

#### 4.4.4 プラズマ・核融合

##### (1) 現在行われている課題

人類社会の持続的な発展を支える長期的に安定供給が可能なエネルギーの実現を目指して、核融合エネルギーの研究開発が世界規模で進められている。核融合エネルギーは

- i) 燃料が偏在せず豊富である
- ii) 高レベルの放射性廃棄物が生成されず環境負荷が低い
- iii) 核融合炉は暴走せず原理的に高い安全性を有する
- iv) 核拡散の制約を受けない

といった特徴があり、日本にとって国産エネルギーとなり得るばかりか途上国を含めた地球規模での基幹エネルギー需要を長期的に代替し得る革新的エネルギー源である。したがって、核融合エネルギーの実現に貢献することは、低炭素社会の実現につながるだけでなく、日本の新たなエネルギー戦略・産業の発展にもつながる。現在、世界中で精力的に開発が進められている磁場閉じ込め型の核融合炉（以降では磁場閉じ込め型の記述を省略する）では約1億度の燃料プラズマをトーラス状の磁場で効率的に閉じ込めて核融合反応を持続させる。燃料プラズマの重水素と三重水素の核融合反応によって3.5MeVのアルファ粒子と14MeVの中性子が発生し、高エネルギーのアルファ粒子は燃料プラズマを自己加熱して炉心プラズマの高温状態が維持する。一方、中性子はブランケットと呼ばれる機器に吸収されて、そのエネルギーは冷却材によって取り出されて発電が行われる。これまでに、JT-60U（日本）およびJET（欧州）という2つの実験装置で入力エネルギーと核融合出力（換算値）が等しくなる臨界条件を達成しているが、現在、核融合炉の科学的・工学的可能性の実証を目的として、次世代の実験装置である国際熱核融合実験炉ITERの建設が日米欧露中韓印、7極の国際協力の下にカダラッシュ（仏）で進められ、2020年に運転開始を予定している。これまでの高温プラズマ実験では水素、もしくは、重水素のみのプラズマを電磁波や粒子ビームで加熱して核融合炉心の高温プラズマ挙動を模擬してきたが、ITERでは重水素と三重水素からなる燃料プラズマを使用して核融合反応を発生させる核燃焼プラズマの長時間運転が計画されており、これまでの模擬実験とは質的に異なる炉心プラズマが実現する。このため、核燃焼プラズマの性能予測や実験条件最適化においてシミュレーションが大きな役割を果たすと期待されている。

核融合炉開発に関連するシミュレーション分野はプラズマ、熱流体、中性子、材料と多岐にわたっているが、この中で特にプラズマシミュレーションは最大規模の計算量を必要としている。これは、核融合プラズマの第一原理モデルが5次元位相空間（3次元空間×2次元速度、ここで、背景磁場中の粒子速度は3次元から2次元に簡約化される）における粒子分布の発展を記述するジャイロ運動論モデル[1]（異なる位置と速度を持つプラズマ粒子の集団を統計的分布関数によって5次元空間の連続体として表現するモデル）で与えられ、流体モデルに比べて $\sim 100^2$ 倍程度大きい自由度を必要とするためである。プラズマシミュレーションが対象とする問題として、プラズマ乱流に起因する熱輸送や燃料粒子輸送、あるいは、磁気流体现象に起因する高エネルギー粒子輸送が挙げられるが、これらのプラズマ現象は炉心性能に大きく影響するため、核融合炉の成立性を左右する重要課題となっている。

これまで世界中で 5 次元ジャイロ運動論シミュレーションが開発されてきたが、ペタスケール計算機の登場やシミュレーション技術の進歩によって、このようなシミュレーションの適用対象は核融合プラズマ物理の理論的研究のみならず、実験データ解析、乱流輸送モデル開発、さらには、炉心プラズマ設計など幅広い展開を見せるようになってきた[2]。

