

図9 核融合炉の安全性と安全研究における課題の構造

## 2-2) コア課題の抽出、優先付

- 安全性検討については、ITER 誘致活動後、検討チームが解散したこと、主だった活動が停滞したことが課題であり、プロジェクトとして活動を立ち上げることが重要である。
- 安全性検討チームは、他分野も含めた産官学の幅広い協力を得やすい体制とすることが重要である。

## 3) 喫緊の対応が必要と考えられる事項

- ① 安全検討と材料データなどの取得を加速し、概念設計の裏付けを強化する必要があるのではないか。このためには以下の点に留意すべきではないか。
- ② 原型炉の要求仕様と、そこから導かれる個別要素への要求の明確化が必要ではないか。
- ③ 原型炉に特有な事象の抽出と影響評価を整理する必要があるのではないか。
- ④ そのために、安全性検討を含む概念設計検討に携わるチームの活動強化が必要ではないか。
- ⑤ 特に、設計に必要な材料を選択し、データ取得に集中する活動のシフトが必要ではないか。
- ⑥ チームの体制は、他分野の研究者にとっても参画する意義のあるものにする必要があるのではないか。

## 4) 作業部会において検討の上、計画としてとりまとめていただきたい事項

- ① 材料データ取得、安全コード開発および Verification&Validation 実験に必要な装置の整備

と試験計画をレビューし、プロジェクト化することが必要ではないか。

- ② 他分野の研究者の協力を得やすい形の検討チームの立ち上げが必要ではないか。
  - ③ 安全要求基準と原型炉の安全設計ガイドラインの整備が必要ではないか。検討にあたっては、既存の規制や設計基準を参考にしつつ、核融合炉固有の安全性を考慮して合理的なものとするのが重要ではないか。
  - ④ さらに、規制と許認可手続きの在り方について検討することが重要ではないか。
  - ⑤ 上記プラントの社会受容性を判断するべきではないか。
- 3)、4) であげた取組事項に関する担い手と施設について表9にまとめる。

表9 核融合炉の安全性と安全研究に関する取組の担い手と施設について

項目	取組	担い手	既存施設(国内)	必要施設(国外または新規)
3) ②	原型炉の要求仕様と、そこから導かれる個別要素への要求の明確化が必要ではないか	JAEA核融合炉システム研究グループ NIFS核融合工学研究プロジェクト	六ヶ所BAサイト	国内他拠点
3) ③	原型炉に特有な事象の抽出と影響評価を整理する必要があるのではないか	JAEA核融合炉システム研究グループ NIFS核融合工学研究プロジェクト	六ヶ所BAサイト	国内他拠点
3) ④	そのために、安全性検討を含む概念設計検討に携わるチームの活動強化が必要ではないか	JAEA核融合炉システム研究グループ NIFS核融合工学研究プロジェクト 大学の研究室	六ヶ所BAサイト	国内他拠点
3) ⑤	設計に必要な材料を選択し、データ取得に集中する活動のシフトが必要ではないか	JAEA核融合炉システム研究グループ JAEAブランケット研究開発ユニット NIFS核融合工学研究プロジェクト	六ヶ所BA施設の材料特性評価装置	材料特性評価装置群の拡充
3) ⑥	チームの体制は、他分野の研究者にとっても参画する意義のあるものにする必要があるのではないか	JAEA NIFS 他研究所 メーカー 大学の研究室		
4) ①	データ取得、安全コード開発およびV&V実験に必要な試験装置の整備、開発計画をレビューし、プロジェクト化することが必要ではないか	JAEA核融合炉システム研究グループ ブランケット研究開発ユニット NIFS核融合工学研究プロジェクト	ヘリオス(六ちゃん)	ブランケットコールド試験装置群
4) ②	他分野の研究者の協力を得やすい形の検討チームの立ち上げが必要ではないか	JAEA NIFS 他研究所 メーカー 大学の研究室	六ヶ所BAサイト	国内他拠点
4) ③	原型炉の概念設計の立案が必要ではないか	JAEA核融合炉システム研究グループ NIFS核融合工学研究プロジェクト メーカー		
4) ④	安全要求基準と原型炉の安全設計ガイドラインの整備が必要ではないか	JAEA核融合炉システム研究グループ NIFS核融合工学研究プロジェクト メーカー 関連学協会		
4) ⑤	想定した核融合プラントの安全性について社会受容性を評価するべきではないか	大学の研究室 シンクタンク		

