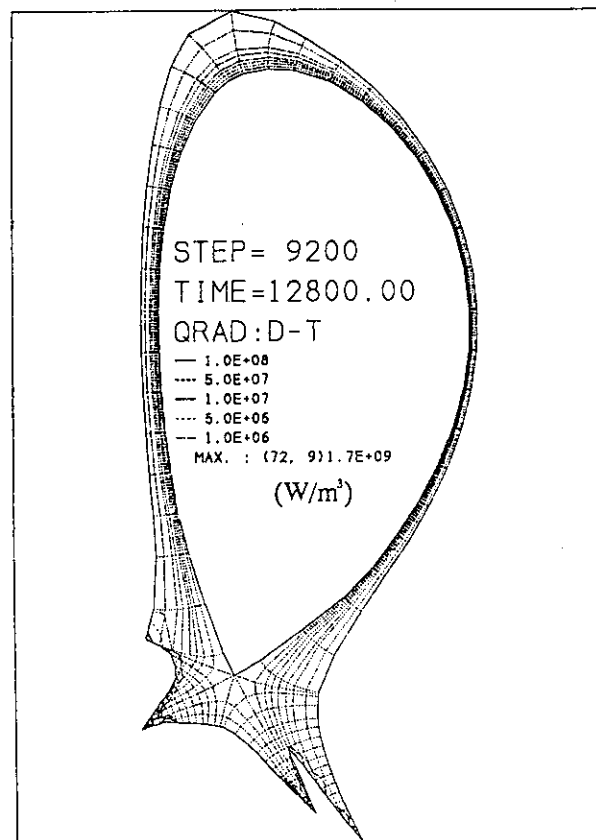


図. A-7-(g)放射損失

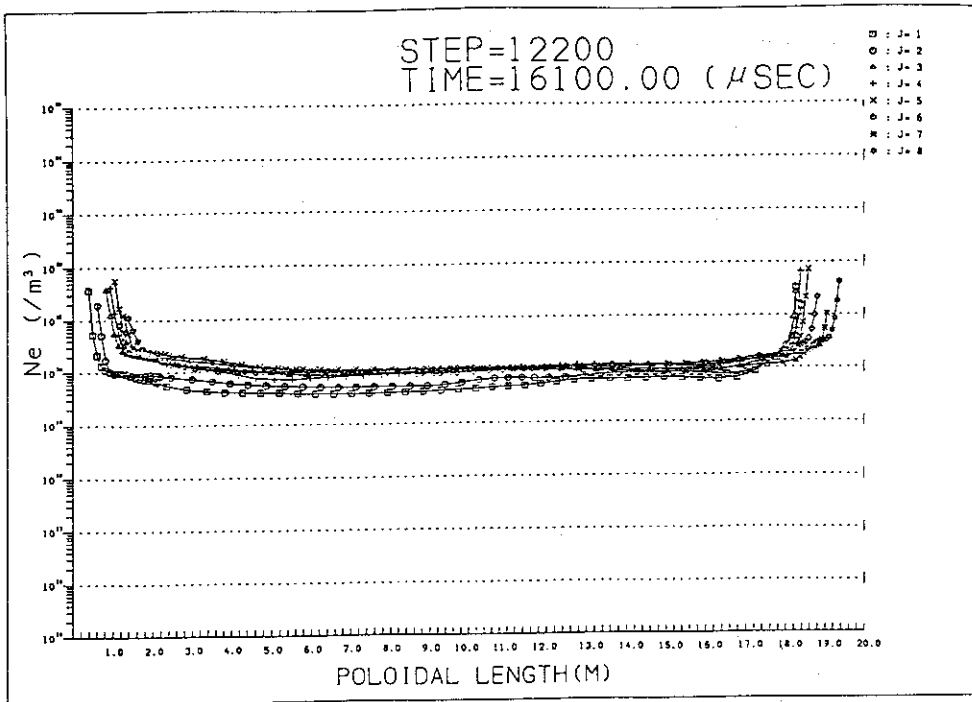


図. A-8-(h) 電子密度分布

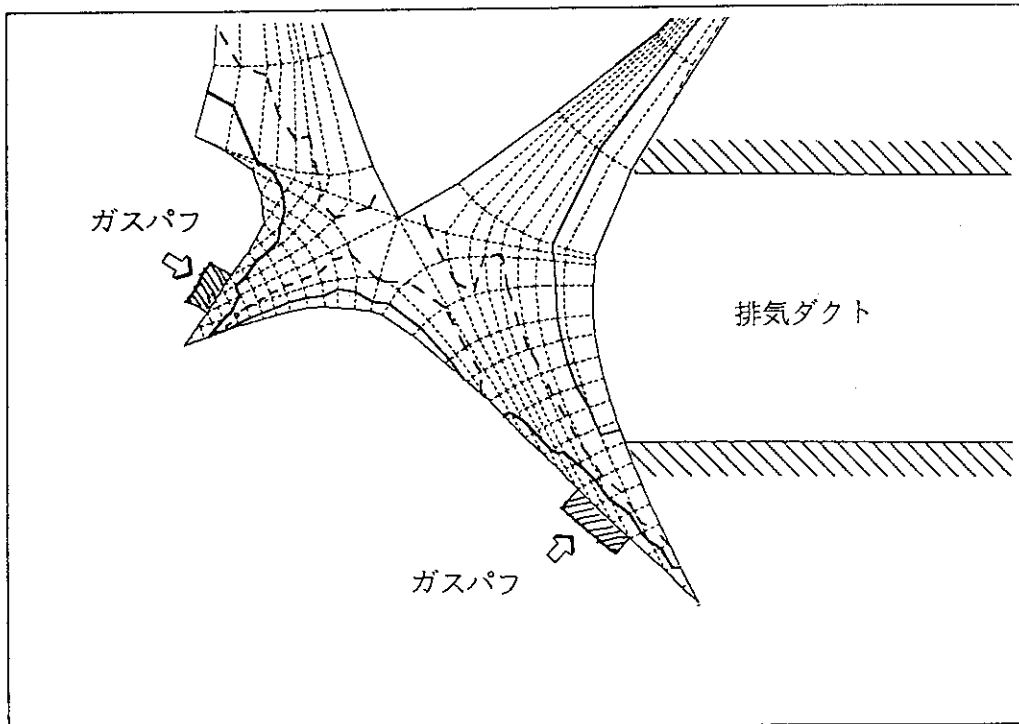


図. A-8-(i) ダイバータ部分拡大図

表 A-8

Run No.	PRNU
ダイバータ構造	プレナム型
ガスパフ方法	<p>プレナム内面の全面よりガスを噴出 D_2パフ量 (内側,外側)=(2Γ,1.5Γ) Fe^+パフ 無し。</p> <p style="text-align: right;">$\Gamma=2.5 \times 10^{23}$(molecules/sec)</p>
アルベド	0.96
プラズマ断面分布図	図 A-8
熱流束分布図	無し
結果	<p style="text-align: center;">ダイバータ性能</p> <p>ダイバータ板表面のプラズマ温度 20eV以上 ダイバータ板の熱負荷 - ※プラズマ密度分布に問題が生じた</p> <p style="text-align: center;">詳細</p> <p>プレナム部分が余りにも高密度になり過ぎた。高密度の部分が周辺にも拡大していつ為にSOLの密度も高くなり過ぎて、炉心プラズマからSOLへの粒子に拡散に支障をきたす。</p> <p>プラズマ粒子は、プレナム部分に滞留していてダクトから排出されにくい傾向がある。</p> <p>ダイバータの特性はスロット型と似ている。スロット型ダイバータと同様にプレナム部分の高密度化と排気の困難の二重の障害がある。</p>

Comment.

