



JAEA-Technology

2006-022



JP0650356

JT-60プラズマ物理量分布の 実時間制御システムの開発

Development of a Profile Control System
for the JT-60 Plasma Equilibrium Control

末岡 通治 鈴木 隆博 細山 博己

Michiharu SUEOKA, Takahiro SUZUKI and Hiroki HOSOYAMA

核融合研究開発部門
トカマク放電システム開発グループ

Tokamak Control Group
Fusion Research and Development Directorate

March 2006

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に刊行している研究開発報告書です。
本レポートの全部または一部を複写・複製・転載する場合は下記にお問い合わせ下さい。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
Tel.029-282-6387, Fax.029-282-5920

This report was issued subject to the copyright of Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about the copyright and reproduction should be addressed to :

Intellectual Resources Section,
Intellectual Resources Department
2-4, Shirakata-shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, JAPAN
Tel.029-282-6387, Fax.029-282-5920

©日本原子力研究開発機構, Japan Atomic Energy Agency, 2006

JT-60 プラズマ物理量分布の実時間制御システムの開発

日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門

トカマクシステム技術開発ユニット

末岡 通治、鈴木 隆博⁺、細山 博己[※]

(2006年1月27日受理)

JT-60 では、新たにプラズマ内部の物理量の分布を実時間で制御することが計画された。

これを実施するため空間(r,z)に分布する物理量が時系列となる「物理量分布プレプログラム」の放電条件設定を行う専用 GUI(Graphical User Interface)システムを新たに製作した。また、今後の拡張性を確保し、既存のシステムへの影響を最小限に留めることから、既存の実時間制御計算機システムから独立した物理量分布制御専用の実時間制御計算機システムを新たに付加した。

実時間制御は、プラズマの平衡条件を解かずに安全係数分布を高速で計算できる新しい手法を考案したことにより可能となった。これを用いて予め設定された安全係数分布の目標値に追従するフィードバック制御アルゴリズムを開発した。

このシステムは、2004年1月からの実験に適用され、MSE(Motional Stark Effect)計測信号等から実時間で安全係数の分布を計算し、LHCD による電流駆動と組み合わせることで、安全係数分布の実時間フィードバック制御を世界で初めて実現した。

本報告書では、この帰還制御を実施する為に新たに開発した GUI システム及び、プラズマ電流分布の実時間制御システムについて報告する。

那珂核融合研究所（駐在）：〒311-0193 茨城県那珂市向山 801-1

+ : 先進プラズマ研究開発ユニット

※ : 日本エクスクリン（株）から出向中

Development of a Profile Control System for the JT-60 Plasma Equilibrium Control

Michiharu SUEOKA, Takahiro SUZUKI[†] and Hiroki HOSOYAMA[‡]

Division of Tokamak System Technology
Fusion Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Naka-shi, Ibaraki-ken

(Received January 27, 2006)

For recent years, plasma profile controls have been planned to improve energy confinement and to avoid instabilities in high performance plasmas. A preprogrammed profile reference with a function of time and position (r,z) is necessary for the profile controls.

We developed a new GUI (Graphical User Interface) system dedicated specifically for time evolution of the controlled parameters, and added a real-time profile control system (j-PC) to the existing real-time control frame to keep redundancy for a future modification.

A new method to calculate the safety factor, that does not consider plasma equilibrium, has been developed. Using this method, the safety factor control algorithm was also developed so as to follow the preprogrammed reference waveform.

This system has been applied to the JT-60 experiment since January, 2004. The safety factor was well controlled in real-time by LHCD using MSE (Motional Stark Effect) measurement signals for the first time in the world.

This report deals with the technical details of a plasma current profile control and its GUI system.

Keywords: JT-60, Plasma Equilibrium, Current Profile, Real-time Feedback Control, GUI, MSE, LHCD, Tokamak

[†]: Division of Advanced Plasma Research

[‡]: On loan from Japan Expert Clone Corp.

目 次

1.はじめに	1
2. 実時間物理量分布制御システムの概要	2
2. 1 実時間物理量分布制御の流れ	3
2. 2 実時間物理量分布制御システムの仕様	3
3. 実時間物理量分布帰還制御の開発	5
3. 1 プラズマ平衡を解かない物理量分布の近似法	5
3. 2 実時間物理量分布制御ロジックの構築	8
3. 3 実時間安全係数分布帰還制御	9
3. 4 安全係数最小位置制御と安全係数最小値制御	15
4. 実験結果例	17
5. 物理量分布制御放電条件設定のための GUI 機能	20
5. 1 物理量分布制御用放電条件	20
5. 2 放電条件設定方法	24
5. 3 合理性検査	30
5. 4 放電条件保存	30
5. 5 実行条件転送	30
5. 6 結果データ表示	31
6. 物理量分布データベース	33
7. まとめと今後の課題	37
謝 辞	38
参考文献	38
付録 1 実時間物理量分布制御用結果データ(PID)一覧	39
付録 2 物理量分布放電条件(PID)一覧	40
付録 3 物理量分布結果データの全系DB内での取扱いについて	41
付録 4 改造対象全系 DB データ取得プログラムフローチャート一覧	43

Contents

1. Introduction	1
2. The real-time profile control system	2
2.1 System configuration of the real-time profile control	3
2.2 Specification definition of the real-time profile control system	3
3. Development of the real-time plasma current (j) profile feedback control	5
3.1 Approximate reconstruction method of j -profile without considering plasma equilibrium	5
3.2 Consideration on the real-time profile control algorithm	8
3.3 Real-time safety factor feedback control	9
3.4 A control of the position or the value of the minimum safety factor	15
4. Experimental results	17
5. A GUI for setting discharge conditions of the j -profile control	20
5.1 Discharge conditions	20
5.2 Human interface	24
5.3 Consistency check	30
5.4 Storage of the discharge condition files	30
5.5 Preset of the discharge condition files	30
5.6 Display of result data	31
6. Database for profile control	33
7. Concluding Remarks	37
Acknowledgments	38
References	38
Appendix 1 List of the real-time profile control result data	39
Appendix 2 List of the profile control discharge conditions	40
Appendix 3 Treatment of profile control discharge condition in ZENKEI-DB	41
Appendix 4 Flowchart of ZENKEI-DB data handling program	43

1. はじめに

トカマク型核融合装置におけるプラズマ電流に関するポロイダル断面内に分布する電流密度、安全係数、磁束密度は、エネルギー閉じ込め性能や不安定性を決める重要な要素であり、プラズマの高性能化を目指すには、これらの物理量分布を実時間で制御することが必要不可欠である。

分布制御の理想的な制御手法は、プラズマの最外殻磁気面内の各点における物理量分布を実時間で再構築して(いわゆる平衡を解きながら)、目標とする物理量分布に追従するようにアクチュエータ(プラズマ加熱装置)を制御することであると考えられる。しかしながら、現時点ではこの再構築手法は開発中であり、プラズマ中の磁場の局所ピッチ角を計測する MSE 信号を用いた以下の方法を適用することとした^[7,15]。

P-17 の真空容器内壁から半径方向外側へ取り付けてある 16 点の MSE 計測器の信号と、プラズマ位置形状再構築(CCS)計算機によるコーシー型条件仮想曲面(コーシー条件面)を用いた最外殻磁気面同定法^[1,2]で算出したプラズマ最外殻磁気面形状から、MSE 計測点に対応した物理量分布を近似する手法を開発した。

この手法を取り入れた実時間制御機能の実現方法は、本機能を追加することによる既存機能への影響や将来の拡張性を考慮して、新たに「物理量分布実時間制御システム」を構築することとした。

物理量分布実時間制御システムのハードウェア構築にあたっては、これまでの実時間制御機能の開発で培ってきた技術や資源を最大限に活用できることから、Intel 社が中心となる PCI SIG(Special Interest Group)によって策定された PCI-bus システムを採用した^[3]。

一方、ソフトウェア開発では、分布制御に必要なパラメータ(放電条件)、目標値(プレプログラム)は、これまでのような時間刻み一定の1次元時系列データ(物理量(N) Nは時間刻み分)とは異なり、新たな(位置(r, z)、物理量(N))といった3次元時系列データとなるため、その設定の複雑さやデータ容量の膨大さに如何に対応するかが課題となる。これまでの放電条件との共通点がほとんど無いので、全く独立した分布制御専用の GUI(Graphical User Interface)システムを新たに開発することとした^[4]。

本報告書では、実時間物理量分布制御システムの概要(2章)、物理量分布実時間帰還制御アルゴリズム(3章)、初期の実験成果(4章)、専用 GUI 機能(5章)、実験結果データのデータベース化(6章)について詳細に報告する。

2. 実時間物理量分布制御システムの概要

実時間物理量分布制御の最初の制御対象は電流密度分布とした。また、プラズマ電流密度分布に従属する電流安全係数分布、磁束密度分布も被制御パラメータとする。

そこで、まず分布を制御するためのアクチュエータには、電流駆動率の高い LH-A 系 RF 加熱装置^[10]を選択することとし、LH-A 系加熱装置への指令は、これまで通り実時間制御計算機(IbR)が他の加熱装置の指令と共に一括して出力することとした。物理量分布制御ロジックの概要是以下のようになる。

実時間物理量分布制御計算機(j-PC)は、物理量分布専用放電条件を予め「条件設定専用ワークステーション(WS)」から受信する。プラズマ着火中は、計測用実時間計算機(RTP)から MSE 計測信号、CCS 計算機からプラズマ位置形状パラメータを受信し、物理量分布現状値を算出し、現状値が物理量分布目標値に追従するように LH-A 系への「パワー」及び「位相」指令値を IbR へ出力する。

従って、これらを実現するために、物理量分布制御用放電条件を作成する「条件設定専用 WS」と、実時間物理量分布制御を司る「実時間電流分布制御計算機(j-PC)」を既存のシステムに付加する。全体構成を図 2.1 に示す。(背景が網掛けの設備は新設)。

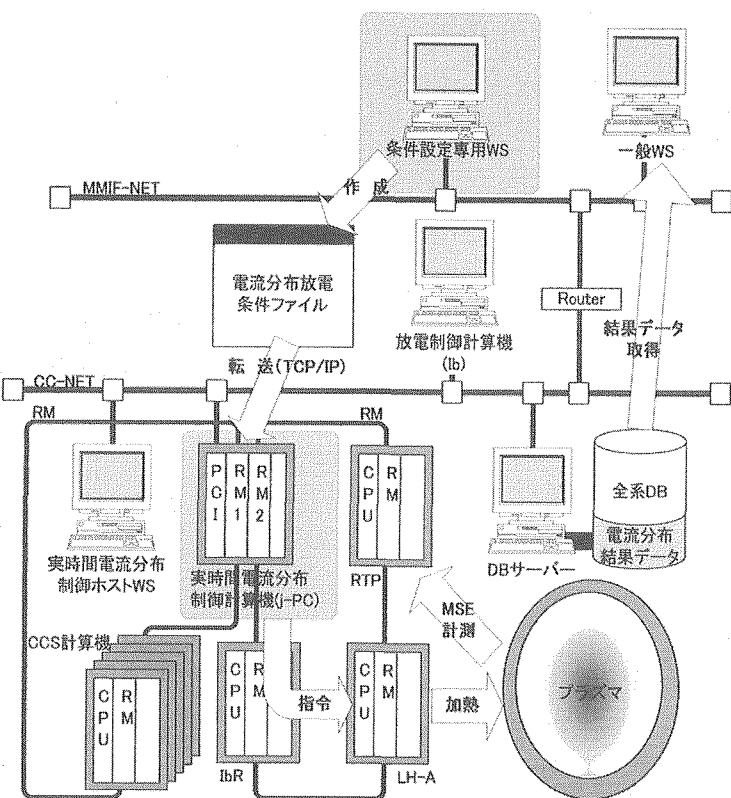


図 2.1 実時間物理量分布制御システムの全体構成

2.1 実時間物理量分布制御の流れ

実時間物理量分布制御の流れは以下のようになる(図 2.2 参照)。

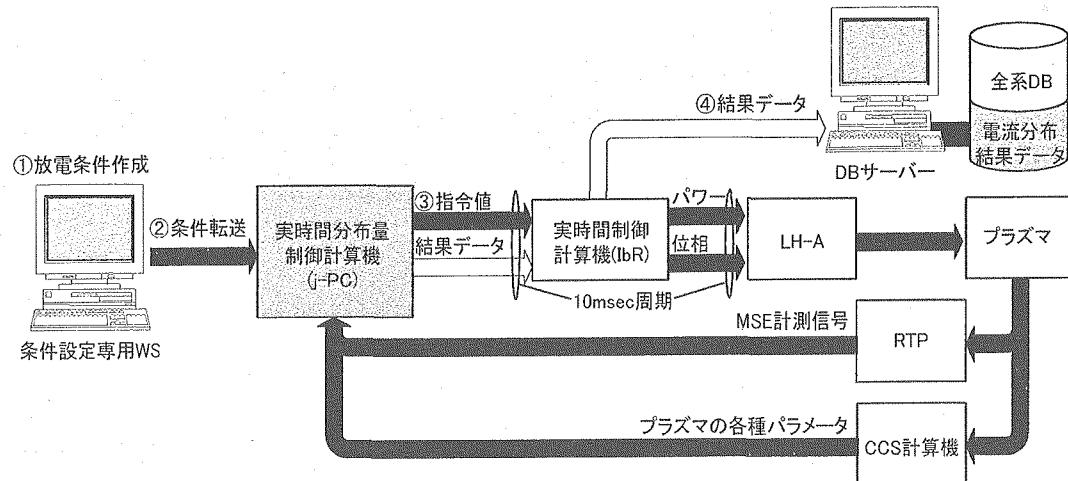


図 2.2 実時間物理量分布制御実行の流れ

- ① 予め「条件設定専用 WS」にて物理量分布制御用放電条件を作成しておく。
 - ② 放電シーケンスの「開始ボタン」押下までに、条件設定者は「実行条件転送ボタン」を押下して、j-PC へ使用する放電条件を転送する。
 - ③ プラズマ着火中、j-PC は RTP を経由して入力される MSE 計測信号と CCS 計算機から算出されるプラズマの各種パラメータから、実時間物理量分布制御を 10ms 周期で実行する。アクチュエータとなる LH-A 系への指令値は、実時間制御計算機(IbR)を経由して出力される。
 - ④ 放電後、実験によって j-PC で取得された結果データは IbR の結果データの一部としてショット毎に DB サーバーに格納され(図 2.2 白矢印)る。このデータは、全系結果データ表示機能および物理量分布制御専用結果データ表示機能で一般の WS から閲覧・解析が可能となる。
- なお、①～④の詳細については後述する。

2.2 実時間物理量分布制御システムの仕様

物理量分布制御システムの開発に使用したハードウェアの詳細を表 2.1 に示す。

表 2.1 実時間物理量分布制御システムハードウェア仕様

計算機/モジュール	型式・仕様	搭載 OS	制御周期
j-PC	EBM 23-AW(PCI-Bus) 搭載チップ:Alpha Processor21164 動作クロック:500MHz 搭載コアメモリ:512MByte	VxWorks V5.2C	10ms
条件作成専用 WS	Sun Ultra5_10	Sun OS リリース 5.6	
ホスト計算機	Alpha Station 600au	digital UNIX	
リフレクティブメモリ	VMIPCI5576(PCI-Bus) 共有メモリ:256kByte 転送速度:6.2MByte/s		

また、放電条件ファイルは JT-60 と同じように、放電制御用放電条件(1 点)とプレプロ放電条件(時系列)の 2種類の放電条件で構成される。JT-60 全体での 1 ショットあたりの放電条件実行ファイル(設備に転送する前に放電条件を編集処理して作成されるファイル)は、612.0 kByte である。しかしながら、物理量分布制御の実行ファイルはそれ単独で 5.14 Mbyte もあり、既存の放電条件ファイルの枠組みには収まりきれなかった。

そこで、物理量分布制御用放電条件として JT-60 の放電条件と切り離して設計・構築することとした。

表 2.2 放電条件設定パラメータ容量の比較

PID 名称	JT-60	物理量分布制御
放電制御用放電条件	11.76 kByte(Max:13.6 kByte)	10.4 kByte(Max:21.1 kByte)
プレプロ放電条件	598.4 kByte	5.12 MByte
Total	612.0 kByte	5.14 MByte

3. 実時間物理量分布帰還制御の開発

JT-60 では、真空容器中心から水平方向外側へ取り付けてある 16 点の MSE 計測器の信号と CCS 計算機で算出したプラズマ最外殻磁気面形状から、MSE 計測点における物理量分布を近似する手法を開発した。

これより以下に、その近似手法とそれの実時間制御ロジックへの適用について詳細に解説する。実時間安全係数分布制御の流れの概略は図 3.1 のようになる。MSE 計測はプラズマ中の磁場のピッチ角(トロイダル磁場とポロイダル磁場のなす角)を測定する。実時間用に使用する測定点の位置を図 3.2 に示す。CCS 法による最外殻磁気面形状を利用してプラズマ内部磁気面を推定し、MSE によるピッチ角から安全係数分布を実時間評価する。制御ロジックでは、実時間で算出する安全係数分布の現状値とその目標値から最適な電流駆動位置を決定し、LH-A 系 RF 加熱装置に指令値を算出する。これにより、プラズマ中の電流分布とそれに従属した安全係数分布が変化し、MSE のピッチ角が変化する。このループにより実時間安全係数分布制御を実現する。

3.1 プラズマ平衡を解かない物理量分布の近似法

実時間電流分布の評価を実施するために、真空容器内位置座標(R, Z)と磁気面座標系(ρ, θ)の対応させる必要がある。 ρ は規格化小半径、 θ はポロイダル角(弱磁場側赤道面で $\theta=0$)である。次の様な Shafranov シフトを含んだ簡単な近似を行い、内部磁気面を評価する。

$$R = R_{ax} + \Lambda(\rho) + a \cdot \rho \cdot \cos(\theta + \delta(\rho) \sin \theta) \quad (3-1)$$

$$Z = Z_{ax} + a \cdot \rho \cdot \kappa(\rho) \sin \theta \quad (3-2)$$

ここで、 R_{ax} : プラズマ磁気軸中心水平位置、

Z_{ax} : プラズマ磁気軸中心垂直位置、

$\Lambda(\rho)$: Shafranov シフト、 $\delta(\rho)$: 三角度、 $\kappa(\rho)$: 非円形度、

a : プラズマ小半径

この近似によって与えられるプラズマ形状では、JT-60U の実際の形状(特に LH 配位)とは全く異なる形状になってしまうことになるが、MSE 計測点が赤道面に近い位置にあれば、MSE 計測点位置での磁気面はほぼ垂直であり、実際は形状にほとんど依存しなくなる。電流分布制御では

MSE 計測点は磁気軸近傍を通り、MSE 計測用 NB の仰角は 7 度程度であるので、この条件は満たされる(図 3.2 参照)。

従って、この非線形連立方程式(3-1, 3-2 式)から(R, Z)を与えたときの(ρ, θ)を求める。この解法は Newton-Raphson 法を用いる。この解法は陰解法であるが、一空間点当たり数回程度の iteration で収束する

