

原型炉開発に向けたアクションプランフォローアップ

第1回中間チェックアンドレビューに向けて

原型炉開発総合戦略タスクフォース

2021年1月27日

1. これまでの経緯

原型炉開発総合戦略タスクフォース(以下、「タスクフォース」という。)は、平成28年2月に、「原型炉開発に向けたアクションプラン」を取りまとめるとともに、その後のITER計画のスケジュール見直し等に伴いアクションプランの再検討を行い、平成29年12月18日開催の核融合科学技術委員会において、現時点におけるアクションプランとして承認を得た。

2. チェックアンドレビューに向けた進捗状況調査の必要性

(1)「核融合原型炉研究開発の推進に向けて」(平成29年12月18日 核融合科学技術委員会)においては、第1回中間チェックアンドレビュー(以下CR1)を2020年頃に、第2回C&R(以下CR2)を2025年から数年以内に行うこととされており、それらに向けて、アクションプランが着実に実施される必要がある。

(2)タスクフォースは、我が国の原型炉開発の司令塔として、アクションプランの実施状況について、オールジャパンの立場から把握する責任を有していることから、タスクフォースにおいてアクションプランの進捗状況を調査し、核融合科学技術委員会に報告することとする。

3. 本調査結果について

本資料は、CR1に向けての調査結果である。ただし、アクションプランは、2020年までで終わっているわけではなく、2035年頃の原型炉の建設を開始するところまで継続的に計画されている。したがって、今回の調査では、原型炉の建設段階に向けて進めるアクションプランとして、どう評価できるかも重視した。すなわち、現時点までの達成度で順調と評価される場合も、今後に新たなアクションの必要性が予測できる場合には、CR1で原型炉開発の推進を承認された後の意味で、「CR1後」と明記の上、それを指摘してある。

現時点までの達成度の評価においては、一部に課題は残るものの、おおむね順調に推移している。本フォローアップ結果を踏まえつつ、CR1を実施することを期待したい。

ただし、CR1後については、多くの必要なアクションが指摘されている。こうしたアクションのためには、2022年以降に本格化させる必要がある核融合実験炉 ITER(イーター)の運転に向けた機器開発の経験を活用していくことが不可欠である。将来の原型炉開発に生かしていく上でも、ITER向けに日本が調達責任を負う機器について開発を加速することは急務と言える。これらアクション全体を俯瞰的に見ると、人材や資金面での十分なリソースを確保した上での開発体制の充実が必要なのは言うまでもない。リソース配分の優先順位を議論すること、ITER、BAで得られた知見を最大限

活用していくこと、産業界との更なる協調に関する議論を深めることなどは重要な課題と言える。

CR1後は、原型炉の建設と運用という大事業に向けて日本国内のステークホルダー一間の議論を醸成する体制の構築と、原型炉建設を担い得るように開発体制を発展させることが、非常に重要になってくるものと予想される。この点は、CR1後の大きな課題であることを指摘しておく。

4. 進捗状況の概要

以下に、本調査の課題別の進捗状況の概要を示す。なお、進捗の記載で「CR1 後」とあるのは、「CR1 において開発の推進を承認された後」の意味に使われている。

0. 炉設計

CR1 までに完了予定のアクションはほとんど達成されており、進捗は順調と判断できる。CR1 以降、原型炉 TBM に向けた先進 BLK の成立性検討が必要であるが、NIFS や大学が参画するなど作業加速の下地ができています。

1. 超伝導コイル

CR1 までの要完了事項は概ね対応したと判断できる。結果として立案された概念基本設計は、ITER 方式をベースとしているものの同一品ではないため、CR1 後に試作・試験による検証は必須である。また、コスト低減案を織り込む場合には、ITER 方式(RP 方式)とコスト低減比の評価と合わせて、ITER には無い耐放射線絶縁材の検討等、新たな知見が必要となるため、CR1 後に試験装置まで含めた R&D 全体の予算計画を立てる必要があると考えられる。