### 3-10. 稼働率と保守性

- 1) 第6期報告書で指摘されている技術課題と課題解決に向けて必要となる取組と体制を要

約すると以下のとおりである。

#### 1-1) 課題

- (a) 経済性と RAMI(Reliability, Availability, Maintainability, Inspectability)、安全性等を含めた稼働率・保守性の全体像に関する理解。保守方式の将来展望、信頼性確保のアプローチ(品質保証、冗長性、安全尤度の考え方)、検査性、計画外停止リスクを考慮した「一定の経済性」提示。
- (b) 炉内機器の寿命予測、及び、寿命伸長へ向けた取組の方向性提示。
- (c) 保守方式、炉構造、建屋・ホットセルにわたる総合的な保守概念の構築。耐放射線性機器の開発、及び、システム統合化。

#### 1-2) 課題解決に向けて必要となる取組と体制

- (a) 稼働率、経済性を見通しを得るために、RAMI を原型炉システムの性能評価手法として確立。ITER やその他の国際協力を活用した設備・機器の故障率データベース構築。
- (b) 最も重大な寿命決定要因となる対向材の損耗は理解に相当の時間を要し、長期的視点に立ち、継続的に取り組む。
- (c) 遠隔保守技術、耐放射線機器開発、炉内機器寿命評価について、BA 活動後に原型炉を目指した開発・試験。長期にわたる高 $\gamma$ 線照射設備の確保と耐放射線性試験の実施。大型構造物の取り扱い、ホットセル、除染、炉内機器の補修、検査、廃棄物処理等の技術は ITER で経験を適用。保守概念の成立性、製作性の検討、確定について、産業界も主体の一つとして参加できる体制の構築。

## 2) 課題の分析

### 2-1) 課題の整理

- 保守方式、炉構造、建屋・ホットセルにわたる総合的な保守概念の構築と稼働率の提示は未だ。(優先度高)
- 炉内プラズマ対向機器、特にダイバータの寿命予測が困難。(優先度高)
- 経済性を見込める稼働率を実現可能な定期保守シナリオと方式に立った、原型炉での実証の在り方とそのため研究開発計画の策定。
- システムとしての計画外停止リスクの要因洗い出し、検知、低減・冗長性、対処手法の研究。
- 原型炉で新たに必要となる大型コンポーネント一括引き抜き、運搬等の遠隔保守技術の開発研究推進。
- より高い耐放射線性能を有する機能材料、機器の開発研究推進。(ITER では 100MGy、DEMO 炉は 200MGy 以上)
- これらの点を勘案すると、稼働率と保守性における課題の構造は、図 10 のように整理できるのではないか。