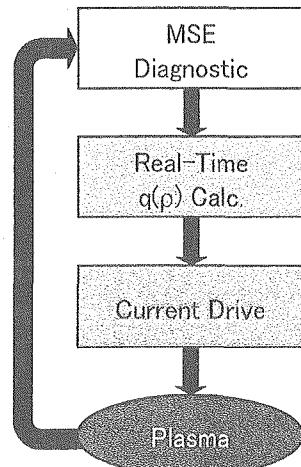


図 3.1: 実時間安全係数分布制御の流れ

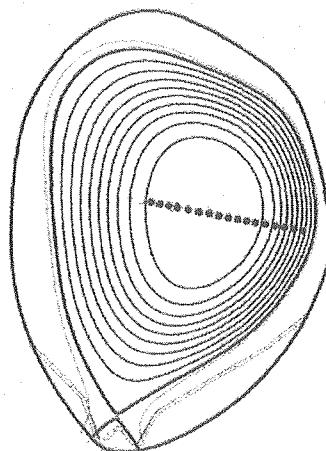


図 3.2 実時間制御用 MSE 計測点位置(R, Z)(図中の●)

ので、実時間制御における演算時間の問題は生じないと考えられる。

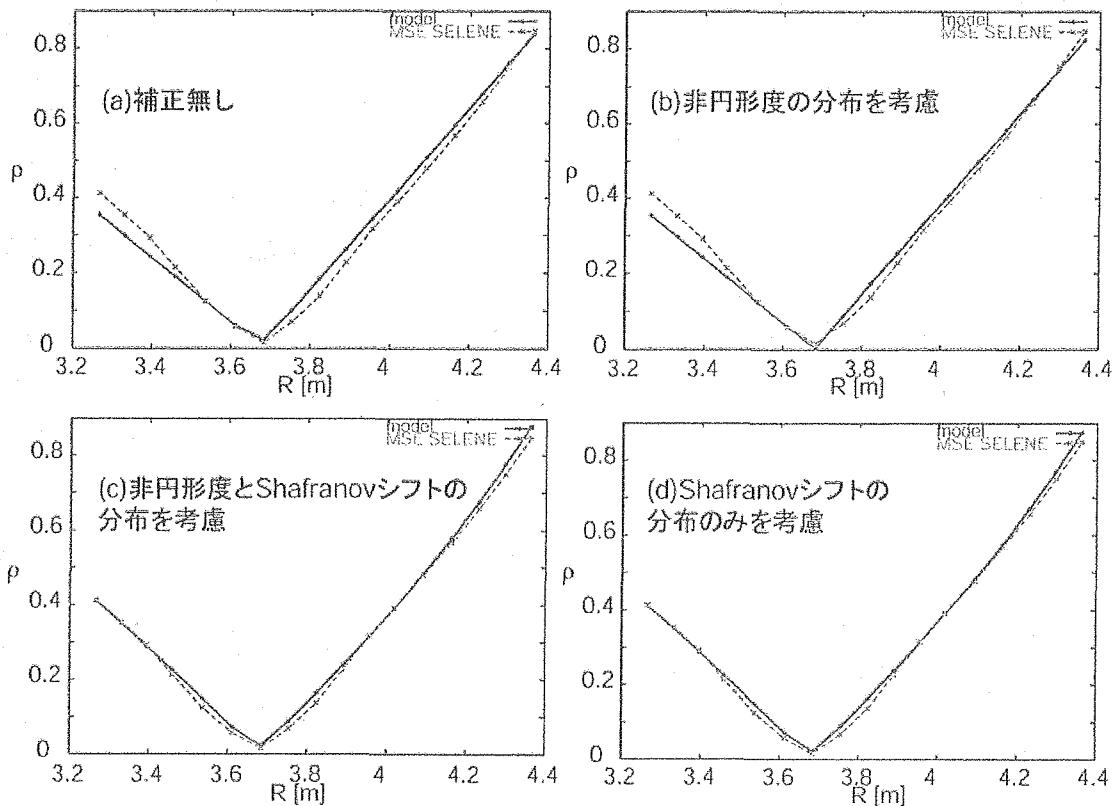


図 3.3 モデル化による評価(実線)と平衡計算結果(破線)の比較

(1) 近似結果の妥当性の確認

本近似結果の妥当性は、電流ホール用 LH 負磁気シア放電(E37964)を用いて確認する。

まず、図 3.3(a)は該当する放電を MSE SELENE による平衡から R_{ax} 、 Z_{ax} 、 $\Lambda(I)$ 、 $\delta(I)$ 、 $\kappa(I)$ 、を用いて、 $\Lambda(\rho) = -\Lambda(I) \cdot \rho$ 、 $\kappa(\rho) = \kappa(I)$ 、 $\delta(\rho) = \delta(I)$ と仮定したときの結果である。この結果は、両者が比較的良く一致してはいるものの平衡計算結果とのずれは明らかであり、これをもとに電流分布評価や制御を行うには誤差が大きい。次に図 3.3(a)の結果を元に平衡計算における非円形度分布を偶数次の多項式(0, 2, 4 次; $\kappa(\rho) = \kappa_0 + \kappa_2 \rho^2 + \kappa_4 \rho^4$)で近似し、その効果を取り入れた結果が図 3.3(b)である。全体に図 3.3(a)より良いが Shafranov シフトに起因する差が弱磁場側・強磁場側共に見られる。さらに図 3.3(b)の結果を元に平衡計算における Shafranov シフト分布を幂乗でフィッティングした結果を取り入れた結果が図 3.3(c)である。平衡計算結果と非常に良く一致しており、実用に足ると考えられる。このときの幂乗の指数は 2.27 程度であった。しかしながら、放電毎にこのような非円形度・Shafranov シフトの近似を行うことは自由度の高い(未知の放電における)電流分布評価・制御には不適切であると考えられる。そこでこれらを次の様に考え、巨視量だけから分布を評価できるようにする。

- 1) 近似における非円形度・三角度の分布効果は MSE 計測点が赤道面近傍にあるため無視できる。

2) Shafranov シフトは、

$$\Lambda(\rho) = -\Lambda(1) \cdot \rho^2 = (R_p - R_{ax})\rho^2 \quad (3-3)$$

で表せる。(ポロイダル磁場一様・圧力勾配一様のときの Shafranov シフトが ρ の 1 乗程度であろうから、磁気軸近くでポロイダル磁場が減ることを考えると 2 乗程度が妥当であろう。実際上記のフィッティングでは 2.27 乗であった。)

これらから計算した近似結果は図 3.3(d)になる。磁気軸近くで非円形度が入っていないことによる差が見られるが、この程度であれば制御への適用には問題ないと考えた。また、計算に使用したパラメータは全て CCS 法で実時間算出が可能である。ただし、CCS が MSE SELENE と同じ値を算出できるかが問題である。

そこで CCS を用いて同様の評価を実施した。そのパラメータを表 3.1 に示す(同時に CCS 以外の FBI, FBEQU も示した)。ここでは MSE SELENE の結果を基本として他者の比較を行う。MSE SELENE はプラズマ中の仮定した圧力分布との整合をとて電流分布を求めており、最も信頼性の高いプラズマ配位同定手法であるからである。すると、一見してわかるように、平衡を解いていない場合(FBI, CCS)には磁気軸位置が MSE SELENE と大きく異なる。FBEQU は負磁気軸アシマではあるが MSE SELENE と良く一致している。図 3.4 に図 3.3(d)と同様の手法で評価した CCS 巨視パラメータによる近似結果を示す。この結果を見ると、磁気軸位置が異なることにより大きな不一致が生じていることがわかる。また図には示していないが、FBI も CCS 同様に一致しなかった。FBEQU は MSE SELENE とほぼ同じく良く一致した。

以上により、主に磁気軸位置を適切に評価できれば、配位の変更にも対応した近似が可能であると考えられる。しかし、実時間制御では CCS の演算パラメータを使用することが前提であることから、CCS の演算パラメータを用いた近似で適切な結果が得られるように、磁気軸位置(電流重心位置相当)の評価や妥当性の検証、および補正・改良が必要不可欠である。

表 3.1 各手法における E37964 の巨視パラメータ

method	R_{ax} [m]	Z_{ax} [m]	R_{av} [m]	a [m]	κ	δ	Shafranov shift [m]
MSE SELENE	3.6808	0.2008	3.508	0.9516	1.3818	0.4443	-0.1728
FBEQU	3.6863	0.2123	3.5052	0.957	1.3983	0.4495	-0.1811
FBI	3.614	0.206	3.479	0.987	1.324	0.399	-0.135
CCS	3.5746	0.1864	3.4751	0.9516	1.3818	0.3878	-0.0995

* R_{ax} : 磁気軸水平位置、 Z_{ax} : 磁気軸垂直位置、 R_{av} : プラズマ幾何中心水平位置、a: プラズマ横小半径、橢円度: κ 、三角度: δ 。なお、a と κ に関しては、CCS が結果データを登録していなかったため、MSE SELENE の値を用いた。

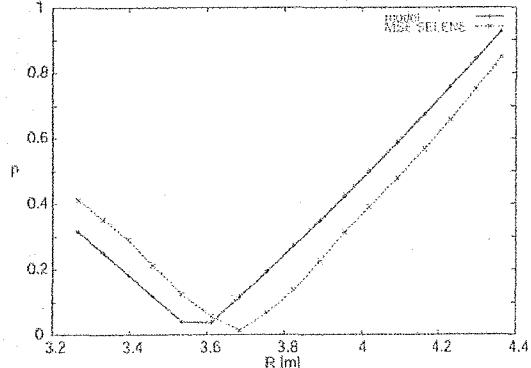


図 3.4 CCS (実線)と MSE SELENE (破線)
の平衡計算による mapping

(2) MSE SELENE と CCS による磁気軸水平位置のずれの補正

MSE SELENE と CCS による磁気軸水平位置(R_{ax})のずれを補正し、実時間で動いている CCS から磁気軸位置を正しく評価するためにいくつかの放電(E43093, E43096, E43098)を調べた。図 3.5 に両者の関係を示す。平均のずれは CCS が MSE SELENE に対して 5.5cm 小さく評価している。このことを考慮して、CCS の計算値に 5.5cm 加えたものを実時間計算で使用するようにした。この経験則による補正により実時間 q 分布の計算精度は磁気軸近くで大きく向上した。最終的に得られた本評価手法による安全係数分布と、平衡計算による安全係数分布の比較を図 3.6 に示す。両者は良く一致していることがわかる。平衡計算による安全係数分布は信頼性が高いが、計算には数分程度を要する。この実時間評価手法では 10ms 以内に計算を終了させることができ、大幅に高速化された。

3.2 実時間物理量分布制御ロジックの構築

3.2.1 制御対象プラズマと前提条件

初期的な電流分布制御実験では、正磁気シアプラズマを対象とする。正磁気シアは安全係数がプラズマ周辺から中心に向かって単調に減少する安全係数分布をもつ。正磁気シアプラズマでは安全係数が 1, 1.5, 2, …などとなる場所で磁場の乱れが生じ、プラズマの性能を劣化させることが知られており、プラズマ中の安全係数がこれらの値にならないように安全係数分布を制御することが、磁場の乱れの発生回避と性能向上に重要であるためである。

なお、前提条件としては以下の2点を想定する。

- 1) 中心までの MSE 計測(中心接線は磁気軸)。
- 2) MSE 計測の較正の困難さからトロイダル磁場(Bt)反転は考えない。

3.2.2 JT-60U における電流駆動源

ここで、JT-60U で実時間電流分布制御に利用可能な電流駆動源の特性を以下に列挙する。以下で、co, ctr はそれぞれプラズマ電流と同方向、逆方向を指し、on-axis, off-axis はそれぞれ磁気軸近傍、磁気軸から離れた位置を指す。

オーミック電流: 定常に近い長時間放電ではゼロまたは中心ピーク。

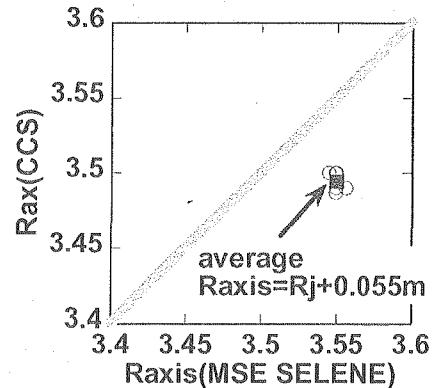


図 3.5 平衡計算による磁気軸水平位置 Raxis(MSESELENE)と実時間計算による磁気軸水平位置 Rax(CCS)との比較

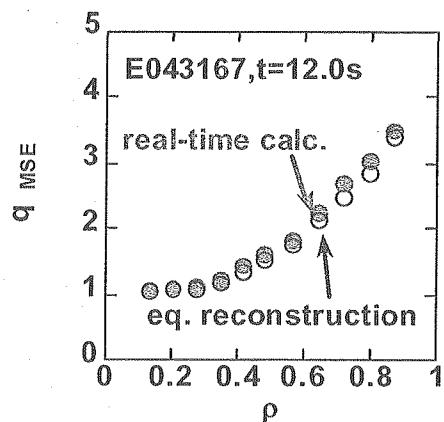


図 3.6 実時間評価した安全係数分布と平衡計算による安全係数分布の比較

- 自発電流: 圧力勾配を介するため閉じ込めと結合していて制御は困難。常に co 方向の電流駆動源。
- 中心接線 PNB: co はオーミック電流と同様に中心ピークしている分布。ctr はオーミックとは異なるが MSE 計測に使うため使用不可。
- 周辺接線 PNB: 共に電流駆動特性が不明だが、co はわずかに off-axis を電流駆動する。ctr は MSE 計測に影響を及ぼすため使用不可。
- 垂直 PNB: 自発電流を通して、周辺部の電流駆動を行うが、自発電流制御は困難。
- NNB: 中心電流駆動なのでオーミックと類似の分布。制御に利用するのは現状では困難。
- LHCD: 高い電流駆動効率で周辺電流駆動できる可能性がある。LH 波の入射位相差により硬 X 線分布測定による高速電子分布が変化することは知られているが、駆動電流分布の制御性は必ずしも明らかにはなっていない。
- ECCD: ミラー入射角制御による電流駆動位置の制御性は良いが、周辺部では電流駆動効率 η_{CD} が低い。小半径方向の電流駆動位置制御に使うには、自分自身で電子温度とそれに伴う η_{CD} を大きく変化させるために、駆動電流量の評価が非常に困難。他の電流源との併用でも電子温度に対する影響が大きく制御が複雑になる。
- オーミック放電と相似な駆動電流分布を持つ外部電流駆動源では電流分布制御はできない。これは、オーミック電流と外部駆動電流の和の分布が全電流分布と相似になるため、電流駆動しても全電流分布が変化せず、オーミック電流と外部駆動電流の割合が変化するだけだからである。
- 上記のことから、電流駆動源としてはオーミックによる中心ピークした駆動電流分布と独立で電流駆動効率の高い LH を選択するのが現実的である。通常のトカマクでは、閉じ込めと巨視的な安定性を決めるプラズマ電流を一定に運転するために、オーミック電流を外部コイル(JT-60 では F-coil)の作る周回電場から制御している。オーミック電流はプラズマ電流の制御にも使われているので、分布制御で直接用いることはできないが、普通は定常の完全非誘導電流駆動でなければ受動的な電流駆動源として中心電流駆動の役割を果たす。受動的なとは、オーミック電流分布が電磁誘導により非誘導電流分布の変化を打ち消す様に流れることを指す。
- 通常は LH、オーミック共に co 方向の電流駆動源であることに注意する必要がある。LH を用いては直接電流を減らすことはできない。

3.3 実時間安全係数分布帰還制御

物理量分布制御における実時間制御ロジックは、新規に開発・設置する「実時間物理量分布帰還制御計算機(j-PC)」に構築する。

j-PC は予め条件設定専用 WS にて設定・転送された目標分布に沿うよう、分布計測信号からの入力データを基に物理量分布現状値を実時間で解析し、物理量分布

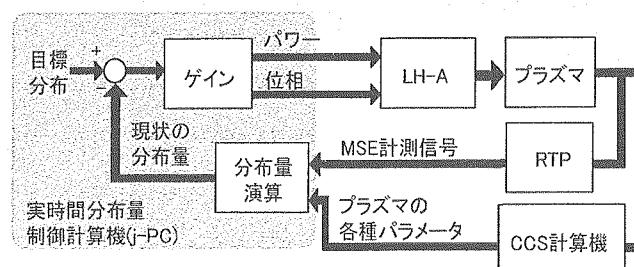


図 3.7 実時間電流分布帰還制御ロジック図

目標値との残差を最小限にするように、対象となるアクチュエータである LH 電流駆動装置に対して指令値を出力すると言う流れを想定する(図3.7 参照)。

今回開発した実時間物理量分布制御のシナリオは、j-PC が算出した目標とする電流駆動目標位置へ LH 入射を行い、実際の電流駆動位置を逐次変化させることで徐々に目標とする安全係数分布に実際の分布を近づけていくというものである。アクチュエータとなる LH は A 系と C 系があり、それぞれ独立に制御することができる。ただし、制御実験を開始する 2003-2004 年には、C 系は装置の入射アンテナの経年劣化により電流駆動性能が低下し、電流分布制御アクチュエータとして不十分だったため、A 系のみを用いる制御ロジックとした。

3. 3. 1 物理量の算出

本制御を実現する上でまず考えなければならないのは、いまどこの場所が電流駆動されているのか？理想的にはどこの場所を電流駆動させなければいけないのか？を評価し決定することである。

MSE が直接計測するのは局所的なピッチ角 γ_n であり^[13, 22]、 γ_n から以下の3つの物理量が導出できる。

1) ある平衡を仮定したときの(主に弱磁場側)ポロイダル磁場($B_{p,n}$)

2) 計測点(n, n-1)を含む二つの磁気面間に流れている電流(dI_n)

3) 計測点(n, n-1)を含む二つの磁気面の囲む面積 dS_n で割った平均電流密度 $\langle j_n \rangle = dI_n / dS_n$

ここで、 $dI_n = I_{n-1} - I_n$ 、 $dS_n = S_{n-1} - S_n$ 。ある MSE 計測点 n を含む磁気面の囲む面積 S_n は CCS の最外殻磁気面形状から推定する。

そこで、まず MSE のピッチ角(γ_n)は、以下である。

$$\tan(\gamma_n) = B_{p,n} / B_{t,n} \quad (3-7)$$

$B_{p,n}$: (ポロイダル磁場[T]) 、 $B_{t,n}$: (トロイダル磁場[T])

アンペール(Ampere)の法則からポロイダル磁場を磁気面上で平均化する。

$$\left\langle B_{p,n} \right\rangle \cdot L_n = \sum_n \mu_0 I_n \quad (3-8)$$

L_n : 計測点 n を含む磁気面のポロイダル方向周長[m]

ここで、 $L_n = \oint_{\partial S_n} d\ell$ であり、CCS の計算結果から S_n と同様に評価できる。従って平均化したポロイダル磁場

が弱磁場側の MSE 計測と同じなら、

$$\sum_n I_n = B_{t,n} \tan(\gamma_n) \cdot L_n / \mu_0 \quad (\text{ここでは } n \text{ の小さいほうが磁気軸寄り}) \quad (3-9)$$

