

JAERI-Data/Code

JP0350402

2003-012



プラズマ過渡事象解析コードSAFALYの改訂(第二部)

2003年7月

仙田 郁夫*・藤枝 浩文・閨谷 讓・多田 栄介・莊司 昭朗

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、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、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、
お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 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。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division,
Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-
gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

プラズマ過渡事象解析コード SAFALY の改訂（第二部）

日本原子力研究所那珂研究所 I T E R 開発室

仙田 郁夫*・藤枝 浩文・閨谷 譲・多田 栄介・莊司 昭朗

(2003年6月12日受理)

トカマク核融合プラズマのシステム応答解析を目的に開発された SAFALY コードの改訂を行い、コードの解析パラメータについて感度解析を実施した。報告書は2部で構成される。第一部ではプラズマ及びプラズマ対向機器のモデル化、解析パラメータの詳細、及び2001年ITER最終設計報告書の標準的プラズマを用いた解析結果について報告した。本書第二部では、プラズマの初期状態や解析パラメータについての詳細な感度解析の結果を報告する。これらの感度解析の結果は、SAFALY コードを用いた解析結果の妥当性や保守性を検討する際の重要な情報となる。

感度解析は、プラズマ初期状態に対する感度解析と解析パラメータに対する感度解析に分けて実施した。プラズマに加わる擾乱として、燃料過剰注入、プラズマ閉じ込め性能改善、及び過剰外部加熱を検討した。はじめに、プラズマ初期状態に対する感度解析を実施し、初期状態と擾乱発生時のプラズマ応答の相関を検討した結果をもとに、各擾乱に対して最も大きな出力増加を与える初期状態を求める。次に、この初期状態を用いて、SAFALY コードの解析パラメータに関する感度解析を行い、解析パラメータの変化がプラズマ応答に与える影響を評価した。

Revised Version of Tokamak Transient Simulation Code SAFALY (2)

Ikuo SENDA*, Hirobumi FUJIEDA, Yuzuru NEYATANI,
Eisuke TADA and Teruaki SHOJI

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

(Received June 12, 2003)

The SAFALY code has been developed to simulate transient events in Tokamaks. The code was improved recently and the sensitivity analyses on the parameters in the code were carried out. The results of these works are summarized in the report, which is composed of two volumes. In the first volume, the formulation and the parameterizations in modeling the plasma and in-vessel components are described. This report describes the results of the sensitivity analyses as the second volume of the report. The results of the sensitivity analyses are important information to examine the validity of simulation results obtained by the SAFALY code.

The sensitivity studies were performed in two steps. In the first step, the responses of plasmas to disturbances were analyzed for various initial conditions. For each disturbance, the initial condition of the plasma, which gave the largest increase of the fusion power, was identified. In the second step, by using the initial conditions derived in the first step, the sensitivities of the plasma responses to the variation of the parameters in the SAFALY code were analyzed. In the analyses, the excessive fueling, the abrupt improvement of the plasma energy confinement and the excessive auxiliary heating were considered as plasma disturbances.

Keywords: Tokamak, Safety Analysis, Transient Analysis, Plasma Facing Components, ITER, SAFALY

* Toshiba Corporation

目次

1. 概要	1
2. 解析パラメータ	2
3. 初期状態に関する感度解析	5
4. 解析パラメータに関する感度解析	9
5. まとめ	33
参考文献	35

Contents

1. Overview	1
2. Simulation Parameters in the SAFALY Code	2
3. Sensitivity Studies on Initial Conditions	5
4. Sensitivity Studies on Simulation Parameters in SAFALY Code	9
5. Summary	33
References	35

This is a blank page.

1. 概要

核融合装置の過渡事象解析を目的に開発された SAFALY コードの改訂を実施した。SAFALY コードは、プラズマに擾乱が加わった際のプラズマ及びプラズマ対向機器の過渡応答を解析し、核融合出力やプラズマ対向機器負荷の変動を評価することを目的としている。そのため SAFALY コードの解析では、プラズマ、プラズマ対向機器及び制御系のモデル化に起因するパラメータを数多く設定する必要がある。これらパラメータのうちあるものは、既存トカマク装置の物理データベースや機器の設計仕様により与えられるが、確定できないパラメータも多くある。これらのパラメータに対する、核融合出力やプラズマ対向機器負荷の感度解析の結果は、解析結果の妥当性や保守性を検討する際、重要な情報となる。

報告書は二部から構成される。第一部ではトカマク装置のモデル化、及び改訂作業の詳細について報告した[1]。第二部（本書）では、プラズマやプラズマ対向機器のモデル化に起因するパラメータ、及び制御などに関する解析条件を与えるパラメータに対する感度解析の結果を報告する。

解析では、ITER 工学設計活動の 2001 年最終設計報告書に記載されたプラズマやプラズマ対向機器の設計に基づいて作成したモデルを使用した[2,3]。図 1 にプラズマ対向機器の配置を示す。PFC#1～PFC#17 までがプランケットモジュールであり、そのアーマー材料はベリリウムである。PFC#18～PFC#25 は、ダイバータカセットのプラズマ対向部であり、#18、#19、#25 はバッフル、#21、#22、#23 はドーム部、#20、#24 はダイバータターゲット板をモデル化したものである。SAFALY コードはプラズマ対向機器を層構造で簡易モデル化する。図 2. 1 は、ITER 工学設計の作業文書 SADL-3 に記載されたプランケットモジュールのモデルである[3]。図 2. 2～2. 4 は、ITER 工学設計活動で使用されてきたダイバータ部のモデルである。

感度解析は、プラズマ初期状態に対する感度解析と解析パラメータに対する感度解析に分けて実施した。プラズマに加わる擾乱として、燃料過剰注入、プラズマ閉じ込め性能改善、及び過剰外部加熱を検討した。はじめに、各擾乱について、プラズマ初期状態に対する感度解析を実施する。この結果、擾乱とその擾乱に対して最も大きな出力変動を与える初期状態の対が得られる。次に、最大出力変動を与える初期状態を用いて、プラズマ、プラズマ対向機器、及び制御系のパラメータに対する感度解析を実施する。

次の第 2 章では、SAFALY コードがもつパラメータの概要について述べる。第 3 章では、プラズマ初期状態に対する感度解析結果を報告する。第 4 章においては、プラズマ、プラズマ対向機器、及び制御系のモデル化に起因する解析パラメータに対する感度解析の結果を報告する。解析上の注意点や今後の課題について第 5 章にまとめる。

2. 解析パラメータ

SAFALY コードの解析に必要な入力パラメータを表 1、表 2 にまとめる。表中の標準解析値は、2001 年 I T E R 設計報告書 (F D R) に基づいた解析に於いて、検討の標準値として使用したパラメータである。参照節の欄には、該当するパラメータの感度解析結果を記載する次章以降の節番号を記した。

本報告書の感度解析では、プラズマ形状を 2001 年 FDR のデザインシナリオ 1 と同じに固定した[2]。初期状態のプラズマ閉じ込めモードは ELMYH モードとする。形状に関するパラメータは、表 1 の項目 1 プラズマ幾何形状に記されたとおりである。形状以外のプラズマ初期状態を決めるパラメータとして、核融合利得 (Q)、プラズマ核融合出力 (WLN)、プラズマ電流 (PIP) があり、これらの値で与えられる初期状態に擾乱が加わったときの出力変動について次の 3 章で検討する。その他の解析パラメータについて、プラズマ応答の感度解析結果を 4 章で報告する。

トカマク装置モデル化の重要な要素として、プランケット、ダイバータなどプラズマ対向機器の冷却水温度、及び冷却水と構造物間の熱伝達係数がある。SAFALY コードでは、既存の信頼性のある冷却解析コードによる詳細解析で得られる冷却水温度や熱伝達率の結果を入力データとして使用して、プラズマ対向機器の温度分布解析を行う。本来の手順では、冷却解析と SAFALY による過渡解析を繰り返し、冷却水温度と熱伝達率を求める必要があるが（報告書第一部参照 [1]）、次章以降の感度解析では I T E R の標準プラズマを用いて求めた冷却水温度と熱伝達率を用いる。

表 1. プラズマに関するパラメータ（入力ファイル：input_plasma）

変数	概要	標準値	参照節
1, プラズマ幾何形状			
R	プラズマ大半径(m)	6.2	
PLARAD	プラズマ小半径(m)	2.0	
XKX	非円軽度	1.7	
XKA	非円形度 (IPB98y2 スケーリング則に使用[4])	1.726	
DLT	三角度	0.33	
BTOR	中心トロイダル磁場 (T)	5.3	
IDIV	ダイバータ配位、1=ダブルヌル、2=シングルヌル	2	
2, S O L に関するパラメータ			
ISOL	PFC 表面材料昇華のプラズマへの影響評価に関するフラグ：考慮する(=1)、しない(=0)	1	4.1
EGRAD	プラズマ周辺での輻射パワー初期値(MW)	19.0	4.2
FRPLI	コア線輻射の周辺輻射パワーに対する比	0.5	4.3
ENEG	周辺プラズマ電子密度のコア電子密度に対する比	0.3	
ENDV	ダイバータ電子密度のコア電子密度に対する比	0.3	4.4
ASPUT	スパッタされた PFC 表面材料のコアプラズマ混入比を評価する因子：混入比～（スクリーニング因子） ^{ASPUT}	1.5	4.5
3, 時間発展に関するパラメータ			
ICAL1	PFC 考慮に関するフラグ：考慮する(=1)、しない(=0)	1	4.6
ICAL2	時間発展に関するフラグ：考慮する(=1)、しない(=0)	1	
DTIME,STIME	時間ステップ、終了時間 (秒)		
FZ1, FZ2	コアから漏れたプラズマが PFC 材料をスパッタさせ、その不純物がコアプラズマに進入する割合。FZ1・FZ2 の積で使用される。	0.01 1.0	4.7

変数	概要	標準値	参照節
RPL	アルファ粒子リップル損失割合	0.014	
RPK	アルファ粒子負荷ピーキング因子	20.5	
SWDT	dW/dt 項の因子：入れない(=0)、入れる(=1.0)	0.0	4.8
CI	イオンエネルギー閉じ込め時間の電子エネルギー閉じ込め時間に対する比	1.0	4.9
CPF	DT 粒子閉じ込め時間の電子エネルギー閉じ込め時間に対する比	2.0	4.10
CP	不純物粒子閉じ込め時間の電子エネルギー閉じ込め時間に対する比の初期値。ベリリウムの電子密度比を FBE にする収束計算において変数として取り扱われる。	結果は要注意	
CA	ヘリウム粒子閉じこめ時間の電子エネルギー閉じ込め時間に対する比	5.0	4.11
EPSNEW	初期配位計算時の収束条件	10^4	
GK	シンクロトロン輻射の壁反射率	0.8	4.12
ISCALE	初期配位の閉じこめモード：5=Hモード、6=Lモード	5	
FACTLH	L-H遷移のスケーリング則マージン値	1.0	
FACTHL	H-L遷移のスケーリング則マージン値	0.31	
ATL	Lモードでの温度分布パラメータ	2.15	
APL	Lモードでの密度分布パラメータ	0.1	
ATH	Hモードでの温度分布パラメータ	2.15	4.13
APH	Hモードでの密度分布パラメータ	0.1	4.14
4, 初期状態パラメータ			
Q	核融合利得：同一出力では、高 Q で高密度・低温度、低 Q 値で低密度・高温度になり、これら初期状態により擾乱に対する応答が異なるため要注意。	初期値	3
WLN	核融合出力初期値 (MW)	初期値	3
CHH0	閉じ込め時間改善因子初期値 (収束条件)	1.0	
TI	イオン温度の計算初期値(keV)、但し初期配位の計算で、HH 因子についての収束計算で収束変数として扱われる。		
PIP	プラズマ電流初期値 (MA)	初期値	3
Q0	安全係数中心値	1.0	
XLI	内部インダクタンス (li3)	0.86	
FBE	ベリリウムの電子密度比初期値 (収束条件)	2.0	
FC	上から、炭素、酸素、鉄、銅、タンクステン、及びアルゴンイオンの電子密度に対する比の初期値。		
FO			
FE	ICAL1=0 の場合、これらが不純物の電子密度比になるよう初期状態を求める。ICAL1=1 の場合、入力値は無視され、PFC 表面でスペッタされた不純物のコア流入割合から、これらの不純物密度を求める。		
FCU			
FW			
FAR	アルゴンの電子密度比初期値 (収束条件)	0.107	
5, プラズマ制御パラメータ			
ICN1	DT 燃料供給制御 : 0=off、1=on	0	
PFUS0	出力目標値(MW)	700	
GS1	制御ゲイン : SIO*GS1*(Pf/PFUS0-1.0)、SIO は燃料供給初期値	-10.0	4.16,
GF_LIM	供給 DT 燃料最大値 (1/m3/s)	$5.8 \cdot 10^{19}$	4.17
ICN2	加熱制御 : 0=off、1=on	0	
GS2	制御ゲイン (PFUS0 を出力目標値とする)	-3.0	4.18,
PMAX	最大加熱パワー (MW)	73.0	4.19
PIP_REF	電流制御目標値 (MA)	15 or 17	
GIP	制御ゲイン: Flux = - F0*(1 + GIP*(Ip - PIP_REF))	-50.0	
VS_LIM	供給磁束変化率最大値 (Wb/s=V)	2.1	
ICN3	アルゴン供給制御 : 0=off、1,2=on	0	4.15
GAR_REF	目標値 (ICN3=1 : Zeff、=2 : ダイバータ熱流束)	1.7 / 80.0	
GPUF_AR	制御ゲイン	-5.0/100.0	
CGR	密度限界のグリーンワルド密度比		

変数	概要	標準値	参照節
C_BN	圧力限界の規格化ベータ値に対する比		
C_SID	DT 燃料供給の一時遅れ時間= C_SID*TAUPF+TAU_GP	0.1	4.16
TAU_GP	TAUPF は DT の粒子閉じこめ時間 (ICN1=1 の場合有効)	0.0	4.17
C_EID	加熱制御の一時遅れ時間= C_EID*TAU_SD+TAU_AUX	1.0	4.18
TAU_AUX	TAU_SD はビームの熱化時間 (ICN2=1 の場合有効)	0.0	4.19
C_SIMP	スペッタされた PFC 材料のコアプラズマ流入遅れ時間 = C_SIMP*TAUP	1.0	4.20
6、外部加熱パラメータ			
FNB	N B I 加熱の全加熱に対する割合	0.45	4.21
FMA	ビーム質量数	2.5	
EWN	ビームエネルギー (keV)	1000	
ZBEAM	ビーム粒子の電荷数	1.0	
SNBI	入射パラメータ ($R_{tang} = RP - AP/SNBI$)	2.5	
COEF_NBI	NBI 電流駆動効率の改善因子	1.0	
FRFE	RF 加熱の電子加熱割合	1.0	
FOMCD_RF	RF 電流駆動の Figure of merit (A/W/m ²)	0.0	
7、擾乱パラメータ 1			
SXNI	時刻 0 でのイオン密度擾乱 (1.0 が擾乱なし)	1.0	
SXNB	時刻 0 でのアルファ粒子密度擾乱 (1.0 が擾乱なし)	1.0	
SXNZ	時刻 0 での不純物粒子密度擾乱 (1.0 が擾乱なし)	1.0	
STI	時刻 0 でのイオン温度擾乱 (加算的, keV)	0.0	
STE	時刻 0 での電子温度擾乱 (加算的, keV)	0.0	
8、擾乱パラメータ 2 (時間変化入力)			
pnbi	NBI 加熱 (MW)	擾乱条件	
prf	RF 加熱 (MW)	擾乱条件	3
fuel	DT 燃料供給 (SI0=初期 DT 供給量に対する比)	擾乱条件	3
ch	閉じこめ改善の増減	擾乱条件	3
flux	磁束供給 (初期の磁束供給量に対する比)	擾乱条件	

表2、プラズマ対向機器に関するパラメータ（入力ファイル：input_pfc）

変数	概要	標準値	参照節
1、PFCに関するパラメータ			
screening factor	各 PFC 表面で発生する、昇華・スペッタリングによる不純物、ダストからの DT 粒子がコアプラズマに進入する割合。	blanket: 10^{-2} divertor: 10^4	4.22
f-delay	各 PFC 表面で発生する、昇華による不純物、ダストからの DT 粒子がコアプラズマに進入する一時遅れ時間 $delay\ time = f_delay * C_SIMP * TAUP$	1.0	4.23
density-dust	表面のダスト密度 (1/m ²)	$8.019 \ 10^{22}$	4.24
peaking factor	熱負荷のピーフィング因子	blanket: 1.0 divertor: 標準運転で $5\text{MW}/\text{m}^2$ に調整	4.25
PFC モデル	レイヤー構成、各レイヤーの厚さ、材料、核発熱分布、冷却水温度、熱伝達係数、ギャップ/冷却パスの割合	SADL-3	

3. 初期状態に関する感度解析

3. 1. 概要

プラズマ擾乱として、燃料過剰注入、プラズマエネルギーの閉じ込め改善、過剰外部加熱を検討する。各擾乱の概要は以下の通りである。

- 1) 燃料過剰注入：コアプラズマに供給される DT 燃料ガスが、制御とは無関係に、増加する事象を検討する。DT 供給量の増加はステップ変化とする。また、検討では出力が最大になる DT 供給量を求める。
- 2) 閉じ込め改善：閉じ込め改善因子 (H_H) が、初期値から 1.0 増加する事象を検討する ($\delta H_H = 1$)。閉じ込め改善因子の変化はステップ変化とする。
- 3) 過剰外部加熱：外部加熱パワーが、制御とは無関係に増加する事象を検討する。以下の検討では、中性粒子ビーム加熱パワーを初期値に固定し、全外部加熱パワーの上限を 130MW として高周波加熱が上限まで増加する事象を検討した。外部加熱パワーの変化はステップ変化とする。

各事象の振る舞いは初期状態により異なり、最大出力変動は初期状態に依存する。以下では、初期状態と擾乱発生時の出力変動の関係を検討し、各擾乱に対して出力が最大となる初期状態を求める。なお、本章の解析は、プラズマ電流に対するフィードバックを有効にし、その他のフィードバック制御は無効にして行った。

初期状態を与える変数として、核融合利得 (Q 値)、核融合出力 (P_{FUSION})、プラズマ電流を使用した。その他のプラズマ配位に関するパラメータは、2001 年 FDR のデザインシナリオ 1 の値を使用する (表 1 参照)。プラズマ電流初期値は 15MA と 17MA の 2 ケースを検討した。各プラズマ電流初期値についてポップコーン図のプラズマ運転領域を求め、代表的運転点の (Q 値、 P_{FUSION}) を初期値として、擾乱に対するプラズマの応答を解析する。初期状態のプラズマ運転領域は、安定した燃焼状態を維持できる条件として、以下の項目を満たすとした。

- i) H モード則に対して閉じ込め改善因子が 1 であること : $H_H = 1$
- ii) 電子密度とグリーンワルド密度の比が 1 以下であること : $n_e/n_{GW} \leq 1$
- iii) 外部加熱が 73MW 以下であること : $P_{AUX} \leq 73\text{MW}$
- iv) 規格化 β 値が 2.5 以下であること : $\beta_N \leq 2.5$
- v) 核融合出力が 840MW 以下であること : $P_{FUSION} \leq 840\text{MW}$

核融合出力については、プラズマ制御系の出力制御は目標値を 500MW 又は 700MW として制御を行うが、最も出力が大きくなる場合を想定して、700MW 出力に対して、10%の制御変動と 10% の計測誤差を考慮して、初期状態の最大出力を 840MW とした。図 3、図 4 がそれぞれプラズマ電流 15MA、17MA の場合のポップコーン図である。ハッチした領域は、プラズマ運転領域を示す。

先に述べた擾乱 1) から 3) をプラズマに加えたとき、核融合出力上昇が発生するが、ある場合はプラズマ内に不純物が蓄積し自然に出力が低下し、又ある場合はディスラプション条件に達

し、運転が終了する。以下の検討では、ディスラプション条件として密度限界とベータ値限界を考慮した。また、それぞれのディスラプションについて、従来の条件と保守的な条件を以下のように設定する。

A) 密度限界、従来の条件 : $n_e/n_{GW}=1.0$

保守的条件 : $n_e/n_{GW}=1.5$

B) ベータ限界、従来の条件 : $\beta_N/q_{95}=1.0$

保守的条件 : $\beta_N/q_{95}=1.5$

従来の条件とは、既存装置の実験データから得る条件で、既存装置と同様の実験環境では、従来の条件でディスラプションが発生するか、又はプラズマ閉じ込め性能の劣化が起こり、それ以上の出力上昇は起こらないと考えられる。しかし、従来の条件を越える可能性を否定できないため、保守的な条件を設定し、その時の出力を評価した。密度については、既存装置ではペレット入射によりプラズマ中心に燃料を供給し中心でピークした密度分布をつくると、 $n_e/n_{GW}>1.5$ でも運転が可能である事が知られているが、現設計の ITER が持つ燃料供給装置では中心でピークした密度分布を作ることが出来ないため、保守的な密限界を $n_e/n_{GW}=1.5$ とした。また、ベータ値限界の保守的条件として、理想 MHD モードの圧力限界を使用する。

3. 2. プラズマ電流初期値が 1.5 MA 場合

図 3 の運転領域の状態を初期状態として、擾乱に対するプラズマの応答を解析した。代表的な初期状態として図に○印で示した 1-a～1-d, 1-f を選び、プラズマの応答を比較した。

1) 燃料過剰注入に対する応答

図 5 は、図 3 の 1-b 点を初期状態として、燃料過剰注入量を変化させたときのプラズマ応答の比較である。過剰注入量は初期状態の定常注入量 $S_{DT,0}$ ($=1.95 \cdot 10^{19} m^{-3}s^{-1}$) 対する比で与えられる。図 5 ①に出力の時間発展を示す。過剰注入量が増加するに従い出力が上昇するが、多く入りすぎるとプラズマが冷えてしまい出力は上昇しない。図 5 ②で注入量が $6 \times S_{DT,0}$ の場合、約 3 秒で L モードへの遷移が起きている。図 5 ③にグリンワルド密度で規格化した電子密度の時間発展を示す。図 3 から明らかなように、1-b 点は初期状態に於いてすでに従来の密度限界条件、 $n_e/n_{GW}=1$ 、に達している。燃料注入量が増加すると、注入量が多い場合 1 秒程度の短時間で保守的な密度限界条件に達する。図 5 ③は、燃料過剰注入時の (n_e/n_{GW} - 核融合出力) の軌跡を比較したものである。最も核融合出力が上昇するのは、適度の燃料が注入され、電子密度が保守的な密度限界を超えない程度に上昇し、そのまま出力が増加する場合である。図 5 ③より、1-b 点を初期状態とした場合、過剰注入量が $1.5 \times S_{DT,0}$ のとき、出力が最も大きくなる。

図 3 の代表点について、保守的な密度限界条件を課したとき最も出力が大きくなる条件を求めた。図 6 ①は、これらの (n_e/n_{GW} - 核融合出力) の軌跡である。これより、1-b 点を初期状態とした場合に出力が最も大きいといえる。また、図 6 ②は (電子温度 - 電子密度) の軌跡、図 6 ③はプラズマ電流の時間変化を示す。このプラズマ電流の変化では、ベータ値の変化による自発

電流の変化の影響が支配的である。プラズマ運転点は燃料過剰注入により、低温度・高密度に移動する。このため、燃料過剰注入では、より高温・高加熱の初期状態のとき、出力上昇が大きくなることが理解できる。

2) 閉じ込め改善に対する応答

図3の代表点を初期状態として、閉じ込め改善因子が1.0から2.0に増加した場合($\delta H_H=1$)のプラズマの応答を図7にまとめる。図7①は、出力の時間変化、図7②はベータ限界を表す指數(β_N/q_{95})の時間変化である。閉じ込め改善では、擾乱発生後急速に β 値が上昇し、ベータ限界に達し、ディスラプションで運転が終了する。図7③に、 $(\beta_N/q_{95}-出力)$ の軌跡を示す。従来のベータ限界条件および保守的なベータ限界条件を課した場合の両方について、1-b点を初期条件としたときに出力が最も大きくなる。図7④は(電子温度-電子密度)の軌跡を比較したものである。閉じ込め改善では、高温・やや低密度に運転点が移動する。このことより、より高密度の初期状態の方が、閉じ込め改善では出力上昇が大きいことが理解できる。

3) 過剰外部加熱に対する応答

外部加熱装置の不具合等により、外部加熱が過剰になる擾乱に対する応答を検討した。ここでは、高周波加熱装置による加熱が増加して、全加熱パワーが130MWになる場合を解析した。高周波加熱は電子サイクロトロン加熱を想定して、電子加熱とし、駆動電流は無いものとした。これは、SAFALYコードでは中性粒子加熱を選択するとその電流駆動が考慮されるため、電流駆動の効果と加熱の効果を分離し、加熱によるプラズマの応答を解析するためである。

図8は、図3の各初期状態に対して擾乱が加わったときの応答を比較したものである。核融合出力は、大きく増加することはなく、ベータ限界指數は多少増加し、電子密度のグリンワルド密度に対する比はむしろ減少する。図8④は、(電子温度-電子密度)の軌跡を比較したものである。加熱の増加で、運転点は高温・低密度に移動する。これは、加熱により温度は上昇するものの、閉じ込め性能が劣化するためである。これらの結果より、過剰外部加熱では大幅な出力上昇に至らないといえる。

3. 3. プラズマ電流初期値が17MAの場合

プラズマ電流17MAの初期状態を、図4の運転領域内の点として、擾乱に対するプラズマの応答を解析した。運転領域の代表点として、図4の○点を初期状態としたときの応答を比較したものを図9に示す。擾乱に対するプラズマの応答は、プラズマ電流15MAの場合とほぼ同様である。

燃料過剰注入の場合、注入量が多すぎると速く密度限界条件に達してしまい大きな出力上昇にはならない。密度限界として、保守的な密度限界の条件($n_e/n_{GW}=1.5$)を適用した。図9①は、図4の各初期状態に対して、密度が密度限界近くまで上昇する場合を比較したものである。この

結果より、2-d 点を初期状態として $2.8 \times S_{DT,0}$ ($=5.26 \cdot 10^{19} m^{-3}s^{-1}$) 程度燃料注入した場合が最も出力が大きくなる。このことは、3. 2 節で得た、燃料過剰注入では高温・高加熱状態を初期状態とした時に出力上昇が大きくなるという結果から理解できる。

閉じ込め改善、 $\delta H_H=1$ 、での $(\beta_N/q_{95} - \text{出力})$ に於ける軌跡を図 9 ②に示す。従来のベータ限界条件、保守的なベータ限界条件とともに、2-b 点を初期状態とした場合に最も出力が大きくなる。この結果は、閉じ込め改善では初期状態が高密度である方が出力上昇が大きくなるという、3. 2 節の結果で説明できる。

過剰外部加熱により全加熱パワーが 130MW に上昇した場合について、初期状態と核融合出力の振る舞いの比較を図 9 ③に示す。プラズマ電流 15MA を初期状態とした場合と同様に、過剰外部加熱では大きな出力上昇は起こらない。

3. 4. 初期状態に関する感度解析のまとめ

以上 3. 2 節、3. 3 節の解析結果より、初期状態と擾乱に対するプラズマの応答について以下のことことがいえる。

- (1) プラズマ電流が大きく、かつ核融合出力の大きい初期状態で擾乱が発生した場合に、大きな出力上昇が起こる。
- (2) 燃料過剰注入の擾乱では、高温・高加熱の初期状態に擾乱が加わった場合に大きく出力が上昇する。プラズマ電流 17MA の初期状態では、図 4 の 2-d 点を初期状態とした場合に最も出力が大きくなる。
- (3) 閉じ込め改善の擾乱では、高密度状態に擾乱が加わった場合に出力上昇が大きくなる。プラズマ電流 17MA の初期状態では、図 4 の 2-b 点を初期状態とした場合に最も出力が大きくなる。
- (4) 過剰外部加熱の擾乱では、大きな出力上昇は発生しない。

コードの持つ解析パラメータを変化させた時の応答は初期条件に依存するが、以降では最も大きい核融合出力を与える初期条件を選定して、感度解析を行う。核融合出力が大きくなる初期状態と擾乱の組合せとして、初期状態のプラズマ電流を 17MA とし、燃料過剰注入事象では初期状態を図 4 の 2-d 点、閉じ込め改善事象では初期状態を図 4 の 2-b 点にそれぞれ選ぶ。これらの初期状態について、表 1、表 2 の SAFALY コードのパラメータに対する感度解析を実施した結果を次の 4 章で報告する。

4. 解析パラメータに関する感度解析

本章では、3章で求めた、核融合出力が大きく増加する初期状態と擾乱の組合せについて、表1・表2の解析パラメータや解析オプションについての感度解析を実施する。合計で25個のパラメータとオプションについて検討をおこない、各々につき次の三項目についてまとめる。

- i) オプション、パラメータの取り扱い：SAFALY コードの中でのパラメータ・オプションの取り扱いについてまとめる。
- ii) 解析結果への影響：解析結果、およびパラメータ・オプションが結果に与える影響をまとめる。
- iii) 関連するオプション、パラメータ：SAFALY コードの解析パラメータ・オプションで関連するものをまとめる。

特に断らない場合、以下の解析はプラズマ電流フィードバック制御を有効にし、他のフィードバック制御を無効にして行った。

4. 1. ISOL依存性

i) オプション、パラメータの取り扱い

ISOLのオプションは、プラズマ対向機器（PFC）の表面材料が昇華して発生した不純物原子の主プラズマへの流入を考慮する (=1)、又は考慮しない (=0) を選択するためのオプションである。SAFALY コードの特徴の一つは、プラズマと PFC との相互作用を考慮した解析が可能であることであり、通常 ISOL=1 を使用する。

ii) 解析結果への影響

図10①、②はそれぞれ燃料過剰注入、閉じ込め改善事象での核融合出力応答の ISOL オプション依存性を比較したものである。不純物放出の影響を見るため、ダイバータカセット部のスクリーニング因子を 0.004 にした。出力の振る舞いは、ISOL による違いが見えない。これは、PFC 表面温度が低く、不純物発生量が少ないためである。

図10③は燃料過剰注入時の内側ダイバータ板温度、図10④は昇華した PFC 表面材料原子が主プラズマに侵入する量を示す。PFC で最も高温になるのはダイバータ板であり、昇華により発生する不純物ではダイバータ板表面材料である炭素が支配的である。図10③、④より、ダイバータ表面温度が 2000 度程度から昇華により発生した不純物の主プラズマへの侵入が増加する。この結果、図10⑤に示すように、炭素原子の密度が上昇する。PFC 表面温度が上昇するか又は不純物が主プラズマに侵入しやすいパラメータ設定では、より不純物密度が上昇し輻射パワーが増加する影響が顕著になる。

iii) 関連するオプション、パラメータ

昇華した材料の主プラズマへの侵入量は、プラズマ対向面の温度と壁で発生した不純物の侵入の度合いを表すスクリーニング因子を用いて、本書第一部式(7)～(9)で与えられる。材料の昇華は、PFC表面温度が上昇すると指数関数的に増加するため、表面温度に強く依存する。この表面温度は熱負荷のピーキング因子(peaking factor)に依存することから、ISOLオプションとピーキング因子は重要な相関関係を持つ。また、スクリーニング因子は大きいほどその壁で発生する粒子が主プラズマに侵入しやすいことを意味し、主プラズマの応答に強い影響をもつ重要なパラメータである。

4. 2. EGRAD依存性

i) オプション、パラメータの取り扱い

EGRADはプラズマ周辺部での線輻射パワー初期値を与える。EGRADを用いて、主プラズマの線輻射初期値を、FRPLI×EGRADで与える。線輻射の時間変化は、データに基づくスケーリング則とその変数の時間変化を用いて評価する[1]。

ii) 解析結果への影響

燃料過剰注入時にEGRADを変化させたときの出力波形を図11①に、閉じ込め改善時の出力波形のEGRAD依存性を図11②に示す。線輻射が大きい方が出力が上昇する傾向にある。これは、輻射が増加することにより、プラズマ加熱パワーが減少し、エネルギー・粒子閉じ込め時間がともに延びるため、DTイオン密度が上昇するためである。その結果、運転点は高密度に移動する。図11③、④はそれぞれ燃料過剰注入時の主プラズマ輻射パワーと電子エネルギー閉じ込め時間の波形である。EGRADが大きい方が、輻射パワーが大きく、閉じ込め時間が長くなる。その結果、図11⑤に示すように、EGRADが大きい方がDTイオン密度が上昇する。

図11⑥は、EGRADをさらに増やした時の、 $(n_e/n_{GW} \cdot P_{fus})$ の軌跡である。先に述べたように、EGRADが増加すると運転点が高密度側へ移動するため、速く密度限界条件に達してしまい、出力上昇は低下する。

閉じ込め改善時の応答では、ベータ値の上昇が速く、輻射の効果が現れる前にベータ限界条件に達してしまうため、ベータ限界で制限される出力上限はEGRADの影響を受けない。

iii) 関連するオプション、パラメータ

主プラズマの線輻射パワーは、EGRADとFRPLIで初期値を与え、その後の時間変化をスケーリングで与える。このため、次節で検討するパラメータFRPLIと関連する。

4. 3. FRPLI 依存性

i) オプション、パラメータの取り扱い

主プラズマの線輻射パワー初期値を、EGRAD を用いて、FRPLI×EGRAD で与える。時間発展での線輻射の振る舞いは、データに基づくスケーリングで評価する[1]。

ii) 解析結果への影響

FRPLI を 0.25 から 0.75 に変化させた時の燃料過剰注入時のプラズマ応答を図 1 2 ①から④に示す。これらは 4. 2 節 EGRAD 依存性とほぼ同じ振る舞いである。FRPLI が増加すると主プラズマ輻射が増加し、閉じ込め時間が増加する。輻射の増加でプラズマ温度は低下するが（図 1 2 ③）、閉じ込め時間が増加するため DT イオン密度が増加する（図 1 2 ④）。その結果、密度上昇の効果が優り、FRPLI が大きい場合の方が出力が大きくなる。しかしながら、図 1 2 ②に示すように、FRPLI を大きく取るほど高密度に運転点が移動し、より速く密度限界条件に達するため、出力変動最大値は逆に減少する。

図 1 2 ⑤、⑥は閉じ込め改善のプラズマ応答を比較したものである。FRPLI を大きくすると、燃料過剰注入と同様に高密度の運転点が移り、DT イオン密度が増加する効果で、核融合出力が増加する。また、ベータ限界で制限される出力上限も FRPLI を大きくすることで多少上昇する。

iii) 関連するオプション、パラメータ

パラメータ FRPLI は、EGRAD と組で使用される。

4. 4. ENDV 依存性

i) オプション、パラメータの取り扱い

現バージョンの SAFALY コードは、ダイバータ部での輻射パワー ($P_{Rad,Div}$) を、ENDV を用いて次式で評価する。

$$\begin{aligned} n_{e,Div,20} &= ENDV \cdot n_{e,20}, \quad n_{e,20} = n_e \times 10^{-20} \\ P_{Div} &= P_\alpha + P_{AUX} + P_{OH} - P_{BRM} - P_{SYN} - P_{LI} - P_{EDGE} \\ F_1 &= 21.14 + 71.5 \cdot n_{e,Div,20}, \quad F_2 = 27.79 + 69.0 \cdot n_{e,Div,20}, \quad F_3 = 40.39 + 54.0 \cdot n_{e,Div,20} \end{aligned} \quad (1)$$

$$P_{Rad,Div} = \begin{cases} F_1 + (F_2 - F_1) \cdot (P_{Div} - 75.0) / (86.0 - 75.0), & P_{Div} < 75.0 \text{MW} \\ F_3 + (F_3 - F_1) \cdot (P_{Div} - 100.0) / (100.0 - 75.0), & 75 \text{MW} < P_{Div} < 100 \text{MW} \\ F_2 + (F_3 - F_2) \cdot (P_{Div} - 86.0) / (100.0 - 86.0), & 100 \text{MW} < P_{Div} \end{cases}$$

