

NATIONAL INSTITUTE FOR FUSION SCIENCE

LHDの磁力線・磁気面可視化プログラム
LHD_lines_of_force.exeの使い方

渡辺二太、吉田正信、増崎貴、江本雅彦、長山好夫

(Received - Aug. 29, 2006)

NIFS-TECH-14

Sept. 2006

RESEARCH REPORT
NIFS-TECH Series

This report was prepared as a preprint of work performed as a collaboration research of the National Institute for Fusion Science (NIFS) of Japan. The views presented here are solely those of the authors. This document is intended for information only and may be published in a journal after some rearrangement of its contents in the future.

Inquiries about copyright should be addressed to the Research Information Office, National Institute for Fusion Science, Oroshi-cho, Toki-shi, Gifu-ken 509-5292 Japan.

E-mail: bunken@nifs.ac.jp

<Notice about photocopying>

In order to photocopy any work from this publication, you or your organization must obtain permission from the following organization which has been delegated for copyright clearance by the copyright owner of this publication.

Except in the USA

Japan Academic Association for Copyright Clearance (JAACC)

6-41 Akasaka 9-chome, Minato-ku, Tokyo 107-0052 Japan

Phone: 81-3-3475-5618 FAX: 81-3-3475-5619 E-mail: jaacc@mtd.biglobe.ne.jp

In the USA

Copyright Clearance Center, Inc.

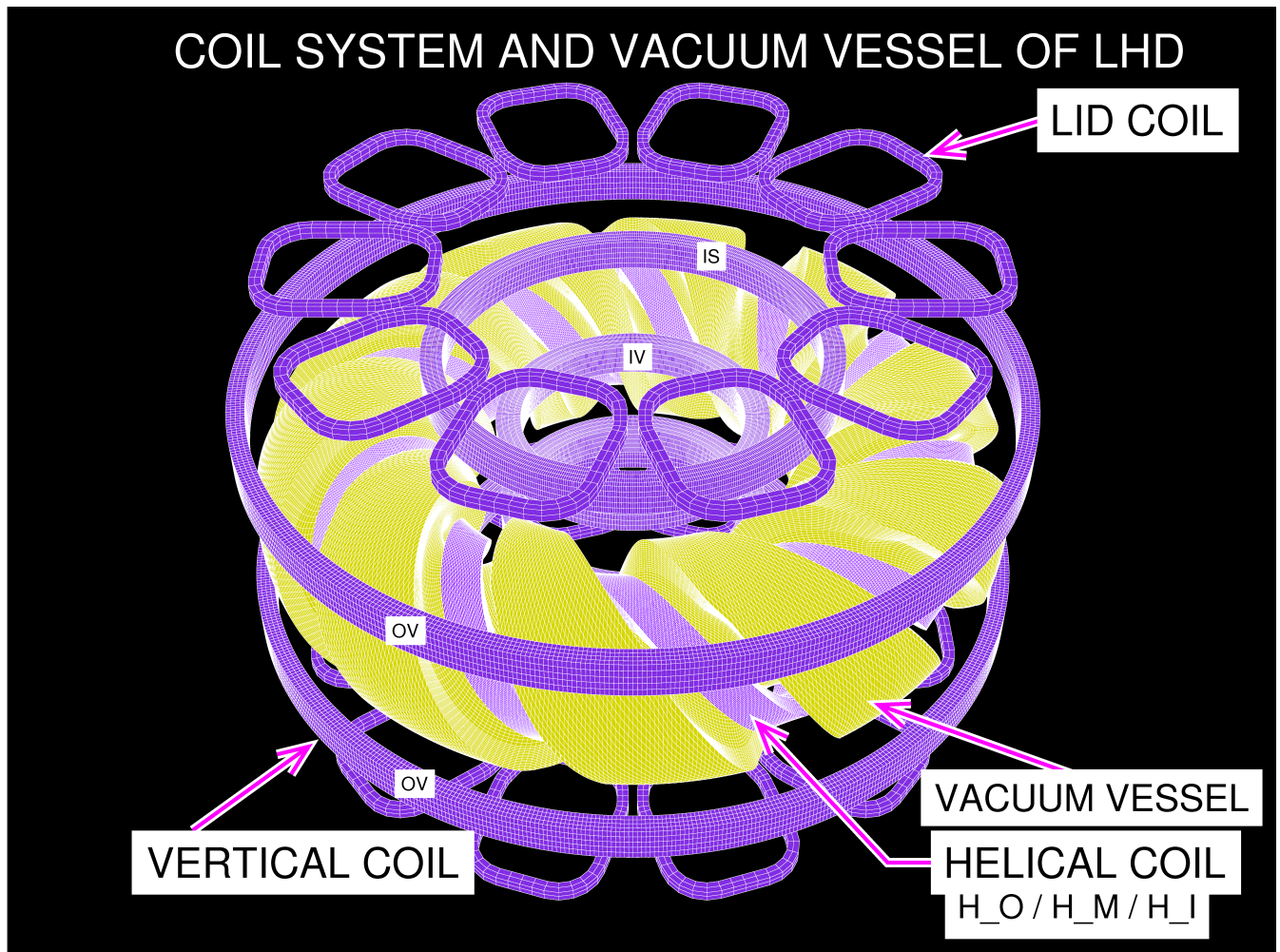
222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA

Phone: 1-978-750-8400 FAX: 1-978-646-8600

LHDの磁力線・磁気面可視化プログラム LHD_lines_of_force.exe の使い方

核融合科学研究所

渡辺二太, 吉田正信, 増崎 貴, 江本雅彦, 長山好夫



平成18年8月28日

How to Use the Numerical System
"LHD_LINES_OF_FORCE.EXE" for the Visualization of
Lines of Force in the Large Helical Device

Tsuguhiro Watanabe, Masanobu Yoshida, Suguru Masuzaki,
Masahiko Emoto, and Yoshio Nagayama

National Institute for Fusion Science, Oroshi-chou, Toki, 509-5292

Abstract

The usage of the numerical system "LHD_LINES_OF_FORCE.EXE" is described in detail here. The primary purpose of the numerical system "LHD_LINES_OF_FORCE.EXE" is to analyze interference of lines of force with various structures installed in the vacuum vessel of the LHD. The second purpose of the numerical system "LHD_LINES_OF_FORCE.EXE" is to show the structure of lines of force and the magnetic surface in front of plasma measurement devices. The feature of the numerical system "LHD_LINES_OF_FORCE.EXE" is to be able to analyze the interference for arbitrary structures being installed in the LHD. A GUI (Graphical User Interface) environment is prepared for the preparation of a lot of parameters to run the numerical system "LHD_LINES_OF_FORCE.EXE". The numerical results are output by a PostScript file (ps-file). A GUI is also prepared to reduce the file size of the numerical results by converting the ps-file into png (Portable Network Graphics) files.

Keywords: LHD, chaotic field line, diverter leg, diverter tile, magnetic surface,

目次

1 序	3
2 「LHD_lines_of_force.exe」の起動法	4
2.1 ブラウザの立ち上げ方	5
2.2 ブラウザを利用するパラメータ設定	5
3 入力データの詳細	14
3.1 計算方法および出力ファイルの指定 (第1データ)	14
3.2 コイル電流値の設定 (第2データ)	14
3.3 Limiter Data の設定 (第3データ)	16
3.4 最大トラス周回数および磁力線追跡方向 (第4データ)	18
3.5 出発地点 (第5データ, 第6データ)	19
3.5.1 回転ヘリカル座標系 ($j_crdnt=0$ の場合)	20
3.5.2 円柱座標系 ($j_crdnt=1$ の場合)	21
3.5.3 直交座標系 ($j_crdnt=2$ の場合)	22
3.5.4 カオス磁力線領域の全体像と磁気面の解析 ($j_crdnt=3$ の場合)	23
3.6 描画最短磁力線結合長 (第7データ)	24
3.7 子午面断面磁力線貫通図 (第8データ)	25
3.8 等高線 (磁力線貫通図に書き込む磁場強度) 記入法の設定 (第9データ)	26
3.9 任意断面磁力線貫通図 (第10データ)	26
3.10 立体図とカメラの構え方 (第11データ)	28
3.10.1 真空容器壁, ダイバータタイルの走査 ($j_rtlhd=1$ の場合)	28
3.10.2 腹這い姿勢でカメラを構えた磁力線立体図の作成 ($j_rtlhd=2$ の場合)	31
3.10.3 立ってカメラを構えた場合の磁力線立体図の作成 ($j_rtlhd=3$ の場合)	32
3.10.4 真空容器を部分的に切断した磁力線立体図の作成 ($j_rtlhd=4$ の場合)	33
3.11 立体図に表示する構造物と磁力線の指定 (第12データ)	34
3.12 磁力線追跡停止の指定 (第13データ)	34
3.13 コメント (第14データ)	35
3.14 PNG 出力 (ps ファイルの png ファイルへの変換)	35
4 数値計算例	36
4.1 ICRF 長時間放電時の磁力線・磁気面解析	37
4.1.1 ICRF 長時間放電時の磁力線・磁気面解析—case(1)	37
4.1.2 ICRF 長時間放電時の磁力線・磁気面解析—case(2)	43
4.2 LHD の標準磁場配位 ($R_{ax}=3.6$ m) の磁力線・磁気面構造解析例	45
4.3 LHD の標準磁場配位 ($R_{ax}=3.75$ m) の磁力線・磁気面構造解析例	57
4.4 Zeeman 効果を用いた LHD 周辺部の中性原子密度計測に対応する計算例	64
5 使用上の注意点とその他の覚え書き	68
6 謝辞	69

1 序

LHD 実験の進展に伴い, 加熱装置の増強, 放電時間の長時間化が実現している. LHD 真空容器内には, プラズマの加熱, 計測を目的とする各種構造物が組み込まれている. 真空容器内に新たな装置の設置を計画することもあるであろう. これらの構造物が, 磁気面, ダイバータ磁力線, あるいは高エネルギー粒子軌道と干渉すると, プラズマ閉じ込め性能の劣化, あるいは, 思いがけない, 装置の損傷等が引き起こされる.

LHD の磁力線・磁気面可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe」の第一の目的は, LHD の真空容器および真空容器内各種構造物と磁気面あるいはダイバータ磁力線との干渉を解析することである. 第二の目的は, プラズマ計測装置から見える, 磁力線・磁気面構造を示すことである. 計測データの解析に役立つことを期待する.

LHD の磁力線・磁気面可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe」の特徴は, 真空容器内に設置予定の任意の構造物を磁力線解析に取り入れることができる点にある.

最近のパソコンの性能向上 (ギガバイトを超える主記憶の実現, 64 ビット対応 Fortran コンパイラの実装, それを支える cpu の高速化 等) により, LHD の磁力線・磁気面可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe」は, 取扱説明書を作成すれば, 多数の研究者の実用に耐えると期待して, 当冊子を用意した.

LHD の磁力線・磁気面可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe」で, 目的とする情報を得るには, 多数のパラメータを入力データして用意する必要がある. そのため, GUI (Graphical User Interface) 環境下で入力データを用意できるようにした. 敷居があるかもしれないが, 数回使えば, 目的とする計算は直ちに行えるようになるであろう. 現在の計算機でも代表的計算時間は約 10 分程度である.

計算結果の出力はポストスクリプトファイル (ps file) で行っている. ASCII テキストファイルなので, 必要に応じた清書 (線の太さ, 点の大きさ, 文字サイズ, 色指定等の変更, 不要部分の削除, 必要部分の追加, あるいは拡大, 縮小, 回転, 等) は任意に行える. ただし, ポストスクリプトファイルのサイズは一般的に巨大となるので, ps file を png ファイルに変換する GUI も用意した.

png (Portable Network Graphics) ファイル:

高い圧縮率と本格的な画像編集に耐える高度の表現力を兼ね備えている, フリーの画像フォーマット. Windows で標準的にサポートされている. $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ に張り込むこともできる.

100MB を超えるポストスクリプトファイルも png ファイルに変換すれば 100kB オーダーのサイズとなり, 遙かに, 扱いやすくする. 見た目の仕上がりはポストスクリプトファイルのものとは変わらない (分解能は任意に設定できる).

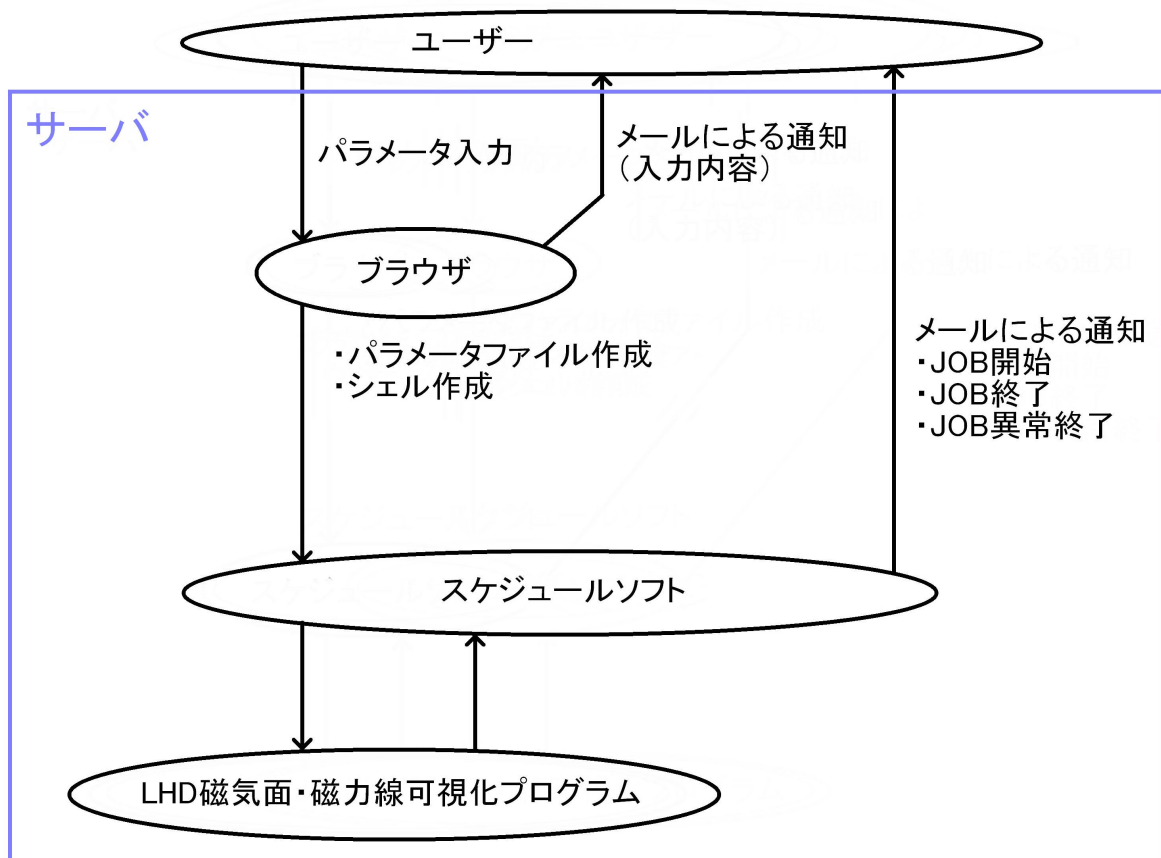
LHD の磁力線解析結果を別のプラズマ挙動解析プログラム, あるいは, CAD システムの入力データに利用したいとする要求もある. そのためのデータを ASCII テキストファイルに出力することは LHD の磁力線・磁気面可視化プログラムのソースファイル「LHD_lines_of_force.f90」に手を加えれば対応できる.

第2節には、LHDの磁力線・磁気面可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe」の起動法を述べる。第3節にはLHDの磁力線・磁気面可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe」に対する入力データの詳細を記述する。LHDの磁力線・磁気面を「LHD_lines_of_force.exe」で計算した例は第4節に示す。

2 「LHD_lines_of_force.exe」の起動法

LHD磁気面・磁力線可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe」の実行は以下のように行なわれる。

- ・ ブラウザを立ち上げる。
- ・ ブラウザでパラメータを設定する。
- ・ パラメータの設定を済ませると、スケジュールソフトによるJOB投入画面となる。
- ・ スケジュールソフトがLHD磁気面・磁力線可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe」を実行する。



2.1 ブラウザの立ち上げ方

デスクトップ上にある，



あるいは



といったブラウザのアイコンをダブルクリックするか、スタートメニューからブラウザを選択し、起動します。

次に、以下のアドレス

<http://dgegw3.nifs.ac.jp/~batch/> (2006/8/25 現在)

にアクセスすると、LHDの磁力線・磁気面可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe」に対する入力データ画面となります。

2.2 ブラウザを利用するパラメータ設定

LHDの磁力線・磁気面可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe」はファイルfort.50から磁力線解析に必要なデータを読み込む。このデータをブラウザで設定することができ、データを設定するブラウザの画面は次のようになっている。

jobset reset

通知先
メールアドレス JOB名

計算方法、画像ファイル名の指定
 新規計算 計算済みデータの再画像化 計算結果格納ファイル名

コイル電流値の設定
 Rax, Bq, gamma Bax CAL
 H₀ H_M H_L OV IS IV(A)

Limiter Dataの設定
 DIVERTER ICRF Antenna アンテナ後退量 (m) Limiter Data File 参照...

出発地点
 最大トラス周回数 + -
 追跡方向 -B方向 両方向 B方向
 出発点記述座標系 回転ヘリカル座標系 円柱座標系 直交座標系 カオス磁力線と磁気面 カオス磁気面領域の磁気島のみプロット

計算条件 & 出力条件
 描画最短磁力線結合長(トラス周回数) + -

子午面断面磁力線貫通図	先頭ロイダル角 <input type="text" value="0"/> (度) 最終ロイダル角 <input type="text" value="27"/> (度) 分割数 <input type="text" value="3"/> <input type="text" value="0, 27, 3"/> <input checked="" type="checkbox"/> ヘリカル対称性
等高線の記入方法	種別 <input type="text" value=" B "/> ΔB <input type="text" value="0.1"/> B0 <input type="text" value="2.75"/>
<input checked="" type="checkbox"/> 任意断面磁力線貫通図	視点の座標(x) <input type="text" value="7.0772"/> 視点の座標(y) <input type="text" value="1.3691"/> 視点の座標(z) <input type="text" value="0.4749"/> 視野の中心座標(x) <input type="text" value="2.6740"/> 視野の中心座標(y) <input type="text" value="1.9339"/> 視野の中心座標(z) <input type="text" value="-1.3955"/> 視野の最大幅 <input type="text" value="3.2"/> (m) <input type="text" value="7.0772d0, 1.3691d0, 0.4749d0, 2.6740, 1.9339, -1.3955, 3.2"/>
立体図とカメラの構え方 <input type="radio"/> 立体図を作成しない <input type="radio"/> 真空容器壁の走査 <input type="radio"/> 腹這いでカメラを構える <input checked="" type="radio"/> 立ってカメラを構える <input type="radio"/> 真空容器の部分的切断	視点の座標(x) <input type="text" value="7.0772"/> 視点の座標(y) <input type="text" value="1.3691"/> 視点の座標(z) <input type="text" value="0.4749"/> 視野の中心座標(x) <input type="text" value="2.6740"/> 視野の中心座標(y) <input type="text" value="1.9339"/> 視野の中心座標(z) <input type="text" value="-1.3955"/> 視点～スクリーン間の距離 <input type="text" value="2.2"/> (m) 視野最大角 <input type="text" value="10"/> (度) <input type="button" value="参考"/> <input checked="" type="checkbox"/> 断面を表示する 磁力線ドットサイズ: <input type="radio"/> 大 <input checked="" type="radio"/> 中 <input type="radio"/> 小
立体図に表示する構造物と磁力線	<input checked="" type="checkbox"/> 真空容器 <input checked="" type="checkbox"/> リミター <input type="checkbox"/> ヘリカルコイル <input type="checkbox"/> ヘリカルコイル容器 <input type="checkbox"/> 垂直磁場コイル <input type="checkbox"/> 磁気島コイル <input checked="" type="checkbox"/> 磁力線
磁力線追跡停止の条件	<input checked="" type="checkbox"/> リミター <input checked="" type="checkbox"/> 真空容器
コメント	<input type="text" value="SAMPLE"/>

 PNG 出力 (DPD)

- 通知先

- メールアドレス:
スケジュールソフトによる通知に使用する.
- JOB 名 :
スケジュールソフトによる通知に使用する.

JOB 開始のメール例

PBS Job Id: 166.dgegw3.nifs.ac.jp
Job Name: SAMPLE
Begun execution

JOB 終了のメール例

PBS Job Id: 166.dgegw3.nifs.ac.jp
Job Name: SAMPLE
Execution terminated
Exit_status=0
resources_used.cput=00:07:15
resources_used.mem=270072kb
resources_used.vmem=15240640kb
resources_used.walltime=00:07:19

JOB 異常終了のメール例

PBS Job Id: 166.dgegw3.nifs.ac.jp
Job Name: SAMPLE
An error has occurred processing your job, see below.
Post job file processing error; job 166.dgegw3.nifs.ac.jp on host
egcalc1.lhd.nifs.ac.jp/0

- 計算方法, 画像データファイル名, 計算結果格納ファイル名の指定 (入力データ詳細:
14 頁第 1 データ参照)

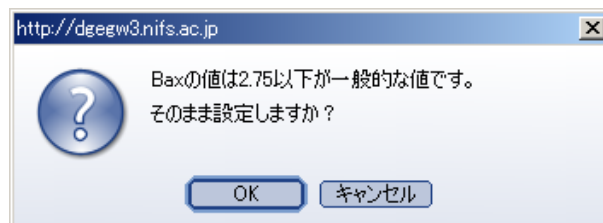
- 新規計算:
新規計算の場合に選択する.
- 計算済みデータの再画像化:
計算済みのデータを使用して再画像化処理を行う場合に選択する. 計算結果格納ファイルが存在していなければならない.
- 画像ファイル名 (画面上表示されない項目):
出力する画像ファイル (ポストスクリプトファイル) の名称で, プログラムで自動的に設定される .(PBSxxxxxxx.ps) . xxxxxxx の部分は、JOB ごとにラン

ダムに生成 .

- 計算結果格納ファイル:
磁力線追跡計算結果を格納するデータファイル (バイナリーフォーマット) の名称で, 新規計算の場合, プログラムで自動的に設定される . (PBSxxxxxxx.40) .
xxxxxxx の部分は、JOB ごとにランダムに生成 .
計算済みデータの再画像化処理を行う場合には、計算結果格納ファイルの名称を入力する .

- コイル電流値の設定 (入力データ詳細: 14 頁第 2 データ参照)

- Rax, Bq, gamma
標準的コイル電流値が一覧表となっている . この一覧表から、コイル電流値を検索するのに使用する .
- Bax
一覧表となっている標準的コイル電流値は、 $B_{ax} = 3T$ 換算の数値である . 実際のコイル電流値を設定するには、磁気軸上磁場強度 B_{ax} の値をここに指定しなければならない .
- CAL ボタン
選択された Rax, Bq, gamma と入力された Bax をもとにコイル電流の参考値を設定する .
LHD として、現在は許可されていない Bax の場合は、以下の警告メッセージを表示する .



OK が押された場合は、その値でコイル電流の参考値を設定する .

キャンセルが押された場合は、Bax 値を、選択されている Rax, Bq, gamma が許容する値に再設定する .

- H_O, H_M, H_I, OV, IS, IV
上記で電流値を設定した場合はここにコイル電流値が出力される . 直接コイル電流値をここに設定することもできる . 磁力線追跡計算はここに示されたコイル電流値を用いて行う .
単位は A

- Limiter Data の設定 (入力データ詳細: 16 頁第 3 データ参照)

- DIVERTER:
 チェック時、既設のヘリカルダイバータタイルの存在を磁力線追跡計算に反映させる。
 未チェック時、ダイバータタイルの存在は無視する。
 - ICRF Antenna:
 チェック時、ICRF アンテナの存在を磁力線追跡計算に反映させる。
 未チェック時、ICRF アンテナは無視する。
 - アンテナ後退量:
 LHD の ICRF アンテナは可動である。ICRF アンテナの後退量を入力する。
 単位はm
 - Limiter Data File:
 チェック時、真空容器内に新規構造物を設置する。新規構造物の構造を記述した csv ファイルを指定する。
 未チェック時、真空容器内に新規構造物は設置しない。
- 出発地点 (入力データ詳細: 18 頁第 4 データ, 19 頁第 5 データ, 20 頁第 6 データ, 参照)
 - 最大トーラス周回数:
 磁力線を追跡する最大のトーラス周回数を入力する。
 標準値は 20 程度。これに対応する磁力線結合長は $L_{cni} = 20 \times 2\pi \times 3.9 \simeq 490.1$ m である。ただし、磁気面を確認するための磁力線追跡は、プログラム内部で、最大トーラス周回数を 200 と設定している。
 - 追跡方向:
 磁力線を追跡する方向を選択する。
 - 記述座標系:
 磁力線追跡出発地点を記述する座標系を選択する。
 - カオス磁気面領域内の磁気島のみプロット:
 チェック時、カオス磁気面領域内の磁気島のみプロットする (例外的計算)。
 未チェック時、カオス磁気面領域内の磁気島はプロットしない (通常的計算)。
 - 計算条件 & 出力条件 (入力データ詳細: 第 7 ~ 14 データ参照)
 - 描画最短磁力線結合長 (トーラス周回数): (24 頁第 7 データ参照)
 描画する最短の磁力線結合長を指定する。
 標準値は 0.5 程度。これに対応する磁力線結合長は $L_{cni} = 0.5 \times 2\pi \times 3.9 \simeq 12.25$ m である。
 - 子午面断面磁力線貫通図: (25 頁第 8 データ参照)
 子午面断面磁力線貫通図を描画するのに必要なパラメータを入力する。
 SELECT コントロールから選択することもできる。

- ヘリカル対称性: (25 頁第 8 データ参照)
 チェック時、ヘリカル対称性の成立を仮定して描画する。
 未チェック時、計算結果をそのまま描画する。
- 等高線 (磁力線貫通図に書き込む磁場強度等高線) の記入法: 26 頁第 9 データ参照)
 未チェック時: 磁場強度の等高線は書き込まない。
 チェック時: 磁力線貫通図に書き込む磁場強度の等高線図の形式を指定する。
 - 種別 : 磁力線貫通図に強度が書き込まれる磁場成分を選択する。
 - B : 磁場強度の間隔を入力する。単位は T。
 - B0 : 基準磁場強度を入力する。単位は T。
- 任意断面磁力線貫通図: (26 頁第 10 データ参照)
 未チェック時、任意断面磁力線貫通図は作成しない。
 チェック時、任意断面磁力線貫通図を作成する。
 任意断面図磁力線貫通図を描画するのに必要なパラメータを入力する。
 SELECT コントロールから選択することもできる。
- 立体図とカメラの構え方: (28 頁第 11 データ参照)
 立体図の、作成・非作成の指示と、立体図を作成するときのカメラの構え方を指定する (SELECT コントロールから選択する)。
- 立体図に表示する構造物と磁力線: (34 頁第 12 データ参照)
 チェックされている構造物、磁力線を描画する。
- 磁力線追跡停止の条件: (34 頁第 13 データ参照)
 チェックされていると、リミター、あるいは、真空容器で磁力線は停止する。
 未チェック時、磁力線はリミター、あるいは、真空容器を貫通する。
- コメント: (35 頁第 14 データ参照)
 図に書き込むコメントを入力する。
- PNG 出力:
 チェック時、出力した PS ファイルを画像ファイル (png ファイル: 参照 3 頁) に変換・出力する JOB を起動する。解像度 (DPI) を指定する標準値は 300。 (PBSxxxxxxx_nn.png)。 xxxxxx の部分は、JOB ごとにランダムに生成。