スロットやプレナムのプラズマを効果的に中性化できれば二重の障害は一度に片付くと考える。

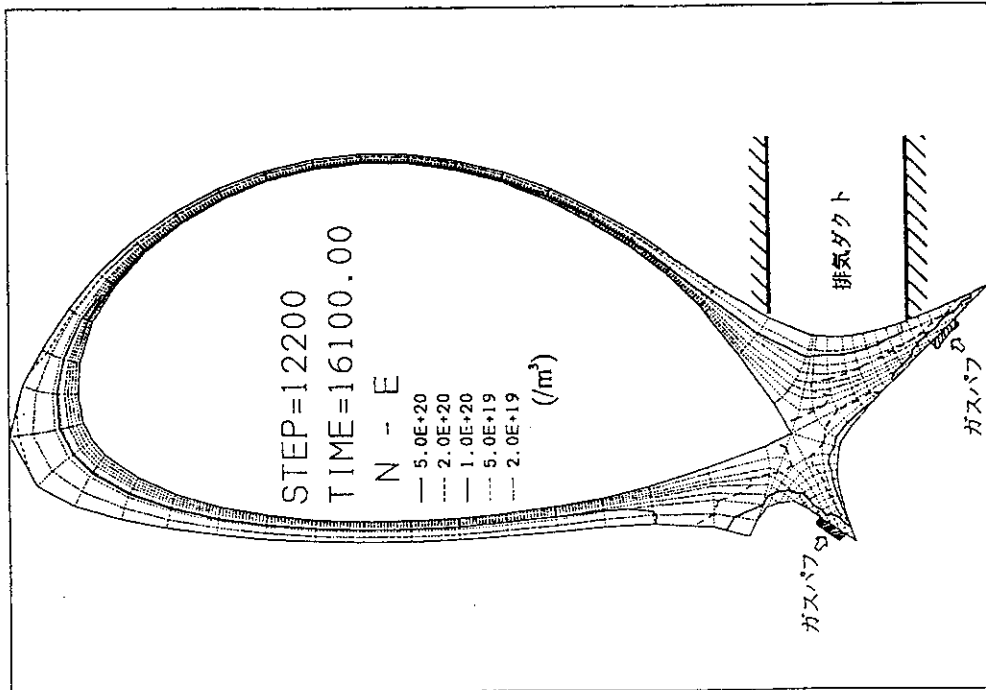


図. A-8-(a) 電子密度分布

解析条件
 プレナム型
 D_2 バフ量 (内側, 外側) = $(5.00 \times 10^{23}, 3.75 \times 10^{23})$
 Fe バフ量 (内側, 外側) = $(0.00 \times 10^{23}, 0.00 \times 10^{23})$
 排気能力 アルベド = 0.96