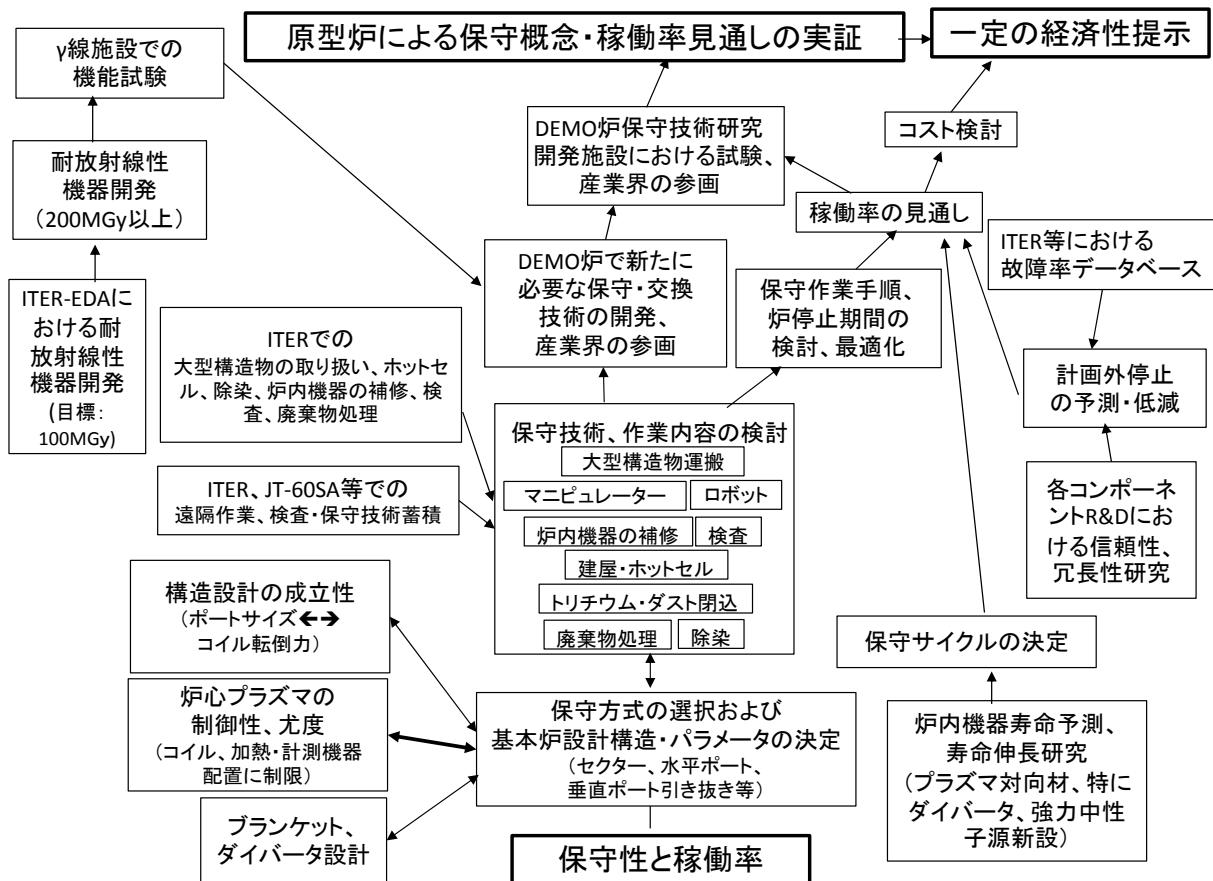


図10 稼働率と保守性における課題の構造

## 2-2) コア課題の抽出、優先付

- 保守方式は炉構造、さらには燃焼プラズマ制御とも密接に関連しており、炉設計の最初に決定する必要がある。BA 活動後の保守技術開発項目の検討、重点化のためにも決定が必要。
- 最も交換頻度が高くなると考えられるダイバータが炉の定期保守サイクルを決定するため、保守方式や経済性見通しを得るためにはその寿命予測が必要。

## 3) 喫緊の対応が必要と考えられる事項

- ① 早期に保守概念の構築と稼働率見通しの提示ができるよう、原型炉設計の全日本的な体制強化が必要ではないか。
- ② 機器開発、プラズマ制御両面からの原型炉ダイバータの開発および寿命予測研究の重点化、体制強化が必要ではないか。

## 4) 作業部会において検討の上、計画としてとりまとめていただきたい事項

- ① 原型炉におけるブランケット大型構造物の着脱・輸送、遠隔保守等の技術研究開発を行うための施設を設置することが必要ではないか。
- ② 耐放射線機能材料・機器開発のために、Co-60 ガンマ線照射が可能な外部施設の長期確保、

維持する計画が必要ではないか。

- ③ 原型炉の炉構造、保守方式についての基本概念を固めていく必要があるのではないか。
  - ④ 廃炉および廃棄物処理に係るバックエンドについて、特に再利用・処分および遠隔保守の在り方を検討する必要があるのではないか。
- 3)、4) であげた取組事項に関する担い手と施設について表 10 にまとめる。

