

平成 22 年 11 月 26 日

核融合科学ネットワーク代表 小川雄一（東京大学）  
核融合炉工学ネットワーク代表 日野友明（北海道大学）

### 核融合研究開発のロードマップに対する 核融合ネットワークでの検討結果

#### [1] はじめに

平成 21 年 12 月 23 日に、文部科学省研究開発局科学官 吉田善章氏および学術調査官 山田弘司氏より、核融合研究開発のロードマップに対して、「文科省核融合研究作業部会への情報提供に関するお願い」が核融合ネットワークにありました。核融合ネットワークでは、まずは核融合コミュニティから広く意見を収集すべくアンケート調査を行いました。そのアンケート結果を踏まえ、関係者<sup>1</sup>で相談し、今後の核融合研究において不可欠な主要項目のリストアップを行いました。次に、これらの項目に対して、キーパーソンを決め、さらに詳細な検討（具体的には、原型炉の設計・工学 R&D・建設・運転などの時期までに必要となる具体的な開発内容やそのための基盤設備や予算、人員規模など）を行いました。本報告書は、その検討結果であります。またこれを文部科学省研究開発局科学官 吉田善章氏および学術調査官 山田弘司氏に平成 22 年 3 月 25 日に回答致しました。

その後、科学官と学術調査官が中堅の方々と協力して本資料の分析を行い、全体展望ができるよう項目間の整合性を確認する作業を進め、判り易い図示を図るとともに、質問事項やさらに検討すべき事項をコメントとしてリストアップしました。核融合ネットワークでは、そのコメントを踏まえてさらに作業を行い、コメントへの回答を作成すると共に、必要に応じて内容の改訂を行いました。本資料は、その改訂版であります。なお中堅の方々がまとめた図示も参考資料として添付致しました。

#### [2] 主要項目のリストアップと検討内容

##### 2. 1 主要項目

本検討で取り上げた主要項目は以下の 14 課題である。

1. ブランケット
2. ダイバータ
3. 加熱・電流駆動機器 (NBI)
4. 加熱・電流駆動機器 (ECH)
5. 計算機シミュレーション
6. トカマク原型炉設計
7. ヘリカル原型炉設計
8. レーザー原型炉設計
9. 炉心プラズマ研究
10. 超伝導・低温工学

<sup>1</sup> 核融合科学ネットワーク 代表：小川雄一  
核融合炉工学ネットワーク 代表：日野友明

所内幹事：武藤敬  
所内幹事：相良明男

11. トリチウム
12. 低放射化材料
13. 計装・制御システム
14. メインテナンス

## 2. 2 検討内容

ここでは以下の視点から検討した。

### (1) 「文科省核融合研究作業部会への情報提供に関するお願い」に対する回答

- 1) ITER・BAをオールジャパンで推進し、その成果を将来の核融合研究につなげるために必要な取り組み。
- 2) ITER・BAと相補的な研究プロジェクトの具体的なプラン。原型炉段階の研究に進むための必要性と他の研究項目との関連性・整合性など。
- 3) その他、研究体制についての具体的な要望やビジョンなど。

### (2) ロードマップ図での位置付け

文科省核融合研究作業部会で検討している「ロードマップ図」を踏まえて、下記の時点までに必要な課題、設備、規模（出来れば予算・人員も）を整理する。

- ①ITER へのインプット
- ②ITER からの成果の反映
- ③BA からの成果の反映
- ④原型炉設計時期（原型炉工学 R&D 開始まで）
- ⑤原型炉建設開始時期まで
- ⑥原型炉運転開始時期まで

### (3) 補足資料や要望書

## [3] 検討結果

上記の 14 課題に対して、それぞれの分野の専門家を中心としてまとめた結果を資料として添付しました。

## [4] おわりに

本報告書には、関連各分野の意見を集約した結果や、グループさらには個人レベルでの意見や要望が含まれております。核融合ネットワークとしては、ここでまとめた本報告書を広くコミュニティに公開することにより、今後のコミュニティの基盤データとして、また核融合研究開発の発展に向けた議論の活性化として活用されることを切に望みます。

なお本検討を進めるにあたり核融合ネットワークメンバーでない多くの方々（特に日本原子力研究開発機構や電力中央研究所など）に協力頂いた点に対して御礼申し上げます。

【文部科学省研究開発局科学官・学術調査官からの依頼】

平成21年12月23日

核融合研究作業部会への情報提供に関するお願い

文部科学省研究開発局科学官 吉田善章  
学術調査官 山田弘司

核融合科学ネットワーク代表 小川雄一先生  
核融合炉工学ネットワーク代表 日野友明先生

文部科学省に設置された核融合研究作業部会では、核融合研究の整合的かつ合理的な推進のために必須の事項を俯瞰・整理し、必要な施策を行政に対して提言するために、「ロードマップ」の作成を軸とした検討を行っています。

つきましては、広く核融合研究に携わる皆さんから、今後この分野の研究を推進するために必要な事項について具体的な提案をいただきたく、特に以下の視点についてネットワークを通じた意見の収集と議論をお願いする次第です。

1) ITER・BAをオールジャパンで推進し、その成果を将来の核融合研究につなげるために必要な取り組み。特に、項目をあげるだけでなく、ITER・BAの成果を評価・総括し、他の研究プロジェクトや将来の研究計画にフィードバック・フィードフォワードするための具体的なチェックポイントや、他事業との接続点を含む「ロードマップ」上での位置づけ・関係づけにご留意ください。

2) ITER・BAと相補的な研究プロジェクトの具体的プラン。原型炉段階の研究に進むための必要性と他の研究項目との関連性・整合性など。

3) その他、研究体制についての具体的な要望やビジョンなど。

なお恐縮ですが、上記作業部会の進行と整合をはかるために、回答を1月22日までにいただけると幸いです。

(以上)

## 検討結果

- No. 1 ブランケット
- No. 2 ダイバータ
- No. 3 加熱・電流駆動機器 (ECH)
- No. 4 加熱・電流駆動機器 (NBI)
- No. 5. 計算機シミュレーション
- No. 6. トカマク原型炉設計
- No. 7. ヘリカル原型炉設計
- No. 8. レーザー原型炉設計
- No. 9. 炉心プラズマ研究
- No. 10. 超伝導・低温工学
- No. 11. トリチウム
- No. 12. 低放射化材料
- No. 13. 計装・制御システム
- No. 14. メインテナンス

1) ITER・BAをオールジャパンで推進し、その成果を将来の核融合研究につなげるために必要な取り組み。

・ITERを利用した取り組みは、

- ①テストブランケットの開発として、テストブランケットの製作技術開発と設計、許認可手続き、性能評価試験、テストブランケット実機製作とITERへの取り付けを行う必要があり、これらを、日本としての活動として、工学基盤の構築と学術研究の強化、それに基づくモックアップ・実機の製作と実証試験を行うことで、ブランケット開発のための研究の推進と集約を行うことが重要である。
- ②テストブランケット試験の実施により、実際の核融合環境下でのモジュール規模のブランケット性能評価データを取得し、それによって、製作技術や性能評価手法の検証を行い、原型炉ブランケットの第一候補ブランケットの設計・製作に反映することが重要である。
- ③テストブランケットの開発・製作・試験実施の過程で人材育成を行い、原型炉の開発に技術と経験を伝承し発展してゆくことが重要である。

・BAを利用した取り組みは、

- ①原型炉ブランケットのための構造材、増殖増倍材の開発研究を進めることで、原型炉の設計・製作に必要な基盤データを蓄積するとともに、そのデータを逐次反映して相補的に原型炉ブランケットの概念検討を進めることが重要である。BA期間に、原型炉の工学設計を開始できる基盤と体制を整えることが需要である。
- ②BA活動の推進の過程で、原型炉開発の中核的な役割を担う人材を育成することも重要である。

