

4.6 炉心シミュレーション

4.6.1 統合コード

原型炉の設計にあたっては、核融合反応を維持する炉心プラズマの振る舞いを、その時間発展を含めて正確に予測する必要がある。炉心プラズマの時間発展には、電磁流体平衡、粒子や熱の輸送、巨視的な安定性、外部からの加熱や燃料供給等のさまざまな現象が関与しており、それらの時間スケールの広がりには 14 桁以上、空間スケールも 7 桁以上にわたっている。したがって、炉心プラズマを単一のシミュレーションで記述することは不可能であり、個々の現象を記述する要素コードを組み合わせた統合シミュレーションコードを必要とする。そのような統合コードは、コアから周縁、SOL、ダイバータにわたるプラズマ全体を、プラズマの立ち上げ、維持、突発事象への応答、立ち下げにわたる放電時間全体を記述し、実際のプラズマ実験結果との比較によりその妥当性が検証されていなければならない。このような統合コードは、原型炉設計における炉心プラズマの予測に加えて、プラズマ制御システムの設計や原型炉の実時間制御への応用のために必須である。

統合コードの代表的な構成を図 4.6-1 に示す。平衡、炉心プラズマ輸送、巨視的安定性、粒子・加熱・運動量源、周辺プラズマ輸送等のモジュールからなる。それぞれのモジュールは、個々の現象に合わせた複数の要素モジュールから構成されることもあり、同じ現象に対して解析レベルの異なる複数の要素モジュールが用意される場合もある。乱流輸送や巨視的不安定性によるプラズマの変形等は強い非線形性をもつ現象であり、大規模シミュレーションを必要とする。統合コードにおいてこのような現象を取り扱うためには、大規模シミュレーションの結果を簡約化したモデルが必要となる場合もある。これらのモジュールは、標準化されたデータを共通化されたインターフェイスを介して互いに交換して相互作用し、プラズマの時間的发展を自己無撞着に記述する。

炉心プラズマの運転シナリオの開発やプラズマ制御システムの設計にあたっては、計算されたプラズマデータを計測装置の出力の形に変換する計測モデルモジュールやアクチュエータとのインターフェイス或いは簡単な制御アルゴリズムを組み込んだ制御モデルモジュール