表 10 稼働率と保守性に関する取組の担い手と施設について

項目	取組	担い手	既存施設(国内)	必要施設(国外または新規)
3) ①	早期に保守概念の構築と稼働率見通しの提示ができるよう、原型炉設計チームの全日本的な体制強化が必要ではないか。	JAEA 核融合炉システム研究グループ 電力中央研究所 NIFS 核融合工学研究プロジェクト		
3) ②	機器開発、プラズマ制御両面からの原型炉ダイバータの開発および寿命予測研究の重点化、体制強化が必要ではないか。	JAEA ITERトカマク本体開発グループ、 先進プラズマ実験グループ、JT-60本 体開発グループ NIFS LHD計画プロジェクト NIFS 核融合工学研究プロジェクト 大学の材料研究室	e-Beam exposure: JEBIS (JAEA), ACT (NIFS) i-Beam exposure: 大学の研究室 Plasma exposure: JT-60SA LHD Material analysis: 大学の研究室, NIFS, JAEA六ヶ所	強力中性子源 (IFMIF)
4) ①	原型炉におけるブランケット大型構造物の着脱・輸送、遠隔保守等の技術研究開発を行うための施設を設置することが必要ではないか。	JAEA ITERトカマク本体開発グループ、 JT-60本体開発グループ NIFS 大学の研究室 産業界	JAEA那珂・ITER遠隔機器開発施設	原型炉ブランケット保守技術研究開発施設
4) ②	耐放射線機能材料・機器開発のために、Co-60ガンマ線照射が可能な外部施設の長期確保、維持する計画が必要ではないか。	JAEA ITERトカマク本体開発グループ、 JT-60本体開発グループ NIFS 大学の研究室 産業界	JAEA・高崎研・Co-60照射施設 大学・Co-60照射施設	
4) ③	原型炉の炉構造、保守方式についての基本概念を固めていく必要があるのではないか。	JAEA 核融合炉システム研究グループ 電力中央研究所 NIFS 核融合工学研究プロジェクト		

### 3-1 1. 計測・制御開発

1) 第 6 期報告書においては計装・制御に関して独立した議論はなかったが、関連する課題がいくつかの技術課題項目に指摘されている。一方で、計測・制御は、計測器・アクチュエータの技術開発や原型炉の総合的な運転シナリオ概念を構築する上で、独立した技術課題項目として検討することが重要との認識に至り、技術課題の分析と取組と体制の分析を実施した。第 6 期報告書で指摘されている技術課題と課題解決に向けて必要となる取組と体制を要約すると以下のとおりである。

#### 1-1) 課題

- (a) 熱負荷制御、ヘリウム排気性能、及びコアプラズマから周辺プラズマまでを含んだ矛盾のないプラズマ立ち上げ・維持シナリオの策定が必要である。(第 6 期報告書 3.2.3 節 ダイバータ開発)
- (b) ダイバータ機器の損耗・脆化・保守と矛盾のない周辺プラズマ運転シナリオ策定が必要である。(第 6 期報告書 3.2.3 節 ダイバータ開発)
- (c) 原型炉の計測・制御システム設計に利用するため、炉システム統合シミュレータの開発が必要である。(第 6 期報告書 3.2.5 節 理論・シミュレーション研究)

(d) 現実的・信頼性のある制御手法と制御ロジックを確立することが肝要である。(第6期報告書 3.2.6 節 炉心プラズマ研究)

## 1-2) 課題解決に向けて必要となる取組と体制

- (a) 磁場閉じ込め装置を利用した大規模な模擬実験が不可欠であり、LHD、JT-60SA、ITERの実験研究と実験室プラズマのモデリングによって原型炉周辺プラズマの外挿性確保が肝要。(第6期報告書 3.2.3 節 ダイバータ開発)
- (b) 炉心プラズマからダイバータ機器までを含む統合コード開発。(第6期報告書 3.2.3 節 ダイバータ開発)
- (c) 炉心プラズマ統合コード研究、炉工学統合コード研究、炉設計コードが、最終的に炉システム統合シミュレータ開発にまともっていくことが期待される。(第6期報告書 3.2.5 節 理論・シミュレーション研究)
- (d) ITER、JT-60SA、理論モデリングを複合した有機的な取組が必要である。(第6期報告書 3.2.6 節 炉心プラズマ研究)

## 2) 課題の分析

### 2-1) 課題の整理

- 運転限界に対する裕度や系統接続のための許容出力変動を踏まえた原型炉の運転基準点と運転許容範囲の同定が、定格運転や試験運転の制御概念の構築に必須である。これによって、制御対象となるパラメータやアクチュエータの絞り込み、運転制御ロジックやシミュレータの構築が可能となる。
- 運転制御シミュレータの構築にはプラズマモデリングの検証が必須であり、そのためのプラズマ応答特性データを ITER、JT-60SA や LHD を活用して蓄積することが重要であり、国際トカマク物理活動(ITPA)との連携強化が必要である。さらに、計測量のアクチュエータに対する応答特性を整理し、計装機器への設計要求仕様に反映することが重要である。
- 原型炉では放射線場が大きいいため、計測器の寿命や設置位置が制限される。特に、構造材の渦電流による磁気計測の精度低下によってプラズマ位置・形状制御への影響が課題であるため、JT-60SA において磁気計測器をプラズマから離れた位置や構造材の影響を受けやすい位置に設置するなど、それら影響への対応策の検討が重要である。
- 原型炉の運転制御に必須かつ原型炉環境下(高放射線場)で使用可能な計装機器の開発が重要であるため、ITER での実績の積み上げと課題の整理を行いつつ、JT-60SA や LHD において原型炉に向けた先進的な計測器開発を進める必要がある。さらに、計測器やアクチュエータ構成機器の重照射試験を行い、高放射線場での信頼性を高めることが重要である。
- これらの点を勘案すると、計測・制御開発における課題の構造は、図 11 のように整理できるのではないか。