核融合プラズマの 5 次元ジャイロ運動論シミュレーションは 1990 年代に米国で基本的な手法が確立し、以降、計算機性能の進展と共に急速に発展してきた。核融合プラズマにおいては、炉心サイズが $\sim m$  規模となるのに対して、乱流の最小スケールが背景磁場の影響下でサイクロトロン運動する荷電粒子の軌道半径（イオン $\sim 5\text{mm}$ 、電子 $\sim 0.1\text{mm}$ ）程度となるため直接数値計算 (DNS) が主に用いられる。プラズマの数値計算法としては歴史的に粒子法 (Particle-In-Cell) と格子法 (Eulerian, Semi-Lagrangian) が 1970 年代に開発されているが、1990 年代後半に初めて実現した第 1 世代のトーラスプラズマシミュレーション (GTC, ORB5 等) では比較的少ないメモリでも計算が可能な粒子法が主流であった。第 1 世代シミュレーションの最大の成果は帶状流と呼ばれる乱流が励起するメゾスケール流（平均流）が乱流輸送を抑制する効果を示したことであり[4]、この成果は ITER の設計の妥当性を巡る議論に大きな影響を与えた。次に、2000 年代前半に開発された第 2 世代のプラズマシミュレーション (GKV, GS2, GYRO, GENE 等) では、計算機性能、特に、メモリ容量の増大によって 5 次元位相空間を格子で分解する見通しが得られ、格子法のトーラスプラズマシミュレーションが開発された。格子法の計算は粒子法で問題となる粒子ノイズの影響がなく計算精度が安定しているために、シミュレーションの専門家以外にも広く普及し、系統的な実験解析等に第一原理シミュレーションが活用されるようになった。このような格子法のシミュレーションは 1 本の磁力線の近傍をモデル化した局所モデルによって開発されたが、その後の計算機性能の進展にともない、炉心全体を計算領域とする大域的モデル、あるいは、イオン軌道半径から電子軌道半径のスケールまで取り扱うマルチスケールモデルが開発されてきている。さらに、2000 年代後半にはペタスケール計算が視野に入ってきたことを受けて、より長時間スケールの数値実験を目的とする第 3 世代のプラズマシミュレーション (GT5D, GYSELA 等) が開発されるようになってきた。第 3 世代の大きな特徴は、第 1～第 2 世代の計算が時空間スケールの分離を仮定して背景プラズマ分布を固定し、乱流成分のみを計算する delta-f モデルを採用していたのに対し、第 3 世代では巨視的なプラズマ分布と微視的な乱流成分を同じ第一原理モデルで同時に発展させる full-f モデルが開発されたことである。full-f モデルでは、delta-f モデルの 100 倍の時間スケールの計算が必要になるが、delta-f モデルで発見された帶状流に加えて、自己無撞着に発展するプラズマ分布と乱流の相互作用という新たなフィードバックループを含む数値実験が実現し、炉心出力に影響するプラズマ分布を第一原理モデルで計算することが可能になった。

5 次元ジャイロ運動論シミュレーションはペタスケールのフラッグシップマシンを必要とするため、今日では各極当たり 2～3 本のコードに開発が集約され、米国では GS2 (メリーランド大学)、GYRO (ジェネラル・アトミック社)、GTC (プリンストン大学)、欧州では GENE (マックス・プランク-プラズマ物理研究所)、GYSELA (フランス原子力庁)、ORB5 (ローランヌ連邦工科大学) が主要コードとなりつつある。一方、国内では GT5D[3] (日本原子力研究開発機構)、GKV[4] (核融合科学研究所) という 2 本のコード開発が進行しており、前者は大域的 full-f モデルの長時間シミュレーション、後者は核融合科学研究所に設置されている大

型ヘリカル装置 LHD に代表される 3 次元形状トーラス磁場配位の複雑な磁場形状の取り扱いにおいて、欧米のコードにない独自性を発揮している (ITER や JT-60U で採用されている 2 次元軸対称トーラス磁場配位のトカマク装置がトーラス磁場コイルとプラズマ中の電流で閉じ込め磁場を形成するのに対して、3 次元形状トーラス磁場装置は螺旋状に巻かれたコイルのみによって閉じ込め磁場を形成する。3 次元形状トーラス磁場装置は現時点での炉心性能としては JT-60U や JET のようなトカマク装置に及ばないものの、定常運転を実現しやすいという長所がある)。