2) ITER・BAと相補的な研究プロジェクトの具体的プラン。原型炉段階の研究に進むための必要性と他の研究項目との関連性・整合性など。

・ITER・BAと相補的な研究

- ①ITER・BAでは、モジュール単位でのブランケット開発と、原型炉条件での材料データ基盤の蓄積が図られる。相補的に行うべき研究としては、原型炉を高性能とするための高機能ブランケットの工学基盤の構築とシステム開発を着実に進めることが重要である。
- ②原型炉の第一候補ブランケットを実現するためには、原型炉の設計と平行して、原型炉の実規模を見通せるブランケットシステム実証試験が必要である。
- ③原型炉を用いたモジュール単位の高機能ブランケットの試験により、原型炉環境下でのブランケット性能評価を行うことで、ブランケットシステムの見通しを得て、原型炉の高性能化に資することが重要である。



(1) 文科省科学官・調査官の依頼「文科省作業部会への情報提供に関するお願い」に対する回答

1) ITER・BAをオールジャパンで推進し、その成果を将来の核融合研究につなげるために必要な取り組み。

ITERに求める成果：

- 定常熱負荷の制御方法を確立し、原型炉におけるダイバータへの熱負荷をダイバータコンポーネントの許容熱負荷以下に抑制する見通しを得る。
- ELM時（特にTYPE-I ELM）のダイバータへの熱パルス制御法、及び、ディスラプションによるダイバータへの熱負荷軽減法を確立し、ダイバータ第一候補材であるタングステンに対し、その健全性を保つ見通しを得る。
- 原型炉ダイバータ支持構造体の挙動調査を行なう。

IFMIFに求める成果：

- ダイバータプラズマ対向材料や支持構造体などの照射損傷評価を行なう。ダイバータコンポーネントの14MeV中性子照射を行なった後に、照射材の熱負荷・プラズマ負荷テストなどの試験設備の整備も視野に入れる。

原型炉設計 R&D に求める成果：

- 原型炉設計と整合性をとってダイバータ概念設計を行なう。

原型炉シミュレーションに求める成果：

- ダイバータプラズマシミュレーションにより、ダイバータ機器への熱負荷（定常熱負荷、ELM熱負荷、ディスラプション熱負荷）を、ダイバータ機器の許容限度以下に低減するプラズマ制御法に関する研究を進める。
- ダイバータアーマー材料とプラズマ・中性子の相互作用シミュレーションより、材料開発・機器開発に資するデータを取得することを検討する。

JT-60SAに求める成果：

- 原型炉を視野に入れた高性能プラズマに対して、ディスラプションやELMによるダイバータへのパルス熱負荷低減、及び定常熱負荷低減に関するプラズマ制御法の研究を行なう。
- シミュレーション研究・パラメータスケリング研究高度化のための実験データベースの提供や、シミュレーション結果の検証実験を行ない、これらの研究レベルを原型炉設計に必要なレベルまで高める。

2) ITER・BAと相補的な研究プロジェクトの具体的プラン。原型炉段階の研究に進むための必要性と他の研究

### 項目との関連性・整合性など。

○ダイバータ材料やダイバータコンポーネントに対して、中性子照射環境を整備する。既存の原子炉用いて、材料や機器の中性子照射場の整備を進める一方で、原型炉の照射環境に近い高エネルギー（14MeV）・高フルエンスの照射環境におけるより正確な照射挙動の研究には IFMIF の利用を想定する。

○非照射材だけではなく、照射材料に対しても高熱負荷照射や高密度プラズマ照射が可能となる実験施設を整備する。

○ダイバータへの熱負荷・プラズマ負荷の制御法の確立、及びこのような環境下でのアーマー材挙動の評価や材料特性・製造法の最適化を行なうに当たり、シミュレーション研究と基礎実験研究は不可欠である。高磁場・高イオン温度の実験が可能な LHD や GAMMA-10、原型炉に匹敵する高温壁での実験が可能な QUEST、及びアーマー材料と高密度プラズマの相互作用研究を迅速かつ機能的に行なうことが可能な線型プラズマシミュレータの整備が必要である。

### 3) その他、研究体制についての具体的な要望やビジョンなど。

○ダイバータ研究開発のための機能的な研究組織の構築が必要である。このためには、原型炉設計研究、エッジプラズマ研究、プラズマ材料相互作用研究、アーマー材・冷却材・ダイバータ構造材の開発研究、熱流動工学研究、トリチウム工学研究、ダイバータシステム工学研究、等多くのグループの協力を必要とする。本研究組織は、2012 年頃までに立ち上げる必要がある。

## (2) ロードマップ図での位置付け

### ① ITER へのインプット

フルタングステンダイバータに向けた研究開発、具体的には、タングステン材料開発やタングステンと冷却管の接合技術開発（2015 年頃まで、ITER の建設スケジュールの進展を考慮する）。

### ② ITER からの成果

定常熱負荷の制御方法、ELM やディスラプション時のパルス熱負荷低減方法や、ダイバータ支持構造体の挙動データなどの知見を設計や安全審査に反映（原型炉ダイバータ製作仕様決定まで（2030 年頃））。

### ③ BA からの成果

原型炉設計の成果と整合性のあるダイバータ開発（原型炉ダイバータ 1 次仕様決定まで、2020 年頃）。IFMIF によるダイバータ材料・コンポーネントの照射研究成果（原型炉ダイバータ製作仕様決定まで（2030 年頃））。

### ④ 原型炉設計時期（原型炉工学 R&D 開始まで）

○プラズマ照射影響、中性子照射影響、熱負荷影響を総合的に検討し、材料・構造・製造技術の最適化を以下の視点より行なう。

- ・アーマー材料開発

- ・冷却管材料・製造技術開発（アーマー材との接合技術を含む）

- ・冷却材と冷却管の共存性評価

- ・コンポーネント製造技術開発と総合性能評価（特に熱除去性能）

○プラズマ熱・粒子負荷の評価、及びアーマー材料の炉心プラズマ影響を適切に評価できるプラズマシミュレーションコードの開発、及びモデリングのための基礎過程の解明や、ベンチマーク実験のための磁場閉じ込め装置（LHD、GAMMA-10、QUEST）や直線型プラズマシミュレータによる研究を推進する。

○中性子照射材料（数 10dpa の照射）を取り扱える高熱負荷実験装置、高密度プラズマ照射装置を整備する。特に、高熱負荷試験装置については、実機規模のコンポーネント照射が可能な装置とする。

#### ⑤原型炉建設開始まで

○原型炉を視野に入れた高性能プラズマに対して、ディスラプションや ELM によるダイバータへのパルス熱負荷、定常熱負荷制御法、及びダイバータ構造体挙動評価について、JT-60SA による実験、及び他の装置による基礎実験研究とシミュレーション研究により確立する。

○ダイバータコンポーネントの製造技術・品質管理技術を確立し、安全性の評価を行なう。また中性子照射ダイバータコンポーネントに対する熱負荷試験やプラズマ照射試験を行ない安全審査のためのデータを取得する。

#### ⑥原型炉運転開始時期まで

○ITER における長時間のダイバータモジュール試験結果や、IFMIF によるダイバータコンポーネントの重照射試験（～50dpa 以上）を参考にして、原型炉運転方法（プラズマ制御、ダイバータ運転パラメータ）の最適化を行なう。