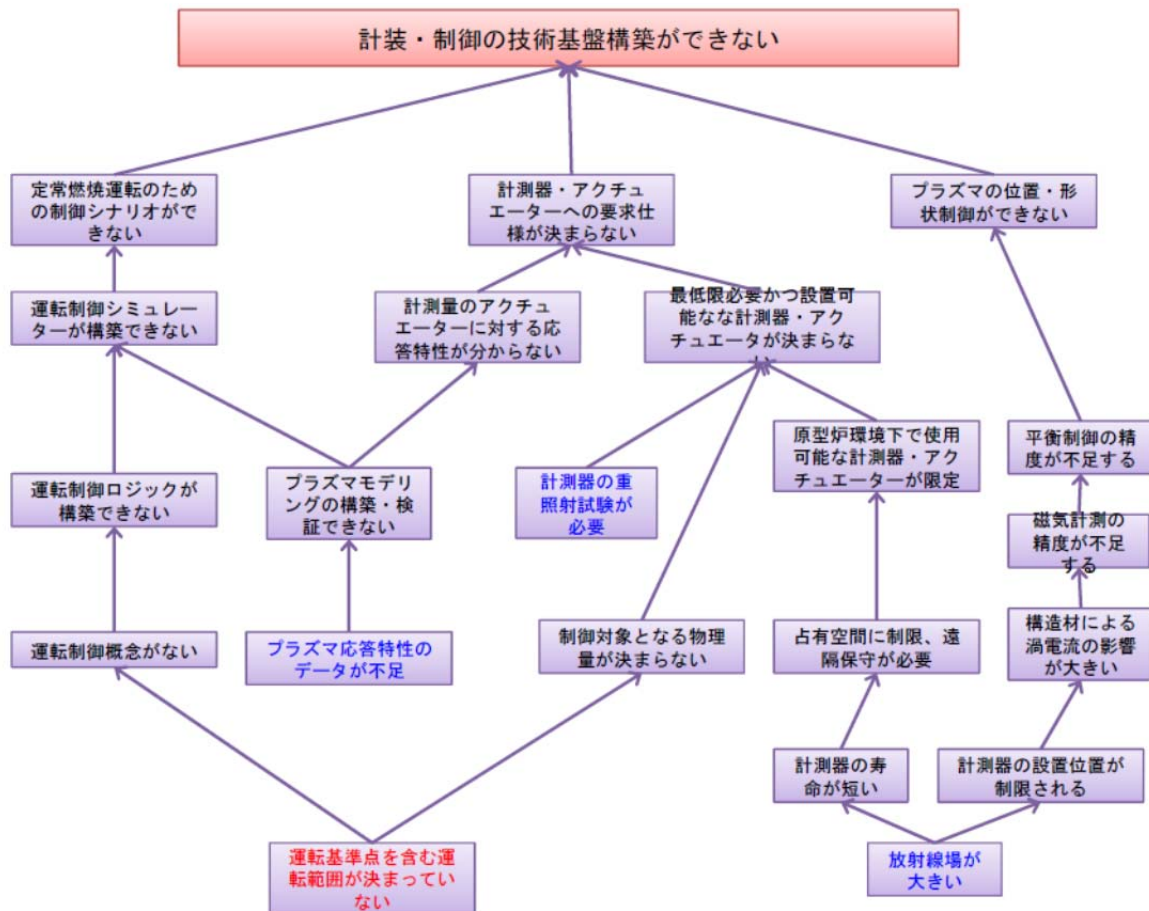


図 11 計測・制御開発における課題の構造

## 2-2) コア課題の抽出、優先付

○ 原型炉環境下での使用に耐える計測器・アクチュエーターの技術開発、原型炉の総合的な運転制御概念を構築する上で中心的な役割を担う運転制御シミュレータを優先する必要がある。