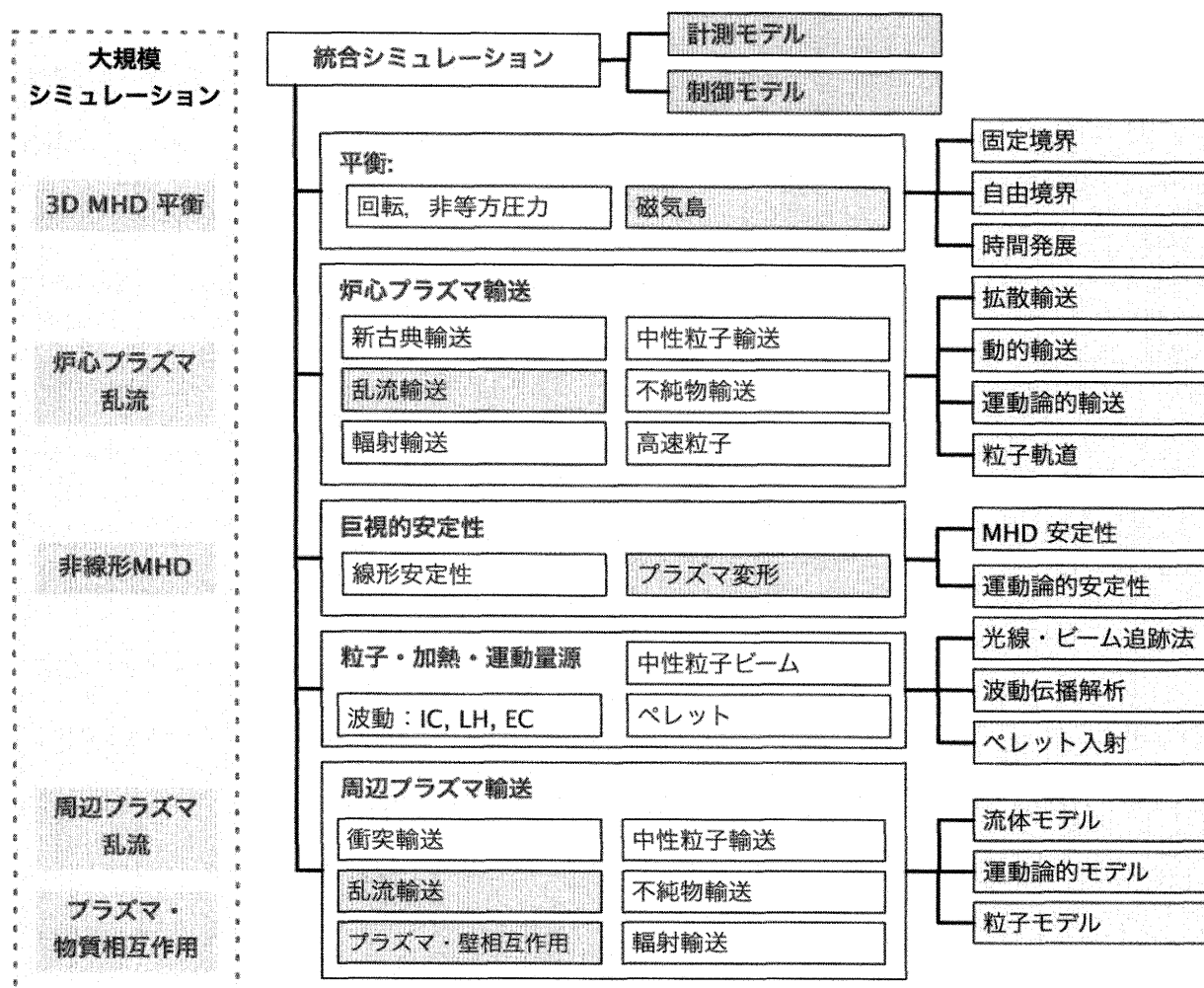


図 4.6-1 トカマク統合コードの代表的な構成

第4章 炉心プラズマに関する基盤と課題

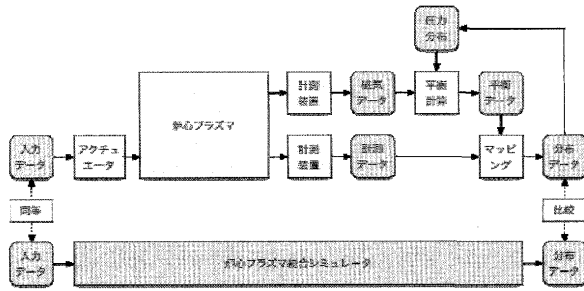


図 4.6-2(a) 炉心プラズマ統合シミュレーション開発フェーズの構成 (分布データで実験と比較)

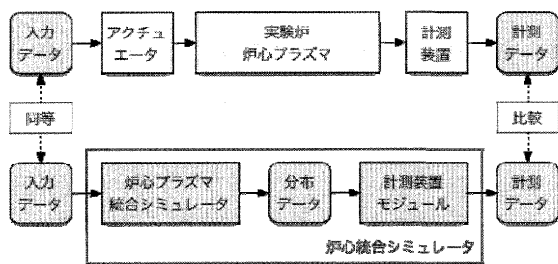


図 4.6-2(b) 炉心統合シミュレーション開発フェーズの構成 (計測データで実験と比較)