JOBset ボタンを押すと JOB の投入が行なわれる。

jobset		reset	
通知先			
メールアドレス	foo@LHD.nifs.ac.jp	JOB	

設定内容がブラウザに表示されるとともに、メールとしても送られてくる。処理結果 (画像ファイル, 計算結果格納ファイル, PNG ファイル) については、¥¥egcalc1¥work or ¥¥egcalc2¥work に出力されている。(2006/8/25 現在)

下記内容でジョブを登録しました

通知先	foo@LHD.nifs.ac.jp								
計算結果出力方法	計算方法	新規							
	画像ファイル名	/work/PBSDSAjqA.ps							
	計算結果格納ファイル名	/work/PBSDSAjqA.40							
コイル電流値	H_O	H_M	H_I	OV	IS	IV	Rax	Bax	gamma
	11000	11000	11000	-17967	-3007	11229	3.6	2.75	1.254
リミッターデータ	DIVERTER								あり
	ICRF アンテナ後退量(m)								0.07
	リミッターデータファイル								limit1.csv
出発地点	最大トラス周回数	20							
	追跡方向	両方向							
	座標系	カオス磁力線と磁気面							
	座標データ	50, 5, 7, 0.1							
計算条件	描画最短磁力線結合長								0.5
子午面断面磁力線貫通図	初期値($180 \cdot \phi / \pi$)								0
	最大値($180 \cdot \phi / \pi$)								27
	分割数(n)								3
	ヘリカル対称性								あり
等高線	種別	B							
	ΔB	0.1							
	B0	2.75							
任意断面磁力線貫通図	視点座標(x, y, z)	7.0772, 1.3691, 0.4749							
	視野中心座標(x, y, z)	2.6740, 1.9339, -1.3955							
	最大視野	3.2							
立体図とカメラの構え方	カメラの構え方	立ってカメラを構える							
	視点座標(x, y, z)	7.0772, 1.3691, 0.4749							
	視野中心座標(x, y, z)	2.6740, 1.9339, -1.3955							
	視点スクリーン間の距離(m)	2.2							
	視野最大角(度)	10							
	断面表示	する							
	磁力線ドットサイズ	中(0.017mm)							
構造物表示	真空容器								表示
	リミッター								表示
	ヘリカルコイル								非表示
	ヘリカルコイルの容器								非表示
	垂直磁場コイル								非表示
	磁気島コイル								非表示
	磁力線								表示
磁力線追跡	リミッター								追跡停止
	真空容器透過								追跡停止
コメント	SAMPLE								
PNG出力	解像度	300 (dpi)							

メール例

【LHD line of force parameters】

《 計算結果出力方法 》

計算方法 : 新規
画像ファイル名 : /work/PBSDSAjqA.ps
計算結果格納ファイル名 : /work/PBSDSAjqA.40

《 コイル電流値 》

H_O : 11000
H_M : 11000
H_I : 11000
OV : -17967
IS : -3007
IV : 11229
Rax : 3.6
Bax : 2.75
gamma : 1.254

《 リミターデータ 》

DIVERTER : あり
ICRF アンテナ後退量 (m) : 0.07
リミッターデータファイル : limit1.csv

《 出発地点 》

最大トーラス周回数 : 20
追跡方向 : 両方向
座標系 : カオス磁力線と磁気面
座標データ : 50, 5, 7, 0.1

《 計算条件 》

描画最短磁力線結合長 : 0.5

《 子午面断面磁力線貫通図 》

初期値 ($\phi * 180/\pi$) : 0
最大値 ($\phi * 180/\pi$) : 27
分割数 (n) : 3
ヘリカル対称性 : あり

<< 等高線 >>

種別： $|B|$

B : 0.1

B0 : 2.75

<< 任意断面磁力線貫通図 >>

視点座標 (x, y, z) : 7.0772, 1.3691, 0.4749

視野中心座標 (x, y, z) : 2.6740, 1.9339, -1.3955

最大視野 : 3.2

<< 立体図とカメラの構え方 >>

カメラの構え方 : 立ってカメラを構える

視点座標 (x, y, z) : 7.0772, 1.3691, 0.4749

視野中心座標 (x, y, z) : 2.6740, 1.9339, -1.3955

視点スクリーン間の距離 (m) : 2.2

視野最大角 (度) : 10

断面表示 : する

磁力線ドットサイズ : 中 (0.017mm)

<< 構造物表示 >>

真空容器 : 表示

リミター : 表示

ヘリカルコイル : 非表示

ヘリカルコイルの容器 : 非表示

垂直磁場コイル : 非表示

磁気島コイル : 非表示

磁力線 : 表示

<< 磁力線追跡 >>

リミター : 追跡停止

真空容器透過 : 追跡停止

<< コメント >>

'SAMPLE'

<< PNG 出力 >>

解像度 : 300(dpi)

3 入力データの詳細

ここでは、LHD 磁気面・磁力線可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe」が使用するデータを入力する GUI 画面と、そこで設定されるデータの詳細を記述する。LHD 磁気面・磁力線可視化プログラムのソース「LHD_lines_of_force.f90」で使用している変数名も示す。

3.1 計算方法および出力ファイルの指定 (第1データ)

計算方法, 画像ファイル名の指定

新規計算 計算済みデータの再画像化 計算結果格納ファイル名

	変数名	値	設定内容
1	j_cmp	= 0 = 1	計算済みデータの再画像処理を行う。 磁力線追跡の新規計算を行なう。
2	fl_ps	'ファイル名'	プログラム実行結果となる画像ファイル名 (post script file) を指定する。存在していなければ新規に作成され、既存のファイルなら上書きされる。ファイル名はアポストロフィーで囲まなければならない。
3	fl_frt40	'ファイル名'	磁力線追跡結果を格納するファイル名を指定する。磁力線追跡結果はこのデータセットにバイナリー形式で出力される。ファイル名はアポストロフィーで囲まなければならない。 新規計算 (j_cmp = 1) の場合、磁力線追跡結果が格納される。再画像処理 (j_cmp = 0) の場合、このデータセットの内容が画像化され、変更されることはない。ファイル参照ボタンを押して探し出すこともできる。

入力例		
計算方法	ps ファイル名	計算結果格納ファイル
0	'r375_fll_v2.ps'	'case9_fort.40'

3.2 コイル電流値の設定 (第2データ)

LHD のヘリカル磁場は 2 対のヘリカルコイルで作られ、それぞれのヘリカルコイルには 450 本 (ヘリカルコイル合計では 900 本) の超伝導線が組み込まれている。各ヘリカルコイルの超伝導線は 3 層 (O ブロック, M ブロック, I ブロック) に分割されていて、それぞれに電流値が設定できる。

ヘリカルコイルの作り出す垂直方向磁場を打ち消し、さらに、LHD 装置外部への漏洩磁場を大幅低減するため、LHD には上下対称の 3 対の垂直磁場コイル (OV コイル, IS コイル,

IV コイル) が存在する. この垂直磁場コイルの電流値の制御で LHD は磁気面形状を様々に変形できる.

コイル電流値の設定

Rax, Bq, gamma Bax

H_O H_M H_I OV IS IV(A)

	変数名	値	設定内容
1	cur_hc(1)	電流値 (A)	ヘリカルコイルの外層 (O ブロック: $25 \times 6 = 150$ ターン) に流す電流値 lhd_O_curr を設定する.
2	cur_hc(2)	電流値 (A)	ヘリカルコイルの中間層 (M ブロック: $25 \times 6 = 150$ ターン) に流す電流値 lhd_M_curr を設定する.
3	cur_hc(3)	電流値 (A)	ヘリカルコイルの内層 (I ブロック: $25 + 23 \times 2 + 21 + 19 + 17 + 13 + 9 = 150$ ターン) に流す電流値 lhd_I_curr を設定する.
4	cur_vt(1)	電流値 (A)	内径がもっとも大きな垂直磁場コイル (OV コイル: $9 \times 16 = 144$ ターン) に流す電流値 lhd_OV_curr を設定する.
5	cur_vt(2)	電流値 (A)	コイル中心位置がもっとも高所に位置する垂直磁場コイル (IS コイル: $13 \times 16 = 208$ ターン) に流す電流値 lhd_IS_curr を設定する.
6	cur_vt(3)	電流値 (A)	内径がもっとも小さな垂直磁場コイル (IV コイル: $15 \times 16 = 240$ ターン) に流す電流値 lhd_IV_curr を設定する.
7	cmnt1	'コメント'	各コイルの電流値をいちいち述べる代わりに, LHD 磁場の特性 (磁気軸位置 R_{ax} , 磁気軸上磁場強度値 B_{ax} , γ 値等) で表現することも多い. それらを必要に応じて記入する. コメントはアポストロフィーで囲まなければならない このコメント cmnt1 は計算結果の図に記入される.

磁気軸位置 R_{ax} , 四重極成分 Bq, γ 値 gamma, 磁気軸上磁場強度 B_{ax} に値を設定し, CAL ボタンを押すと, コイル電流値の一覧表から, 各コイルの電流値が自動設定できる (LHD の標準的磁場配位の場合).

入力例						
H_O(A)	H_M(A)	H_I(A)	OV (A)	IS (A)	IV (A)	コメント
11000	11000	11000	-17967	-3007	11229	' $R_{AX} = 3.6, B_{AX} = 2.75$ '

LHD 磁場の磁気軸位置は微少なヘリカル回転をしている。LHD 磁場の磁気軸のトレース ($r_{ax}(\phi)$, $z_{ax}(\phi)$ のトロイダル角 (ϕ) 依存性) は次式で近似される (単位: m)。

$$r_{ax} = r_0 + X_{ax} \cos \theta - Y_{ax} \sin \theta \quad (1)$$

$$z_{ax} = X_{ax} \sin \theta + Y_{ax} \cos \theta \quad (2)$$

$$X_{ax} \simeq a_1 \cos \theta + a_3 \cos 3\theta \quad (3)$$

$$Y_{ax} \simeq b_1 \sin \theta + b_3 \sin 3\theta \quad (4)$$

$$r_0 = 3.9 \quad (5)$$

$$\theta = 5\phi \quad (6)$$

(a_1, a_3, b_1, b_3) の数値, 磁気軸位置平均値 $\langle r_{ax} \rangle$ と 磁気軸上磁場強度平均値 $\langle B_{ax} \rangle$, および 磁気軸上の回転変換 $\nu_{ax}/2\pi$ の数値を磁力線追跡計算に先立って出力する。

3.3 Limiter Data の設定 (第3データ)

LHD の磁力線・磁気面可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe」には LHD のダイバータタイル, サイドリミター付の ICRF アンテナが組み込まれている。また, 新規に構造物を追加することもできる。

ここでは, 新規構造物の組み込みを指定するとともに, これらの構造物を取り入れて磁力線追跡するのか, これらの構造物の存在を無視して, 磁力線追跡するのかを指定する。

	変数名	値	設定内容
1	j_dvt_tile	= 0 = 1	ダイバータタイルの存在は無視される。 ダイバータタイルを取り入れて磁力線追跡する。
2	j_icrf_antenna	= 0 = 1	ICRF アンテナの存在は無視される。 ICRF アンテナを取り入れて磁力線追跡する。
3	del_antenna ¹⁾	後退量 (m)	アンテナの後退量を指定する
4	j_lmtr	= 0 = 1	新規構造物を真空容器内に追加しない。 新規構造物を真空容器内に設置して磁力線解析を行う。
5	fl_lmtr	'ファイル名'	真空容器内に設置する新規構造物を多角形に分割し, その頂点を直交座標系 (単位: mm) で記述したカンマ区切りのテキストファイル (csv ファイル) を指定する。参照ボタンを押して表示されるファイル選択ダイアログから, ファイルを選択することもできる。ファイル名はアポストロフィーで囲まなければならない。

1) : LHD の ICRF アンテナはプラズマに近づけたり、プラズマから遠ざけたりすることができる。現在の (2006/8/3) の最大後退量 (真空容器壁際までアンテナを後退させたとき) は, del_antenna = 0.07 m である。

入力例				
ダイバータタイプの存在	ICRF アンテナの存在	アンテナ後退量	新規構造物	ファイル名
1	1	0.07	0	'simpl_lmtr.csv'

次に, 新規構造物の構造を指定する csv ファイルの具体例を占めず。

```
tileNo.,x0,y0,z0,x1,y1,z1,x2,y2,z2,x3,y3,z3,x4,y4,z4,x5,y5,z5,x6,y6,z6,/
101,3717.16,469.998,-1609.85,3702.74,470.005,-1594.16,3910.69,470,-1403.12,/
102,3598.07,470,-1594.33,3583.66,470.001,-1578.63,3791.6,469.996,-1387.61,3880.51,470.004,-1399.2,3894.93,470.003,-1414.9,3686.99,469.994,-1605.92,/
103,3479.09,470.003,-1578.81,3464.67,469.999,-1563.12,3672.62,470.002,-1372.1,3761.53,470.002,-1383.69,3775.95,469.995,-1399.39,3668.01,470,-1590.41,/
104,3310.2,470.004,-1556.79,3339.94,469.995,-1328.72,3641.9,470.006,-1368.09,3656.66,470.002,-1384.16,3449.03,470.005,-1574.89,/
105,3214,428,-1356,3171,464,-1349,3341,588,-1365,3420,588,-1375,3420,493,-1380,3340,493,-1369,3286,428.2,-1365.9,/
106,3085.3,485.571,-1275.4,3077.07,499.266,-1272.26,3220.23,604.049,-1353.67,3293.45,578.552,-1389.13,3301.69,564.853,-1392.28,3158.53,460.07,-1310.87,/
107,2993.29,519.73,-1227.9,2985.04,533.151,-1225.12,3094.11,648.722,-1295.8,3198.89,612.238,-1346.55,3207.29,598.57,-1349.37,3066.51,494.229,-1263.36,/
108,2910.52,532.437,-1142.7,2899.18,547.672,-1135,2999.94,674.485,-1237.49,3069.06,661.406,-1294.8,3080.4,646.177,-1302.5,2979.64,519.359,-1200.01,/
109,2820.66,551.151,-1065.36,2809.07,566.341,-1057.95,2907.06,692.671,-1163.67,2976.19,679.592,-1220.98,2987.77,664.403,-1228.39,2889.78,538.073,-1122.67,/
110,2730.86,570.012,-987.966,2719.01,585.137,-980.861,2814.06,710.831,-1089.97,2883.2,697.748,-1147.29,2895.04,682.613,-1154.39,2799.99,556.934,-1045.28,/
111,2641.14,589.034,-910.533,2631.08,601.522,-904.902,2706.29,731.719,-1004.25,2790.09,715.867,-1073.73,2802.21,700.815,-1080.51,2710.26,575.956,-967.844,/
112,2585.79,604.374,-800.006,2576.06,619.083,-789.563,2628.97,747.737,-921.423,2678.07,737.007,-996.974,2687.79,722.303,-1007.42,2634.89,593.649,-875.557,/
113,2522.63,620.12,-699.164,2512.59,634.739,-688.913,2562.03,762.573,-822.905,2611.13,751.843,-898.457,2621.17,737.209,-908.708,2571.73,609.39,-774.715,/
114,2459.5,635.982,-598.312,2449.14,650.52,-588.259,2494.98,777.36,-724.454,2544.08,766.631,-800.005,2554.44,752.092,-810.059,2508.6,625.252,-673.864,/
115,2402.78,650.594,-507.23,2397.38,798.751,-579.227,2476.92,781.374,-701.621,2487.62,766.937,-711.47,2445.52,641.256,-573.006,/
116,2314.76,691.95,-367.523,2313.88,714.414,-353.233,2401.71,805.141,-490.5,2427.6,778.81,-560.336,2362.94,642.952,-497.471,/
117,2288.81,748.107,-273.95,2287.63,764.402,-263.919,2349.04,833.885,-369.561,2379.35,803.068,-451.3,2380.52,786.774,-461.331,2319.12,717.284,-355.689,/
118,2252.67,789.455,-167.197,2250.95,805.849,-157.404,2307.59,876.167,-265.129,2337.9,845.343,-346.867,2339.62,828.964,-356.66,2282.98,758.637,-248.936,/
119,2216.52,830.973,-60.5085,2214.24,847.436,-50.9501,2265.97,918.366,-160.723,2296.29,887.542,-242.462,2298.57,871.088,-252.02,2246.82,800.156,-142.247,/
120,2214.54,852.868,56.4689,2217.54,864.389,65.5409,2253.23,944.869,-48.5239,2253.72,924.801,-133.159,2250.71,913.286,-142.228,2215.02,832.804,-28.1643,/
121,2215.71,879.784,167.772,2219.25,894.627,179.362,2251.4,973.975,67.8763,2251.91,952.65,-22.093,2248.37,937.793,-33.6828,2216.21,858.452,77.8028,/
122,2223.94,910.685,283.819,2225.9,925.901,295.316,2244.26,1008.4,183.001,2244.77,987.08,93.0319,2242.81,971.856,81.5364,2224.46,889.36,193.85./
```

上記ファイルの説明

- 第一行目は任意のコメントである。プログラムの中では読み飛ばされる
- 第2行目以下の第一列はタイル番号を示す整数である。
- 第2列以下には構造物の表面を記述する多边形 (3 角形, 4 边形, 5 边形, 6 边形, 7 边形) の頂点の直交座標値 (x, y, z) を mm 単位で記述する。1 行で記述できるデータは 7 边形までである。8 以上の辺 (あるいは稜) を有する構造物外壁は再分割して, 7 以下の多边形タイルのデータの集合で表現しなければならない (複数行でデータを表現する。そのときタイル番号は同一であっても良い)。
- 各行の最後には 1 行の最後を明示する / (スラッシュ) をつけること。
- LHD の磁力線・磁気面可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe」では, 1 行で記述された多边形を 3 角形に分割して処理している。このとき, 分割法は下記に従う (図 1 参照)。

$$\begin{aligned}
 (1, 2, 3, 4) &\longrightarrow (1, 2, 3) + (3, 4, 1) \quad (4 \text{ 边形}) \\
 (1, 2, 3, 4, 5) &\longrightarrow (1, 2, 3, 4) + (1, 4, 5, 1) \quad (5 \text{ 边形}) \\
 (1, 2, 3, 4, 5, 6) &\longrightarrow (1, 2, 3, 4) + (1, 4, 5, 6) \quad (6 \text{ 边形}) \\
 (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7) &\longrightarrow (2, 4, 5, 6) + (1, 2, 6, 7) + (2, 3, 4, 2) \quad (7 \text{ 边形})
 \end{aligned}$$

- 通常の、同一平面にある凸多角形ならば頂点の番号の付け方はほぼ自由である。ただし、切り欠きのあるタイル、あるいは、折れ曲がりのあるタイルではタイル番号の付け方には上記規則を念頭に置く必要がある。
- 4 辺形で指定していても、第 3 頂点と第 4 頂点とが一致していたら 3 角形タイルと判定して対処する。

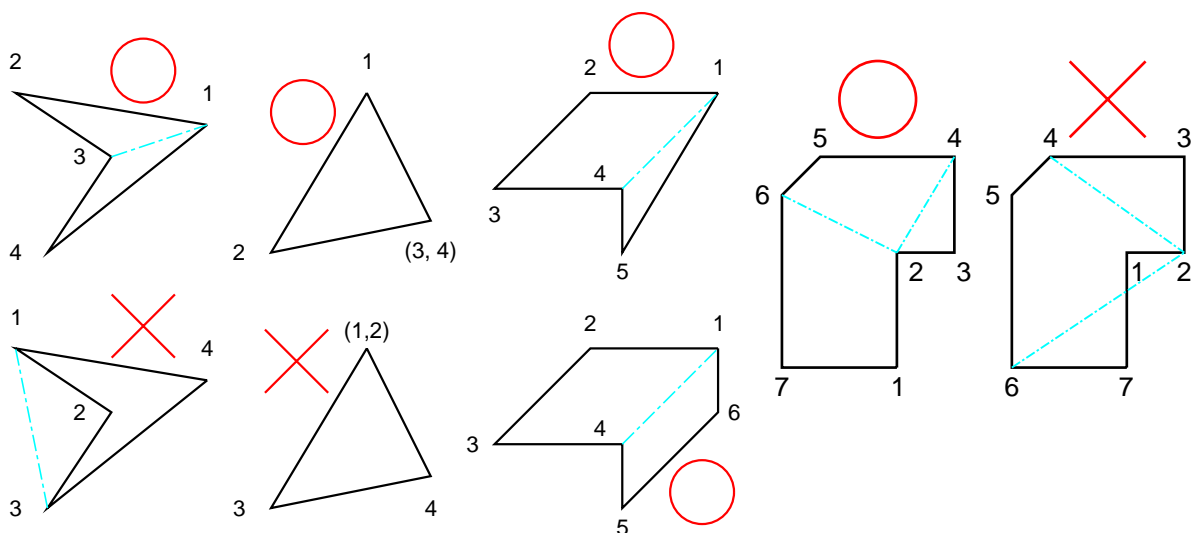


図 1: 多边形タイルの頂点番号の付け方。「X」印は不適切な番号付けの例を示す。

3.4 最大トラス周回数および磁力線追跡方向 (第 4 データ)

出発地点

最大トラス周回数

追跡方向 -B方向 両方向 B方向

	変数名	値	設定内容
1	mtn	回数	磁力線追跡を追跡する最大のトラス周回数を設定する。ダイバータ磁力線の特徴を把握するには $mtn = 20$ 程度で十分である。
2	j_tr_drctn	= -1 = 0 = 1	逆磁場方向 ($-B$ 方向) に磁力線を追跡するとき。 磁場方向と逆磁場方向の両方に磁力線を追跡するとき。 磁場方向 (B 方向) に磁力線を追跡するとき。

磁気面の構造だけを解析するときは、 B 方向 ($j_tr_drctn = 1$) と設定した磁力線追跡計算だけで十分である。しかしながらカオス磁力線 (ダイバータ磁力線) の構造を把握するには、両方向 ($j_tr_drctn = 0$) と設定して計算する必要がある。

磁力線長 L とトーラス周回数 mtn との間には,

$$L \simeq mtn \times (2\pi r_0) = mtn \times 24.504 \dots, \quad (\text{単位 : m})$$

の関係がある.

入力例	
最大トーラス周回数	磁力線追跡方向
20	0

3.5 出発地点 (第5データ, 第6データ)

磁力線を追跡する際の出発地点を記述する座標系を指定し, 座標値を設定する. まず, LHD 磁気面・磁力線可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe」が採用している, 回転ヘリカル座標系 [1], 円柱座標系, 直交座標系の関係を説明する.

空間の任意の地点 x を記述する各座標系 (回転ヘリカル座標系, 円柱座標系, 直交座標系) での座標値に関する要点をまとめる.

(X, Y, ϕ) : 回転ヘリカル座標系

(r, ϕ, z) : 円柱座標系

(x, y, z) : 直交座標系

r_0 で回転ヘリカル座標系の回転半径を表し, p でヘリカル回転のピッチ数を表す. LHD では, $r_0 = 3.9 \text{ m}$, $p = 5$ である. 次の関係が成り立つ.

$$r = r_0 + X \cos \theta - Y \sin \theta$$

$$z = X \sin \theta + Y \cos \theta$$

$$\theta \equiv p\phi$$

$$x = r \sin \phi$$

$$y = r \cos \phi$$

ここでの円柱座標系はLHDの装置設計に合わせて, 装置を天井から見て, 時計回りにトロイダル角 ϕ が設定されていることに注意しなければならない.

x 軸方向 : 東

y 軸方向 : 北

z 軸方向 : 鉛直上方

$\phi = 0$ 方向 : y 軸方向

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = X\mathbf{i} + Y\mathbf{j} - r_0 \frac{d\mathbf{k}}{d\phi}$$

ここで, (i, j, k) は回転ヘリカル座標系での規格化直交ベクトルで, 直交座標系での成分は次のようになる.

$$(i, j, k) = \begin{pmatrix} \cos \theta \sin \phi, & -\sin \theta \sin \phi, & \cos \phi \\ \cos \theta \cos \phi, & -\sin \theta \cos \phi, & -\sin \phi \\ \sin \theta, & \cos \theta, & 0 \end{pmatrix}.$$

直交座標系から回転ヘリカル座標系への変換は次式のようにになる.

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{x^2 + y^2}, \\ \phi &= \tan^{-1} \left(\frac{x}{y} \right), \\ X &= (r - r_0) \cos \theta + z \sin \theta, \\ Y &= -(r - r_0) \sin \theta + z \cos \theta. \end{aligned}$$

任意のベクトル A は回転ヘリカル座標系での成分 (A_X, A_Y, A_ϕ) を使って次式で表される.

$$A = A_X i + A_Y j + A_\phi k.$$

変数名	値	設定内容
1	j_crdnt	= 0 磁力線の出発地点を回転ヘリカル座標系で指定した正方形領域に設定する. = 1 磁力線の出発地点を円柱座標系で指定した正方形領域に設定する. = 2 磁力線の出発地点を直交座標系で指定した正方形領域に設定する. = 3 カオス磁力線領域の全体像と磁気面を解析する.

j_crdnt の値により, 設定するパラメータの個数や意味は変化する.

3.5.1 回転ヘリカル座標系 (j_crdnt=0 の場合)

磁力線の出発地点を回転ヘリカル座標で指定した正方形領域に設定する.