故に、

$$\begin{aligned} I_n &= B_{t,n} \tan(\gamma_n) \cdot L_n / \mu_0 - B_{t,n-1} \tan(\gamma_{n-1}) \cdot L_{n-1} / \mu_0 \\ &= (RB_t / \mu_0) (\tan(\gamma_n) \cdot L_n / R_n - \tan(\gamma_{n-1}) \cdot L_{n-1} / R_{n-1}) \end{aligned} \quad (3-10)$$

例えば 5ch 使うなら、次の非線形の行列方程式を得る。

$$\begin{pmatrix} I_5 \\ I_4 \\ I_3 \\ I_2 \\ I_1 \end{pmatrix} = \frac{RB_t}{\mu_0} \begin{pmatrix} L_5 / R_5 & -L_4 / R_4 & & 0 & \\ & L_4 / R_4 & -L_3 / R_3 & & \\ & & L_3 / R_3 & -L_2 / R_2 & \\ & & & L_2 / R_2 & -L_1 / R_1 \\ 0 & & & & L_1 / R_1 \end{pmatrix} \tan \begin{pmatrix} \gamma_5 \\ \gamma_4 \\ \gamma_3 \\ \gamma_2 \\ \gamma_1 \end{pmatrix} \quad (3-11)$$

I_p - I_5 から ch5 の外の電流も得られる。rn は、MSE 測定装置で決まっており、 $dR_n = 0$ である。さらに配位が時間的に変化していなければ $dL_n = 0$ 。

$$dI_n = (RB_t / \mu_0) \left(\frac{L_n}{R_n \cos^2(\gamma_n)} d\gamma_n - \frac{L_{n-1}}{R_{n-1} \cos^2(\gamma_{n-1})} d\gamma_{n-1} \right) \quad (3-12)$$

$\gamma_n \ll 1$ なら

$$dI_n = (RB_t / \mu_0) \left(\frac{L_n}{R_n (1 - \gamma_n^2 / 2)} d\gamma_n - \frac{L_{n-1}}{R_{n-1} (1 - \gamma_{n-1}^2 / 2)} d\gamma_{n-1} \right) \quad (3-13)$$

γ_n について 2 次以降を無視すると、

$$dI_n = (RB_t / \mu_0) \left(\frac{L_n}{R_n} d\gamma_n - \frac{L_{n-1}}{R_{n-1}} d\gamma_{n-1} \right) \quad (3-14)$$

電流”分布”制御であるためには、空間で何点かの電流を制御する必要がある。これまでの他の装置の実験では内部インダクタンス ℓ_i などの巨視的な積分量で代表させているが、JT-60U では複数個(N)の

$\Delta I_n = I_n^{obs} - I_n^{ref}$ を考える。そこで、少ない制御パラメータで多変数を制御するために

$$\Im = \max_{n=1}^N (w_n \Delta I_n) \quad (3-15)$$

を制御すべきと考える。ここで w_n は制御上の重み付けであり、電流駆動位置を決める際の一つの要素とする。これは電流駆動位置の重要性に応じて指定しておくパラメータである。

制御手法は、(3-15)式により導出される \Im の場所を電流駆動することにより、予め定めた電流分布制御目標値に徐々に一致させていくという制御を試みる。

このとき、算出された \Im (目標とする電流駆動位置) に該当する場所を ρ^{ref} とする。すると ρ^{ref} は以下のように与えられる。

$$\rho^{ref} = \rho_n \quad (\text{ここで、n は}\Im\text{を与える n}) \quad (3-16)$$

$$\rho^{obs} = \rho_m \quad (\text{ここで、m は}\max_{m=1}^N(|\frac{1}{I_m^{obs}} \frac{dI_m^{obs}}{dt}|)\text{を与える m}) \quad (3-17)$$

ただし、 ρ_m には少なくともオーミック電流のしみ込み分が入る。電流分布制御目標値と実績値の差は $\Delta R = \rho^{obs} - \rho^{ref}$ とする。 \Im が正の時は磁気面の外側を電流駆動し、 \Im が負の時は磁気面の内側を電流駆動することで制御を行う。従って、電流駆動により制御を行う場所は以下で決まる。

$$\Re = \Delta R + \text{sgn}(\Im) \delta \rho = \rho^{obs} - \rho^{ref} + \text{sgn}(\Im) \delta \rho \quad (3-18)$$

$\delta \rho$: 適当な長さ $(\rho_{n-1} - \rho_n)/2$ 程度

CCS による幾何形状を考慮して γ_n を評価できれば、 I_n 、 dI_n は直接評価できる。すなわち \Im 、 \Re を実時間で計算が可能である。 dI_n の次元は A^1 。

安全係数 q は非円形度などの形状から定数(K_n)が決まれば以下の式で表せる。

$$q_n = K_n \frac{a \rho_n}{R_n} \tan(\gamma_n) \quad (3-19)$$

以上のことから、実時間制御で周期毎に導出される電流駆動位置に LH の入射が行われることで、複数の計測点の安全係数分布現状値が、重み w_n に応じて順番に目標値に近づいていく結果になると予想される。

3. 3. 2 電流駆動位置から算出する位相指令値の計算方法

実時間制御で算出する指令値の1つは LH に対する位相である。この位相を求めるに当たって着目するのは、電流駆動現状位置 ρ_{CD} である。今回開発した安全係数分布制御ロジックでは、位相差の変化率を「電流駆動現状位置 ρ_{CD} 」と「電流駆動目標位置 ρ_{CDref} 」の差に比例するように制御する。オーミック電場などの大きな誘導電場による全電流の変化が無いときは、 ρ_{CD} が実際の電流駆動位置とほぼ一致するので、実時間制御での適用が可能と考える。

(1) 電流駆動現状位置の算出

電流駆動位置は

$$\frac{dI_n/dt}{I_n} = \frac{\frac{L_n}{R_n \cos^2(\gamma_n)} \frac{d\gamma_n}{dt} - \frac{L_{n-1}}{R_{n-1} \cos^2(\gamma_{n-1})} \frac{d\gamma_{n-1}}{dt}}{\frac{L_n}{R_n} \tan(\gamma_n) - \frac{L_{n-1}}{R_{n-1}} \tan(\gamma_{n-1})} \sim \frac{\frac{L_n}{R_n} \frac{d\gamma_n}{dt} - \frac{L_{n-1}}{R_{n-1}} \frac{d\gamma_{n-1}}{dt}}{\frac{L_n}{R_n} \gamma_n - \frac{L_{n-1}}{R_{n-1}} \gamma_{n-1}} \quad (3-20)$$

の最大値(正值)を与える場所 n と考えられ、電流駆動位置 ρ_{CD} とする^[8,9]。さらに、少なくとも LH 配位では近似に shaping の効果は重要ではないので、磁気面の周長 L_n は最外殻磁気面周長 L から線形補間できて $L_n = L \rho_n$ となるので、

$$dI_n = (RB_t L / \mu_0) \left(\frac{\rho_n}{R_n \cos^2(\gamma_n)} d\gamma_n - \frac{\rho_{n-1}}{R_{n-1} \cos^2(\gamma_{n-1})} d\gamma_{n-1} \right) \quad (3-21)$$

と簡略化できる。

(2) 電流駆動目標位置 ρ_{CD}^{ref} の算出方法

ρ_{CD}^{ref} は、安全係数分布の現状値と目標値を用いて次のように決める。

考え方はこれまでと同じように、「使用」になっている物理量分布計測チャンネル i の重み付き残差の絶対値 $|w\delta q|$ の最大の位置を求ることとした(図 3.8 参照)。なお δq は、チャンネル i における安全係数現状値と安全係数目標値の差($\delta q = q^{obs} - q^{ref}$)である。

①重み付き最大位置の δq が正の場合、その内側を電流駆動する。該当したチャンネルからチャンネル番号の増える方向(内側)に $w\delta q$ (絶対値をつけてないもの)を調査し、

i) 初めて $w\delta q < 0$ になるチャンネル i と一つ前に調べたチャンネル $i-1$ の間を電流駆動する。

$$\rho_{CD}^{ref} = (\rho[i] + \rho[i-1])/2$$

もし仮に不使用のチャンネルが途中に一つあった場合、

$$\rho_{CD}^{ref} = (\rho[i] + \rho[i-2])/2 \text{とする(以下も同様)。}$$

ii) 内側のチャンネルが無い場合、 $w\delta q$ 最大位置のチャンネルを i として

$$\rho_{CD}^{ref} = \rho[i]/2 \text{とする。}$$

iii) $w\delta q < 0$ になるチャンネルが無い場合、調べたチャン

ネルのうち ρ の最小のものをチャンネル i として、

$$\rho_{CD}^{ref} = \rho[i]/2 \text{とする。}$$

②重み付き最大位置の δq が負の場合、その外側を電流駆動する。該当したチャンネルからチャンネル番号の減る方向(外側)に $w\delta q$ を調査し、

i) 初めて $w\delta q > 0$ になる位置と一つ前に調べたチャンネル $i+1$ の間を電流駆動する。

$$\rho_{CD}^{ref} = (\rho[i] + \rho[i+1])/2$$

ii) 外側のチャンネルが無い場合、 $w\delta q$ 最大位置のチャンネルを i として、

$$\rho_{CD}^{ref} = (1 + \rho[i])/2 \text{とする。}$$

iii) $w\delta q > 0$ になるチャンネルが無い場合、調べたチャンネルのうち ρ の最大のものをチャンネル i として、

$$\rho_{CD}^{ref} = (1 + \rho[i])/2 \text{とする。}$$

③重み付き最大位置の δq が完全にゼロになる(つまり全チャンネルが完全に目標値に達する)ことは無いと

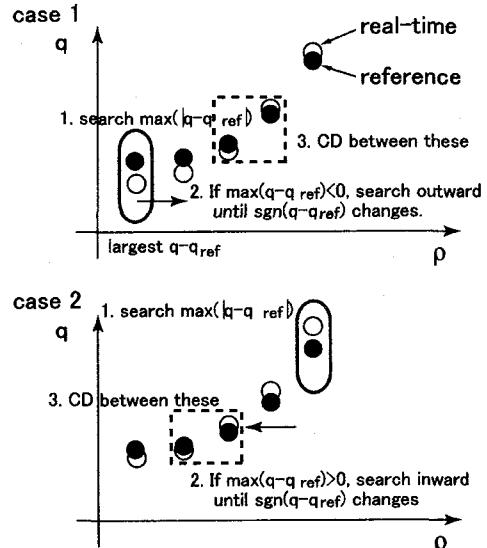


図 3.8 電流駆動目標位置の算出手法概略

想定できるが、その場合は ρ_{CD}^{ref} を前回値維持とする。

遅延制御は従来通り入れておくこととする。すなわち、一度着目した $|w\delta q|$ 最大位置の δq の符号が反転するか、条件入力した制限時間になるまで、 ρ_{CD}^{ref} を変化させない(位相差を変化させないのでない)。 ρ_{CD}^{ref} は変化しなくとも ρ_{CD} は変化するので、位相差は ρ_{CD} を ρ_{CD}^{ref} と一致させるように時々刻々変化する。

(3) 位相指令値の算出

上記のことから位相差 $\Delta\phi$ の変化率を ρ_{CD} と ρ_{CD}^{ref} の差に比例するように制御する。

$$\frac{d}{dt}(\Delta\phi) = -\alpha(\rho_{CD} - \rho_{CD}^{ref}) \quad (3-22)$$

α の単位は [degree/s]である。時間で積分すると、

$$\Delta\phi(t) = -\alpha \int_{t_0}^t (\rho_{CD} - \rho_{CD}^{ref}) dt + \Delta\phi(t_0)$$

$\rho_{CD} < \rho_{CD}^{ref}$ の場合、位相差を増やすので通常 α は正。 $\Delta\phi(t_0)$ は定数で、制御開始($t=t_0$)における目標値を用いる。後述する安全係数最小値(q_{min})制御、安全係数最小位置(ρ_{qmin})制御とほぼ同じである。

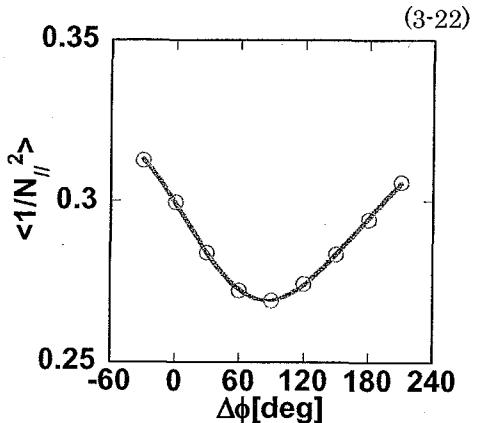
また、演算に使用する係数は放電条件入力画面から設定した値を読み込む。LH システムが受け付ける $\Delta\phi$ は 0° から 360° であるので、位相差を計算して算出した値が負の場合はその値に 360 度足す。その後、 $270^\circ \leq \Delta\phi \leq 360^\circ$ なら $\Delta\phi=0^\circ$ (条件設定値)、 $180^\circ < \Delta\phi < 270^\circ$ なら $\Delta\phi=180^\circ$ (条件設定値)と値を置き換え、実時間制御計算機(IbR)へ転送する。

3.3.4 パワー指令値の計算方法

制御ロジック version 1(2004年9月7日週の実験以前で適用)では、安全分布制御ではパワーはプレプロ値固定してきた。version 2(2004年9月27日週の実験以降から適用)ではこれを変更し、LH 駆動電流を一定にするようにパワーも制御する。

電流駆動効率 $\eta_{CD} \equiv \frac{I_{CD}nR}{P}$ は $\left\langle \frac{1}{N_{||}^2} \right\rangle$ に比例するという報告がある^[11]。駆動電流 I_{CD} を一定にするために、

パワー P を次のように $\left\langle \frac{1}{N_{||}^2} \right\rangle$ に反比例して制御する。



$\langle 1/N_{ }^2 \rangle = m1 + m2 \cos(\Delta\Phi - m3) + m4 \cos(2(\Delta\Phi - m5))$		
	値	エラー
m1	0.29583	0.00024997
m2	0.025525	0.00042991
m3	-85.022	0.45793
m4	0.0023413	0.00025884
m5	-30.337	3.9638
カイ2乗	8.6447e-07	NA

図 3.9 $\langle 1/N_{||}^2 \rangle$ の位相差に対する依存性(上)と最小2乗フィットしたパラメータ(下)

$$P = I_{CD} n R / \left\langle 1/N_{\parallel}^2 \right\rangle \quad (3-23)$$

位相差に対して $\left\langle \frac{1}{N_{\parallel}^2} \right\rangle$ を計算すると図 3.9(上)のようになり、

$\left\langle 1/N_{\parallel}^2 \right\rangle = m_1 + m_2 \cos(\Delta\phi - m_3) + m_4 \cos(2((\Delta\phi - m_5)))$ の関数型でフィットすると、係数は図 3.9(下)の

ようになる。したがって、位相差 $\Delta\phi$ が決まった時、パワーはプレプロ値 P_{pp} を用いて次の式で計算する。

$$P(\Delta\phi) = P_{pp} \frac{m_1 + m_2 \cos(-m_3) + m_4 \cos(-2m_5)}{m_1 + m_2 \cos(\Delta\phi - m_3) + m_4 \cos(2((\Delta\phi - m_5)))} \quad (3-24)$$

P_{pp} は位相差 $\Delta\phi = 0$ の時の値を条件で入力することとする。 $0 < \Delta\phi < 180$ の範囲では最大で 11%程度、プレプロに書いたパワーより大きな値を指令することになる。従って制御中に $P(\Delta\phi)$ が RF 装置の最大入射パワーにならないように P_{pp} は適切にマージンをとって入力する。

3. 3. 5 電流分布変化が微小な場合の例外処理

制御中に電流分布の変化が小さくなり、電流駆動位置の測定限界を越えたときの対応を予め考えておく必要がある。以下の2つのケースの場合には、それぞれ示す制御により、不適当な定常状態に陥ることを防ぐ。

ケース1:「電流分布変化が測定限界以下」、且つ「計測値と指令値が一致」した場合

最新の指令値をホールドしてアクチュエータに出力を継続することとする。

ケース2:「電流分布変化が測定限界以下」、且つ「計測と指令が不一致」

この場合、3. 2. 3で述べたロジックでは駆動位置がわからなくなり、制御が破綻する。従って、駆動位置同定のために、パワーをステップ状に上げて状態をモニターする必要がある。これとは反対に、パワーをステップ状に下げる制御が考えられる。装置の安全性を考慮すると、パワーを下げるよう製作するのが適切である。

3. 4 安全係数最小位置制御と安全係数最小値制御

3. 3節で述べた安全係数分布制御は非常に詳細に目標安全係数分布を指定できる制御であるが、実際の実験ではプラズマの特徴を決めるようなより簡単なパラメータを指定した方が便利な場合がある。特に負磁気シアプラズマではこのような簡単なパラメータが知られており、それは安全係数最小位置、安全係数最小値である。安全係数最小位置は高性能負磁気シアの内部輸送障壁(ITB)の外側位置を制限していることが JT-60 実験で知られている。従って、安全係数最小位置を大きくするような制御により ITB を拡大しプラズマの性能を向上させることができると期待できる。また、安全係数最小値は不安定性の発生と関係しており、 q_{min} が有理数 (1.0, 1.5, 2.0, 2.5...) となる条件では不安定になる。このため、プラズマが不安定にならないように安全係数最小値を制御することが重要になる。以上から、安全係数最小位置制御と安全係数最小値制御の両機能を組み込むこととした。

3. 4. 1 安全係数分布と最小位置・最小値の計算

先に述べたように安全係数分布は次の式により計算する。

$$q = K \frac{r}{R} \tan(\gamma), r = a\rho, K = \sqrt{(1 + \kappa^2)/2} \quad (3-25)$$

κ : 非円形度 (b/a)、 a : プラズマ水平半径、 b : プラズマ垂直半径

安全係数最小値、最小位置はこの空間分布 $q(r)$ を適切な関数で最小2乗法を用いて求める必要がある。高速な計算が要求されるために、自由度 5 程度以下で妥当な関数形を見つける必要がある。解析的に解がもとまるように、2 次関数を利用するようにした。

3. 4. 2 安全係数最小位置制御

安全係数最小位置 (ρ_{qmin}) を大きくするときは、現状値より外側の小半径で電流駆動し、小さくするときは内側の小半径で電流駆動する。式で書き出すと次のようになる。

位相固定でパワーによる制御では

$$\frac{dP}{dt} = -\alpha_1 \operatorname{sgn}(\rho_{CD} - \rho_{qmin}^{ref})(\rho_{qmin} - \rho_{qmin}^{ref}) \quad (3-26)$$

パワー固定で位相による制御では

$$\frac{d\phi}{dt} = -\alpha_2 (\rho_{qmin} - \rho_{qmin}^{ref}) \quad (3-27)$$

α_1 、 α_2 は正の定数である。また、現状のデータベースによると $\Delta\phi$ と電流駆動位置 ρ_{CD} の関係は、

$$\rho_{CD} = 6.194 \times 10^{-3} \Delta\phi - 2.093 \times 10^{-2} \text{ であった。}$$

3. 4. 3 安全係数最小値制御

安全係数最小値 (q_{min}) を下げるときには安全係数最小位置より外側で LH パワーを小さくする／安全係数最小位置より内側で LH パワーを大きくする。安全係数最小値を大きくするときには安全係数最小位置より内側で LH パワーを小さくする／安全係数最小位置より外側で LH パワーを大きくする。