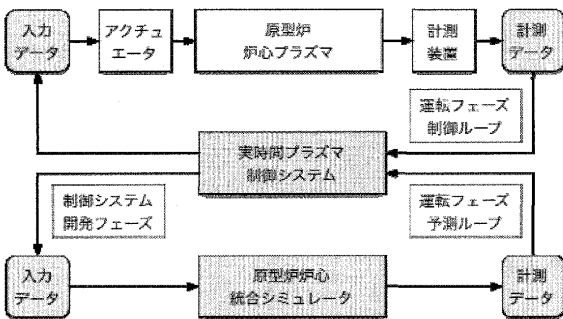


図 4.6-2(c) 制御システム開発フェーズおよび原型炉運転フェーズの構成

ルが必要となる。図 4.6-2(a)に示すように、現在は実験計測データから平衡データに基づくマッピングによって得られた分布データをシミュレーション結果と比較している。しかしながら、より高速に、またより正確に実験データと比較するためには、図 4.6-2(b)に示すようにシミュレーション結果を計測装置の出力値に変換し、実験計測データと直接比較することが必要となる。さらに、図 4.6-2(c)に示すように、原型炉制御システムの開発にあたっては炉心シミュレータが不可欠であり、運転時には通常の制御ループと並行して、プラズマの振る舞いを先行して予測する予測ループが必要となろう。実

時間制御への利用にあたっては、高速応答を実現するために、必要十分な解析レベルを維持し、並列処理に適した解析手法を用いた要素モジュールが必要である。

原型炉設計に必要な統合シミュレーションの実現にむけて、統合コードの開発が進められている。原子力機構では、コアプラズマを中心に電磁流体安定性や高速粒子軌道追跡を含めた統合コード TOPICS-IB とダイバータ統合コード SONIC を開発し、両者の統合を進めている。京都大学では、輸送モデリングの高度化や波動伝播解析を含めた統合コード TASK を開発しており、3次元効果を含むように拡張した TASK3D の開発を核融合研と共同で進めている。

4.6.2 炉心シミュレーションに求められるもの

(1) MHD 安定性の実時間評価

炉心プラズマの平衡および MHD 安定性を実時間で計算し、分布制御することは核融合出力を定常維持する上で重要と考えられる。デモ炉の循環パワーの許容範囲でどのようなタイプのアクチュエータが成立するのか検討することが不可欠であるが[4.6-1]、ここでは、高速な安定性解析をいかに実現するかその取り組みの一例を紹介する[4.6-2]。

原子力機構では、MHD 安定性解析コード MARG2D[4.6-3]を開発し、JT-60U の実験データ解析を進めている[4.6-4]。安定性の実時間制御を行うためには、MARG2D で大きな CPU 時間を占める固有値ソルバーの高速化が不可欠である。今回、PlayStation3[®]にも搭載された実績を持つ Cell を複数台ネットワーク接続し、固有値ソルバーを Cell 間並列、Cell 内並列、演算レベル並列の 3 階層並列化処理により高速化を試みた。この結果、固有値を 1 秒以内で求めることが可能となった。図 4.6-3 にトカマク装置にお

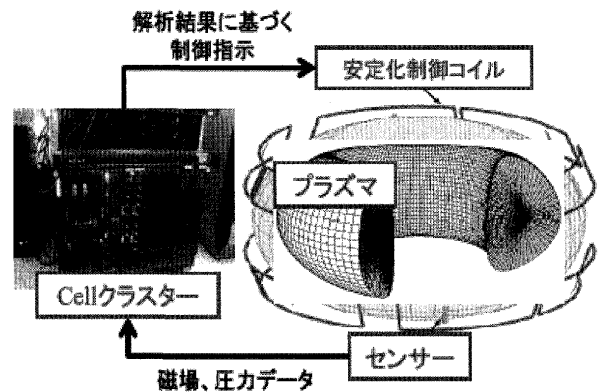


図 4.6-3 トカマク装置におけるプラズマ安定性制御の概念図
プラズマの安定性を制御するためセンサにより不安定の兆候をモニターし、外部コイル磁場により安定化する。センサからの情報をもとに平衡・安定性を高速に解析できる専用計算機が必要となる。