## 3) 喫緊の対応が必要と考えられる事項

① ダイバータを含む炉心プラズマ、理論シミュレーション、計測器やアクチュエーターの専門家で構成する計装・制御検討活動を強化すべきではないか。

## 4) 作業部会において検討の上、計画としてとりまとめていただきたい事項

① 原型炉に要求される計測器および運転制御シミュレータの開発を前記の炉心プラズマ研究計画と整合して位置付けることが必要ではないか。

② ガンマ線及び中性子による重照射試験施設の検討が必要ではないか。

○ 3)、4) であげた取組事項に関する担い手と施設について表 11 にまとめる。



表 11 計測・制御開発に関する取組の担い手と施設について

項目	取組	担い手	既存施設(国内)	必要施設(国外または新規)
3) ①	ダイバータを含む炉心プラズマ、理論シミュレーション、計測器やアクチュエータの専門家で構成する計装・制御検討活動を強化すべきではないか。	JAEA 核融合炉システム研究グループ、先進プラズマ研究開発ユニット、プラズマ理論シミュレーショングループ、計測開発グループ NIFS 高温プラズマ物理研究系を中心に		
4) ①	原型炉に要求される計測器および運転制御シミュレータの開発を前記の炉心プラズマ研究計画と整合して位置付けることが必要ではないか。	JAEA 核融合炉システム研究グループ、先進プラズマ研究開発ユニット、プラズマ理論シミュレーショングループ、計測開発グループ NIFS 高温プラズマ物理研究系を中心に	JT-60SA LHD	ITER
4) ②	ガンマ線及び中性子による重照射試験施設の検討が必要ではないか。	JAEA 核融合炉システム研究グループ、先進プラズマ研究開発ユニット、プラズマ理論シミュレーショングループ、計測開発グループ、核融合中性子工学研究グループ NIFS 高温プラズマ物理研究系を中心に	JAEA FNS	放射線照射試験施設

#### 4. 炉設計活動の在り方について

- 炉設計活動に求められることは、21 世紀中葉までに核融合エネルギーの実用化の目処を得ることに照らして、商用炉までの唯一のステップである原型炉について、現在の技術知見の延長上に構想可能であり、かつ社会の要請を満足しうる概念を提示することにある。
- 核融合炉は既存のエネルギー生産システムとくらべてシステム構成及び機器構成が複雑なことから、エネルギー産業技術としての妥当性を確保する必要がある。特に、材料、製作、加工・組立精度、保守、検査、補修などに配慮した設計にするため、概念設計の初期段階から産業界の製造技術ポテンシャルを取り込み、原型炉技術基盤を構築することが不可欠と考えられる。
- 核融合エネルギーを実用化するためには、技術課題の解決によって原型炉建設を可能とする技術に集約するだけでなく、社会の要請・受容までを統合的視座に立って満足させうる炉設計が必要である。このためには、複合的な視点からを強化すると共に、これらの問題に造詣の深い有識者の叢知を集約することが必要ではないか。そのための人材交流と組織が必要ではないか。
- 炉設計は技術開発全体を統合的視座から結集してなされるものであることから、炉設計には個々の技術の目標設定と成熟度評価によって開発計画全体を管理し、新規の技術開発を提言することが求められるのではないか。
- 原型炉で経済性を見通しを示すためには、発電システムとしての信頼性（稼働率、計画外停止率など）を実証する運転実績を積むことに加えて、ブランケットモジュールまたはセクター規模の先進ブランケット試験（原型炉 TBM）を実施し高効率エネルギー利用へ向けた技術開発を行う必要があるのではないか。さらに、建設、運用に係る経済見通しだけでなく、廃炉および廃棄物処理に係るバックエンドコストの見通しも合わせて検討することが必要ではないか。
- 中間チェック・アンド・レビューまでの完成度について



実現性及び社会受容性に照らして妥当な原型炉の全体目標が策定され、炉設計ではシステム全体の整合性と実機製作の見通しを裏付ける技術検討が行われていることが必要ではないか。

- ・ 原型炉の全体目標の策定。
  - ・ 原型炉概念設計の基本設計。
  - ・ 炉心・炉工学への開発要請の提示。(運転シナリオ、構造材料、ダイバータ材料、ブランケット構成、保守方式)
- 上記の在り方を実行するため、原型炉設計と原型炉に必要な技術の研究開発計画の管理に全日本体制で取り組む炉設計活動組織を速やかに立ち上げる必要があるのではないか。