式で書き出すと、

$$\text{位相固定でパワーによる制御では } \frac{dP}{dt} = -\beta_1 \operatorname{sgn}(\rho_{CD} - \rho_{qmin})(q_{min} - q_{min}^{ref}); \beta_1 \text{ は正の定数} \quad (3-28)$$

$$\text{パワー固定で位相による制御では } \frac{d\phi}{dt} = -\beta_2 (q_{min} - q_{min}^{ref}); \beta_2 \text{ は正の定数} \quad (3-29)$$

3. 4. 4 安全係数最小位置・最小値同時制御

例えば、安全係数最小位置と安全係数最小値をパワーと位相差により同時に制御できるかは難しい問題である。現在のところ、未実装である。

4. 実験結果例

開発した実時間安全係数分布制御システムをプラズマ電流 $I_p = 0.6\text{MA}$, トロイダル磁場 $B_t = 2.3\text{T}$ のプラズマに適用した^[5]。線平均電子密度はガス注入量により $n_e = 0.5 \times 10^{19}\text{m}^{-3}$ に制御している。さらに LH 波が安定にプラズマへ入射されるように、プラズマ表面とアンテナ表面のギャップを 10cm に制御している。図 5.1 に周回電圧 VI、入射 LH パワー、LH 波位相差 $\Delta\phi$ の指令値、実績値(および安全係数分布の最大残差とその誤差)を示す。下段には安全係数分布の等高線を示してある。この放電では安全係数分布制御に 9 チャンネルの MSE 信号を使用した。これは規格化小半径で $\rho \sim 0.1\text{-}0.7$ の範囲に対応する。

目標とする安全係数分布は図 4.2 の黒塗り四角形(◆)に示すように $q(0)=1.3$ の正磁気シア分布とした。このような $q=1$ 面の存在しない安全係数分布への制御は、 $q=1$ の磁気面の存在により発生しプラズマの閉じ込めを劣化させる鋸歯状振動不安定性を回避するシナリオに適用可能である。この放電では、プラズマ電流と同方向の低域混成波電流駆動を $t=4\text{s}$ から行い、 $t=4.5\text{s}$ から実時間安全係数分布制御を開始した。LH 波の最大入射パワーは $P_{LH}=1\text{MW}$ 程度である。LH 波以外に MSE 計測用に中性粒子ビーム(NB, #7B)約 1MW を入射し、この接線 NB の作るビーム駆動電流が流す電流を打ち消すように、逆方向の接線 NB(#9B)約 1MW を入射しビーム駆動電流はほとんど流れないようにしている。またこのプラズマは低 β プラズマであるため、自発電流は全プラズマ電流に比べ十分小さい。従ってプラズマ電流は、ほとんど LH 駆動電流と誘導電流により支配されている。また、図 4.1 の P_{LH} の波形からわかるように、LH 波を入射した直後から $t=10\text{s}$ までは LH アンテナ内のアーク検出によるインターロックで入射が殆ど出来なかつたため、LH のパワーは制御システムの要求する 1MW まで入射されなかつた。しかし $t=10\text{s}$ 以降は LH 波のプラズマとの結合が良く、LH 波は安定に入射され周回電圧はほぼ 0V に低下している。図 4.1 の安全係数分布の等高線によると、このフェーズで $q=1$ 面が消滅し、さらに $q=1.25$ 面が

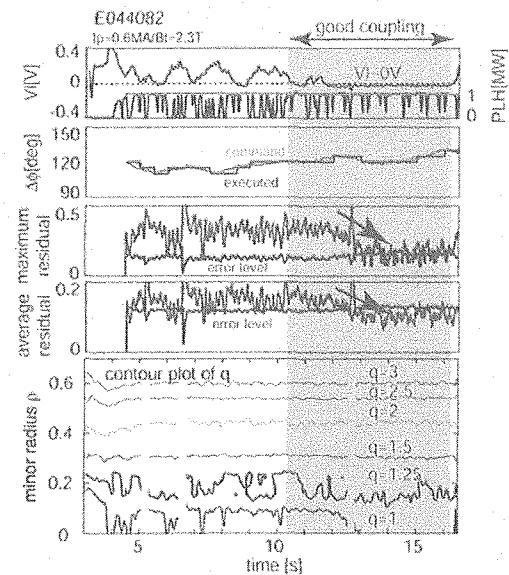


図 4.1 周回電圧(VI)、LH パワー(PLH)、LH 波位相差($\Delta\phi$)、実時間 q と目標 q 分布の間の残差の(最大値と平均値)およびその誤差の時間発展と安全係数分布 $q(\rho, t)$ の等高線。

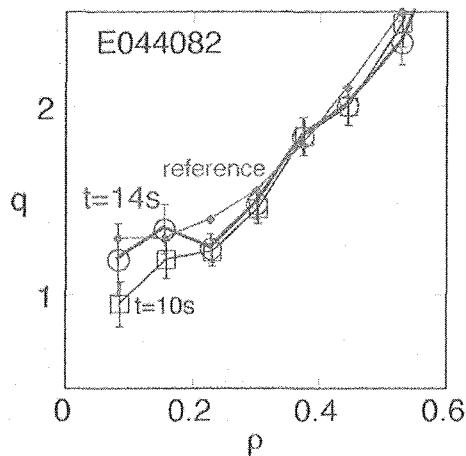


図 4.2 図 4.1 の $t=10\text{s}$ (□)および $t=14\text{s}$ (○)における実時間評価した安全係数分布。◆は目標とする安全係数分布。

縮小(ρ が小さい方に移動)しているのがわかる。図 4.2 には $t=10s$ と $14s$ の安全係数分布を示す。制御により中心部の安全係数は上昇し、目標値に近づいていることがわかる。

また、図 4.1 に示されているように、制御システムは自身で N_{\parallel} (あるいは直接制御可能な $\Delta\phi$) を制御している。残差の最大値 $\max((q(\rho) - q_{ref}(\rho))w(\rho)) \equiv \max(w\delta q)$ は減少し、誤差レベルで 3 秒間($t \sim 13\text{-}16s$)維持されている。本制御は重み付き残差のある時間での最大値($\max(w\delta q)$)が減少することを目標としているが、 q 分布全体が目標分布にどの程度近づいたかを示すために「重み付き2乗平均残差($w\delta q$)」を次で定義し振る舞いを調べた。

$$\langle w\delta q \rangle = \sqrt{\sum_{i=1}^N (w_i(q_i - q_{ref,i}))^2 / \sum_{i=1}^N (w_i)^2} \quad (4-1)$$

総和記号の i は条件入力で「使用」にしたチャンネル数の和を表す。図 4.1 に示すように、 $\max(w\delta q)$ の減少と共に $\langle w\delta q \rangle$ も減少し、 q 分布も全体として目標分布に近づいていくことがわかった。

この放電では、LH パワーの最大値(1MW)は LH アンテナのコンディショニングにより制限されていたが、今後は $q(0)$ をさらに上昇させる実験を行い、 $q=1.5$ あるいは $q=2$ 面を消滅させることにより高 β で起こりえる不安定性(新古典アーリングモード)を回避し、JT-60 プラズマの性能向上を目指す予定である。

ここで、上記実験(図 4.1)の電流分布の変化について議論しよう。図 4.3(a)に制御前($t=4.0s$)と制御中($t=16.0s$)における電流密度分布を示す。MSE 計測を考慮した平衡計算により評価を行った。これによると、制御により $j(\rho < 0.2)$ は減少し $j(\rho = 0.2\text{-}0.6)$ は増加していることがわかる。このときの LH 駆動電流密度分布の理論値を実験での電子温度 T_e 、電子密度 n_e 、安全係数の各分布(図 4.3(c))を使用して計算した。計算には Bonoli と Englade により開発された光線追跡法と Fokker-Planck 計算の結合コードを使用した^[12]。

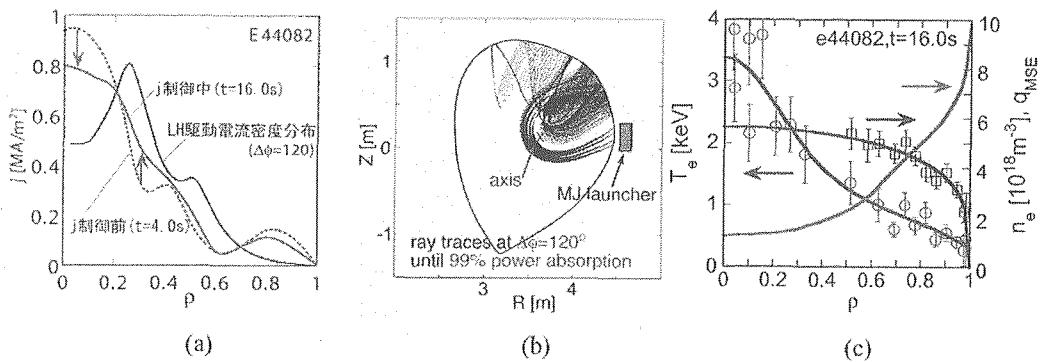


図 4.3 (a) 図 4.1(E44082)における制御前($t=4.0s$)および制御中($t=16.0s$)における全電流密度分布
Bonoli コードにより評価した LH 駆動電流密度分布、(b) 99% のパワーが吸収されるまでの LH 波の光線
の軌跡($\Delta\phi=120^\circ$)、(c) 計算に使用した T_e , n_e , q の各分布($t=16.0s$)

これまで JT-60において実験で求めた LH 駆動電流密度分布と本コードにより求めた理論値が良く合致することが報告されている^[6]。ここでの計算ではアンテナ垂直位置 Z の異なる 4 力所からそれぞれ 21 本の N_{\parallel} の異なる光線(計 84 本)を入射した。各光線のもつパワーは図 4.4 に示すスペクトルを持つように与えた。図

4.3(b)に LH 波位相差 120 度における各光線のパワーが 99% 減衰するまでの光線の軌跡を示す。LH 波の吸収は十分強かつた。計算された LH 駆動電流密度分布 $j_{\text{LH}}(r)$ を図 4.3(a)に示す。同図に示してある全電流密度分布 $j(r)$ と $j_{\text{LH}}(r)$ を比較すると、 $j(r)$ は j_{LH} が j より小さな場所で減少し、大きな場所で増加している。先に述べたように自発電流とビーム駆動電流は小さいので、計算した LH 駆動電流密度分布は全電流密度分布 $j(r)$ の時間発展と矛盾しないことが分かる。

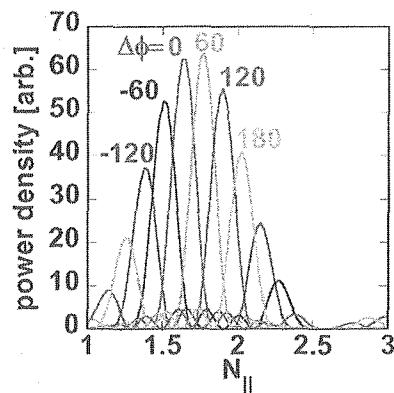


図 4.4 様々な $\Delta\phi$ での LH 波のパワー密度スペクトル

5. 物理量分布制御放電条件設定のための GUI 機能

物理量分布制御用マンマシンシステム開発のポイントは、本来、「3次元(場所(r, z)・制御量)の時系列データ」である物理量分布目標値プレプログラムをどのように設定するかである。

既存のプレプログラムは「1次元時系列データ」であり、物理量分布目標値プレプログラムをこれと同様に取り扱えることが望ましいので、これを考慮して設定機能を設計した。

ハードウェアとしては、設定する条件の容量は膨大になり、設定に要する時間も長くなることが想定できることから、

専用の条件作成ワークステーション(図 5.1)を新設し、GUI(Graphical User Interface)システムを構築することとした。

本章では、物理量分布制御用放電条件(物理量分布目標値プレプログラムを含む)の設定・格納・参照、及び実時間電流分布制御システム(j-PC)への放電条件転送の各機能の詳細について述べる。

5. 1 物理量分布制御用放電条件

(1) 設定条件項目

物理量分布制御用放電条件には、以下に示す 4 種類の放電条件がある。

①アルゴリズム番号プレプログラム、②分布プレプロ制御基準、③参照分布プレプロ No.、④物理量分布目標値プレプログラム。これら 4 種類の放電条件は、実時間物理量分布制御を実行する上で必要不可欠な条件であり、それぞれが相互に関連している。図 5.2 は、これら4種類の放電条件の関係を実際の放電条件設定画面を用いて示したものである。なお、以降ではこれら4つの放電条件について詳細に解説する。また、その他の物理量分布制御用放電条件の情報については「付録 2 物理量分布放電条件」を参照のこと。

①アルゴリズム番号プレプログラム

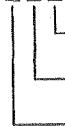
アルゴリズム番号とは、j-PC に格納されている制御ロジック1つずつに割り当てられた番号である。条件設定者は、その放電で使用する制御ロジック、即ち「アルゴリズム番号」とそのアルゴリズム番号を使用する「時間帯」を予め設定しなければならない(これをプレプログラムと言う。図 5.2 の上段から2番目の図を参照)。

物理量分布制御では、制御対象となる物理量分布(電流分布、安全係数分布、磁束分布)をどのアクチュエータ(LH、PNB、NNB)を用いて制御するかにより、それぞれ固有のアルゴリズムが割り当てられており、その番号は設定画面内のテーブルに表示されている(図 5.2 の上段から2番目の図および図 5.11 参照)。今回、これらのアルゴリズム(異なるゲインテーブルの場合も含む)はアクチュエータ毎に最大5つまで設定できる仕組みとした。また、アルゴリズム番号から即座に設定内容が判別できるよう、アルゴリズム番号を 3 枝として、各枝の示す内容を以下のように定義した。



図 5.1 条件設定専用 WS

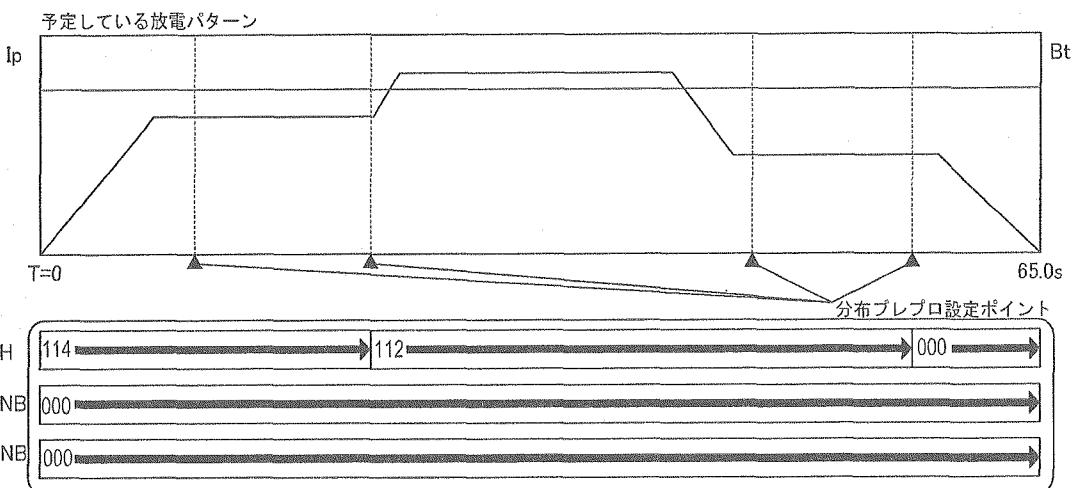
アルゴリズム番号:# 110



アルゴリズム・ゲインテーブル No.(0~4:No.1~5)

制御目標物理量分布(1:j, 2:q, 3:ψ)

対象アクチュエータ(1:LH, 2:PNB, 3:NNB)



①アルゴリズム番号プレプログラム

	加熱方式	電流分布 : j	安全係数分布 : q	磁束分布 : ψ
選択可能な アルゴリズム番号	LH	#110, #111, #112, #113, #114	#120, #121, #122, #123, #124	#130, #131, #132, #133, #134
	PNB	#210, #211, #212, #213, #214	#220, #221, #222, #223, #224	#230, #231, #232, #233, #234
	NNB	#310, #311, #312, #313, #314	#320, #321, #322, #323, #324	#330, #331, #332, #333, #334

アルゴリズム番号は、制御対象分布量(j, q, ψ)と使用する加熱装置(LH, PNB, NNB)から任意の番号を選択

各アルゴリズムが制御中に参照する分布量目標値プレプログラム(No. 1/No. 2)を
「③参照分布プレプロNo.」で選択

④分布量目標値プレプログラム

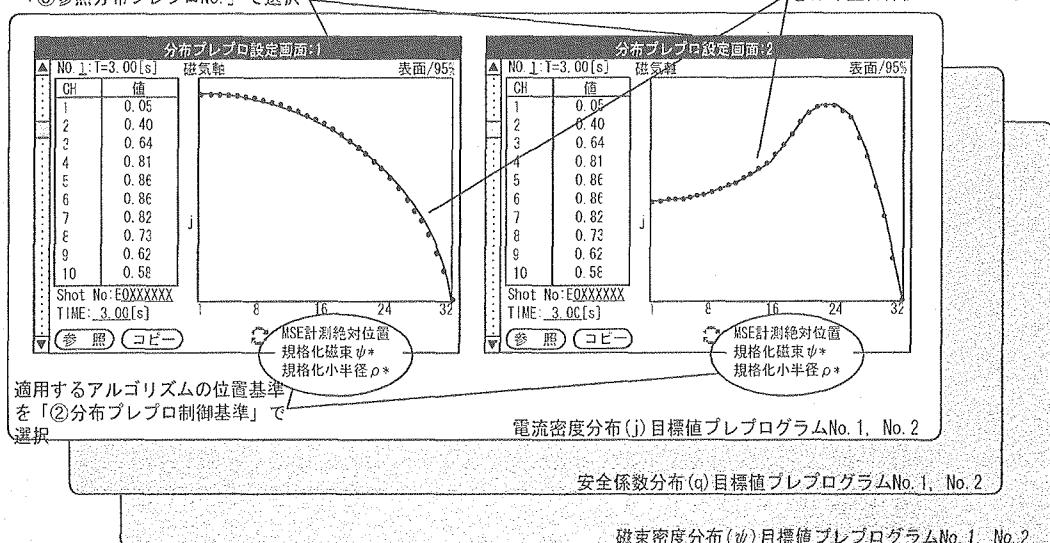


図 5.2 物理量分布固有の放電条件の関連付け

②分布プレプロ制御基準

各々の制御アルゴリズムは、MSE 計測器から入力する物理量分布計測信号(ピッチ角)と物理量分布プレプロ値を用いて演算を実行する。物理量分布は場所と時間の関数であるが、計測点の場所を固定すると残るは時間だけの関数とみなせる。即ち、入力点の場所の次元を2次元(R,Z)から1次元(分布プレプロ制御基準)にすることでデータ量の削減を図った。なお、この1次元の変数は次の3種類を設定した。

1) MSE 計測点基準(MSE)

計16個の MSE 計測器の取付け位置

2) 規格化小半径基準(ρ^*)

プラズマ最外殻磁気面の小半径 r で規格化した時のプラズマ中心からプラズマ最外殻磁気面までの任意の32点

3) 規格化磁束基準(ϕ^*)

プラズマ最外殻磁気面の磁束値 ϕ で規格化した時のプラズマ中心からプラズマ最外殻磁気面までの任意の32点

従って、j-PC で演算される各制御アルゴリズムは、選択された座標(位置)基準に応じた各点の物理量分布現状値を算出する必要があるため、分布目標値プレプログラムがどの位置基準を基に作成されたか予め知つておく必要がある。

そこで、以下にその放電条件を示す。なお、今回の物理量分布制御 GUI では、放電中に同一分布制御を異なる位置基準を用いて実験可能とするため、各物理量分布目標値プレプログラムを 2 つ別々に作成できるように配慮した。従って、位置基準もそれぞれ個別に設定する必要がある。

条件 No.	条件 名	選 択 範 囲
M427-428	電流分布PP制御1、2(位置基準)	MSE/ ρ^*/ϕ^*
M429-430	安全係数分布 PP 制御1、2(位置基準)	MSE/ ρ^*/ϕ^*
M431-432	磁束分布 PP 制御1、2(位置基準)	MSE/ ρ^*/ϕ^*

・参照分布プレプロ No.