ける Cell クラスタを用いた MHD 安定性制御の概念図を示す。実際の応用のためには、(1) 平衡を実時間で再構成すること、(2) 上記の高速ソルバーを MARG2D に実装し、想定されるすべてのモードを実時間内に計算すること等、解決すべき課題が残されている。将来の原型炉では制御対象の時定数が数秒程度であるため、数十～百ミリ秒程度の時間内に安定性計算を終えることが最終目標となるが、今後、GPU ボードの性能が向上してくれば、GPU/CPU ハイパフォーマンスクラスタを用いて十分達成可能な課題と考えられる。

(2) 統合コードによる MHD 制御 : ECCD による新古典テアリングモードの抑制

統合コードによる MHD 制御の例として、新古典テアリングモードの電子サイクロトロン波電流駆動 (ECCD) による安定化がある。MHD ブートストラップ電流割合が大きい高ベータポロイダルプラズマでは、磁気島形成による圧力分布の平坦化が、磁気島内のブートストラップ電流を局所的に減少させ、その減少が磁気島を成長させるのが新古典テアリングモード (NTM) であり、トカマクプラズマの高ベータ・定常化において、大きな課題となっている。新古典テアリングモードを回避するには、電流分布および圧力分布の適切な制御によって不安定性を抑制する方法があるが、磁気島内で不足したブートストラップ電流を電子サイクロトロン波電流駆動 (ECCD) 等によって補うことで安定化する方法が有効である事の実験的検証が盛んに行われている [4.6-5~4.6-7]。安定化にはモード位置に正確に ECCD を入射する必要があるため、JT-60U においては繰り返し放電によって予め予想される q 分布から NTM 発生の狙いを定め、ECE ヘテロダイナミクスによる電子温度計測から、磁気島のある磁気面の位置を正確に同定して、ECCD の入射角を 10ms で実時間制御した。その結果、磁気島への ECCD により、モード安定化及び β 値の上昇が得られ、ITER や核融合炉での実行可能性を示した。このため、ITER でも採用され、 $m/n=3/2, 2/1$ の両モードを安定化するため、20MW 程度の EC 波入射パワーを用意している [4.6-8]。核融合炉を考えたとき、シミュレーションによる q 分布等の内部分布予測に基づき、まず安全係数の最小値 $q_{\min}$ を 2 以上にして、テアリングモードがより安定な分布にするなど、安定な圧力・電流分布を持ったプラズマを形成する運転をすることや、EC 波による NTM 安定化の最適化が必要である。また、実時間のプラズマ平衡の再構築等による NTM の位置の同定と EC 波の最適入射条件の予測に基づいた、安定化が重要な制御要素と考えられる (図 4.6-4)。

新古典テアリングモードは、輸送過程のエネルギー閉じ込め時間とはほぼ同等の時間スケール ($\sim 10^{-2} \tau_p$, ここで、 τ_p は、抵抗性磁場拡散時間) を持っており、ブートストラップ電流や垂直や水平方向の熱拡散と関連している。このため、輸送と MHD を結合して考慮するこ

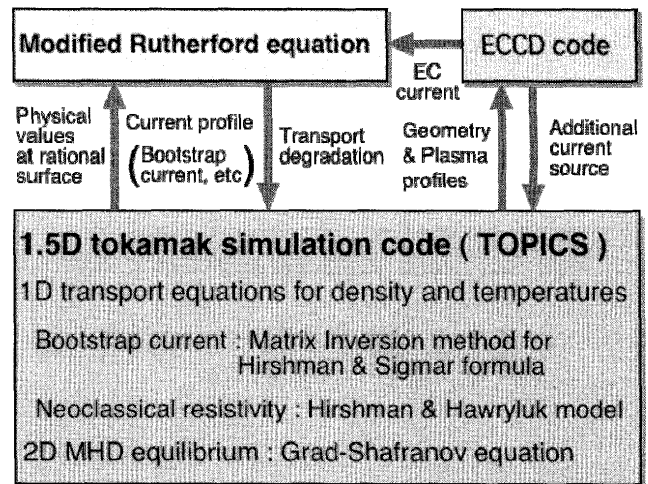


図 4.6-4 新古典テアリングモード予測計算統合モデル

とが重要であり、統合コードによるシミュレーションが必要な課題である。新古典テアリングモードによる磁気島の成長は、次式の修正ラザフォード方程式 [4.6-8] によって良く表わされる。

$$\frac{\mu_0}{\eta} \frac{dw}{dt} = \Gamma_{\Delta} + \Gamma_{GGJ} + \Gamma_{BS} + \Gamma_{pol} + \Gamma_{EC} \quad (1)$$