### （3）補足資料や要望書

ダイバータ開発のロードマップを俯瞰できる資料を補足資料として添付します。

## 補足資料「ダイバータ開発ロードマップ」

### 1. 本ロードマップ概要

まず、原型炉ダイバータ開発戦略の構築と研究協力体制の確立を行なう。その後、要素研究やコンポーネント研究を進め、原型炉ダイバータの1次仕様決定は2020年頃、最終仕様決定は、ブランケットのそれと同じで2030年頃とする。安全審査データの一部はITERの結果を参照することになると考えられるため、ITER-DTフェーズの結果が出る時期(2028年頃)との整合性も良い。また、コンポーネントの中性子照射(特に、数10 dpa規模)、照射材のプラズマ照射(できれば、中子とプラズマの同時照射)、及びそのPIE(熱負荷試験を含む)を可能とする施設が必要であり、早急に検討する必要がある。

### 2. 原型炉ダイバータ開発戦略の構築(2~3年以内)

○現在考え得るダイバータ概念、材料・技術(アーマー材、冷却管、接合技術、冷却材)について、原型炉設計との整合性に留意しつつ以下の点を明らかにする。

- ・予想される性能(特に除熱性能)と特徴(利点と欠点をリストアップ)
- ・研究開発の現状
- ・今後必要な研究開発課題
- ・研究開発に従事可能な研究者・機関

○上記を総合的に考慮し、推進すべき要素開発、システム開発、設計活動をピックアップし、全日本的な研究協力体制(材料、PSI、エッジプラズマ、熱流動、トリチウム、コンポーネント技術など)のもと、原型炉ダイバータ開発プロジェクトをスタートさせる。

### 3. ダイバータ技術開発研究期間(2020年頃まで)

○前項の研究戦略に沿って、研究開発を進める。プラズマ照射影響、中子照射影響、熱負荷影響を総合的に検討し、材料・構造・製造技術の最適化を行なう。以下に研究課題を列挙する。

- ・アーマー材料開発
- ・冷却管材料・製造技術開発(アーマー材との接合技術を含む)
- ・冷却材と冷却管の共存性評価
- ・コンポーネント製造技術開発と総合性能評価(特に熱除去性能)

○プラズマ熱・粒子負荷の評価(主にプラズマシミュレーションより)、アーマー材の炉心プラズマ影響、及び安全性や炉設計との整合性についても並行して検討を行なう。

○基礎過程の解明や、シミュレーションのベンチマーク実験のための磁場閉じ込め装置や直線型プラズマシミュレータによる研究を推進する。

○実機規模のコンポーネント評価のための、中子照射、及び照射後性能試験を行なう施設を準備する。

#### 4. 原型炉ダイバータ 1 次仕様の決定 (2020 年頃)

○これまでの研究開発の結果を総合的に判断して、原型炉ダイバータの 1 次仕様を決定する。

○また、未成熟であるが将来性のある技術・概念については、先進ダイバータ開発研究として活動を継続する。

#### 5. 実機ダイバータモジュール製作と性能試験、品質管理技術開発、及び安全審査のためのデータ取得 (2030 年頃まで)

○1 次仕様に基づき、実機ダイバータモジュールを製作し、必要な性能試験を行ない、安全審査のためのデータをそろえる。

○ITER プロジェクトと協力し、特にプラズマ制御サイドからの、安全審査用データ取得を行なう。

#### 6. その他

○原型炉ダイバータ開発と並行して、ITER のための技術開発も行なう。特に、タングステンダイバータのためのタングステン材料開発やタングステン・冷却管接合技術開発については、喫緊の課題である (2015 年頃まで)。これらの技術開発で得られた結果は、可能な範囲で原型炉ダイバータに適用する。なお、ITER ダイバータのための技術開発は ITER の建設スケジュールの進展に留意しつつ進める必要がある。

○ITER の DT プラズマ試験後 (2030 年頃) に、先進ダイバータ要素技術開発の進展状況や ITER の結果をふまえて、原型炉先進ダイバータの仕様を決定する。

○本活動は 2010 年頃から ITER 運転開始後の最初の 10 年間である 2030 年頃までがおもな活動期間となる。この期間は ITER 建設、BA 活動を経て ITER 実験フェーズ及び BA 活動終了後の原型炉に向けた研究開発体制を再構築する重要な時期にあたり、ITER 活動などをおして得られる装置統合技術やそれを継承する人材の原型炉開発に向けた円滑な移行を図りつつ、新しい人材の育成に注力する必要がある。

(1) 文科省科学官・調査官の依頼「文科省作業部会への情報提供に関するお願い」に対する回答

1) ITER・BAをオールジャパンで推進し、その成果を将来の核融合研究につなげるために必要な取り組み。

NBIは将来の核融合炉において必須の加熱・電流駆動機器であり、単にITERにおける仕様を満足するだけでなく、核融合炉に向けて、国内においてNBIの工学的・技術的基盤を維持・確立しておく必要がある。

加熱・電流駆動機器は、ヘリカル型装置では点火に必要な仕様を満足すればよいが、トカマク型装置では、それに加えて、年間を通じた連続運転を満足すると共に、還流エネルギーを低減するために高効率化を実現しなければならない。このことは、トカマク型装置を原型炉とする場合、原理的な連続運転の可能性のみならず、連続運転を可能とする加熱・電流駆動機器の実現性も含めて成立性を検討しなければならない。この点は、核融合炉の実現に向けたロードマップを考える上で、極めて重要な視点であり、チェックポイントであることを認識する必要がある。

ITERにおけるNBIの仕様は、入射エネルギー1MeV、入射電力17MW(1基)、入射時間3600秒である。原型炉や商業炉では、点火に必要な入射エネルギーは2MeV程度、入射電力は30MW(1基)程度が予想されるが、点火のみであれば、入射時間は1時間程度で十分である。トカマク型装置では電流駆動が必要なため、入射時間は1年以上に及びかつ高効率で信頼性の高い連続運転が求められる。

以上のことを考慮すると、ITER・BAにおいて、加熱・電流駆動機器としてのNBIに対して必要な事項はITER-NBI開発であり、それを将来の核融合炉に必要な仕様のNBI実現へ向けた国内の開発研究基盤の確立にどのように結びつけるかが重要である。具体的な項目を以下に示す。

・JT60SAに向けた500keV-10MW-100秒のNBIシステムの開発

ITER-NBI開発に対して補完的に位置付ける事ができ、国内の開発研究基盤確立に不可欠

JT60SA-NBIの実現は、ITER-NBI実現への試金石となる

要素技術の開発において、LHD-NBIシステムの活用も必要

・イタリア・パドバに建設予定のITER-NBIのtest facility (NBTF) への積極的参加

ITER-NBI開発を国内で行えないため、1MeV-3600秒システムの開発実績の蓄積は不可欠

原型炉に向けたNBIシステム開発研究基盤確立のために必要

2) ITER・BAと相補的な研究プロジェクトの具体的プラン。原型炉段階の研究に進むための必要性と他の研究項目との関連性・整合性など。

負イオンNBIを有していないEUは、ITER-NBI開発を通じて原型炉NBIシステム開発の研究基盤を確立することができる。一方、国内で現状稼働している負イオンNBIはエネルギーが低く、ITER-NBIシステムで使用される計画のRF負イオン源を使用していないため、原型炉NBIシステム開発に対してEUに大きな後れを取る。そこで、原型炉に必要なNBIシステムの開発へ向けた研究基盤・体制を確立させるため、ITER・BAに直接関与するプロジェクトと相補的に、以下のプロジェクトが必要である。

- ・原型炉 NBI システム開発へ向けた RF 負イオン源開発プロジェクト
- ・2MeV 程度をターゲットとした高エネルギービーム加速システム開発プロジェクト
- ・光中性化セルの実現へ向けた要素技術開発プロジェクト