物理量分布目標値プレプログラムは制御対象物理量分布毎に 2 種類の制御アルゴリズムを設定出来る為、各アルゴリズムが演算中に参照するプレプログラムは No.1 と No.2、どちらかを設定するための条件が必要である。

これらの条件は、FB 制御パラメータ設定画面のアルゴリズム番号(例:#110)を押下した際に表示される制御ゲインパラメータ設定画面内に配置されている(図 5.11 参照)。

条件 No.	条件 名	選 択 範 囲
V001-015	#110-134 参照分布プレプロ No.	No. 1/No. 2
V016-030	#210-234 参照分布プレプロ No.	No. 1/No. 2
V031-045	#310-334 参照分布プレプロ No.	No. 1/No. 2

・物理量分布目標値プレプログラム

物理量分布は「空間(r,z)と物理量」から成り、物理量分布目標値プレプロは「空間(r,z)と物理量」の時系列データから成る。本放電条件設定では、物理量分布目標値プレプロを1次元時系列データの集合体とみなす

ことで、既存のプレプログラム設定機能を流用して物理量分布目標値のプレプログラム設定を可能とした。物理量分布目標値プレプログラムは各制御対象物理量分布につき 2 種類設定が出来る。

(2) 条件ファイル

① 条件ファイル構造

条件ファイルの構造は、図 5.3、5.4 に示す。設定する各条件のデータ容量は以下に示すとおり。

・放電条件データ

約 2600 点 × float 型 (4byte) = 10,400byte (Max:21,124byte * アキ:1540 点 (float 型))

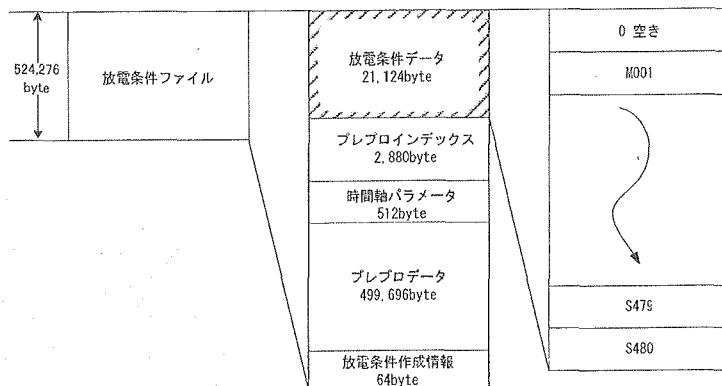


図 5.3 電流分布帰還制御条件ファイル構造(放電条件データ)

・プレプロデータ

約 300 点 × プレプロ 1 点当たりのデータ (1,388byte) = 416,400byte (Max:485,800byte * アキ:50 点)

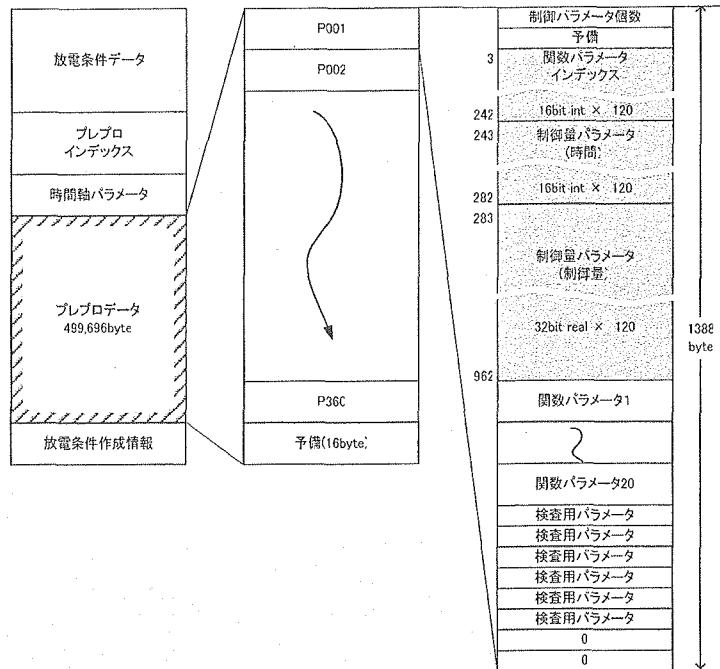


図 5.4 電流分布帰還制御条件ファイル構造(プレプロデータ)

②条件ファイル名称

条件ファイルは、条件作成専用 WS のハードディスク内のディレクトリ(未実行条件ファイル用／実行済条件ファイル用)に任意のファイル名称(MSE0000～9999 または E0XXXXX)で保存され、以降、この名称で取り扱いが可能となる。

5.2 放電条件設定方法

物理量分布放電条件の設定は、大きく①物理量分布目標値プレプロの設定、②実時間物理量分布制御に関する条件の設定、の2つのグループに分けられる。そして、これらの設定すべき放電条件が全て完了した時点で、放電条件の保存や転送が可能となる。

1) 物理量分布目標値プレプロの設定

物理量分布制御用放電条件設定画面のメイン画面の例を図 5.5 に示す。

物理量分布目標値を設定するにはまず、「GS シーケンス開始時期(ポロイダル磁場コイル電源の停止、即ちプラズマ放電制御完了時期)」と「トロイダル磁場」そして、「分布プレプロ設定点」を設定する。分布プレプロ設定点とは、ここで設定した時刻値が分布目標値プレプロを設定する時刻ポイントとなる(図 5.5 の右上部参照)。これら時刻ポイントの間は、関数内挿(直線)を行う。

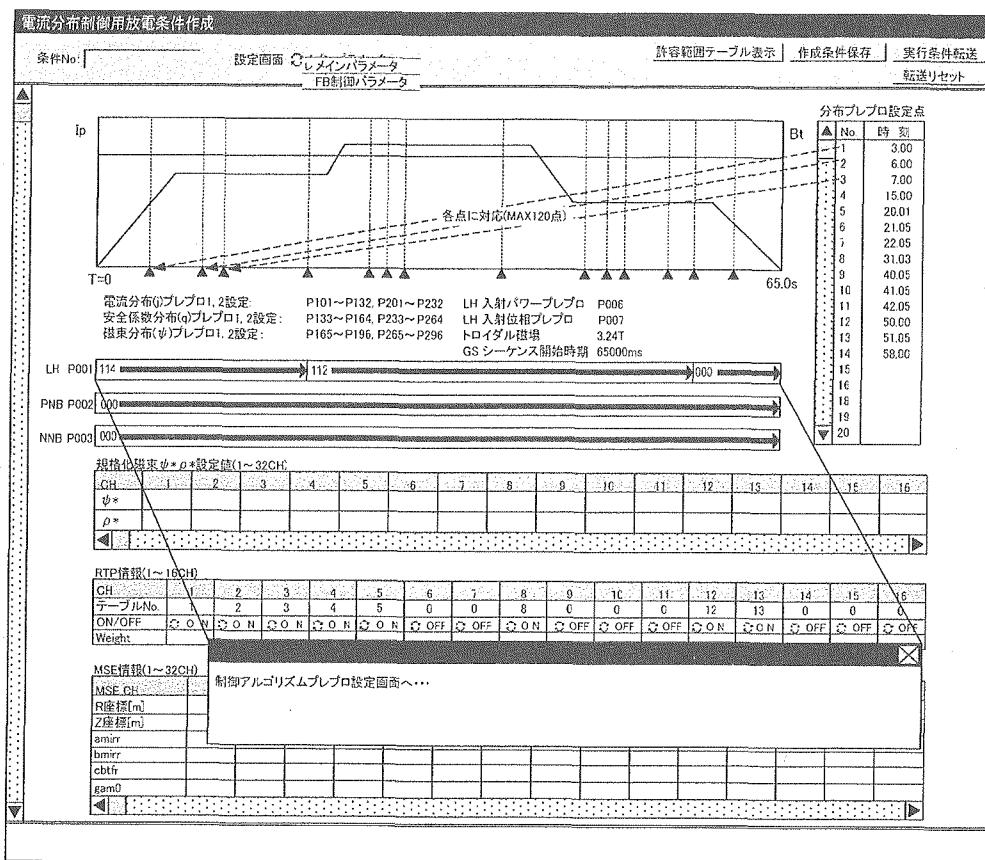


図 5.5 電流分布制御用放電条件設定(メインパラメータ)画面例

次に、設定する物理量分布に該当するプレプロ番号(電流分布プレプロであるなら P101～132、P201～232)を選択して、分布プレプロ設定画面に移行する(図 5.6)。

分布プレプロ設定画面は、「電流分布:j」、「安全係数:q」、「磁束分布: ϕ 」の3つの制御目標分布に対して各2枚の設定画面を用意しており(図 5.6 (1/2) 参照)、選択された物理量分布(この場合、電流分布)に該当する設定画面が表示される。

物理量分布プレプロ設定画面では、まず「MSE 計測点基準」、「規格化磁束 ϕ^* 基準」、「規格化小半径 ρ^* 基準」の3つの位置基準から1つを選択する。各々の物理量分布プレプロ設定画面では、位置基準を個別に選択可能であるが、1つの分布プレプロ設定画面中で位置基準を時刻に応じて変更することは出来ない。

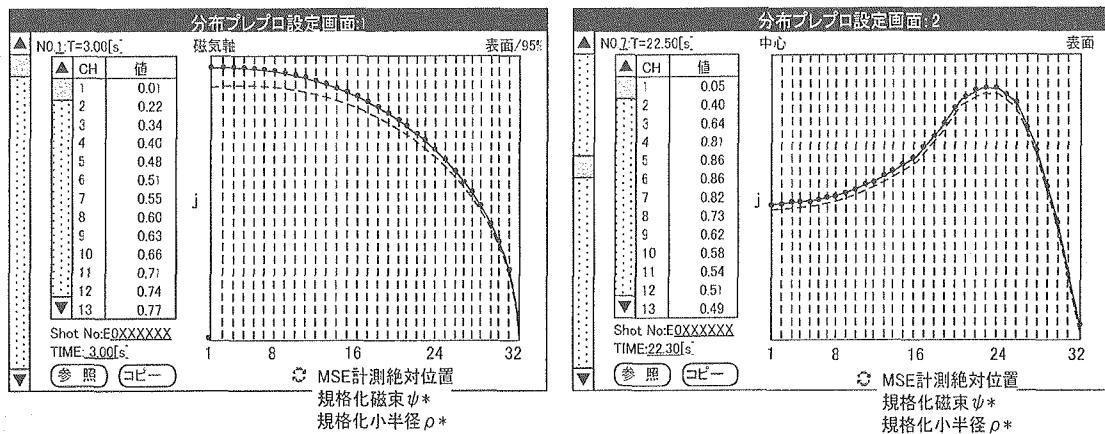


図 5.6 分布プレプロ設定画面 (1/2)

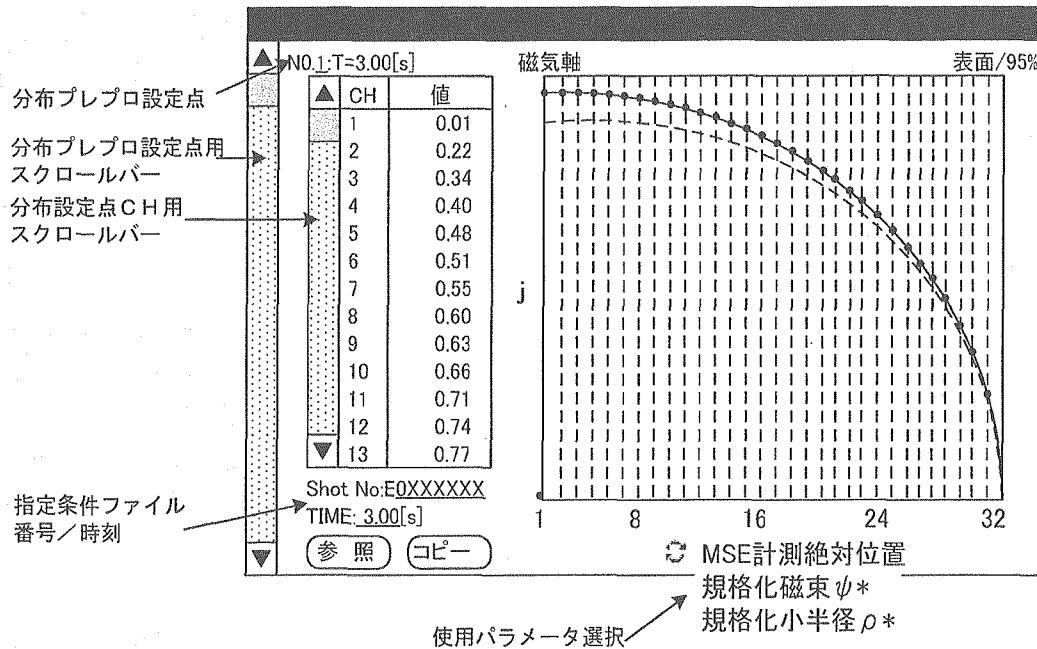


図 5.6 分布プレプロ設定画面 (2/2)

分布プレプロ設定では、「メインパラメータ」画面(図 5.5)の「分布プレプロ設定点」で設定された時刻に該当する設定画面が表示され、設定点で設定した数だけ必ず設定する必要がある。その最大点数は 120 点である。

また、分布プレプロ設定点の最大数は 32 点(図 5.6 中、グラフの横軸)である。分布プレプロは、この点1つに対して1つを対応させている(例:電流分布用 ch No.1～No.32=P101～P132)。ここでは、次ぎに述べる工夫が施されている。

なお、登録済み放電条件ファイル(MSEF0000～9999)からは、ファイル名称および該当する分布プレプロ設定点時刻を指定すれば分布プレプロの「参照」及び「コピー」が可能である。

分布プレプロ設定機能における工夫

既存の時系列データ設定機能は1次元時系列データ(時間と制御量が1対1対応)をサポートしており、分布プレプロは3次元(位置(r, z)・制御量)時系列データであることから、そのままでは使用出来ない。

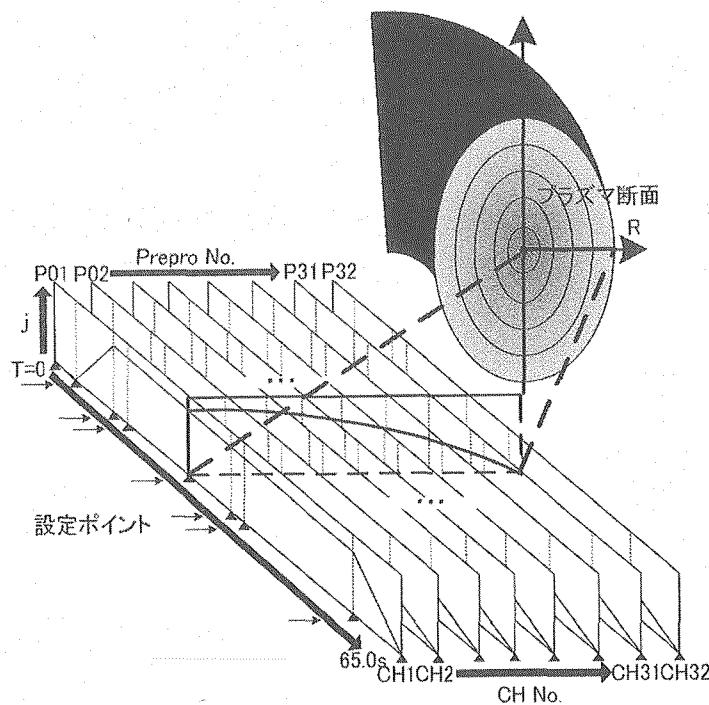
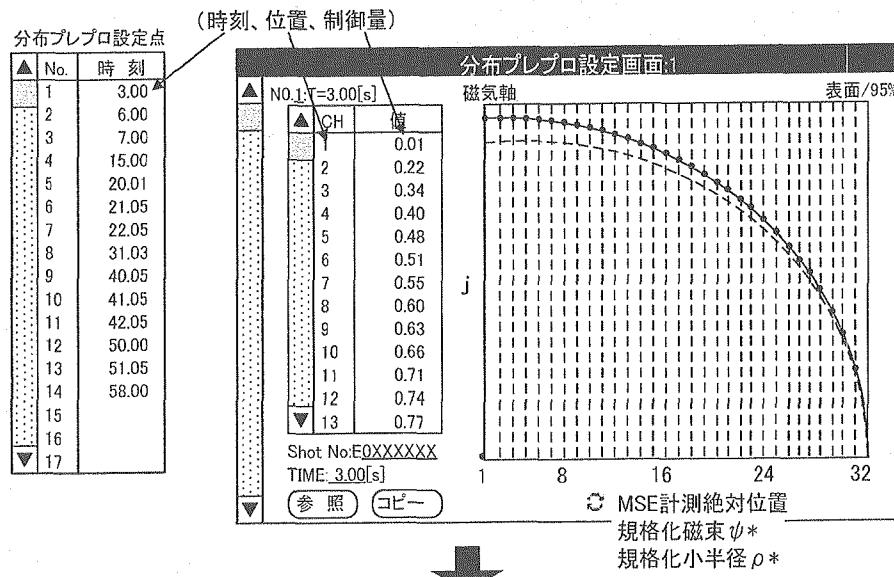
そのため、既存の放電条件設定機能を流用することで3次元(位置(r, z)・制御量)時系列データを1次元時系列データと同様に取り扱えるよう、以下の2つの点を工夫した。

<工夫1:位置を規格化量に変更する>

座標位置(r, z)に対して、プラズマの内部実空間と対応して磁気軸を中心とした規格化小半径パラメータを適用する事が可能であることを利用して、「位置(ch)、制御量(その位置での電流密度)」として扱うことで1次元減らし、容量・設定画面の合理化を図った。

<工夫2:規格化した位置を固定する>

工夫1で規格化した位置(1～32ch)を固定することで、各位置での制御量(電流密度)の時刻変化を設定する(既存の1次元時系列データと同様の設定)ことが出来、既存のデータ構造や機能を利用する事を可能とした。即ち、本機能では1つの分布プレプロを「空間上の 32箇所の1次元時系列データの集合」としてみなすこととした(図 5.7 参照)。