ここで、 Γ_{Δ} , Γ_{GGJ} , Γ_{pol} は、各々テアリングモードの安定性の指標、磁気井戸による安定化項、分極電流による安定化効果である。 η は、新古典抵抗率。 Γ_{BS} はブートストラップ電流の減少による不安定化項である。

$$\Gamma_{BS} = k_2 \mu_0 L_p j_{BS} \left\langle \frac{\nabla \rho}{B_p} \right\rangle \frac{w}{w^2 + w_d^2} \quad (2)$$

ここで、 j_{BS} は、ブートストラップ電流密度、 L_p は圧力勾配長、 w_d は垂直と水平の熱輸送係数の比に関連した量であり、これらの物理量は輸送コード TOPICS で求めることができる。そこで、図 4.6-4 の様に輸送コード TOPICS と修正ラザフォード方程式に基づく新古典テアリングモードの磁気島成長モデルを結合し、ECCD コードを統合し EC の局所電流による安定化効果 Γ_{EC} を、式(1)に加えた。 Γ_{EC} は、ECCD コードにより輸送コードから得られたプラズマデータを基に、EC の入射条件から磁気島への駆動電流を求め、磁気島安定化効果を求める。方程式(1)における未定係数は、JT-60U における実験結果を用いて決められた。このモデルは、図 4.6-5 に示す様に、新古典テアリングモードによる磁気島の成長と EC 電流駆動による安定化を良く説明できている。この統合モデルにより、170GHz の EC 波を持つ ITER の場合の予測を行い、トロイダルおよびポロイダル

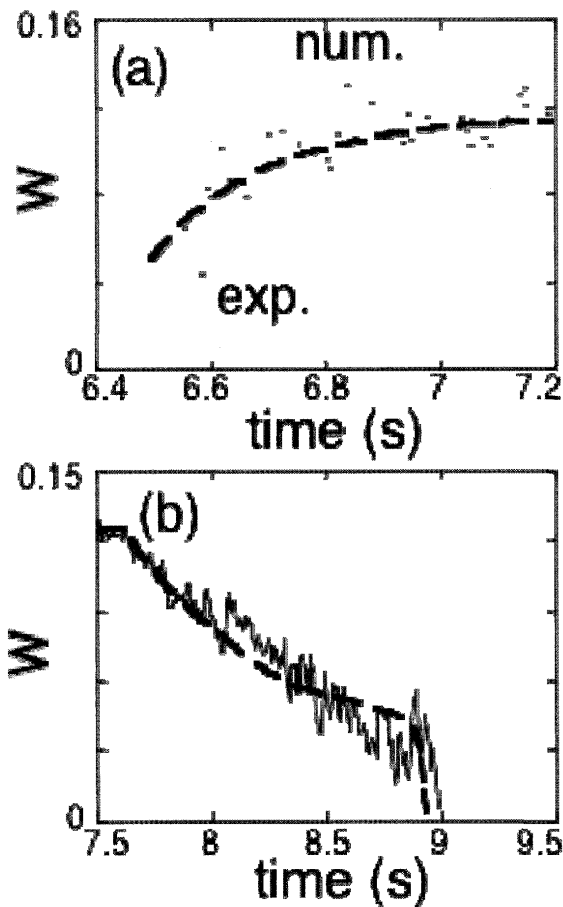


図 4.6-5 新古典テアリングモードによる磁気島幅 W の(a)成長と(b)EC 電流駆動による安定化の時間変化. 実線は実験値, 点線はシミュレーション.