$n_{e,20}$ は、 $10^{20} (1/m^3)$ を単位とする主プラズマの平均電子密度、 P_{Div} はダイバータ部への熱流束で MW を単位とする。二行目の右辺は左から順に α 加熱パワー、外部加熱パワー、OH 加熱パワー、制動輻射パワー、シンクロトロン輻射パワー、主プラズマ線輻射パワー、プラズマ周辺部線輻射パワーで、MW を単位とする。この評価式は、ダイバータ解析コードを用いた解析結果を定式化したものである。パラメータ ENDV は、ダイバータでの輻射パワー評価の重要なパラメータである。

り、またダイバータ部のプラズマ対向壁の熱負荷評価にとって重要な役割を果たす。

図13①に、式(1)から得られるダイバータ室での輻射損失パワーを、ダイバータ熱流束(P_{Div})とダイバータ電子密度($n_{e,Div}$)の関数として示す。ダイバータ熱流束が小さい領域では($P_{Div}<150\text{MW}$)、ダイバータの電子密度が上昇するとダイバータ部の輻射も増加する。しかし、ダイバータ熱流束が大きい領域では($P_{Div}>150\text{MW}$)、ダイバータの電子密度が上昇するとダイバータ部の輻射が減少する。また、ダイバータ電子密度が大きい場合($\sim 1.0 \cdot 10^{20}\text{m}^{-3}$)、ダイバータ熱流束が大きい領域で($P_{Div}>100\text{MW}$)、ダイバータ熱流束が増えると共にダイバータ輻射損失パワーが減少する。これらは、ダイバータ熱流束が大きく、ダイバータ電子密度が大きい状態では、ダイバータプラズマが直接ダイバータ板に接触するアタッチの状態になるためと考えられる。

ii) 解析結果への影響

図13②は、燃料過剰注入を擾乱としたときの、出力波形のENDV依存性、図13③は($n_e/n_{GW} \cdot P_{fuel}$)の軌跡である。図13②の結果では、ENDVが大きい場合、出力が減少する傾向がある。また、密度限界で制限される出力上限はENDVに依存しない。

図13④は、燃料過剰注入時のダイバータ部輻射パワーの比較である。ENDVが大きい($=0.45$)の場合、出力が上昇しているにもかかわらず、ダイバータ輻射パワーが減少している。これはi)で述べたように、ダイバータ電子密度とダイバータ熱流束が同時に十分大きいとき、ダイバータ熱流束の上昇とともにダイバータ部輻射パワーが減少するためである。燃料過剰注入では主プラズマの電子密度が大きく上昇し、ダイバータ電子密度を $ENDV \times n_e$ で評価するため、ENDVが大きいほどダイバータ電子密度が増加し、密度上昇とともにダイバータ輻射パワーが低下する現象が起こる。

ダイバータ輻射パワーが減少すると、ダイバータはアタッチ状態になり、図13⑤に示す様にダイバータ板表面温度が上昇する。その結果、ダイバータ表面材料の昇華が増え、図13⑥、⑦のように主プラズマへの昇華不純物流入量が上昇し、実効電荷が増加する。

以上より、燃料過剰注入のときの高密度プラズマでは、ENDVが増加すると運転点は高電子密度、低温、高不純物の点に移る。そのため、昇華不純物がより多く主プラズマに侵入するパラメータを使用した場合、ENDVが大きいほど電子密度が速く上昇し、密度限界に達するため、密度限界までの出力上昇は低下する。逆にENDVが小さい方が、ダイバータはデタッチ状態に近くなり、ダイバータからの不純物流入が低下し、より核融合出力が上昇する。

図13⑧～⑪は、閉じ込め改善時の波形のENDV依存性を比較したものである。図13⑨は、ダイバータ部の輻射パワーであるが、閉じ込め改善では電子密度が上昇しないため、燃料過剰注入のようにダイバータ熱流束の増加と共にダイバータ輻射パワーが減少することはないが、やはりダイバータ熱流束が十分大きいため($P_{Div}>150\text{MW}$)、ENDVが大きいほどダイバータはアタッチに近い状態になり輻射パワーは減少し、ダイバータ板表面温度は上昇する(図13⑩)。図13⑪のように、この時のダイバータ表面材料の昇華による不純物流入量は少ないため、主プラズ

マの燃焼には大きな影響を与えない。この様に、閉じ込め改善では *ENDV* の影響が現れにくいが、*ENDV* の増加は高電子密度、低温、高不純物の運転点を移すため、昇華不純物が多く主プラズマに侵入するパラメータを使用する場合には出力低下につながる。

iii) 関連するオプション、パラメータ

ENDV はダイバータ部の熱負荷に深く関わるパラメータであるため、ダイバータ部のピーキング因子やスクリーニング因子との関係が重要である。ダイバータ部のピーキング因子を大きく取るとダイバータ部の熱負荷密度が増加し、スクリーニング因子が大きいと昇華した不純物が主プラズマに侵入しやすくなり、*ENDV* の影響が強く出るようになる。

4. 5. A S P U T 依存性

i) オプション、パラメータの取り扱い

コードでは、パラメータ *ASPUT* を用いて、プラズマ対向面でスパッタリングにより発生した不純物粒子の主プラズマへの侵入割合求めている[1]。2001 年 FDR 設計では、ブランケット表面材料をベリリウム、ダイバータバッフル・ドーム部をダングステン、ダイバータターゲット板を炭素繊維 (CFC) にする。表 2 のスクリーニング因子を使用した場合、*ASPUT* と各不純物の流入割合を図 14①に示す。*ASPUT* が増加するほど、ダイバータ部で発生する不純物が主プラズマに侵入しにくくなる。

ii) 解析結果への影響

燃料過剰注入時の応答の *ASPUT* 依存性を図 14②から⑤に示す。図 14①の出力波形には影響は現れていない。*ASPUT* が小さい程ダイバータ部の高電荷不純物が主プラズマに侵入しやすくなり、運転点が高密度（図 14④）・高不純物密度（図 14⑤）に移動すため、図 14③の様に *ASPUT* が小さいほど密度上昇が大きく、速く密度限界条件に近づく。

図 14⑥から⑪は閉じ込め改善時の *ASPUT* 依存性である。図 14⑥、⑦から、*ASPUT* が小さいほど出力が上昇する傾向があると言える。図 14⑧、⑨より、*ASPUT* が小さいと不純物量が増加し、高密度・高不純物密度に運転点が移動し、その結果図 14⑩に示すように主プラズマの輻射損失が増加する。輻射損失の冷却効果で温度が多少低下するが、加熱パワーの減少により閉じ込め時間が増加し DT イオン密度が大きくなる効果が優り（図 14⑪参照）、出力が上昇する。

以上の解析結果から、擾乱発生時のプラズマ応答に与えるパラメータ *ASPUT* の影響は小さいと言える。2001 年 FDR では、標準プラズマの実効電荷を 1.7 程度としている。図 14⑤、⑨の結果より、表 2 の標準的プラズマ対向機器のパラメータを使用する場合、実効電荷を 1.7 にするためには *ASPUT*=1.0 程度に設定するの適当である。

iii) 関連するオプション、パラメータ

パラメータ APUT は、プラズマ対向機器のスクリーニング因子や表面材料及びその表面積と関係して、計算結果に影響を与える。

4. 6. ICAL1 依存性

i) オプション、パラメータの取り扱い

オプション ICAL1 は、PFC 表面材料の昇華不純物侵入や PFC 表面に付着したダストから放出された DT 燃料流入を制御する。ICAL1=1 の場合は、これらの効果を考慮した解析をするが、ICAL1=0 の場合これらの効果は無視される。

ii) 解析結果への影響

ダイバータなど PFC 表面温度が上昇する場合には大きな影響を与えるが、そうで無い場合でもダストから放出される DT による燃料供給は出力に影響を与える。本節の解析は、ICAL1 の違いが現れやすいよう、ダイバータ部のスクリーニング因子を 0.002 にして行った。

図 15 ①は燃料過剰注入時の出力波形、図 15 ②は $(n_e/n_{GW} - P_{fus})$ の軌跡である。この結果から、この解析条件ではオプション ICAL1 の影響は小さいと言える。燃料過剰注入事象では、過注入により主プラズマに入る DT 燃料が支配的であるため、ダストで発生する DT 燃料の影響は小さいためと考えられる。

図 15 ③から⑥は、閉じ込め改善事象での ICAL1 オプション依存性である。図 15 ③は出力波形であり、ICAL1=1 の方が出力上昇が大きくなる傾向が分かる。しかし、ベータ限界で押さえられる出力上限は、図 15 ④に示すように ICAL1 選択の影響をほとんど受けていない。図 15 ⑤は主プラズマの DT イオン密度、図 15 ⑥は PFC 表面のダストから放出され、主プラズマに侵入する DT 燃料束である。ICAL1=1 の場合は、ダストに起因する DT 燃料侵入があるため、DT イオン密度が上昇し、図 15 ③のように出力が上昇することが理解できる。

iii) 関連するオプション、パラメータ

オプション ICAL1 は、オプション ISOL と機能を一部共有している。その他、プラズマ対向機器のパラメータを有効にするかどうかは ICAL1 オプションで決まる。

4. 7. F Z 1, F Z 2 依存性

i) オプション、パラメータの取り扱い

パラメータ F Z 1, F Z 2 はそれぞれ、主プラズマから漏れた D T イオンがプラズマ対向壁に入射する確率、D T イオンの入射によりスパッタされた対向壁材料原子が主プラズマに侵入する確率という意味を持ち、対向壁スパッタリングによる不純物源を与える[1]。二つのパラメータは $F Z \equiv F Z 1 \cdot F Z 2$ の積で必ず使用されるため、感度解析は積の値 F Z について行う。

SAFALY コードの初期状態を求める解析では、与えられた F Z を使用して、ベリリウム密度が入力値になるよう C P (不純物粒子閉じ込め時間の電子エネルギー閉じ込め時間に対する比) をもとめる。図 1 6 ①は、燃料過剰注入の初期状態で、F Z と C P の関係を示す。F Z が小さいほど、不純物の粒子バランスを成立させるために、不純物粒子の閉じ込め時間が長くなくてはならず、C P が増加する。変数 C P 自身は、物理的な意味を持っており、既存装置のデータではヘリウム粒子閉じ込め時間のエネルギー閉じ込め時間に対する比が 5 度であることから (C A = 5)、C P も 5 度の値を取るものと予測される。よって、F Z の標準値は 0. 01 度にするのが適当である。

ii) 解析結果への影響

図 1 6 ②、③に燃料過剰注入事象での、出力波形と ($n_e/n_{GW} \cdot P_{fus}$) の軌跡を示す。図 1 6 ④は燃料過剰注入時の PFC 表面材料のスパッタリングで発生した不純物が主プラズマに侵入する粒子束である。明らかに、大きい F Z では不純物流入量が多くなっているが、不純物閉じ込め時間が F Z が大きくなると減少することから、主プラズマの不純物量に大きな差は生じない。その結果、図 1 6 ⑤に示すように実効電荷の F Z 依存性は弱い。また、燃料過剰注入では、D T 供給量が多いため、壁の影響が出にくいという事情もある。これらの結果から、燃料過剰注入に於いては F Z の影響は小さいといえる。

図 1 6 ⑥～⑩は、閉じ込め改善時事象に於けるプラズマ応答の F Z 依存性である。図 1 6 ⑥、⑦からは、出力上昇やベータ値限界で制限される出力上限に大きな影響は出ていないが、F Z が大きい方が出力上昇が大きくなる傾向がある。図 1 6 ⑧のように F Z が大きいほど不純物流入量が多いものの不純物粒子閉じ込め時間が短くなるため、図 1 6 ⑨に示すように実効電荷への影響は小さい。図 1 6 ⑩は PFC 表面ダストから放出される D T 燃料の主プラズマへの侵入量を比較したものである。この結果より、F Z が大きい方がより多く D T 燃料が供給されることが分かる。輻射パワーやプラズマ対向壁温度は F Z にほとんど依存しておらず、図 1 6 ⑩はダストから発生した D T 粒子の主プラズマへの侵入遅れ時間の影響である。ダストから生成される D T 粒子が主プラズマに侵入する遅れ時間は次式で与えられる。

$$\tau_{DT,Dust} = (f - delay) \cdot (C_IMP) \cdot \tau_{P,IMP}$$

パラメータ f -delay (4. 23 節参照)、C_IMP (4. 20 節参照) は比例係数、 $\tau_{P,IMP}$ は不純物粒子閉じ込め時間である。図 1 6 ①で示したように、F Z が大きいほど $\tau_{P,IMP}$ が小さく、遅れ時間

短いためダストから生成されるD T粒子が速く主プラズマに侵入する。この結果、図16⑩のようにF Zが大きいほどダストで生成されるD T粒子が多く供給されることになり、図16⑥に示すように出力が多少であるが高くなる。

以上の結果から、パラメータF Zが核融合出力の振る舞いに及ぼす影響は小さいと言える。

iii) 関連するオプション、パラメータ

F Zを入力値として初期状態を求めて得られる、不純物粒子閉じ込め時間の電子エネルギー閉じ込め時間に対する比C Pについてはその結果を注意する必要がある。また、C PはPFC表面から発生する不純物やD T粒子の主プラズマ侵入の遅れ時間に使用されるので、*f-delay* や *C_IMP*と合わせて注意を要する。

4. 8. SWDT依存性

i) オプション、パラメータの取り扱い

SAFALY コードでは電子エネルギー閉じ込め時間を、既存装置実験データから求めたスケーリング則を用いて求める。スケーリング則はプラズマ加熱パワーの関数であるが、その加熱パワーを次式で評価する。

$$P_{Heating} = P_a + P_{AUX} + P_{OH} - P_{BRM} - P_{SYN} - P_L - SWDT \cdot dW/dt \quad (2)$$

ここで、Wはプラズマの熱エネルギーである。パラメータ SWDT はプラズマ熱エネルギーの変動効果を考慮するか否かを選択するパラメータである。

ii) 解析結果への影響

図17は SWDT に対する感度解析結果である。図17①は燃料過剰注入時の核融合出力の波形である。SWDT=1 の場合、擾乱のはじめで大きな出力上昇が起こるが、これは図17②で示すように、エネルギー閉じ込め時間が擾乱時に増加しているためである。これは、燃料が注入され出力が上昇するとプラズマ熱エネルギーが増加するため、式(2)の右辺7項の効果で加熱パワーが減少するためである。また同様に、図17④、⑤で示す閉じ込め改善事象においても、擾乱発生後閉じ込め時間が大きく上昇し、核融合出力が上昇する。但し、図17⑥に示すように、ペタ限界値で制限される出力上限は、SWDT にあまり依存しない。

閉じ込めスケーリング則の導出では、式(2)は主プラズマから熱流束として漏れる損失パワーの意味を持ち、データベースは dW/dt に制限を設け、放電の安定した点で得たデータのみを選別して作られている。そのため、プラズマエネルギーの変動が大きいところで、閉じ込めスケーリング則を使用可能かという問題がある。また、SWDT=1 として、式(2)を使用して評価すると、 dW/dt が大きい場合、閉じ込め時間が極端に大きくなってしまうため、単純に SWDT=1 を使用することにも問題がある。正しい対処を得るために、データベースの範囲を広げ dW/dt を変

数に持つスケーリング則を作成することが求められる。当面の対処としては、密度限界やベータ限界で制限される出力上限は SWDT の選び方に大きく依存しないことから、SWDT=0 で解析するのが妥当である。

iii) 関連するオプション、パラメータ

直接 SDWT に関するパラメータは無い。

4. 9. C I 依存性

i) オプション、パラメータの取り扱い

パラメータ C I はイオンエネルギー閉じ込め時間と電子エネルギー閉じ込め時間の比であり、イオン温度に影響を与える重要なパラメータである。既存装置の知見では C I は 1 程度と考えられる。

ii) 解析結果への影響

図 18 ①～③は燃料過剰注入時の応答比較である。CI=0.7 では、途中で L モードに遷移してしまい、燃焼が終了する。さらに小さい CI では初期状態の解が存在しなくなる。図 18 ②に示すように、出力・Q 値を固定した場合、CI が増加するとともに運転点は低密度・高温に移動する。

3 章で見たように、燃料過剰注入では低密度・高温の運転点を初期状態とした方が大きな出力上昇が発生するため、CI が大きいほど出力上昇は大きくなる。図 18 ③、④はそれぞれ燃料過剰注入時の密度限界の制限及びベータ限界の制限と核融合出力との関係である。CI が大きい場合 (~3.0)、密度が低いため密度限界には達しないものの、ベータ値が上昇しベータ限界の制限を受ける。

図 18 ⑤は閉じ込め改善時の（電子温度 - 電子密度）軌跡である。これまでの解析と同様、閉じ込め改善で運転点は高温に移動する。閉じ込め改善ではベータ値の上昇が速く、CI が大きい場合、速くベータ値限界に達するため、ベータ限界で制限される到達出力は減少する。

図 18 ②、⑤より分かるように、パラメータ CI の変更は初期状態を大きく変える。CI が変わる場合、密度限界やベータ値限界の条件など、初期状態が満たすべき条件との整合性を調整する必要がある。

iii) 関連するオプション、パラメータ

既に述べたように、C I は初期状態を定める重要なパラメータであるため、初期状態の核融合出力 WLN や Q 値などとともに調整し、初期状態が所定の条件を満たすようにしなくてはならない。

4. 10. C P F 依存性

i) オプション、パラメータの取り扱い

パラメータ C P F は、D T イオン粒子閉じ込め時間の電子エネルギー閉じ込め時間に対する比の初期値を与える。C P F が大きいほど D T イオン粒子閉じ込め時間は長くなる。

ii) 解析結果への影響

図 1 9 ① は核融合出力の C P F 依存性である。C P F が大きい場合、D T 粒子閉じ込め時間が長くなるため D T イオン密度が増加し、核融合出力が大きく上昇する。しかし、図 1 9 ② に示すように C P F が大きほど密度上昇が速く、密度限界条件に早く到達し、密度限界で制限される出力上限は低くなる。一方、C P F が小さい場合、同じ燃料過剰注入量では D T 密度が低くなり、出力上昇は小さくなる。C P F が異なる場合、出力上昇が最大になる過注入量もまた異なってくため、最大出力を求める場合は擾乱パラメータの調整が必要となる。

図 1 9 ③、④ は燃料過剰注入でのインボードダイバータ板温度と表面材料の昇華で発生した不純物が主プラズマに流入する量を比較したものである。C P F が大きいほど出力が上昇し、ダイバータ板温度が上昇し、その結果主プラズマに流入する不純物量が増加する。図 1 9 ① で 15 秒以降出力が低下するのは、この不純物流入の影響である。

図 1 9 ⑤、⑥ に閉じ込め改善事象の比較を示す。C P F が大きいほど、ベータ値の上昇が大きく、ベータ値限界で制限される出力上限は低くなる。

iii) 関連するオプション、パラメータ

電子エネルギー閉じ込め時間の C P F 倍で、D T イオン粒子閉じ込め時間の初期値を与えるため、表 1 のエネルギー閉じ込め時間の改善因子 CHH0 と関連する。

4. 11. CA依存性

i) オプション、パラメータの取り扱い

パラメータCAと電子エネルギー閉じ込め時間の積で、DT反応の結果発生したヘリウムの粒子閉じ込め時間の初期値を与える。既存装置のデータでは、CAは5.0程度の値を取ることが知られており、ITERの物理設計でも5.0を使用している。

ii) 解析結果への影響

CAを変更すると、初期状態が大きく変化する。また、ヘリウム粒子閉じ込め時間が大きくなるため、主プラズマのヘリウム蓄積量が増加し、電子密度が増加する。図20①、②は燃料過剰注入時の核融合出力波形及び(電子温度-電子密度)での軌跡である。図②より分かるように、CAが増加すると、初期状態の運転点は低温・高密度に移動する。CA=10以上では、初期状態すでに電子密度のグリンワルド密度比が1.0を越している(図20③参照)。

図20①のように出力波形は、CAが上昇するほど出力上昇が大きくなる傾向を示す。これは、CAが大きいとヘリウム密度の増加とともに輻射パワーが増加し、主プラズマの加熱パワーが適度に減少するため、エネルギー閉じ込め時間が長くなるためである。図20④にDT粒子閉じ込め時間を比較した結果を示す。この様に、CAが大きいとDT粒子閉じ込め時間が長くなり、DTイオン密度が増加する。この効果が、ヘリウム密度増加による輻射冷却の効果より優り、CAが大きい方が核融合出力が増加する。しかし、図20③に示すように、CAが大きいほど速く密度限界に達するため、密度限界で制限される出力上限は低下する。また、CAが小さい場合、同じ燃料過剰注入量では最大出力が減少する。

図20⑤、⑥は閉じ込め改善での出力波形及びベータ限界の制限と核融合出力との関係である。CAが7.5以上に大きい場合、使用したパラメータでは初期状態で使用できる定常解は存在しない。CAが大きいほど出力上昇が増加するのは燃料過剰注入の場合と同じ理由からである。また、CAが大きいほど、出力上昇は増加するが、初期状態の密度がグリンワルド密度を越すため、初期状態パラメータの調整が必要になる。

iii) 関連するオプション、パラメータ

電子エネルギー閉じ込め時間のCA倍で、ヘリウムイオン粒子閉じ込め時間の初期値を与えるため、表1のエネルギー閉じ込め時間の改善因子CHH0に関連する。また、CAの変更は初期状態を大きく変えるため、初期状態のパラメータ(出力WLN、Q値)の見直しが必要になる。

4. 1 2. G K 依存性

i) オプション、パラメータの取り扱い

パラメータ G K は、シンクロトロン輻射の壁での反射率を表す[1]。反射率が大きいほど（1に近いほど）、シンクロトロン輻射によるエネルギー損失が減少する。

ii) 解析結果への影響

表 1 に記した G K の代表値は 0.8 であり、シンクロトロン輻射の 45% ($=\sqrt{1-0.8}$) が損失になる。パラメータ G K が減少すると、シンクロトロン輻射損失が増加するため、核融合出力と Q 値を固定した場合、運転点は低温・高密度に移動する。

図 2 1 ①から④は燃料過剰注入時のプラズマ応答を比較したものである。G K を小さくすると出力が上昇する。図 2 1 ③に示すように G K を下げるとシンクロトロン輻射損失が増加し、スケーリング則を用いた閉じ込め時間評価に於いて、プラズマ加熱パワーが減少するため、閉じ込め時間が増加し、D T イオン密度が増加する。この密度上昇の効果が、輻射冷却の効果より優るため、出力が上昇する。しかしながら、図 2 1 ④に示すように、G K を下げると運転点が高密度に移るため、同量の燃料を渦注入する条件では G K が小さいほど密度限界に速く達するため、密度限界で制限される出力上昇は減少する。

図 2 1 ⑤、⑥は閉じ込め改善時の応答を比較したものである。反射率 G K が小さい方が出力上昇が大きくなるのは燃料過剰注入と同じ理由による。図 2 1 ⑥より、G K が小さい方がベータ限界で制限される最大出力が上昇する。

燃料過剰注入と閉じ込め改善の両方とも、反射率 G K を下げると密度限界・ベータ限界で制限される最大出力が増加する。しかしながら、G K を 0.8 から 0.08 に下げたときの最大出力の増加割合は 6% 程度であり、その影響は小さい。

iii) 関連するオプション、パラメータ

直接的に関連するパラメータはないが、反射率 G K を定める際、プラズマ対向面の材料とその反射率を確認することが必要である。

4. 1 3. A TH 依存性

i) オプション、パラメータの取り扱い

パラメータ A TH は、プラズマ閉じ込めモードが H モードの場合の温度分布パラメータである。A TH を用いて温度分布関数を $T \propto (1 - r/a)^{ATH}$ で与える。但し、r はプラズマ中心からの距離、a はプラズマ小半径である。この分布は、電子、イオン、不純物に共通であるとする。表 1 の代表値 2.15 は、1.5 次元輸送解析で得たプラズマ燃焼性能を 0 次元コードで再現するように調整した値である。

ii) 解析結果への影響

温度分布は核融合出力や様々な物理量に影響を及ぼす。温度分布が平坦な方が核融合反応に寄与するプラズマ体積が大きくなり、プラズマ燃焼性能を向上させる効果がある。また、核融合出力とQ値を固定して初期条件を求めるとき、ATHが小さいほど高温・低密度、逆に大きいと低温・高密度に運転点が移動する。図2.2①は、燃料過剰注入事象の初期状態（出力840MW、Q値11.5）の電子密度のグリンワルド密度に対する比をATHの関数として示したものである。この様にATHが小さく平坦な温度分布では低密度になり、高密度での閉じ込め性能劣化の回避できることから、平坦な温度分布で運転することが望ましい。しかしながら、ITERのように α 加熱が支配的で自律性の強いプラズマでは温度分布の制御が困難であるため、プラズマ自身が決める分布になってしまふ。ATH=2.15という代表値は、その様な自律性を考慮したプラズマ解析の結果得られた値である。

図2.2②から⑤は、燃料過剰注入時のプラズマ応答である。図2.2②のように、ATHが小さい方が出力上昇が大きくなる。運転点は、図2.2③に示すように、同量の燃料過剰注入で比較すると、ATHが小さいほうが運転点は高温・低密度に移動し、燃料注入時の密度上昇も小さくて済む。図2.2④、⑤に示す、密度限界・ベータ値限界で制限される出力上昇の上限は、ATHが小さいほど増加する。逆に、ATHが大きいと、高密度側に運転点が移動し、出力上昇は密度限界に制限される。

図2.2⑥は閉じ込め改善時の（ β 限界指数－出力）空間での軌跡を比較したのである。燃料過剰注入と同様に、ATHが小さいほど、擾乱の影響による出力上昇が増加する。

以上のように、温度分布のパラメータATHはプラズマの運転に大きな影響を与える。ATHが大きく変わらるようであれば、運転点や燃焼制御の見直しが必要になる。

iii) 関連するオプション、パラメータ

温度分布は次節の密度分布と合わせて、核融合出力やプラズマ性能に強い影響を持つため、密度分布パラメータAPHと相補的関係にある。

4. 1.4. APH依存性

i) オプション、パラメータの取り扱い

パラメータAPHは、プラズマ閉じ込めモードがHモードの場合の密度分布パラメータである。APHを用いて密度分布関数を $n \propto (1-r/a)^{APH}$ で与える。この分布は、電子、イオン、不純物に共通であるとする。既存装置の実験では、Hモードではプラズマ周辺に閉じ込め障壁が形成されるため、周辺で密度が上昇し、プラズマ内部では平坦な密度分布になることが知られている。表1の代表値APH=0.1はこの様な知見より定めた値である。

ii) 解析結果への影響

A P Hは前節のA T Hと共に、核融合出力などの物理量を規定する重要なパラメータである。A P Hが大きいほど、中心で増加する密度分布になり、温度の高い中心部で密度が高くなり、低い体積平均密度で効率的に核融合反応を起こすことが出来るため、A P Hの大きい密度分布が望ましい。しかし、先に述べたように、主に燃料供給をガスパフで行ったHモードの運転では、平坦な密度分布になることが知られている。既存装置では、ペレットにより中心部に燃料を供給すると、中心で高い密度分布が形成されることが報告されているが、2001年FDRの設計では入射ペレットの速度が低いため、ペレットはプラズマ中心まで到達せず、中心でピークする密度分布を作ることは困難であると予測されている。

図23①は、燃料過剰注入事象の初期状態（出力840MW、Q値11.5）の電子密度のグリンワルド密度に対する比をA P Hの関数として示したものである。A P Hの増加と共に、運転点は低密度に移る。図23②から⑤は燃料過剰注入時のプラズマ過渡解析の比較である。図23②より、A P Hが大きい方が出力上昇が増加することが分かる。また、図23③より、A P Hが大きいと運転点は全体に高温・低密度に移動する事が分かる。密度限界・ベータ限界で制限される出力上昇の上限も、A P Hが大きいほど高くなる。逆に、A P Hを小さくすると、高密に運転点が移動し、密度限界の制限を強く受けるため、出力上昇が低下する。

図23⑥は、閉じ込め改善時の(β限界指数-出力)空間での軌跡を比較したのである。A P Hが大きいほど、ベータ限界により制限される出力上昇は増加するが、燃料過剰注入事象に比べて、A P Hの違いが結果に与える影響は小さい。

以上のように、A P Hは擾乱に対する応答に大きな影響を与える。特に、燃料過剰注入事象の応答に対する影響が大きい。しかしながら、密度分布は燃料供給の方法と関係するため、ペレット入射など燃料供給装置の設計などを考慮して決める必要がある。

iii) 関連するオプション、パラメータ

温度分布パラメータA T Hと相補的関係にある。

4. 1 5. I C N 3依存性

i) オプション、パラメータの取り扱い

オプションI C N 3は、ダイバータやプラズマ対向機器熱負荷を調整するためのアルゴン供給のフィードバック制御方法を選択するオプションである。初期状態のアルゴン供給量は、入力された電子に対するアルゴン密度比になるよう決める。I C N 3を0とした場合、アルゴン供給量をその初期値に固定し、制御をしない。I C N 3が0以外では、オプションの選択に従い、GAR_REFを目標値、GPUF_ARを制御ゲインとして、フィードバック制御を行う。オプション

ICN3 = 1 では、実効電荷 (Z_{EFF}) を目標値としてアルゴン供給量を制御する。ICN3 を 2 とした場合、ダイバータ熱流束（式（1）参照）を目標値として制御する。アルゴン注入量は次式で計算される。

$$S_{Ar} = S_{Ar,0} \cdot (1.0 + G_{FB} \cdot (X/X_{REF} - 1.0))$$

但し、 $S_{Ar,0}$ は初期状態のアルゴン供給量、 G_{FB} は入力されたフィードバックゲイン、 X は実効電荷又はダイバータ熱流束、 X_{REF} はその目標値である。また、アルゴン供給制御は DT 燃料供給制御と同じ一次遅れ時間を持つものとする（4. 16 節、4. 17 節参照）。

以下の解析結果は、燃料供給制御、加熱制御行わない状態で、アルゴン供給制御のみを行った場合の結果である。本来は、これらの制御が互いに協調しながら燃焼制御を行う。

ii) 解析結果への影響

図 2.4 ①から④は、燃料過剰注入に於けるプラズマ応答を、アルゴン制御方法で比較したものである。図 2.4 では、不純物の影響を見るために、ダイバータピーキング因子を 1.5 に少し高くして比較した。ICN3 = 1 の場合に実効電荷の目標値を 1.7、ICN3 = 2 の場合にダイバータ熱流束の目標値を 80MW とした。それぞれのオプションについて、制御が適切になされていることが図より分かる。図 2.4 ①より、制御を入れた方が出力上昇が下がる。また、燃料過剰注入の場合、目標値に追随するために、アルゴンを供給する必要があるため、制御を行った場合密度が上昇する。その結果、図 2.4 ④に示すように、密度限界条件に速く達してしまい、アルゴン制御を入れた場合、密度限界で制限される出力上限は低下する。

図 2.4 ⑤、⑥は、閉じ込め改善時の波形を比較したものである。図には示さないが、実効電荷やダイバータ熱流束は適切に制御されている。図 2.4 ⑥より、閉じ込め改善では、アルゴン注入制御を入れても、ペータ限界で制限される出力上限はあまり影響を受けないことがわかる。

以上より、アルゴン注入制御を行った場合、プラズマ対向機器の負荷を低減させることが可能である。特に、ダイバータ熱流束制御を行った場合、ダイバータ熱負荷が大幅に低減され、プラズマ対向機器損傷の可能性を低下させるものと考えられる。

iii) 関連するオプション、パラメータ

アルゴン注入制御は、他の燃焼制御と合わせて実施することから、DT 燃料制御オプション ICN1 や加熱制御オプション ICN2 と関係が深い。また、アルゴン注入の遅れ時間を DT 燃料供給と同じにしているため、遅れ時間のパラメータ C_SID (4. 16 節)、TAU_GP (4. 17 節) も重要なパラメータである。

4. 16. C_SID依存性

i) オプション、パラメータの取り扱い

DT燃料供給制御の有無はオプション ICN1で選択する。初期状態のDT燃料供給量は粒子保存の式を解いて求める。オプション ICN1=0 を選択した場合、DT燃料供給のフィードバック制御は行わず、初期状態の燃料供給量が時間に関係なく一定量供給される。オプション ICN1=1 を選択した場合、燃料供給フィードバック制御が有効となる。この制御に関する表1のパラメータは、核融合出力目標値 (PFUS0)、制御ゲイン (GS1)、DT供給量上限 (GF_LIM)、及び制御の遅れ時間に関するパラメータ (C_SID、TAU_FP) である。なお、燃料過剰注入事象の解析では、過注入により供給されるDT燃料は制御の対象とせず、パラメータ fuel (表1参照) で与えられるDT燃料が制御と関係なく供給されるものとする。

DT燃料供給制御の一次遅れ時間を次式で与える。

$$\tau_{DT,delay} = C_SID \cdot \tau_{p,DT} + TAU_GP \quad (3)$$

この式で、 $\tau_{p,DT}$ は DTイオンの粒子閉じ込め時間、TAU_GP は次節 4. 16 で検討するハードウエアなどに起因する遅れ時間を表すパラメータである。 C_SID は、DTイオン閉じ込め時間の比例係数である。

ii) 解析結果への影響

パラメータ C_SID に関する感度解析は、ICN1=1 を選択して DT燃料供給制御を有効にし、目標出力を 700MW にして行った。図25①から③に燃料過剰注入の場合の比較を示す。これまでの燃料供給制御をしなかった場合（例えば、図11①の実線）に比べて出力上昇は減少している。図25②は、制御により主プラズマに供給されるDT燃料量であり、遅れ時間が反映された波形である。

燃料過剰注入により出力が上昇するため、制御系は出力を抑えるために燃料供給量を絞り込む。しかしながら、図25②のように遅れ時間により燃料供給量の絞り込みに差が生ずる。遅れ時間が大きいほど、燃料供給量の絞り込みが遅れ、その間に出力が上昇する。図25③は(n_e/n_{GW} -出力)軌跡の比較であるが、通常の密度限界の条件で決まる出力の上限は遅れ時間にほとんど依存しない。保守的な密度限界条件まで許すと、遅れ時間が大きいほうが出力上昇が大きくなる。

図25④から⑥は、閉じ込め改善事象の波形を比較したものである。擾乱による燃料供給がないため、燃料供給制御により出力上昇を大幅に抑えることができる。図25⑥に示すように、制御がある場合でも閉じ込め改善事象では保守的な限界までベータ値が上昇する。しかし、ベータ値限界で制限される出力上限は、制御を行わない場合に比較して低下する。また、制御遅れが小さいほど出力上昇は抑えることができる。

iii) 関連するオプション、パラメータ

燃料供給制御は、他の燃焼制御と合わせて実施することから、加熱制御オプション ICN2 やア

ルゴン供給制御オプション ICN3 と関係が深い。また、燃料供給の遅れ時間を D T イオンの粒子閉じ込め時間に比例するとしているため、制御特性はパラメータ C P F (4. 10 節参照) に依存する。