2) 実時間物理量分布制御に関する条件の設定

・パラメータ情報の設定

実時間制御に関する放電条件の設定は、設備の「使用/不使用」や設備(MSE)情報など、パラメータ情報の設定から始まる(図 5.8 参照)。もし、今回の制御が「MSE 計測点基準」なら、「RTP 情報(1~16ch)」の設定

欄に値を入力する。「MSE 情報(1~32ch)」の設定欄は、RTP や j-PC が制御で使用するパラメータを必要に応じて入力しなければならない。もし、物理量分布制御の位置基準が「規格化小半径基準」の場合は、これらの設定に加えて、該当する「 ρ^* 設定値(1~32ch)」の設定欄にも値を入力する。

規格化磁束 ψ^* ρ^* 設定値 1~16CH															
CH	1	2	17~32CH	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ψ^*															
ρ^*															

MSE情報 1~16CH															
MSE.CH	17~32CH	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RTP.CH															
使用/不使用	<input checked="" type="checkbox"/> 使用	<input type="checkbox"/> 不使用	<input type="checkbox"/> 使用	<input type="checkbox"/> 使用	<input type="checkbox"/> 不使用	<input type="checkbox"/> 使用									
R座標[m]															
Z座標[m]															
amirr															
bmirr															
cbtfr															

図 5.8 放電条件設定画面例(メインパラメータ画面)

・目標値プレプロの設定

制御アクチュエータである LH に対して、目標値プレプロの設定を行う。図 5.5 中の「LH 入射パワープレプロ(P006)」、「LH 入射位相プレプロ(P007)」を選択すると、図 5.9 に示す目標値プレプロ設定画面が現れる。この他の目標値プレプロとしては、LH をアクチュエータとする「安全係数分布最小目標値(P004)」、「安全係数最小位置目標値(P005)」が該当する。これら2つは安全係数分布最小値制御、最小位置制御を実行する際には設定が必要となる。

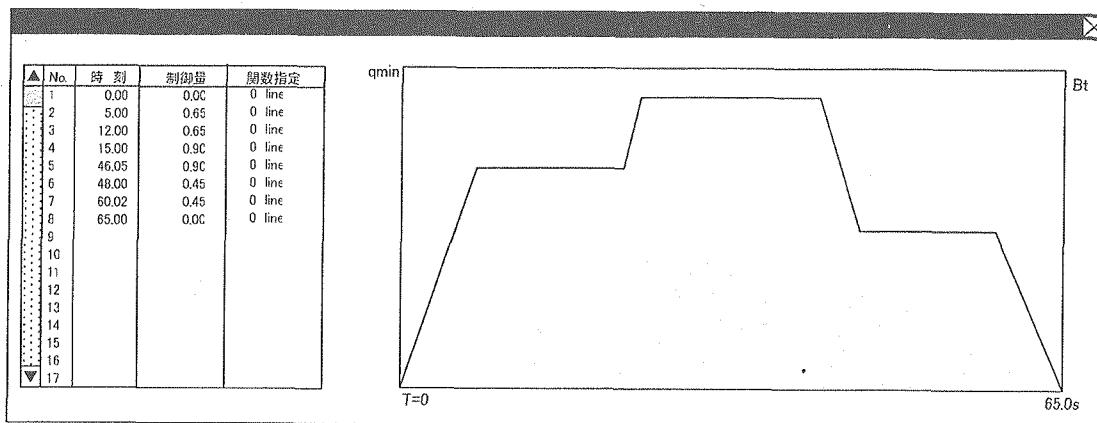


図 5.9 目標値プレプロ設定画面

・アルゴリズム番号プレプロの設定

放電で行われる物理量分布制御のロジックを決定するのは、アルゴリズム番号プレプロである。アルゴリズム番号プレプロは、図 5.5 中に表示される3つのアクチュエータ LH(P001)、PNB(P002)、NNB(P003)の何れかを選択することで図 5.10 に示す画面が表示される。図 5.10 の中で時間軸にプロットされる▲印は、分布プロが設定されている時刻(図 5.5 の右上部参照)を示している。

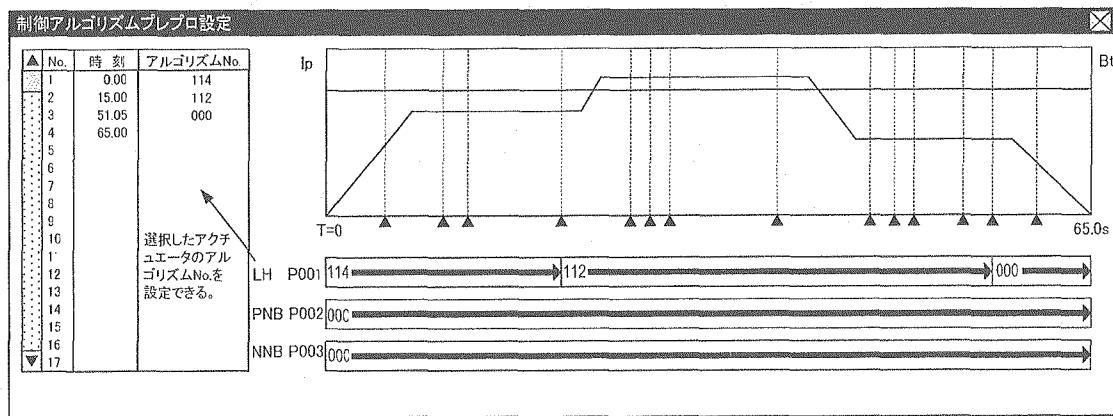


図 5.10 アルゴリズム番号プレプロ設定画面

・フィードバック制御パラメータの設定

フィードバック制御に関するパラメータは、第 5.11 図に示す専用の設定画面で設定する。

テーブル内に表示されているアルゴリズム番号の文字列(例:#110)を選択すると「制御ゲイン設定ウィンドウ」が表示され、各ゲインの設定および、本アルゴリズムが参照すべき「参照分布プレプロ No.」の選択ができる。

本ウィンドウは、実績のある放電条件ファイルから該当するアルゴリズム番号の定数テーブルをコピーする機能を有し、本機能を用いることによって一括で定数テーブルを設定することも可能である。

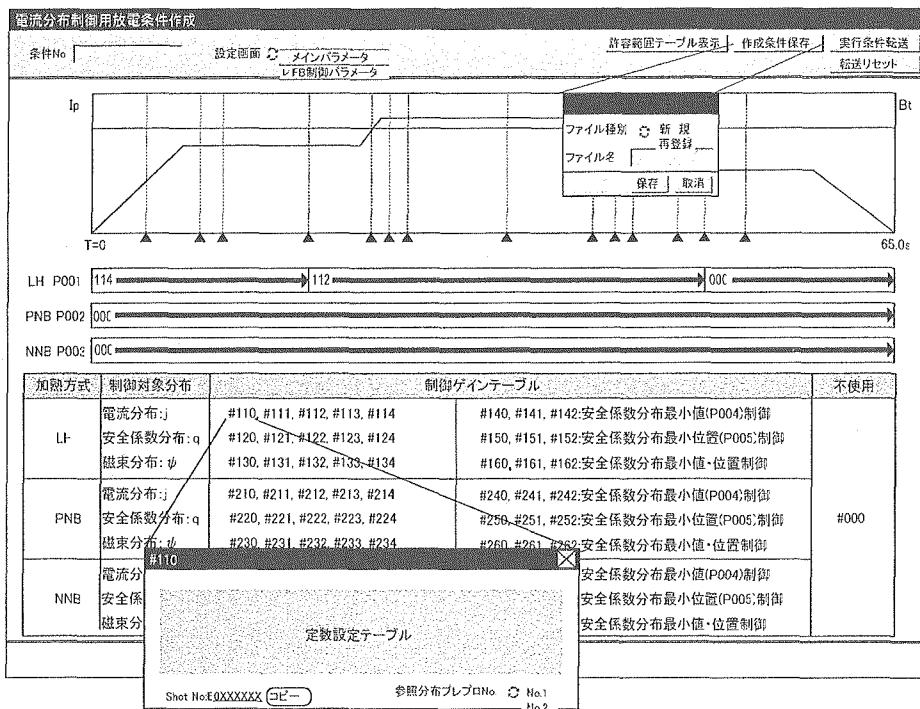


図 5.11 放電条件設定画面(FB制御パラメータ画面)

5.3 合理性検査

電流分布制御用放電条件の設定は、設定が複雑である上に、他のパラメータとの整合の取れた関係も重要であり、放電条件作成上の制約や注意点などが数多く存在する。一方、放電条件設定者がこれらを全て把握し、実行することは非常に困難であるため、合理性検査機能を設けて放電条件作成に関わる設定者の負担軽減を図った。合理性検査を実行するタイミングは、放電条件の保存または転送時である。

表 5.1 はその合理性検査項目の一例である。MSEで計測する局所ピッチ角の対応点(CH1～32)を物理量分布制御に使用するため、RTP の CH 選択との対応を正確にとる必要がある。

表 5.1 合理性検査項目の例

No	検査項目	検査内容
G001	RTP 使用 CH の検査	「MSE CH1-32 使用／不使用(M065-096)」において「使用」を選択する場合には、「MSE CH1-32 用 RTP CH-No.(M033-064)」で該当する CH の値が入力されていなければならない。

5.4 放電条件保存

放電条件設定機能で作成した条件ファイルは「作成条件保存」ボタン押下で別ウインドウが表示され、そのウインドウ上で操作で保存処理が実行される(図 5.12 参照)。

別ウインドウでは、ファイル種別「新規／再登録」の選択項目があり、「保存」ボタン押下で該当する保存場所へ条件ファイルを保存する。なお、「取消」ボタン押下時は、保存処理を実行せずに別ウインドウをクローズする。

ファイル名を入力する欄は、新規／再登録の場合、自動的に該当するファイル名が表示、保存される。

①新規の場合:「MSE0000～MSE9999」の範囲で自動的に最新のファイル名が表示、保存される。

②再登録の場合:表示しているファイル名「MSEXXXX」が表示、保存される。

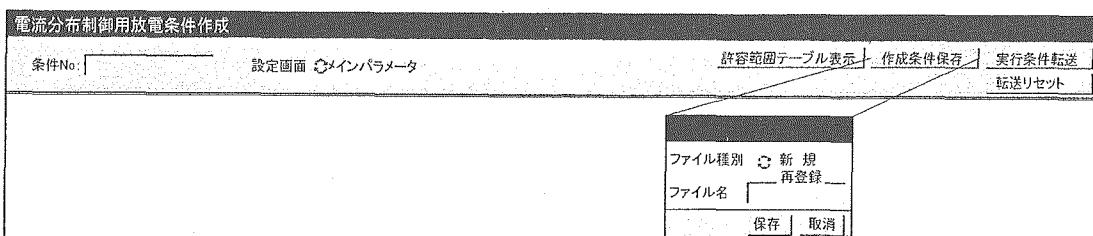


図 5.12 放電条件保存方式イメージ図

5.5 実行条件転送

j-PC に放電条件を転送するには、「実行条件転送」ボタン(図 5.12 中の右上参照)を押下すると、画面に表

示されている「条件 No.」に該当する放電条件ファイルが「実行条件ファイルフォーマット」へと変換され、「実行条件ファイル」が作成されたことを j-PC へ通知する(実行条件ファイル準備完了フラグをオン)。「転送リセット」ボタンは、「実行条件ファイル準備完了フラグ」をオフにするものである。

5. 6 結果データ表示

電流分布制御の実験結果をデータベースから呼び出し、表示する手法は2つある。

①全系DB結果データ表示機能

②電流分布制御専用結果データ表示機能

である。

①は、既存全系マンマシン機能の表示機能であり、1次元時系列データのグラフ表示ツールである。物理量分布結果データであっても、同様な表示形式であれば表示することが可能である。

②は、電流分布制御専用に新たに開発した表示機能であり、分布制御に特化した表示機能で構成されている。

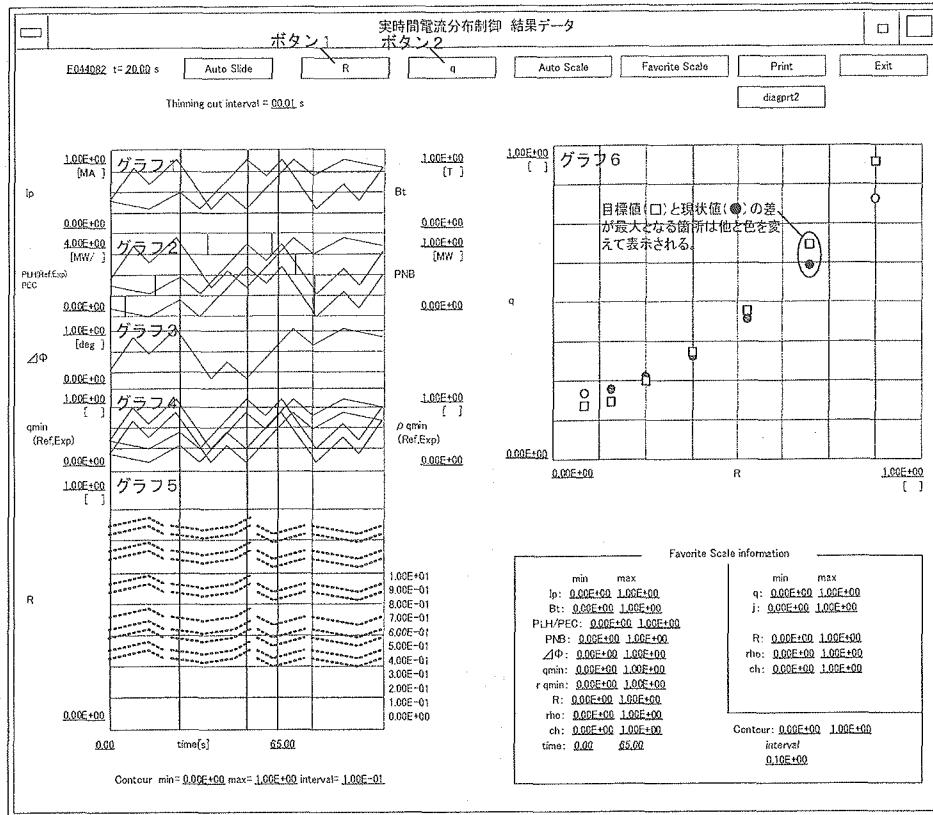


図 5.13 電流分布帰還制御結果データ表示画面

表示されるグラフは図 5.13 に示す6個のグラフで構成される。それぞれのグラフで表示している結果データは以下の通り。

グラフ1: プラズマ電流、トロイダル磁場

全系DBから該当する放電番号の結果データを取得し、プラズマ電流(I_p)・トロイダル磁場(B_t)の実績値を同一画面に表示する(固定)。

グラフ2:LH(指令値・実績値)、P-NBI(全入射パワー)、ECH(全入射パワー)

全系DBから該当する放電番号の結果データを取得し、LH-A系のパワー指令値と実績値、ECHの全入射パワー実績値、P-NBI全入射パワーの実績値、計4本を同一画面に表示する(固定)。

グラフ3:LH位相差指令値

全系DBから該当する放電番号の結果データを取得し、LH-A系の位相差指令値を画面に表示する(固定)。

グラフ4: 安全係数最小値 q_{min} (目標値・実績値)、安全係数最小位置 ρ_{min} (目標値・実績値)

全系DBから該当する放電番号の結果データを取得し、安全係数最小値指令値と実績値、安全係数最小位置目標値と実績値の計4本を同一画面に表示する(固定)。

グラフ5: 物理量分布等高線表示(安全係数 q 、電流密度 j の分布)

表示したい物理量分布(q/j)を選択する(図 5.13 中「ボタン2」と、

①選択された放電番号

②位置基準(計測点水平位置(R)、規格化計測点水平位置(rho)、MSE チャンネル番号(ch)、図 4.13 中「ボタン1」で選択)

③RTP チャンネル使用番号(物理量分布放電条件)

から、該当する物理量分布結果データ(実績値)を取得し、RTP チャンネル使用番号の最小値と最大値に該当する範囲で物理量分布のスプライン補間を実行する。その後、その結果と表示機能で設定されている等高線表示定義パラメータ(等高線の上下限値、等高線間隔)に従って、物理量分布データを画面に表示する。

グラフ6: 任意の時刻の安全係数、電流密度分布(目標値・実績値)

表示したい物理量分布(q/j)を選択する(図 5.13 中ボタン2)と、

①選択された放電番号

②選択された時刻

③位置基準(計測点水平位置(R)、規格化計測点水平位置(rho)、MSE チャンネル番号(ch)、図 5.13 中「ボタン1」で選択)

④RTP チャンネル使用番号(物理量分布放電条件)

から、該当する物理量分布結果データ(目標値・実績値)を取得し、RTP チャンネル使用番号の最小値と最大値に該当する範囲で選択された任意の時刻のデータを同一画面にプロットする。

6. 物理量分布データベース

物理量分布制御を実行した際に得られる「物理量分布制御放電条件」および「実時間物理量分布結果データ」(両者を総称して「物理量分布データベース」と称す)は、当初、新設した条件設定専用 WS のディスクに格納・蓄積されており、全系結果データデータベース(以降「全系 DB」)とは個別に運用・管理されてきた。しかし、これらの資源はデータの保守・運用等の面を考えると、本来全系 DB の一部として管理されるべきデータである。そこで、これまで条件設定専用 WS に蓄積してきた物理量分布結果データおよび放電条件ファイルを全系 DB サーバーにデータフォーマットを統一して移植するとともに、今後実験で得られる結果データは、格納先を全系 DB サーバーに変更し、今後実験DBとして保守・管理していくこととした(図 6.1 参照)。

なお、新たに結果データとして追加される物理量分布制御放電条件は、全系 DB 内では既存放電条件と区別して取り扱うこととし、それに必要な結果データ取得プログラムの対応も同時に講じる。

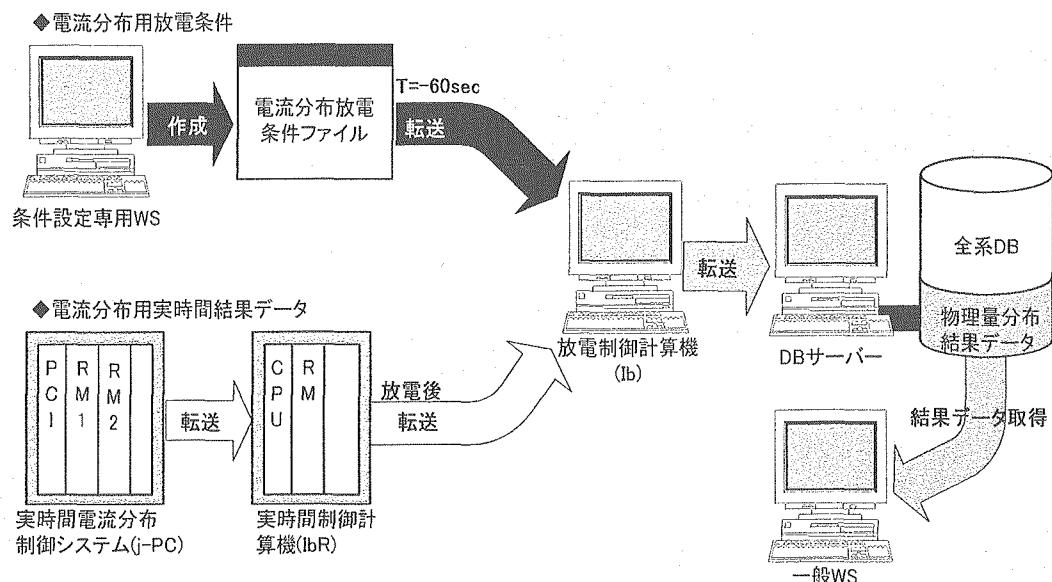


図 6.1 改新された物理量分布結果データ転送の流れ

(1)全系 DB 結果データの取得

全系 DB から特定の結果データを取得するには、ユーザー側のプログラムで「全系 DB ハンドリングパッケージ」の指定した関数を呼び出すと、それに応じて DB サーバーで「全系DBローカルアクセスルーチン」が起動し、全系DBから該当するデータを読み出す仕組みとなっている(図 6.2 参照)。