### 3) その他、研究体制についての具体的な要望やビジョンなど。

ITER・BA に直接関与する取り組みを含めた、上記の原型炉に向けた NBI 開発プロジェクトを実施するに当たり、NIFS-JAEA の共同 NBI 開発プロジェクトの立ち上げは効果的であり、特に、RF 負イオン源の開発においては、大学の研究室との連携研究ならびに LHD-NBI を用いた要素技術の開発研究が重要である。また、光中性化セルの要素技術開発は、大学との連携研究が求められる。

## (2) ロードマップ図での位置付け

### ①ITER へのインプット

イタリア・パドバの NBTF 建設までは、負イオンビームの 1MeV 加速試験が必要。そのための設備としては JAEA に MeV 試験装置があり、現在その試験を行っているが、引き続き整備が必要。

JT60SA 用の 500keV-10MW-100 秒の NBI システムの開発が必要。パドバの NBTF による開発試験と相補的に JT60SA-NBI の開発・運転を行うことにより、ITER-NBI システムの開発に貢献する。また、LHD-NBI システムを活用して、負イオン源に関する要素試験を行うことも ITER-NBI システム実現に向けて必要。

ITER-NBI システムの開発は EU で行われるため、原型炉 NBI システム開発へ向けた RF 負イオン源開発プロジェクトを国内で立ち上げることが必要。大学等での小型 RF 負イオン源の原理検証・開発研究と JAEA または NIFS における大型 RF 負イオン源の開発・試験研究を組み合わせることが重要。

### ②ITER からの成果

ITER-NBI システムにおいて、仕様値の 1MeV-3600 秒が達成された場合、原型炉における NBI システムで想定される 2MeV 程度の静電加速の見通しが得られるが、実現へ向けて高エネルギービーム加速システム開発プロジェクトが必要。小型 RF 負イオン源を用いた 2MV-1A 程度の試験装置が必要。

パルス幅に関しては、3600 秒の達成は、ヘリカル型を原型炉として想定した場合に必要な仕様をほぼ満足するため、原型炉 NBI へのインプットとなる。しかし、トカマク型を原型炉として想定した場合は、1 年間の連続運転が必要なため、3600 秒程度の達成では、原型炉 NBI へのインプットには全くならない。そのため、1 年間の連続運転を達成するための工学的研究プロジェクトが必要。

### ③BA からの成果

JT60SA-NBI の開発・運転は、ITER-NBI システム実現に貢献するが、フィラメント・アーク負イオン源のため、原型炉における NBI に必要な RF 負イオン源の開発プロジェクトが必要。

### ④原型炉設計時期（原型炉工学 R&D 開始まで）

2MeV までのビーム加速が可能であることの見通しが必要。ヘリカル型原型炉の場合は、これでシス

テム R&D を開始できるが、トカマク型原型炉の場合、1 年間の高効率な連続運転の見通しが立たない限り、原型炉 NBI の設計ができない。そのため、光中性化セルの実現の見通しが必要。

⑤原型炉建設開始時期まで

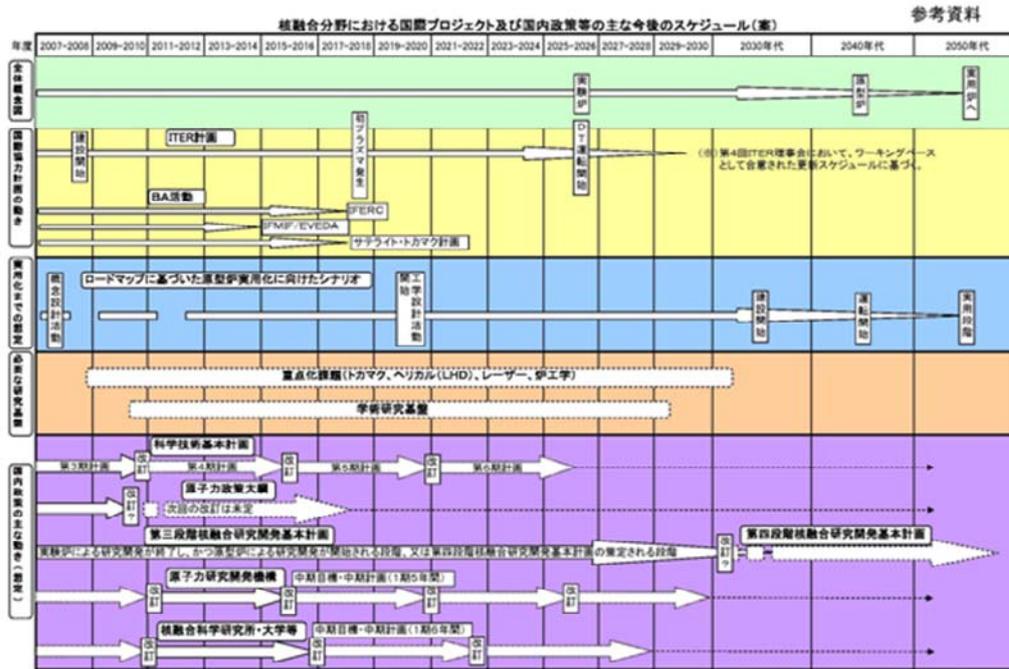
ヘリカル型原型炉の場合、2MeV-1hour の NBI システムの実現が必要。トカマク型原型炉の場合、2MeV-1year の NBI システムの実現と光中性化セルの実現が必要。

⑥原型炉運転開始時期まで

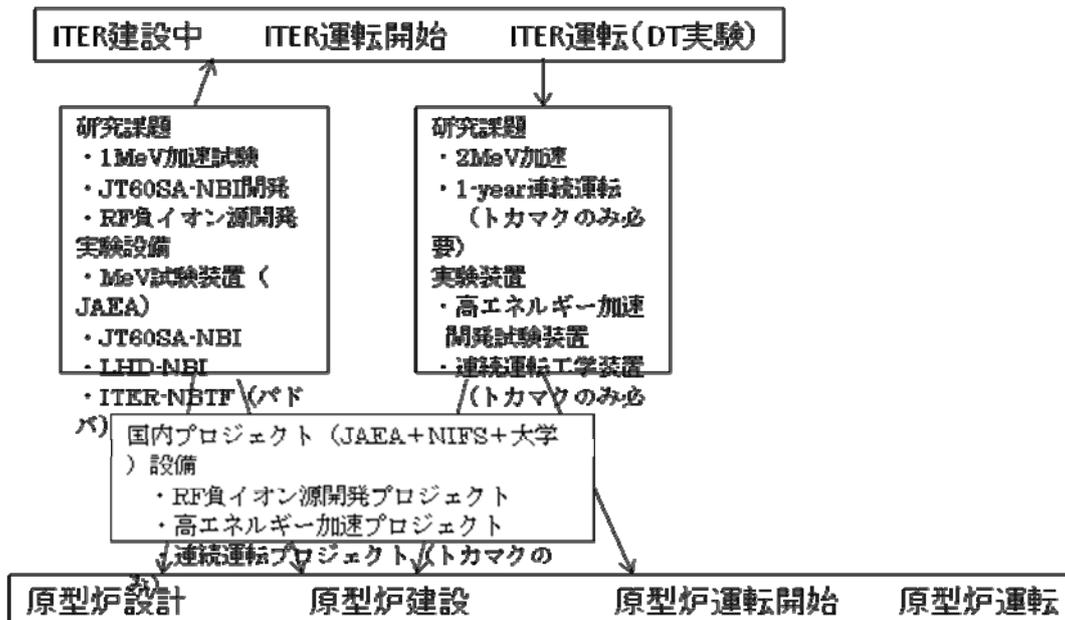
ヘリカル型原型炉の場合、2MeV-1hour の NBI システムの実現が必要。トカマク型原型炉の場合、2MeV-1year の NBI システムの実現が必要。