ペタスケール計算機の利用によって数年前まで困難であった実装置規模の 5 次元ジャイロ運動論シミュレーションが日常的に実行されるようになってきた。例えば、[5]では GKV を用いて LHD 実験のイオン熱輸送係数を定量的に再現する、あるいは、[6]では GT5D を用いて DIII-D 実験 (ジェネラル・アトミックス社) において報告されたイオン熱輸送係数のプラズマサイズスケーリングを再現するといった実証研究の成果が報告されており、今後 5 年程度で既存実験データに対する実証研究が飛躍的に進展するものと期待される。現時点では、各極における既存装置の実験データに対する実証研究が始まりつつある段階であり、サイエンスベースの議論が展開している状況であるが、今後、ITER という一つの国際協力目標に向かってコード間の国際競争、あるいは、標準化が進展する可能性がある。実際、G8 Nuclear Fusion Simulation@Exascale (G8NuFuSE) 計画[7]のような、多国間協力でエクサスケール計算に向けたソフトウェア開発に取り組むような枠組みも最近構築されている。

## (2) 長期的目標

ITER は核融合エネルギー開発における重要なマイルストーンである。このため、今後 10 年程度の間では、前述の既存実験データに対する実証研究を推進することによってコードの基礎的な物理モデルの確度を高めつつ、ITER の本格的な核燃焼プラズマ実験に先駆けてその炉心性能を予測することが重要な課題となる。そして、今後 20 年程度のスパンでは ITER の運転開始後に初めて可能になる核燃焼プラズマ実験に対する実証研究によって ITER の知見を蓄積した炉心プラズマシミュレーションを開発することが最終的な目標となる。ITER の次の段階としては、各極とも商用炉 (原型炉) の開発を想定しており、国内では 21 世紀中葉までに核融合炉の実用化を目指すロードマップ[3]が提案されているが、そこで鍵を握る技術の一つが ITER における核燃焼プラズマ実験の知見を反映した炉心設計である。ここで、ITER の炉心熱出力が約 400MW となるのに対して、上記ロードマップでは現在の軽水炉と同程度の炉心熱出力約 3GW を想定している。したがって、このような炉心設計を行うには ITER の実験データを単純に外挿するのではなく、機構論的 (第一原理的) なアプローチに基づく予測性能の高いシミュレーションが必要不可欠になる。

上述の目標を達成するためには、まず、ITER の核燃焼プラズマ実験を模擬できるシミュレーションの開発が必要とされる。しかしながら、ITER のシミュレーションには、現時点で推測される範囲でも以下の点において従来の既存装置のシミュレーションにはない難しさがある。

- i) 既存装置に比べて半径で約 3 倍、体積で 10 倍以上となる巨大な炉心プラズマであること。

- ii) 既存装置が水素、あるいは、重水素の单一イオン系の模擬実験であるのに対し、ITER は燃料の重水素と三重水素、および、核融合反応で生成するヘリウムを含む多種イオン系となること。
- iii) ITER では 3.5MeV のヘリウム ( $\alpha$  粒子) による電子系の加熱が主要となるため、イオン軌道半径 ( $\sim 5\text{mm}$ ) から電子軌道半径 ( $\sim 0.1\text{mm}$ ) におよぶマルチスケールの電子系乱流による熱輸送が重要になること。
- iv) エネルギー閉じ込め時間 ( $\sim 1\text{s}$ ) に及ぶ長時間スケールで変動するプラズマ乱流輸送、核燃焼による熱源・粒子源の変化および燃料密度・温度の分布形成の自律的な振る舞いが見られること。

これらの課題はシステムサイズ、分解能、時間スケール、どれをとっても従来のシミュレーションに比べてきわめて高い計算コストを要求する。この壁をペタスケール、あるいは、将来のエクサスケール計算で乗り越えることができれば、その核融合エネルギー開発に対するインパクトはきわめて大きいと考えられる。また、核燃焼プラズマ実験自体が ITER で初めて実現するきわめて科学的価値の高い研究対象であり、そこで展開するプラズマ現象をシミュレーションで理論的に解明することによって、プラズマ物理、あるいは、非線形科学としての大きな科学的ブレークスルーも期待できる。