「全系 DB ハンドリングパッケージ」と「全系DBローカルアクセスルーチン」は、実時間物理量分布結果データを IbR のデータとして取り扱う為、改造の必要はない。しかし、放電条件(プレプロ以外)に関しては、既存放電条件と物理量分布放電条件を区別する為の機能の追加が必要である。

以下に改造対象となるプログラムを示す。尚、プログラムフローチャートに関しては「付録 4 改造対象全系 DB データ取得プログラムフローチャート一覧」を参照のこと。

①全系 DB ローカルアクセスルーチン

・放電条件(プレプロ以外)取得関数(shtcdt_func)

取得するデータの格納先が物理量分布放電条件ディレクトリ「CONDJ」か既存放電条件ディレクトリ「COND」か判定できるように修正する。判定方法は PID の「大分類 小分類」が”QZ”で「設備番号」が”1626”的場合は、物理量分布制御用ディレクトリ「CONDJ/QZ」、それ以外は既存ディレクトリ「COND/XXX」と判定する。

・プレプロ取得(prprdlt_func)

取得するデータの格納先が物理量分布放電条件ディレクトリ「CONDJ」か既存放電条件ディレクトリ「COND」か判定できるよう修正する。判定方法は PID の「大分類 小分類」が”RP”で「設備番号」が”1626”的場合は、物理量分布制御用ディレクトリ「CONDJ/RP1626」、それ以外は既存ディレクトリ「COND/RP1622」と判定する。

・指定 PID 生データ取得(pidchr)、指定 PID 更新(update)

取得するデータが放電条件(プレプロ以外)またはプレプロの場合、データの格納先が物理量分布放電条件ディレクトリ「CONDJ」か既存放電条件ディレクトリ「COND」か判定できるよう修正する。判定方法は、上記 shtcdt_func、prprdlt_func の項を参照のこと。

②全系 DB ハンドリングパッケージ

全系 DB ハンドリングパッケージでは、プレプロ取得に関する関数(prprdlt:プレプロ取得関数、nssrpg:プレプロ展開関数)にのみ以下の理由から修正が必要となる。

既存放電条件のプレプロには、

- 1) 制御量プレプロ
- 2) アルゴリズム番号プレプロ

の2種類があり、これらのプレプロは全部で 120 点(P001～P120)存在する。このうちアルゴリズム番号プレプロは 12 点(P025～P029、P110～P116)が該当する。

既存プレプロ展開処理(nssrpg)中の両者の判定は、「信号種別:P」と「一貫番号:001～120」から区別され、制御量プレプロに該当する一貫番号(上記 12 点以外)のデータは、設定された波形パラメータに応じて、直線 / 矩形波 / sin 波 / 三角波の展開処理が行われる。アルゴリズム番号プレプロに該当する(上記 12 点)データは、波形パラメータを直線とし、アルゴリズム番号専用の展開処理が行われる。

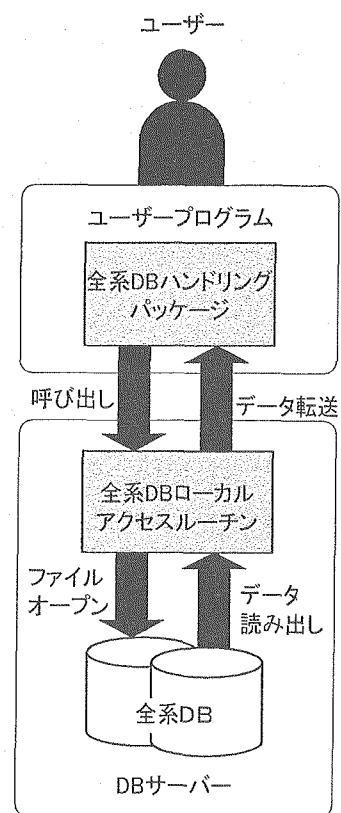


図 6.2 全系 DB 結果データ取得フロー

今回新たに扱う物理量分布放電条件のプレプロは、上記2種類のプレプロの他に、

3) 物理量分布プレプロ(32PIDで1つのプレプロを表す)

が新たに追加される。

物理量分布放電条件のプレプロは全部で 296 点(P001～P296)存在し、このうちアルゴリズム番号プレプロは 3 点(P001～P003)、物理量分布プレプロは 196 点(P100～P296)が該当する。

従って今後 prprd() では、取得するプレプロがどちらの放電条件の何のプレプロデータなのか判定して展開処理を実行しなければならない。それには、以下の3つの問題についてそれぞれ対策を講じる必要がある(図 6.3、6.4 参照)。

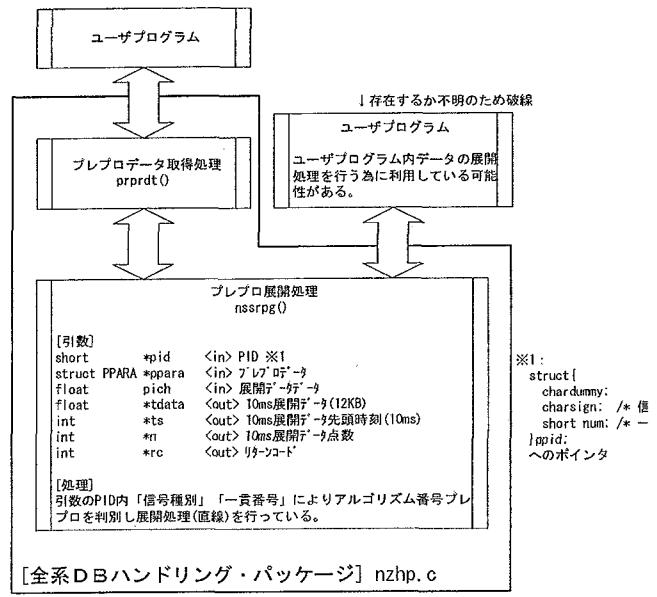


図 6.3 改造前:全系 DB ハンドリング・パッケージ構造

問題1: 物理量分布放電条件は既存放電条件と同じ構造を持つため、各々の格納ディレクトリ内の構造は同一であり、プレプロに関しても同一の「信号種別:P」と「一貫番号:001～296」が使用される。従って、prprd() 内で呼ばれる nssrpg() では「信号種別」と「一貫番号」のみを引数として判別処理を実行している為、既存放電条件と物理量分布放電条件を区別することが出来ない。

対策1: nssrpg() で実施していたプレプロ種別判定処理を prprd() に移行し、prprd() 内で物理量分布放電条件のプレプロ全 296 点のうちアルゴリズム番号プレプロ 3 点、既存放電条件プレプロ全 120 点のうちアルゴリズム番号プレプロ 12 点をそれぞれ区別できるように判別機能を追加する。その判別手法は「展開方式フラグ(アルゴリズム番号プレプロか? 否か?)」とする。nssrpg() では、既存のプレプロ種別判定処理を削除し、代わって展開方式フラグの判定結果を元に該当する展開処理を実行するよう改造する。なお、「展開方式フラグ」の値は、アルゴリズム番号プレプロの場合は 0、それ以外のプレプロの場合を 1 とする。

問題2: nssrpg() は prprd() に限らず、データの展開処理を実施する為に、他の関数やプログラムでも利用されている可能性がある。従って、一方的に nssrpg() のインターフェースを改造してしまうと、これを利用しているユーザーのプログラムに支障を来たす恐れがある。

対策2: 上記対策にて nssrpg() のインターフェースが変更になる為、これまで nssrpg() を prprd() 以外で利用していたプログラムとの整合性を取る為に、nssrpg() とユーザープログラムとの間に新たにインターフェース機能を設けた。このインターフェース機能は、ユーザープログラム側に何の修正も起こらないように、名称を nssrpg() とした。これに伴い、既存 nssrpg() (対策 1 で述べた nssrpg()) は tnssrpg() と名称を変更した。

問題3:prprdlt は複数のプレプロデータを一括して扱える取得関数でないため、物理量分布プレプロ(32PID で1セット)には対応していない。

対策3:物理量分布プレプロデータを一括して取得するには、本来であれば prprdlt に代わる専用の取得関数を必要とする。しかし、物理量分布プレプロを1PID 每に取得する場合には prprdlt でも利用可能であるため、新規に関数を開発するのではなく、prprdlt を必要な PID 数分繰り返して使用してデータを取得することとした。

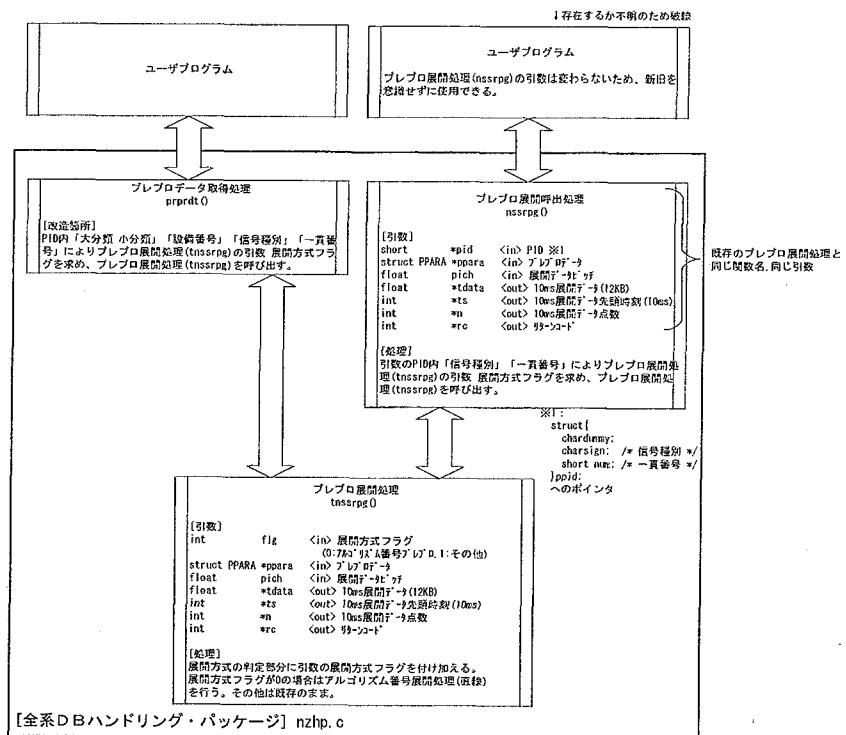


図 6.4 改造後:全系 DB ハンドリング・パッケージ構造

7. まとめと今後の課題

高性能トカマクプラズマを安定に維持するためには、プラズマ電流分布の実時間フィードバック制御を行うことが不可欠との認識が一般的となりつつある。その分布の時間変化という特殊な被制御パラメータを考えた時、どのような形で条件を与えるのか、既存のシステムとどのように整合をとるか、といった問題設定の下で、新たな条件設定用 GUI、及び実時間制御システムの開発、物理量分布データベースの開発を行った。

物理量分布制御放電条件設定のGUI機能は、物理量分布の表現形式に規格化量を導入することなどで次元を減らし、3次元時系列データを複数の1次元時系列データとして設定するという工夫をはじめ、本文で述べた画面設計の試行錯誤を経て、2004年1月より実験への供用を開始し、2004年10月にはフィードバック制御実験としての結果を得る段階まで到達した。

また、実時間物理量分布帰還制御に関しては、まず実時間制御を実現する為にプラズマの平衡を解かなくても安全係数分布を評価できる新しい手法を開発した。これにより、実時間で安全係数の分布を算出することが可能となり、予め設定しておく安全係数分布の目標値の差の絶対値を小さくするという論理式制御アルゴリズムを用いて(実際にはアクチュエータとなる LH 波の入射位相差を制御することで電流駆動位置を変化させる)安全係数分布の目標値との差が最小になるよう逐次制御を行う。制御アルゴリズムは、version 1 ではデータベース化された電流駆動位置と LH 波位相差の関係から LH 波の入射位相差を決定していたが、version 2 では電流駆動位置を実時間で同定するように改良した。さらに、負磁気シアプラズマを特徴づける安全係数最小値・安全係数最小位置を実時間で算出する分布から同定し、それらを制御するためのアルゴリズムも実装した。

実験では、MSE 計測信号を用いた実時間安全係数分布評価と LHCD による電流駆動位置制御による実時間安全係数分布制御を世界で初めて実現した。また、今回開発した MSE 計測点信号を利用した近似法での安全係数物理量分布の算出結果は、平衡計算結果の値と良く一致し、その妥当性が示された。このように、今回開発した安全係数分布の実時間評価は高精度であることから、この実時間評価を利用することで有理面($m/n=2/1, 3/2$)位置を同定することができる。JT-60 での研究で、EC 波を不安定性発生以前に有理面位置へ入射することで、不安定性発生後に入射するよりも低い ECRF パワーで効率的に不安定性を抑制できることが知られている^[13,14]。従来は有理面位置を実時間で同定することができなかつたが、本システムを用いることで ECRF 早期入射による NTM 抑制のための入射角指令値を与えることができ、高性能プラズマの維持に貢献できる可能性がある。現在検討を進めているところである。また、現時点では LHRF のみを制御対象機器としているが、将来的には複数の加熱装置(NBI 加熱装置や ECRF 加熱装置)も制御操作対象として追加し、プラズマ高性能化に向けて開発を進めていく。

今後は、分布制御システムの運用を通じて本 GUI の性能を評価し、放電条件作成の効率向上を目的とした支援機能(ツール)を充実させ、更なる機能向上を目指す予定である。さらにこの GUI 手法は、他の物理量分布制御(電流密度分布、磁束密度分布、電子密度分布、温度分布、他)にも利用できる汎用性を持っており、今後の先進的な実験に対応する重要な基礎の一つが形成されたと考えられる。

謝 辞

本制御機能の設計・製作に際し、適切な助言をしていただいたトカマク放電システム開発グループリーダー 栗原 研一氏、トカマク実験グループリーダー 鎌田 裕氏にお礼申し上げます。さらに、本報告書を纏めるに当たり、御支援頂いたトカマクシステム技術開発開発ユニット長 栗山正明氏、同研究主席 細金 延幸氏、先進プラズマ研究ユニット長 二宮 博正氏、同研究主席 菊池 満氏にお礼申し上げます。

参考文献

- [1] Kurihara, K., Fusion Eng. Dec., 51-52, 1049(2000)
- [2] Kurihara, K. et al., Fusion Tech. 34, 548 (1998).
- [3] 細山博己、他、平成 15 年度 高エネルギー加速研究機構 技術研究会報告集(CD)、Index No. P-017(2004)
- [4] 末岡通治、他、平成 16 年度 大阪大学総合技術研究会報告集(CD)、Index No. P3-03(2005)
- [5] Suzuki, T. et al., Proceeding of 20th IAEA Fusion Energy Conference (Vilamoura) IAEA-CN-116/EX/1-3 (2004); submitted to Nucl. Fusion.
- [6] Naito, O. et al., Phys. Rev. Lett. 89, 065001 (2002).
- [7] Fujita, T. et al., Fusion Eng. Des. 34-35, 289 (1997).
- [8] Suzuki, T. et al., Nucl. Fusion 44, 699 (2004)
- [9] Suzuki, T. et al., J. Plasma Fusion Res. 80, 362 (2004).
- [10] Seki, M. et al., Fusion Sci. Tech. 42, 452 (2002).
- [11] Ushigusa, K. et al., Fusion Sci. Tech. 42, 255 (2002).
- [12] Bonoli, P. T. and Englade, R. C., Phys. Fluids 29, 2937 (1986).
- [13] Isayama, A. and the JT-60 Team, Phys. Plasmas 12, 056117 (2005).
- [14] Nagasaki, K. et al., Nucl. Fusion 43, L7 (2003).
- [15] 鈴木隆博、杉江達夫、「加熱中性粒子ビームを利用した核融合プラズマ計測」プラズマ・核融合学会誌 78 (2002)411.