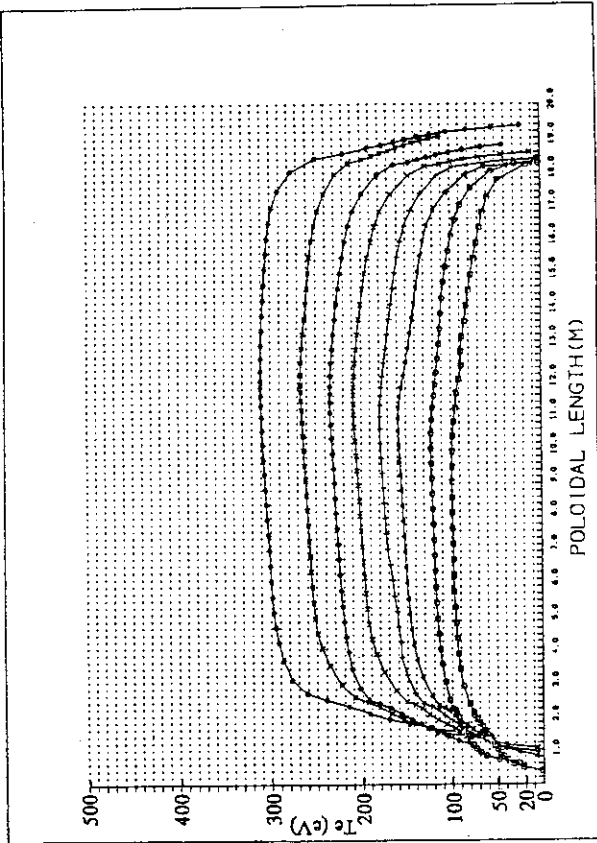


図. A-8-(b) 電子温度分布

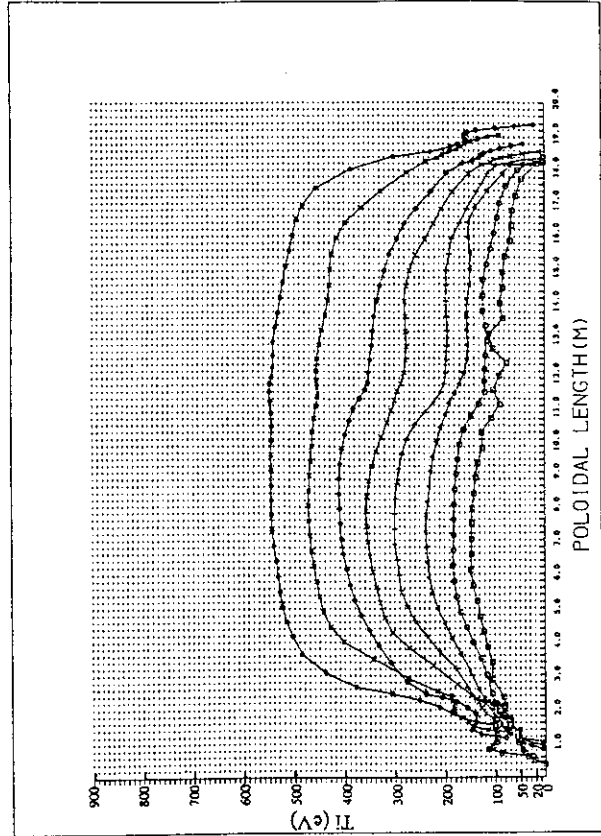


図. A-8-(c) イオン温度分布

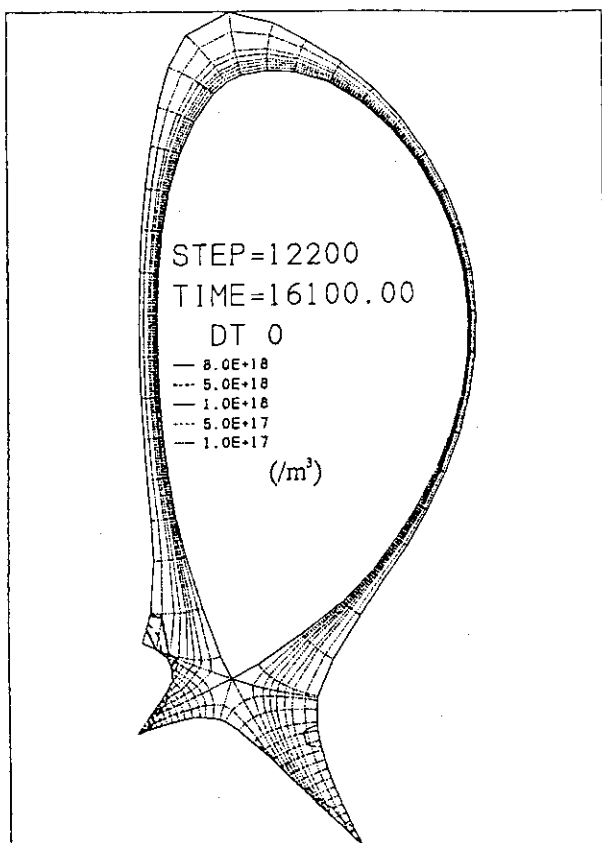