### (3) 次世代に解決すべき課題

#### (i) ITER の計算に向けたシステムサイズ、物理モデルの拡張

第3世代プラズマシミュレーションの例として GT5D による準定常乱流計算(重水素イオン、 $\sim 10\text{ms}$  程度の時間スケール)の計算量を図 4.4.4-1 に示す。既存装置 (JT-60U) 規模の数値実験は現在のペタスケール計算で実現するのに対し、ITER 規模の準定常乱流計算を行うには 10PFLOPS 規模の計算が必要となる。さらに、10PFLOPS~100PFLOPS 規模のポストペタスケール計算では、ITER 規模の準定常乱流計算を多種イオン系(重水素、三重水素、ヘリウム)の核燃焼プラズマに対して行えるようになると期待される。

#### (ii) strong scaling の向上

1EF~10EF 規模のエクサスケール計算では、strong scaling を飛躍的に向上し、これまで数日~1週間という時間スケールで実行してきた Capability computing の問題を 10~100 倍加速して数時間に短縮し、パラメータスキャン等の Capacity computing を可能にすることが重要な課題となる。これによって、このようなシミュレーションを実験条件の最適化や炉心設計等に活用し、ITER 計画や商用炉開発を加速することが可能になると期待される。また、10~100 倍の計算速度が実現すれば、核燃焼による炉心出力の過渡的応答を模擬するのに必要なエネルギー閉じ込め時間 ( $\sim 1\text{s}$ ) 程度の数値実験も視野に入ってくる。このような長時間スケールの数値実験が実現すれば、核融合炉の新たな運転手法や制御手法の開発、あるいは、より高性能な炉心プラズマの設計をシミュレーションで探索することが可能になると期待される。これまで、核融合分野の主要アプリケーションである GT5D および GKV を対象として、OpenMP で実装した通信スレッドによって 1 対 1 通信や集団通信を演算の背後で同時処理する通信隠蔽技術[9]を開発し、「京」フルシステム規模まで良好な strong scaling を達成している。これに加えてメ

ニーコア環境のカーネル最適化技術、あるいは、ノード間の動的負荷分散技術等の開発によって、エクサスケール計算に向けた更なる strong scaling の向上を目指す。