4. 17. TAU_GP 依存性

i) オプション、パラメータの取り扱い

D T 燃料供給制御の一次遅れ時間、式 (3) の定数項を表す入力パラメータである。TAU_GP は燃料供給系の制御遅れや機器の応答に起因する遅れを表す。取り扱い詳細については、4. 16 節を参照のこと。

ii) 解析結果への影響

解析では、燃料供給制御を有効にし (ICN1=1)、目標出力を 700MW、パラメータ C_SID=0.1 として、プラズマ応答の TAU_GP に対する依存性を比較した。燃料過剰注入事象の結果を、図 26 ①から③に示す。また、閉じ込め改善事象の結果を図④から⑥に示す。プラズマの応答は、ほぼ 4. 16 節で得た結果と同じである。遅れ時間が長くなるほど、核融合出力の上昇が大きくなり、密度限界やベータ限界により制限される出力上昇も上昇する。

iii) 関連するオプション、パラメータ

燃料供給制御は、他の燃焼制御と合わせて実施することから、加熱制御オプション ICN2 やアルゴン供給制御オプション ICN3 と関係が深い。

4. 18. C_EID 依存性

i) オプション、パラメータの取り扱い

外部加熱制御の有無はオプション ICN2 で選択する。初期状態の外部加熱パワーは入力の核融合出力と Q 値の初期値からもとめる。外部加熱の中性粒子ビーム加熱と高周波加熱の割合は、入力パラメータ FNB で与える (4. 21 節参照)。オプション ICN2=0 を選択した場合、外部加熱パワーのフィードバック制御は行わず、初期状態の加熱パワーを時間に関係なく一定に加える。オプション ICN2=1 を選択した場合、外部加熱フィードバック制御が有効となる。外部加熱の制御は、核融合出力に対して行う。この制御に関する表 1 のパラメータは、核融合出力目標値 (PFUS0)、制御ゲイン (GS2)、加熱パワー上限値 (PMAX)、及び制御の遅れ時間に関するパラメータ (C_EID、TAU_AUX) である。

外部加熱制御の一次遅れ時間を次式で与える。

$$\tau_{AUX} = C_EID \cdot \tau_{SD} + TAU_AUX \quad (4)$$

この式で、 τ_{SD} は加熱入力が熱プラズマのエネルギーに変換される遅れ時間を表し、NBI により生成される高速イオンの熱化時間で代表させる[1]。TAU_AUX は次節 4. 1.9 で検討するハードウエアなどに起因する遅れ時間を表すパラメータである。

ii) 解析結果への影響

パラメータ C_EID に関する感度解析は、ICN2=1 を選択して外部加熱制御を有効にし、目標出力を 700MW、加熱パワー最大値を 73MW、TAU_AUX=0.0 として行った。図 2.7 ①から③に燃料過剰注入の場合の比較を示す。外部加熱制御を行うと、擾乱が加わった直後の出力上昇を抑えることが可能であり、図 2.7 ③に示すように、この間に密度が上昇し密度限界に達するため、密度限界で制限される出力上限は大きく低下する。また、遅れ時間が大きいほど、密度限界で制限される出力上限は大きくなる。

図 2.7 ④から⑥は、閉じ込め改善事象でのプラズマ応答を比較した結果である。この結果より、閉じ込め改善事象では、加熱制御を行ってもほとんど出力波形に影響はない。これは、初期状態の Q 値が大きく、もともと α 加熱の割合が大きい燃焼状態であるため、出力に対するフィードバック制御で外部加熱が減少しても、プラズマの燃焼には大きな影響を与えないためである。

以上より、燃料過剰注入事象では加熱制御を行うことで出力上昇を大きく低下させることが可能である。また、閉じ込め改善事象の解析結果のように、Q 値が大きい初期状態に擾乱が加わった場合、加熱制御の影響は小さい。

iii) 関連するオプション、パラメータ

加熱制御の遅れ時間定数項、TAU_AUX、と関係する。

4. 1.9. TAU_AUX 依存性

i) オプション、パラメータの取り扱い

外部加熱制御の一次遅れ時間、式 (4) の定数項を表す入力パラメータである。TAU_AUX は外部加熱系の制御遅れや機器の応答に起因する遅れを表す。取り扱い詳細については、4. 1.8 節を参照のこと。

ii) 解析結果への影響

外部加熱の熱化遅れ時間に加え、トカマクシステムに起因する遅れ時間を TAU_AUX で表す。比較は、ICN2=1 を選択して外部加熱制御を有効にし、目標出力を 700MW、加熱パワー最大値を 73MW、C_EID=1.0 とし、TAU_AUX 依存性を比較した。

図 2.8 ①から③は、燃料過剰注入に対する結果である。遅れ時間が増加するに従い、出力が上昇する。しかしながら、図 2.8 ③に示すように、1.0 秒の遅れ時間があっても、密度限界で制限

される出力上限は、制御の無い場合に比較して、十分低下する。

図28④から⑥は、閉じ込め改善事象での比較である。前節4.18で述べたように、閉じ込め改善事象では、加熱制御の影響はほとんど現れない。

iii) 関連するオプション、パラメータ

加熱制御の遅れ時間の熱化時間に対する比例係数、C_EID、と相補的関係にある。

4. 20. C_SIMP 依存性

i) オプション、パラメータの取り扱い

パラメータ C_SIMP は不純物や PFC 表面に付着したダストから放出される DT 燃料が主プラズマに侵入する遅れ時間を設定する[1]。これらの遅れ時間と C_SIMP との関係は以下の通りである。

- ・スパッタされたプラズマ対向壁材料の遅れ時間 : $= C_{SIMP} \cdot \tau_{p,DT}$
- ・昇華したプラズマ対向壁材料の遅れ時間 : $= f_{delay,i} \cdot C_{SIMP} \cdot \tau_{p,DT}$
- ・プラズマ対向壁付着ダストから放出される DT の遅れ時間 : $= f_{delay,i} \cdot C_{SIMP} \cdot \tau_{p,DT}$

但し、 $\tau_{p,DT}$ は DT 粒子閉じ込め時間、 $f_{delay,i}$ は i 番目のプラズマ対向面から発生する不純物の主プラズマへの侵入遅れ時間を与える係数パラメータである（表2の f-delay、4.23節参照）。現状の SAFALY では、昇華不純物の主プラズマ侵入遅れ時間とダストから放出される DT の侵入遅れ時間と同じ式で与えている。C_SIMP が小さくなるほど、遅れ時間は短くなる。

ii) 解析結果への影響

図29①から④は燃料過剰注入時のプラズマ応答を C_SIMP で比較したものである。図29③、④に示すように、スパッタされた不純物の主プラズマ侵入量やダストから放出された DT 粒子の主プラズマ侵入量は遅れ時間が短いほど多くなり、プラズマは低温・高密度になる。C_SIMP によるダイバータターゲット板温度の差が小さいため、昇華により発生する不純物のプラズマ侵入量の差は小さい。

燃料過剰注入の場合、遅れ時間が短い方が、出力上昇が低下する傾向にある。これは、DT 燃料密度の変化は、過注入による変化が支配的で、C_SIMP による差が生じないものの、遅れ時間が短いと不純物侵入量が多くなり温度低下の効果が効いてくるためである。ただし、図29②で示すように、密度限界で制限される出力上限は C_SIMP にほとんど依存しない。

図29⑤、⑥は閉じ込め改善時の応答比較である。閉じ込め改善では、遅れ時間が短い方が出力上昇が増加する傾向にある。これは、図29④と同様に遅れ時間が短い方がダストから発生する DT 燃料供給量が増加し、DT イオン密度が増加するためである。但し、ベータ限界で制限される出力上限は C_SIMP にほとんど依存しない。

iii) 関連するオプション、パラメータ

遅れ時間は、C_SIMP と D_T 粒子閉じ込め時間の積で与えるため、D_T 粒子閉じ込め時間の初期値を与える C_P_F に依存する。また、昇華不純物やダストから発生する D_T 粒子の遅れ時間は各プラズマ対向面で定義される遅れ時間の係数、 $f_{delay,i}$ に依存する（4. 2 3 節参照）。

4. 2 1. FNB 依存性

i) オプション、パラメータの取り扱い

パラメータ FNB は、初期状態の外部加熱の中性粒子ビーム加熱割合を設定するパラメータである。プラズマ加熱の NBI の割合を FNB、高周波加熱の割合を (1-FNB) とする。NBI の電子加熱とイオン加熱の割合は解析式を用いて求める[1]。高周波加熱については、入力パラメータ FRFE を用いてイオン加熱の割合を (1-FRFE)、電子加熱の割合を FRFE で与える。

ii) 解析結果への影響

以下の感度解析は、高周波加熱として電子サイクロトロン加熱を使用することを想定し、FRFE=1、高周波の電流駆動効率をゼロ、FOMCD_RF=0.0、として行った。外部加熱のパラメータの変更は、燃料過剰注入の初期状態のように Q 値の低い運転では影響が現れるが、閉じ込め改善の初期状態のように Q 値の高い運転では影響は現れない。

図 3 0 ①から⑤は、燃料過剰注入時の比較である。初期状態では、FNB が大きいと多少低密度に運転点が移動するが、擾乱発生後の 10 秒程度までは FNB が大きいほど低密度・低温になる。図 3 0 ③はイオン加熱パワー波形の比較である。はじめ 10 秒程度は FNB が小さい方がイオン加熱が大きい。これは、図 3 0 ④に示すように、FNB が小さい場合の外部加熱は高周波による電子加熱が支配的になり、電子-イオンの温度差が大きく、電子からイオンに与えられるエネルギーが大きいことに起因している。その結果、図 3 0 ⑤のように、10 秒程度まで、FNB が小さい方がイオン温度が高くなり、核融合出力もこの間高くなる。

図 3 0 ⑥は、閉じ込め改善時の（ベータ限界指数-核融合出力）の軌跡である。先に述べたように、閉じ込め改善の解析の初期状態は Q 値が大きいため、パラメータ FNB の影響は小さい。ベータ限界で制限される出力上限もほとんど影響を受けない。

iii) 関連するオプション、パラメータ

表 1、項目 6 の外部加熱、電流駆動に関わるパラメータと関連する。

4. 2.2. スクリーニング因子 (Screening factor) 依存性

i) オプション、パラメータの取り扱い

スクリーニング因子は、プラズマ対向機器の表面で発生した不純物やD T燃料が主プラズマへの侵入しやすさを表すパラメータであり、プラズマと真空容器内機器との相互作用を支配する重要なパラメータである[1]。昇華により発生する不純物粒子とダストから放出されるD T粒子の主プラズマへの侵入しやすさはスクリーニング因子に比例すると仮定する。また、スパッタリングにより発生する不純物については、主プラズマから漏れたイオンがプラズマ対向面に入射する確率の位置依存性と主プラズマへの侵入しやすさを考慮するために、スクリーニング因子の APUT 乗に比例した侵入確率を仮定している。

スクリーニング因子は、ファイル `input_pfc` に於いて、プラズマ対向機器個別に指定される。表2の標準的な値では、プランケットは主プラズマに距離的に近いことから 0.01、ダイバータ部は主プラズマから離れているため、0.0001を使用している。

ii) 解析結果への影響

感度解析では、プランケット部のスクリーニング因子を固定し、ダイバータ部のスクリーニング因子を 0.0001 から増加させて解析結果を比較した。図3.1①は、核融合出力 840MW、Q 値 11.5 の場合について、ダイバータ部のスクリーニング因子と初期状態に於ける実効電荷の関係を表す。スクリーニング因子が 0.001 より大きいところで実効電荷は急に上昇する。逆にスクリーニング因子が小さいところでは、実効電荷はスクリーニング因子にごく弱くしか依存しない。以下の解析では、パラメータ APUT は 1.5 に固定した(4. 5 節参照)。

図3.1②から⑤は燃料過剰注入の解析結果の比較である。図3.1③に示すように、初期状態はスクリーニング因子が大きくなると、低温・高密度・高不純物割合に運転点は移動する。また、スクリーニング因子が 0.0001 と 0.001 では結果の差は小さい。核融合出力は、スクリーニング因子が大きいほど増加する傾向にある。図3.1⑤に示すように、スクリーニング因子が大きいほど、ダイバータ部の高 Z 不純物が主プラズマに多く侵入し電子密度が速く上昇するため、密度限界で制限される出力上限は低くなる。なお、ダイバータ部スクリーニング因子が 0.004 以上では不純物密度が大きくなりすぎ、初期状態の解が存在しない。

図3.1⑥から⑧は閉じ込め改善の応答結果比較である。解析の初期状態は、ダイバータ部スクリーニング因子が増加するに従い、低温・高密度に運転点が移動する。また、図3.1⑧に示すように、ベータ限界で制限される出力上限もスクリーニング因子が上昇するに従い増加し、スクリーニング因子 0.002 では、出力が 10%程度増加する。但し、閉じ込め改善の初期条件では、ダイバータ部スクリーニング因子が 0.002 以上で初期状態の解が存在しなくなる。また、スクリーニング因子 0.0001 と 0.001 では、結果に大きな差は生じない。

iii) 関連するオプション、パラメータ

スクリーニング因子は、プラズマ対向機器のモデルの重要なパラメータである。プラズマ対向機器の位置や冷却条件が変更なった場合、同時に修正する必要がある。スパッタされた材料の主プラズマへの侵入割合は、スクリーニング因子と APUT から評価されるため、パラメータ APUT と関連する。

4. 2 3. f-delay 依存性

i) オプション、パラメータの取り扱い

既に 4. 2 0 節で述べたように、プラズマ対向材料の昇華により発生する不純物の主プラズマへの流入やプラズマ対向壁に付着するダストから発生する DT 燃料の主プラズマへの流入の遅れ時間を求めるために使用する。パラメータ f-delay は真空容器内機器個々に定義され、f-delay が大きいほど、遅れ時間が大きいこと意味する。

ii) 解析結果への影響

図 3 2 ①、②は燃料過剰注入事象に於ける波形の比較である。燃料過剰注入では、外部からの DT 供給が支配的であるため、プラズマ対向壁からの不純物・DT 供給の影響は小さい。

図 3 2 ③から⑥は閉じ込め改善時の応答比較である。遅れ時間が小さい方が (f-delay が小さい方が)、出力上昇が大きくなる傾向にある。図 3 2 ④は昇華したプラズマ対向壁材料が主プラズマに侵入する量、図 3 2 ⑤はプラズマ対向面のダストから放出される DT 燃料が主プラズマに侵入する量を比較したものである。遅れ時間が短いほど、対向壁から放出される DT 燃料が多く主プラズマに侵入し、DT イオン密度が上昇するために出力も上昇する。また、遅れ時間が小さいほど多くの不純物が主プラズマに侵入し、主プラズマの輻射が増加し、プランケットプラズマ対向壁表面温度を上昇させるため、さらに多くの DT 燃料が対向壁表面から放出され、主プラズマの DT イオン密度を増加させる。この様な理由で、遅れ時間が小さいほど図 3 2 ③では出力上昇が大きくなる。但し、図 3 2 ⑥に示すように、ベータ限界で制限される出力上限はパラメータ f-delay にほとんど依存しない。

iii) 関連するオプション、パラメータ

プラズマ対向機器で発生する不純物や DT 燃料の遅れ時間の設定より、C_SIMP (4. 2 0 節参照) や CPF (4. 1 0 節参照) と関連する。

4. 2 4. ダスト密度 (density-dust) 依存性

i) オプション、パラメータの取り扱い

プラズマ対向壁に付着したダストは、低温でDT粒子を捕捉し、高温でDT粒子を放出する。パラメータ density-dust は、ファイル input_pfc に於いて、プラズマ対向機器個々に定義され、プラズマ対向壁表面に付着したダストが低温で捕捉する水素同位体密度を与える[1]。

ii) 解析結果への影響

ダストに捕捉されるDT原子密度が大きいほど、プラズマ対向壁温度が上昇したときに放出されるDT燃料が大きくなる。よって、パラメータ density-dust が大きくなるほど、プラズマ対向壁温度が上昇する擾乱発生時のDTイオン密度が大きくなり、出力も上昇する。

図3.3①から④は燃料過剰注入時のプラズマの振る舞いを比較したものである。図3.3③に示すように、出力が上昇に伴い、プラズマ対向壁温度が上昇すると DT 燃料が対向壁から放出され主プラズマに侵入する。その結果、図3.3④に示すように、主プラズマのDTイオン密度が上昇し、出力が上昇する。こうして、出力が上昇すると、輻射が増加し、さらにプラズマ対向壁温度が上昇し、DT燃料が壁から供給されることで出力がさらに増加する。しかしながら、擾乱による密度上昇が速いため、図3.3②のように密度限界で制限される出力上限値は大きく変更を受けない。

図3.3⑤、⑥は、閉じ込め改善の結果を比較したものである。閉じ込め改善でも、燃料過剰注入と同様の応答をする。図3.3⑥にベータ限界指数と核融合出力との関係を示すが、ベータ限界で制限される出力上限も、ダストに捕捉されたDT量にほとんど依存しない。

iii) 関連するオプション、パラメータ

ダストの水素同位体放出挙動は温度に強く依存するため、ダストから放出されるDT燃料の量はプラズマ対向壁温度を決めるパラメータに依存する。プラズマ対向壁温度に関わるパラメータとしては、輻射に関するパラメータ (EGRAD、FRPLI など)、プラズマ対向壁の物性値 (熱伝達係数、冷却水温度) があげられる。

4. 2.5. ピーキング因子 (peaking factor) 依存性

i) オプション、パラメータの取り扱い

ピーキング因子は、プラズマ対向壁表面での熱負荷分布のピーク度を与える。また、プラズマ対向面では、ステップ的な負荷分布を仮定するため、熱を受ける面積はピーキング因子に反比例する。

ii) 解析結果への影響

図3.4①から⑥は燃料過剰注入事象での波形を比較したものである。一般にピーキング因子を大きくすると、プラズマ対向壁熱負荷・温度が上昇し、昇華により発生する不純物が増加するために、プラズマの輻射が増加する。解析では、初期状態に於ける、内側ダイバータ板と外側ダイバータ板の熱負荷密度がほぼ同じになるように各々ピーキング因子を調整した。ダイバータ板以外のプラズマ対向機器のピーキング因子は1として解析を行った。図3.4③に示す内側ダイバータ板熱負荷は、プラズマからの輻射及び熱流束による負荷から輻射や昇華による冷却効果を差し引いた熱負荷密度である。ピーキング因子が大きいほど、初期状態のダイバータ板熱負荷が大きく、その温度も高い。図3.4⑤に示すように、燃料過剰注入により出力が上昇すると、ピーキング因子が大きい場合ほど、速く昇華した不純物が主プラズマに侵入し、放射冷却の効果で出力が低下する。その結果、図3.4①のように、ダイバータ板ピーキング因子が大きいほど出力上昇が低く抑えられる。また、ピーキング因子が大きいほど、電子密度が上昇し、速く密度限界に達するため、密度限界で制限される出力上限は低くなる。

図3.4⑦から⑪は閉じ込め改善時のプラズマ応答比較である。ダイバータ板ピーキング因子が大きいほど、ダイバータ板の温度が高く、速く不純物が主プラズマに侵入するため、出力の上昇が抑えられる。図3.4⑧に示すように、ダイバータ板から発生する不純物の効果が現れる以前にベータ値が上昇してしまうため、ベータ限界で制限される出力上限はピーキング因子にほとんど依存しない。

iii) 関連するオプション、パラメータ

ピーキング因子が大きいほど、昇華する壁材量の量が大きくなる。そのため、昇華した不純物が主プラズマに侵入する遅れ時間を与える、C-SIMP (4. 2.0節参照)、f-delay (4. 2.3節参照) や、昇華した不純物が主プラズマに侵入する割合を与えるスクリーニング因子 (4. 2.2節参照) の役割が重要になる。

5. まとめ

本検討では擾乱に対するプラズマの応答を、初期状態による応答と解析パラメータによる応答に分けて検討した。まず、擾乱に対するプラズマの応答が初期状態の違いでどの様に影響が現れるかを解析し、各擾乱に対して最も核融合出力が上昇する初期状態を求めた。この様にして求めた、擾乱と初期状態の組を用いて、SAFALY コードが持つ解析パラメータに対する感度解析を行った。

擾乱に対する応答の初期条件依存性について、3. 4 節でまとめた。3 章の検討は標準的な解析パラメータを使用して行ったが、3. 4 節の結論はこの解析パラメータに依存しないと考えられる。

擾乱発生時の核融合出力の最大値は、プラズマ自身の燃焼性能によって決まる場合もあるが、燃料過剰注入や閉じ込め改善の事象では、密度限界やベータ値限界などのディスラプション条件により最大出力が決まることが多い。4 章で検討したように、大きな核融合出力上昇を引き起こす擾乱では、プラズマ密度やベータ値の上昇が速いため、解析パラメータの違いの影響が現れにくい。しかしながら、幾つかのパラメータは、核融合出力やプラズマ対向機器の熱負荷に大きな影響を与える。以下に影響の大きいパラメータとそのパラメータに対するプラズマや対向機器熱負荷の振る舞いをまとめる。

1) プラズマの初期状態に影響するパラメータ。

- ・ C I : イオンエネルギー閉じ込め時間の評価に使用するパラメータで、このパラメータが大きいほど、運転点は高温・低密度に移動する。但し、C I は通常 1 度の値を取り、特別な理由がない限り大きく変更する必要はない。
- ・ C A : ヘリウム粒子閉じ込め時間の評価に使用するパラメータで、C A が大きくなると、初期状態が低温・高密度に移動する。既存装置の知見から、C A は 5.0 度の値をとることが知られているため、これから大きくはずれた値を使用することは出来ない。
- ・ A T H : H モードでの温度分布を与えるパラメータである。A T H が大きいほど、運転点は低温・高密度に移る。A T H は、1.5 次元輸送解析の結果と整合性が取れるよう設定しているが、閉じ込めモードや外部加熱により温度分布が変更を受ける場合がある。
- ・ A P H : H モードでの密度分布を与えるパラメータである。A P H が大きいほど、運転点は高温・低密度に移る。A T H は、既存装置の結果を反映して 0.1 度に設定しているが、高速ペレット入射装置など、プラズマ中心に燃料供給が可能な場合は、A P H を大きく設定することが可能である。
- ・ スクリーニング因子：プラズマ対向機器の表面材料の昇華やスパッタリングで発生する不純物やダストから放出される D T 燃料の主プラズマへの侵入度合いを表す。初期状態の不純物割合を決定する。ダイバータ部に高 Z 材料を使用する I T E R の設計では、ダイバータカセットのスクリーニング因子が大きいと、プラズマは低温・高密度・高不純物割合の状態になる。

2) プラズマの応答に影響するパラメータ

- C P F : D T イオン粒子閉じ込め時間の評価に使用するパラメータである。特に、燃料過剰注入事象でのプラズマの振る舞いに影響し、P F C が大きいほど速く密度限界に達するため密度限界で制限される出力最大値は低下する。SAFALY コードの定式化では、D T イオンの閉じ込め時間を、リサイクリングの効果を含んだ粒子閉じ込め時間として扱っている。よって、C P F はプラズマ対向壁の状態や排気条件に依存しており、運転条件に従って設定する必要がある。

3) プラズマ対向機器の熱負荷に影響するパラメータ

- ENDV : ダイバーティプラズマの電子密度を評価するパラメータであり、ダイバーティ室での輻射パワーは ENDV に依存する。ダイバーティ熱流束が小さい領域では ($P_{DIV} < 150\text{MW}$)、ENDV が大きいほどダイバーティ電子密度が増加し、ダイバーティでの輻射が増加するため、ダイバーティ板への熱流束が減少する。しかし、ダイバーティ熱流束が大きい領域では ($P_{DIV} > 150\text{MW}$)、ENDV が大きくダイバーティ電子密度が大きいほど、ダイバーティでの輻射が減少し、ダイバーティ板への熱流束が増加する。ダイバーティ板のからの不純物放出量やプラズマ対向壁からの DT ガス放出量の振る舞いは、このパラメータに強く依存する。但し、このパラメータは、ダイバーティ解析などの結果を参考に設定する必要がある。
- ピーキング因子 : プラズマ対向機器表面の熱負荷密度の集中度を与える。ピーキング因子が大きいほど、表面熱負荷密度が大きく、表面温度が高くなる。表面温度が十分高くなる設定では、昇華により発生する不純物が主プラズマに侵入するため、燃焼プラズマの応答にも影響を与える。

以上のパラメータのうちピーキング因子、スクリーニング因子、閉じ込め時間に化するパラメータ、C I、C A、C P F を標準値から変更する事は、初期状態やプラズマの応答及びプラズマ対向壁負荷に影響を与えるが、擾乱時の最大核融合出力を大きく増加させることはない。しかしながら、プラズマ分布に関わるパラメータ A T H や A P H は、それらを標準値から変更することで、擾乱発生時の最大核融合出力が増加する可能性があるため注意が必要である。

本報告書では、SAFALY コードの解析パラメータについて一通り感度解析を行い、プラズマの応答を比較した。今後、本報告書の感度解析結果を参考にして、SAFALY を用いた解析結果の妥当性や保守性を検討する。

参考文献

- [1] 仙田郁夫・藤枝浩文・閨谷譲・多田栄介・莊司昭朗、プラズマ過渡事象解析コード SAFALY の改訂（1）、日本原子力研究所研究報告 JAERI-Data/Code 2003-008 (2003).
- [2] Plant description document, in ITER Final Design Report, IAEA (2002).
- [3] Safety analysis data list-3 (SADL-3), ITER Joint central team (2001).
- [4] ITER Physics Basis, Nucl. Fusion 39 (1999) 2137.
ITER Physics Guideline, in ITER Final Design Report, IAEA (2002).

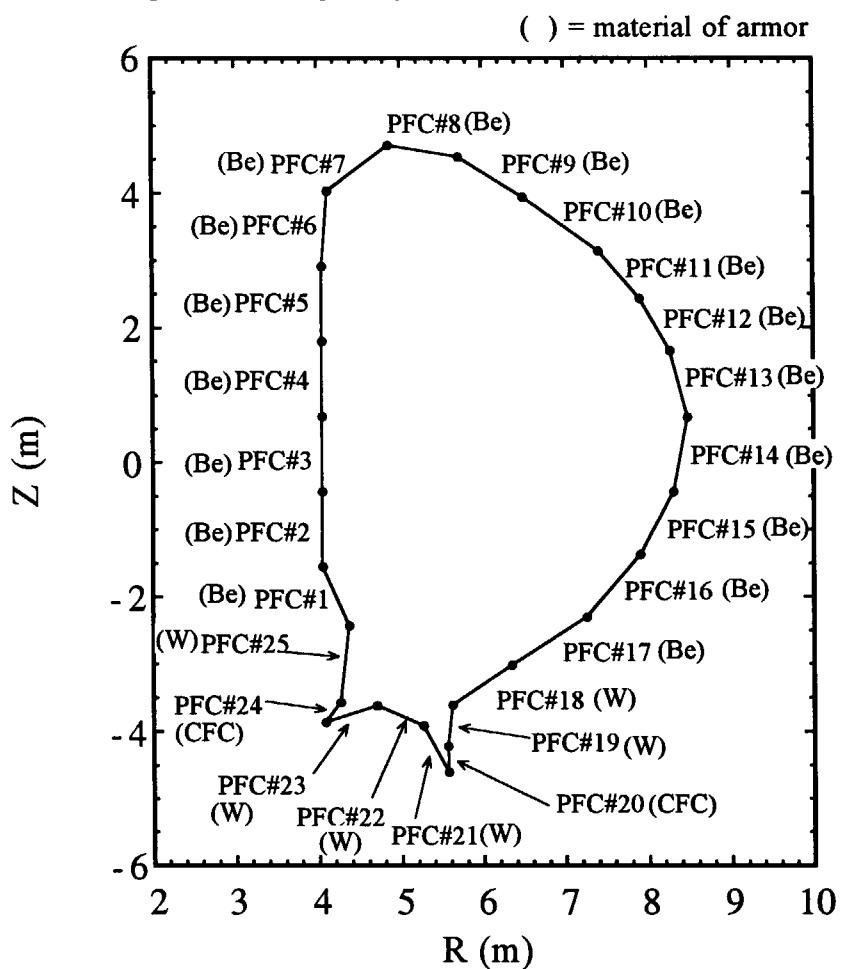
Position of plasma facing components (PFC) in the analysis of safaly

図1、SAFALY 解析用、プラズマ対向機器モデルの配置。2001 年 ITER 最終設計報告書に記載された真空容器内機器の配置をモデル化した。括弧内はプラズマ対向面（アーマー）の材料を示す。

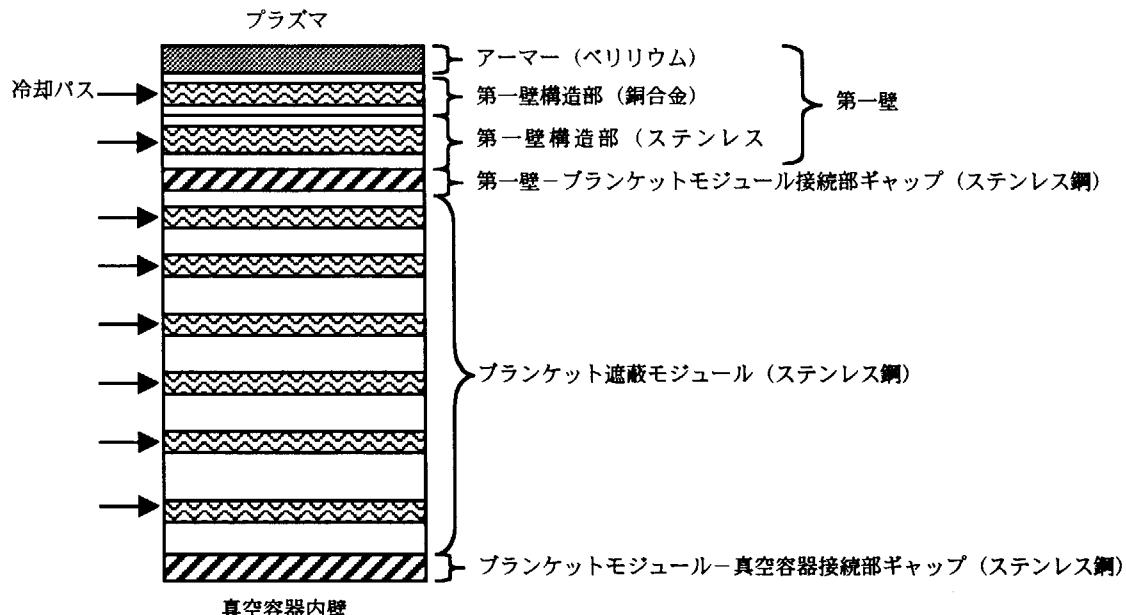


図2. 1, ブランケットモジュールのモデル (全体厚さ=0.455m)

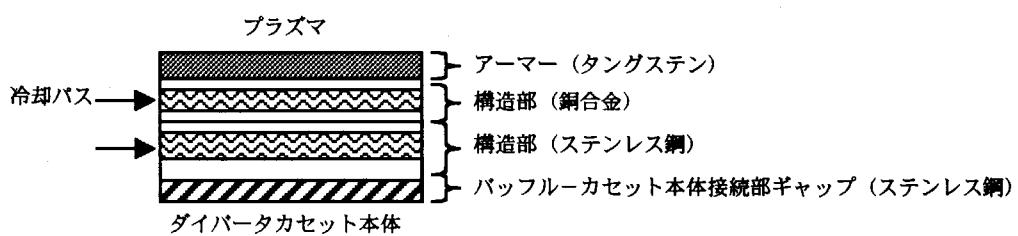


図2. 2, ダイバータバッフル板のモデル (全体厚さ=0.16m)

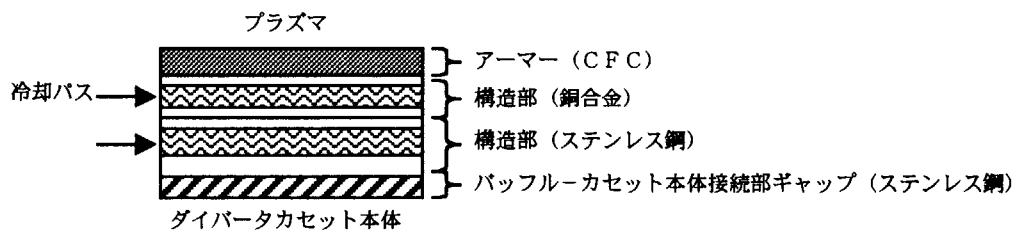


図2. 3, ダイバータターゲット板のモデル (全体厚さ=0.23m)

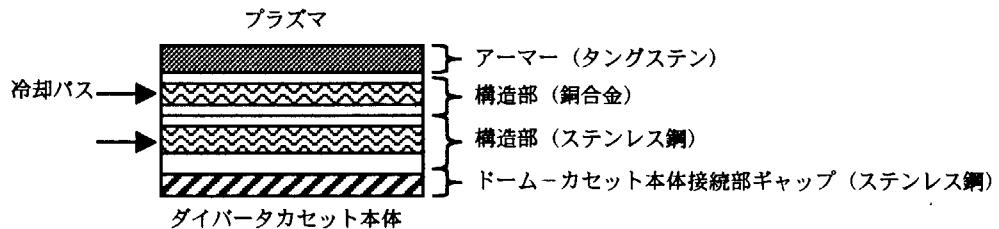


図2. 4, ダイバータドーム部のモデル (全体厚さ=0.09m)