入射角の最適化等を図ることによって, 12MW 程度の入射パワーで新古典テアリングモードの完全な安定化が可能であることが示された[4.6-9]. また, 同じ統合コードによるシミュレーションにより, EC の入射位置の精度や, 入射電流幅, 入射時期を早める事などが安定化に有効である事を示している.

(3) 計測モジュール開発

トラスプラズマの輸送現象を理解するために, 近年, 高時間・空間分解能をもつ測定器の開発が進み, 乱流構造の同定, 輸送に果たす役割の定量的評価が可能となってきた. 核融合科学研究所と九州大学では, 乱流輸送現象の定量的評価手法の確立をめざし, 乱流シミュレーションデータを用いて実験計測を模擬する乱流計測シミュレータ (Turbulence Diagnostic Simulator)の開発を進めている[4.6-10].

乱流計測シミュレータはトロイダルプラズマにおける乱流コードと様々な実験計測を模擬する計測モジュールから構成される. 解析に必要なのは統計操作が可能なサンプル数を持つ3次元数値乱流場であり, 第一原理

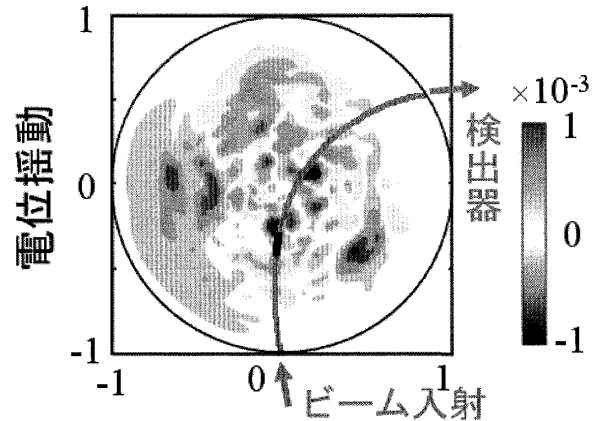


図 4.6-6 乱流シミュレーションで得られた電位揺動の瞬間値と重イオンビームの軌跡. 緑線でビームの軌跡を示す. 黒色領域で重イオンが一価から二価に電離.

シミュレーション等により計算する. そのデータに対して実験で乱流計測に用いられる計測手法を模擬した解析を行う. 一例として重イオンビームプローブ(HIBP)の数値計測について説明する. HIBPでは重イオンビームをプラズマ内に入射し, 電離したイオン束を測定することでプラズマ中の電位, 密度に関する情報が得られる(図4.6-6). 乱流計測シミュレータでは, シミュレーションデータ, 実験データをもとに構成された任意の乱流場の粒子軌道およびビーム強度を計算し, さらに有限ビーム幅を考慮することで, 乱流場上で測定器の分解能を取り込んだ測定値が得られる(図4.6-7). 実際のポテンシャルと計測により得られたポテンシャルを比較することで計測手法の妥当性を検証することが可能となる.

乱流計測シミュレータは, 次世代磁気核融合装置の計測機開発に対して有用と考えられる. また, デモ炉のオペレーションを制御するための核燃焼プラズマシミュ

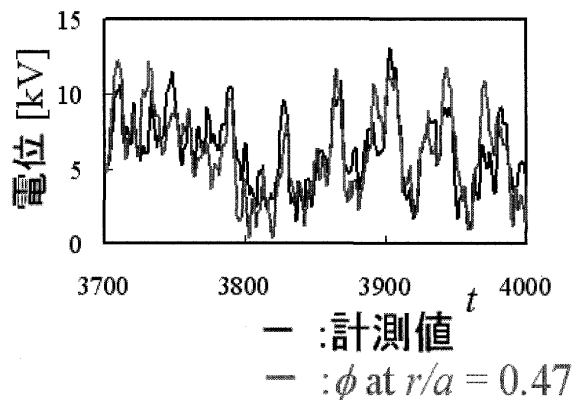


図 4.6-7 電位の時間発展. HIBP計測模擬による値 (黒)と固定点における値(赤)を示す.