(3) 補足資料や要望書

特になし。



項目名：加熱電流駆動NBI



1) ITER・BAをオールジャパンで推進し、その成果を将来の核融合研究につなげるために必要な取り組み。

- ① ジャイロトロン開発はEC加熱機器開発の核である。ITERジャイロトロン開発で170GHz、1MW準定常化が実現された。ITERの高性能化には加熱の増力が必須であり、ITER建設期には、ITERジャイロトロンのマルチMW化が期待されている。また、2周波数可変ジャイロトロン、高速電力変調などプラズマ加熱・制御物理の発展に貢献する技術の開発も重要である。アンテナ/伝送系の損失低減もジャイロトロン高出力化と同様に、ECシステムの簡素化、信頼性の向上につながる重要な開発である。これらのジャイロトロン・アンテナ技術開発はJAEAの高周波工学試験装置が中心となる。
- ② DEMOに向けては（ITER運転期）、ジャイロトロンとアンテナの信頼性、長寿命化に向けて研究がITER、JT-60SAで可能となる。また、EC電流駆動効率の向上は、核融合炉のシステムの効率化、簡素化に大きなインパクトを与える物理として研究開発が期待される。
- ③ 実用炉に向けては（DEMO運転期）、炉システムとして最も重要な総合コストに関わる項目が必須となる。ジャイロトロンの高信頼性・長寿命化、アンテナでは重照射下での長寿命化である。これらの中心設備はDEMO、ITER等と考えられる。

2) ITER・BAと相補的な研究プロジェクトの具体的プラン。原型炉段階の研究に進むための必要性と他の研究項目との関連性・整合性など。

- ① ITER建設期には、ジャイロトロンのマルチMW化の要素技術、周波数可変ジャイロトロン、高速電力変調など、ITER・BAを補完し、プラズマ加熱・制御物理の発展に貢献する研究開発が必要である。これら学術的、要素的な開発では、JAEAの高周波工学試験装置やJT-60SAに加えて、GAMMA10、Heliotron-J、LHD等の大学側のECシステムが利用できる。
- ② DEMOに向けては（ITER運転期）、ジャイロトロンの高周波数化(200GHz)、2MWレベルの完全連続出力化、アンテナの耐中性子照射化が必須である。また、アンテナの信頼性と寿命の飛躍的な向上につながる高速多周波数可変ECシステムの実現に向けた技術開発が必要である。この時期の開発では、ITER・BAの相補的な装置として、増力化した高周波工学試験装置やLHDが中心と考えられる。
- ③ 実用炉に向けては（DEMO運転期）、炉システムとして最も重要な総合コストに関わる項目が必須となる。ジャイロトロンでは70%以上の高効率化、高信頼性・長寿命化である。この時期の開発では、ITER・BAの相補的な装置として、新高周波工学試験装置が必要と考えられる。

3) その他、研究体制についての具体的な要望やビジョンなど。

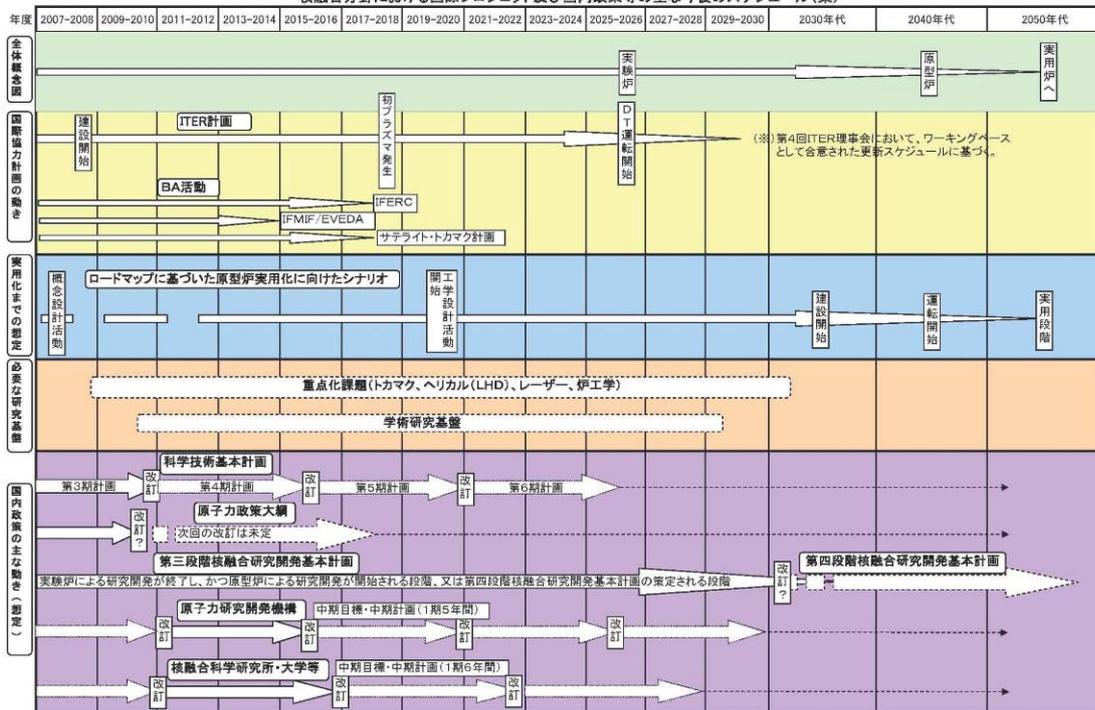
現在、ITER/DEMOに向けたEC加熱電流駆動工学開発体制はJAEAの高周波工学試験装置が中心となり、LHDやGAMMA10等のEC加熱装置が相補的に進めている。原型炉等に向けた中期的な開発も現体制を維持することが必要である。長期的にはJAEAの高周波工学試験装置の増力や新装置の建設が必要となる。

ECHのプラズマ物理はジャイロトロン技術の進展とともに新たな展開を見せており、多機能な役割を持ち、炉環境に最も適した加熱電流駆動方式であることから、将来的にもDEMO/実用炉に向けた研究開発の継続が不可欠である。