出発点記述座標系	<input checked="" type="radio"/> 回転ヘリカル座標系 <input type="radio"/> 円柱座標系 <input type="radio"/> 直交座標系 <input type="radio"/> カオス磁力線と磁気面 <input type="checkbox"/> カオス磁気面領域の磁気島のみプロット
	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>
	<input type="text"/> 0d0, -0.3d0, 1.3d0, 16, -0.001d0, 0.001d0, 2

変数名	値	設定内容	
1	ph0	トロイダル角 (度)	出発地点のトロイダル角を指定する.
2	x00	先頭 X 座標 (m)	出発地点の先頭 X 座標を指定する.
3	x11	終端 X 座標 (m)	出発地点の終端 X 座標を指定する.
4	nx00	X 方向分割数	出発地点の X 方向分割数を指定する. (0 以上の整数)
5	y00	先頭 Y 座標 (m)	出発地点の先頭 Y 座標を指定する.
6	y11	終端 Y 座標 (m)	出発地点の終端 Y 座標を指定する.
7	ny00	Y 方向分割数	出発地点の Y 方向分割数を指定する. (0 以上の整数)

入力例						
出発地点のトロイダル角	先頭 X 座標	終端 X 座標	X 方向分割数	先頭 Y 座標	終端 Y 座標	Y 方向分割数
0	-0.3	1.3	16	-0.001	0.001	2

3.5.2 円柱座標系 (j_crdnt= 1 の場合)

磁力線の出発地点を円柱座標で指定した正方形領域に設定する。

追跡方向	<input type="radio"/> -B方向 <input checked="" type="radio"/> 両方向 <input type="radio"/> B方向
出発点記述座標系	<input type="radio"/> 回転ヘリカル座標系 <input checked="" type="radio"/> 円柱座標系 <input type="radio"/> 直交座標系 <input type="radio"/> カオス磁力線と磁気面 <input type="checkbox"/> カオス磁気面領域の磁気島のみプロット
	0d0, 3.6d0, 5.2d0, 16, -0.001d0, 0.001d0, 2

	変数名	値	設定内容
1	ph0	トロイダル角 (度)	出発地点のトロイダル角を指定する。
2	r00	先頭 r 座標 (m)	出発地点の先頭 r 座標を指定する。
3	r11	終端 r 座標 (m)	出発地点の終端 r 座標を指定する。
4	nx00	X 方向分割数	出発地点の r 方向分割数を指定する。(0以上の整数)
5	z00	先頭 z 座標 (m)	出発地点の先頭 z 座標を指定する。
6	z11	終端 z 座標 (m)	出発地点の終端 z 座標を指定する。
7	ny00	Y 方向分割数	出発地点の z 方向分割数を指定する。(0以上の整数)

入力例						
出発地点のトロイダル角	先頭 r 座標	終端 r 座標	r 方向分割数	先頭 z 座標	終端 z 座標	z 方向分割数
0	3.6	5.2	16	-0.001	0.001	2

3.5.3 直交座標系 (j_crdnt= 2 の場合)

磁力線の出発地点を直交座標で指定した正方形領域に設定する。

追跡方向	<input type="radio"/> -B方向 <input checked="" type="radio"/> 両方向 <input type="radio"/> B方向
出発点記述座標系	<input type="radio"/> 回転ヘリカル座標系 <input type="radio"/> 円柱座標系 <input checked="" type="radio"/> 直交座標系 <input type="radio"/> カオス磁力線と磁気面 <input type="checkbox"/> カオス磁気面領域の磁気島のみプロット
	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>
	<input type="button" value="▼"/>

	変数名	値	設定内容
1	x00	中心 x 座標 (m)	出発地点の中心の x 座標を指定する。
2	y00	中心 y 座標 (m)	出発地点の中心の y 座標を指定する。
3	z00	中心 z 座標 (m)	出発地点の中心の z 座標を指定する。
4	x11	第一掃引方向終端 x 成分 (m)	出発地点の第一掃引方向終端の x 成分。
5	y11	第一掃引方向終端 y 成分 (m)	出発地点の第一掃引方向終端の y 成分。
6	z11	第一掃引方向終端 z 成分 (m)	出発地点の第一掃引方向終端の z 成分。
7	nx00	第一掃引方向への分割数	第一掃引方向への分割数を指定する。
8	x22	第二掃引方向終端 x 成分 (m)	出発地点の第二掃引方向終端の x 成分。
9	y22	第二掃引方向終端 y 成分 (m)	出発地点の第二掃引方向終端の y 成分。
10	z22	第二掃引方向終端 z 成分 (m)	出発地点の第二掃引方向終端の z 成分。
11	ny00	第二掃引方向への分割数	第二掃引方向への分割数を指定する。

出発地点の初期値 \mathbf{x}_0 は

$$\mathbf{x}_0 = \mathbf{x}_{00} + \sum_{i=-nx00}^{nx00} \sum_{j=-ny00}^{ny00} i \frac{\mathbf{x}_{11} - \mathbf{x}_{00}}{nx00} + j \frac{\mathbf{x}_{22} - \mathbf{x}_{00}}{ny00}$$

と設定される。

j_crdnt= 2 の場合は、ダイバータタイル上に埋め込まれたプローブ列に到達する磁力線群解析等を想定している。

3.5.4 カオス磁力線領域の全体像と磁気面の解析 (j_crdnt= 3 の場合)

j_crdnt= 3 の場合は, LHD 実験に対応できる磁気面領域とカオス磁力線領域の全体像を解析することを目的としている. LHD 実験に対応できるカオス磁力線領域の全体像得るには,

- 磁力線の出発地点を磁気面近傍の内外に均等に設定すること,
- 真空容器壁に到達しなかった磁力線追跡結果は捨てること,
- 磁力線がカオスとなる基本過程 (磁力線の引き延ばしと折りたたみ過程 : stretching and folding[2]) を経験しない磁力線 (真空容器壁から, 真空容器壁へと極端に短い結合長で結ばれている磁力線) は取り除くこと,

等が要求される. LHD の磁力線・磁気面可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe」では, 下記のプロセスでこの要求に応える.

1) LHD の通常の磁気面, カオス磁力線領域を取り囲むことのできる大きな回転楕円体を

$$1 = \frac{(X - X_{ax})^2}{1.3^2} + \frac{(Y - Y_{ax})^2}{0.65^2}$$

を設定する. また, 完全に磁気面内に存在すると見なすことのできる小さな回転楕円体を

$$1 = \frac{(X - X_{ax})^2}{(1.3/2)^2} + \frac{(Y - Y_{ax})^2}{(0.65/2)^2}$$

を設定する. 磁気軸位置 (X_{ax}, Y_{ax}) のトロイダル角依存性は 16 頁に記した (3), (4) 式で与えられている. 最外殻磁気面, カオス磁力線領域はこの二つの回転楕円体の中間域に存在すると仮定する. 出発点のトロイダル角, 方位角は均等に配置する. トロイダル角, 方位角を一つ定めた後, 上記大きな楕円体の周上から磁気軸に向け, 径方向に均等に出发点移動しながら磁力線追跡を行う.

2) 磁力線結合長が極端に短い磁力線は捨てる. 捨てる磁力線の結合長は第 7 データ (24 頁参照) の cnl_mnd で指定する.

3) 第 4 データ (18 頁参照) で指定した磁力線追跡打ち切りの最大トラス周回数 (=mtn) に達しても真空容器壁に到達しなかった磁力線追跡が連続 3 回続いたら (磁気軸に向けて, 径方向に移動しているとき), 磁気面領域に到達したと判断して次の方位角, トロイダル角での計算に移行する.

4) 磁気面領域以外の計算では, 第 4 データで指定した磁力線追跡打ち切りの最大トラス周回数 (=mtn) に達しても真空容器壁に到達しなかった磁力線は, 磁力線貫通図にはプロットしない. すなわち, カオス磁力線領域に埋め込まれている磁気島の貫通図は, 通常, 白抜けとなる.

出発点記述座標系	<input type="radio"/> 回転ヘリカル座標系	<input type="radio"/> 円柱座標系	<input type="radio"/> 直交座標系	<input checked="" type="radio"/> カオス磁力線と磁気面	<input type="checkbox"/> カオス磁気面領域の磁気島のみプロット
<input type="text" value="1000, 100, 7., 0.1"/>					

	変数名	値	設定内容
1	nx00	径方向分割数 (整数)	出発地点の径方向分割数を指定する.
		長径 (短径) は 1.3 → 0.65 (0.65 → 0.325) を nx00 分割する.	
2	ny00	方位角方向分割数 (整数)	出発地点の方位角方向分割数を指定する.
		方位角方向については 0 → 2π を ny00 分割する.	
3	nph00	トロイダル方向分割数 (整数)	出発地点のトロイダル方向分割数を指定する.
		トロイダル方向については 1 ヘリカルピッチ (0 → π/5) を nph00 分割する ¹⁾ .	
4	del_ms	磁気面間隔 (m)	磁気面を描くときの磁気面間隔を指定する.
5	j_chaos_fln_plot	= 0 (標準)	カオス磁力線領域の全体像をプロットする.
		= 1 (例外)	カオス磁気面領域の磁気島のみプロットする ²⁾ .

1) : ヘリカル磁場には対称性があるので計算の無駄 (実質的に同一地点からの磁力線追跡の重複) を避けるため, nph00 は素数が望ましいと思われる.

2) : j_chaos_fln_plot= 1 を設定した場合, 第 4 データ (18 頁参照) で指定した磁力線追跡打ち切りの最大トーラス周回数 (=mtn) に達しても真空容器壁に到達しなかった磁気島, 磁気面, 結合長の極端に長い磁力線の貫通図が得られるが, あまり物理的意味はないと思われる.

入力例				
径方向分割数	方位角方向分割数	トロイダル方向分割数	磁気面間隔	磁気島のみプロット
50	5	7	0.1	0

3.6 描画最短磁力線結合長 (第 7 データ)

計算条件 & 出力条件

描画最短磁力線結合長(トーラス周回数)

	変数名	値	設定内容
1	cnlmnd ¹⁾	トーラス周回数	描画する磁力線の最短結合長の値を設定する.

1): 磁力線の結合長 (磁力線が真空容器壁に到達するまでの磁力線長) L_{cni} が

$$L_{cni} < 2\pi r_0 \times cnlmnd$$

の場合には、その磁力線は捨て去られる。 $cnlmnd = 0.2$ の場合は磁力線貫通図に初期位置の配置状況を直接反映するものが現れる。(カオス磁力線ではない磁力線の貫通図が現れる)。カオス磁力線の構造を見出すには $cnlmnd = 0.5$ 程度が適切である。

入力例	
描画最短磁力線結合長 (トーラス周回数)	0.5

3.7 子午面断面磁力線貫通図 (第 8 データ)

子午面断面磁力線貫通図	先頭トロイダル角 <input type="text"/> (度)	最終トロイダル角 <input type="text"/> (度)	分割数 <input type="text"/> 0, 27, 3	<input checked="" type="checkbox"/> ヘリカル対称性
-------------	-----------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	---

	変数名	値	設定内容
1	plt_ph_in	先頭トロイダル角 (度)	磁力線貫通図を描く子午面の先頭トロイダル角を指定する。
2	plt_ph_fn	最終トロイダル角 (度)	磁力線貫通図を描く子午面の最終トロイダル角を指定する。
3	plt_ph_bn	分割数 (整数)	トロイダル角の分割数を指定する ¹⁾ 。
4	j_hl_prd	= 1	ヘリカル対称性の成立を仮定して描画する ²⁾ 。
		= 0	描画に対してヘリカル対称性を仮定しない。

1) : 磁力線貫通図が作成される子午面断面のトロイダル角は次式で与えられる。

$$\phi(n) = plt_ph_in + n \times \frac{plt_ph_fn - plt_ph_in}{plt_ph_bn}, \quad n = 0, 1, \dots, plt_ph_bn.$$

2) : LHD の磁力線・磁気面可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe」は、トーラス全周を使って磁力線を追跡しているため、通常のヘリカル対称性 (1 ヘリカルピッチ = $\pi/5$) が成立する配位の計算では、 $j_hl_prd = 1$ と設定すれば計算効率は 10 倍高くなる (1 本の磁力線追跡計算が 10 本分の磁力線のデータを提供する)。通常の計算では、そのため、

$$j_hl_prd = 1$$

と設定すべきである。

入力例			
先頭トロイダル角	最終トロイダル角	トロイダル角の分割数	ヘリカル対称性の仮定の有無
0	27	3	1

3.8 等高線 (磁力線貫通図に書き込む磁場強度) 記入法の設定 (第9データ)

磁力線貫通図に書き込む磁場強度に対する指定を行なう。

等高線	種別 なし	ΔB	B_0
-----	-------	------------	-------

	変数名	値	設定内容
1	j_bplot	= 0	磁力線貫通図に磁場強度分布は書き込まない。
		= 1	磁力線貫通図に B_X の等高線を書き込む。
		= 2	磁力線貫通図に B_Y の等高線を書き込む。
		= 3	磁力線貫通図に B_ϕ の等高線を書き込む。
		= 4	磁力線貫通図に $ B $ の等高線を書き込む。
2	del_b	磁場強度の間隔 (T)	磁場強度分布等高線図における等高線の間隔を指定する。
3	std_b	基準磁場強度 (T)	磁場強度分布等高線の基準の高さを指定する。この高さの等高線は、一点鎖線 (黒) で描画する。

入力例		
磁場強度等高線に対する指定	磁場強度の間隔	基準磁場強度
0	0.1	2.75

3.9 任意断面磁力線貫通図 (第10データ)

<input checked="" type="checkbox"/> 任意断面磁力線貫通図	視点の座標(x)m	<input type="text"/>	視点の座標(y)	<input type="text"/>	視点の座標(z)	<input type="text"/>
	視野の中心座標(x)	<input type="text"/>	視野の中心座標(y)	<input type="text"/>	視野の中心座標(z)	<input type="text"/>
	視野の最大幅	<input type="text"/> (m)	7.0772d0, 1.3691d0, 0.4749d0, 2.6740, 1.9339, -1.3955, 4.2			

	変数名	値	設定内容
1	j_arb_pln	= 0	任意断面での貫通図は作成しない。以下の7パラメータは無視され、磁力線貫通図は第8データ(25頁参照)に述べた子午面断面磁力線貫通図だけとなる。
		≥ 1	視野中心と視点を通る任意断面での磁力線貫通図を作成する。 任意断面画像の原点 (0, 0) は視野中心位置を示す。 第一の方向 (任意断面画像の横軸) は、視野中心から視点へと向かう方向である。 第二の方向 (任意断面画像の縦軸) は、j_arb_plnの値で定まるベクトル n と第一の方向とのベクトル積の方向である。 $n =$ 視野中心のトロイダル方向ベクトル $n =$ 視野中心の径方向ベクトル $n = z$ 方向ベクトル
		= 1	
		= 2	
		= 3	
2	arb_pln_eyex	視点 x 座標 (m)	視点の x 座標を指定する。
3	arb_pln_eyey	視点 y 座標 (m)	視点の y 座標を指定する。
4	arb_pln_eyez	視点 z 座標 (m)	視点の z 座標を指定する。
5	arb_pln_cntx	視野中心 x 座標 (m)	視野中心の x 座標を指定する。
6	arb_pln_cnty	視野中心 y 座標 (m)	視野中心の y 座標を指定する。
7	arb_pln_cntz	視野中心 z 座標 (m)	視野中心の z 座標を指定する。
8	max_scr	視野の最大幅 (m)	トーラスを平面で切断したとき、断面が2個生成される場合がある。視野中心に位置する断面に貫通図を限定するため、視野の最大幅を max_scr で指定する。

入力例							
任意断面貫通図の有無と断面の向き	視点 x 座標	視点 y 座標	視点 z 座標	視野中心 x 座標	視野中心 y 座標	視野中心 z 座標	視野の最大幅
1	7.0772	1.3691	0.4749	2.6740	1.9339	-1.3955	3.2

3.10 立体図とカメラの構え方 (第 11 データ)

立体図とカメラの構え方 <input checked="" type="radio"/> 立体図を作成しない <input type="radio"/> 真空容器壁の走査 <input type="radio"/> 腹這いでカメラを構える <input type="radio"/> 立ってカメラを構える <input type="radio"/> 真空容器の部分的切断	視点の座標(x)	<input type="text"/>	視点の座標(y)	<input type="text"/>	視点の座標(z)	<input type="text"/>
	視野の中心座標(x)	<input type="text"/>	視野の中心座標(y)	<input type="text"/>	視野の中心座標(z)	<input type="text"/>
	視点～スクリーン間の距離	<input type="text"/> (m)	視野最大角	<input type="text"/> (度)	<input type="button" value="参考"/>	
	<input checked="" type="checkbox"/> 断面を表示する	磁力線ドットサイズ: <input type="radio"/> 大 <input checked="" type="radio"/> 中 <input type="radio"/> 小				

変数名	値	設定内容
1	j_rtlhd = 0	立体図を作成しない。(以下の8パラメータは無視される).
	= 1	真空容器壁, ダイバータタイルに対するダイバータ磁力線の到達地点 (diverter footprints) を走査する. 磁力線の立体図は作成しない.
	= 2	足を LHD の中心, 頭を磁気面に向けた腹這い姿勢でカメラを構え, 磁力線の立体図を作成する.
	= 3	立ってカメラを構えた磁力線の立体図を作成する.
	= 4	真空容器を部分的に切断して磁気面・磁力線の立体図を作成する.

カメラの構え方 (第 1 パラメータ j_rtlhd の値) により, 第 2 ~ 9 パラメータの設定値は意味合いが変化する。以下では, 次の 4 種の単位ベクトルを定義する。

$$\begin{pmatrix} n_0 \\ n_\phi \\ n_r \\ n_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{視野中心へ向かう視線方向単位ベクトル} \\ \text{視野中心のトロイダル方向単位ベクトル} \\ \text{視野中心の径方向単位ベクトル} \\ z \text{ 方向単位ベクトル} \end{pmatrix} \quad (7)$$

3.10.1 真空容器壁, ダイバータタイルの走査 (j_rtlhd= 1 の場合)

スクリーンの横軸方向は $n_0 \times (n_\phi \times n_0)$, スクリーンの縦軸方向は $n_\phi \times n_0$ とする。すなわち, 横軸はほぼトロイダル角が増加する方向となる。このカメラの構え方はダイバータ磁力線の到達地点 (diverter footprints) を連続的に走査するのに適している。磁力線の立体図は作成せず, 第 2 パラメータ以下は, 真空容器壁, ダイバータタイルに対するダイバータ磁力線の到達地点 (diverter footprints) を連続的に走査することを前提に次のように定める。視点は磁気軸と真空容器壁との中間位置に設定する。カメラはヘリカル回転座標系の上で固定する。この状態でトロイダル角を掃引すれば真空容器壁, ダイバータタイル全体を連続的に走査できる。視点と視野の中心位置, および, 真空容器壁との関係は Fig.2 を見れば参考となる。

立体図とカメラの構え方 <input type="radio"/> 立体図を作成しない <input checked="" type="radio"/> 真空容器壁の走査 <input type="radio"/> 腹這いでカメラを構える <input type="radio"/> 立ってカメラを構える <input type="radio"/> 真空容器の部分的切断	走査開始トロイダル角	<input type="text"/>	走査終端トロイダル角	<input type="text"/>	トロイダル角分割数	<input type="text"/>
	視野中心座標(x)	<input type="text"/>	視野中心座標(y)	<input type="text"/>	視点移動距離	<input type="text"/>
	視点～スクリーン間の距離	<input type="text"/> (m)	視野最大角	<input type="text"/> (度)	<input type="button" value="参考"/>	
	<input checked="" type="checkbox"/> 断面を表示する	磁力線ドットサイズ: <input type="radio"/> 大 <input checked="" type="radio"/> 中 <input type="radio"/> 小				

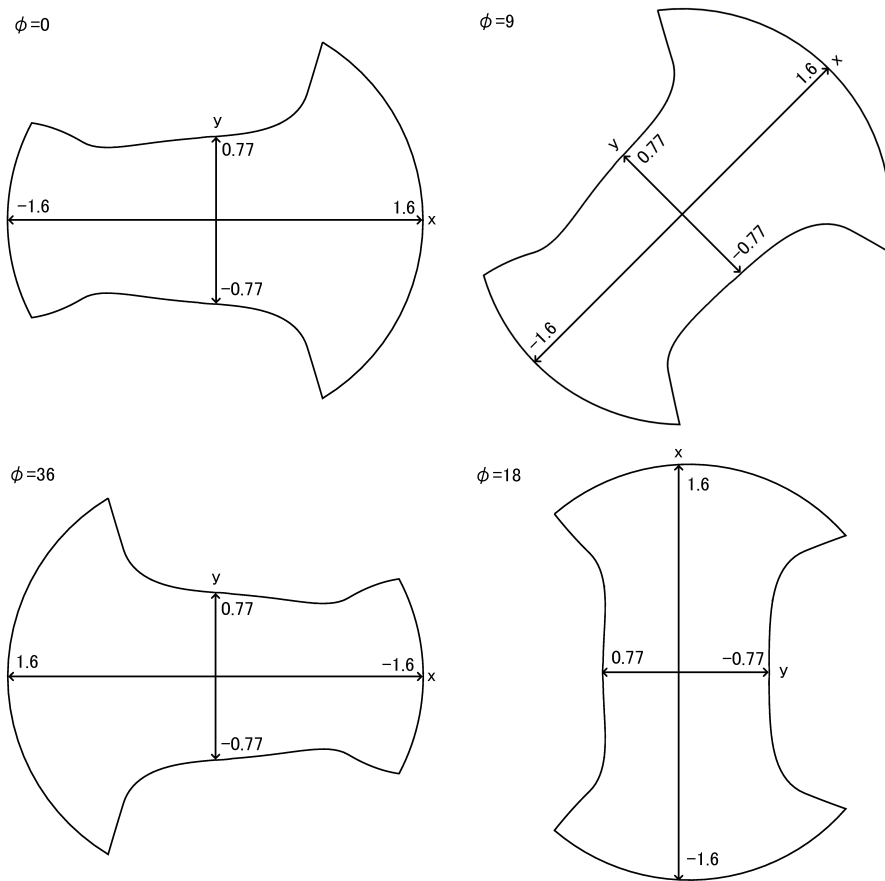


図 2: 回転ヘリカル座標 (X, Y) と真空容器壁との関係

	変数名	値	設定内容
2	ph_scn_in	走査開始トロイダル角 (度)	視点の先頭トロイダル角を指定する.
3	ph_scn_fn	走査終端トロイダル角 (度)	視点の終端トロイダル角を指定する.
4	ph_scn_bn	トロイダル角分割数 (個)	視点トロイダル角の分割数を指定する.
5	x_scn	視野中心 X 座標 (m)	視野中心の X 座標を指定する.
6	y_scn	視野中心 y 座標 (m)	視野中心の y 座標を指定する.
7	mu_scn ¹⁾	視点移動距離 (m)	視点を磁気軸から真空容器壁側 (視野中心側) へ移動させる距離を指定する.
8	l_scrn	視点スクリーン間 (m)	視点とスクリーン間の距離を指定する. 通常のカメラ並みの 0.05 程度を設定すればよい.
9	vis_angl	視野最大角 (度)	立体図を作成する時の視野の最大角 (立体図の横軸方向) を指定する. 立体図縦軸方向視野の最大角は自動調整する.
10, 11	dot_s ²⁾	切断面の描画とドットサイズ	見たままの立体図か切断面を示す立体図かを指定するとともに, 磁力線のドットサイズを指定する.

1) : LHD の真空容器壁の断面はダンベル型 (垂鈴型) をしているため, 磁気軸からアウトボード側内壁を見ると影の部分 (立体図で表現されない内壁) が現れる. 影の部分为了避免するには視点を真空容器壁に近づける必要がある.

2) 見たままの立体図の場合は, dot_s に正の数値, 切断面を示す立体図の場合は, dot_s に負の数値が設定される. 切断面の指定は次の規則に従う. 視点から, 視野中心へ向かう単位ベクトルを n_0 , 視野中心のトロイダル方向単位ベクトルを n_ϕ , z 方向 (鉛直方向) 単位ベクトルを n_z と表す.

1. トーラスを接線方向に見ていると判断できるとき, すなわち,

$$|n_0 \cdot n_\phi| > 0.829 \text{ の場合.}$$

が成立すれば, 視野中心位置を通る子午面を切断面とする. そうでなければ,

2. トーラスを見下ろし, あるいは見上げていると判断できるとき, すなわち,

$$|n_0 \cdot n_z| > 0.829 \text{ の場合.}$$

が成立すれば, 赤道面 ($z = 0$) を切断面とする.

3. 上記以外は $r = \langle r_{ax} \rangle$ の円筒面を切断面とする. ($\langle r_{ax} \rangle$ は磁気軸の平均値)

dot_s	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ドットサイズ (mm)	0.4	0.2	0.1	0.07	0.02	0.01	1	2	3

表 1: 立体図を描画する実際のドットサイズとパラメータ dot_s の値の関係

描画される磁力線のドットの大きさは, dot_s の絶対値で指定する.

入力例								
走査開始 トロイダル角	走査終端 トロイダル角	トロイダル角分割数	視野中心 X 座標	視野中心 Y 座標	視点移動 距離	視点スクリーン間	視野最大角	ドットサイズ
0	72	12	-1.5	0	-0.1	0.05	40	2

3.10.2 腹這い姿勢でカメラを構えた磁力線立体図の作成 (j_rtlhd=2 の場合)

スクリーンの横軸方向は $n_r \times n_0$, スクリーンの縦軸方向は $n_0 \times (n_r \times n_0)$ とする. すなわち, 横軸はほぼトロイダル角が増加する方向となる. U, L ポートから真空容器内を見た立体図の作成に適している. 立体図は 1 枚だけ作成する.

立体図とカメラの構え方 <input type="radio"/> 立体図を作成しない <input type="radio"/> 真空容器壁の走査 <input checked="" type="radio"/> 腹這いでカメラを構える <input type="radio"/> 立ってカメラを構える <input type="radio"/> 真空容器の部分的切断	視点座標(x)	<input type="text"/>	視点座標(y)	<input type="text"/>	視点座標(z)	<input type="text"/>
	視野中心座標(x)	<input type="text"/>	視野中心座標(y)	<input type="text"/>	視野中心座標(z)	<input type="text"/>
	視点~スクリーン間の距離	<input type="text"/> (m)	視野最大角	<input type="text"/> (度)	参考	
	<input checked="" type="checkbox"/> 断面を表示する	磁力線ドットサイズ: <input type="radio"/> 大 <input checked="" type="radio"/> 中 <input type="radio"/> 小				

	変数名	値	設定内容
2	rtlhd_eyex	視点の x 座標 (m)	視点の x 座標を指定する.
3	rtlhd_eyey	視点の y 座標 (m)	視点の y 座標を指定する.
4	rtlhd_eyez	視点の z 座標 (m)	視点の z 座標を指定する.
5	rtlhd_cntx	視野中心の x 座標 (m)	視野中心の x 座標を指定する.
6	rtlhd_cnty	視野中心の y 座標 (m)	視野中心の y 座標を指定する.
7	rtlhd_cntz	視野中心の z 座標 (m)	視野中心の z 座標を指定する.
8	l_scrn ¹⁾	視点スクリーン間 (m)	視点とスクリーン間の距離を指定する.
9	vis_angl	視野最大角 (度)	立体図を作成する時の視野の最大角度 (立体図の横軸方向) を指定する. 立体図縦軸方向視野の最大角は自動調整する.
10, 11	dot_s ²⁾		見たままの立体図か切断面を示す立体図かを指定するとともに, 磁力線のドットサイズを指定する.