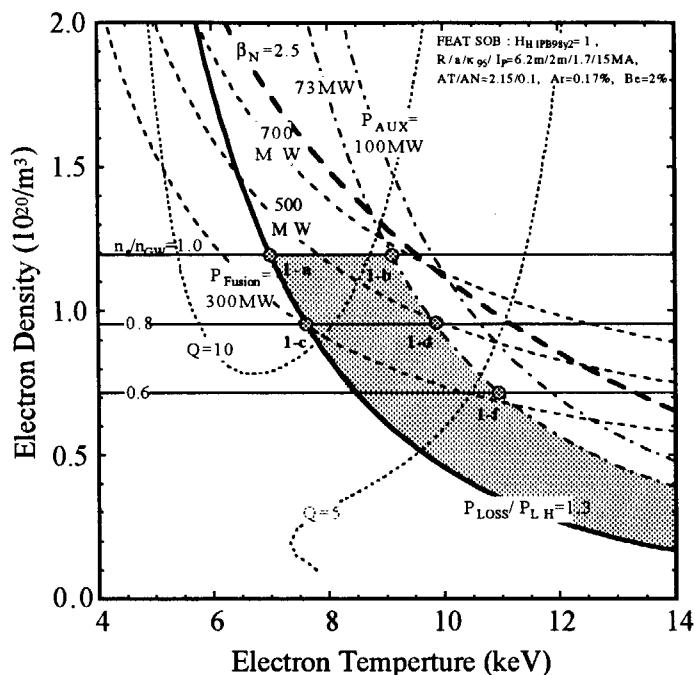


図3, プラズマ電流 15MA の場合の初期状態のポップコーン図。ハッチ部は運転領域を示し、○点を代表的な初期状態としてプラズマ応答を解析する。

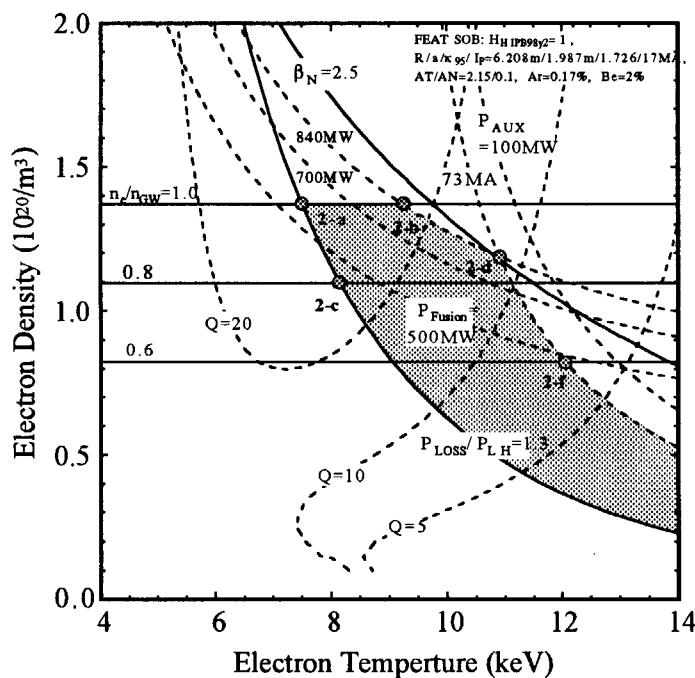
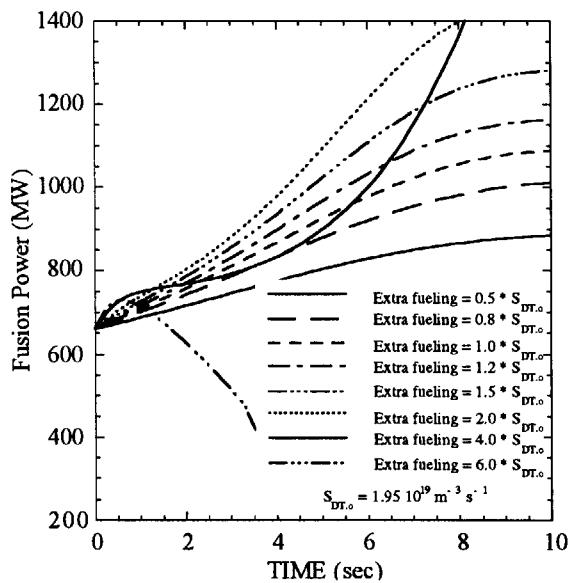
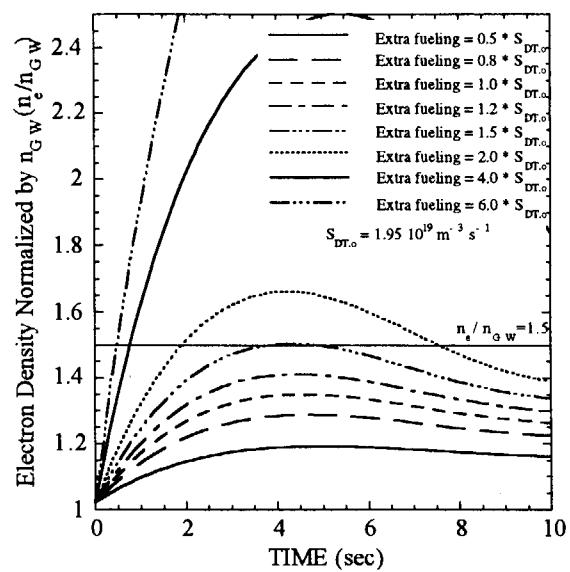


図4, プラズマ電流 17MA の場合の初期状態のポップコーン図。ハッチ部は運転領域を示し、○点を代表的な初期状態としてプラズマ応答を解析する。

①核融合出力の応答



②Greenwald 密度で規格化した電子密度



③ (ne/nGW - 出力) の軌跡

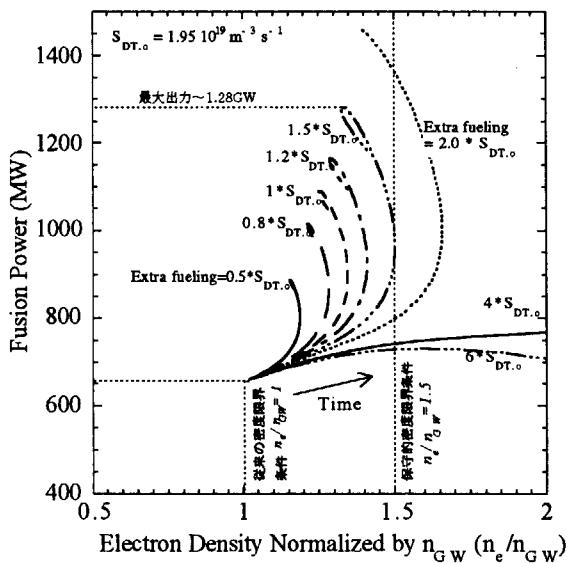
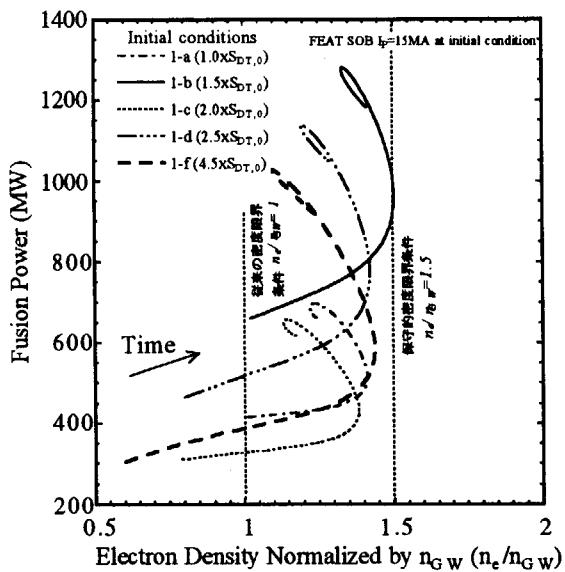
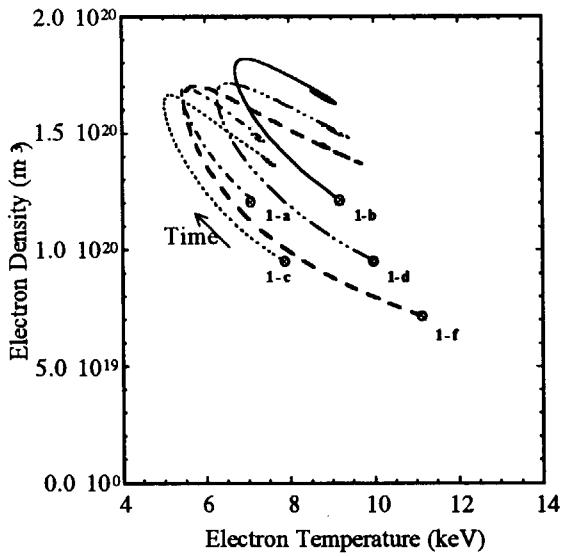


図5、初期プラズマ電流 15MA、初期状態を図3の 1-b 点とした場合、燃料過剰注入量とプラズマ応答の比較。（初期値：出力 660MW、Q 値 9.0）

① (n_e/n_{GW} -出力) の軌跡

② (電子温度-電子密度) の軌跡



③ プラズマ電流の応答

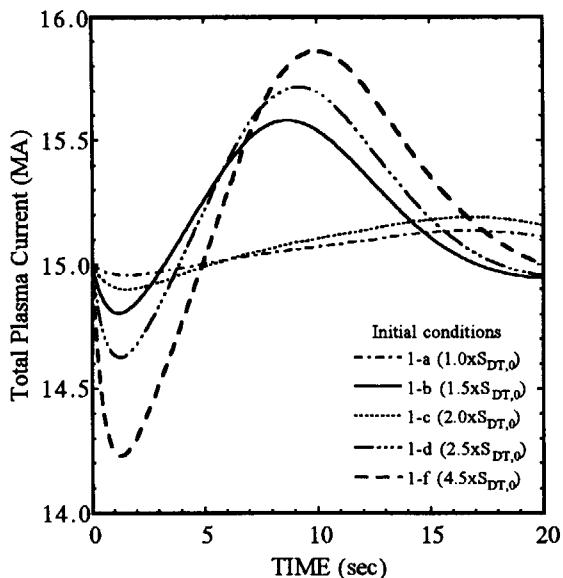
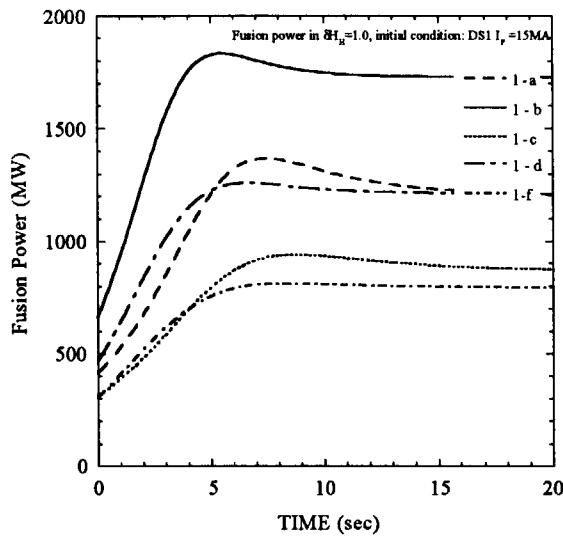
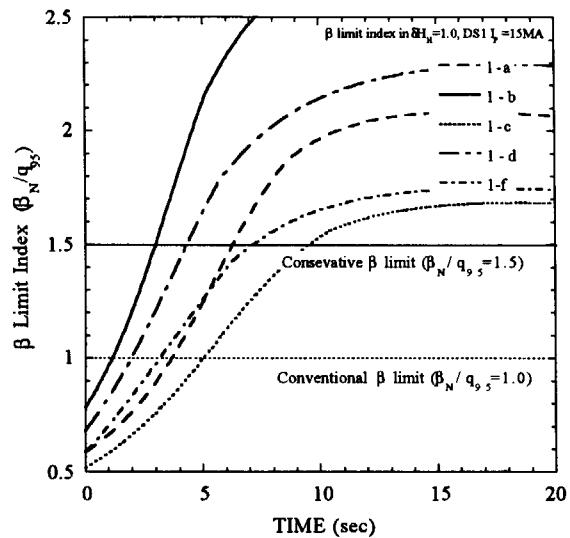


図 6、初期プラズマ電流 15MA、初期状態を図 3 の○点としたときの最大出力変動を与える、燃料過剰注入量とその時のプラズマ応答。保守的な密度限界条件を課したとき最大出力変動を与える燃料過剰注入量を各初期状態について求めた。

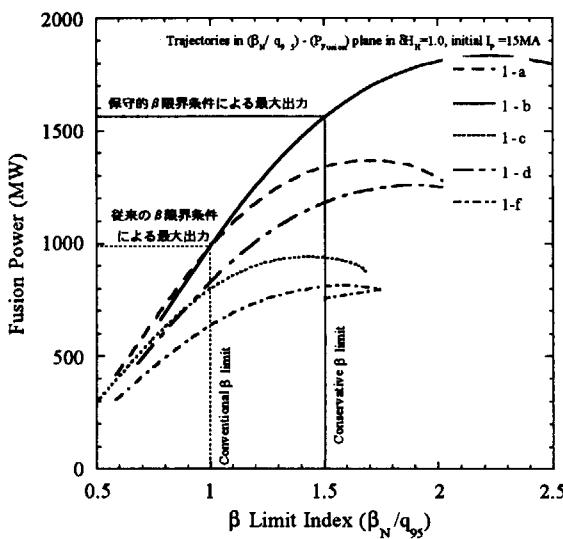
①核融合出力時間変化の比較



②ベータ限界値指標の時間変化の比較



③(ベータ限界指標-出力) の軌跡



④(電子温度-電子密度) の軌跡

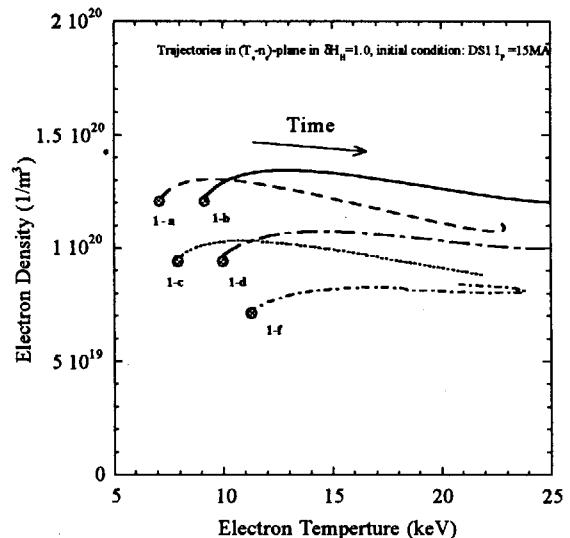
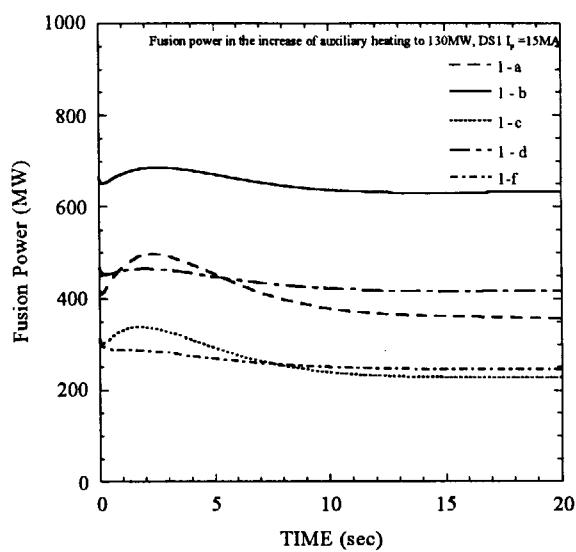
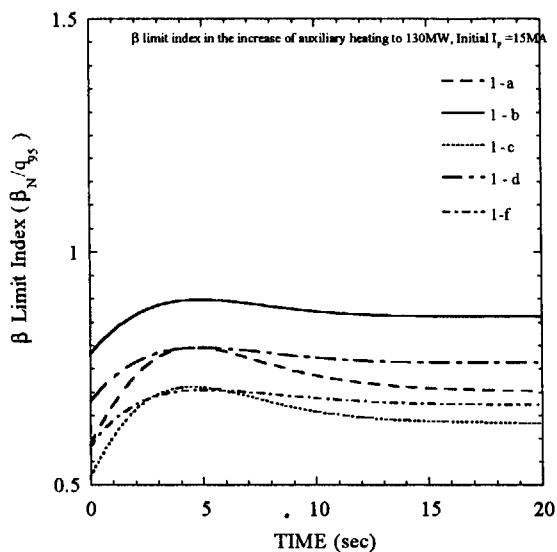


図 7、初期プラズマ電流 15MA、初期状態を図 3 の○点としたとき、 $\delta H_H=1$ の閉じ込め改善に対するプラズマ応答の比較。

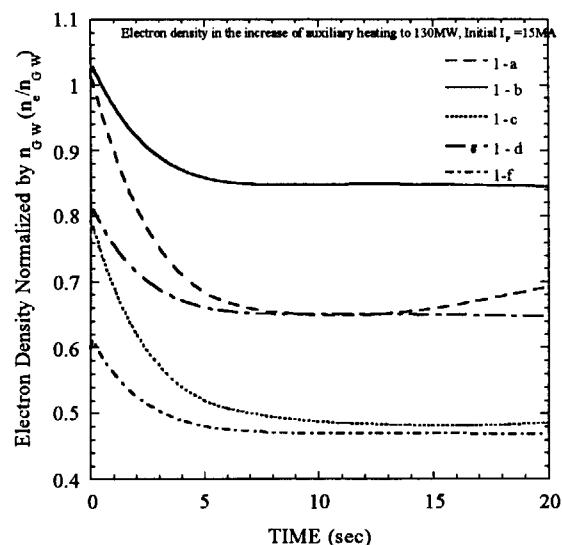
①核融合出力時間変化の比較



②ベータ限界値指指数の時間変化の比較



③Greenwald 密度で規格化した電子密度



④(電子温度 - 電子密度) の軌跡

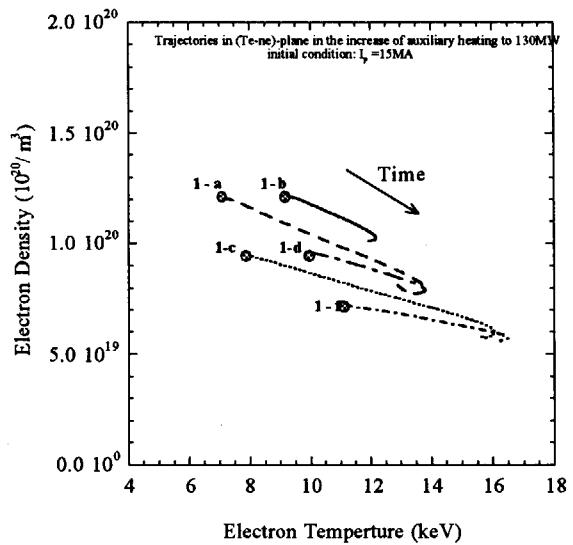
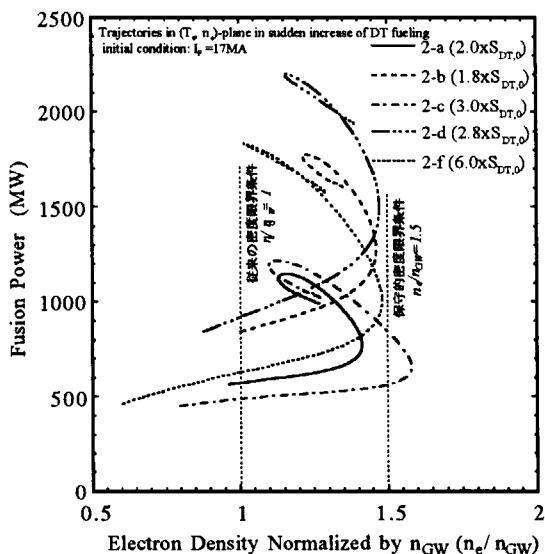
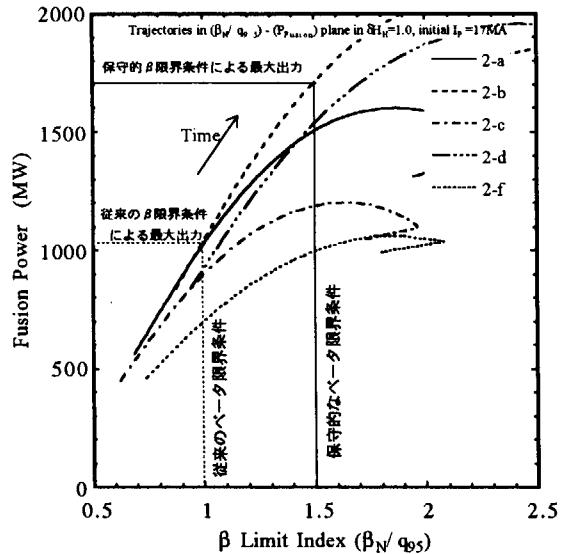


図 8、初期プラズマ電流 15MA、初期状態を図 3 の○点としたとき、過剰外部加熱で全加熱パワーが 130MW に上昇したときのプラズマ応答比較。

①燃料過剰注入時、(ne/nGW - 出力)軌跡の比較。2-d点を初期状態とした時、出力が最大となる。



②閉じ込め改善時、(ベータ限界指数 - 出力)軌跡の比較 ($\delta H_H=1.0$)。2-b点を初期状態とした時、出力が最大となる。



③過剰外部加熱時、核融合出力の時間発展。
大きな出力上昇はない。

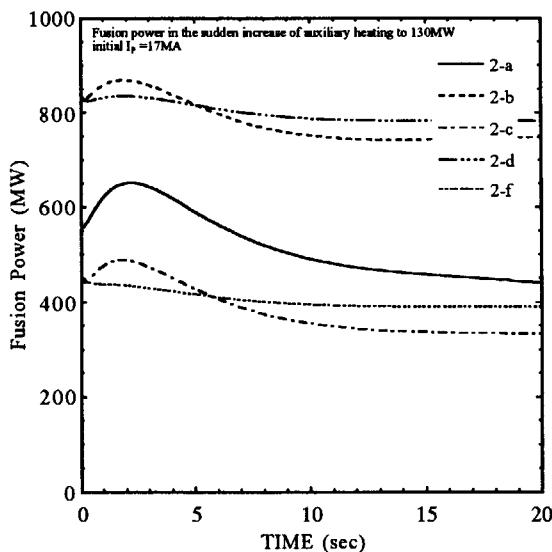
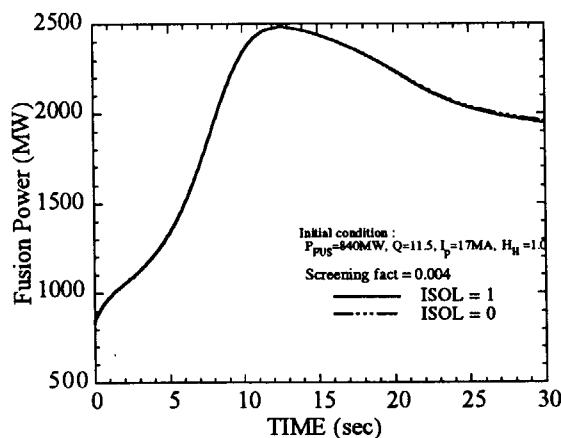
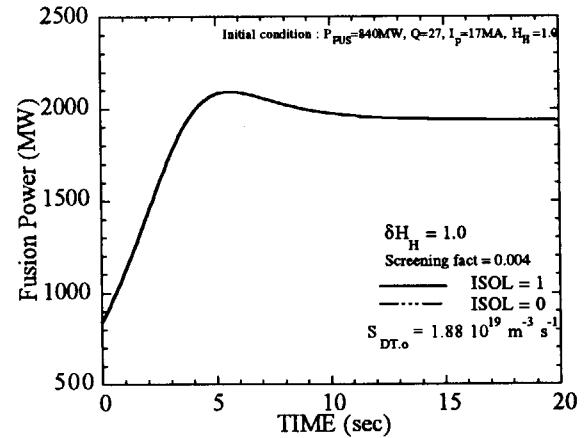


図9、初期プラズマ電流17MAの場合、初期状態を図4の○点としたとき、燃料過剰注入、閉じ込め改善、過剰外部加熱に対するプラズマ応答の比較。

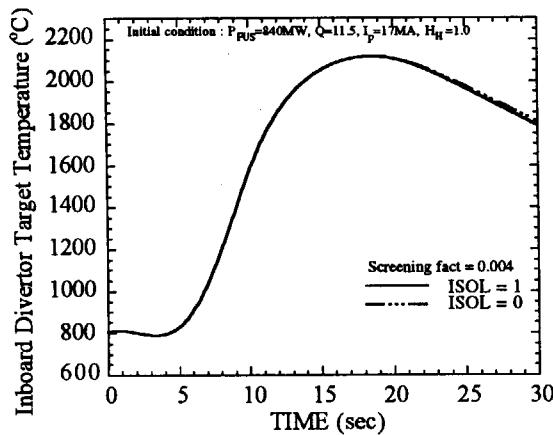
①燃料過剰注入時の出力波形



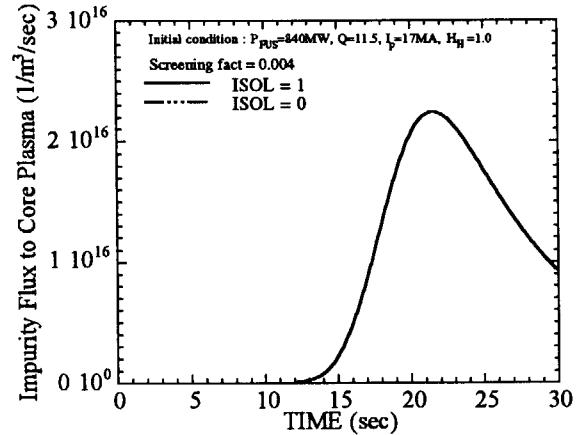
②閉じ込め改善時の出力波形



③燃料過剰注入時の内側ダイバータ板温度



④燃料過剰注入時の昇華不純物流入量



⑤燃料過剰注入時の主プラズマ炭素密度

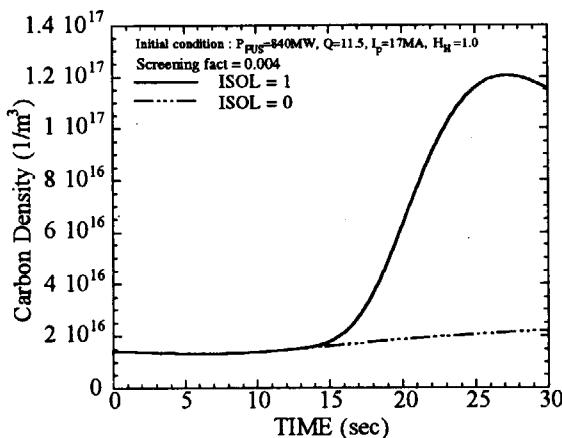
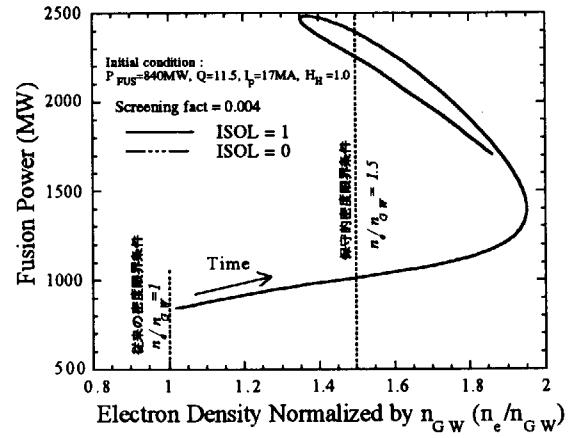
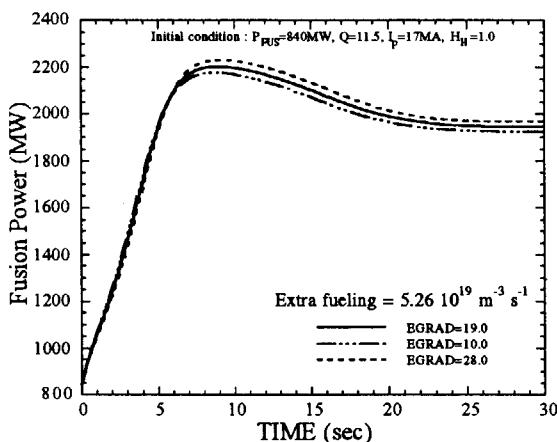
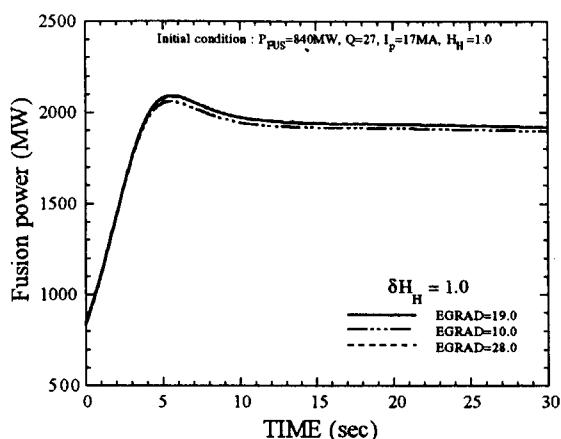
⑥燃料過剰注入時の $(n_e/n_{GW} - P_{\text{fus}})$ の軌跡

図 10、解析パラメータ ISOL に対する感度解析結果 (ダイバータスクリーニング因子=0.004)。
ISOL=1 では、PFC 昇華不純物の主プラズマ流入の影響を評価するため、高温になるダイバータターゲット板材料の原子密度が主プラズマで増加する。

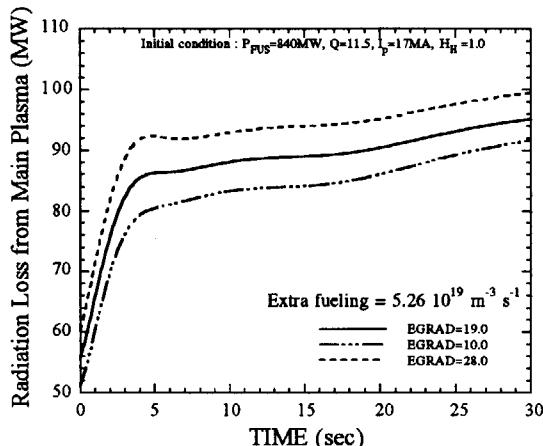
①燃料過剰注入時の出力波形



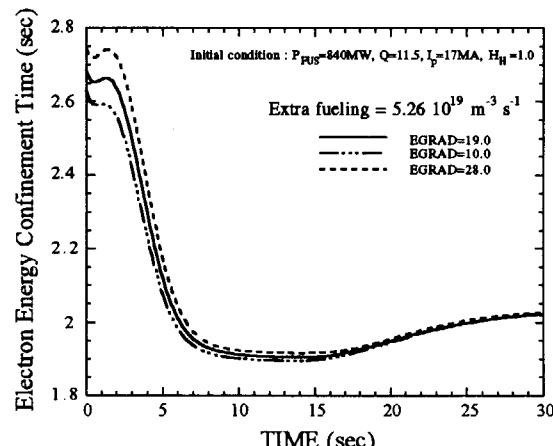
②閉じ込め改善時の出力波形



③燃料過剰注入時の主プラズマ輻射パワー比較



④燃料過剰注入時の電子エネルギー閉込時間



⑤燃料過剰注入時の DT イオン密度比較

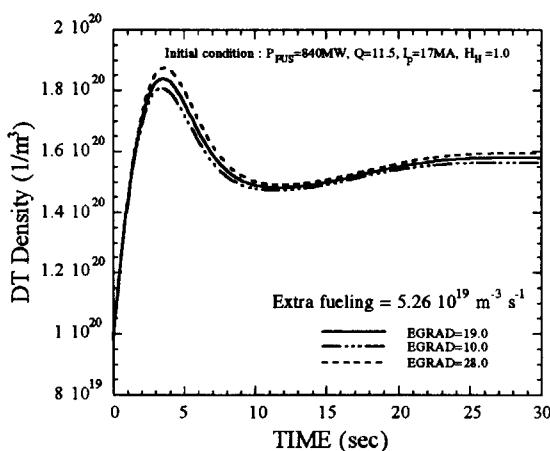
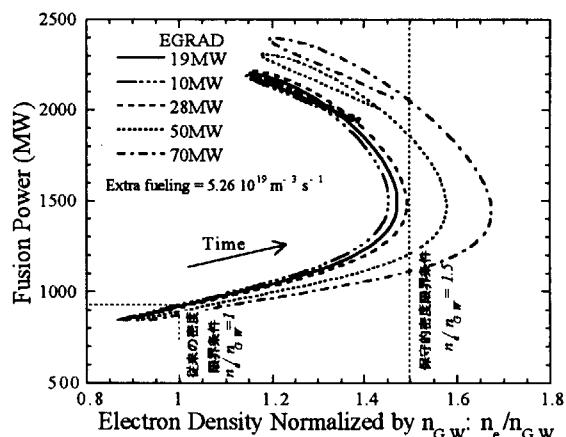
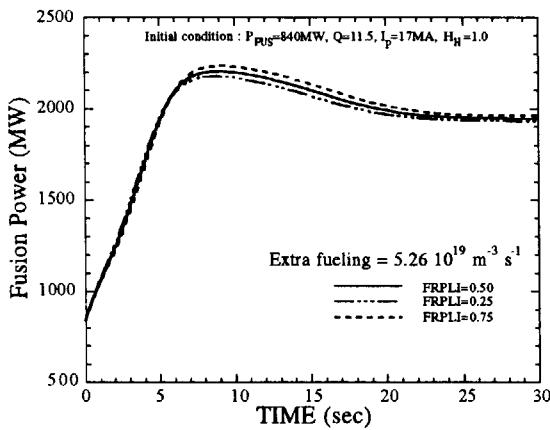
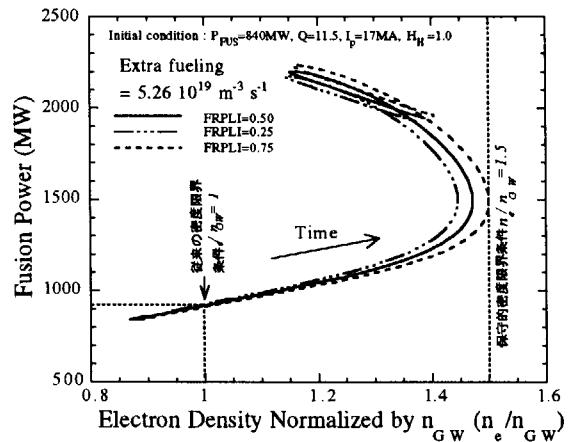
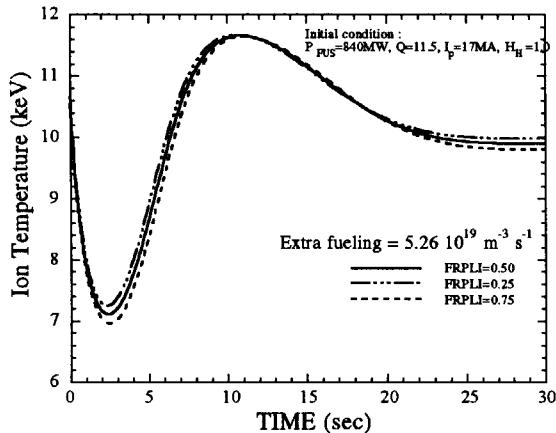
⑥燃料過剰注入に於いて、EDRAD をさらに増加させたときの $(n_e/n_{GW} - P_{\text{fus}})$ の軌跡