## 5. 海外の原型炉に向けた取組について

### (1) EU

- 欧州では、国際協力である ITER 計画と BA(幅広いアプローチ)計画の実施にあたる F4E と並んで、欧州委員会が参加国の代表的な機関となる 28 の研究所が協定を結び、連携と資源の共有をはかる欧州核融合開発協定 (EFDA) が核融合研究開発の推進母体であった。
- 核融合エネルギーの実現に向けて、道筋を明らかとし、研究資源の重点化を図るため、2012 年 11 月に「核融合電力 核融合エネルギー実現への工程」(Fusion Electricity, A roadmap to the realization of fusion energy) が EFDA によってまとめられた。野心的ではあるが、現実的な 2050 年までの核融合発電への行程表」と総括されている。
- この「ロードマップ」報告書に沿い、附属書、作業計画(Workplan)へと展開され、参加研究所がこの作業計画を担当することが EFDA からの資源配分の根拠となった。この新しい仕組みに対応すべく、EFDA は EUROfusion と呼ばれるコンソーシアムに 2014 年 1 月より再編された。
- ロードマップには 8 つのミッション(核融合発電炉のプラズマ運転領域、熱と粒子の排出、中性子耐性材料、トリチウムの自己充当能力と燃料サイクル、核融合の安全面の充足、統合された原型炉設計とシステム開発、電力コストの競争力、ヘリカル方式の開発)が定義され、それぞれのミッションは表題(Headline)に分解され、さらに作業計画(Workplan)へと展開されている。作業計画は 2014-2018 年と年限が決められている。
- ミッションとならんで、ロードマップを支持するための教育と訓練、基礎研究の機会、資源充足の枠組み、エネルギー源としての核融合の実現への産業界の取り込み、が項目としてあげられている。
- 原型炉の概念として、トカマク方式のパルス運転とヘリウム冷却ブランケットを基本の方向として考えている。

### (2) 韓国

- 2007 年 3 月に核融合エネルギー開発促進法を制定し、法的根拠のもとに研究開発を進めている。2012-2021 年を第 2 期とし、原型炉のためのコア技術開発を目的と定義している。中心は ITER 計画の完遂とそれによるコア技術の獲得と原型炉設計である。

- 原型炉は K-DEMO と呼ばれ、ITER 規模のコンパクトなトカマク炉を指向している。炉設計は 2015 年迄に準備概念設計を終え、2015 年から概念設計活動、2021 年に工学設計活動への移行評価を行う計画。

### (3) 中国

- 国の新エネルギー開発への強い政策的促進の一つとし、2011 年 3 月に国立磁場核融合炉統合設計グループが発足した。ここでは、核融合による発電実証を行う中国核融合工学試験炉を (CFETR: Chinese Fusion Engineering Test Reactor) 2025 年に稼働させるべく、2015 年までにその概念設計を終えることが求められている。
- 炉心プラズマは ITER よりも小規模であり、50-200 MW の核融合出力の実証を基盤に、定常運転、トリチウム増殖、交換保守などの工学試験を原型炉の前に行うという位置づけ。
- 2015 年に二つの提案をすべく、検討中。

### (4) 米国

- 米国においては、磁場核融合は科学研究とされており、それゆえ、ITER 以外には年次的な計画はない。
- 主な磁場核融合の研究機関の長による磁場核融合プログラムリーダーイニシアチブによって、ロードマップ作業グループが技術成熟度とギャップ分析を主とした検討を行っている。
- 原型炉の前に、ITER と同時期に核融合 (原子力) 科学施設 (FNSF: Fusion Nuclear Science Facility) が必要としている。炉心プラズマは極めて先進的あり、炉材料の研究開発を中心課題としている。

### (5) ロシア

- 核融合炉をこれまでの軽水炉、高速中性子炉にたつた原子力開発として定義。
- ITER 以後として、核融合中性子源、核融合・核分裂ハイブリッド炉を構想している。