1) : 真空容器内に視点を設定するときは, 通常のカメラ並みの 0.05 程度を l_scrn に設定すればよい. 計測装置によっては真空容器外に設置するものも数多い. このときは計測装

置 (視点) の前方に真空容器の外壁が存在する (LHD の磁力線・磁気面可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe」には、真空容器に設けられているポート類の開口部まではデータとして組み込まれていない)。その時でも、l_scrn を適当に設定し、立体図を作成するスクリーン (フィルム) 位置を真空容器内に持ち込めば、真空容器外から真空容器内の立体画像が作成可能となる。LHD の磁力線・磁気面可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe」では、スクリーンと視点間に位置する構造物は画像化しない。

²⁾ : dot_s の詳細については表 1(31 頁) 参照のこと。

入力例								
視点の x 座標	視点の y 座標	視点の z 座標	視野中心の x 座標	視野中心の y 座標	視野中心の z 座標	視点スクリーン間	視野最大角	ドットサイズ
7.0772	1.3691	0.4749	2.6740	1.9339	-1.3955	2.2	10	2

3.10.3 立ってカメラを構えた場合の磁力線立体図の作成 (j_rtlhd= 3 の場合)

スクリーンの横軸方向は $n_z \times n_0$, スクリーンの縦軸方向は $n_0 \times (n_z \times n_0)$ とする。すなわち、縦軸はほぼ、鉛直方向となる。O, I ポートから真空容器内を見た立体図の作成に適している。立体図は 1 枚だけ作成する。

立体図とカメラの構え方 <input type="radio"/> 立体図を作成しない <input type="radio"/> 真空容器壁の走査 <input type="radio"/> 膝這いでカメラを構える <input checked="" type="radio"/> 立ってカメラを構える <input type="radio"/> 真空容器の部分的切断	視点座標(x)	<input type="text"/>	視点座標(y)	<input type="text"/>	視点座標(z)	<input type="text"/>
	視野中心座標(x)	<input type="text"/>	視野中心座標(y)	<input type="text"/>	視野中心座標(z)	<input type="text"/>
	視点～スクリーン間の距離	<input type="text"/> (m)	視野最大角	<input type="text"/> (度)	参考	
	<input checked="" type="checkbox"/> 断面を表示する	磁力線ドットサイズ: <input type="radio"/> 大 <input checked="" type="radio"/> 中 <input type="radio"/> 小				

	変数名	値	設定内容
2	rtlhd_eyex	視点の x 座標 (m)	視点の x 座標を指定する。
3	rtlhd_eyey	視点の y 座標 (m)	視点の y 座標を指定する。
4	rtlhd_eyez	視点の z 座標 (m)	視点の z 座標を指定する。
5	rtlhd_cntx	視野中心の x 座標 (m)	視野中心の x 座標を指定する。
6	rtlhd_cnty	視野中心の y 座標 (m)	視野中心の y 座標を指定する。
7	rtlhd_cntz	視野中心の z 座標 (m)	視野中心の z 座標を指定する。
8	l_scrn ¹⁾	視点スクリーン間 (m)	視点とスクリーン間の距離を指定する。
9	vis_angl	視野最大角 (度)	立体図を作成する時の視野の最大角度 (立体図の横軸方向) を指定する。立体図縦軸方向視野の最大角は自動調整する。
10, 11	dot_s ²⁾		見たままの立体図か切断面を示す立体図かを指定するとともに、磁力線のドットサイズを指定する。

¹⁾ : l_scrn については、32 ページ参照のこと。

²⁾ : dot_s の詳細については表 1(31 頁) 参照のこと。

入力例								
視点の x 座標	視点の y 座標	視点の z 座標	視野中心の x 座標	視野中心の y 座標	視野中心の z 座標	視点スクリーン間	視野最大角	ドットサイズ
7.0772	1.3691	0.4749	2.6740	1.9339	-1.3955	2.2	10	2

3.10.4 真空容器を部分的に切断した磁力線立体図の作成 ($j_rtlhd=4$ の場合)

LHD の磁気面、磁力線構造を大局的に把握するには、真空容器を部分的に切断した磁力線立体図が有効である。この磁力線立体図を作成するためのパラメータ設定を行う。真空容器壁の切断はトロイダル角が $phcr1$ と $phcr2$ とで行うとする。視点のトロイダル角は取り除かれた部分の中央 $(phcr1 + phcr2)/2$ に設定し、 (r, z) はパラメータで指定する。視野の中心はトロイダル角が $(phcr1 + phcr2)/2$ となる磁気軸上に設定する。真空容器内の磁力線は奥まで見通せるので描画する磁力線の上限、下限も別途 ($phcr0, phcr3$) 設定する。

立体図とカメラの構え方 <input type="radio"/> 立体図を作成しない <input type="radio"/> 真空容器壁の走査 <input type="radio"/> 膝這いでカメラを構える <input type="radio"/> 立ってカメラを構える <input checked="" type="radio"/> 真空容器の部分的切断	トロイダル角下限1 <input type="text"/>	トロイダル角下限2 <input type="text"/>	トロイダル角上限1 <input type="text"/>
	トロイダル角上限2 <input type="text"/>	視野座標(γ) <input type="text"/>	視野座標(z) <input type="text"/>
	視点～スクリーン間の距離 <input type="text"/> (m)	視野最大角 <input type="text"/> (度)	<input type="button" value="参考"/>
	<input checked="" type="checkbox"/> 断面を表示する	磁力線ドットサイズ: <input type="radio"/> 大 <input checked="" type="radio"/> 中 <input type="radio"/> 小	

	変数名	値	設定内容
2	$phcr0$	トロイダル角下限 1 (度)	描画する磁力線のトロイダル角下限を指定。
3	$phcr1$	トロイダル角下限 2 (度)	描画する真空容器のトロイダル角下限を指定。
4	$phcr2$	トロイダル角上限 2 (度)	描画する真空容器のトロイダル角上限を指定。
5	$phcr3$	トロイダル角上限 1 (度)	描画する磁力線のトロイダル角上限を指定。
6	r_eye	視点 r 座標 (m)	視点の r 座標を指定する。
7	z_eye	視点 z 座標 (m)	視点の z 座標を指定する。
8	l_scrn ¹⁾	視点スクリーン間 (m)	視点とスクリーン間の距離を指定する。
9	vis_angl	視野最大角 (度)	立体図を作成する時の視野の最大角度 (立体図の横軸方向) を指定する。立体図縦軸方向視野の最大角は自動調整する。
10, 11	dot_s ²⁾		見たままの立体図か切断面を示す立体図かを指定するとともに、磁力線のドットサイズを指定する。

1) : l_scrn については、32 ページ参照のこと。

2) : dot_s の詳細については表 1(31 頁) 参照のこと。

入力例								
磁力線ト ロイダル 角下限	真空容器 トロイダ ル角下限	真空容器 トロイダ ル角上限	磁力線ト ロイダル 角上限	視点 r 座 標	視点 z 座 標	視点スク リーン間	視野最大 角	ドットサ イズ
-3	18	72	108	10	7.5	0.05	50	3

3.11 立体図に表示する構造物と磁力線の指定 (第 12 データ)

立体図に表示する構造物の指定と、立体図に磁力線を描画するかどうかを指定する。

立体図に表示する構造物と磁力線	<input type="checkbox"/> 真空容器 <input type="checkbox"/> リミター <input type="checkbox"/> ヘリカルコイル <input type="checkbox"/> ヘリカルコイル容器 <input type="checkbox"/> 垂直磁場コイル <input type="checkbox"/> 磁気島コイル <input type="checkbox"/> 磁力線
-----------------	--

	変数名	値	設定内容
1	swtch_vevs	= 0 = 1	真空容器壁を立体図に書き込まない。 真空容器壁を立体図に書き込む。
2	swtch_lmtr	= 0 = 1	リミターを立体図に書き込まない。 リミターを立体図に書き込む。
3	swtch_hlc	= 0 = 1	ヘリカルコイル超伝導線を立体図に書き込まない。 ヘリカルコイル超伝導線を立体図に書き込む。
4	swtch_hlvc	= 0 = 1	ヘリカルコイル容器を立体図に書き込まない。 ヘリカルコイル容器を立体図に書き込む。
5	swtch_vtc	= 0 = 1	垂直磁場コイルを立体図に書き込まない。 垂直磁場コイルを立体図に書き込む。
6	swtch_lid	= 0 = 1	磁気島コイル (LID コイル) を立体図に書き込まない。 磁気島コイル (LID コイル) を立体図に書き込む。
7	swtch_lines	= 0 = 1	磁力線を立体図に書き込まない。 磁力線を立体図に書き込む。

入力例						
真空容器壁	リミター	ヘリカルコイ ル超伝導線	ヘリカルコイ ル容器	垂直磁場コイ ル容器	磁気島コイル	磁力線
1	1	0	0	0	0	1

3.12 磁力線追跡停止の指定 (第 13 データ)

磁力線追跡停止の条件を指定をする。磁力線追跡は回転ヘリカル座標系で表した位置座標 (X, Y) が、

$$|X| > 2 \text{ m}, \text{ または } |Y| > 1.4 \text{ m}$$

を満たせば必ず停止する。磁力線はそこに到達する以前に、真空容器壁を貫通し、真空容器内構造物 (リミター, あるいはICRF アンテナ等) を貫通する場合もあり得る。真空容器内構造物に衝突した時点, あるいは真空容器壁を貫通した時点で 磁力線追跡を停止させるかどうかを指定する。磁力線追跡を停止するしないにかかわらず, リミター上および真空容器壁上には通過地点 (diverter footprints) を必ず刻印する。

磁力線追跡停止	<input type="checkbox"/> リミター <input type="checkbox"/> 真空容器
---------	---

	変数名	値	設定内容
1	j_lmtr_stp	= 0 = 1	磁力線はリミターで停止する。 磁力線はリミターを貫通し, 停止しない。
2	j_vcvs_stp	= 0 = 1	磁力線は真空容器壁で停止する。 磁力線は真空容器壁を貫通し, 停止しない。

入力例	
リミターでの磁力線の停止または通過の指定	真空容器壁での磁力線の停止または通過の指定
1	1

3.13 コメント (第14データ)

図に書き込む任意コメントを指定する。

コメント	<input type="text"/>
------	----------------------

	変数名	値	設定内容
1	cmnt2	'コメント'	図に書き込む任意のコメント。コメントは必ずアポストロフィーで囲むこと。

入力例
コメント
'SAMPLE DATA #2'

3.14 PNG 出力 (ps ファイルの png ファイルへの変換)

ps ファイルに出力された図を png ファイルに変換・出力する場合に指定する。作成される png ファイルは ps ファイルの拡張子を .png に変更し, ps ファイルのページ番号順に通し番号をファイル名に付加する。

<input checked="" type="checkbox"/> PNG 出力	300 (DPI)
--	-----------

	値	設定内容
1	解像度 (DPI)	画像ファイルの解像度 (デフォルトは 300DPI)。

画像の縦横は、おおよそ A 4 用紙横に収まるサイズ (縦 2550pixel, 横 3300pixel) となります。

入力例
解像度
300

入力データは以上で完結する。

4 数値計算例

この節は「LHD の磁力線・磁気面可視化プログラム」LHD_lines_of_force.exe による数値計算結果を述べる。

磁力線結合長 L_{cni} に基づく磁力線の色分けは次のように行う。

$L_{cni} \leq 12.25$ m (0.5 toroidal turn) プロットせず (cnlmnd=0.5 の場合)

$L_{cni} \leq 24.5$ m (1 toroidal turn) 赤: RGB=(1,0,0)

$L_{cni} \leq 49.0$ m (2 toroidal turn) 黄: RGB=(1,1,0)

$L_{cni} \leq 122.5$ m (5 toroidal turn) 緑: RGB=(0,1,0)

$L_{cni} \leq 245.0$ m (10 toroidal turn) 水色: RGB=(0,1,1)

$L_{cni} \leq mtn \times (2\pi r_0) = mtn \times 24.50$ (m) (mtn toroidal turn) 青色: RGB=(0,0,1)

$L_{cni} > mtn \times (2\pi r_0) = mtn \times 24.50$ (m) (mtn toroidal turn) 鮮紅色: RGB=(1,0,1)

磁気面 magenta: (鮮紅色: RGB=(1,0,1), ドットサイズ = 0.7 mm)

パラメータ cnlmnd については 25 頁, パラメータ mtn については 18 頁を参照のこと。

計算結果は, 磁力線ダイバータチャート, 子午面断面磁力線貫通図, 任意断面磁力線貫通図, 磁力線立体図の順で作成される。

- 磁力線ダイバータチャート

LHD の真空容器は大半径 3.9 m, 小半径 1.6 m の円環型 (ドーナツ型) を基本としている。当プログラムは真空容器壁から 0.15 m 内側, すなわち, 小半径 1.45 m の円環型表面でのダイバータ磁力線痕 (diverter footprints) を示す。横軸はトロイダル角, 縦軸は方位角を示す。j_hl_prd=1 と設定されているとき (25 頁参照) 横軸は 2 ヘルリカルピッチ ($0 \leq \phi \leq 2\pi/5$), それ以外はトーラス一周 ($0 \leq \phi \leq 2\pi$) が設定される。

- 子午面断面および任意断面での磁力線貫通図, 磁力線立体図の作図条件は入力データで設定する。

4.1 ICRF 長時間放電時の磁力線・磁気面解析

LHD の代表的磁場配位の一つとして、ICRF 長時間放電 (ショット番号 #53754) を実現した配位を取り上げる。この放電では磁気軸掃引モードを採用しているので、時刻 $t = 360 \text{ sec}$ におけるコイル電流値での磁力線・磁気面の解析結果を示す。コイル電流値は下記のようになっていた。

T(SEC)	H_O (A)	H_M (A)	H_I (A)	OV (A)	IS (A)	IV (A)
360	11071	11062	11073	-17630	-39654	98715

表 2: ICRF 長時間放電 (ショット番号 #53754) の $t = 360 \text{ sec}$ におけるコイル電流値

4.1.1 ICRF 長時間放電時の磁力線・磁気面解析—case(1)

「LHD の磁力線・磁気面可視化プログラム」LHD_lines_of_force.exe の GUI (6 頁参照) が作成する入力データ (fort.50) は次のようになる。


```

1 'icrf8_cut.ps' 'icrf8_fort.40'
## 新規計算の実行 (再画像化処理時は 0 と設定), PS ファイル 計算結果格納ファイル
11071, 11062, 11073, -17630, -3965.4, 9871.5 ' #53754, T=360 SEC, RAX=3.6865 M'
## コイル電流 H_O, H_M, H_I, OV, IS, IV (A) とコメント
1, 1, 0.07, 0, 'limiter.csv'
## ダイバータタイトル, アンテナの有無, アンテナ後退位置, 追加リミターの有無と csv ファイル名
20, 0
## 最大トーラス周回数と追跡方向 (-1: -B 方向, 0: 両方向, 1: B 方向)
3
## 出発点座標系 (0:回転ヘリカル座標系, 1:円柱座標系, 2:直交座標系, 3:カオス磁力線と磁気面)
200, 5, 7, 0.1, 0
## 径, ポロイダル, トロイダル (1 ヘリカルピッチ) 各方向分割数, 磁気面間隔, 磁気島プロットせず
0.5,
## 描画最短磁力線結合長 (トーラス周回数)
0 27 3 1
## 子午面磁力線貫通図の指定 (phi_ini, phi_max, 分割数, ヘリカル対称性 (= 1 : 仮定する)
4, 0.1, 2.5
## 磁場強度等高線図プロットの有無と, 間隔, 基準値
1 -1.233 -3.4589 2.357 -1.233 -3.4589 0 3.2
## 任意断面磁力線貫通図の有無と任意断面を指定する視点と視野中心. 最大視野
4 54d0 72d0 108d0 126d0 3.7d0 8d0 .01, 22, 2,
## 立体図有無, 視点, 視野中心, 視点とスクリーン間距離, 視野角, (切断面/見たまま)&ドットサイズ
1, 1, 1, 1, 1, 0, 1
## 立体図描画物:真空容器, リミター, ヘリカルコイルと容器, 垂直磁場コイル, 磁気島コイル, 磁力線
1, 1
## リミターおよび真空容器での磁力線追跡停止 (1) あるいは磁力線透過 (0) の指定
' ICRF LONG PULSE'
## 計算結果に書き込む任意のコメント. データの終了

```

磁気軸位置と磁気軸上磁場強度は次式で与えられることが示される (16 頁 (6) 式参照).

$$\begin{aligned}
a_1 &= -0.22799, & a_3 &= -0.60418 \times 10^{-4}, & b_1 &= 0.1885892, & b_3 &= 0.1226752 \times 10^{-3}, \\
\langle r_{ax} \rangle &= 3.692, & \delta r_{ax} &= 0.39588 \times 10^{-1}, & \langle z_{ax} \rangle &= -.6 \times 10^{-18}, & \delta z_{ax} &= 0.39222 \times 10^{-1} \\
\langle B_{ax} \rangle &= 2.695, & \delta B_{ax} &= 0.11862 \times 10^{-1}, & \nu_{ax}/2\pi &= 0.340, & & (\text{単位: SI 単位系}).
\end{aligned}$$

磁力線線ダイバータチャート, 子午面伝面磁力線貫通図, 任意断面磁力線貫通図, 磁力線立体図を以下に示す.

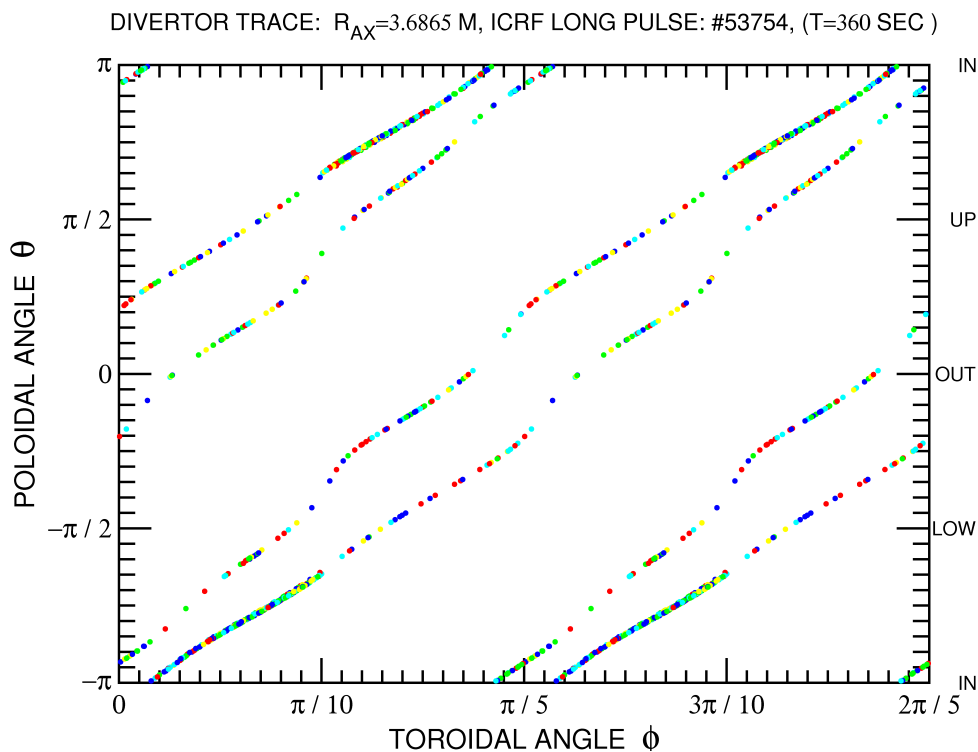


図 3: ダイバータチャート. 横軸はトロイダル角, 縦軸はポロイダル角を示す. ダイバータ磁力線の結合長に応じてダイバータ痕 (diverter footprints) が色分け (36 頁参照) されている.

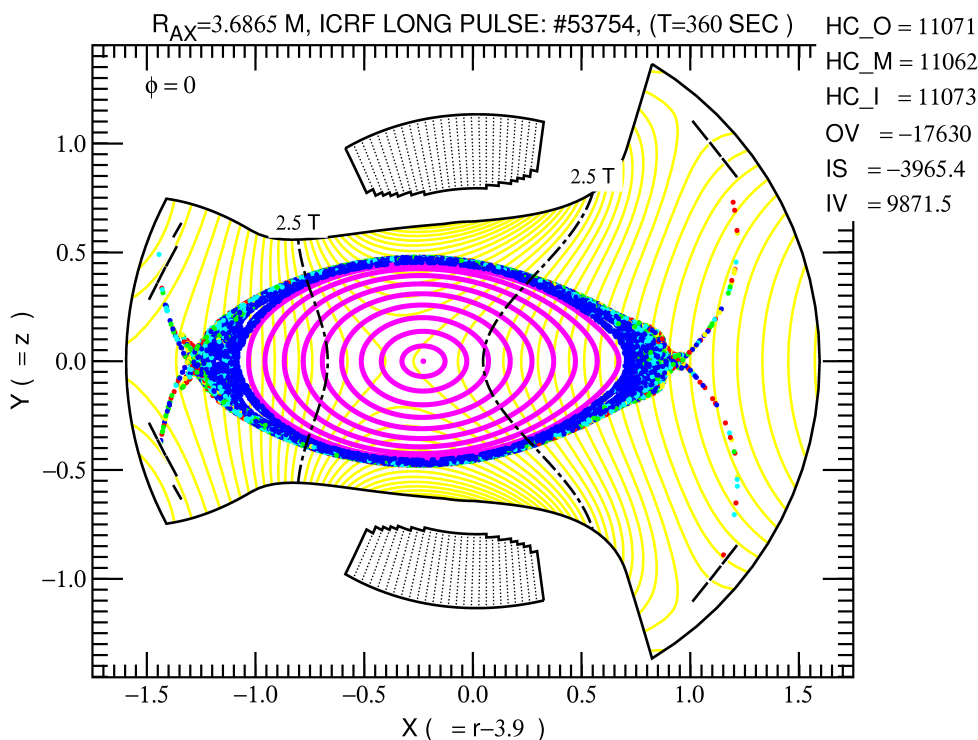


図 4: 子午面 $\phi = 0$ における磁力線貫通図. 横軸は回転ヘリカル座標での X 軸, 縦軸は Y 軸. ダイバータ磁力線は結合長に応じて色分け (36 頁参照) されている. 磁気面は鮮紅色のドットで記されている.

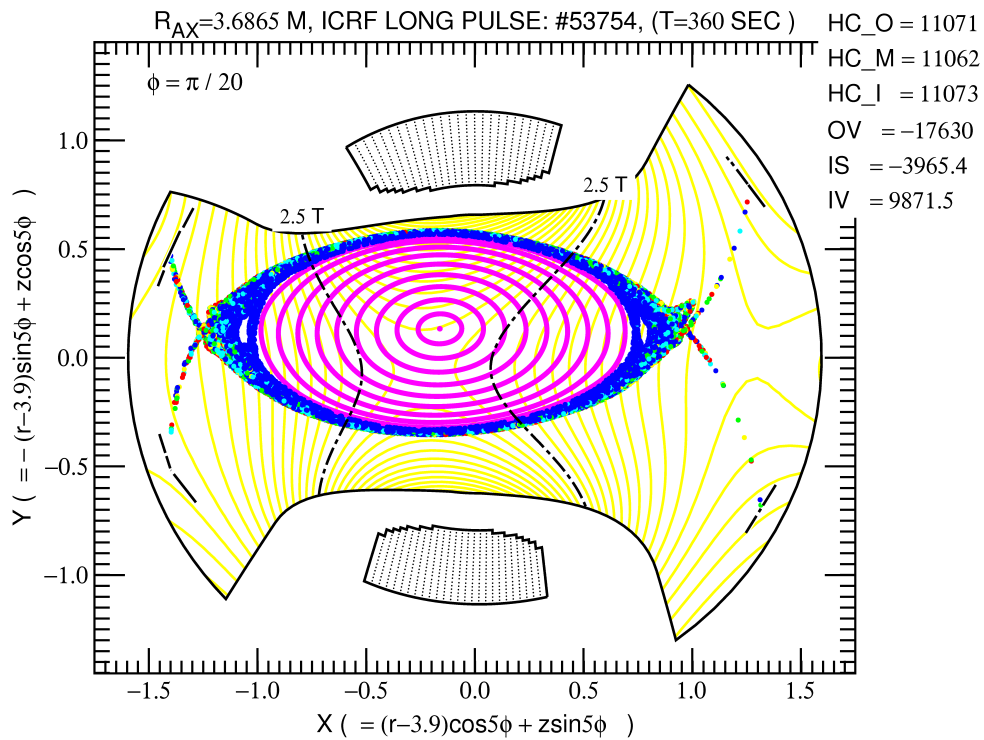


図 5: 子午面 $\phi = \pi/20$ における磁力線貫通図と磁気面. 横軸は回転ヘリカル座標での X 軸, 縦軸は Y 軸.

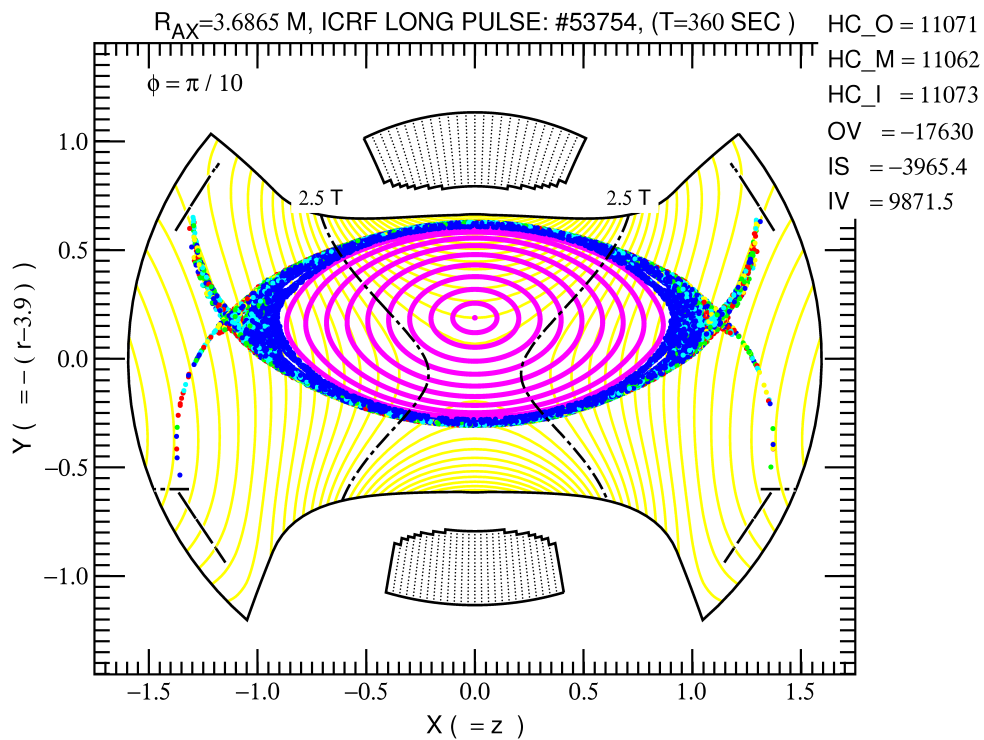


図 6: 子午面 $\phi = \pi/10$ における磁力線貫通図. 横軸は回転ヘリカル座標での X 軸, 縦軸は Y 軸.

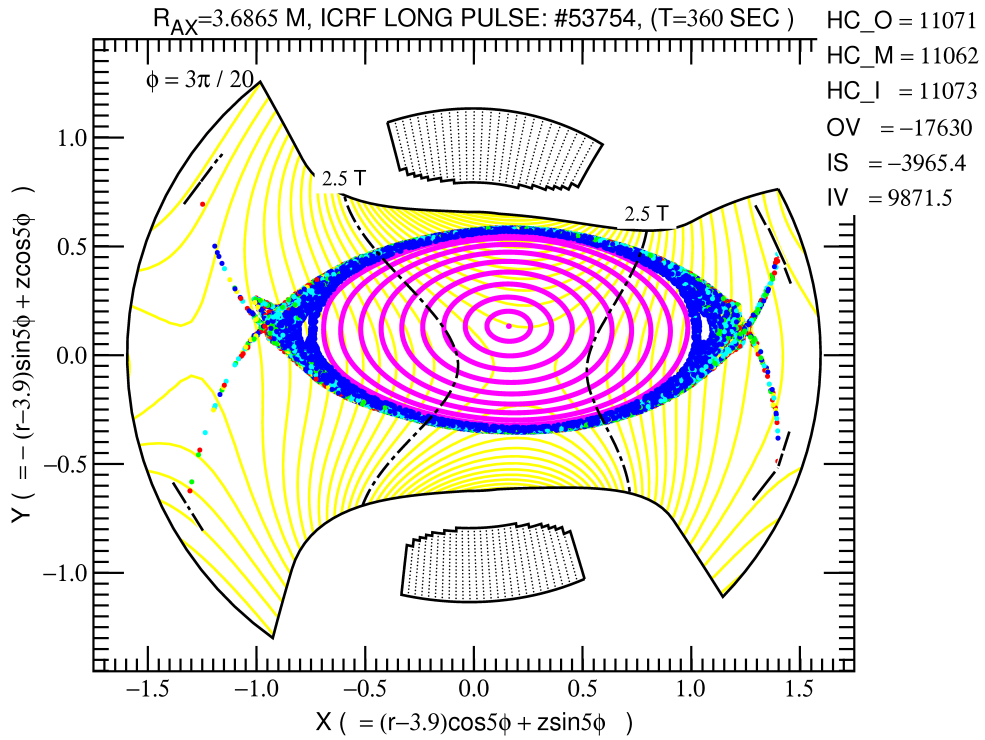


図 7: 子午面 $\phi = 3\pi/20$ における磁力線貫通図. 横軸は回転ヘリカル座標での X 軸, 縦軸は Y 軸.