図 1 1、解析パラメータ E G R A D に対する感度解析結果。

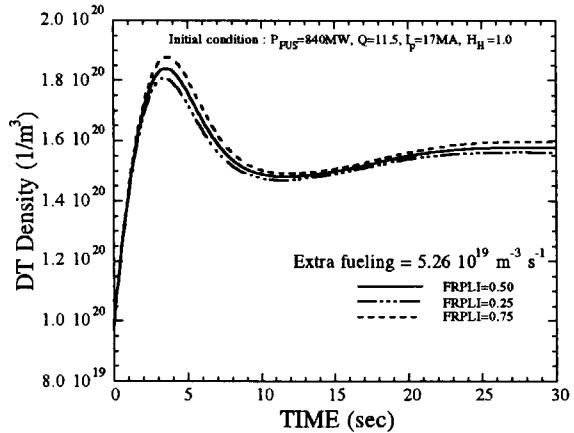
①燃料過剰注入時の出力波形

②燃料過剰注入時の $(n_e/n_{GW}-P_{\text{fus}})$ の軌跡

③燃料過剰注入時の DT イオン温度比較



④燃料過剰注入時のイオン密度比較



⑤閉じ込め改善時の出力波形

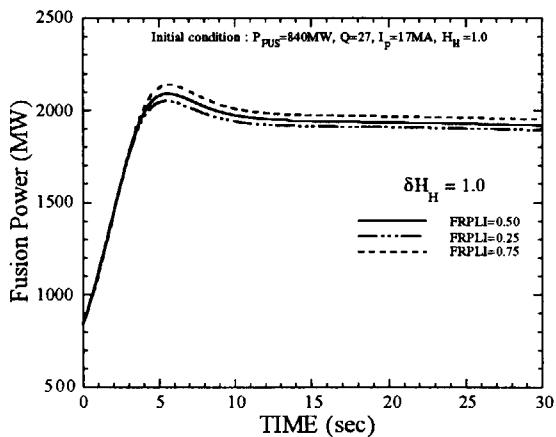
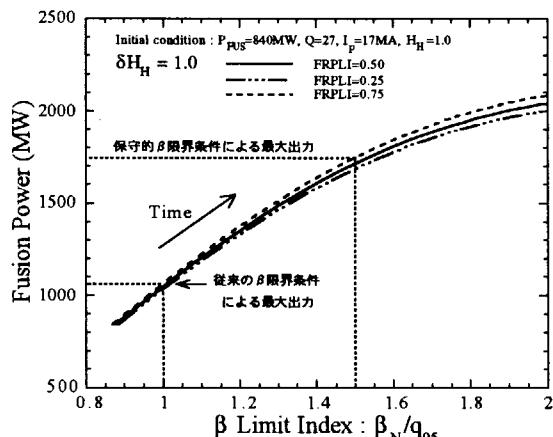
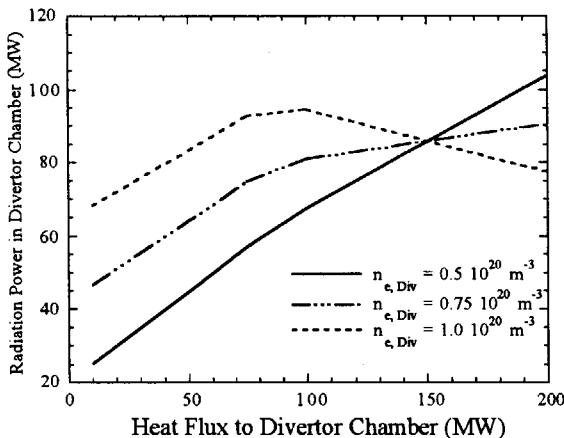
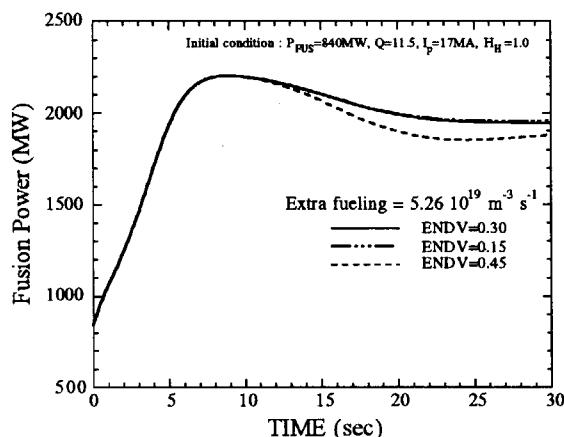
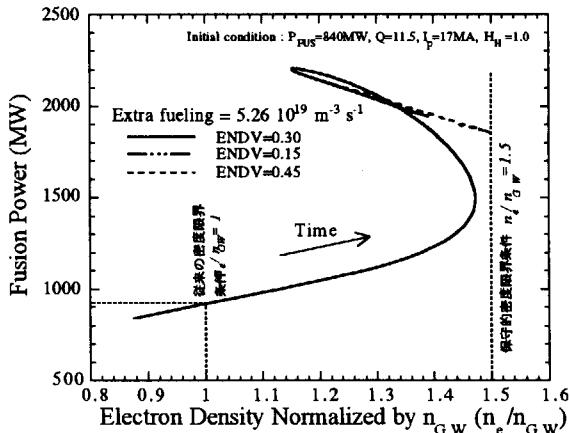
⑥閉じ込め改善時の(β 限界指標 - 出力)軌跡

図 1.2、解析パラメータ F R P L I に対する感度解析結果。EGRAD を 19MW に固定し、FRPLI を変えたときのプラズマ応答を比較した。

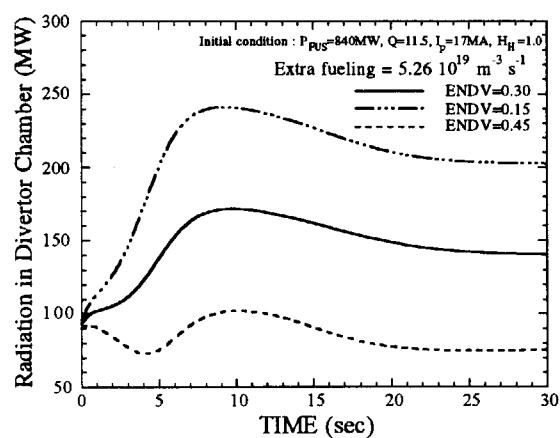
①4. 3節式(1)で表されるダイバータ室への熱流速と輻射パワーの関係



②燃料過剰注入時の出力波形

③燃料過剰注入時の $(n_e/n_{GW} - P_{fus})$ の軌跡

④燃料過剰注入時のダイバータ部輻射パワー



⑤燃料過剰注入時の内側ダイバータ板温度

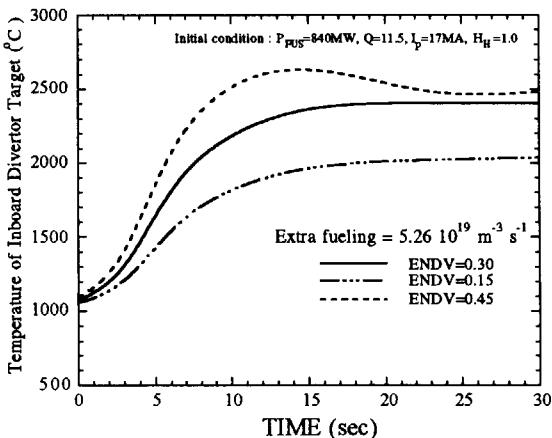
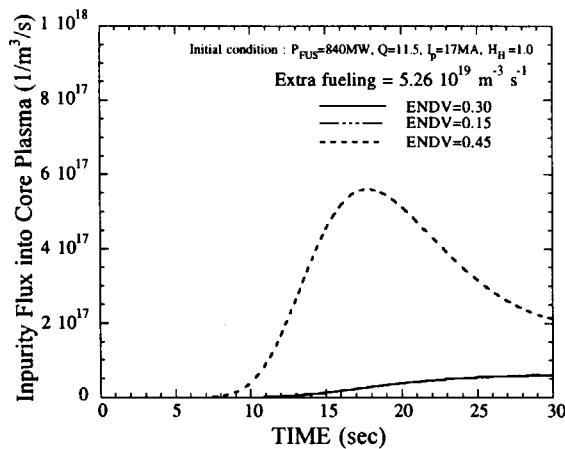
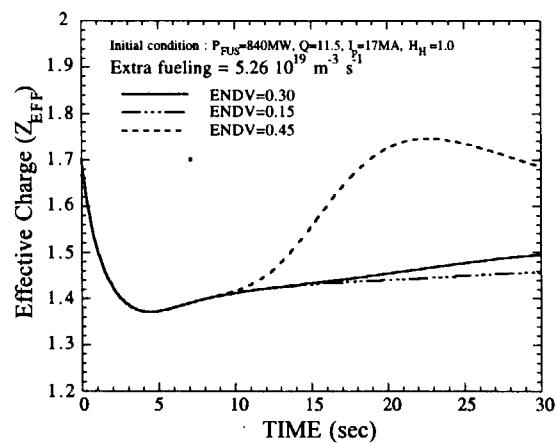


図1.3、解析パラメータENDVに対する感度解析結果。ENDVはダイバータ部での輻射パワーの評価に重要な役割を持つ。

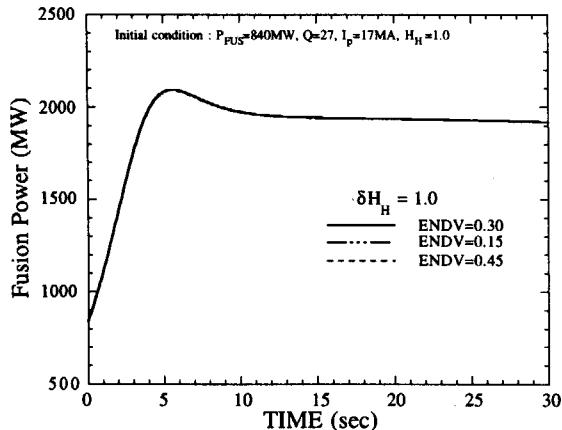
⑥燃料過剰注入時の昇華不純物流入量



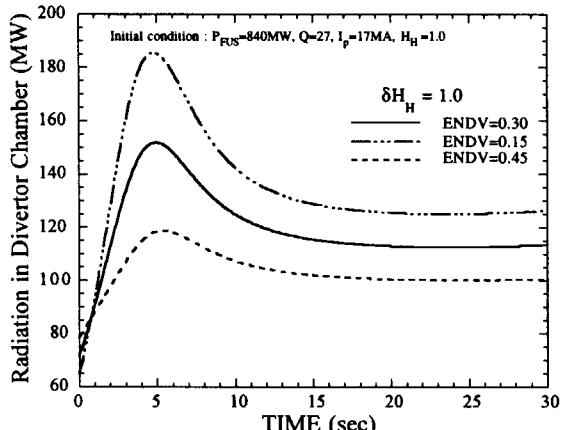
⑦燃料過剰注入時の主プラズマ実効電荷



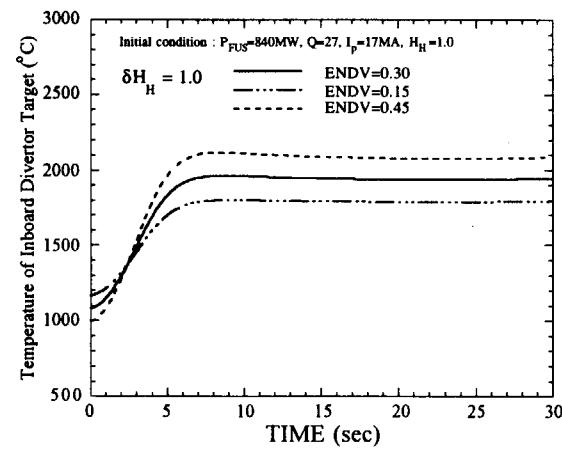
⑧閉じ込め改善時の出力波形



⑨閉じ込め改善時のダイバータ部輻射パワー



⑩閉じ込め改善時の内側ダイバータ板温度



⑪閉じ込め改善時の昇華不純物流入量

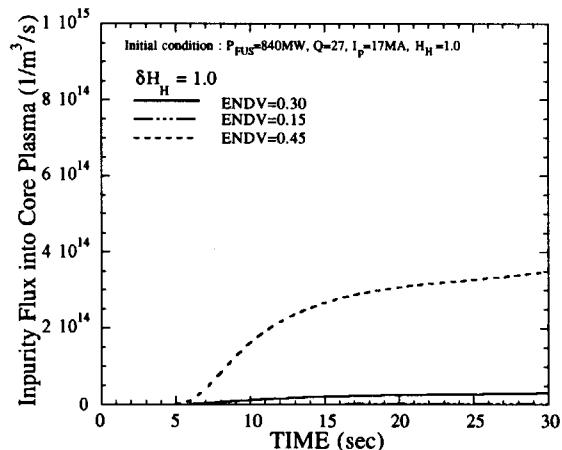
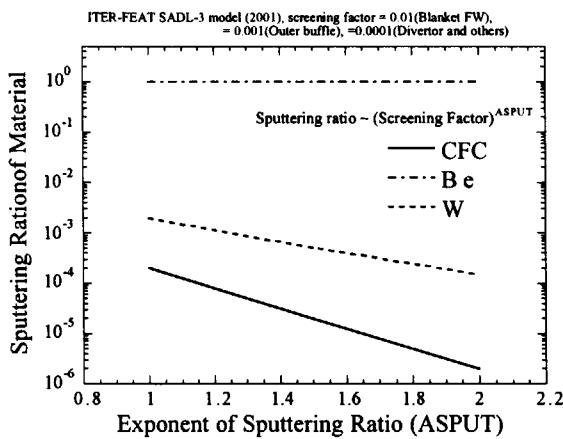
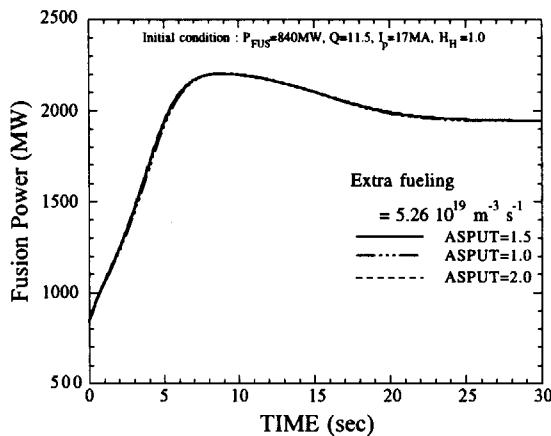
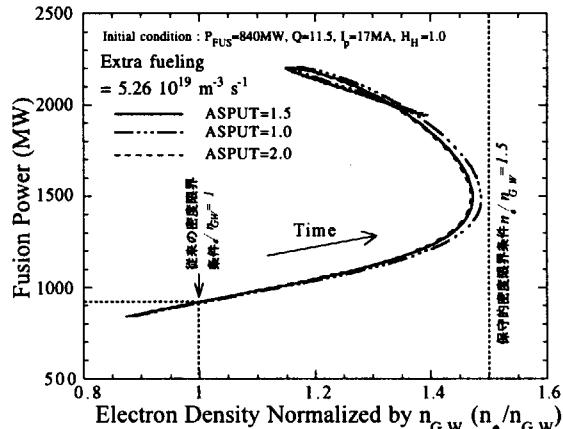


図 1 3、前ページの続き

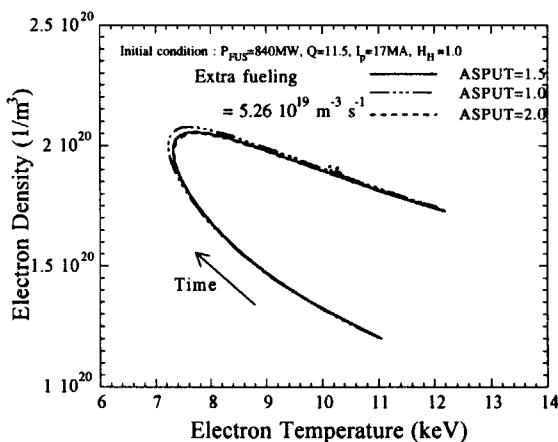
① A S P U T とスパッタされた各不純物流入割合



② 燃料過剰注入時の出力波形

③ 燃料過剰注入時の $(n_e/n_{GW}-P_{fus})$ の軌跡

④ 燃料過剰注入時の (電子温度 - 電子密度) 軌跡



⑤ 燃料過剰注入時の実効電荷波形

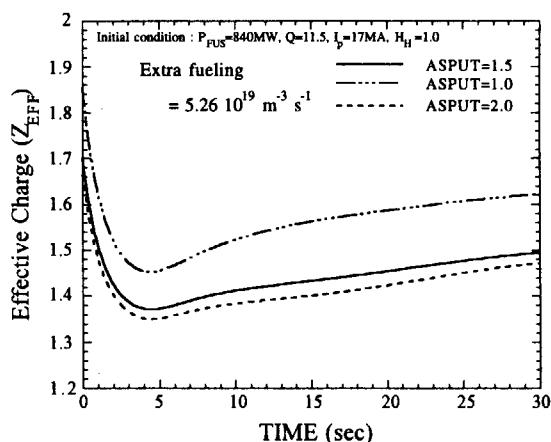
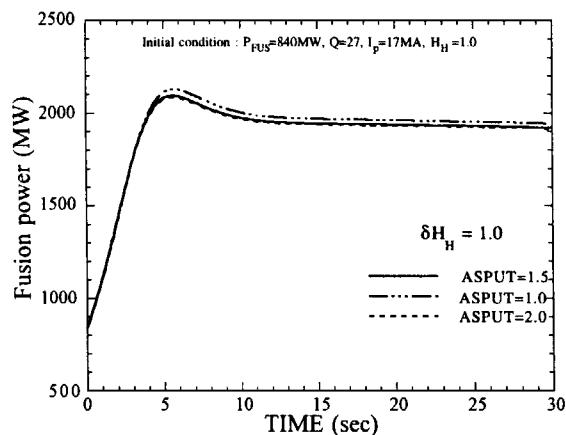
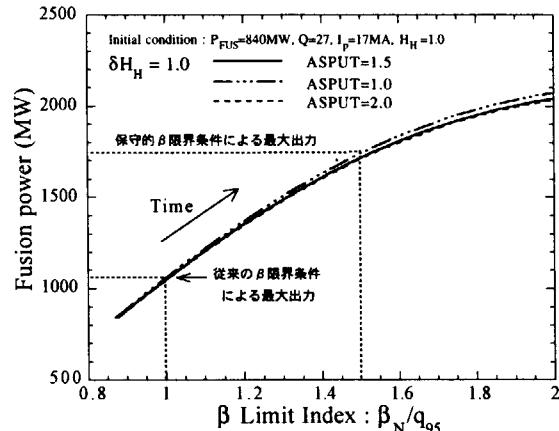
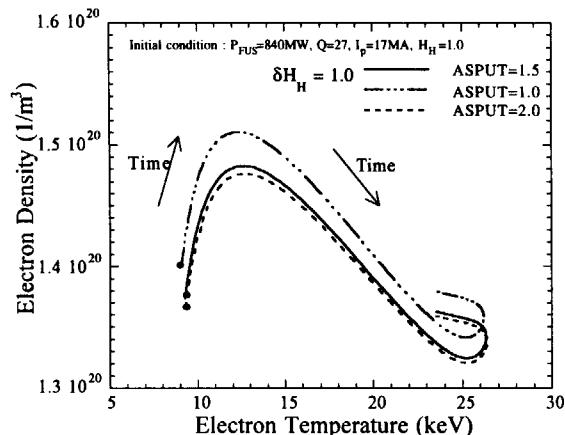


図 1 4、解析パラメータ A S P U T に対する感度解析結果。ASPUT が大きいほど、スクリーニング因子が小さいダイバータ部でスパッタされる不純物の主プラズマ流入割合が減少する。

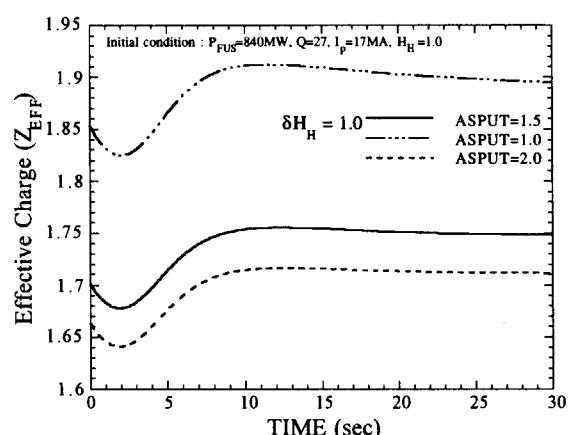
⑥閉じ込め改善時の出力波形

⑦閉じ込め改善時の(β 限界指数-出力)軌跡

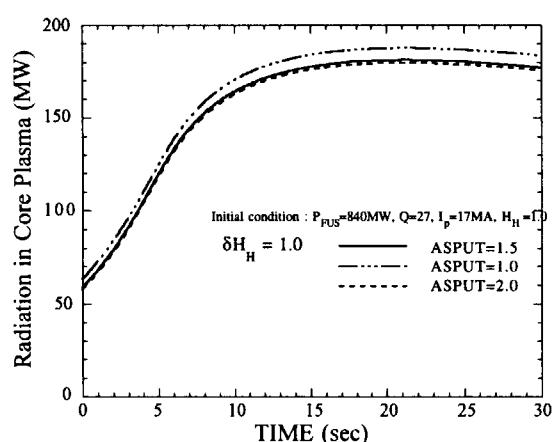
⑧閉じ込め改善時の(電子温度-電子密度)軌跡



⑨閉じ込め改善時の実効電荷波形



⑩閉じ込め改善時の主プラズマ輻射パワー



⑪閉じ込め改善時のDTイオン密度波形

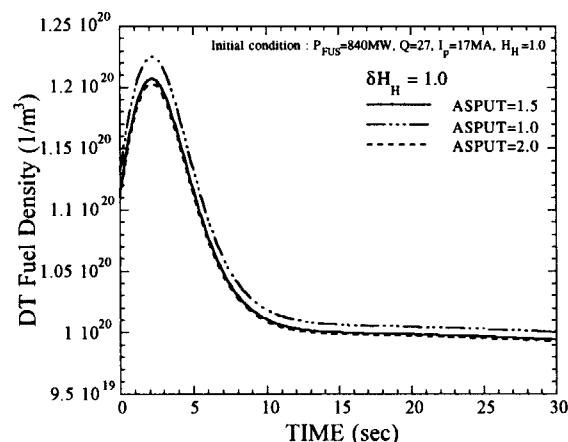
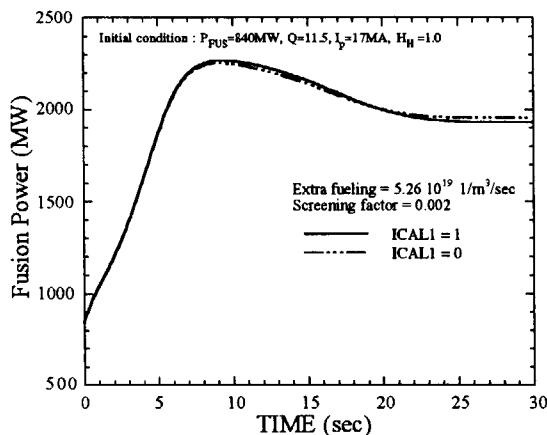
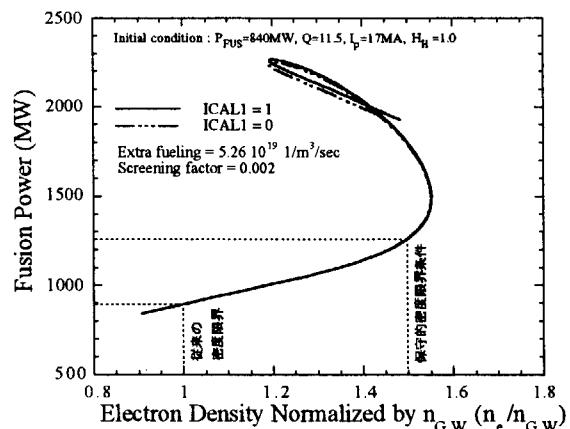
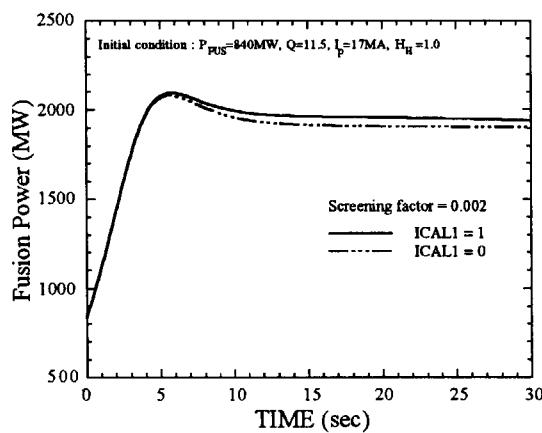
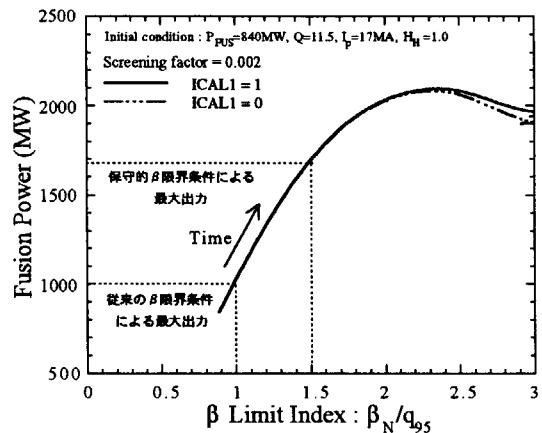


図14、前ページのつづき

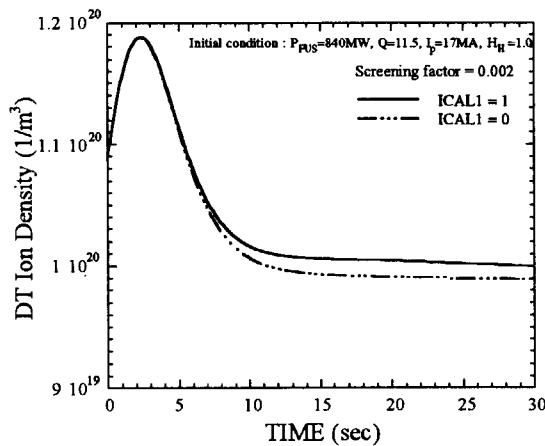
①燃料過剰注入時の出力波形

②燃料過剰注入時の $(n_e/n_{GW}-P_{\text{fus}})$ の軌跡

③閉じ込め改善時の出力波形

④閉じ込め改善時の(β 限界指標-出力)軌跡

⑤閉じ込め改善時のDTイオン密度波形



⑥閉じ込め改善時のPFCダストから発生し主プラズマに流入するDT燃料束

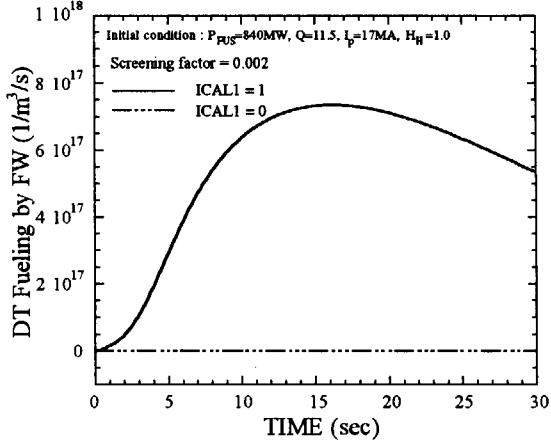
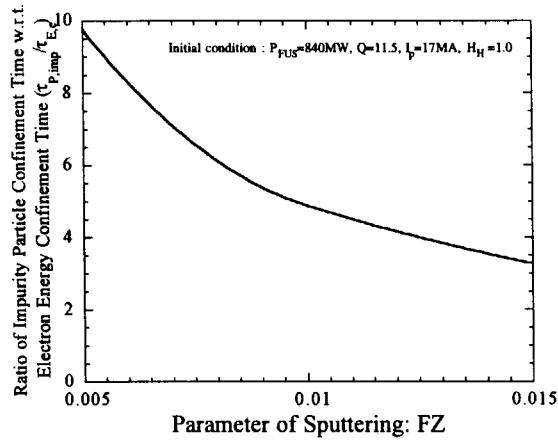
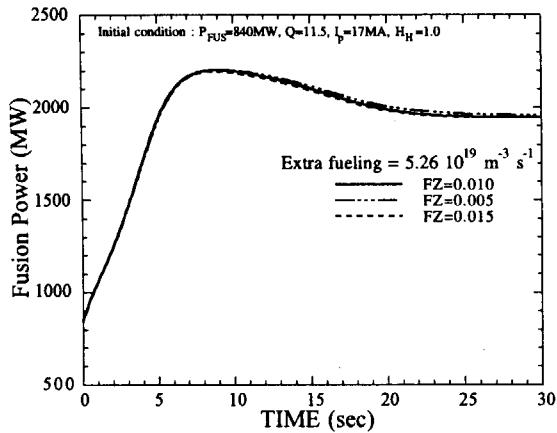


図15、解析オプション ICAL1 に対する感度解析結果。

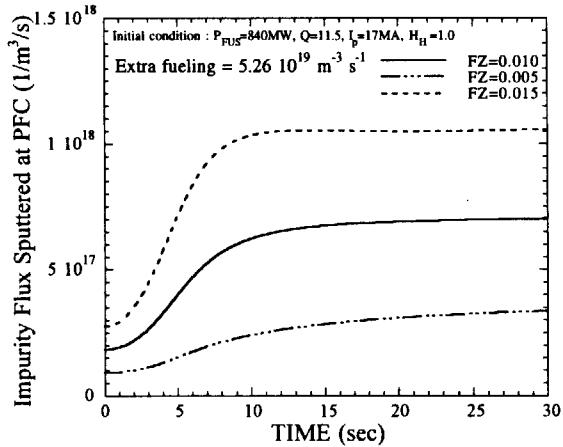
①F ZとC Pの関係。出力 840MW、Q 値 11.5、
 $n_{Be}/n_e=2\%$ の場合について解析した。



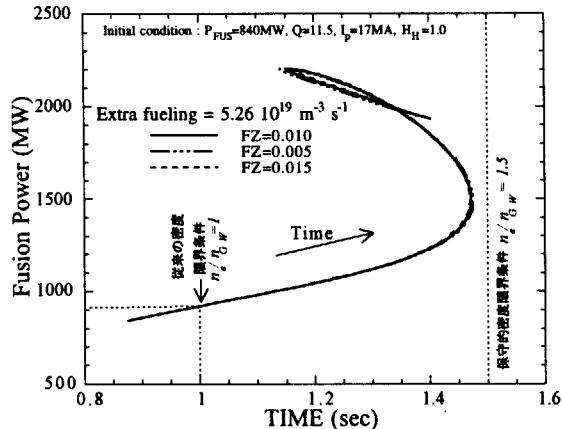
②燃料過剰注入時の出力波形



④燃料過剰注入時のスパッタ生成不純物流入量



③燃料過剰注入時の($n_e/n_{GW}-P_{fus}$)の軌跡



⑤燃料過剰注入時の実効電荷波形

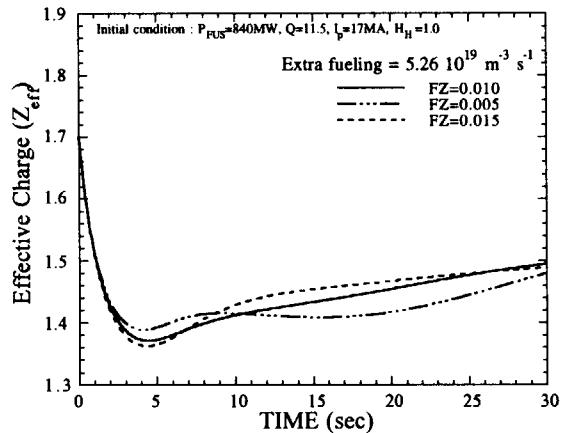
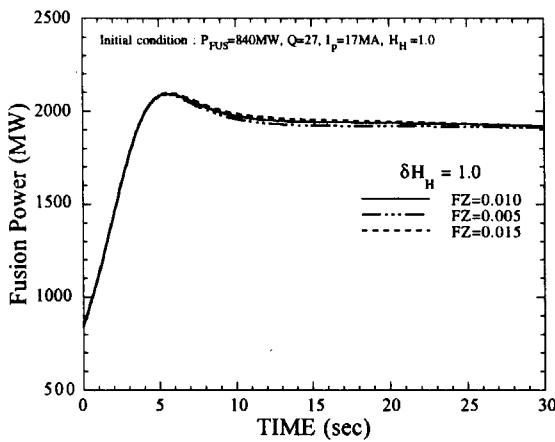
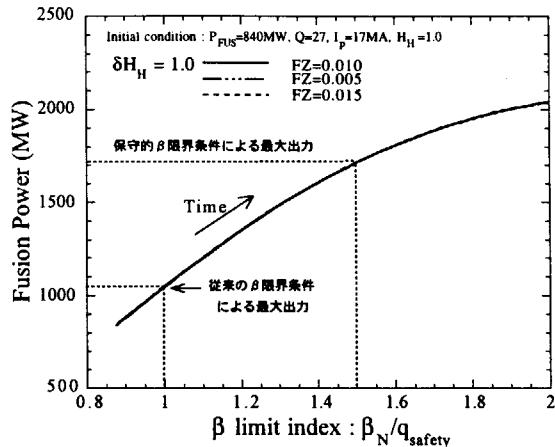
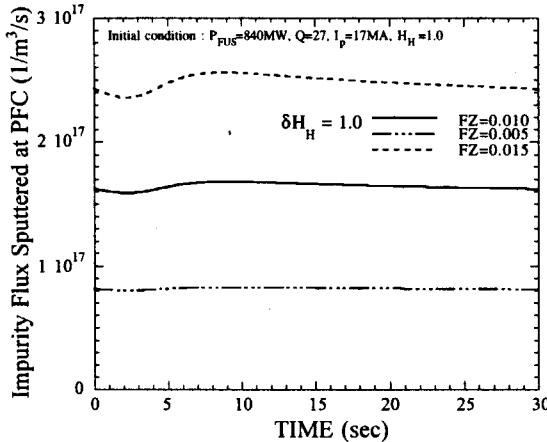