図. A-8-(d)中性粒子密度分布

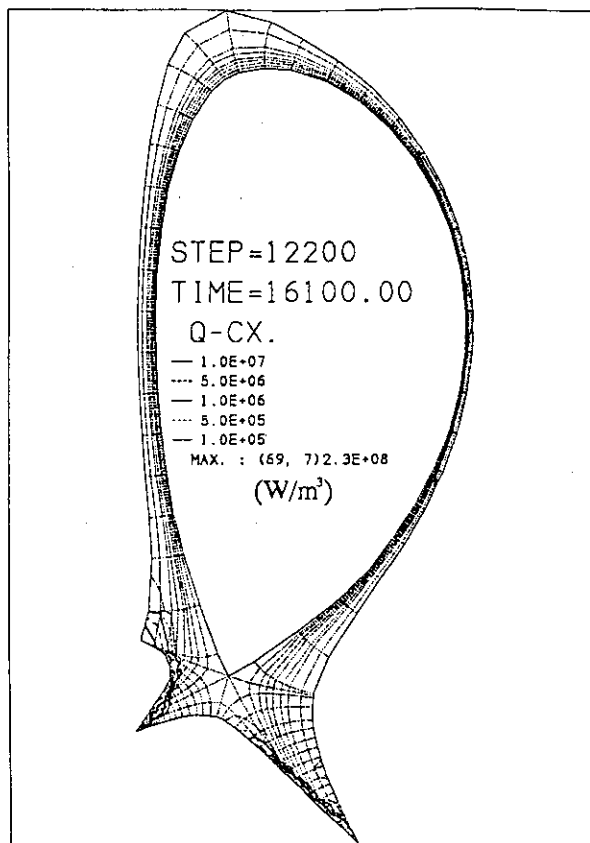


図. A-8-(e)荷電交換損失

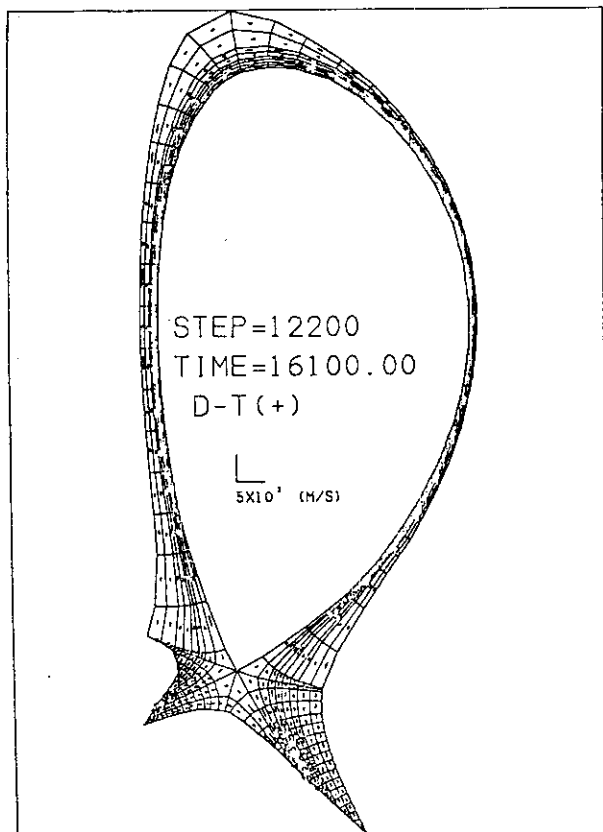


図. A-8-(f) D-T速度分布