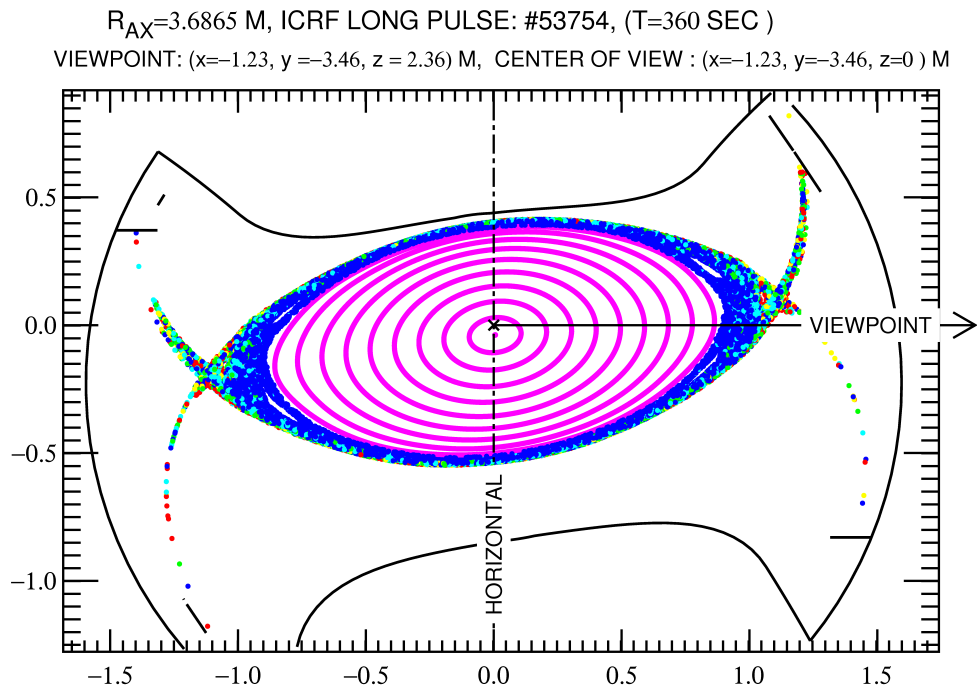


図 8: U ポートに設置された ccd カメラ位置 $((x, y, z) = (-1.233, -3.4589, 2.357) \text{ m})$ から真下を見下ろす視線が定める子午面を通過する磁力線貫通図

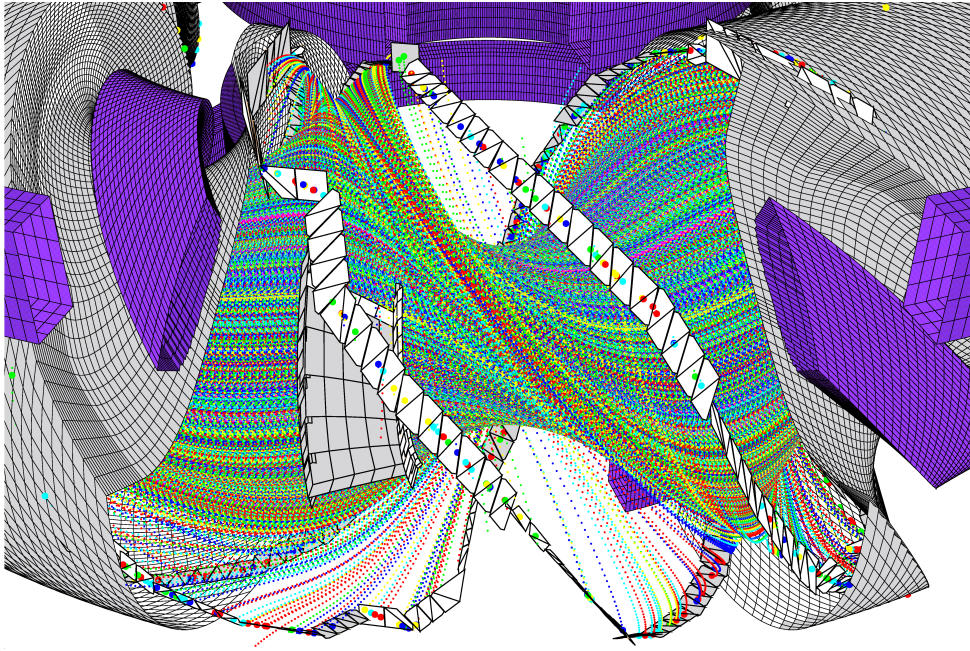


図 9: 真空容器壁を $7\pi/20 \leq \phi \leq 11\pi/20$ の範囲で切除してカオス磁力線の立体図を示す. ダイバータタイルと ICRF アンテナも示されている. コイル電流は表 2 に示され, ICRF 長時間放電 (ショット番号 #53754, $t = 360$ sec) のときの値である.

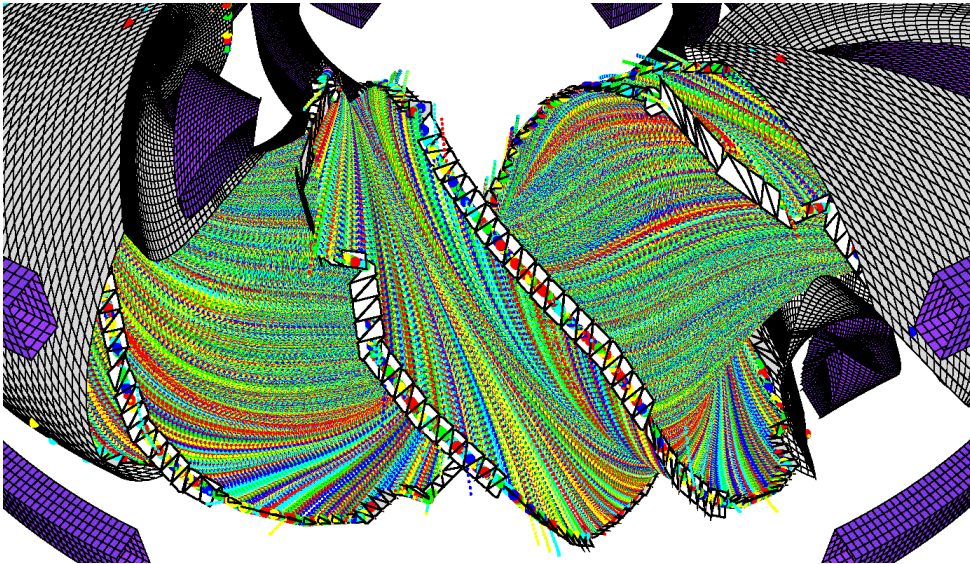


図 10: 磁力線追跡の出発地点を稠密に設定すればダイバータレッグも明瞭に描画される. LHD における高性能プラズマ保持を実現しているカオス磁力線とダイバータレッグの興味深い構造が見える.

4.1.2 ICRF 長時間放電時の磁力線・磁気面解析—case(2)

LHD のダイバータタイルは強制水冷され、その除熱能力は 3MW の ICRF 定常加熱実験に耐えることができる (設計値)。そのため、ICRF 長時間放電の実現にはダイバータ磁力線がダイバータタイルに受け止められていることが重要である。このことを確認しよう。「LHD の磁力線・磁気面可視化プログラム」LHD_lines_of_force.exe の GUI (6 頁参照) では次のような入力データを (fort.50) を作成する。

```
01) 'icrf8_diverter' 'icrf8_diverter.40'  
## 新規計算の実行 (再画像化処理時は 0 と設定), PS ファイル, 計算結果格納ファイル  
11071, 11062, 11073, -17630, -3965.4, 9871.5 ' #53754, T=360 SEC, RAX=3.6865 M'  
## コイル電流 H_O, H_M, H_I, OV, IS, IV (A) とコメント  
1, 1, 0.07, 0, 'limiter.csv'  
## ダイバータタイル, アンテナの有無, アンテナ後退位置, 追加リミターの有無と csv ファイル名  
20, 0  
## 最大トラス周回数と追跡方向 (-1: -B 方向, 0: 両方向, 1: B 方向)  
3  
## 出発点座標系 (0:回転ヘリカル座標系, 1:円柱座標系, 2:直交座標系, 3:カオス磁力線と磁気面)  
10002), 31, 7, 0.1, 0  
## 径, ポロイダル, トロイダル (1 ヘリカルピッチ) 各方向分割数, 磁気面間隔, 磁気島プロットせず  
0.5,  
## 描画最短磁力線結合長 (トラス周回数)  
0 0 0 1  
## 子午面磁力線貫通図の指定 (phi_ini, phi_max, 分割数, ヘリカル対称性 (= 1 : 仮定する))  
4, 0.1, 2.5  
## 磁場強度等高線図プロットの有無と, 間隔, 基準値  
0 -1.233 -3.4589 2.357 -1.233 -3.4589 0 3.2  
## 任意断面磁力線貫通図の有無と任意断面を指定する視点と視野中心. 最大視野  
13) 0d0, 72d0, 12, -1.6d0, 0d0, 0.1d0, .1d0, 32d0 1  
## 立体図の有無と走査データ, 視野中心, 視点移動距離, 視野角 (切断面/見たまま)&ドットサイズ  
1, 1, 1, 1, 1, 0, 04)  
## 立体図描画物:真空容器, リミター, ヘリカルコイルと容器, 垂直磁場コイル, 磁気島コイル, 磁力線  
1, 1  
## リミターおよび真空容器での磁力線追跡停止 (1) あるいは磁力線透過 (0) の指定  
' ICRF LONG PULSE'  
### 計算結果に書き込む任意のコメント. データの終了
```

前小節—case(1)—とのデータの主な違いは次の通りである。

- 1): ファイル 'icrf8_diverter.40' に磁力線追跡計算は格納されている。再画像化処理を行う。
- 2): ダイバータ痕を稠密に描くために、出発点を稠密に設定した。
- 3): 真空容器壁、ダイバータタイルの走査と指定した。
- 4): 磁力線自身は立体図に含ませない。

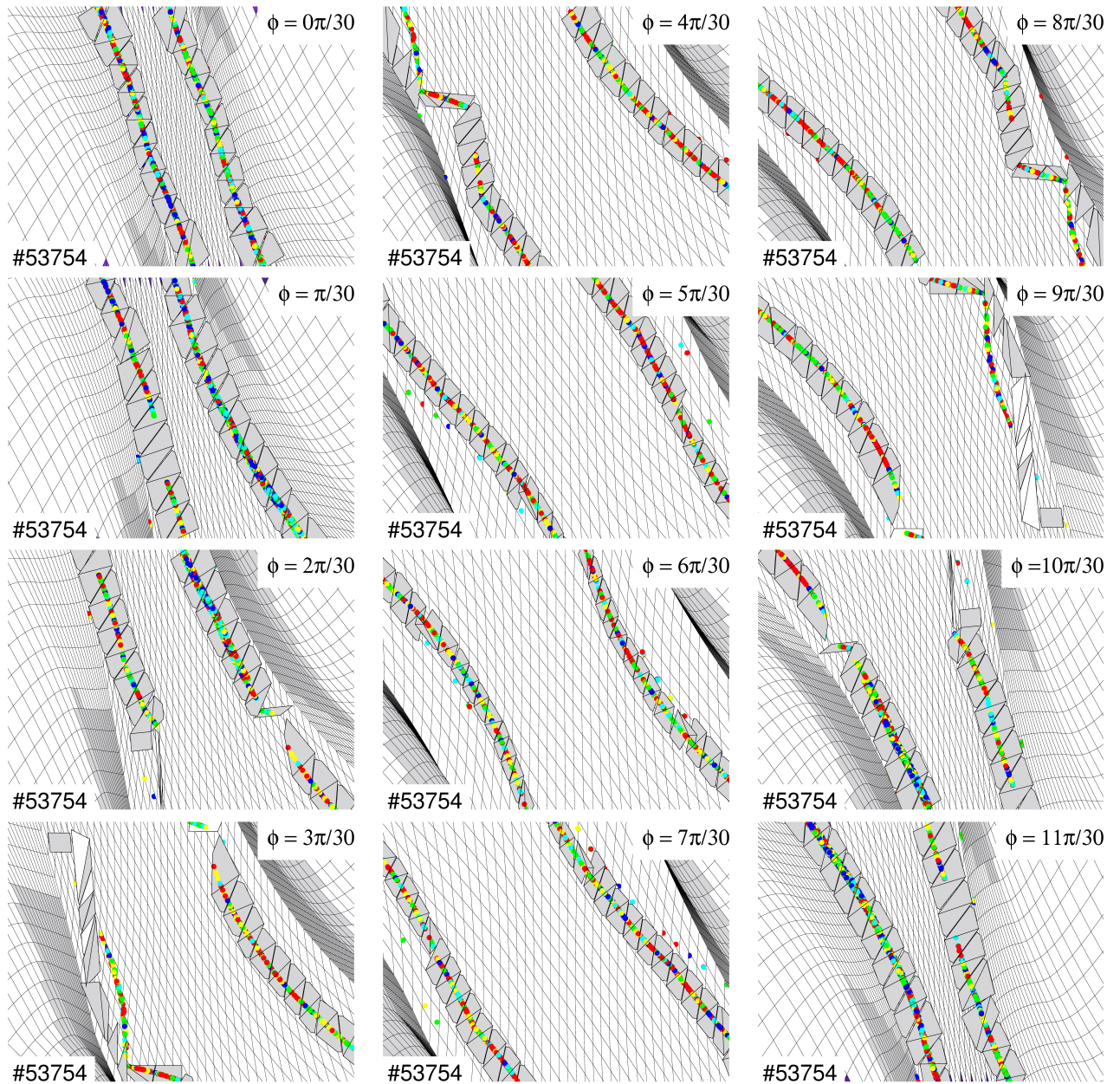


図 11: ICRF 長時間放電時 ($t = 360 \text{ sec}$) のダイバータ痕 (diverter footprints) をトロイダル方向に走査した結果を示す. ICRF 長時間放電 (ショット番号#53754) のダイバータ磁力線はダイバータタイトルのほぼ中央を貫通しているのが確認できる. $\phi = \pi/10$ の L ポート近辺, $\phi = 3\pi/10$ の U ポート近辺は, ダイバータ磁力線が真空容器壁に衝突しているが, 実際にはこの部分には大きな観測孔が存在し, ダイバータタイトルはそこでは垂直方向に差し込まれている. そのため, この図だけからは, この領域におけるダイバータ磁力線とダイバータタイトルの関係は読み取れない. また, $\phi = \pi/30, \phi = 4\pi/30$, 近辺にダイバータ磁力線の貫通しないダイバータタイトルが存在する. これはダイバータ磁力線がダイバータタイトルにほぼ平行に走行しているためである.

4.2 LHD の標準磁場配位 ($R_{ax} = 3.6$ m) の磁力線・磁気面構造解析例

磁気軸位置を装置中心位置 ($R_{ax} = 3.9$ m) よりも, 0.3 m 内側に寄せた配位 ($R_{ax} = 3.6$ m 配位) は, これまでの LHD 実験では最高のプラズマ閉じ込め性能を実現してきた. このため, $R_{ax} = 3.6$ m 配位は LHD の標準磁場配位の一つ (内寄せ標準磁場配位) とれている. 磁気軸上磁場強度が 2.75 T ($B_{ax} = 2.75$ T), $\gamma = 1.254$ となる $R_{ax} = 3.6$ m 配位を実現するコイル電流値は次で与えられる.

R_{ax}	B_{ax}	H_O (A)	H_M (A)	H_I (A)	OV (A)	IS (A)	IV (A)
3.6 m	2.75 T	11000	11000	11000	-17967	-3007	11229

表 3: $R_{ax} = 3.6$ m 配位のコイル電流値

磁気軸位置, および磁気軸上磁場強度は次式で与えられることが示される (16 頁 (6) 式参照).

$$\begin{aligned}
 a_1 = - - 0.3352 \quad , \quad a_3 = -0.479 \times 10^{-3} \quad , \quad b_1 = 0.2638131 \quad , \quad b_3 = 0.6204 \times 10^{-3} \quad , \\
 \langle r_{ax} \rangle = 3.600 \quad , \quad \delta r_{ax} = 0.72486 \times 10^{-1} \quad , \quad \langle z_{ax} \rangle = -.7 \times 10^{-18} \quad , \quad \delta z_{ax} = 0.703 \times 10^{-1} \quad , \\
 \langle B_{ax} \rangle = 2.736 \quad , \quad \delta B_{ax} = 0.94933 \times 10^{-1} \quad , \quad \iota_{ax}/2\pi = 0.373 \quad , \quad (\text{単位: SI 単位系}) \quad .
 \end{aligned}$$

内寄せ標準磁場配位 ($R_{ax} = 3.6$ m 配位) の特徴は次のようになる.

- 最外殻磁気面での回転変換 $\iota_{LCFS}/2\pi$ が黄金分割比となっている [3].

$$\frac{\iota_{LCFS}}{2\pi} \simeq \frac{1 + \sqrt{5}}{2} = 1.61803398874989\dots \quad ,$$

- 最外殻磁気面の外側を取り囲むカオス磁力線領域の厚みが極めて薄い. これは, 最外殻磁気面での回転変換 $\iota_{LCFS}/2\pi$ が黄金分割比となっていることと関係している可能性がある. 黄金分割比は有理数からは最も遠い無理数の一つである.
- 最外殻磁気面の囲む体積 V_{LCFS} はほぼ最大と思われる.

$$V_{LCFS} \simeq 30.0 \text{ m}^3$$

カオス磁力線領域の体積は $V_{chaos} \simeq 2.1 \text{ m}^3$ である [3].

- ダイバータ磁力線を構成するヒゲ磁力線のやや顕著な分裂が I ポートの近辺に出現する. ダイバータ痕 (diverter footprints) の一部はダイバータタイルを逸れて真空容器壁に達している.

LHD は磁場の 3 重構造 (磁気面領域, カオス磁力線領域, ダイバータレッグ) で高性能プラズマ保持を実現する. 炉心の高温プラズマは磁気面領域で保持する. それを取り囲むカオス磁力線領域は磁力線に規則性がないため, MHD 不安定を引き起こす荷電分離は直ちに中和し, プラズマの崩壊を抑止する. さらに, カオス磁力線領域の長大な磁力線結合長

は、炉心の高性能保持と、ダイバータでの合理的熱処理の両立に道を開く。カオス磁力線領域を離脱した磁力線（ダイバータレグ）は直ちに真空容器壁に到達し、そこに固定される。そのためダイバータレグはバルーニング型不安定、プラズマの位置不安定を抑止する。LHD 磁場の 3 重構造を、3T ポートに設置され、2U ポートの起立ダイバータタイルを監視する ccd カメラからみた立体構造で示す。

「LHD の磁力線・磁気面可視化プログラム」LHD_lines_of_force.exe の GUI (6 頁参照) で次のような入力データを (fort.50) を作成する。

```

1 'r360_1000_cut_r.ps' 'r360_1000.40'
## 新規計算の実行 (再画像化処理時は 0 と設定), PS ファイル, 計算結果格納ファイル
11000, 11000, 11000, -17967, -3007, 11229, 'RAX=3.6 M, BAX=2.75 T, gamma=1.254'
## コイル電流 H_O, H_M, H_I, OV, IS, IV (A) とコメント
1, 1, 0.07, 0, 'limiter.csv'
## ダイバータタイル, アンテナの有無, アンテナ後退位置, 追加リミターの有無と csv ファイル名
20, 0
## 最大トラス周回数と追跡方向 (-1: -B 方向, 0: 両方向, 1: B 方向)
3
## 出発点座標系 (0:回転ヘリカル座標系, 1:円柱座標系, 2:直交座標系, 3:カオス磁力線と磁気面)
1000, 1001), 7, 0.1, 0
## 径, ポロイダル, トロイダル (1 ヘリカルピッチ) 各方向分割数, 磁気面間隔, 磁気島プロットせず
0.5,
## 描画最短磁力線結合長 (トラス周回数)
0 27 3 1
## 子午面磁力線貫通図の指定 (phi_ini, phi_max, 分割数, ヘリカル対称性 (= 1 : 仮定する)
0, 0.1, 2.5
## 磁場強度等高線図プロットの有無と, 間隔, 基準値
1 7.0772, 1.3691, 0.4749d0, 2.60488 2.0260 -1.3955, 3.2
## 任意断面磁力線貫通図の有無と任意断面を指定する視点と視野中心. 最大視野
3 7.0772, 1.3691, 0.4749d0, 2.60488 2.0260 -1.3955, 2.45, 10, -2
## 立体図の有無と走査データ, 視野中心, 視点移動距離, 視野角, (切断面/見たまま)&ドットサイズ
1, 1, 0, 0, 0, 0, 1
## 立体図描画物:真空容器, リミター, ヘリカルコイルと容器, 垂直磁場コイル, 磁気島コイル, 磁力線
1, 1
## リミターおよび真空容器での磁力線追跡停止 (1) あるいは磁力線透過 (0) の指定
'STANDARD CONFIGURATION 1'
### 計算結果に書き込む任意のコメント. データの終了

```

¹⁾ : ダイバータレグ, ダイバータ痕 (diverter footprints) を明瞭に示すため, 出発地点は稠密に設定した。

磁力線線ダイバータチャート, 子午面伝面磁力線貫通図, 任意断面磁力線貫通図, 磁力線立体図を以下に示す (図 12 ~ 図 19) .

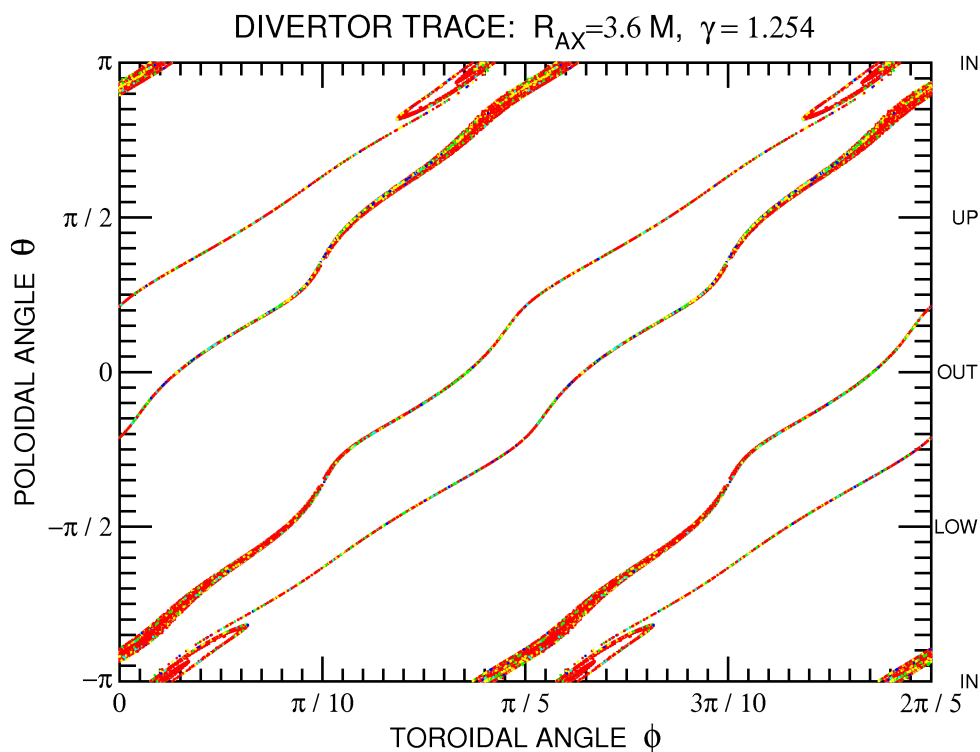


図 12: 内寄せ標準磁場配位 ($R_{ax} = 3.6$ m 配位) でのダイバータチャート. 横軸はトロイダル角, 縦軸はポロイダル角を示す. ダイバータ磁力線の結合長に応じてダイバータ痕 (diverter footprints) が色分け (36 頁参照) されている.

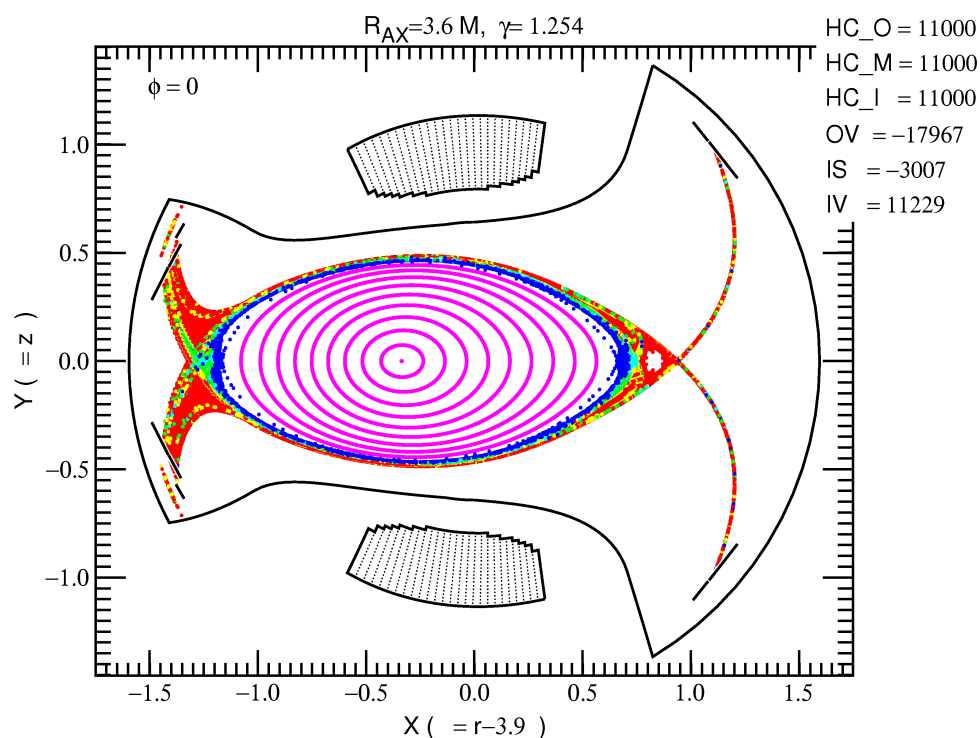


図 13: 子午面 $\phi = 0$ における磁力線貫通図. 横軸は回転ヘリカル座標での X 軸, 縦軸は Y 軸. ダイバータ磁力線は結合長に応じて色分け (36 頁参照) されている. 磁気面は鮮紅色のドットで記されている.

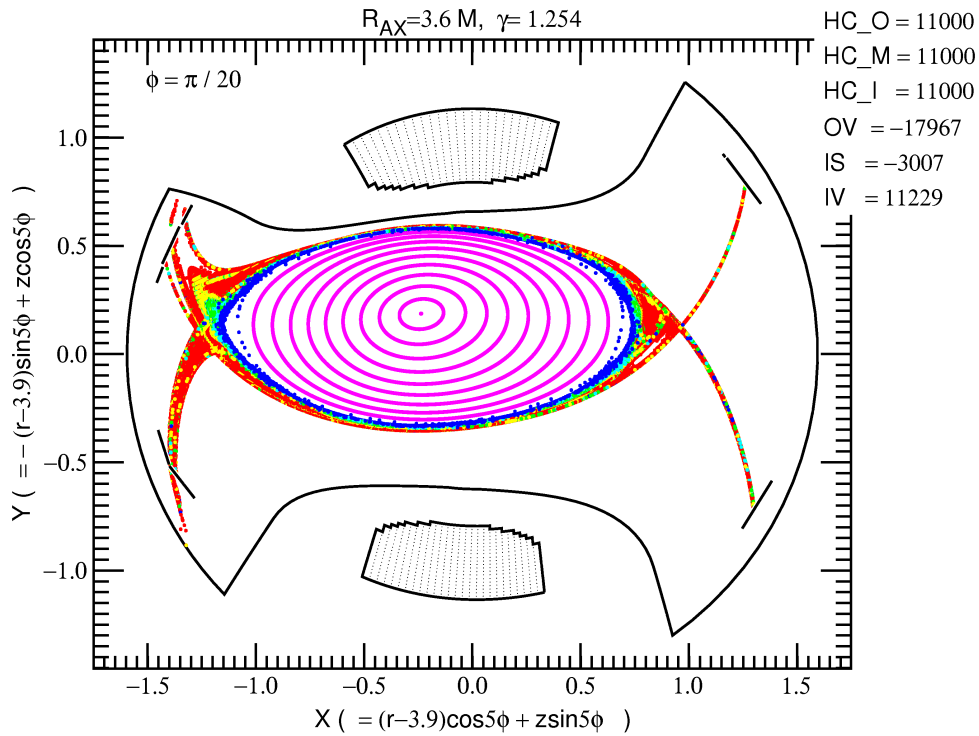


図 14: 子午面 $\phi = \pi/20$ における磁力線貫通図と磁気面. 横軸は回転ヘリカル座標での X 軸, 縦軸は Y 軸.