付録1 実時間物理量分布制御用結果データ(PID)一覧

付録 1.1 表 物理量分布制御結果データ一覧(時系列)

PID No.	名称	単位	DATA 点数	備考
EF1623JA001～032	MSE 偏光角 Ch1～32	degree	6501	
EF1623JA033～064	安全係数目標値 Ch1～32 MSE 基準		6501	
EF1623JA065～096	電流密度目標値 Ch1～32 MSE 基準	MA/m2	6501	
EF1623JA097～128	安全係数目標値 Ch1～32 ρ *基準		6501	
EF1623JA129～160	電流密度目標値 Ch1～32 ρ *基準	MA/m2	6501	
EF1623JA161	安全係数最小値目標値		6501	
EF1623JA162	安全係数最小位置目標値		6501	
EF1623JA163	電流駆動位置目標値		6501	
EF1623JI001～032	安全係数現状値 Ch1～32 MSE 基準		6501	
EF1623JI033～064	電流密度現状値 Ch1～32 MSE 基準	MA/m2	6501	
EF1623JI065～096	安全係数現状値 Ch1～32 ρ *基準		6501	
EF1623JI097～128	電流密度現状値 Ch1～32 ρ *基準	MA/m2	6501	
EF1623JI129～160	規格化小半径現状値 Ch1～32		6501	
EF1623JI161	安全係数最小値現状値		6501	
EF1623JI162	安全係数最小位置現状値		6501	
EF1623JI163	電流駆動位置現状値		6501	
EF1623JI164	LH 制御アルゴリズムプレプロ実績値		6501	
EF1623JI165	NBI 制御アルゴリズムプレプロ実績値		6501	
EF1623JI166	ECH 制御アルゴリズムプレプロ実績値		6501	
EF1623JE001	LH-A 入射パワー指令値	kW	6501	
EF1623JE002	LH-C 入射パワー指令値	kW	6501	
EF1623JE003	LH-A 入射位相指令値	degree	6501	
EF1623JE004	LH-C 入射位相指令値	degree	6501	
EF1623JE005	NBI Gr.1 ユニット数指令値	ユニット	6501	
EF1623JE006	NBI Gr.2 ユニット数指令値	ユニット	6501	
EF1623JE007	NBI Gr.3 ユニット数指令値	ユニット	6501	
EF1623JE008	NBI Gr.4 ユニット数指令値	ユニット	6501	
EF1623JE009	NBI Gr.5 ユニット数指令値	ユニット	6501	
EF1623JE010	NBI Gr.6 ユニット数指令値	ユニット	6501	
EF1623JE011	NBI Gr.7 ユニット数指令値	ユニット	6501	
EF1623JE012	ECH Gr.1 ユニット数指令値	ユニット	6501	
EF1623JE013	ECH Gr.2 ユニット数指令値	ユニット	6501	
EF1623JE014	ECH Gr.3 ユニット数指令値	ユニット	6501	
EF1623JE015	ECH Gr.4 ユニット数指令値	ユニット	6501	
EF1623JE016	ECH #1-3 可動鏡指令値	degree	6501	
EF1623JE017	ECH #4P 可動鏡指令値	degree	6501	

付録 2 物理量分布放電条件(PID)一覧

付録 2.1 表 物理量分布放電条件一覧(プレプロ以外)

PID No.	条件名称	定格範囲	備考
QZ1626JM001～032	規格化磁束 ϕ^* 設定 CH1-32	$\leq \phi^*_{1-32} \leq$	
QZ1626JM033～064	規格化小半径 ρ^* 設定 CH1-32	$\leq \rho^*_{1-32} \leq$	
QZ1626JM065～080	RTP テーブル No. CH1-16	$1 \leq \text{indg}_{\text{CH1-32}} \leq 30$	
QZ1626JM081～096	RTP CH1-16 不使用／使用	0/1	
QZ1626JM097～112	RTP Weight CH1-16	$0 \leq W_{\text{CH1-32}} \leq 1.0$	
QZ1626JM113～144	MSE CH1-32 R 座標	$0.0 \leq R_{\text{CH1}} \leq 4.5$	[m]
QZ1626JM145～176	MSE CH1-32 Z 座標	$-2.0 \leq Z_{\text{CH1}} \leq 2.0$	[m]
QZ1626JM177～208	MSE CH1-32 amirr	$0.0 \leq a_{\text{CH1}} \leq 2.0$	
QZ1626JM209～240	MSE CH1-32 bmirr	$-10.0 \leq b_{\text{CH1}} \leq 10.0$	[deg]
QZ1626JM241～272	MSE CH1-32 cbtfr	$-10.0 \leq c_{\text{CH1}} \leq 10.0$	[deg/T]
QZ1626JM273～304	MSE CH1-32 gam0	$-90.0 \leq g_{\text{CH1}} \leq 90.0$	[deg]
QZ1626JM305	トロイダル磁場	$0.45 \leq B_t \leq 4.05$	[T]
QZ1626JM306	GS シーケンス開始時期	$0 \leq T \leq 65000$	[ms]
QZ1626JM307～426	分布プレプロ設定点 1-120	$0 \leq T_{p1-120} \leq 65000$	[ms]
QZ1626JM427	電流分布 PP 制御基準 1	MSE/ ϕ^*/ρ^*	
QZ1626JM428	電流分布 PP 制御基準 2	MSE/ ϕ^*/ρ^*	
QZ1626JM429	安全係数分布 PP 制御基準 1	MSE/ ϕ^*/ρ^*	
QZ1626JM430	安全係数分布 PP 制御基準 2	MSE/ ϕ^*/ρ^*	
QZ1626JM431	磁束分布 PP 制御基準 1	MSE/ ρ^*	
QZ1626JM432	磁束分布 PP 制御基準 2	MSE/ ρ^*	
QZ1626JZ001～960	#110-134 演算係数 P01-64	$\leq \leq$	
QZ1626JX001～960	#210-234 演算係数 P01-64	$\leq \leq$	
QZ1626JY001～960	#310-334 演算係数 P01-64	$\leq \leq$	
QZ1626JW001～144	#140-162 演算係数 P01-16	$\leq \leq$	
QZ1626JW145～288	#240-262 演算係数 P01-16	$\leq \leq$	
QZ1626JW289～432	#340-362 演算係数 P01-16	$\leq \leq$	
QZ1626JV001～015	#110-134 参照分布プレプロ No.	No.1/No.2	
QZ1626JV016～030	#210-234 参照分布プレプロ No.	No.1/No.2	
QZ1626JV031～045	#310-334 参照分布プレプロ No.	No.1/No.2	
QZ1626JS001	LH 入射パワープレプロ許容範囲	$0.0 \leq P_{\text{LH}} \leq 8.0e3$	[kW]

付録 2.2 表 物理量分布放電条件プレプロ一覧

PID No.	条件名称	定格範囲	備考
RP1626JP001	LH アルゴリズム番号プレプロ	$0 \leq AL_{\text{LH}} \leq 360$	
RP1626JP002	PNB アルゴリズム番号プレプロ	$0 \leq AL_{\text{PNB}} \leq 360$	
RP1626JP003	NNB アルゴリズム番号プレプロ	$0 \leq AL_{\text{NNB}} \leq 360$	
RP1626JP004	安全係数分布最小目標値	$0 \leq q_{\min} \leq 100$	
RP1626JP005	安全係数分布最小位置目標値	$0 \leq P_{\min} \leq 1$	
RP1626JP006	LH 入射パワープレプロ	$0.0 \leq P_{\text{LH}} \leq 1.12e4$	[kW]: S001
RP1626JP007	LH 入射位相プレプロ	$0 \leq \phi_{\text{LH}} \leq 360$	
RP1626JP101～132	電流分布 j1(1)～(32)	$0 \leq j_{1-32} \leq 10$	
RP1626JP133～164	安全係数 q1(1)～(32)	$0 \leq q_{1-32} \leq 100$	
RP1626JP165～196	磁束分布 ϕ 1(1)～(32)	$0 \leq \phi_{1-32} \leq 1$	
RP1626JP201～232	電流分布 j2(1)～(32)	$0 \leq j_{2-32} \leq 10$	
RP1626JP233～264	安全係数 q2(1)～(32)	$0 \leq q_{2-32} \leq 100$	
RP1626JP265～296	磁束分布 ϕ 2(1)～(32)	$0 \leq \phi_{2-32} \leq 1$	

付録3 物理量分布結果データの全系DB内での取扱いについて

①蓄積済み物理量分布結果データの移植

これまで蓄積してきた実時間結果データおよび物理量分布放電条件は、新規に割り当てられた PID 番号として登録し(別添2「物理量分布放電条件(PID)一覧」参照)全系 DB フォーマットに変換した後、全系 DB サーバーへ移植する。

②実時間結果データ転送先の変更

今後取得する実時間結果データは、IbR の結果データの一部として取り扱うこととする。従って、j-PC は、まず IbR へ取得した結果データを転送する。IbR は自身の設備番号である「EF1623」を j-PC から受信したデータに割り付け、既存のルートで Ib を経由して、全系 DB サーバーへ転送する。なお、全系 DB 内で今後 IbR と j-PC の結果データを区別する為に、j-PC の結果データに対しては装置区分として「J」を割り付ける(図6-2、別添1「実時間物理量分布制御用結果データ(PID)一覧」参照)。

下記に PID の「大分類、小分類」、「設備番号」、「装置区分」、「信号種別」を示す。

付録 3.1 表 追加 PID 番号

	大分類 小分類	設備番号	装置区分	信号種別
放電結果 時系列データ	EF	1623	J	A / I / E
放電条件	QZ	1626	J	M / Z / X / Y / W / V / S
プレプロ	RP	1626	J	P

PID フォーマット : EF 1626 J A 001

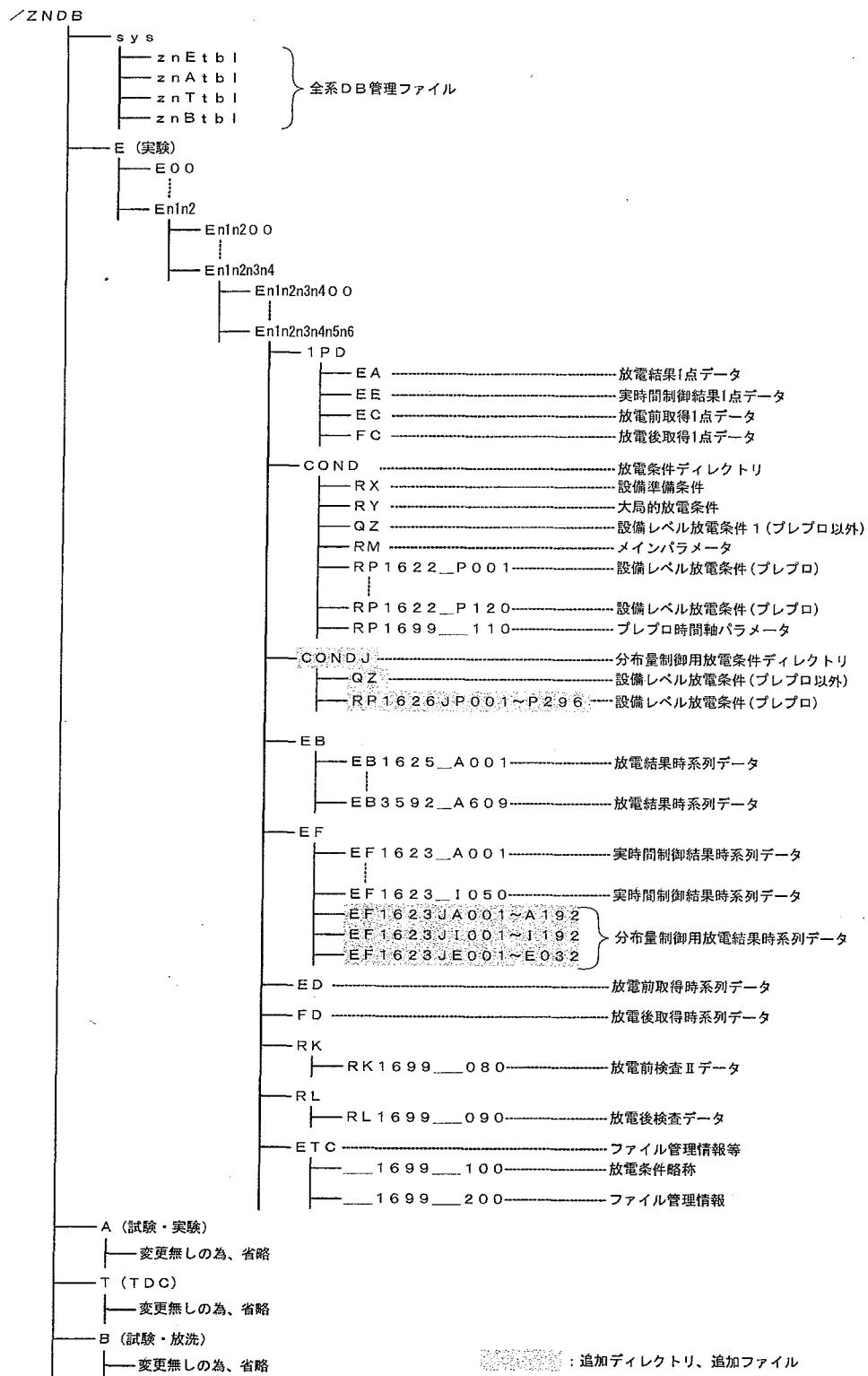


③物理量分布放電条件転送先の変更

物理量分布放電条件ファイルについても、放電条件設定専用 WS から Ib を経由して全系 DB サーバーへ転送される。全系DBサーバーでは、全系DBの放電条件格納ディレクトリ(COND)と同じ階層に物理量分布放電条件ファイル格納ディレクトリ(CONDJ)を新設して区別する。但し、ディレクトリ内の構造は全て COND と同一とする(付録 3.1 図参照)。

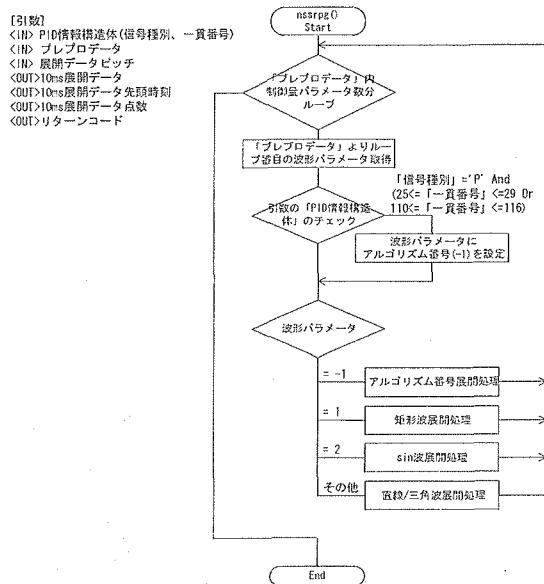
④物理量分布放電条件プレプロ

これまで既存放電条件は全て Ib のデータとして扱われ、それ以外の放電条件は存在しない。従って、今回追加される物理量分布放電条件は、Ib 以外の初の放電条件であるため、新たに設備番号「1626」を割り当ることとする。なお、装置区分は実時間結果データと同様に、物理量分布という意味で「J」を割り付ける(付録 3.1 図、付録 2.2 表参照)。

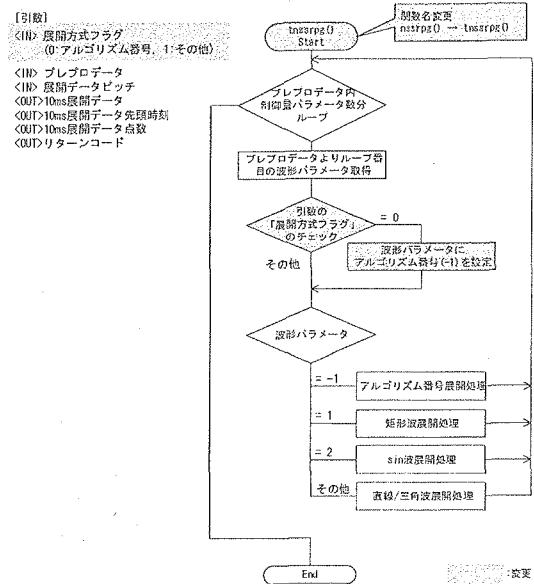


付録 3.1 図 全系DBファイルディレクトリ構成

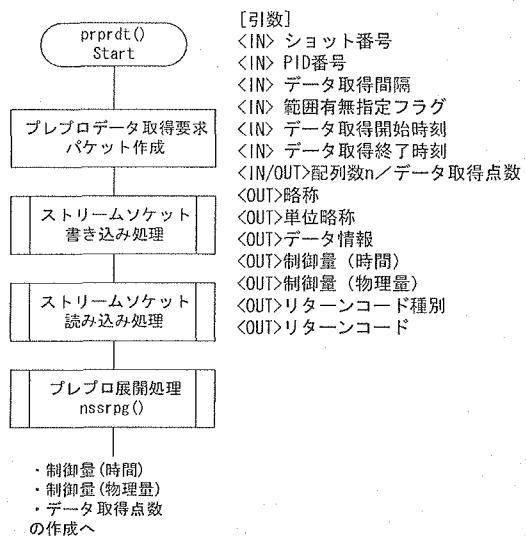
付録4 改造対象全系DBデータ取得プログラムフローチャート一覧



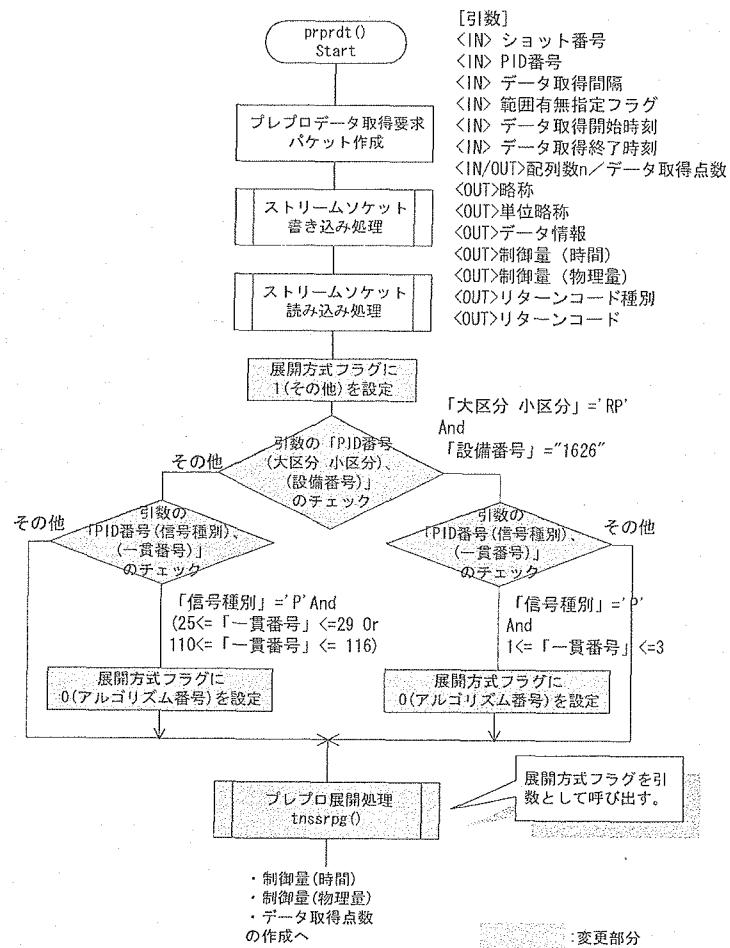
付録4.1図 改造前 プレプロ展開処理
(nssrpg)フロー



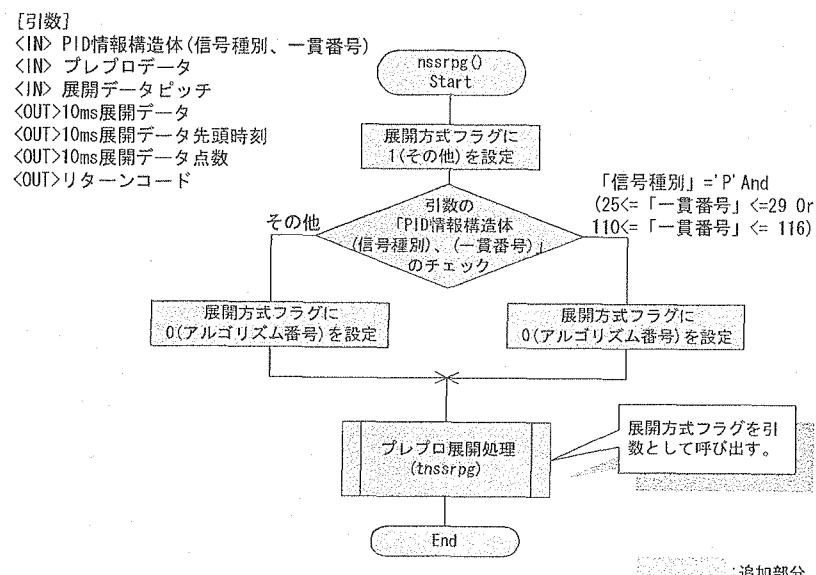
付録4.2図 改造後プレプロ展開処理
(tnssrpg)フロー



付録4.3図 改造前 プレプロ取得処理(prprd0)フロー



付録 4.4 図 改造後 プレプロ取得処理(prprd0)フロー



付録 4.5 図 tnssrpg 呼出処理(新 nsrrpg)フロー