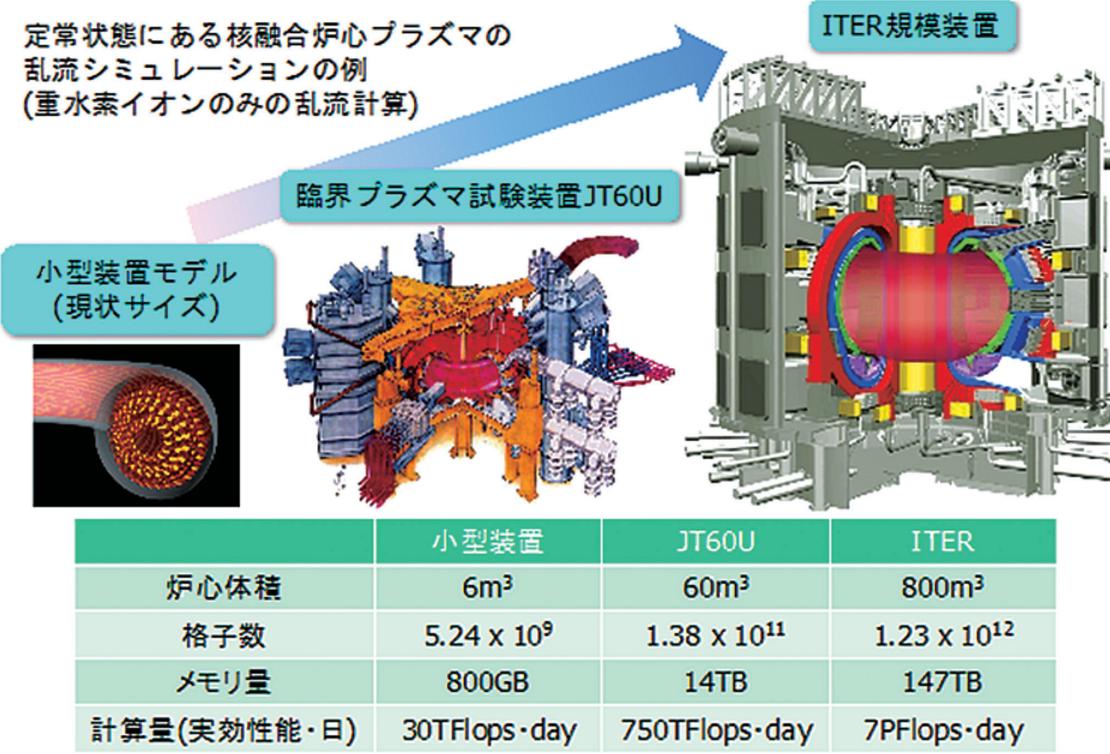


図 4.4.4-1 核融合プラズマ乱流シミュレーションの計算規模

### (iii) マルチスケールの電子乱流計算

これまで述べたような装置サイズ、粒子種、時間スケールの拡張に加えて、ITER ではマルチスケールの電子系乱流のシミュレーションも重要な課題となっている。しかしながら、このようなマルチスケールシミュレーションはイオンスケールの乱流計算に比べて、 $50^3$ 倍 ( $\sim 10^5$  倍) の問題規模となるため、大域的モデルで扱うことは依然として難しい。そこで、マルチスケールの電子系乱流の取り扱いでは GKV のような局所モデルの第 2 世代プラズマシミュレーションの分解能を拡張することが必要になる。GKV の計算コストの見積りでは、水素イオンと電子を含むマルチスケール乱流計算に 10PFLOPS 規模が必要となることから、ポストペタスケールではやはり多種イオンと電子を含む核燃焼プラズマのマルチスケール乱流計算が可能になると期待される。この見積りは 2 次元トーラス磁場配位のトカマク装置の場合であるが、3 次元トーラス磁場配位の LHD では計算コストが一桁以上大きくなるため、エクサスケール計算が必要になる。

### (4) 課題を解決するために必要なアプリケーション群（要求性能）

GT5D[3]、GKV[4]ともに 5 次元位相空間（3 次元位置×2 次元速度）における移流・拡散方程式として与えられるジャイロ運動論方程式と乱流場の静電ポテンシャルを決めるポアソン

方程式をカップルさせてプラズマ乱流による燃料粒子の速度分布関数の非線形発展を追跡する。以下にこの二つのコードの基本要求性能を示す。

#### (i) GT5D の要求性能

GT5D (Gyrokinetic Toroidal 5D full-f Eulerian code) は大域的 full-f モデルの長時間シミュレーションを目的として開発され、トーラス全体を計算領域として移流・拡散方程式に差分 - 半陰解法を適用する。ここで、最もコストの大きい陰的ステップをクリロフ部分空間解法（共役残差法）の反復法ソルバーで取り扱う。ポアソン方程式はトーラス方向の 1 次元フーリエモード展開と断面上の 2 次元有限要素法を組み合わせて解く。ITER 規模の重水素イオンの計算には  $\sim 10^{12}$  自由度の計算格子を必要とし、多粒子種の場合には粒子種の数だけ計算格子が増加する。時間ステップ数は準定常乱流計算で  $\sim 10^5$  ステップ、長時間スケールの数値実験で  $\sim 10^7$  ステップが必要となる。メモリ量は数 100TB、1 ケースあたりの総演算量は準定常乱流計算で  $10^{21}$ FLOP 程度（×数 100 ケース）、長時間数値実験で  $10^{23}$ FLOP 程度（×10 ケース程度）となり、前者を 1 時間、後者を 1 週間で処理するために実効 100PFLOPS 程度が要求される。

#### (ii) GKV の要求性能

GKV (GyroKinetic Vlasov code) は LHD 装置の局所的 delta-f モデルのシミュレーションを目的として開発され、1 本の磁力線に沿った局所領域を計算領域として実空間に周期境界条件を適用する。これにより、スペクトル法によるマルチスケールの乱流スペクトルの高精度な取り扱いを可能にしている。また、速度空間には差分法、時間積分には陽解法を用いる。水素イオンと電子のマルチスケール乱流計算には  $\sim 10^{11}$  自由度の計算格子を必要とし、時間ステップ数は  $\sim 10^5$  ステップとなる。GT5D と同様に多粒子種の場合には粒子種の数だけ計算格子が増加し、3 次元トーラス磁場配位の LHD の計算では更に高い解像度が要求されて計算格子と時間ステップ数が一桁増大する。このため、メモリ量は 100TB 程度、1 ケース当たりの総演算量は  $10^{22}$ FLOP 程度（×数 10 ケース）となり、これを 1 日で処理するために実効 100PFLOPS 程度が要求される。