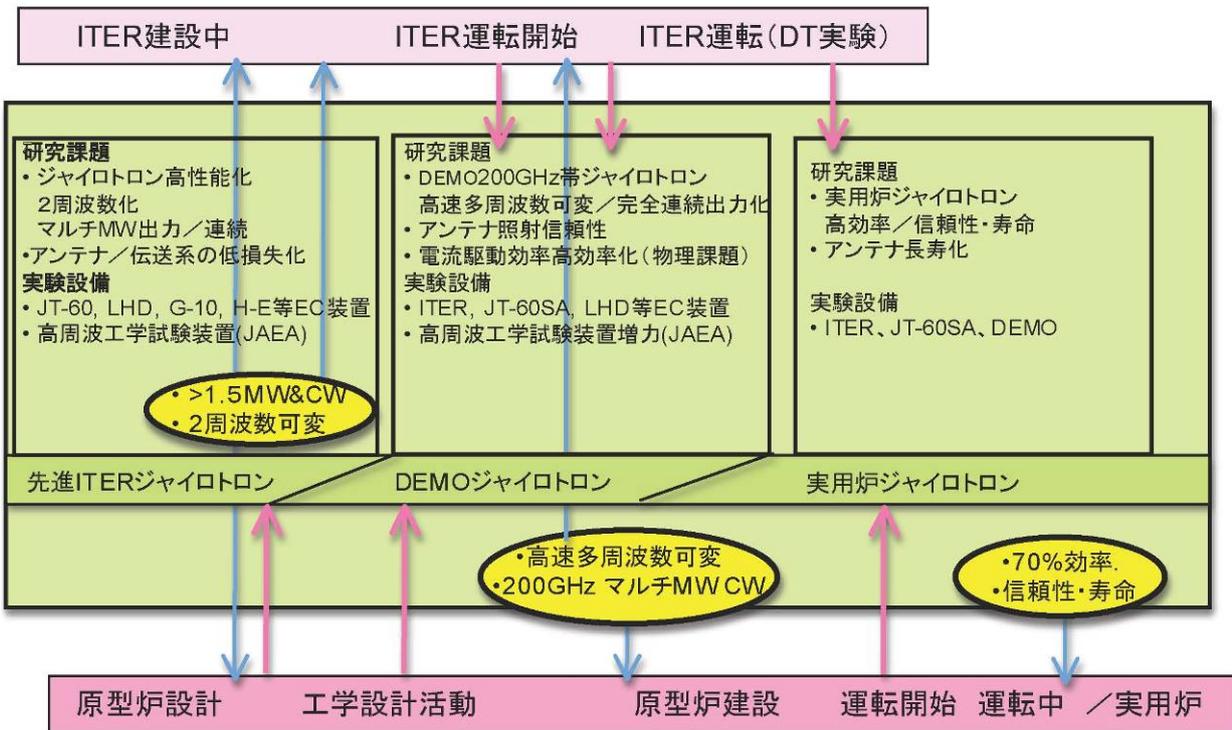
さらに、EC電流駆動効率の向上や高自発電流運転による能動駆動電流の低減が可能となれば、加熱電流駆動装置はECのみで簡素化することも可能となり、システムに大きなインパクトをもたらす。

核融合分野における国際プロジェクト及び国内政策等の主な今後のスケジュール(案)

参考資料



EC加熱電流駆動



## (1) 文科省科学官・調査官の依頼「文科省作業部会への情報提供に関するお願い」に対する回答

1) ITER・BAをオールジャパンで推進し、その成果を将来の核融合研究につなげるために必要な取り組み。

## 核融合炉設計統合コードの開発に向けた取り組み

核融合炉の信頼性高い設計を行うためには、ITER や原型炉等によって十分に検証された核燃焼プラズマ統合解析と核融合炉構成要素を総合的に記述する炉工学統合解析を組み合わせた核融合炉設計統合コードが必要である。その開発にあたっては、必要な物理モデルや工学モデルとそれらに基づく計算コードを系統的かつ組織的に構築し、実験データとの比較による検証を通して十分な信頼性を確保する事が厳しく要求される。このようにして開発された核融合炉設計統合コードを用いて実証される技術的成立性を、経済的成立性や環境・安全性等の社会的評価と整合させることにより、開発期間の短縮ならびに経済性の向上を含めて最適化された核融合炉を設計する事が可能となると考えられる。

ITER プラズマの解析や原型炉開発に向けた設計活動においては、大規模な計算機シミュレーションが不可欠である。BA-IFERC 計算機シミュレーションセンターの計算資源を最大限に利用するとともに、BA 終了後の計算資源確保が重要課題である。もう一つの重要課題は、設計統合コード開発に向けた研究者ポストの大幅な拡大とそのための人材育成である。このため、核融合原型炉シミュレーションセンターの設置を要望する（添付の要望書を参照）。

この取り組みでは、ITER 建設期間中は核燃焼プラズマ物理モデルの開発、ITER プラズマの性能予測、運転シナリオの開発等を進め、ITER 運転開始後は物理モデルの検証や運転シナリオの最適化を行い、さらに JT-60SA や LHD における実験結果に基づく物理モデルの検証により、信頼性の高い核燃焼プラズマ統合解析コードを開発する。一方、ITER 建設期間と重なる BA 期間中は炉設計活動と協力して原型炉設計基盤コードを開発し、BA 期間以降は原型炉設計に向けた炉工学統合解析に核燃焼プラズマ統合解析を組み合わせ、原型炉設計統合コードを開発する。最終的に原型炉による検証を経て、核融合炉設計統合コードを確立する。

## (2) ロードマップ図での位置付け

1. ITER へのインプット (2012-2017)
  - ・ 課題：ITER プラズマ統合シミュレーションの開発
  - ・ 必要性

- 既存のトカマクにおける実験データを再現し、ITER プラズマの時間発展を予測する統合コードが必要であり、そのためには、乱流輸送モデルの検証、巨視的非線形現象の解明等が必要である。

- ・ 目的

- ITER プラズマにおける物理現象の解明
- ITER プラズマの性能評価
- ITER 加熱機器・制御機器等の詳細設計
- ITER 運転シナリオの開発
- JT-60SA 実験データの解析

- ・ 必要コード：

- 乱流輸送シミュレーション
- 巨視的非線形現象シミュレーション ( $\alpha$  粒子, 運動論効果を含む)
- プラズマ壁相互作用シミュレーション
- ITER プラズマ統合コード (SOL, ダイバータを含む)

- ・ 検証対象

- JT-60U 実験データ
- 国際トカマク分布データベース
- JT-60SA 実験データ

- ・ 設備：

- 1PFLOPS 級計算機システム (BA-IFERC-CSC)
  - ・ 大規模シミュレーション
  - ・ 中規模シミュレーションの多数並列実行

- ・ 人員：

- 物理モデル研究者 10 名 (物理モデル開発, コード開発)
- 数値手法研究者 5 名 (高速化手法開発, コード開発支援)
- 実験解析研究者 5 名 (物理モデル検証, 実験データ解析)
- シミュレーション支援研究者 10 名 (コード実行支援, 関連コード開発)

- ・ 予算：

- 人件費+研究費 3 億/年
- 計算機 21 億/年 (BA-IFERC-CSC 経費)

## 2. ITER からの成果 I (2018-2023)

- ・ 課題：核燃焼プラズマ統合シミュレーションの開発

- ・ 必要性

- ITER および JT-60SA における実験データを再現し、原型炉炉心プラズマを予測する統合コードが必要である。閉じ込めの最適化、高 $\beta$ 長時間運転の実現には、輸送障壁モデルの検証、巨視的非線形現象の予測・制御を行うことが必要である。

- ・ 目的

- 核燃焼プラズマにおける物理現象の解明
- 核燃焼プラズマを記述する物理モデルの検証
- ITER 運転シナリオの最適化
- ・ 必要コード：
  - 乱流輸送・輸送障壁シミュレーション
  - 巨視的非線形現象シミュレーション ( $\alpha$ 粒子, 運動論効果を含む)
  - プラズマ壁相互作用シミュレーション
  - ITER プラズマ統合コード (SOL, ダイバータを含む)
- ・ 検証対象
  - JT-60SA 実験データ
  - ITER 実験データ
  - 国内外トカマク実験データ
- ・ 設備：
  - 10PFLOPS 級計算機システム (原型炉シミュレーションセンター)
- ・ 人員：
  - 物理モデル研究者                    10名
  - 数値手法研究者                        5名
  - 実験解析研究者                        5名
  - シミュレーション支援研究者    10名
- ・ 予算：
  - 人件費+研究費                    3億/年
  - 計算機                                21億/年 (原型炉シミュレーションセンター)

### 3. ITER からの成果 II (2024-2030)

- ・ 課題：原型炉プラズマ統合シミュレーションの開発
- ・ 必要性
  - ITER における核燃焼プラズマ実験データを再現し, 原型炉炉心プラズマを予測する統合コードが必要である. 原型炉における計測および制御システムを含めた解析を行う必要がある.
- ・ 目的
  - 原型炉核燃焼プラズマの予測
  - 原型炉核燃焼プラズマ制御システムの開発
- ・ 必要コード：
  - 乱流輸送・輸送障壁シミュレーション
  - 巨視的非線形現象シミュレーション ( $\alpha$ 粒子, 運動論効果を含む)
  - プラズマ壁相互作用シミュレーション
  - 原型炉プラズマ統合コード (SOL, ダイバータを含む)
- ・ 検証対象