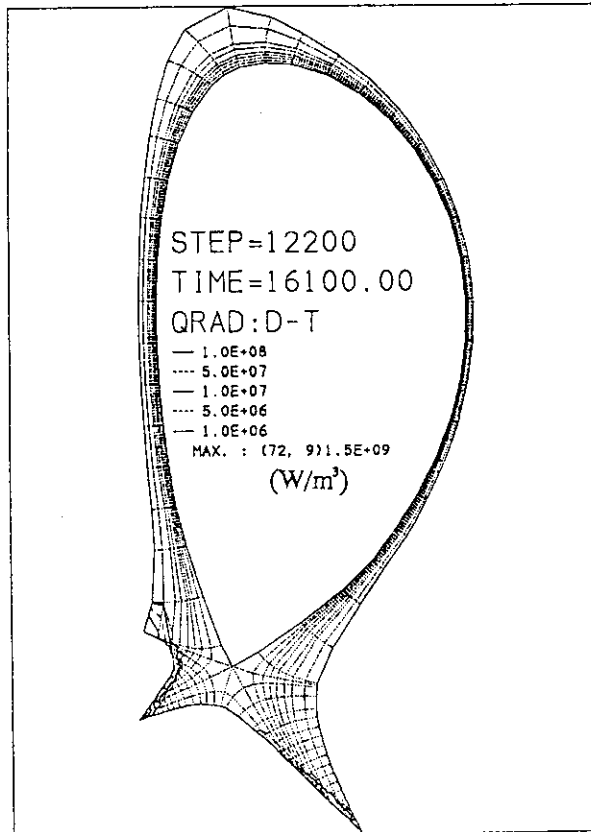


図. A-8-(g)放射損失

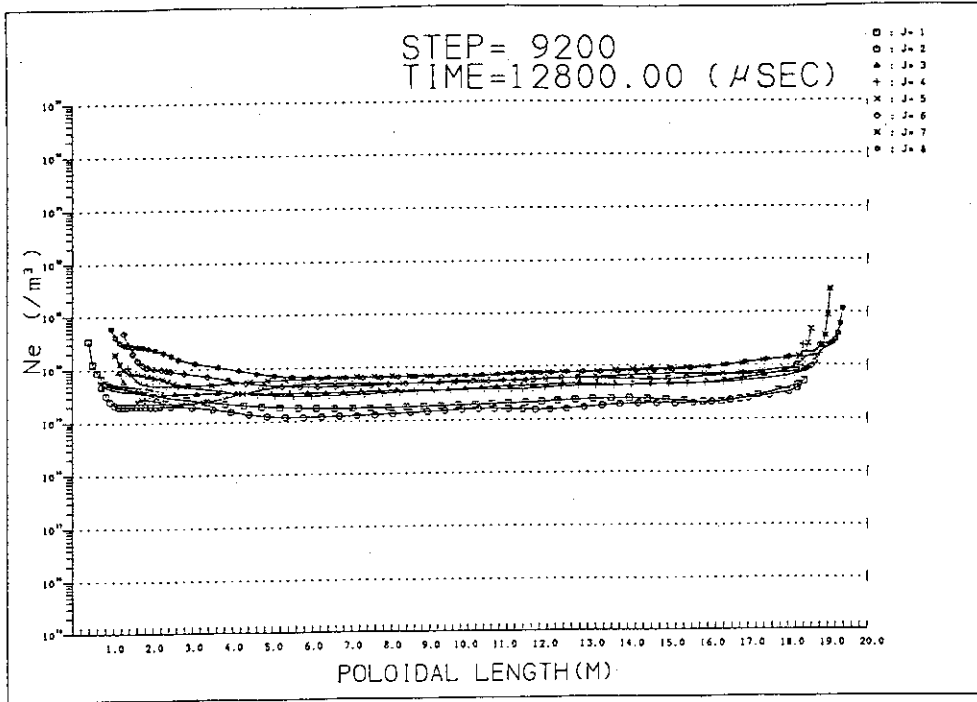


図. A-7(h) 電子密度分布

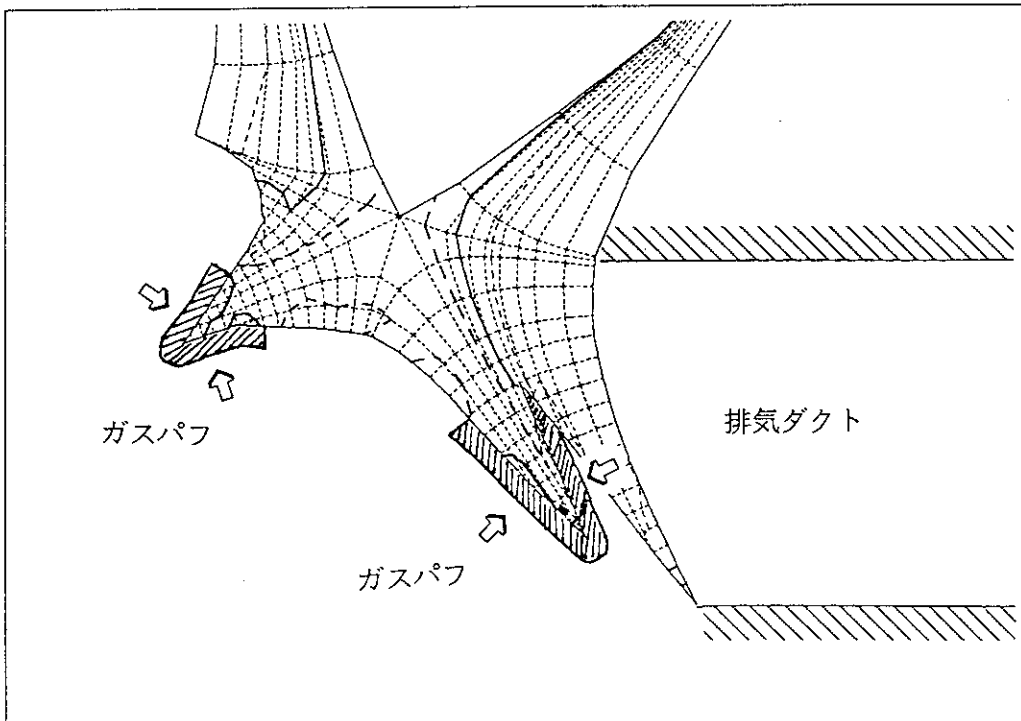


図. A-7(i) ダイバータ部分拡大図