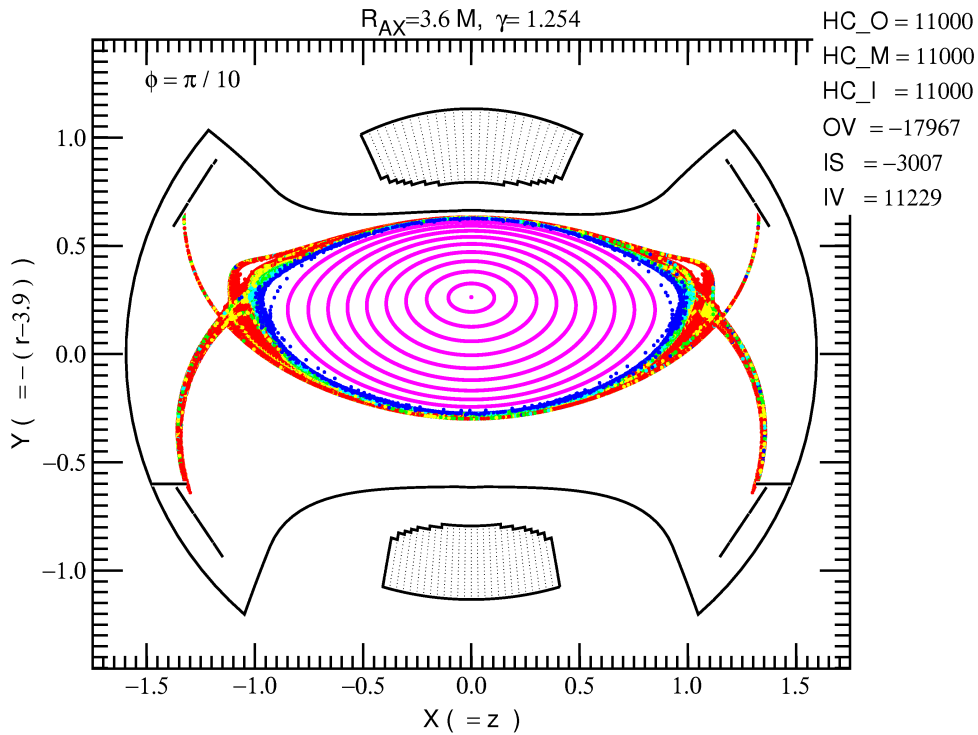


図 15: 子午面 $\phi = \pi/10$ における磁力線貫通図. 横軸は回転ヘリカル座標での X 軸, 縦軸は Y 軸.

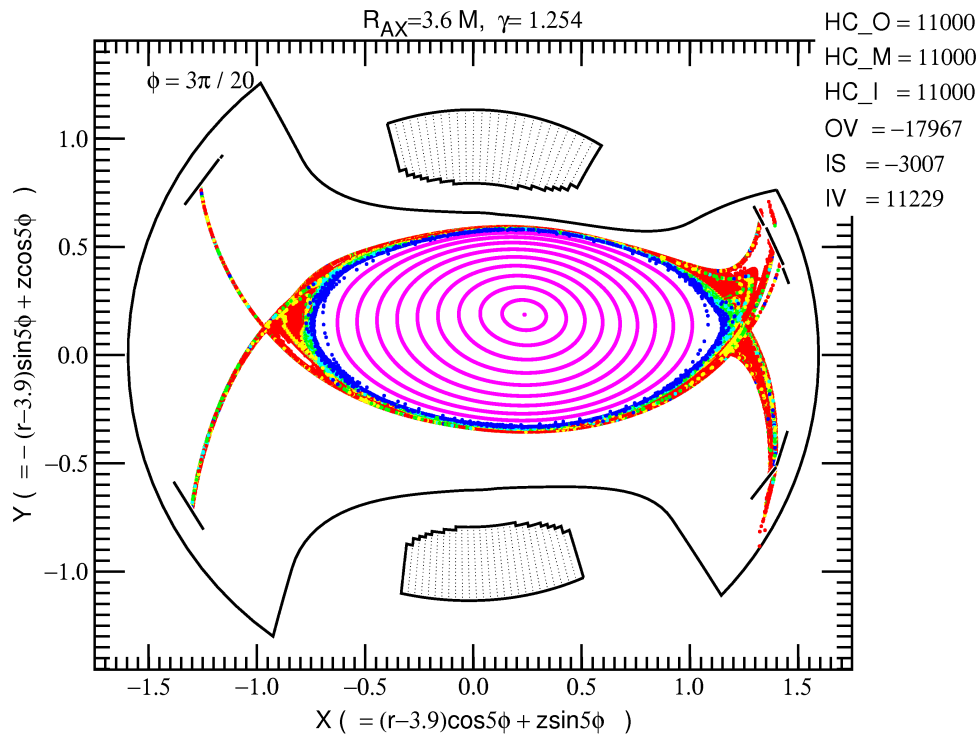


図 16: 子午面 $\phi = 3\pi/20$ における磁力線貫通図. 横軸は回転ヘリカル座標での X 軸, 縦軸は Y 軸.

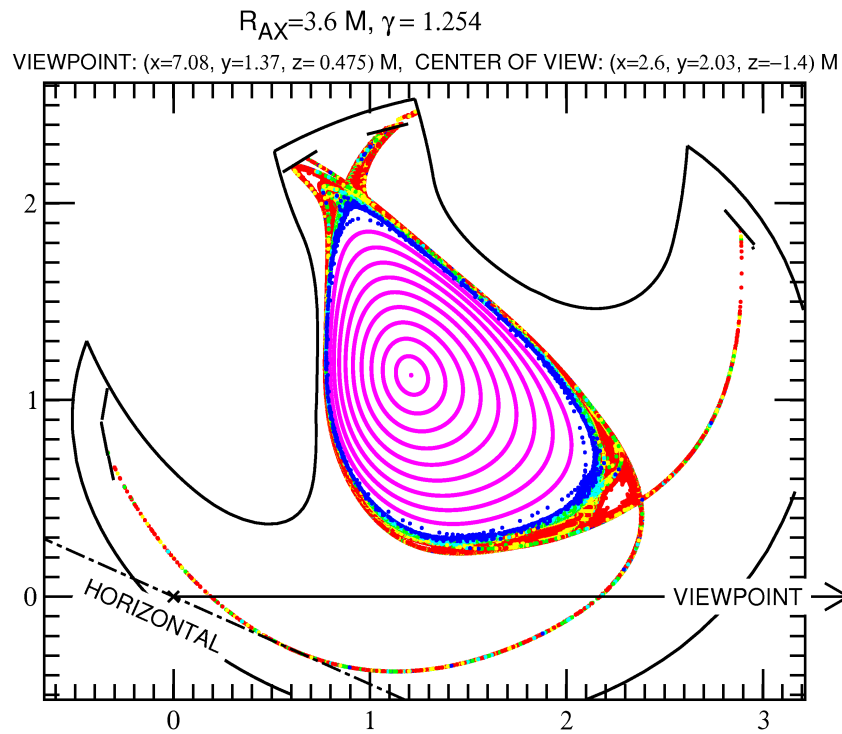


図 17: 3T ポートに設置し, 2U ポートの起立ダイバータを監視する ccd カメラ位置 $((x, y, z) = (7.0772, 1.3691, 0.4749) \text{ m})$ を視点とし, 視野中心位置 $(2.60488, 2.0260, -1.3955)$ を見下ろす視線が定める平面を通過する磁力線貫通図.

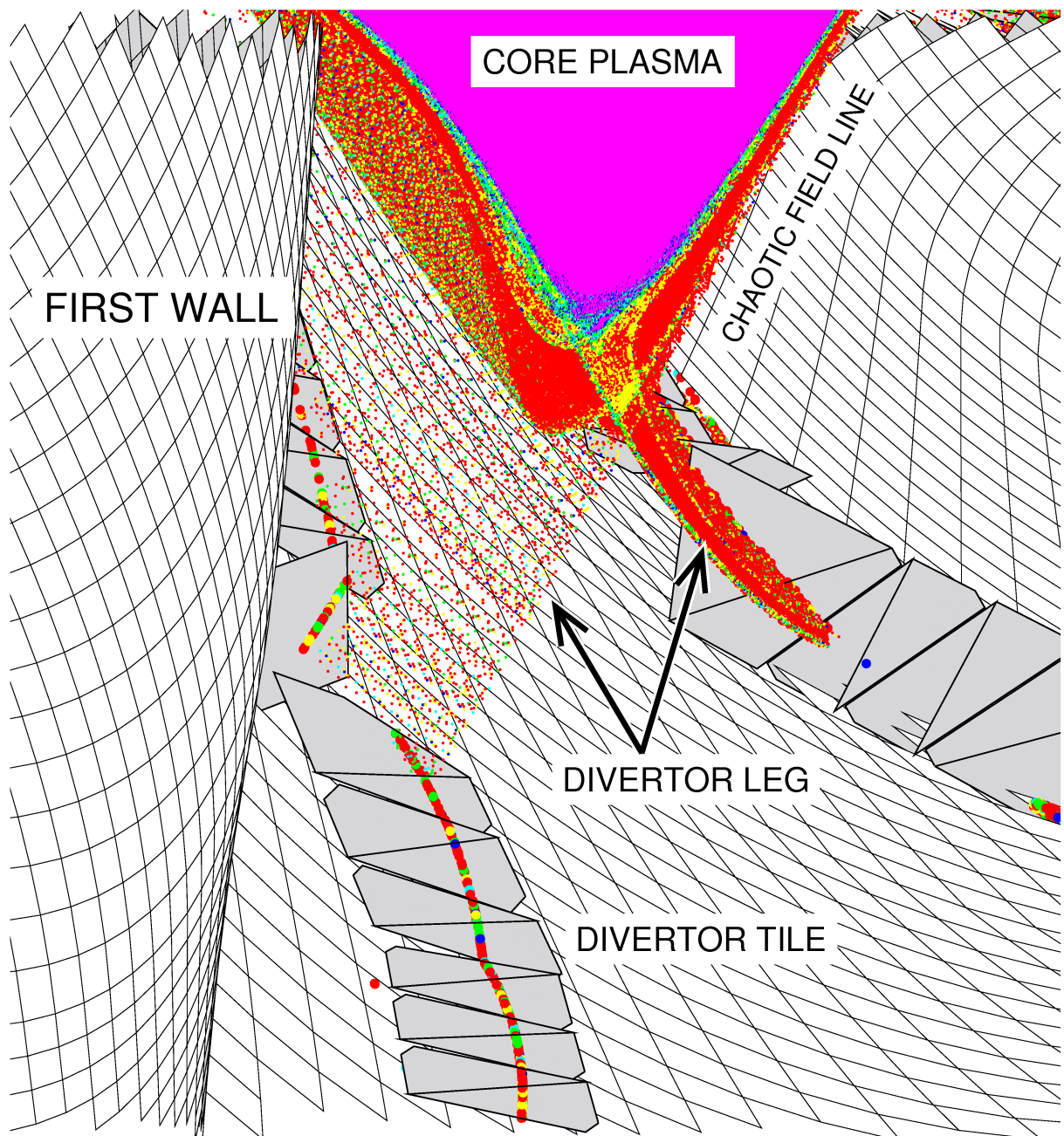


図 18: 内寄せ標準磁場配位 ($R_{ax} = 3.6$ m 配位) での磁場構造. 3T ポートに設置し, 2U ポートの起立ダイバータを監視する ccd カメラ位置から見た LHD の磁場構造. 磁気面構造とカオス磁力線領域, ダイバータレグの関係を示す. 断面図を示すため, $r \geq r_{ax}$ の関係を満たす磁力線はプロットしていない. コイル電流値は表 3 で与えられている.

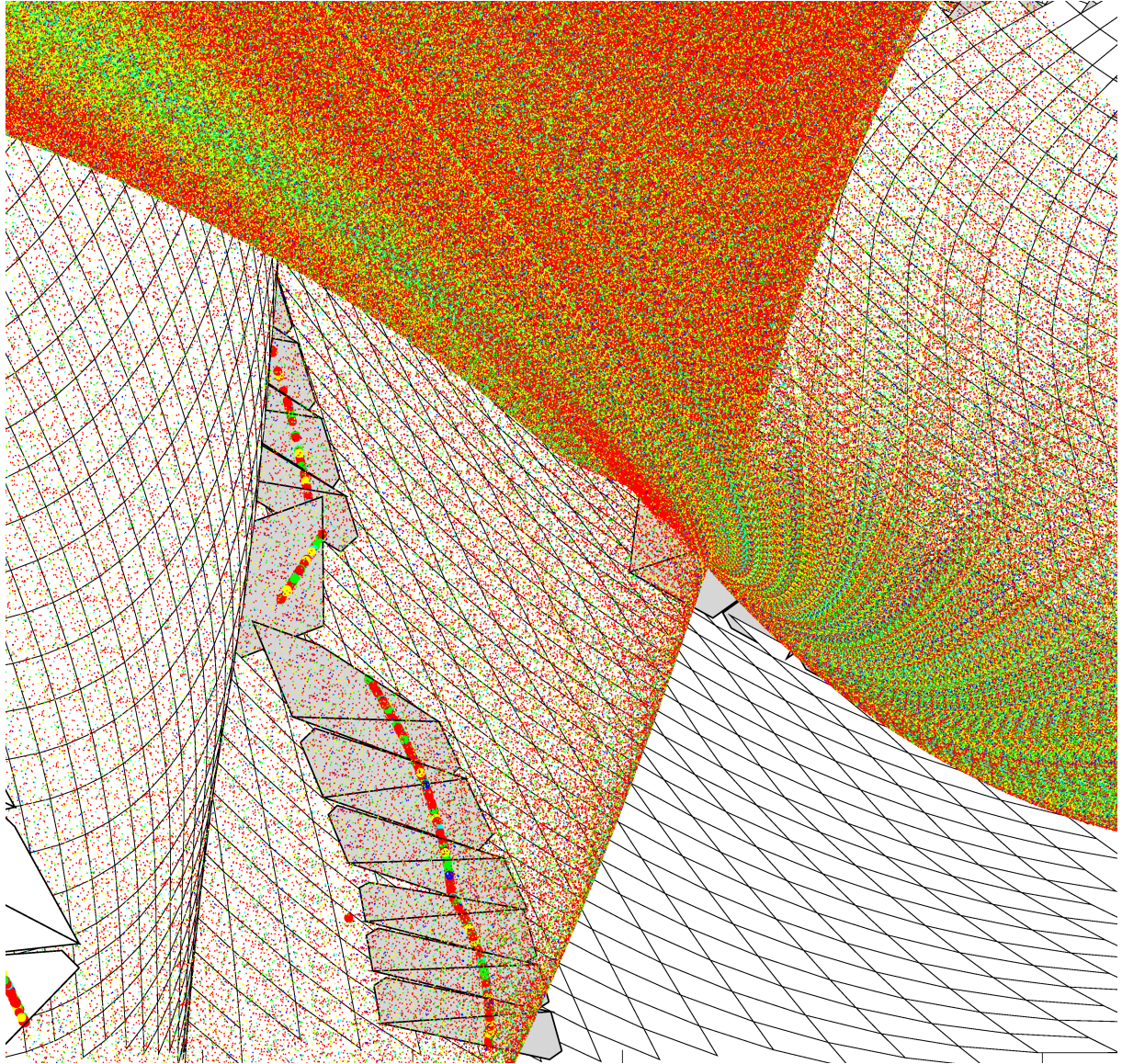


図 19: 内寄せ標準磁場配位 ($R_{ax} = 3.6 \text{ m}$ 配位) での磁場構造. 3T ポートに設置し, 2U ポートの起立ダイバータを監視する ccd カメラ位置から見ている. 磁気面領域はカオス磁力線領域の背後に隠され, カオス磁力線領域とダイバータレッグとが見えている. コイル電流値は表 3 で与えられている.

通常のLHD実験では6Tポートに設置したccdカメラでICRFアンテナ(7.5UL)の表面を監視している。このカメラはIRボロメータに合わせ、トロイダル方向に向けら、カメラ位置と焦点は次のように設定されている(直交座標系)。

	x (m)	y (m)	z (m)
カメラ位置	1.423	-6.158	0.236
焦点位置	-0.912	-3.544	0.087

表 4: 6T 設置 ccd カメラの設定データ

このカメラは真空容器外にある、投影面(スクリーン)を真空容器内に持ち込むため、視点・スクリーン間距離(32参照) l_scrn は 1.45 m と設定する。さらに、可視光では高温プラズマは透明であり、見えるのは磁力線がダイバータタイルに到達しているカオス磁力線領域の低温プラズマのみである。プラズマ表面を覆うカオス磁力線領域を稠密に画像化すると、透明感は再現できないので、出発地点は粗く設定する。6Tポートに設置したccdカメラでプラズマを接線方向に見た画像を再現するためには、「LHDの磁力線・磁気面可視化プログラム」LHD_lines_of_force.exeのGUI(6頁参照)で次のような入力データを(fort.50)を用意する。

```

1 'r360_50_7t_fl.ps' 'r360_50_7t.40'
## 新規計算の実行 (再画像化処理時は 0 と設定), PS ファイル, 計算結果格納ファイル
11000, 11000, 11000, -17967, -3007, 11229, ' RAX=3.6 M, BAX=2.75 T, gamma=1.254'
## コイル電流 H_O, H_M, H_I, OV, IS, IV (A) とコメント
1, 1, 0.07, 0, 'limiter.csv'
## ダイバータタイトル, アンテナの有無, アンテナ後退位置, 追加リミターの有無と csv ファイル名
20, 0
## 最大トーラス周回数と追跡方向 (-1: -B 方向, 0: 両方向, 1: B 方向)
3
## 出発点座標系 (0:回転ヘリカル座標系, 1:円柱座標系, 2:直交座標系, 3:カオス磁力線と磁気面)
50, 171), 7, 0.1, 0
## 径, ポロイダル, トロイダル (1 ヘリカルピッチ) 各方向分割数, 磁気面間隔, 磁気島プロットせず
0.5,
## 描画最短磁力線結合長 (トーラス周回数)
0 27 3 1
## 子午面磁力線貫通図の指定 (phi_ini, phi_max, 分割数, ヘリカル対称性 (= 1 : 仮定する)
0, 0.1, 2.5
## 磁場強度等高線図プロットの有無と, 間隔, 基準値
1 1.423, -6.158, 0.236, -0.912 -3.544 .087, 3.2
## 任意断面磁力線貫通図の有無と任意断面を指定する視点と視野中心 . 最大視野
3 1.423, -6.158, 0.236, -0.912 -3.544 .087, 1.45, 19, 52)
## 立体図の有無と視点, 視野間中心, 視点とスクリーン位置までの距離, 視野角 (度) ドットサイズ
1, 1, 0, 0, 0, 0, 1
## 立体図描画物:真空容器, リミター, ヘリカルコイルと容器, 垂直磁場コイル, 磁気島コイル, 磁力線
1, 1
## リミターおよび真空容器での磁力線追跡停止 (1) あるいは磁力線透過 (0) の指定
' STANDARD CONFIGURATION 1'
### 計算結果に書き込む任意のコメント. データの終了

```

1) : 磁力線に透明感を持たせるため, 出発地点は祖に設定した.

2) : 磁力線に透明感を持たせるため, 立体図を描くドットサイズ (1 参照) を極めて小さく設定した.

計算結果を図 21, 図 20 に示す.

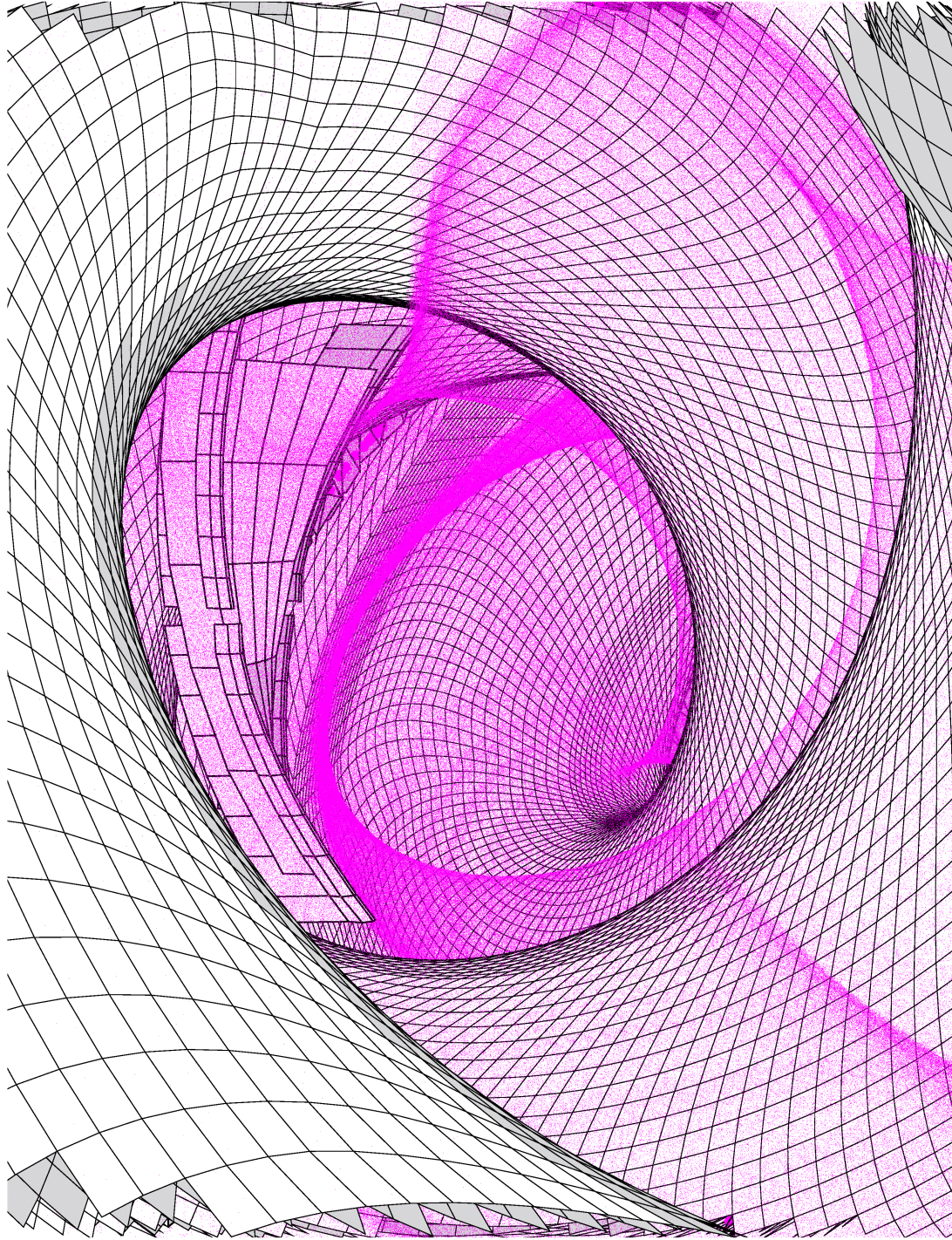


図 20: 6T ポートに設置し ICRF アンテナ表面を監視する ccd カメラの位置から見たカオス磁力線領域の立体画像. ここでは, 図のコントラストを高めるため, 磁力線のドットは全て鮮紅色 (RGG=(1,0,1)) でプロットした. ICRF アンテナ (7.5UL) も磁力線の背後に見える. 磁場は内寄せ標準磁場配位 ($R_{ax} = 3.6$ m 配位).

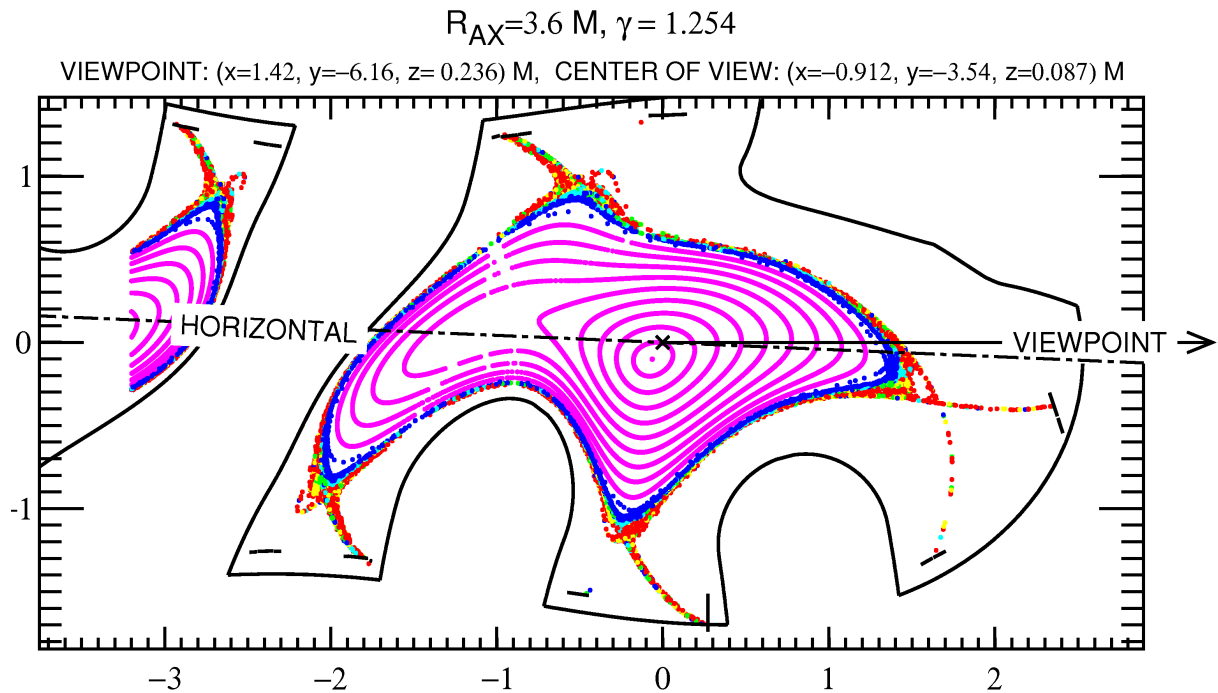


図 21: 6T ポートに設置し, ICRF アンテナ表面を監視する ccd カメラ位置 $((x, y, z) = (1.423, -6.158, 0.236) \text{ m})$ を視点とし, 視野中心位置 $(-0.912, -3.544, 0.087)$ を見通す視線が定める平面を通過する磁力線貫通図. 図の原点 $(0, 0)$ は視野中心を表し, 横軸は視線方向, 縦軸は, 鉛直方向と視線ベクトルとで作るベクトル積の方向. 縦軸と横軸の単位は m である. この図の縦軸はほぼ r 方向となっている.