- ITER 実験データ
- 国内外トカマク実験データ
- ・ 設備：
  - 10PFLOPS 級計算機システム（原型炉シミュレーションセンター）
- ・ 人員：
  - 物理モデル研究者                    10名
  - 数値手法研究者                    5名
  - 実験解析研究者                    5名
  - シミュレーション支援研究者    10名
- ・ 予算：
  - 人件費+研究費                    3億/年
  - 計算機                            21億/年（原型炉シミュレーションセンター）

#### 4. BA からの成果（2012-2017）

- ・ 「1. ITER へのインプット」に挙げた項目に加えて
- ・ 課題：原型炉設計基盤コードの開発
- ・ 必要性
  - ブランケット設計を行うために中性子工学，トリチウム，熱流動，構造設計等の要素コードを整備し，統合コードに発展させることが必要である．併せて，炉材料評価のための材料シミュレーション，および原型炉の概念設計に必要な炉心プラズマ，ブランケット，超電導コイル，炉システム等の簡易モデルを統合した原型炉設計基盤コードの開発に着手する必要がある．
- ・ 目的
  - ブランケットの概念設計
  - 核融合材料シミュレーション
  - 原型炉設計基盤コードの開発
- ・ 必要コード：
  - ブランケット統合コード（中性子工学，トリチウム，熱流動，構造設計等）
  - 核融合材料シミュレーションコード（分子動力学から構造設計まで）
  - 原型炉設計基盤コード（炉心プラズマ，ブランケット，超電導コイル，炉システム等）
- ・ 設備：
  - 1PFLOPS 級計算機システム（BA-IFERC-CSC）（1. と共用）
- ・ 人員：
  - 原型炉物理モデル研究者            5名（物理モデル開発，コード開発）
  - 核融合材料モデル研究者            5名（物理モデル開発，コード開発）
  - 炉設計・運転シナリオ研究者        5名（統合コード開発，実験データ解析）
  - シミュレーション支援研究者        5名（コード実行支援，関連コード開発）
- ・ 予算：

- 人件費+研究費 2億/年
- 計算機 21億/年 (BA-IFERC-CSC 経費) (1. と共用)
- 

5. 原型炉基本設計時期 (原型炉工学設計開始まで) (2018-2023)

- ・ 課題：原型炉設計基盤コードの整備
- ・ 必要性
  - 核燃焼プラズマ統合コードの成果を取り入れて原型炉炉心プラズマの最適化を行うとともに、ブランケット統合コードの成果を取り入れた原型炉設計基盤コードの整備により、原型炉の基本設計に寄与することが必要である。併せて炉材料最適化のための材料シミュレーションも必要である。
- ・ 目的
  - 炉心プラズマ設計の最適化
  - ブランケットの概念設計
  - 核融合材料シミュレーション
  - 原型炉設計基盤コードの整備
- ・ 必要コード：
  - 核燃焼炉心プラズマ統合コード
  - ブランケット統合コード
  - 核融合材料シミュレーションコード
  - 原型炉設計基盤コード
- ・ 設備：
  - 10PFLOPS 級計算機システム (原型炉シミュレーションセンター) (2. と共用)
- ・ 人員：
  - 原型炉物理モデル研究者 5名 (物理モデル開発, コード開発)
  - 核融合材料モデル研究者 5名 (物理モデル開発, コード開発)
  - 炉設計・運転シナリオ研究者 5名 (統合コード開発, 実験データ解析)
  - シミュレーション支援研究者 5名 (コード実行支援, 関連コード開発)
- ・ 予算：
  - 人件費+研究費 2億/年
  - 計算機 21億/年 (2. と共用)

6. 原型炉建設開始時期まで (2024-2030)

- ・ 課題：原型炉設計統合コードの開発
- ・ 必要性
  - 原型炉プラズマ統合コードと原型炉設計基盤コードを一体化し、炉心プラズマ、ブランケット、炉システム等を含めた原型炉設計統合コードへと発展させることによって、

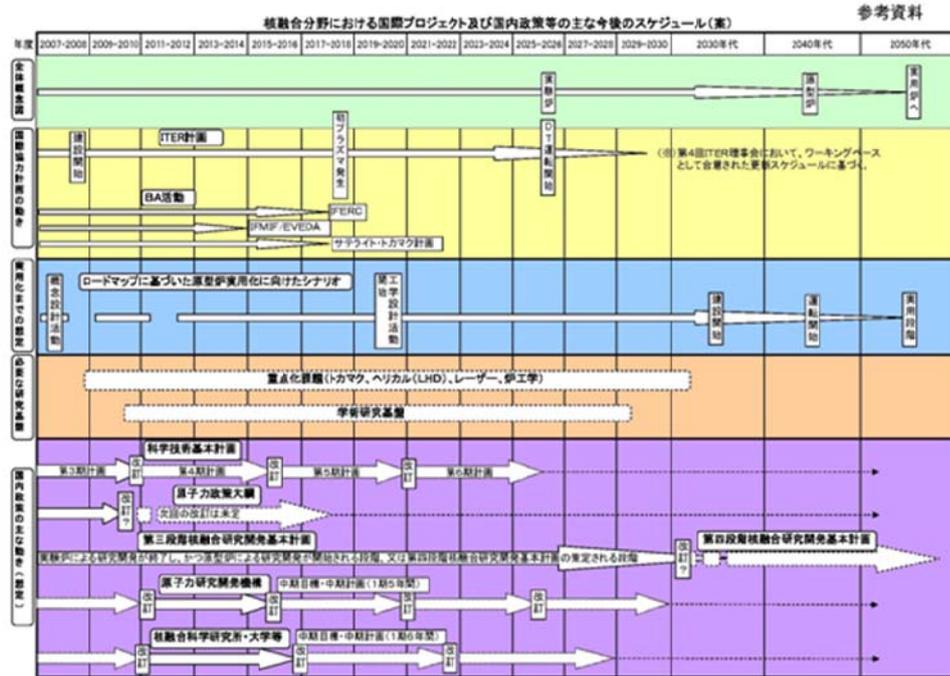
原型炉の工学設計に寄与することが必要である。併せて炉材料選定のための材料シミュレーションが必要である。

- 
- ・ 目的
  - 原型炉炉心プラズマの性能予測
  - 炉心プラズマ設計・制御の最適化
  - ブランケット設計の最適化
  - 核融合材料シミュレーション
  - 原型炉設計統合コードの整備
- ・ 必要コード：
  - 核燃焼炉心プラズマ統合コード
  - ブランケット統合コード
  - 核融合材料シミュレーションコード
  - 原型炉設計統合コード
- ・ 設備：
  - 100PFLOPS 級計算機システム（原型炉シミュレーションセンター）
- ・ 人員：
  - 核融合炉工学モデリング研究者 5名（工学モデル開発，コード開発）
  - 核融合材料モデリング研究者 5名（物理モデル開発，コード開発）
  - 数値手法研究者 5名
  - 炉設計・運転シナリオ研究者 5名（統合コード開発，実験データ解析）
  - シミュレーション支援研究者 10名（コード実行支援，関連コード開発）
- ・ 予算：
  - 人件費＋研究費 3億／年
  - 計算機 21億／年（原型炉シミュレーションセンター）（3. と共用）