図16、解析パラメータ $FZ = FZ_1 \cdot FZ_2$ に対する感度解析結果。

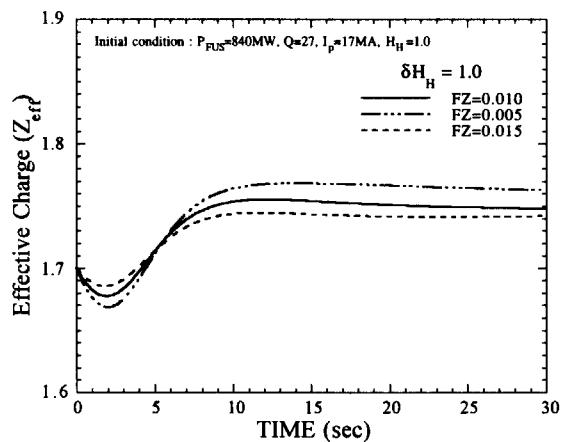
⑥閉じ込め改善時の出力波形

⑦閉じ込め改善時の(β 限界指標-出力)軌跡

⑧閉じ込め改善時のスパッタ生成不純物流入量



⑨閉じ込め改善時の実効電荷波形



⑩閉じ込め改善時のPFCダストから発生し主プラズマに流入するDT燃料量

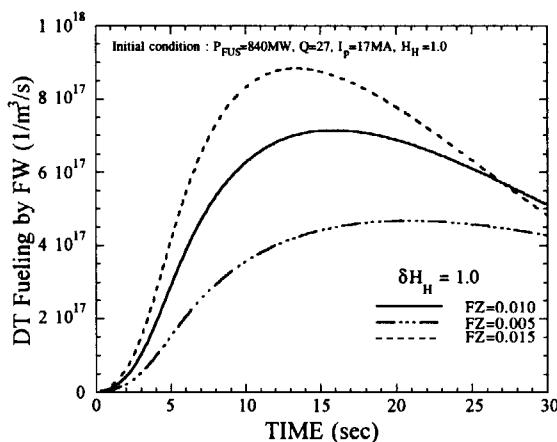
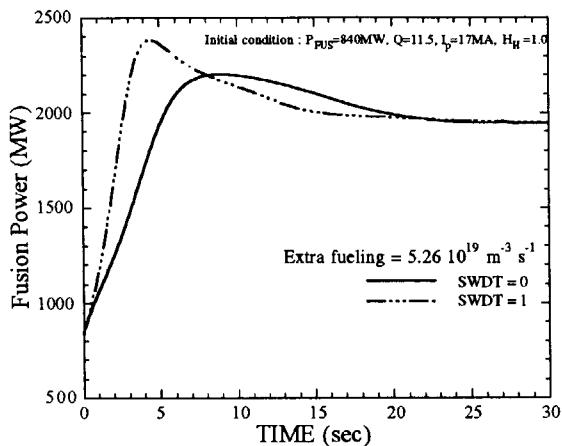
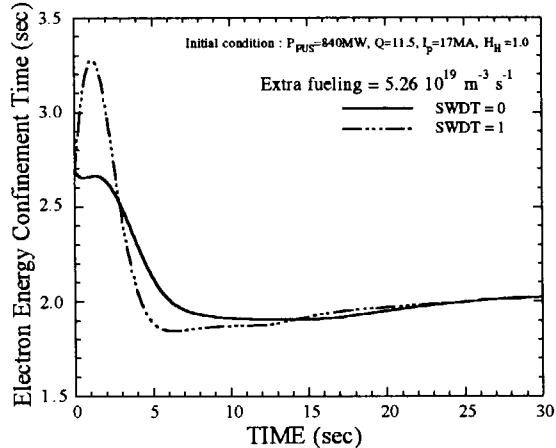
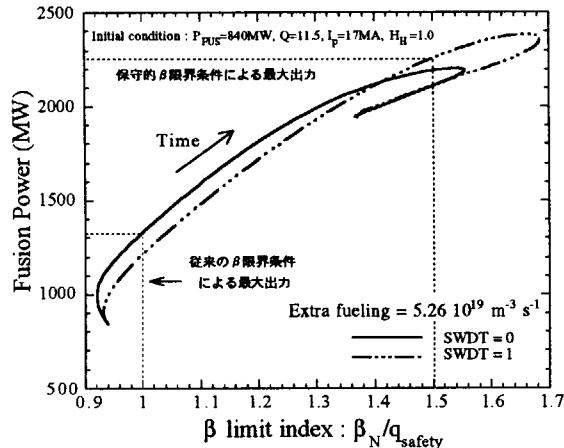


図16、前ページのつづき

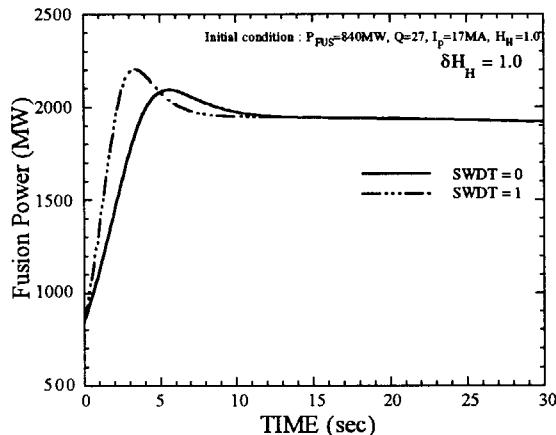
①燃料過剰注入時の出力波形



②燃料過剰注入時の電子エネルギー閉込時間

③燃料過剰注入時の(β 限界指標-出力)軌跡

④閉じ込め改善時の出力波形



⑤閉じ込め改善時の電子エネルギー閉込時間

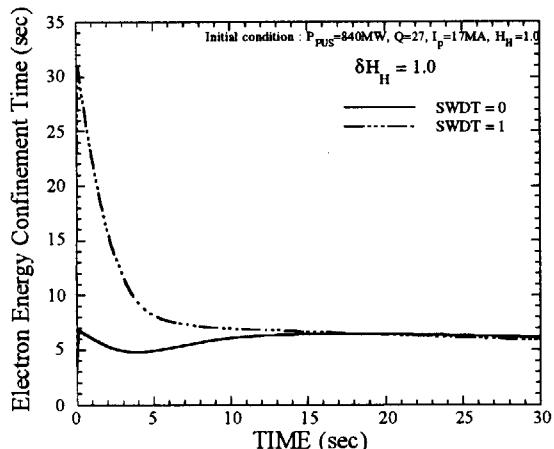
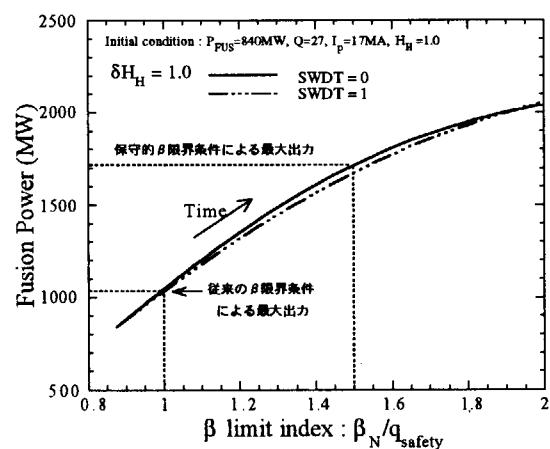
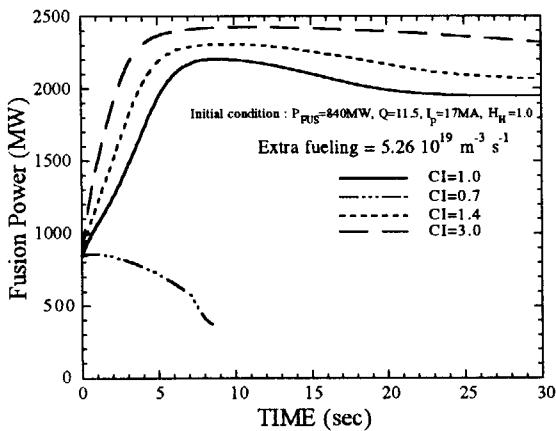
⑥閉じ込め改善時の(β 限界指標-出力)軌跡

図17、解析パラメータSWDTに対する感度解析結果。SWDT=1とすると、プラズマ熱エネルギーの時間変化が大きいときに、閉じ込め時間が特異な振る舞いをする。密度限界やベータ限界で制限される出力上昇は、SWDTに強く依存しないことから、SWDT=0とすることが妥当と考える。

①燃料過剰注入時の出力波形



②燃料過剰注入時の(電子温度 - 電子密度)軌跡

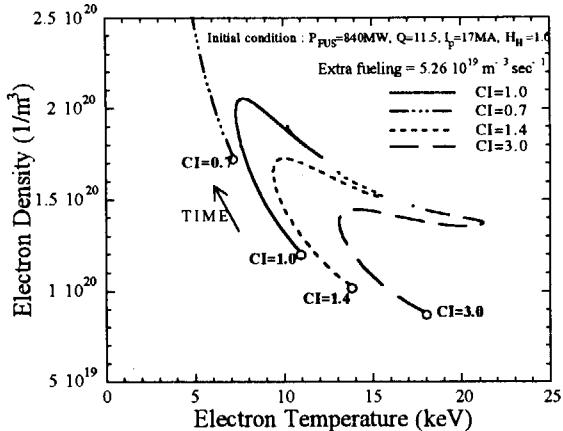
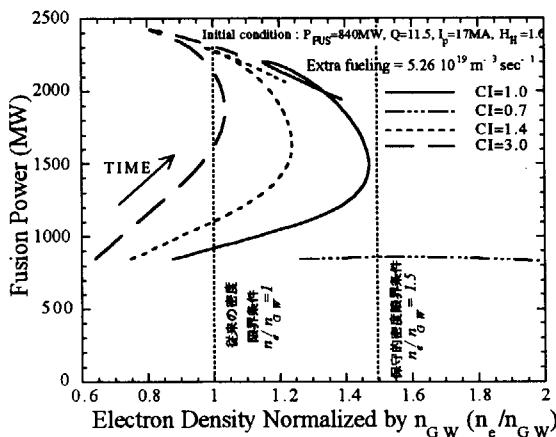
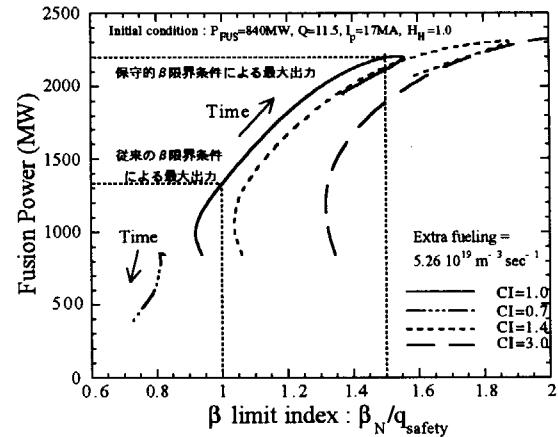
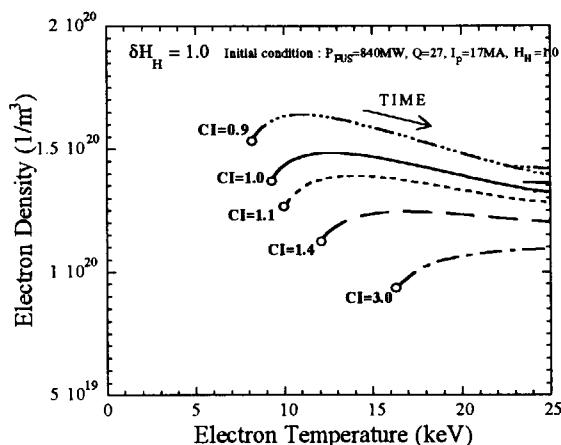
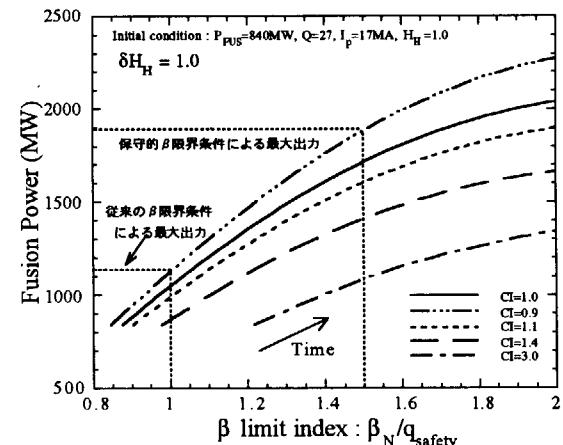
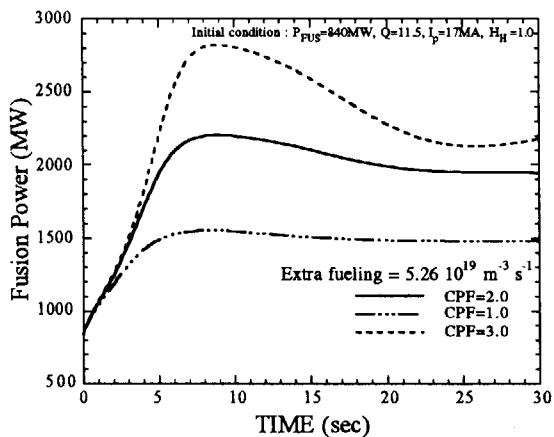
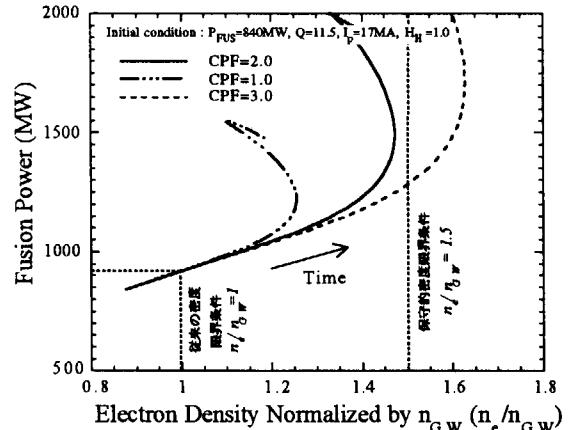
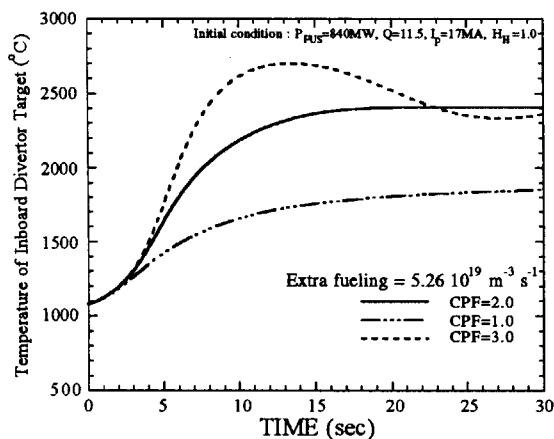
③燃料過剰注入時の $(n_e/n_{GW} - P_{\text{fus}})$ の軌跡④燃料過剰注入時の(β 限界指数 - 出力)軌跡⑤閉じ込め改善時の $(n_e/n_{GW} - P_{\text{fus}})$ の軌跡⑥閉じ込め改善時の(β 限界指数 - 出力)軌跡

図18、解析パラメータCIに対する感度解析結果。CIを大きく取ると、運転点は高温・低密度に移動する。

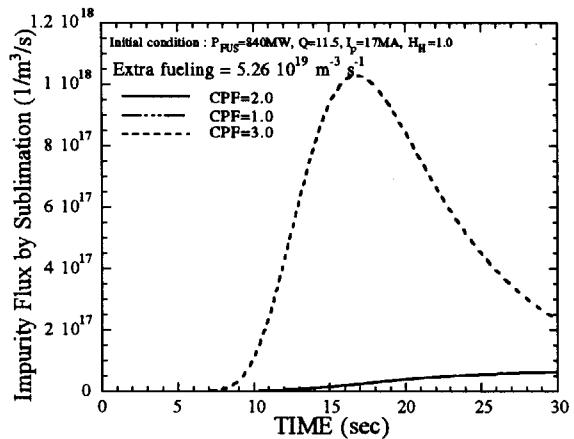
①燃料過剰注入時の出力波形

②燃料過剰注入時の(n_e/n_{GW} - P_{fus})軌跡

③燃料過剰注入時の内側ダイバータ板温度



④燃料過剰注入時の昇華不純物流入束



⑤閉じ込め改善時の出力波形

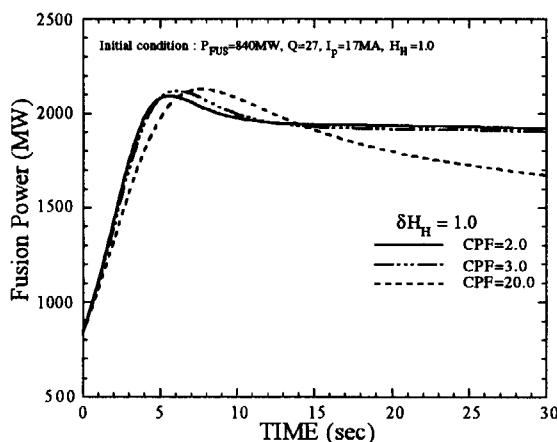
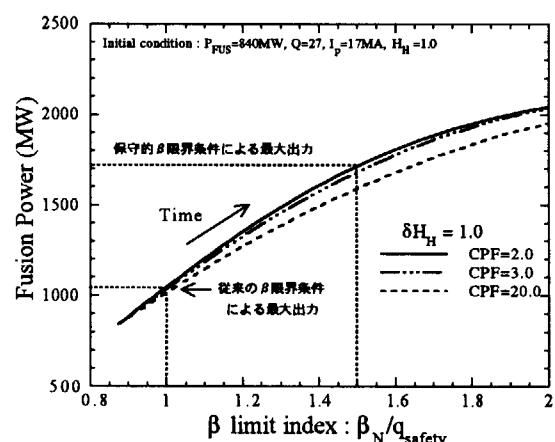
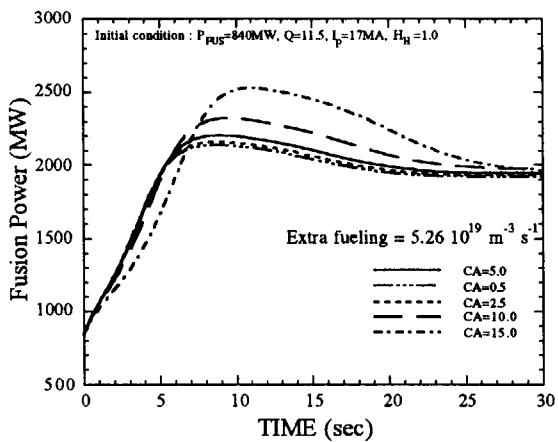
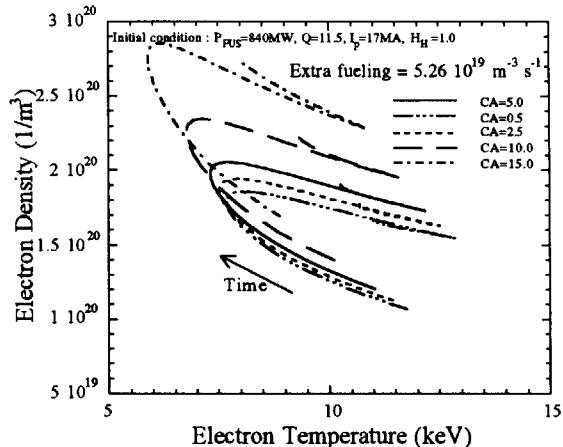
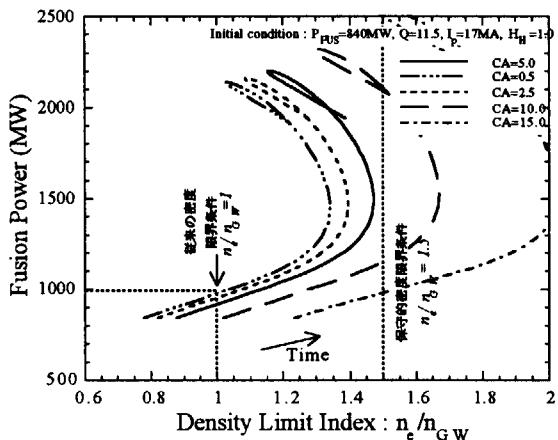
⑥閉じ込め改善時の(β 限界指数-出力)軌跡

図19、解析パラメータCPPに対する感度解析結果。CPPはDTイオン粒子閉じ込め時間の初期値を与えるパラメータであり、プラズマ応答に大きく影響を与える。

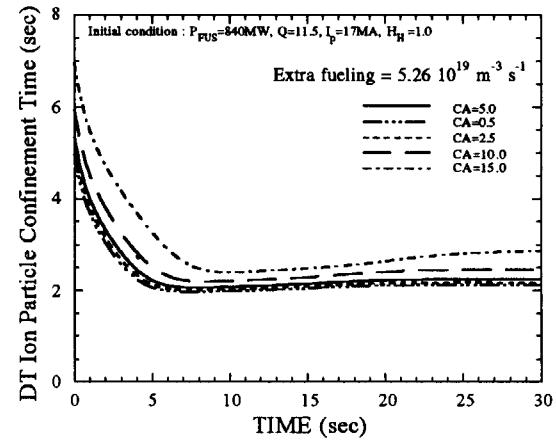
①燃料過剰注入時の出力波形



②燃料過剰注入時の(電子温度 - 電子密度)軌跡

③燃料過剰注入時の(n_e/n_{GW} - 出力)軌跡

④燃料過剰注入時の DT 粒子閉じ込め時間



⑤閉じ込め改善時の出力波形

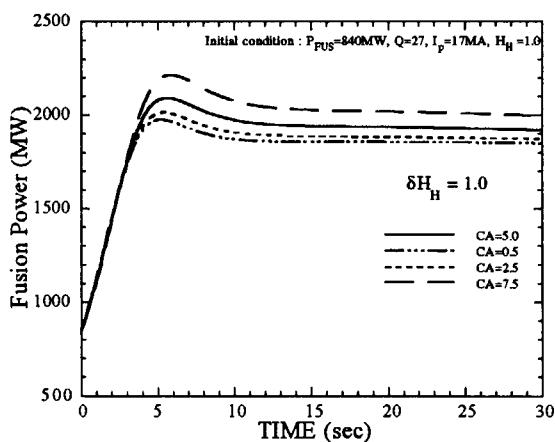
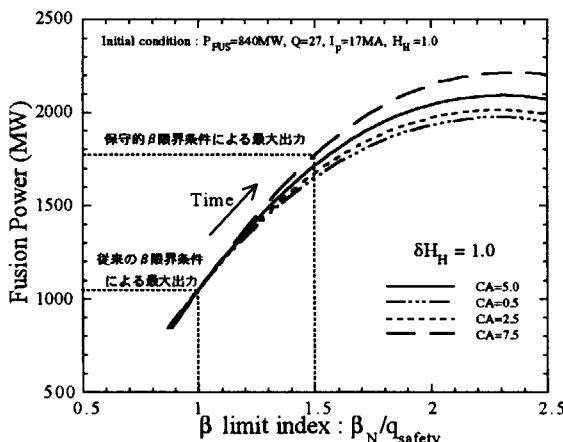
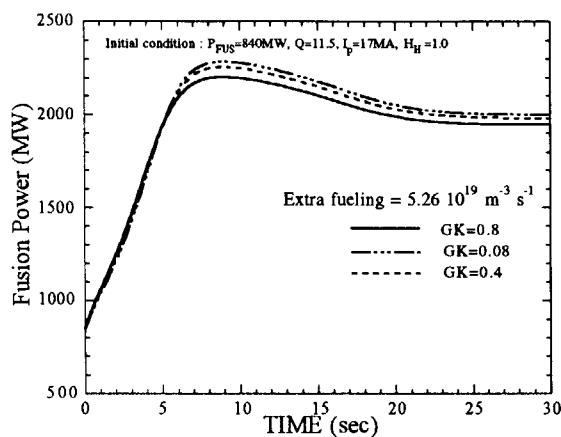
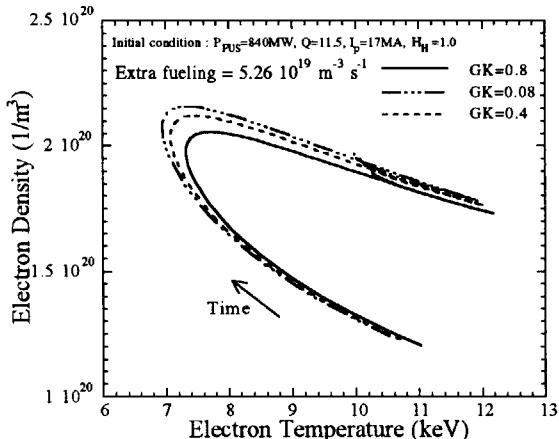
⑥閉じ込め改善時の(β 限界指数 - 出力)軌跡

図 20、解析パラメータ CA に対する感度解析結果。CA が増加すると、運転点は低温・高密度に移動し、初期状態も強く変更を受ける。

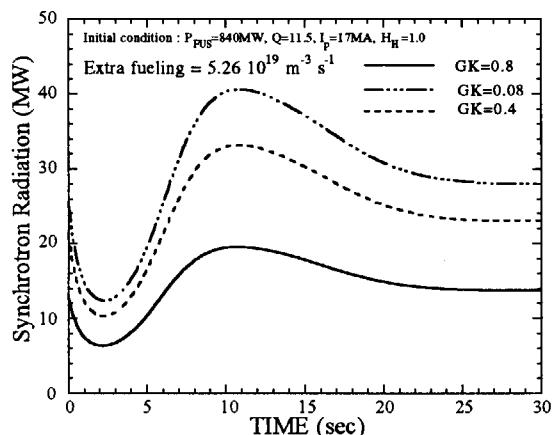
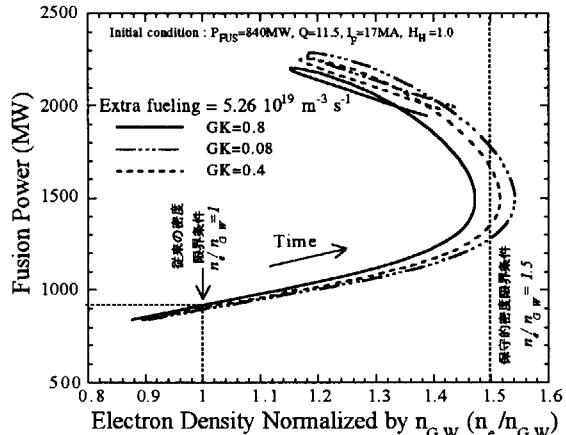
①燃料過剰注入時の出力波形



②燃料過剰注入時の(電子温度 - 電子密度)軌跡



③燃料過剰注入時のシンクロトロン輐射

④燃料過剰注入時の(n_e/n_{GW} - 出力)軌跡

⑤閉じ込め改善時の出力波形

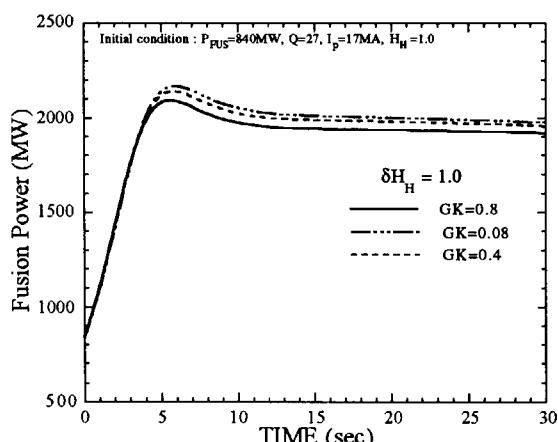
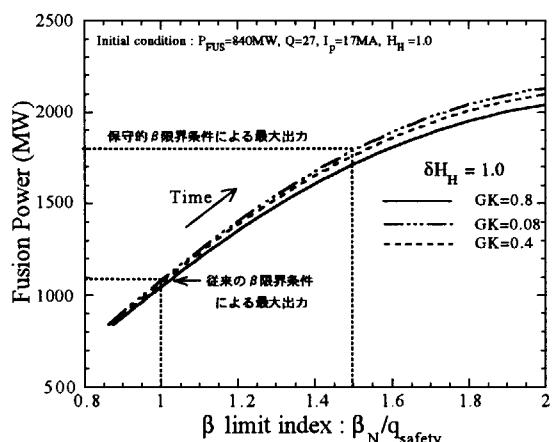
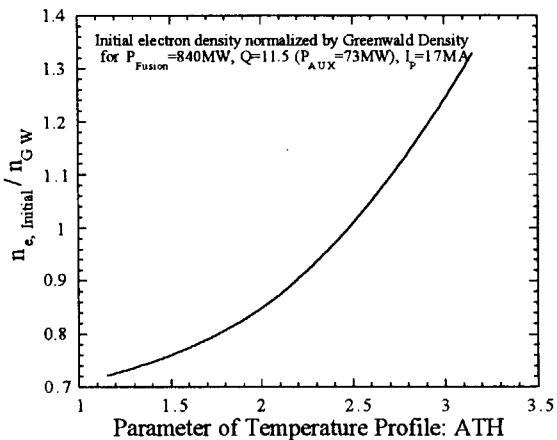
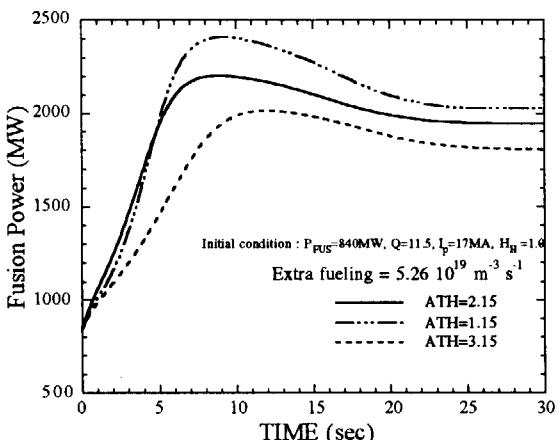
⑥閉じ込め改善時の(β 限界指数 - 出力)軌跡

図 2 1、解析パラメータ GK に対する感度解析結果。シンクロトロン輐射の壁での反射率 GK を下げるに従い、運転点は低温・高密度に移動する。また、加熱パワーが減少することで閉じ込め時間が増加し、出力が上昇する。

①パラメータ ATH と初期状態の n_e/n_{GW} の関係

②燃料過剰注入時の出力波形



③燃料過剰注入時の(電子温度－電子密度)軌跡

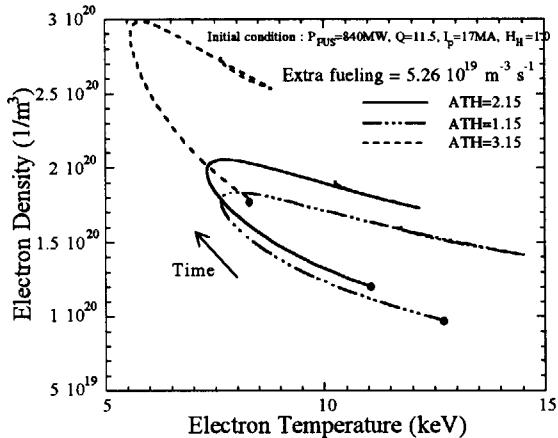
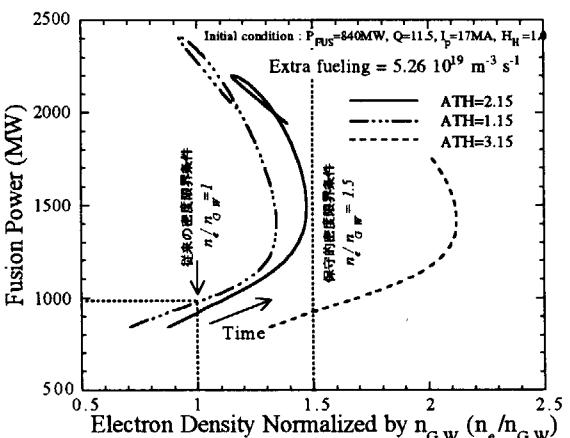
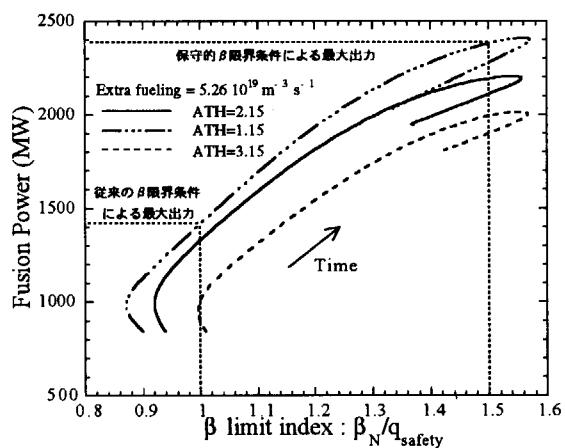
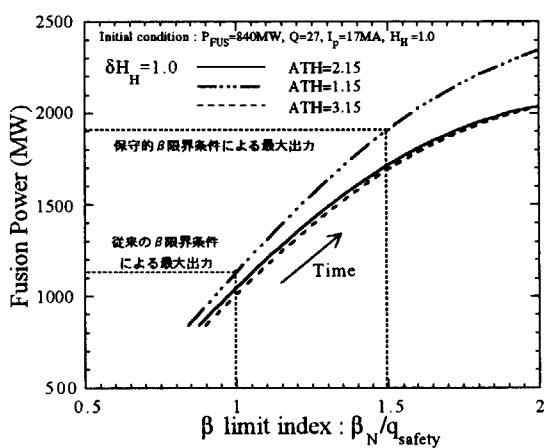
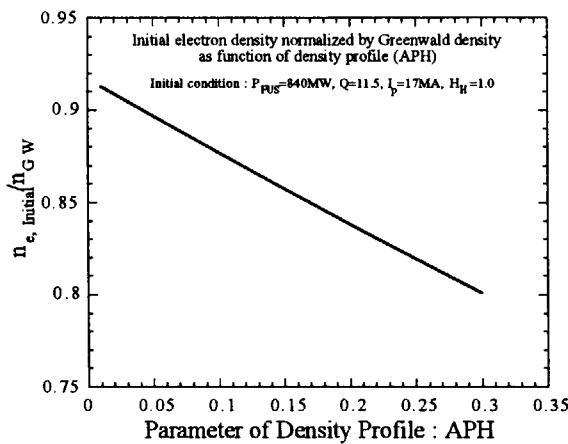
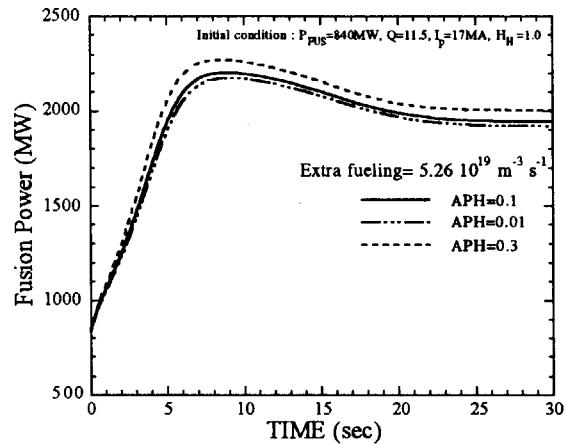
④燃料過剰注入時の(n_e/n_{GW} －出力)軌跡⑤燃料過剰注入時の(β 限界指数－出力)軌跡⑥閉じ込め改善時の(β 限界指数－出力)軌跡

図 2 2、解析パラメータ ATHに対する感度解析結果。ATHはHモードの温度分布パラメータである。ATHが低い、中心で緩やかに増加する、温度分布ほど低密度でも効率よく核融合反応が起きるため、ATHは初期状態や擾乱時の応答に強い影響を与える。