内寄せ標準磁場配位 ($R_{ax} = 3.6 \text{ m}$ 配位) では, ダイバータ磁力線を構成するヒゲ磁力線のやや顕著な分裂が I ポートの近辺に出現する. この状況を確認するためには, 第 11 データ (28 頁 3.10.1 節参照) を次のように設定すればよい.

```
1 0d0, 72d0, 12, -1.6d0, 0d0, 0.1d0, .1d0, 40d0 1
```

```
## 立体図の有無と走査データ, 視野中心, 視点移動距離, 視野角, (切断面/見たまま)&ドットサイズ
```

図 22 に示す計算結果を得る .

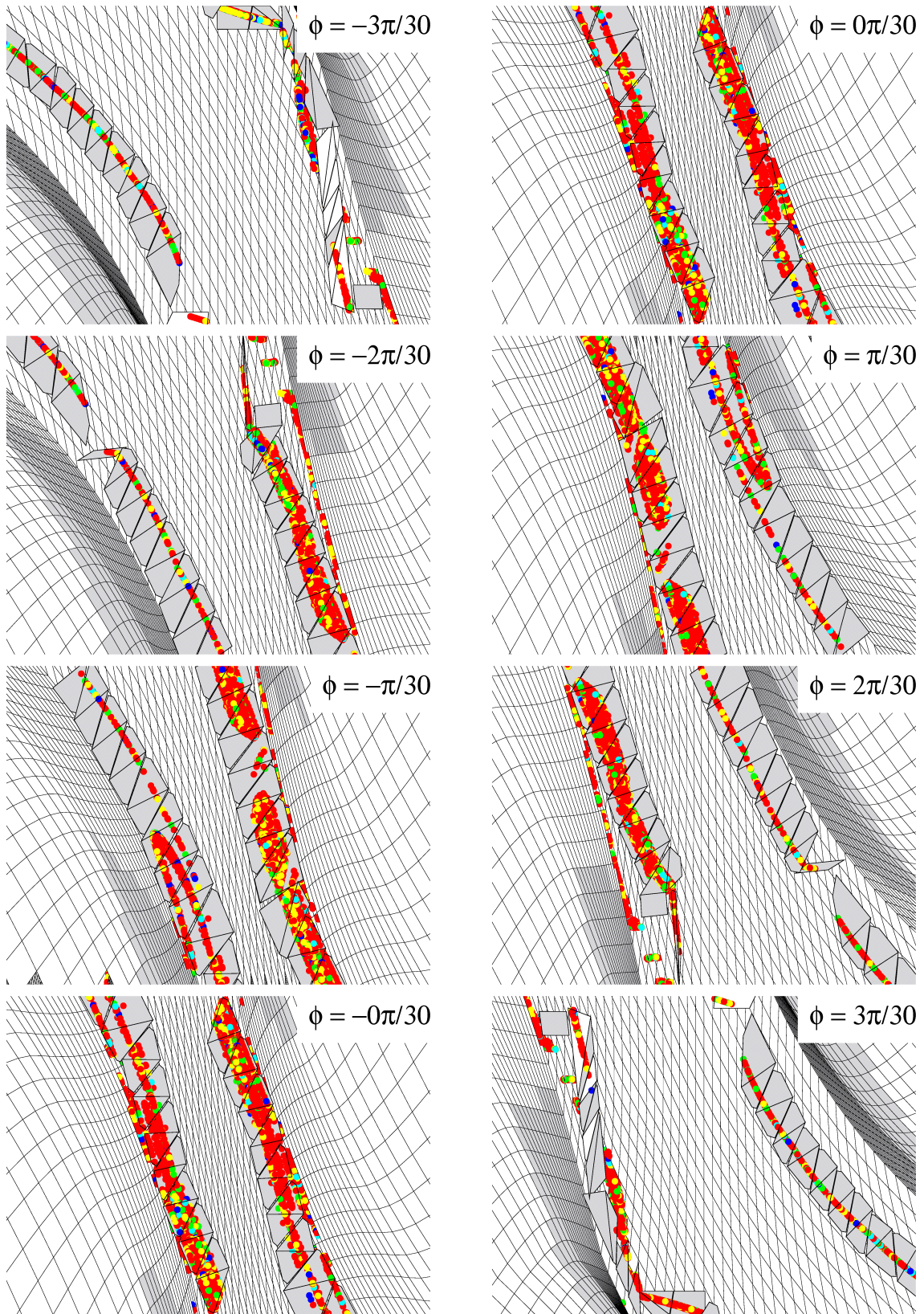


図 22: 内寄せ標準磁場配位 ($R_{ax} = 3.6$ m 配位) におけるダイバータ痕 (diverter footprints). トーラス内側 (インボードサイド) を見る.

4.3 LHD の標準磁場配位 ($R_{ax} = 3.75 \text{ m}$) の磁力線・磁気面構造解析例

LHD 実験が立案された当初, プラズマの MHD 安定性と, 良好な高エネルギー粒子閉じ込めの両立を勘案して決定された標準配位が磁気軸位置を $R_{ax} = 3.75 \text{ m}$ とした配位である (標準配位 あるいは, $R_{ax} = 3.75 \text{ m}$ 配位). ダイバータタイルはこの $R_{ax} = 3.75 \text{ m}$ 配位をもとに設置された. しかしながら, カオス磁力線領域での荷電分離中和効果, および, ダイバータレッグ固定効果により, LHD プラズマでは MHD 不安定が抑制されていることが明らかになるにつれ, $R_{ax} = 3.6 \text{ m}$ 配位が LHD の標準磁場配位として, 重要視されてきた. 標準磁場配位 ($R_{ax} = 3.75 \text{ m}$ 配位) の特徴は次のようになる.

- 最外殻磁気面での回転変換は $l_{LCFS}/2\pi \simeq 1.332$ であり, その近辺では有理数の密度が極めて高い [3].
- 最外殻磁気面の外側を取り囲むカオス磁力線領域の厚みが極めて厚い. 上記と関係している可能性がある.
- 最外殻磁気面の囲む体積 V_{LCFS} とカオス磁力線の体積は次のようになる [3].

$$V_{LCFS} \simeq 27.0 \text{ m}^3$$

$$V_{chaos} \simeq 5.0 \text{ m}^3$$

$R_{ax} = 3.6 \text{ m}$ 配位に比べると, V_{LCFS} はほぼ, 1 割少なく, V_{chaos} は約 2.5 倍となっている.

- ダイバータ磁力線を構成するヒゲ磁力線は全領域できれいにまとめられている.

磁気軸上磁場強度が 2.75 T ($B_{ax} = 2.75 \text{ T}$), となる $R_{ax} = 3.75 \text{ m}$ 配位を実現するコイル電流値は次で与えられる.

R_{ax}	B_{ax}	H_O (A)	H_M (A)	H_I (A)	OV (A)	IS (A)	IV (A)
3.75 m	2.75 T	11532	11532	11532	-18112	-4574	9481

表 5: $R_{ax} = 3.75 \text{ m}$ 配位のコイル電流値

「LHD の磁力線・磁気面可視化プログラム」LHD_lines_of_force.exe の GUI (6 頁参照) で次のような入力データを (fort.50) を作成する.

```

1 'r375_500_cut4.ps' 'r375_500.40'
## 新規計算の実行 (再画像化処理時は 0 と設定), PS ファイル, 計算結果格納ファイル
11532., 11532., 11532., -18112, -4574, 9481., ' RAX=3.75 M, BAX=2.75 T, gamma =1.254'
## コイル電流 H_O, H_M, H_I, OV, IS, IV (A) とコメント
1, 1, 0.07, 0, 'limiter.csv'
## ダイバータタイル, アンテナの有無, アンテナ後退位置, 追加リミターの有無と csv ファイル名
20, 0
## 最大トーラス周回数と追跡方向 (-1: -B 方向, 0: 両方向, 1: B 方向)
3
## 出発点座標系 (0:回転ヘリカル座標系, 1:円柱座標系, 2:直交座標系, 3:カオス磁力線と磁気面)
500, 50, 7, 0.1, 0
## 径, ポロイダル, トロイダル (1 ヘリカルピッチ) 各方向分割数, 磁気面間隔, 磁気島プロットせず
0.5,
## 描画最短磁力線結合長 (トーラス周回数)
0 27 3 1
## 子午面磁力線貫通図の指定 (phi_ini, phi_max, 分割数, ヘリカル対称性 (= 1 : 仮定する)
0, 0.1, 2.5
## 磁場強度等高線図プロットの有無と, 間隔, 基準値
1 7.0772, 1.3691, 0.4749d0, 2.60488 2.0260 -1.3955, 3.2
## 任意断面磁力線貫通図の有無と任意断面を指定する視点と視野中心. 最大視野
3 7.0772, 1.3691, 0.4749d0, 2.60488 2.0260 -1.3955, 2.45, 10, -4
## 立体図の有無と走査データ, 視野中心, 視点移動距離, 視野角, (切断面/見たまま)&ドットサイズ
1, 1, 0, 0, 0, 0, 1
## 立体図描画物:真空容器, リミター, ヘリカルコイルと容器, 垂直磁場コイル, 磁気島コイル, 磁力線
1, 1
## リミターおよび真空容器での磁力線追跡停止 (1) あるいは磁力線透過 (0) の指定
' STANDARD CONFIGURATION 2'
### 計算結果に書き込む任意のコメント. データの終了

```

磁力線線ダイバータチャート, 子午面伝面磁力線貫通図, 任意断面磁力線貫通図, 磁力線立体図を図 23 ~ 図 30 に示す.

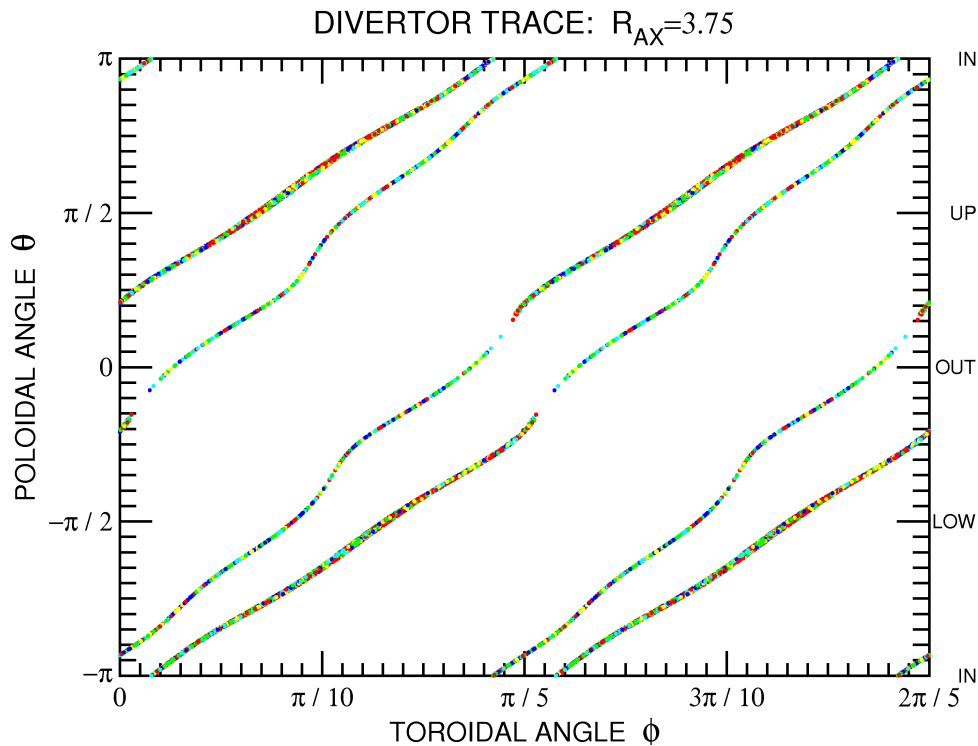


図 23: 標準磁場配位 ($R_{ax} = 3.75$ m 配位) でのダイバータチャート. 横軸はトロイダル角, 縦軸はポロイダル角を示す. ダイバータ磁力線の結合長に応じてダイバータ痕 (diverter footprints) が色分け (36 頁参照) されている.

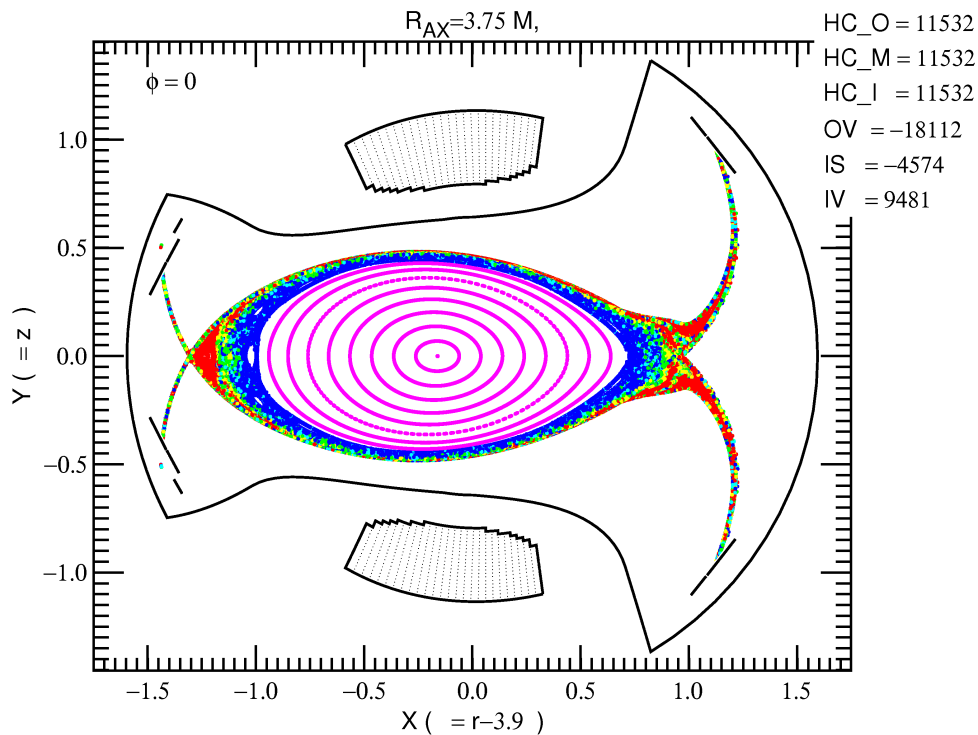


図 24: 子午面 $\phi = 0$ における磁力線貫通図. 横軸は回転ヘリカル座標での X 軸, 縦軸は Y 軸. ダイバータ磁力線は結合長に応じて色分け (36 頁参照) されている.. 磁気面は鮮紅色のドットで記されている.

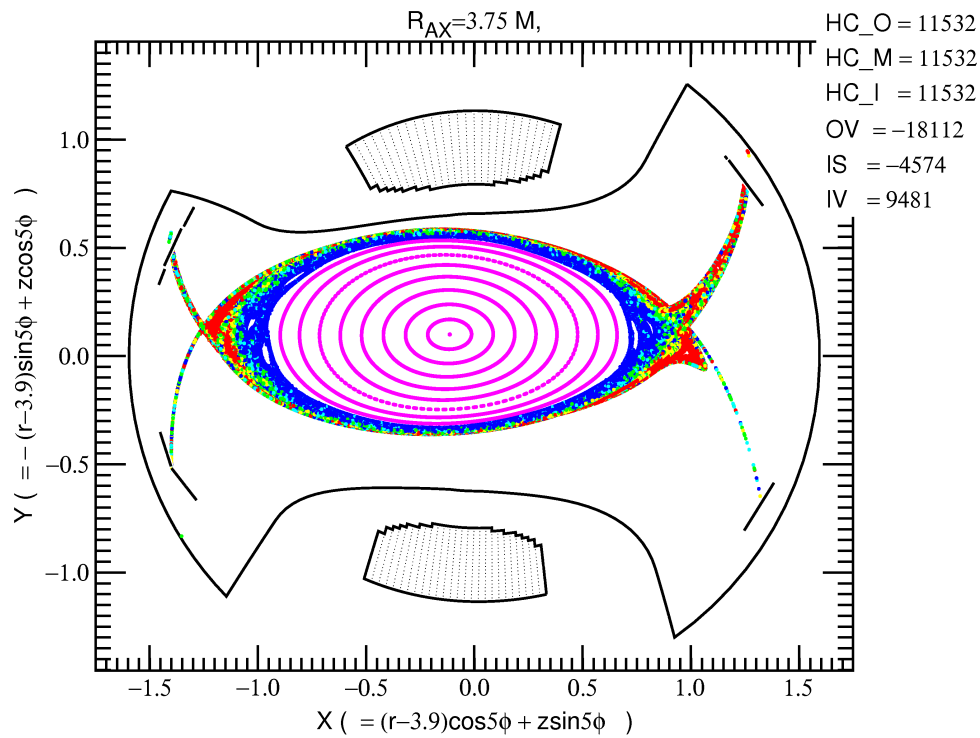


図 25: 子午面 $\phi = \pi/20$ における磁力線貫通図と磁気面. 横軸は回転ヘリカル座標での X 軸, 縦軸は Y 軸.

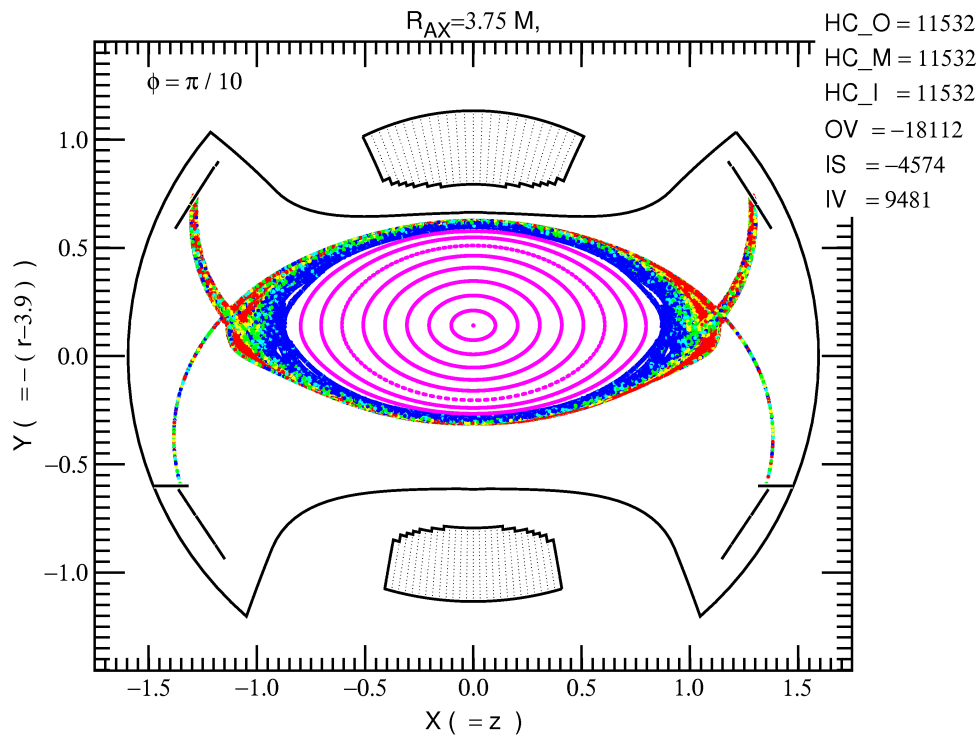


図 26: 子午面 $\phi = \pi/10$ における磁力線貫通図. 横軸は回転ヘリカル座標での X 軸, 縦軸は Y 軸.

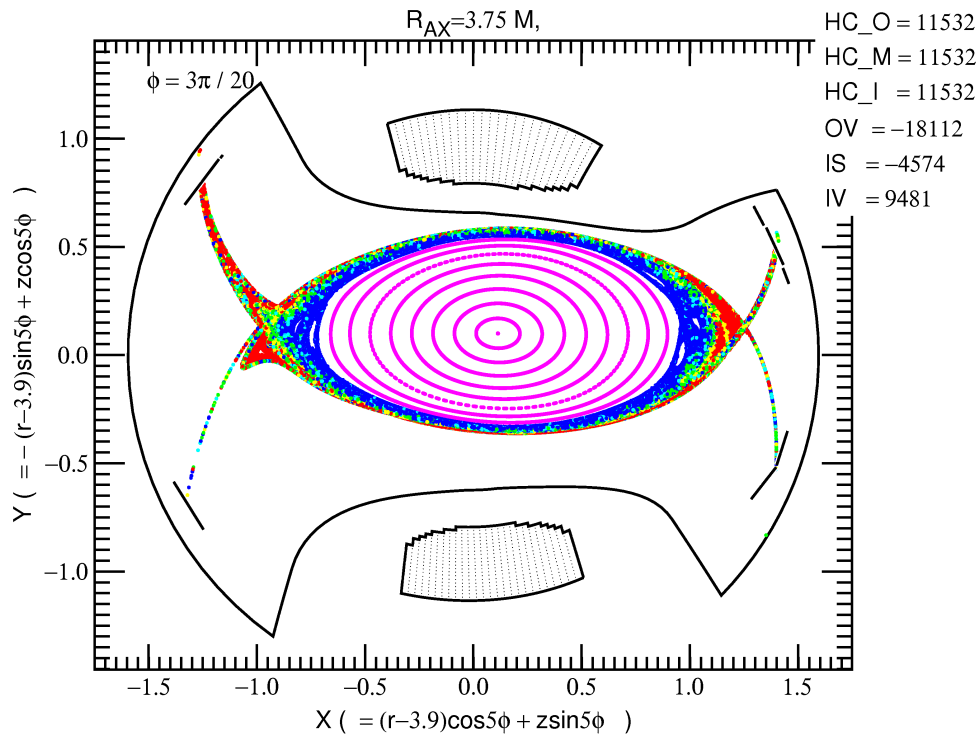


図 27: 子午面 $\phi = 3\pi/20$ における磁力線貫通図. 横軸は回転ヘリカル座標での X 軸, 縦軸は Y 軸.

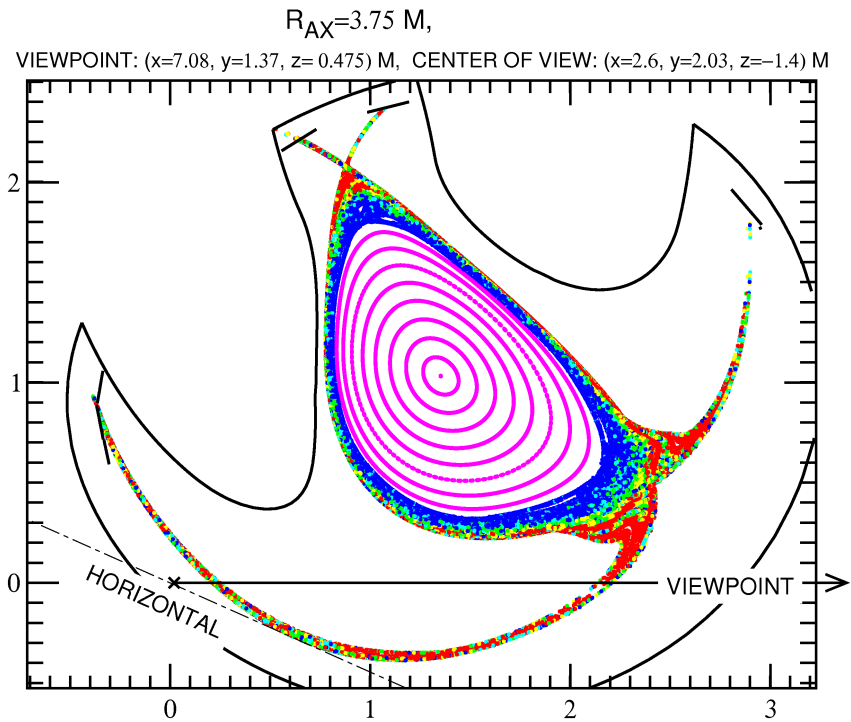


図 28: 3T ポートに設置し, 2U ポートの起立ダイバータを監視する ccd カメラ位置 $((x, y, z) = (7.0772, 1.3691, 0.4749) \text{ m})$ を視点とし, 視野中心位置 $(2.60488, 2.0260, -1.3955)$ を見下ろす視線が定める平面を通過する磁力線貫通図.

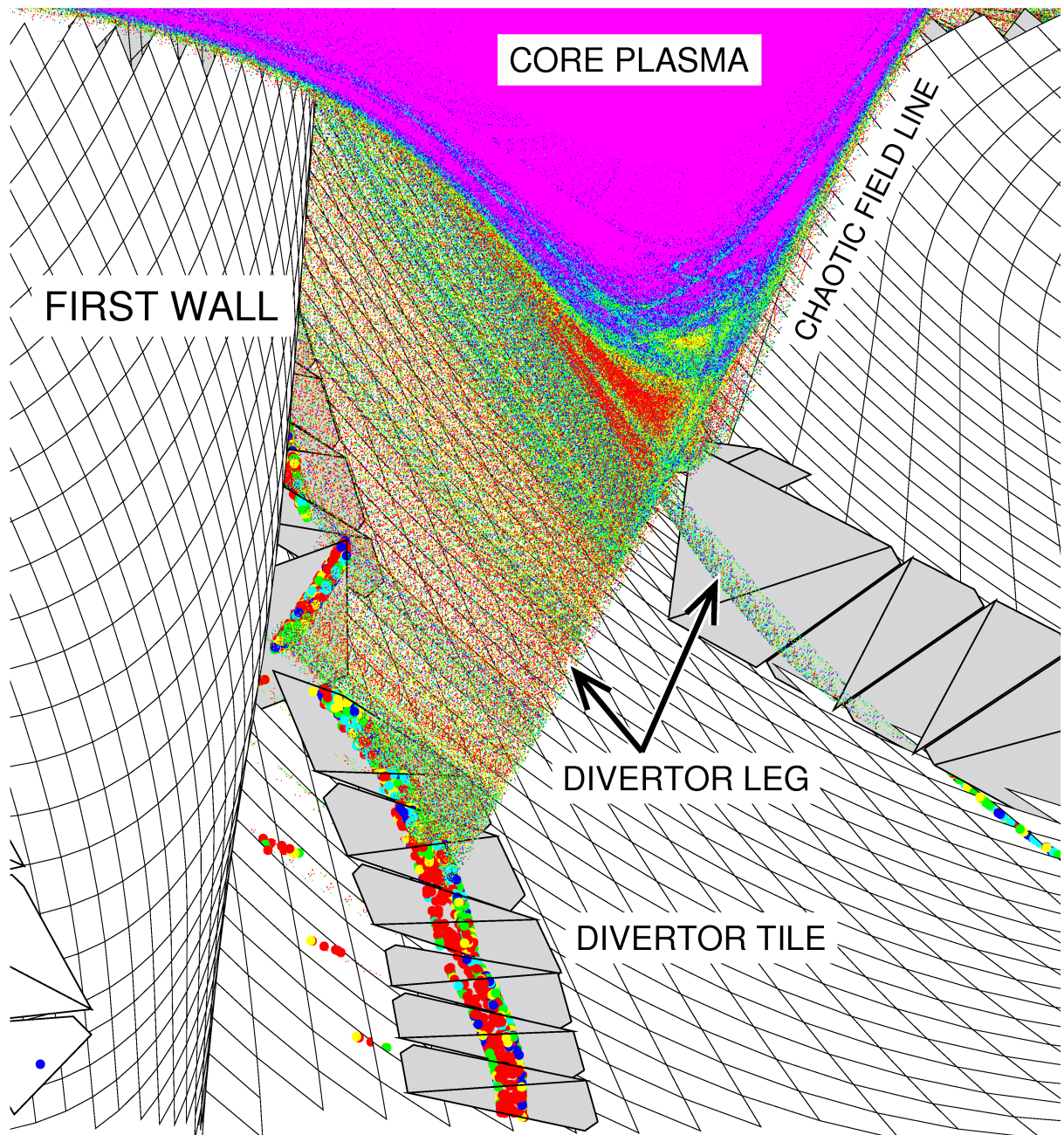


図 29: 標準磁場配位 ($R_{ax} = 3.75$ m 配位) での磁場構造. 3T ポートに設置し, 2U ポートの起立ダイバータを監視する ccd カメラ位置から見た LHD の磁場構造. 磁気面構造とカオス磁力線領域, ダイバータレグの関係を示す. 断面図を示すため, $r \geq r_{ax}$ の関係を満たす磁力線はプロットしていない. コイル電流値は表 5 で与えられている.