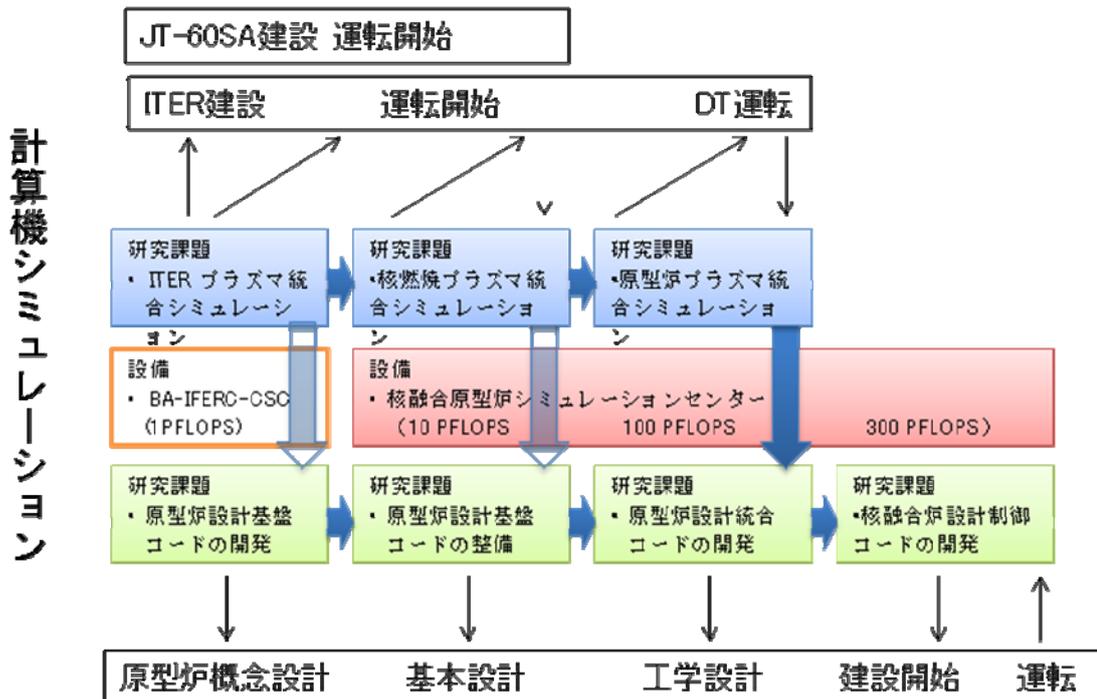
## 7. 原型炉運転開始時期まで（2031-2038）

- ・ 課題：核融合炉設計制御コードの開発
- ・ 必要性
  - 原型炉における運転シナリオの最適化や計測制御システムの開発に必要な統合コードを開発するとともに，核融合実用炉に向けた設計コードを開発することが必要である
- ・ 目的
  - 原型炉炉心プラズマの運転シナリオ最適化
  - 原型炉プラズマにおける計測制御システムの開発
  - 核融合炉設計統合コードの開発
  - 核融合材料シミュレーション
- ・ 必要コード：

- 原型炉プラズマ統合コード
- 核融合炉設計統合コード
- 核融合材料シミュレーションコード
- ・ 設備：
  - 300PFLOPS 級計算機システム（原型炉シミュレーションセンター）
- ・ 人員：
  - 炉心プラズマモデリング研究者 15名（物理モデル開発，コード開発）
  - 核融合炉工学モデリング研究者 5名（工学モデル開発，コード開発）
  - 核融合材料モデリング研究者 5名（物理モデル開発，コード開発）
  - 数値手法研究者 5名
  - 炉設計・運転シナリオ研究者 10名（統合コード開発，実験データ解析）
  - シミュレーション支援研究者 10名（コード実行支援，関連コード開発）
- ・ 予算：
  - 人件費＋研究費 5億／年
  - 計算機 21億／年（原型炉シミュレーションセンター）



以下はExampleですので、次ページの図にITERや原型炉のそれぞれのフェイルとの関連を、より分かり易く工夫して、記入頂ければ幸甚です。(上図に直接矢印などを記入して頂いても結構です。



### (3) 補足資料や要望書

添付：「核融合原型炉シミュレーションセンターの設置について」の要望書

平成22年1月19日

文部科学省核融合研究作業部会からの情報依頼に対する提案

京都大学 教授 福山 淳  
慶應義塾大学 教授 畑山明聖  
京都大学 教授 岸本泰明  
京都大学 教授 功刀資彰  
京都大学 准教授 森下和功  
山口大学 教授 内藤裕志  
核融合科学研究所 教授 中島徳嘉  
徳島大学 教授 大宅 薫  
東京理科大学 准教授 佐竹信一  
九州大学 教授 矢木雅敏

#### 核融合原型炉シミュレーションセンターの設置について

##### 提案の背景：

日欧協力による Broader Approach (BA) は10年の時限があり，国際核融合エネルギー研究センター計算機シミュレーションセンター (IFERC-CSC) は2017年をもって運用を終了することになる。しかしながら，ITERの運転開始は2018年であり，2017年以降こそ，ITERプラズマの解析，物理モデルの検証，原型炉の設計に関連するシミュレーション研究を推進することが必須であり，そのために高性能計算機システムを必要とする。

現在のBA-IFERC-CSCは，計算機ハードウェアの運用が中心であり，計算コードの開発，高性能化や利便性向上のための経費は含まれておらず，それらは原子力機構，核融合研，大学等の自己努力に任されている。しかしながら，国内の核融合関連の計算コード開発者の数は欧米に比べて圧倒的に少なく，核融合エネルギーフォーラム ITER・BA 技術推進委員会「トカマク型原型炉に向けた開発実施のための人材計画に関する検討報告書」(2008年6月)に指摘されているようにその増員を図ると共に，コード開発者およびコード利用者の全国的連携を進め，核融合原型炉に向けた理論・モデリング・シミュレーション研究の裾野を広げていくことが必要である。

炉心プラズマシミュレーションの国内連携は実績があり，核燃焼プラズマ統合コード構想 (BPSI) は2002年より活動を始め，大学，原子力機構，核融合研等の研究協力として，これまでに8回の研究会を開催して情報交換を実現すると共に，当該分野の日米協力や日韓協力に主導的役割を果たし，CSC や次

世代スーパーコンピュータに向けた計画立案に重要な役割を担ってきた。

一方、炉工学シミュレーションは、これまでに日米科学技術協力事業の JUPITER-II 計画および TITAN 計画のタスクとして、核融合研や大学を中心に実績を積み重ねてきているが、炉工学シミュレーション研究を本格的に推進するためにはより強力な国内連携が必要である。ブランケット設計には、中性子工学、トリチウム、熱流動、材料、構造設計等を含めた統合シミュレーションが必要であり、特に精密な計算を必要とするトリチウム増倍率の評価は、大規模なシミュレーションが必須である。また、材料シミュレーションにおいても、分子動力学法に基づく材料物性から核融合炉の構造設計までをカバーする多階層シミュレーションが求められている。これらのコード開発は原子力機構だけで閉じたものではなく、大学や核融合研との国内連携を積極的に進めることが必要である。

以上の背景ならびに核融合エネルギーフォーラム・物理クラスター・モデリング・シミュレーションサブクラスター会合での議論に基づき、以下の内容を提案したい。

**提案：**

BA 終了後もオールジャパンで ITER の解析、物理モデルの検証、原型炉の設計に関連するシミュレーション研究を推進するために、高性能計算機システムを運用する核融合原型炉シミュレーションセンターを設置する。同センターは、上記シミュレーション研究の推進のために、高性能計算機システムを運用するだけでなく、必要な計算コードの開発、高性能化、利便性向上を図るための研究を、大学・原子力機構・核融合研との国内連携ならびに ITER およびその参加極との国際連携を通して行う。

以 上