レータに実装することで原型炉から得られる限られた計測データを補完するものとして応用が期待される(図 4.6-8).

4.6.3 今後の開発課題

炉心プラズマを記述する統合コードの開発課題としては、個々の現象に対する物理モデルの精密化・高度化に加えて、実験データとの比較による物理モデルの検証がまず必要である。燃焼プラズマに対する検証は ITER における DT 燃焼実験を待つことになる。また、乱流輸送現象や巨視的非線形現象の大規模シミュレーションの結果を系統的に取り入れることも不可欠である。要素モジュールの統合において重要となるモジュール間のデータ交換と実行制御の標準化については、国内では核燃焼プラズマ統合シミュレーション構想(BPSI)を中心に進められており、将来的には ITER 統合モデリング活動との整合を検討する必要がある。原型炉の性能予測やプラズマ制御システムの開発に向けては、計測モデルや制御モデルの開発に加えて、物理モデルの簡約化ならびに並列処理による高速化を進める必要がある。

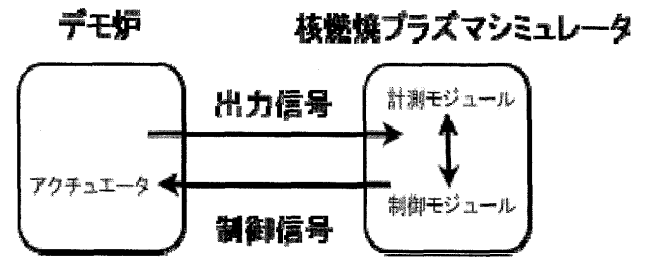


図 4.6-8 核燃焼プラズマシミュレータ概念図

デモ炉の出力信号を基に核燃焼プラズマシミュレータによりデモ炉の核燃焼を模擬し、内部診断を実時間で行う。分布制御の必要性が生じた時、制御信号をデモ炉へ送り、アクチュエータを起動する。

炉工学および炉設計におけるコード開発と組み合わせた原型炉設計制御コードの開発計画を図 4.6-9 に示す。炉工学におけるブランケット統合コードは、中性子遮蔽、トリチウム増倍、熱流動等の要素コードを含ん