### (6) インド

- 原型炉に向けた具体的な検討は後発である。

日本及び各国・極の計画のあらましを図 12 にまとめる。

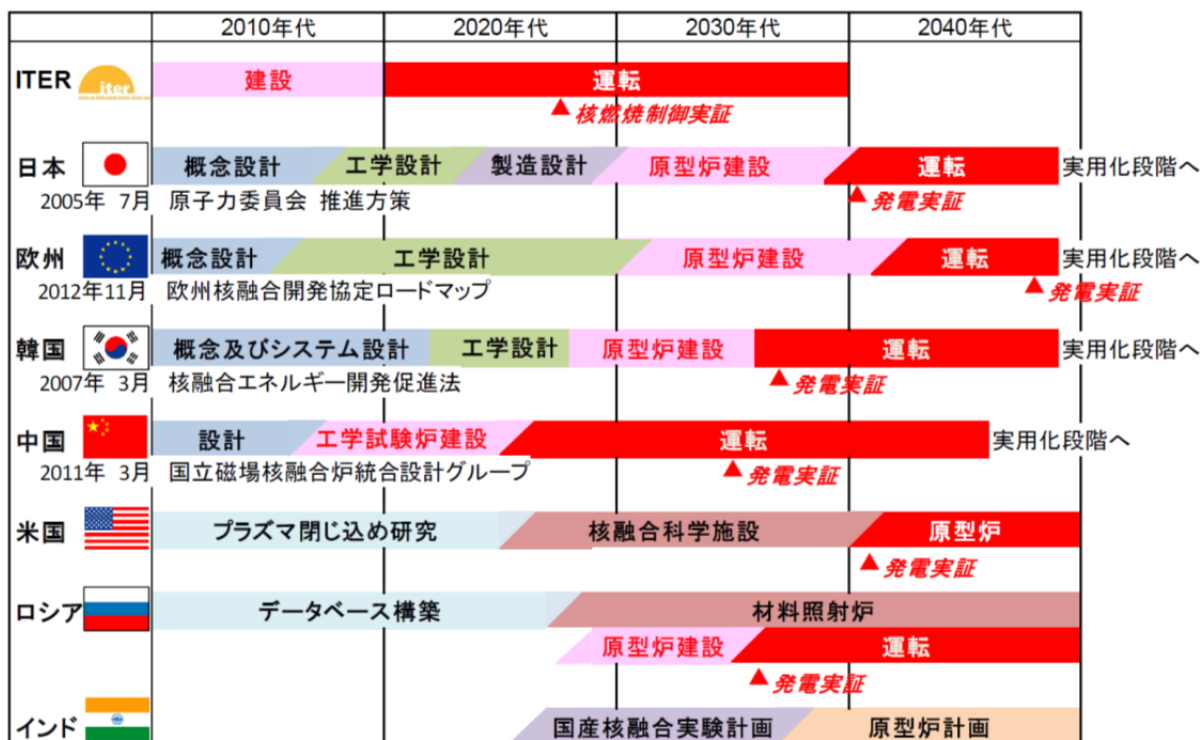


図 12 世界各国・極は 2040 年頃の発電実証を目指している

## 6. 次回報告に向けた合同コアチーム活動の今後の予定

- 検討の前提となる核融合原型炉概念が科学技術的にも社会的にも説得力をより持つよう考察を深める。この概念と構成要素の技術課題の整合を図る。
- チェック・アンド・レビュー項目を決定的な技術課題に照らして精査し、実施すべき活動とその目標の詳細化と具体的な数値を含めた判断基準の具体化を科学・技術的検討に基づいてはかる。
- 技術課題の構造分析から、統合的視座に立った時系列上の計画への展開を検討する。
- 本中間報告で述べられている課題の解決をはかるために、原型炉設計と原型炉に必要な技術の研究開発計画の管理に全日本体制で取り組む炉設計活動組織の在り方について検討をする。
- 我が国の核融合コミュニティの総意を踏まえた検討となるように、また、核融合作業部会における政策審議と研究開発の最前線が強くかつ迅速に連携できるようコミュニティとの対話を重ね、合同コアチーム活動のコミュニティへの浸透をはかる。
- 産業界との意見交換を進め、産業的健全性（industrial soundness）を核融合研究開発の中でどのように担保していくかについて検討する。例えば、3月26日に原子力産業協会と本中間報告について意見交換をする予定。
- 安全基準の在り方、その裏付けとなる安全研究について検討する。「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」および「放射性同位元素等による放射線障害の防止

に関する法律」に照らして、原型炉の許認可の手続きがどうあるべきかなどを検討する。

- 基礎から応用まで広く、関連分野の学会や産業界などセクター間の関係強化をはかる。
- 原型炉設計活動段階および建設段階に必要なコア人材の育成と、その育成に求められる人材ネットワークの形成の見通しについて、コミュニティや産業界からの意見を求める。