①パラメータ A PH と初期状態の n_e/n_{GW} の関係

②燃料過剰注入時の出力波形



③燃料過剰注入時の(電子温度－電子密度)軌跡

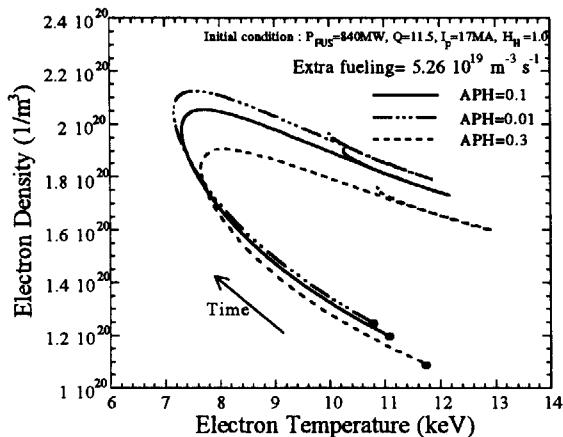
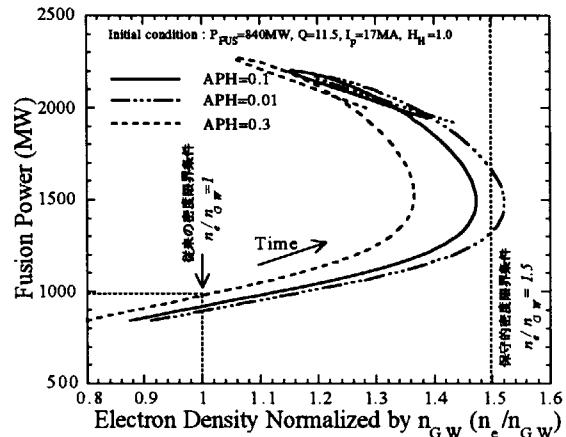
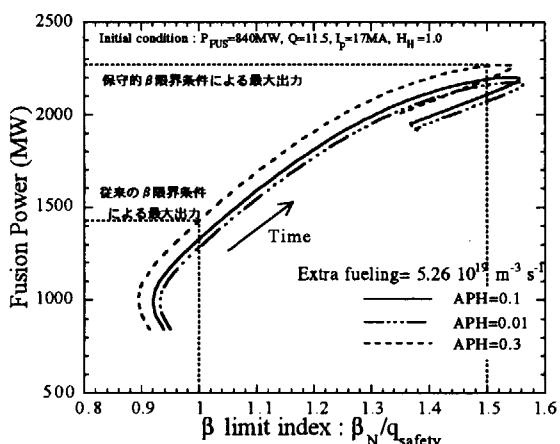
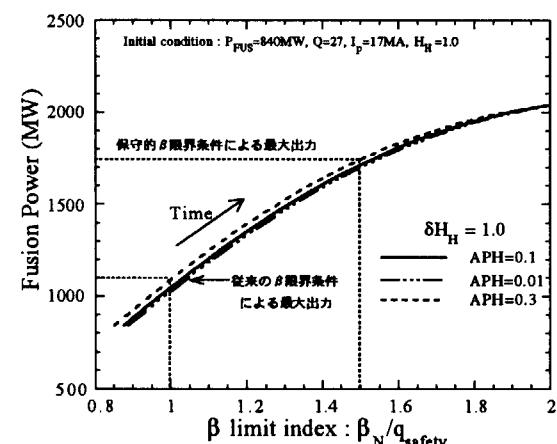
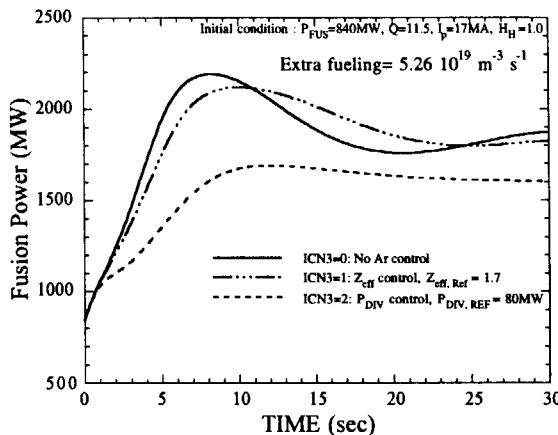
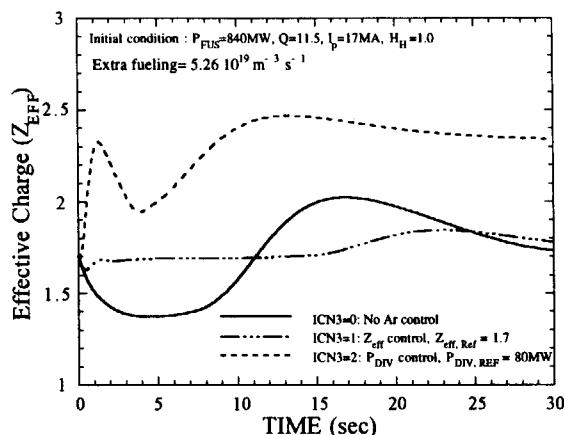
④燃料過剰注入時の(n_e/n_{GW} －出力)軌跡⑤燃料過剰注入時の(β 限界指数－出力)軌跡⑥閉じ込め改善時の(β 限界指数－出力)軌跡

図 2 3、解析パラメータ A PH に対する感度解析結果。A PH は H モードの密度分布パラメータである。A PH が大きい、中心で増加する、密度分布ほど低い体積平均密度で効率よく核融合反応を起こすことが出来る。

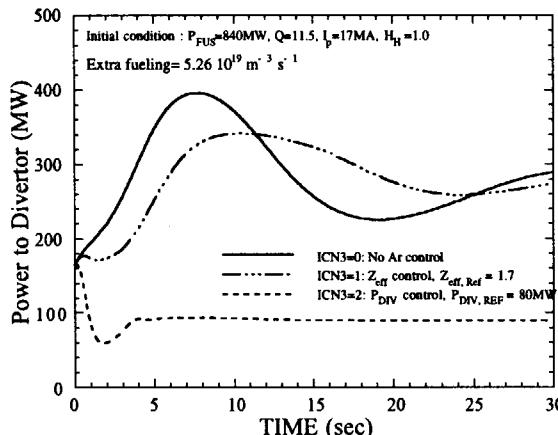
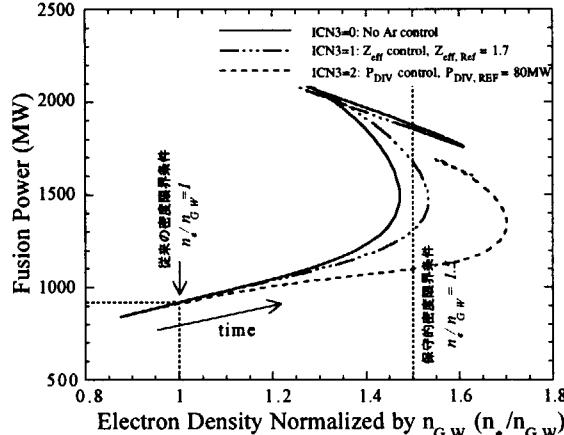
①燃料過剰注入時の出力波形



②燃料過剰注入時の実効電荷波形



③燃料過剰注入時のダイバータ熱流束

④燃料過剰注入時の(n_e/n_{GW} - 出力)軌跡

⑤閉じ込め改善時の出力波形

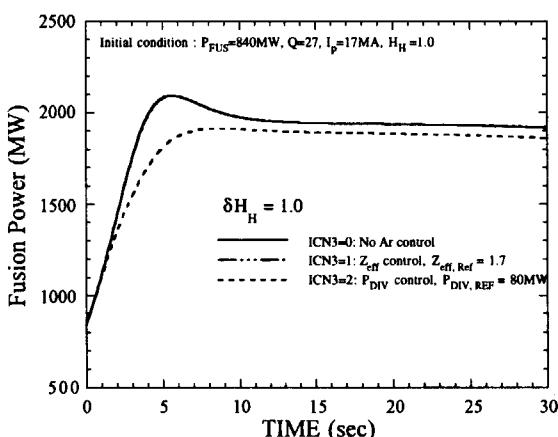
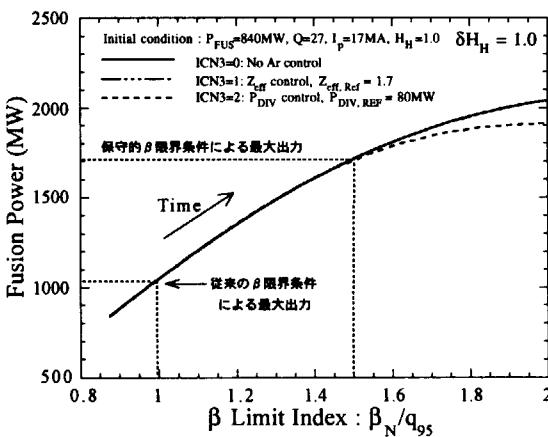
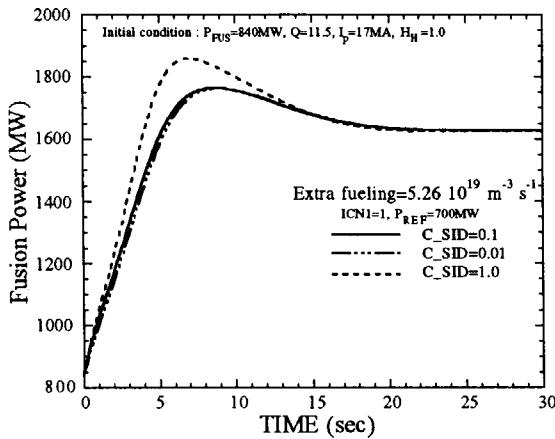
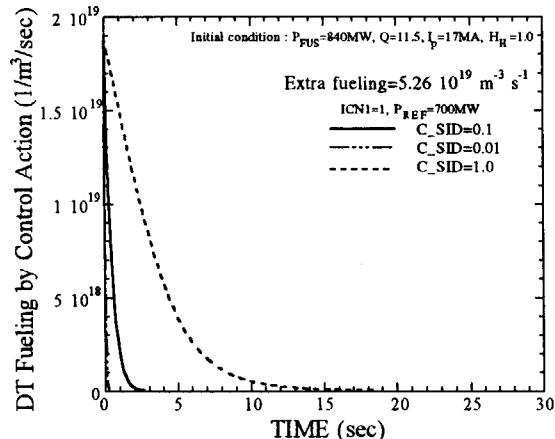
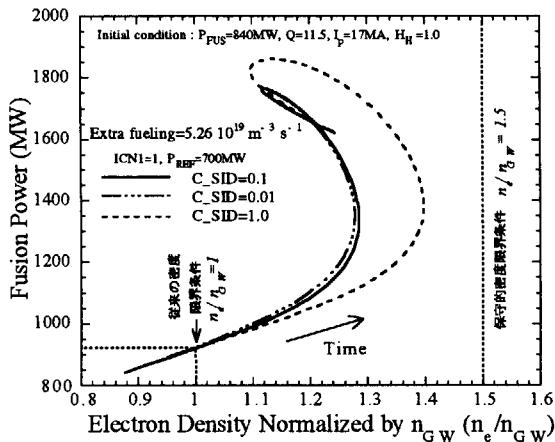
⑥閉じ込め改善時の(β 限界指数 - 出力)軌跡

図24、解析オプション I C N 3 に対する感度解析結果（インボードピーキング因子 1.5 の場合）。実効電荷制御 (ICN3=1、目標値 1.7) とダイバータ熱流束制御 (ICN3=2、目標値 80MW) について比較する。

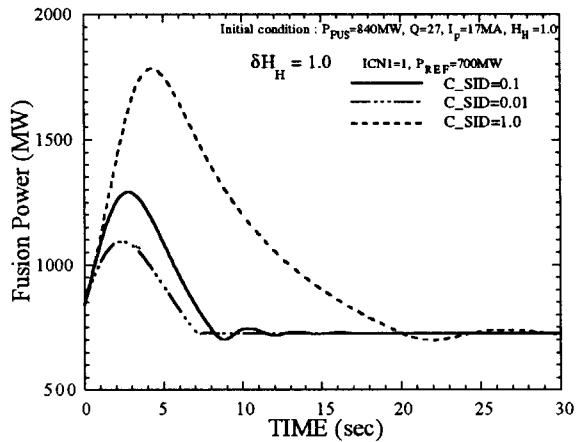
①燃料過剰注入時の出力波形



②燃料過剰注入時の制御による DT 燃料供給量

③燃料過剰注入時の(n_e/n_{GW} - 出力)軌跡

④閉じ込め改善時の出力波形



⑤閉じ込め改善時の制御による DT 燃料供給量

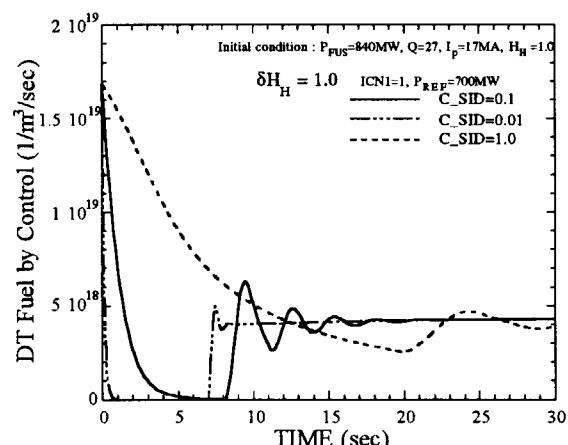
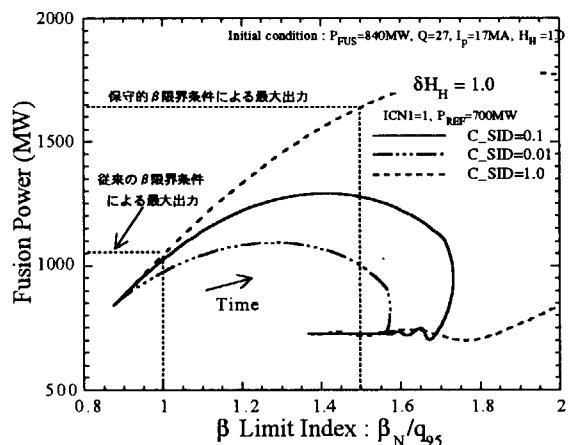
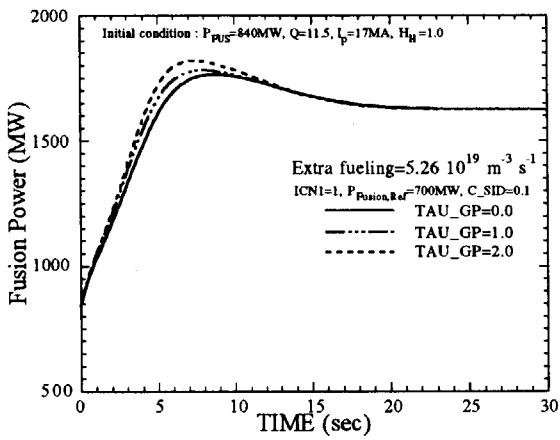
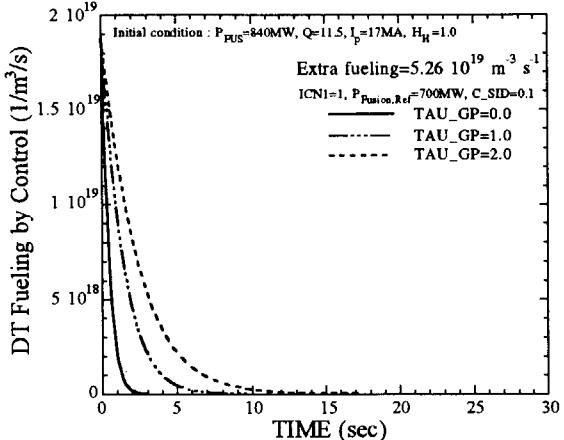
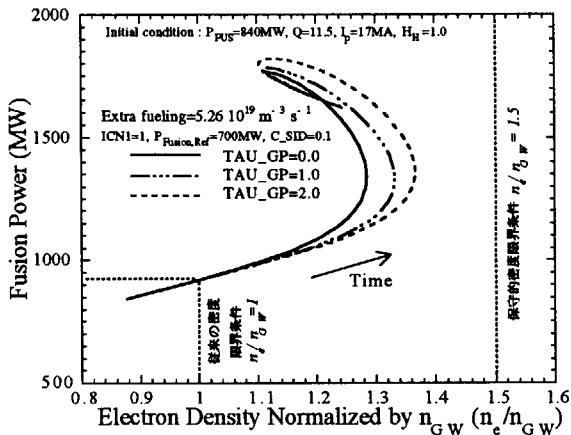
⑥閉じ込め改善時の(β 限界指数 - 出力)軌跡

図 25、解析パラメータ C_SID に対する感度解析結果。解析は ICN1 = 1、TAU_GP=0.0 とし、DT 燃料供給制御を有効にして行った。

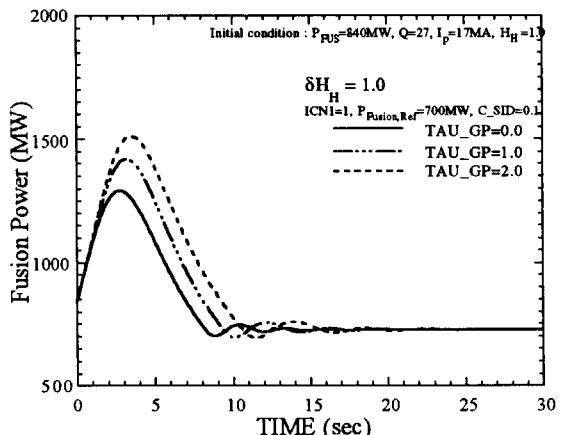
①燃料過剰注入時の出力波形



②燃料過剰注入時の制御による DT 燃料供給量

③燃料過剰注入時の(n_e/n_{GW} - 出力)軌跡

④閉じ込め改善時の出力波形



⑤閉じ込め改善時の制御による DT 燃料供給量

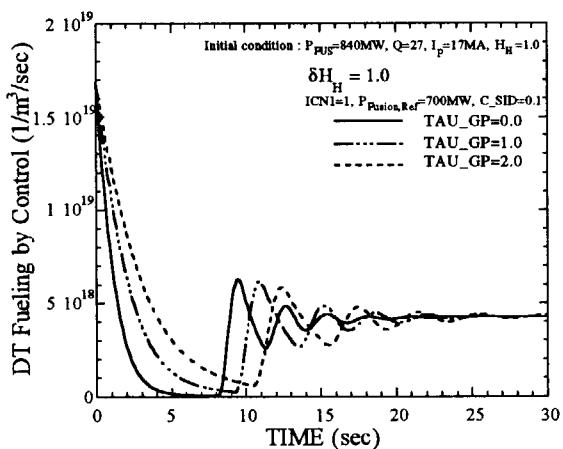
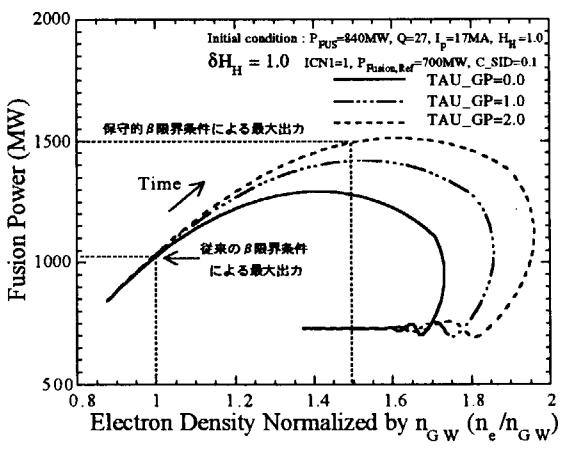
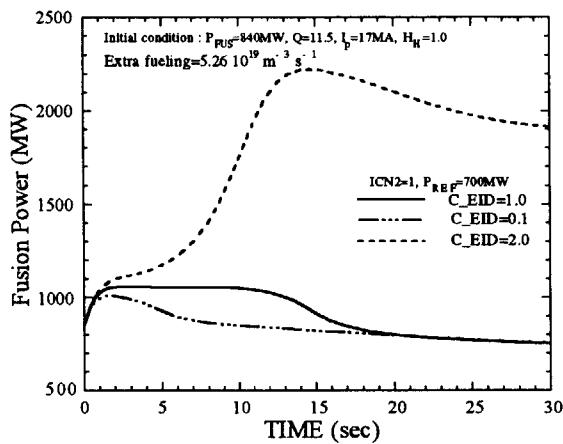
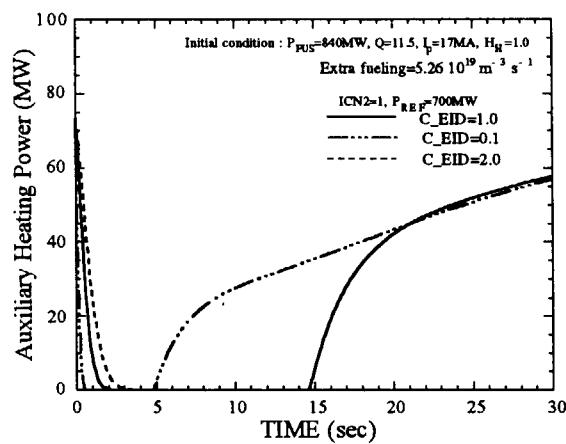
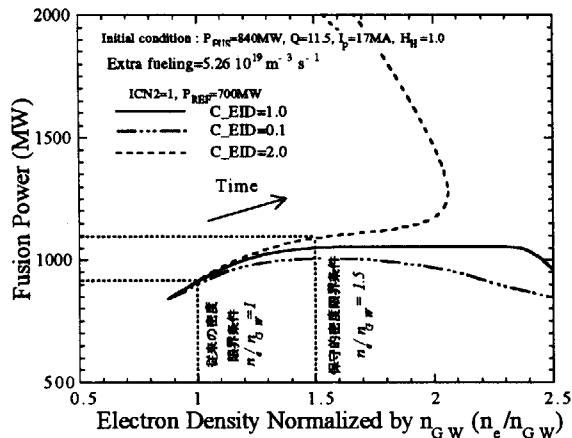
⑥閉じ込め改善時の(β 限界指数 - 出力)軌跡

図 2 6、解析パラメータ TAU_GP に対する感度解析結果。解析は ICN1 = 1, C_SID=0.1 とし、DT 燃料供給制御を有効にして行った。

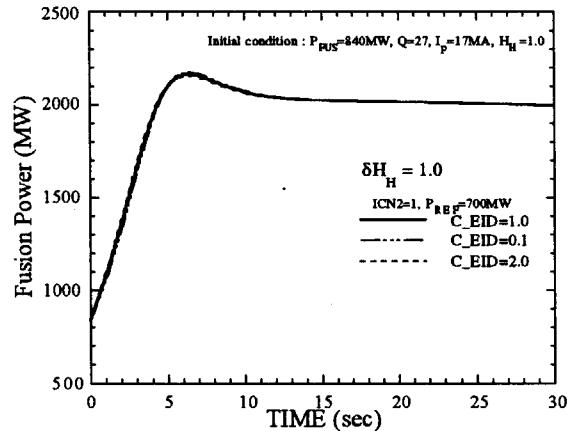
①燃料過剰注入時の出力波形



②燃料過剰注入時の制御による外部加熱パワー

③燃料過剰注入時の(n_e/n_{GW} −出力)軌跡

④閉じ込め改善時の出力波形



⑤閉じ込め改善時の制御による外部加熱パワー

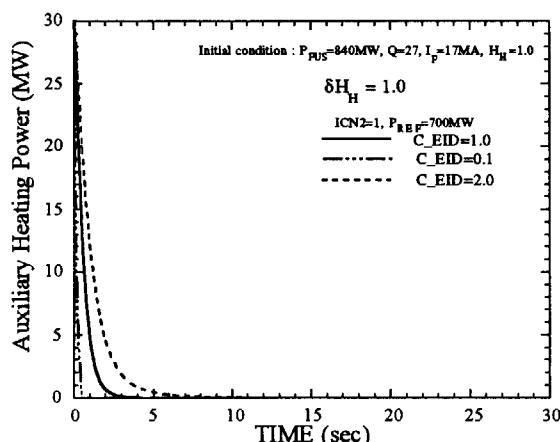
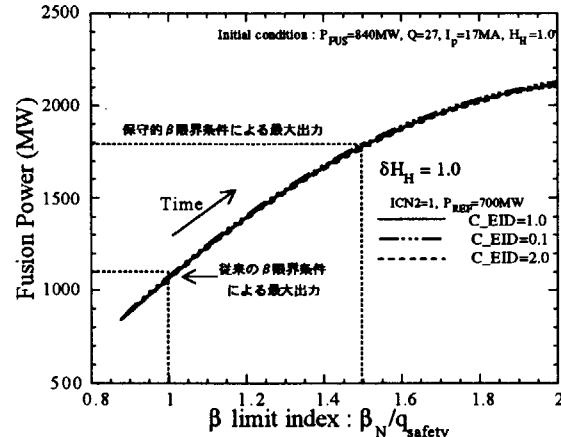
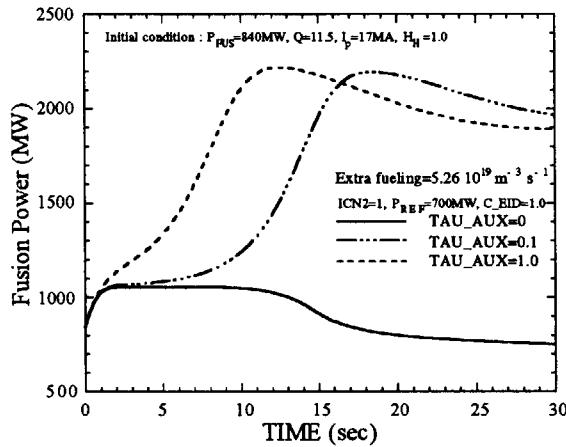
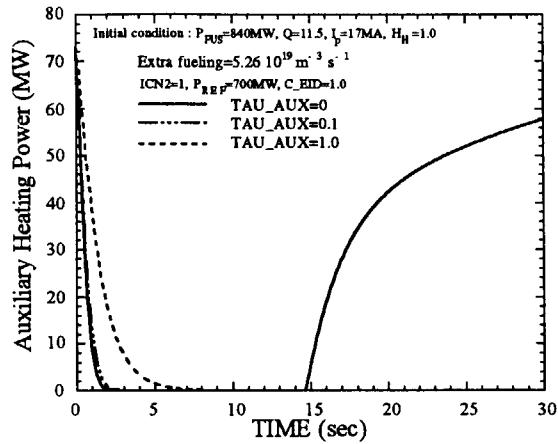
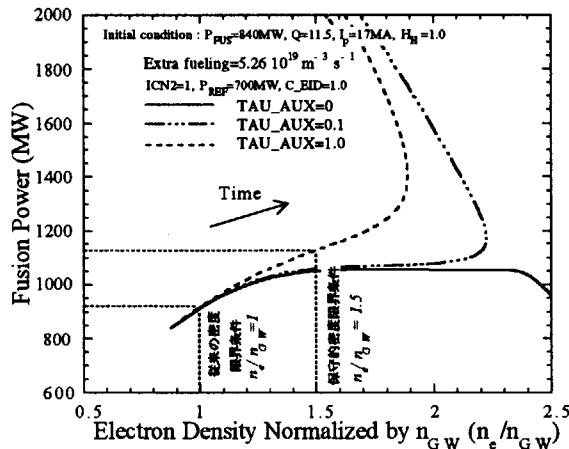
⑥閉じ込め改善時の(β 限界指数−出力)軌跡

図27、解析パラメータC_EIDに対する感度解析結果。解析はICN2=1、TAU_AUX=0とし、外部加熱制御を有効にして行った。

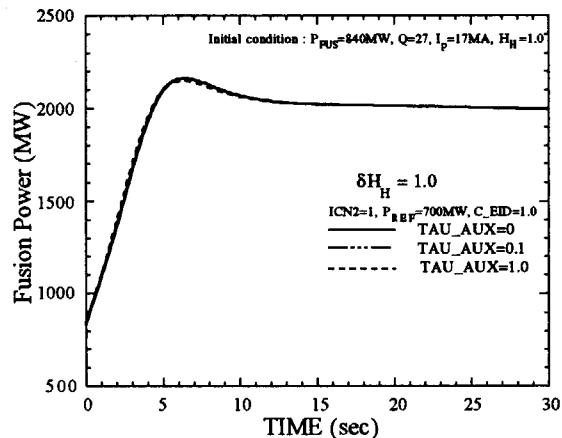
①燃料過剰注入時の出力波形



②燃料過剰注入時の制御による外部加熱パワー

③燃料過剰注入時の(n_e/n_{GW} - 出力)軌跡

④閉じ込め改善時の出力波形



⑤閉じ込め改善時の制御による外部加熱パワー

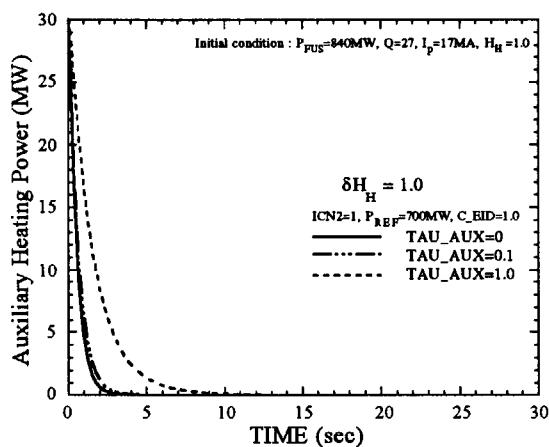
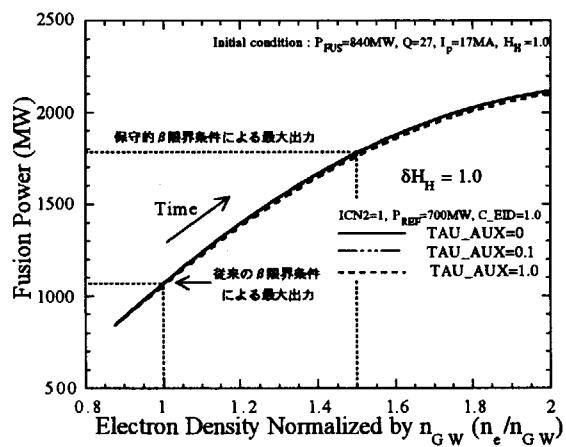
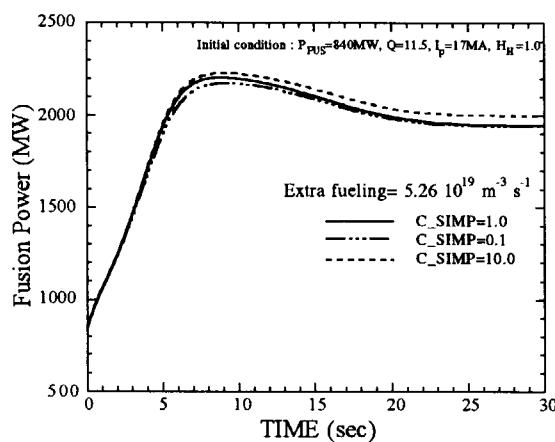
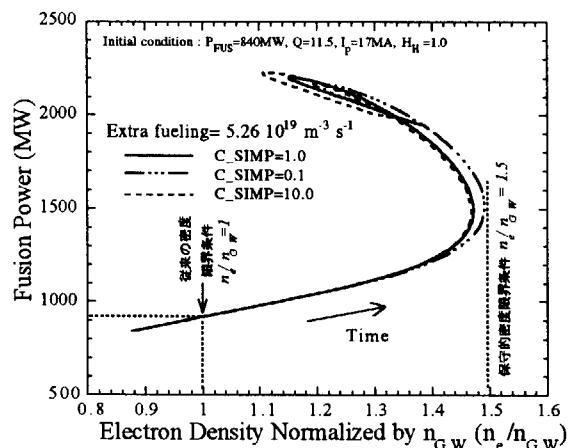
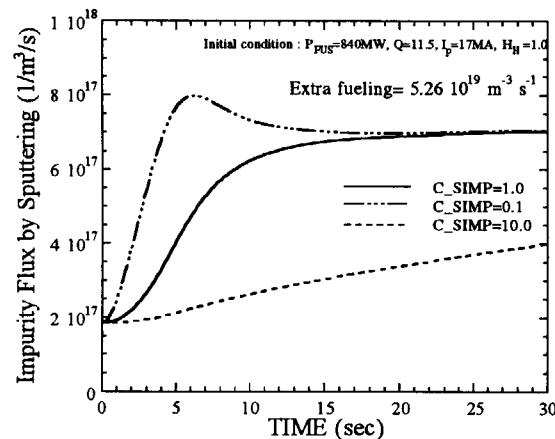
⑥閉じ込め改善時の(β 限界指数 - 出力)軌跡

図 2.8、解析パラメータ TAU_AUX に対する感度解析結果。解析は ICN2 = 1、C_EID=1.0 とし、外部加熱制御を有効にして行った。

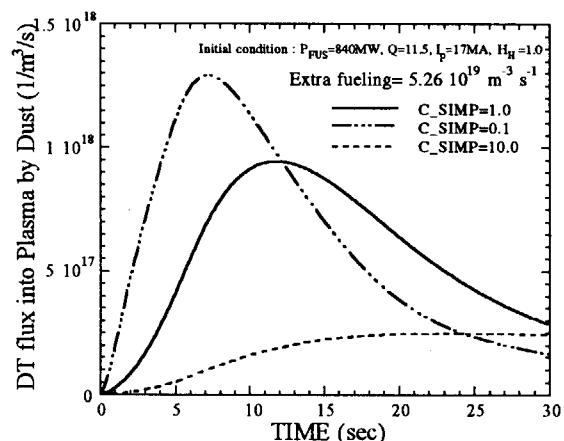
①燃料過剰注入時の出力波形

②燃料過剰注入時の(n_e/n_{GW} −出力)軌跡

③燃料過剰注入時のスパッタ不純物流入量



④燃料過剰注入時のPFCダストから発生し主プラズマに流入するDT燃料量



⑤閉じ込め改善時の制御による外部加熱パワー

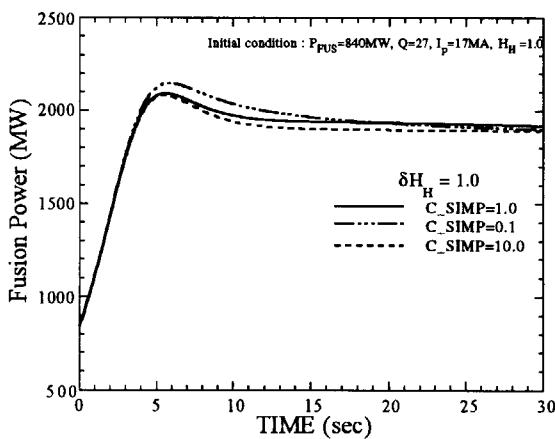
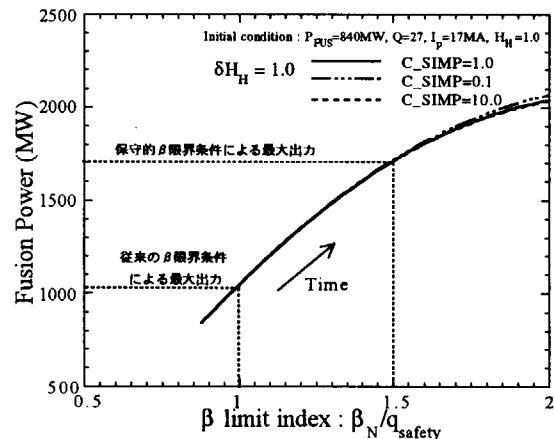
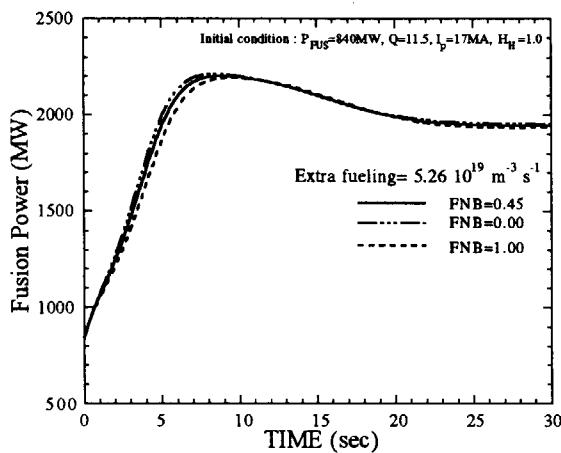
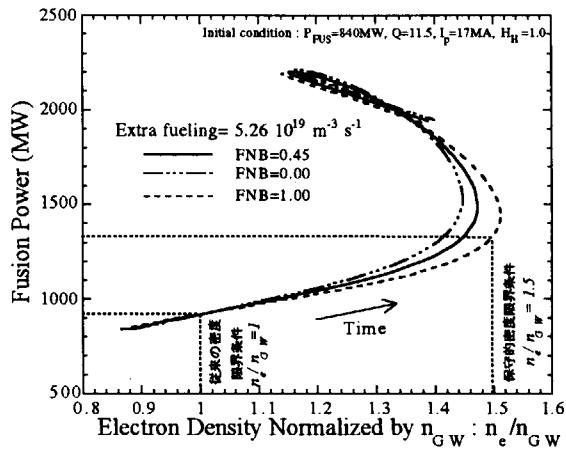
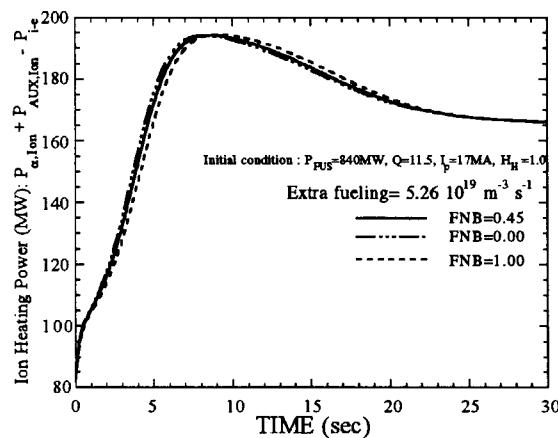
⑥閉じ込め改善時の(β 限界指数−出力)軌跡