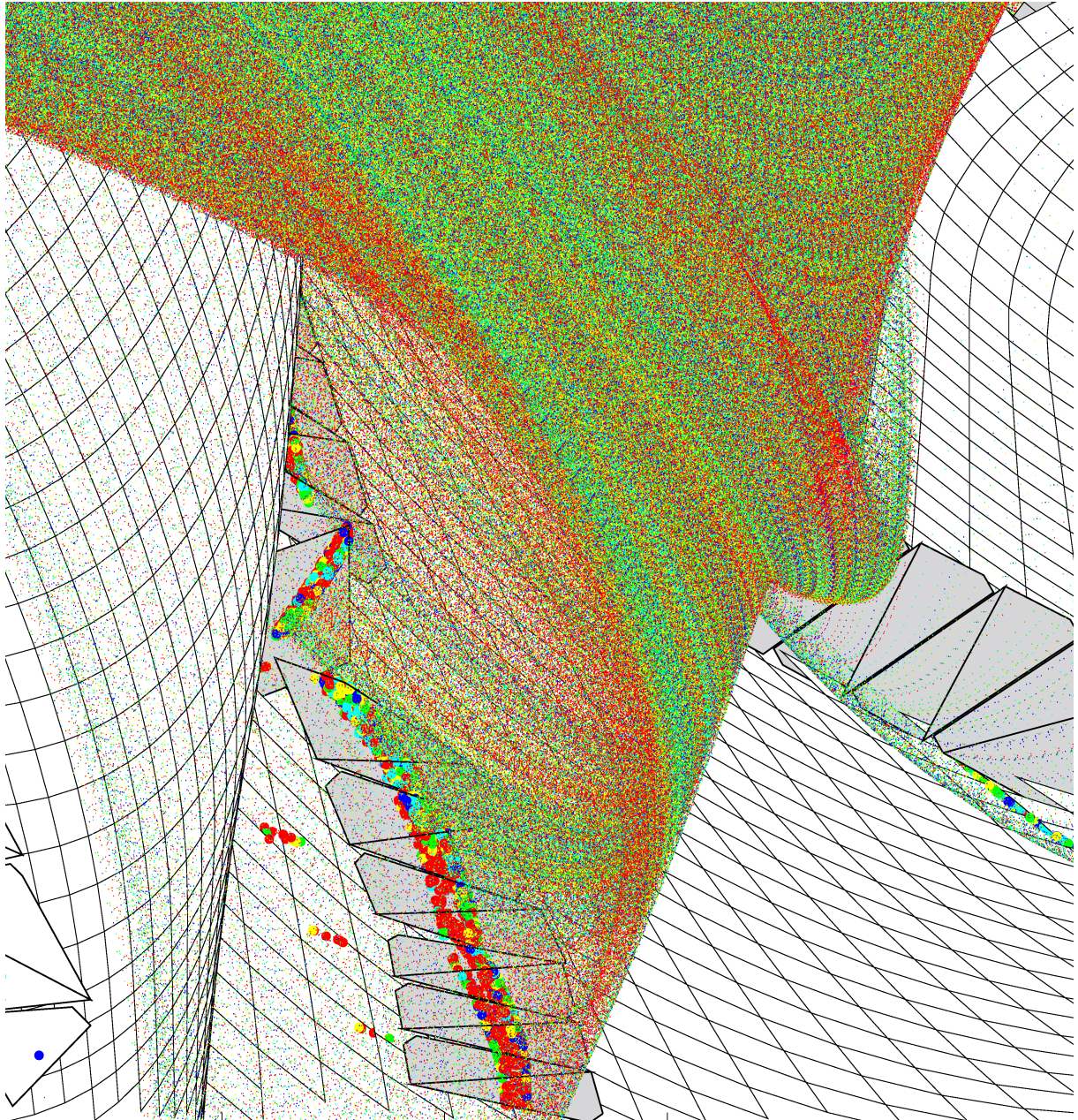


図 30: 標準磁場配位 ($R_{ax} = 3.75$ m 配位) での磁場構造. 3T ポートに設置し, 2U ポートの起立ダイバータを監視する ccd カメラ位置から見た LHD の磁場構造. 磁気面領域はカオス磁力線領域の背後に隠され, カオス磁力線領域とダイバータレッグとが見えている. コイル電流値は表 5 で与えられている.

4.4 Zeeman 効果を用いた LHD 周辺部の中性原子密度計測に対応する計算例

1-O ポートで, z 方向に整列した視線でプラズマからの発光を計測する. プラズマ周辺部の中性原子による発光は Zeeman 効果により, スペクトル分裂が発生する. 発光強度の測定とスペクトル分裂からプラズマ周辺部の中性原子の発光位置および強度が求まる. この測定に対応した磁力線・磁気面の構造を解析する.

計測されるプラズマからの発光は水平でかつ y 軸に対しては $\delta\phi = 6$ 度だけ傾き, x 軸とは

$$r_c = 4.15 + 2.3 \times 10^{-3} / \sin \delta\phi$$

で交差している. よってこの計測に対応する磁力線・磁気面構造を求めるために, この交差点から計測光方向に 1m だけ離れた赤道面上に視点 \mathbf{x}_{eye} を設定しよう. 視野中心 \mathbf{x}_{cntr} は赤道面上の計測光と x 軸との交差点に設定する. これにより, 任意断面磁力線貫通図の原点 $(0, 0)$ はこの交差点となり, X 軸は交差点から計測光方向に沿った距離 (計測器の存在する方向が正の方向), Y 軸は z 方向 (鉛直方向) となる. よって, 視点 \mathbf{x}_{eye} と視野中心 \mathbf{x}_{cntr} を次のように設定すれば十分である.

$$\mathbf{x}_{eye} = \begin{pmatrix} 1 \times \sin \delta\phi \\ r_c + 1 \times \cos \delta\phi \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} .1045284632 \\ 5.166525471 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{x}_{cntr} = \begin{pmatrix} 0 \\ r_c \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 4.172003576 \\ 0 \end{pmatrix}$$

「LHD の磁力線・磁気面可視化プログラム」LHD_lines_of_force.exe の GUI(6 頁参照) で次のような入力データを (fort.50) を作成する (内寄せ標準磁場配位 ($R_{ax} = 3.6$ m 配位) の場合).

```

1 'zeeman_r360.ps' 'zeemzn_r360.40'
## 新規計算の実行 (再画像化処理時は 0 と設定), PS ファイル, 計算結果格納ファイル
11000, 11000, 11000, -17967, -3007, 11229, ' RAX=3.6 M, BAX=2.75 T, gamma=1.254'
## コイル電流 H_O, H_M, H_I, OV, IS, IV (A) とコメント
1, 1, 0.07, 0, 'limiter.csv'
## ダイバータタイル, アンテナの有無, アンテナ後退位置, 追加リミターの有無と csv ファイル名
20, 0
## 最大トーラス周回数と追跡方向 (-1: -B 方向, 0: 両方向, 1: B 方向)
3
## 出発点座標系 (0:回転ヘリカル座標系, 1:円柱座標系, 2:直交座標系, 3:カオス磁力線と磁気面)
200, 30, 7, 0.1, 0
## 径, ポロイダル, トロイダル (1 ヘリカルピッチ) 各方向分割数, 磁気面間隔, 磁気島プロットせず
0.5,
## 描画最短磁力線結合長 (トーラス周回数)
0 27 3 1
## 子午面磁力線貫通図の指定 (phi_ini, phi_max, 分割数, ヘリカル対称性 (= 1 : 仮定する)
0, 0.1, 2.5
## 磁場強度等高線図プロットの有無と, 間隔, 基準値
1 0.1045284632d0, 5.166525471d0, 0d0, 0d0, 4.172003576d0, 0d0, 3.2
## 任意断面磁力線貫通図の有無と任意断面を指定する視点と視野中心. 最大視野
3 0.1045284632d0, 5.166525471d0, 0d0, 0d0, 4.172003576d0, 0d0, 0.01d0, 40d0, 5
## 立体図の有無と走査データ, 視野中心, 視点移動距離, 視野角, (切断面/見たまま)&ドットサイズ
1, 1, 0, 0, 0, 0, 1
## 立体図描画物:真空容器, リミター, ヘリカルコイルと容器, 垂直磁場コイル, 磁気島コイル, 磁力線
1, 1
## リミターおよび真空容器での磁力線追跡停止 (1) あるいは磁力線透過 (0) の指定
' ZEEMAN EFFECT'
### 計算結果に書き込む任意のコメント. データの終了

```

カオス磁力線構造は磁気軸位置によって大きく変化する。中性原子密度計測装置に直面している磁気面・磁力線構造を図 31 に示す。

さらに、中性原子密度計測装置から見えるカオス磁力線領域の立体図を、図 32 ($R_{ax} = 3.6 \text{ m}$ 配位の場合) と図 33 ($R_{ax} = 3.75 \text{ m}$ 配位の場合) とに示す。 $R_{ax} = 3.75 \text{ m}$ 配位は $R_{ax} = 3.6 \text{ m}$ 配位に比べ、カオス磁力線領域の厚みが厚いことが示されている。

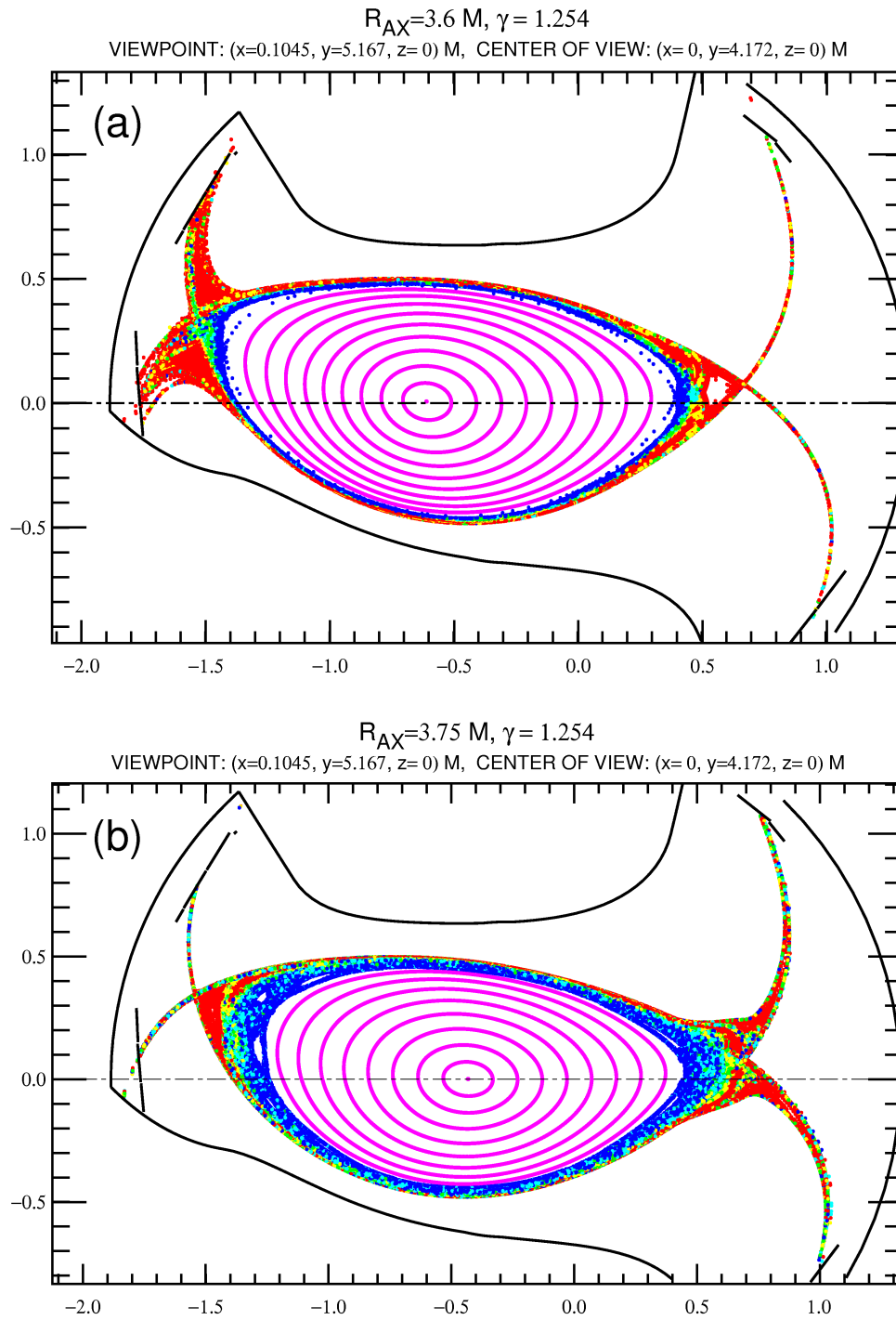


図 31: LHD 周辺部中性原子密度計測装置に対面する磁力線貫通図. 横軸は視線方向 (r 方向, 縦軸は鉛直方向を示す. 図の原点は $(0, 0)$ は視野の中心と定めた位置 $(r, \phi, z) = (4.173, 0, 0)$ を示す. (a) 内寄せ標準磁場配位 ($R_{ax} = 3.6 \text{ m}$ 配位) の場合. (b) 標準磁場配位 ($R_{ax} = 3.75 \text{ m}$ 配位) の場合.

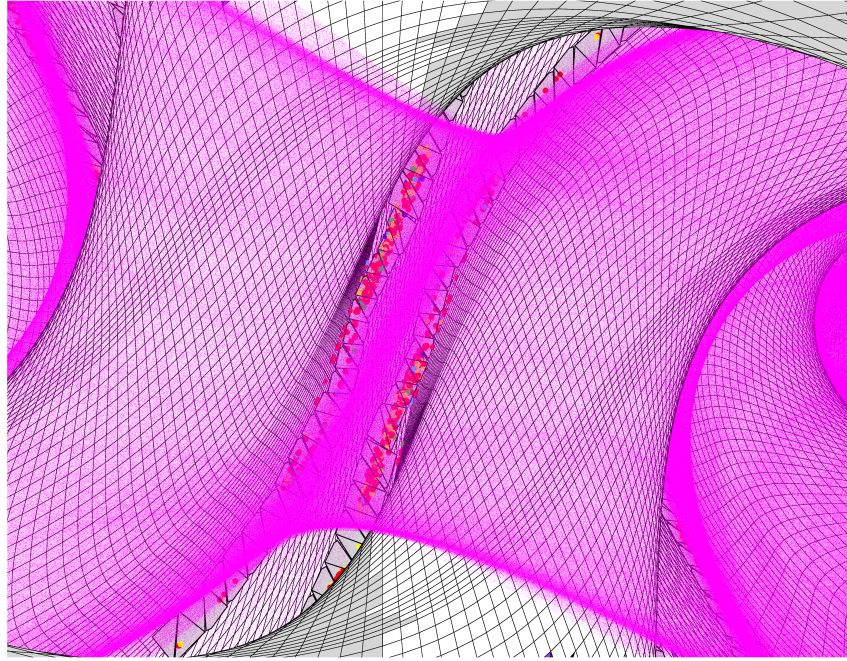


図 32: 1-O ポートに設置された中性原子密度計測装置から見えるカオス磁力線領域の立体図. $R_{ax} = 3.6$ m 配位の場合.

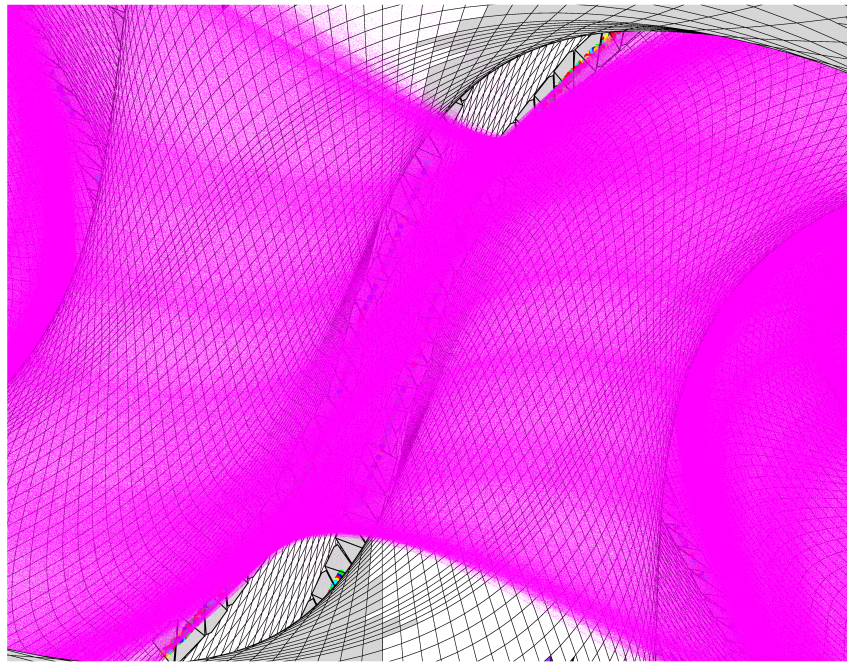


図 33: 1-O ポートに設置された中性原子密度計測装置から見えるカオス磁力線領域の立体図. $R_{ax} = 3.75$ m 配位の場合.

5 使用上の注意点とその他の覚え書き

LHD 磁力線・磁気面可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe」を使う上での注意点を列挙する。

- 子午面断面貫通図, 任意断面貫通図は磁力線追跡時に必要なデータを全て取得している。そのため, そのデータを再画像化するときは, 磁力線追跡計算時と同一のデータでなければならない。(第 8 データ (25 頁), 第 10 データ (26 頁))
- 立体図は任意の条件 (第 10 データ (26) 頁) で再画像化できる (視点, 視野中心位置等を任意に設定して, 再画像化処理できる)。

LHD 磁力線・磁気面可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe」のソースプログラムは 3 個の fortran90 プログラムで作られている (表 6)。

磁力線追跡プログラム	lhd_lines_of_force.f90
LHD 装置解析プログラム	lhdmsview.f90
図形処理プログラム	gsnifs.f90

表 6: LHD 磁力線・磁気面可視化プログラムのソースプログラム

これらのプログラムから, LHD 磁力線・磁気面可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe」を作るには次のようにする。(64 ビットパソコンの Linux オペレーティングシステム上に, Linux 版 Fortran&C Package 64 V1 (富士通) がインストールされているとする)

まず最初に適当なディレクトリー (例えば home directory) の下に 5 個のディレクトリー

LHD_lines_of_force, lhdmsview, gsnifs, dvt_tile_point, lhd_B_data,

を作成する。表 6 のプログラムをそれぞれのディレクトリーにコピーする。さらに, プログラムの実行に必要なダイバータイルデータを dvt_tile_point ディレクトリーに, LHD の磁場データを lhd_B_data ディレクトリーにそれぞれコピーする。

ディレクトリー LHD_lines_of_force に移動し, 8 行からなる次の Makefile を作成する。

```
1:LHD_lines_of_force.exe: ../gsnifs/gsnifs.o ../lhdmsview/lhdmsview.o lhd_lines_of_force.f90
2:      frt -Ae -Am -Kfast -o LHD_lines_of_force.exe -fw -I ../gsnifs -I ../lhdmsview \
3:      ../gsnifs/gsnifs.o ../lhdmsview/lhdmsview.o lhd_lines_of_force.f90
4:../lhdmsview/lhdmsview.o: ../gsnifs/gsnifs.o ../lhdmsview/lhdmsview.f90
5:      frt -Ae -Am -Kfast -c -o ../lhdmsview/lhdmsview.o -fw -M ../lhdmsview -I \
6:      ../gsnifs ../gsnifs/gsnifs.o ../lhdmsview/lhdmsview.f90
7:../gsnifs/gsnifs.o: ../gsnifs/gsnifs.f90
8:      frt -Ae -Am -Kfast -c -o ../gsnifs/gsnifs.o -fw -M ../gsnifs ../gsnifs/gsnifs.f90
```

その後, ディレクトリー LHD_lines_of_force 上で

make Enter-key

とすれば, LHD 磁力線・磁気面可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe」が作成される。

6 謝辞

LHD 磁力線・磁気面可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe」の完成までには核融合科学研究所の多数の方々から多くの援助・励ましをいただきました

LHD 磁力線・磁気面可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe」開発の一番の原動力は、LHD 実験結果と LHD 磁力線・磁気面可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe」の計算結果との対応に深い関心を寄せていただいたことにあります。LHD 実験グループの方々に深く感謝いたします。

LHD 装置に関するデータは下記の方々から提供していただきました。このことに、心からのお礼を申し上げます。

LHD 磁力線・磁気面可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe」の特色は LHD の真空容器の形状が正確に取り入れられていることである。プログラムに真空容器形状を取り入れるために、必要かつ十分な設計図は小森彰夫教授に提供していただきました。

LHD の真空容器壁には、第 3 サイクル以降は、保護板が取り付けられている。LHD 磁力線・磁気面可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe」にはこの保護板は組み込まれていない。LHD のプラズマ対向壁は LHD 磁力線・磁気面可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe」の示す真空容器壁よりも、約 2.5 cm だけ狭まっている。

LHD 磁場の計算に不可欠な、ヘリカルコイル、垂直磁場コイルのデータは、佐藤隆教授、今川信作教授から提供していただきました。佐藤隆教授からは、装置大半径 $r_0 = 3.9\text{m}$ は LHD 実験遂行時（真空容器冷却時）の数値であるが、設計図にあるその他の数値は全て常温時のものであるとの注意を受けました。これに従い、LHD 磁力線・磁気面可視化プログラム「LHD_lines_of_force.exe」に組み込まれている磁場コイル、真空容器のデータは設計図の数値に、0.997 倍されたものが使用されています。これらのコイルの作る磁場のテーブルは赤尾英毅博士に作成していただきました。LHD 磁場コイルのデータは大藪修義教授に提供していただきました。

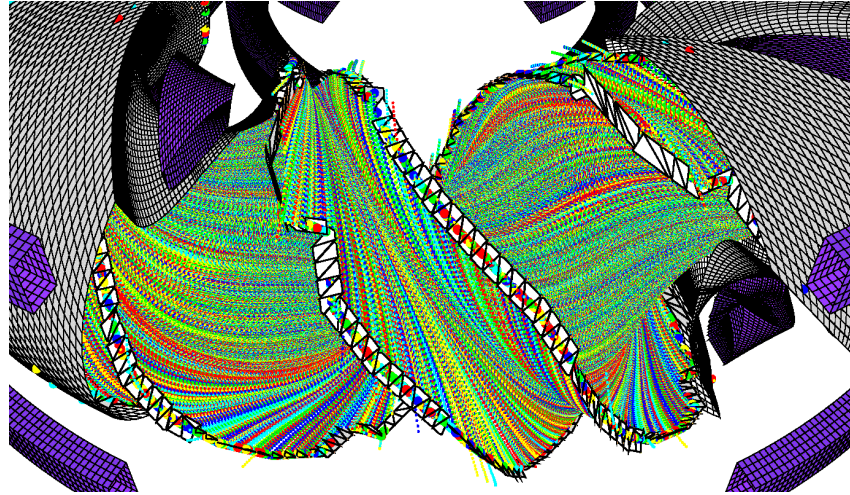
ICRF アンテナの形状は武藤敬教授に提供していただきました。また、ICRF アンテナのサイドリミター、NBI アーマータイルのデータは装置技術課の飯間理史氏、米津宏昭氏、小島治樹氏に提供していただきました。

第 4 節の実行例に使用した CCD カメラ位置のデータは庄司圭助手、芦川直子助手にデータを提供していただきました。第 4.4 節の実行例 (Zeeman 効果を用いた LHD 周辺部の中性原子密度計測に対応する計算例) では、後藤基志助手にデータを提供していただきました。

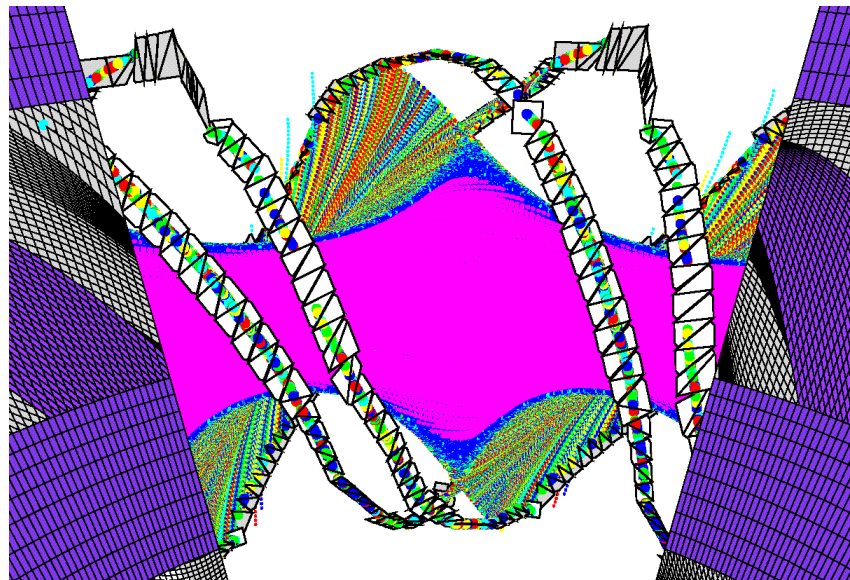
参考文献

- [1] 渡辺二太, 赤尾英毅, 「ヘリカルプラズマに成立する対称性」, J. Plasma Fusion Res. 73 (1997) pp.186 - 200 .

- [2] AKAO, H., "Numerical Study of Whisker Field Lines in the Periphery of the Large Helical Device", J. Phys. Soc. JPN, **59** (1990) p.1633.
- [3] T.Watanabe, Y. Matsumoto, M. Hishiki, S. Oikawa, H. Hojo, M. Shoji, S. Masuzaki, R. Kumazawa, K. Saito, T. Seki, T. Mutoh, A. Komori and LHD Experimental Group, "Magnetic field structure and confinement of energetic particles in the LHD", Nucl. Fusion **46** (2006) 291 — 305.



LHDにおける高性能プラズマ保持を実現しているカオス磁力線の立体構造. 真空容器壁を $\pi/10 \leq \phi \leq 4\pi/10$ の範囲で切除してしている. ダイバータタイルも示されている. トーラス外側から見る.



真空容器壁を $\pi/10 \leq \phi \leq 4\pi/10$ の範囲で切除してしている. LHDの磁力線立体構造を磁気軸 ($r = r_{ax}$) を通り, 法線が視点 ($r = r_{eye}, z = z_{eye}$) に向かう, 曲面

$$(r - r_{ax})(r_{eye} - r_{ax}) + z z_{eye} = 0$$

で切断して, 磁気面領域 (鮮紅色プロット) とカオス磁力線の立体構造を示す. ダイバータタイルも示されている. トーラス内側から見る.