GT5D と GKV のどちらも 5 次元という問題の特徴を生かして 3 次元ないし 4 次元の階層的な領域分割を採用し、さらに、袖領域の 1 対 1 通信やデータ転置の集団通信を演算とオーバーラップする通信マスク手法を採用することによって並列化率の向上を図っている。要求するネットワークバンド幅については、通信マスク手法を適用する際の通信と演算のバランスで決まってくるため、演算ノードの構成によって変化する。プロセッサー・メモリ間のメモリバンド幅についても、京や BlueGene のような Thin node を想定する場合には B/F 比  $\sim 0.5$  程度が望ましいが、GPGPU のようにプロセッサ上の専用メモリを利用した処理を前提とする場合にはプロセッサ内のメモリバンド幅が問題となる。I/O 量は最大で使用メモリ量の十倍程度になる。

課題	要求性能 (PFLOPS)	要求メモリ リバンド幅 (PB/s)	メモリ量 (PB)	ストレージ量/ ケース (PB)	計算時間/ ケース (hour)	ケース 数	総演算量 (EFLOP)	概要と計算手法	問題規模	備考
プラズマ乱流計算・マルチスケール乱流	100	200	0.5	0.1	24	50	430,000	ポルツマン方程式の5次元計算(スペクトル法+差分法)	$10^{12}$ 格子、 $10^6$ ステップ	B/F=2として計算
プラズマ乱流計算・大域的非定常乱流	100	200	0.5	1	170	10	610,000	ポルツマン方程式の5次元計算(差分法)	$10^{12}$ 格子、 $10^7$ ステップ	B/F=2として計算

※本見積もりは未だ精査中である。より精度の高い数値はWeb版(→「1.2. 本文書の構成」)を参照のこと。

## (5) 他分野との連携

現在想定しているアプリケーション群は差分法およびスペクトル法に基づく5次元位相空間のCFDであり、ものづくり分野内外の大規模流体計算一般と課題を共有できると考えられる。また、陰解法ソルバーに現れるような大規模疎行列の反復法ソルバーに関しては流体計算のみならず、幅広い分野とライブラリや解法に関する知見を共有できるものと考える。

## (6) 公的な意見交換とそのサマリー

平成23年度にアプリケーション作業部会によって執筆された計算科学ロードマップ白書に関して、以下の会合で意見交換を実施した。

■ 「核融合エネルギーフォーラム モデリング・シミュレーションサブクラスター 平成24年度第1回会合」 平成24年8月3日(金) 日本原子力研究開発機構 青森研究開発センター

意見交換の結果、次世代のスーパーコンピュータにおいてプラズマ・核融合分野のシミュレーション研究を展開することについて、特に、異論は出なかった。ただし、核融合分野のものづくり、すなわち、商用炉開発はITER計画の進捗と強くリンクしているので、今回の計算機開発スケジュールがITER計画に先行するようであれば、テーマの位置づけを“ものづくり”としてコミットするのは時期尚早であり、核融合プラズマのサイエンスとして取り組むべきだという意見があった。

## (7) ロードマップ

核融合プラズマシミュレーションのロードマップとしては、図4.4.4-2に示すようにポストペタスケール規模までは装置規模、分解能、あるいは物理モデルの拡張にともなうweak scalingを想定し、それ以降は時間スケールの拡大にともなうstrong scalingを想定する。研究のロードマップとしては、

- i) 10PFLOPS～：既存装置における核燃焼のない超高温プラズマ実験に対する実証研究
- ii) 100PFLOPS～：ITERにおける核燃焼プラズマの性能予測研究