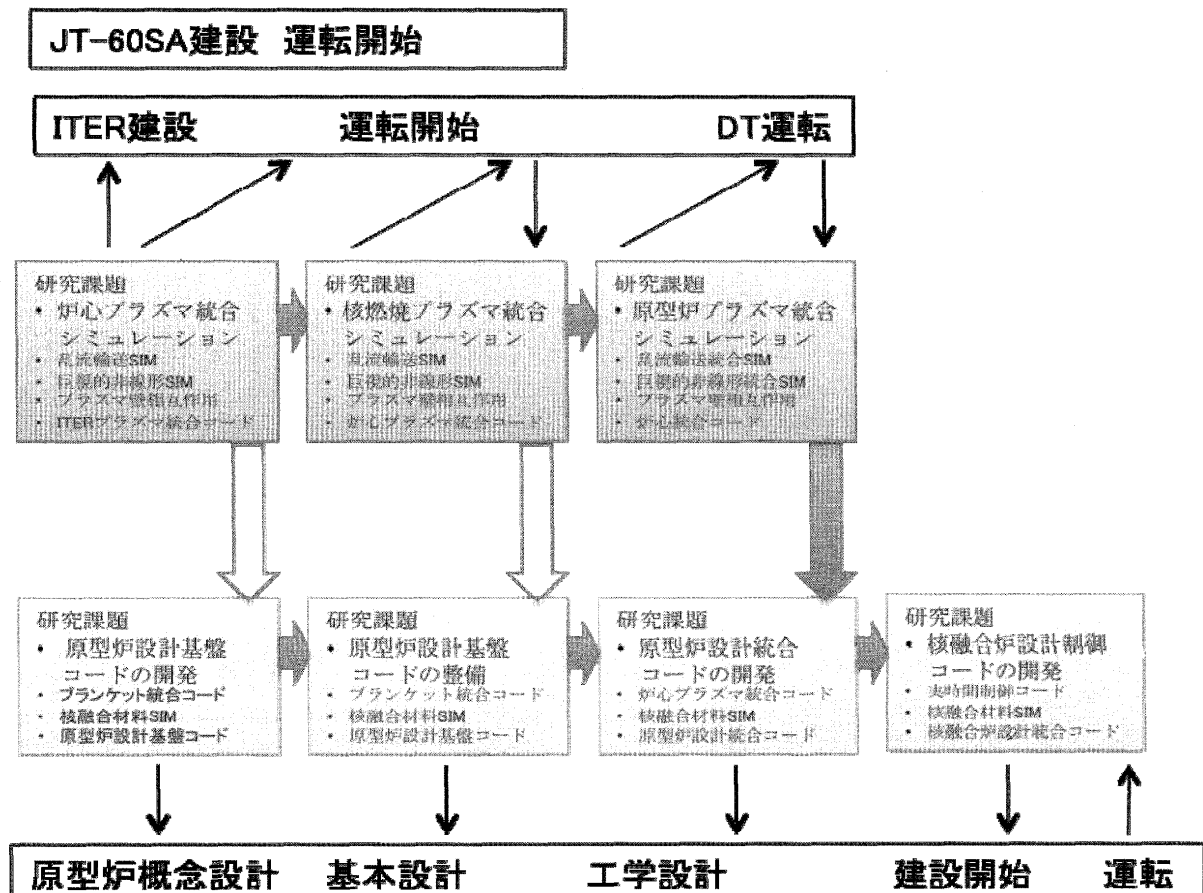


図 4.6-9 原型炉の設計・制御に向けたコード開発

第4章 炉心プラズマに関する基盤と課題

であり、原型炉設計基盤コードは炉システム設計に必要なコード群からなる。原型炉設計統合コードは、この基盤コードをベースに、炉心プラズマ統合コードおよびブランケット統合コードを組み合わせて構成され、原型炉の設計に必要なコード群となる。原型炉の運転時にむけて、炉心プラズマの実時間制御予測コードを開発することも必要である。

参考文献

- [4.6-1] 次世代核融合実験装置の実時間制御に向けた取り組みに関しては、以下の小特集が参考となる。
出射浩，小特集「燃焼・高ベータプラズマの実現に向けたプラズマ分布制御の課題：5. 実時間データ処理・演算の進展と課題」，核融合学会誌 2010 年
- [4.6-2] N. Kushida, et al., Proc. of The 18th Euro-micro International Conference on Parallel, Distributed and Network-Based Computing (2010) 482.
- [4.6-3] S. Tokuda et al., Phys. Plasmas 6, 3012 (1999).
- [4.6-4] 矢木雅敏，NEXT 計画と BA CSC を利用した理論・シミュレーション研究，
RIST NEWS No.49, 2010
http://www.rist.or.jp/rist/rnews/49/ristnews_49.html
- [4.6-5] AUG: H. Zohm et al., Proc. 21st IAEA Conf. EX/ 4-1Rb.
- [4.6-6] DIII-D: R. Prater et al., Proc. 21st IAEA Conf. EX/4-2.
- [4.6-7] JT-60U: A. Isayama et al., Proc. 21st IAEA Conf. EX/ 4-1Ra.
- [4.6-8] C.C. Hegna and J.D. Callen, Phys. Plasmas 4, 2940 (1997).
- [4.6-9] N. Hayashi, et al., J. Plasma Fusion Res. 80, 605 (2004).
- [4.6-10] 糟谷直宏他，3次元シミュレーションデータを用いたトロイダルプラズマにおける乱流計測，第8回核融合エネルギー連合講演会，高山市高山市民文化会館，2010年6月10～11日，10A-29P