図29、解析パラメータC_SIMPに対する感度解析結果。

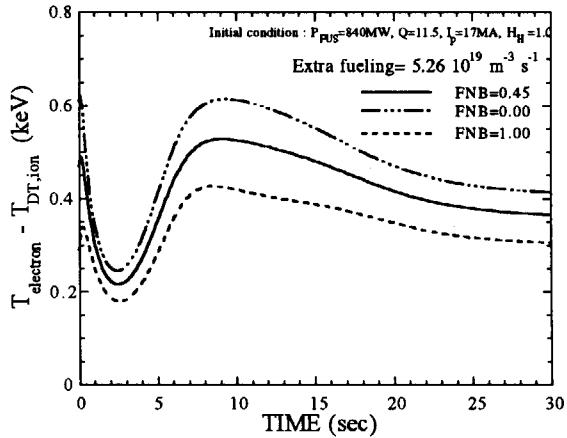
①燃料過剰注入時の出力波形

②燃料過剰注入時の(n_e/n_{GW} - 出力)軌跡

③燃料過剰注入時のイオン加熱パワー波形の



④燃料過剰注入時の、電子温度とイオン温度差の波形



⑤燃料過剰注入時のイオン温度波形

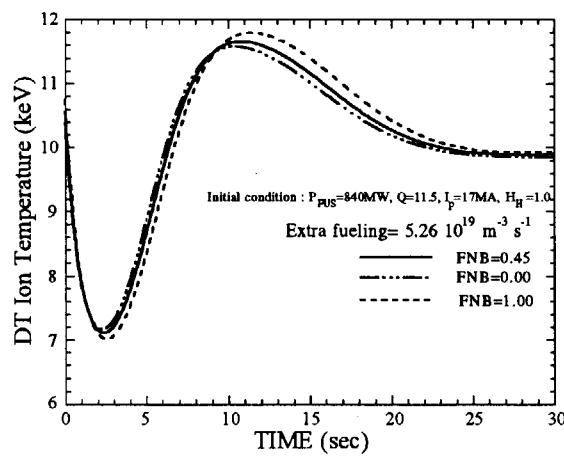
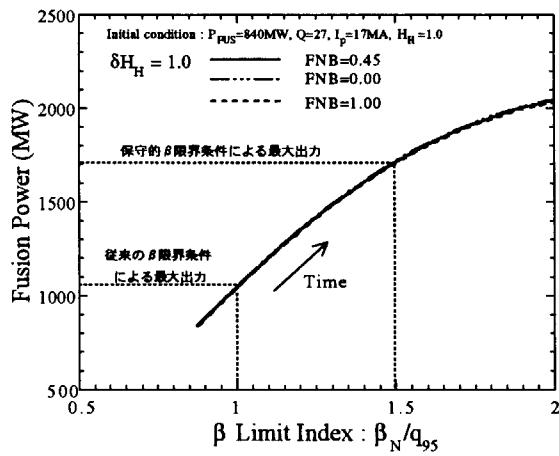
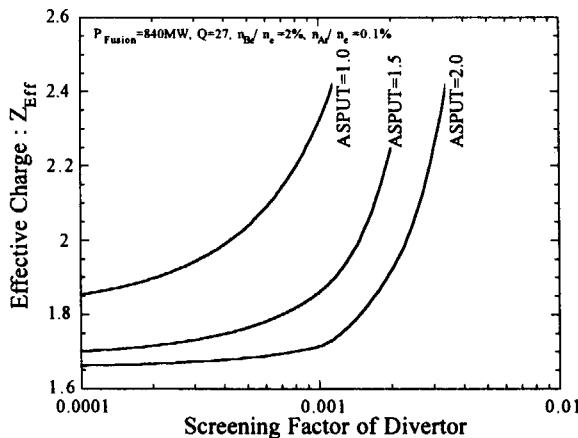
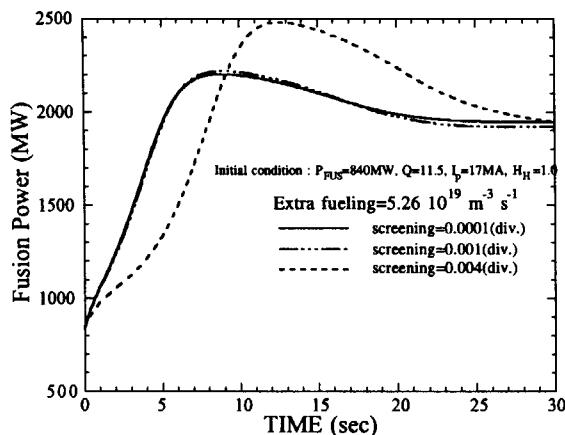
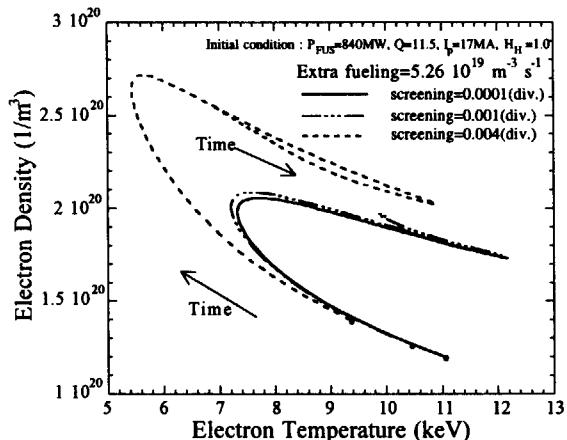
⑥閉じ込め改善時の(β 限界指数 - 出力)軌跡

図30、解析パラメータFNBに対する感度解析結果。FNBは外部加熱の中性粒子ビーム加熱の割合を表し、Q値が小さい初期状態からの応答には影響があるが、Q値の大きい初期状態での擾乱には影響を与えない。

①スクリーニング因子、ASPUT と初期状態の実効電荷



②燃料過剰注入時の出力波形

③燃料過剰注入時の (n_e - T_e) 軌跡

④燃料過剰注入時の実効電荷波形

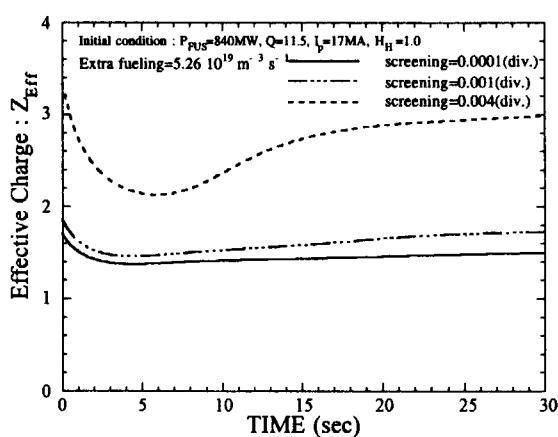
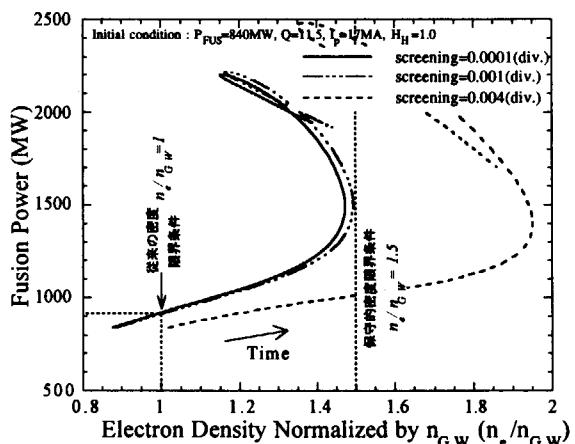
⑤燃料過剰注入時の(n_e/n_{GW} - 出力)軌跡

図 3.1、解析パラメータスクリーニング因子に対する感度解析結果。ダイバータ部のスクリーニング因子を変数として、擾乱時のプラズマ応答を比較した。図②以降は ASPUT=1.5 に固定した結果である。

⑥閉じ込め改善時の出力波形

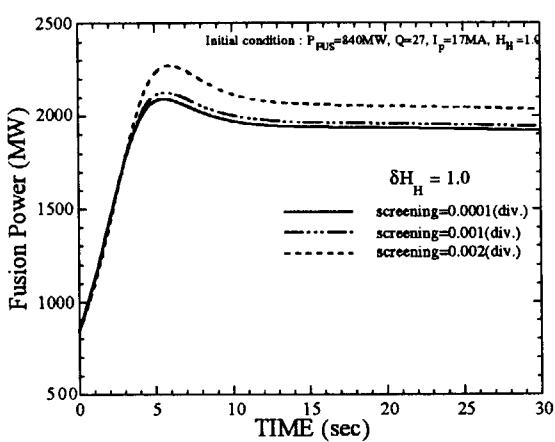
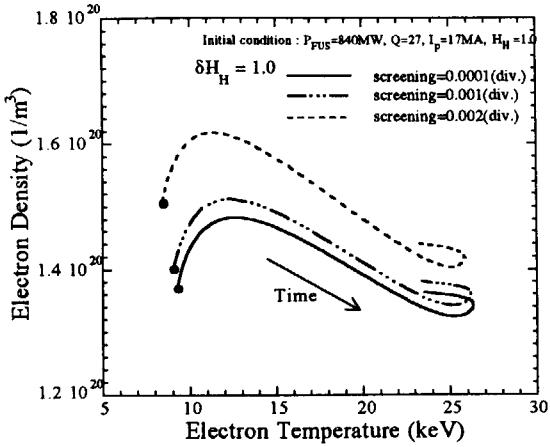
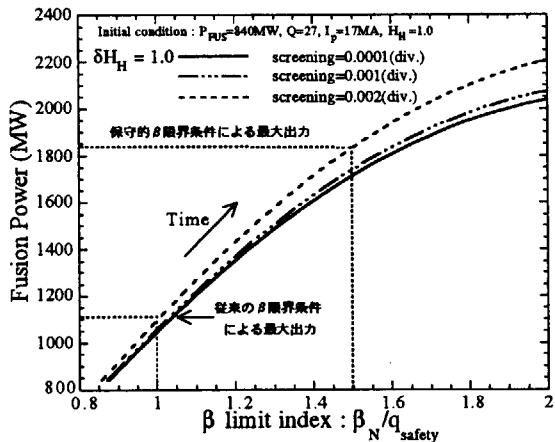
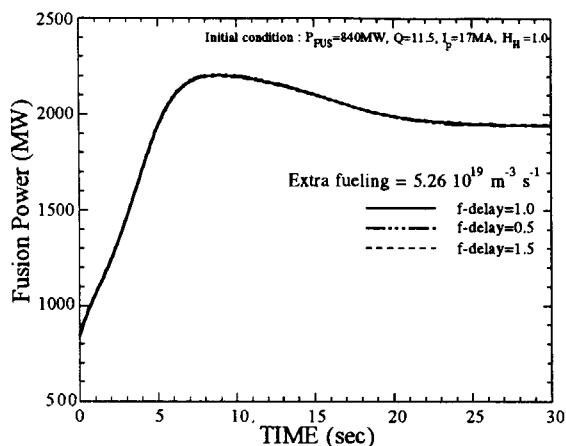
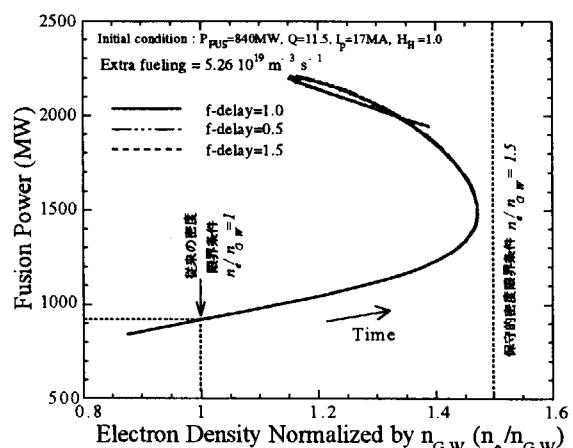
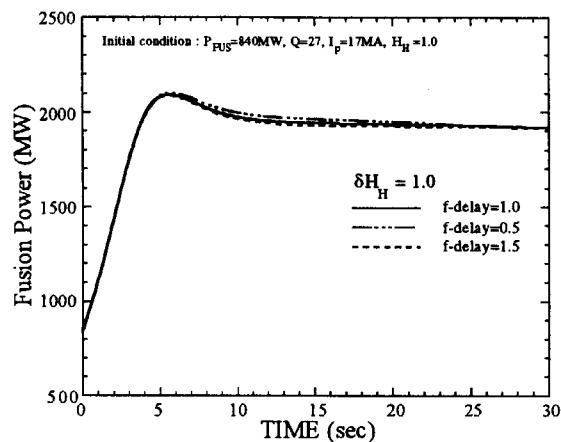
⑦閉じ込め改善時の $(n_e - T_e)$ 軌跡⑧閉じ込め改善時の(β 限界指標-出力)軌跡

図31、前ページのつづき

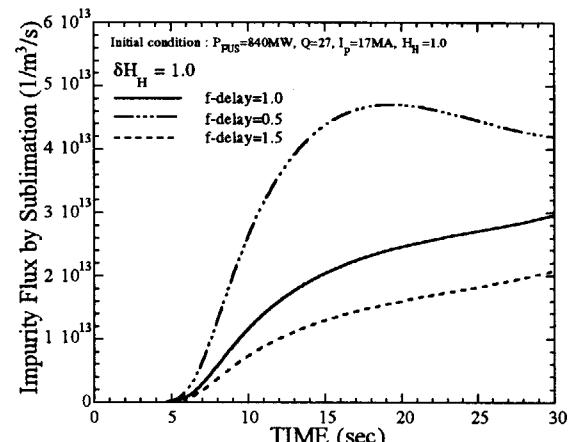
①燃料過剰注入時の出力波形

②燃料過剰注入時の(n_e/n_{GW} －出力)軌跡

③閉じ込め改善時の出力波形



④閉じ込め改善時の昇華不純物の流入量



⑤閉じ込め改善時のPFCダストから発生し主プラズマに流入するDT燃料量

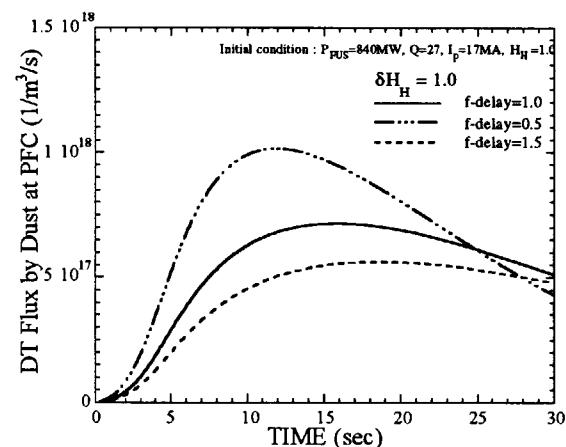
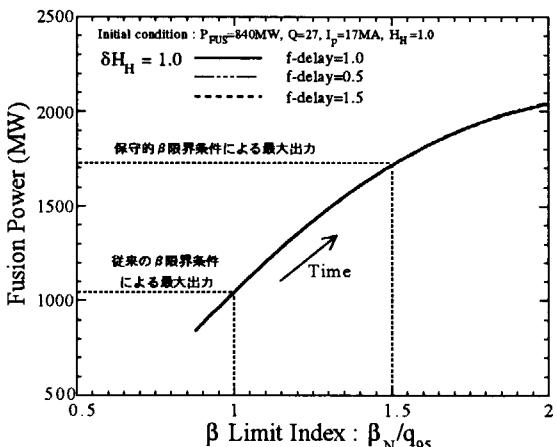
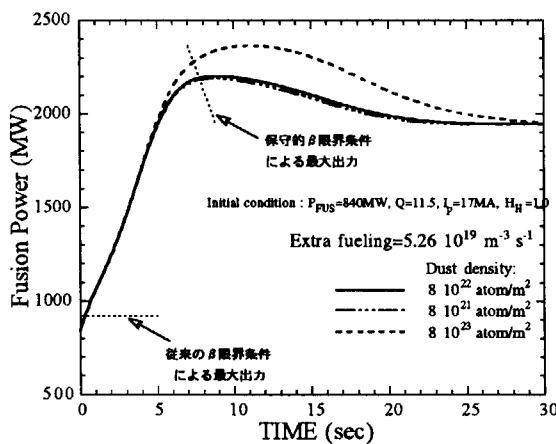
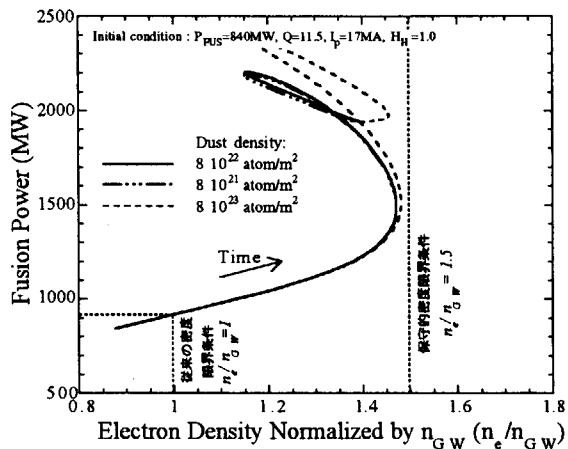
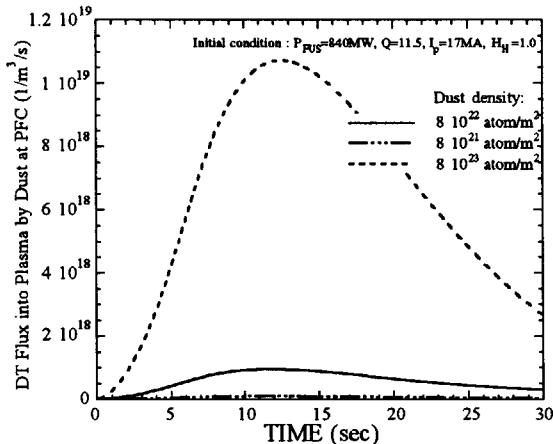
⑥閉じ込め改善時の(β 限界指数－出力)軌跡

図3.2、解析パラメータ $f - delay$ に対する感度解析結果。外部からの燃料注入が支配的な燃料過剰注入事象に対する影響は小さい。閉じ込め改善事象では、遅れ時間が小さいほど、壁で放出されるDT燃料が増加し、出力が上昇する。但し、ベータ限界で制限される出力上限はほとんど影響を受けない。

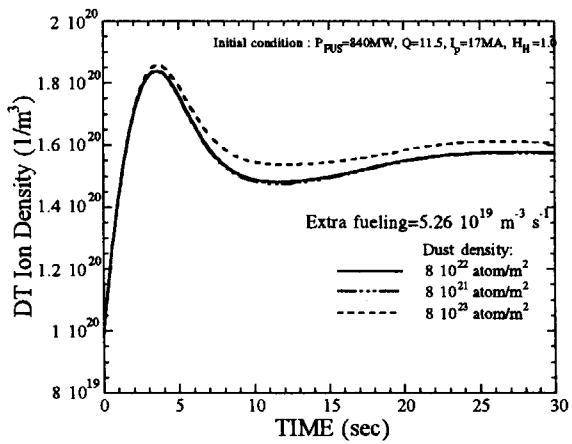
①燃料過剰注入時の出力波形

②燃料過剰注入時の(n_e/n_{GW} -出力)軌跡

③燃料過剰注入時のPFCダストから発生し主プラズマに流入するDT燃料量



④燃料過剰注入時のDTイオン密度波形



⑤閉じ込め改善時の出力波形

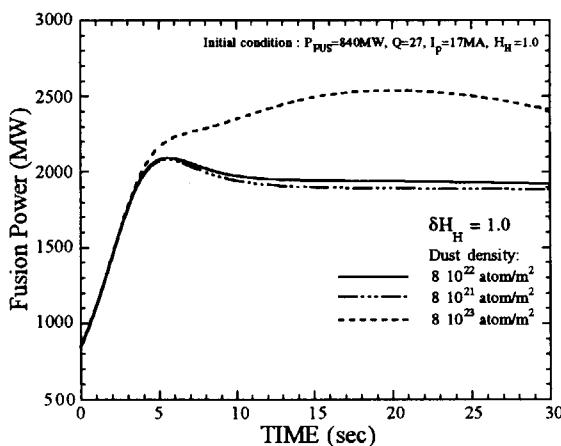
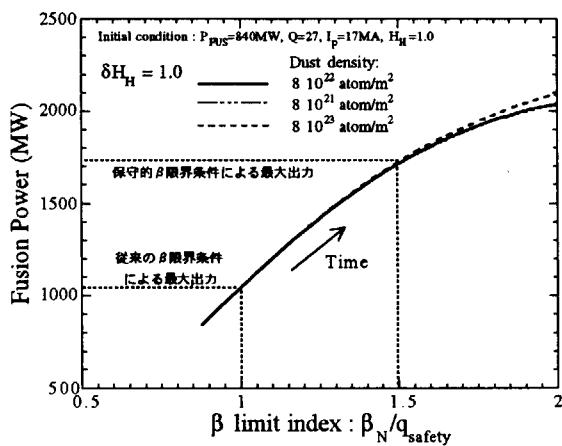
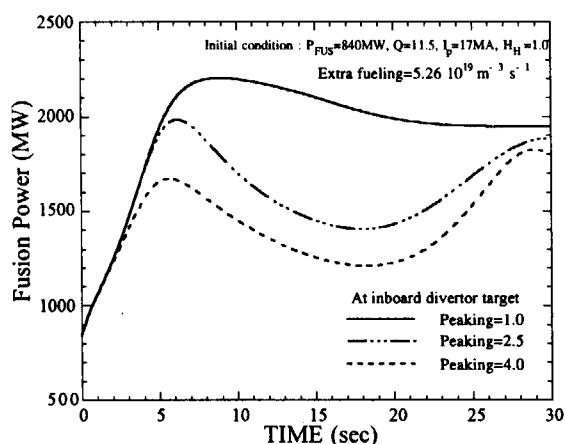
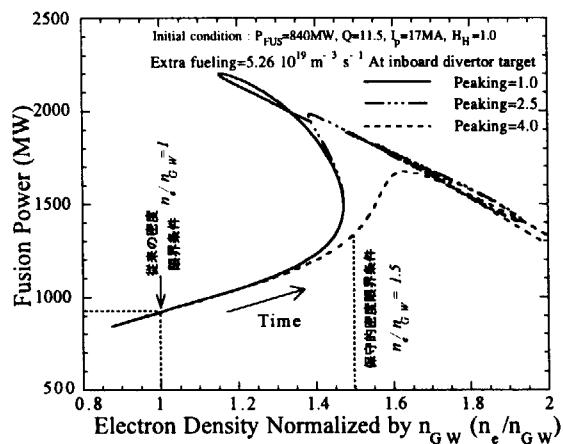
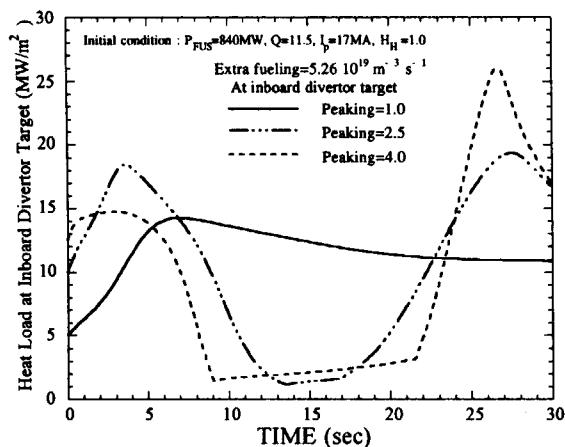
⑥閉じ込め改善時の(β 限界指数-出力)軌跡

図3.3、解析パラメータ density-dust に対する感度解析結果。ダストに捕捉されるDT原子密度が大きいほど (density-dust が大きいほど)、出力上昇が増加する。但し、密度限界やベータ限界で制限される出力上限への影響は小さい。

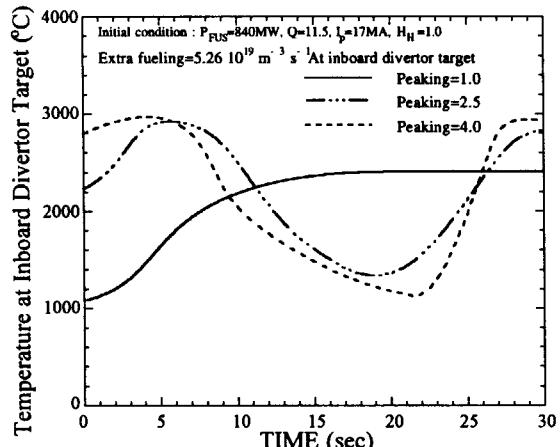
①燃料過剰注入時の出力波形

②燃料過剰注入時の(n_e/n_{GW} -出力)軌跡

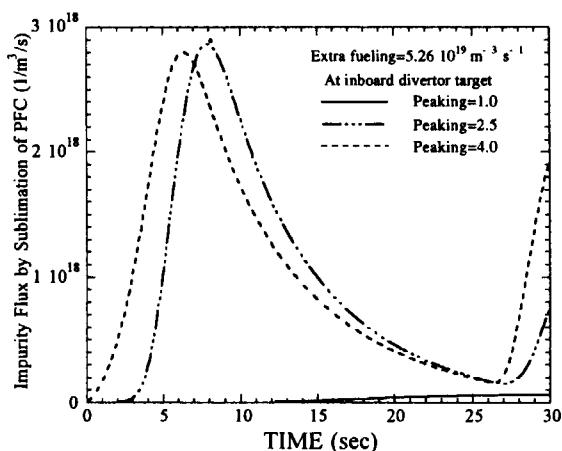
③燃料過剰注入時の内側ダイバータ板熱負荷



④燃料過剰注入時の内側ダイバータ板温度



⑤燃料過剰注入時の昇華不純物流入量波形



⑥燃料過剰注入時の実効電荷

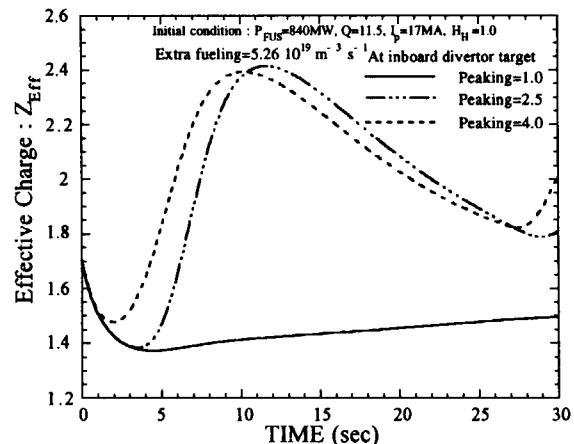
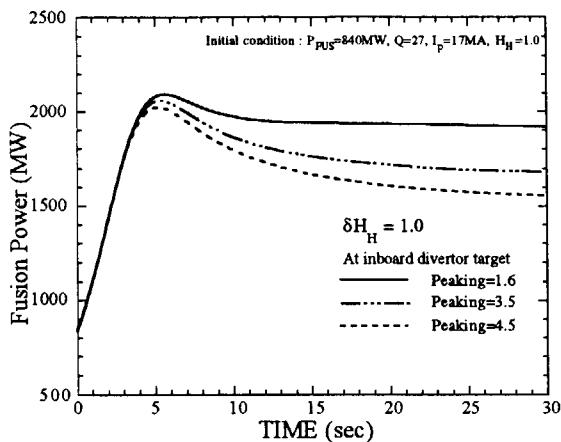
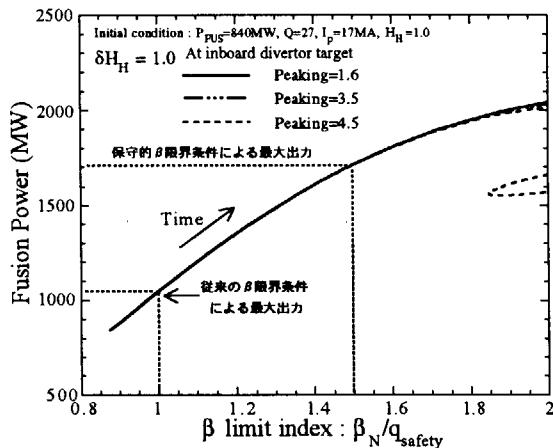
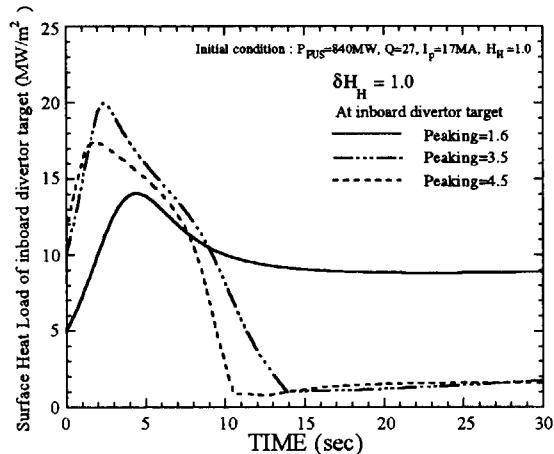


図3.4、解析パラメータ peaking-factor に対する感度解析結果。

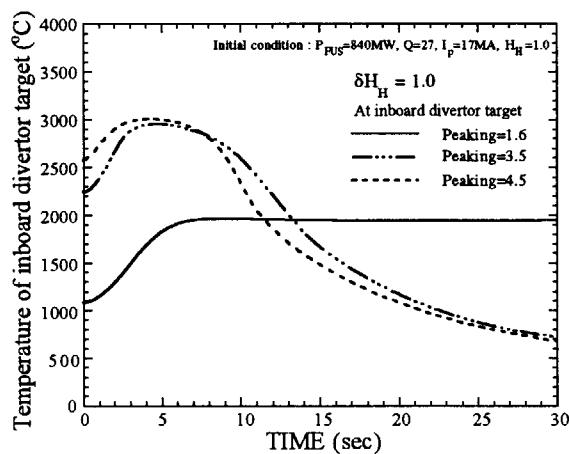
⑦閉じ込め改善時の出力波形

⑧閉じ込め改善時の(β 限界指数 - 出力)軌跡

⑨閉じ込め改善時の内側ダイバータ板熱負荷



⑩閉じ込め改善時の内側ダイバータ板温度



⑪閉じ込め改善時の昇華不純物流入量

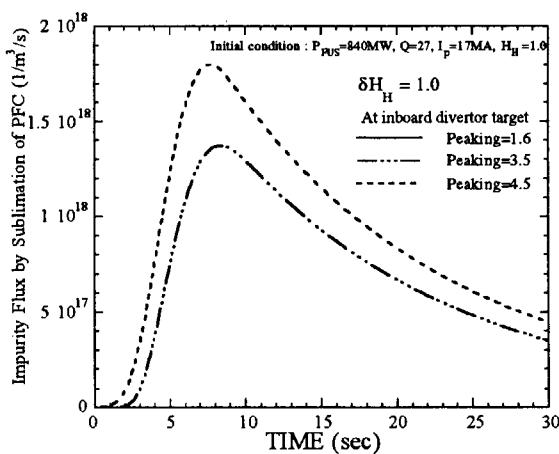


図 3.4, 前ページのつづき

This is a blank page.

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
工率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束密度	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トントン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリ	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10^{18}	エクサ	E
10^{15}	ペタ	P
10^{12}	テラ	T
10^9	ギガ	G
10^6	メガ	M
10^3	キロ	k
10^2	ヘクト	h
10^1	デカ	da
10^{-1}	デシ	d
10^{-2}	センチ	c
10^{-3}	ミリ	m
10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-9}	ナノ	n
10^{-12}	ピコ	p
10^{-15}	フェムト	f
10^{-18}	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表す場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s} (\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P} (\text{ポアズ}) (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St} (\text{ストークス}) (\text{cm}^2/\text{s})$$

圧	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062×10^3	145.038
0.0980665	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
0.101325	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322×10^{-4}	1.35951×10^{-3}	1.31579×10^{-3}	1	1.93368×10^{-2}
	6.89476×10^{-3}	7.03070×10^{-2}	6.80460×10^{-2}	51.7149	1

エネルギー	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)
1	0.101972	2.77778×10^{-7}	0.238889	9.47813×10^{-4}	0.737562	6.24150×10^{18}	$= 4.184 \text{ J} (\text{熱化学})$	
9.80665	1	2.72407×10^{-6}	2.34270	9.29487×10^{-3}	7.23301	6.12082×10^{19}	$= 4.1855 \text{ J} (15^\circ \text{C})$	
3.6×10^6	3.67098×10^5	1	8.59999×10^5	3412.13	2.65522×10^6	2.24694×10^{25}	$= 4.1868 \text{ J} (\text{国際蒸気表})$	
4.18605	0.426858	1.16279×10^{-6}	1	3.96759×10^{-3}	3.08747	2.61272×10^{19}	仕事率 1 PS (仮馬力)	
1055.06	107.586	2.93072×10^{-4}	252.042	1	778.172	6.58515×10^{21}	$= 75 \text{ kgf} \cdot \text{m/s}$	
1.35582	0.138255	3.76616×10^{-7}	0.323890	1.28506×10^{-3}	1	8.46233×10^{18}	$= 735.499 \text{ W}$	
1.60218×10^{-19}	1.63377×10^{-20}	4.45050×10^{-26}	3.82743×10^{-20}	1.51857×10^{-22}	1.18171×10^{-19}	1		

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
1	2.70270×10^{-11}			1	100
3.7×10^{10}	1			0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58×10^{-4}	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

(86年12月26日現在)

プラズマ過渡現象解析コードSAFALYの改訂（第二部）



古紙配合率100%
白色度70%の再生紙を使用しています