- iii) 1EFLOPS～：ITER の実験条件最適化や運転手法の高度化等を主要なターゲットとする研究開発

といった展開が想定される。既存実験に対する実証研究は JET、JT-60U に代表される 2 次元トーラス磁場配位のトカマク型装置、あるいは、3 次元トーラス磁場配位の LHD を対象とする。このような 3 次元形状磁場効果の研究は ITER における制御磁場や炉内機器の炉心プラズマへの影響を評価する上で有用である。

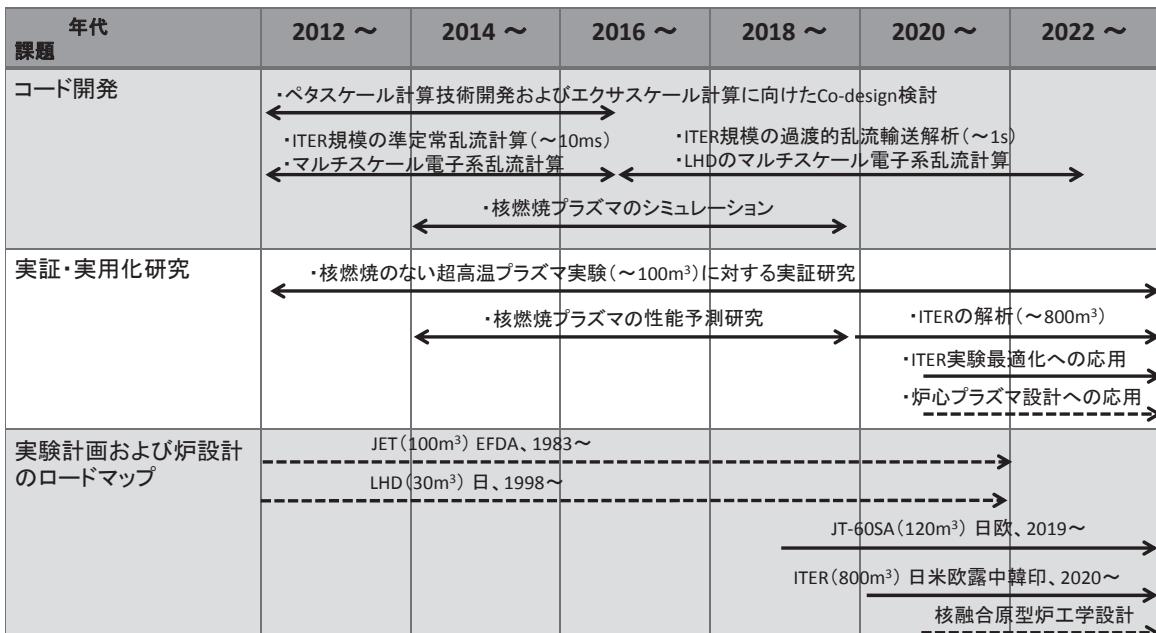


図 4.4.4-2 プラズマ・核融合ロードマップ

## 参考文献

- [1] A. J. Brizard and T. S. Hahm, Rev. Mod. Phys. 79, 421 (2007).
- [2] X. Garbet, Y. Idomura, L. Villard, and T. H. Watanabe, Nucl. Fusion 50, 043002 (2010);洲鎌、渡邊、日本物理学会誌 68, 296 (2013)
- [3] Y. Idomura, M. Ida, T. Kano, N. Aiba, and S. Tokuda, Comput. Phys. Commun. 179, 391 (2008).
- [4] T. H. Watanabe and H. Sugama, Nucl. Fusion 46, 24 (2006).
- [5] N. Nunami, T.-H. Watanabe, H. Sugama, and K. Tanaka, Phys. Plasmas 19, 042504 (2012).
- [6] S. Jollet and Y. Idomura, Nucl. Fusion 52, 023026 (2012).
- [7] <http://www.nu-fuse.com/>
- [8] 核融合エネルギーフォーラム ITER・BA 技術推進委員会報告書「核融合エネルギー実用化に向けたロードマップと技術戦略」(2008 年 6 月、<http://www.naka.jaea.go.jp/fusion-energy-forum/>)
- [9] Y. Idomura, M. Nakata, S. Yamada, M. Machida, T. Imamura, T.-H. Watanabe, M. Nunami, H. Inoue, S. Tsutsumi, I. Miyoshi, and N. Shida, Int. J. HPC Appl. in press.