2. ブランケット

CR1 に向け、固体増殖・水冷却 BLK については、原型炉 BLK の概念基本設計としてはおおよその見通しは得られた。ITER-TBM については、製作性設計検討を開始した。BLK 工学試験棟が着工され、導入される安全性試験装置群の設計は順調であり、導入後に速やかなデータ取得が求められる。T 工学試験については ITER の T 除去系の設計は順調に進捗しているが、大型 T 取扱施設については設計検討に着手したところであり、CR1 後の加速が必要である。先進 BLK については、設計検討や基礎データ取得などに着手されてはいるが、体制構築含めた加速が CR1 後に必要。

3. ダイバータ

原型炉の初期フェーズで W/銅合金水冷却 DIV を選択するのであれば、デタッチメントプラズマの実時間制御は不可欠な要素である。デタッチメントプラズマの素過

程の理解とそれに基づく制御シナリオの確立を目指した研究開発が、CR1 に向けて着実に進歩している。一方で、最終的な目標達成には、多くの項目で CR1 後の長期的な加速が必要である。また、「DIV 級定常高密度プラズマ実験装置」やホットラボに設置する「中性子照射材料・機器の熱負荷試験装置」に関しては、CR1 後、今後の研究進展を見ながら展開を判断していく必要がある。

4. 加熱・電流駆動システム

ITER、JT60-SA に向けて QST が担当する課題に関しては ECH、NBI とも CR1 に向けて順調に進捗している。CR1 後については、2022 年以降に本格化させる必要がある ITER 核融合運转向けの機器開発の経験を活用していくことが不可欠である。欧州担当の ITER NBI の RF 負イオン源開発に関して高出力・長パルスの観点で克服すべき問題が発生しているが、NIFS を交えた国際共同研究による解決が図られている。またメンテナンスレスセシウムフリー負イオン源開発は NIFS も交え大学での基礎研究が進められており、高信頼性に関する NBI の課題に取り組む国内体制が構築されつつあり、CR1 後も推進する必要がある。高信頼性に関する ECH の課題は、ジャイロトロン周波数可変、高周波数帯域における大電力化、ミラーレスアンテナの設計に関しては進捗がある。しかし、ITER、JT60-SA に向けた計画に直接取り込まれていない高速周波数切替・高効率運転・完全連続運転・アンテナ保守・伝送系に関する設計や開発は国内の取り組み体制を早急に構築し CR1 後の進捗を加速させる必要がある。

5. 理論・シミュレーション

原型炉設計合同特別チーム(以下、特別チーム)理論シミュレーション WG 等における 2025 年頃までの開発・利用計画の議論・提示を踏まえつつ、アクションプランの進捗は全般的に堅調であり CR1 に向けて成果が出ているが、加速が必要な項目もある。特に、DIV シミュレーションコード(SMC)の JT-60SA、ITER 実験への適用、検証及び継続開発、炉心プラズマ統合 SMC の JT-60SA、ITER 実験への適用、検証及び継続開発、及びディスラプション・核燃焼プラズマ・乱流輸送・プラズマエッジ第 1 原理系 SMC の継続開発・利用は、CR2 までの C&R 項目の達成と強くリンクしており、今後、さらに重点化していかないと CR1 後の進捗が遅れる可能性があり、対策が必要と考える。

6. 炉心プラズマ

CR1 までに完了すべきアクションについては、概ね順調であることを確認できた。特に、「JT-60SA 研究計画」や「JT-60SA ファーストプラズマ」のアクションは極めて順調である。粒子制御技術については、CR1 後も高度化に向けた取組が必要であ

る。また、モデリング/シミュレーション研究には計算機資源の継続的な確保も必要である。

7. 燃料システム

CR1 までに完了すべきアクションについては、全て完了していることを確認できた。CR1 後、新たな課題が顕在化した「燃料循環システム要素技術(不純物除去、同位体分離など)の開発」、規模拡大が必要な「パイロットプラント規模での Li 確保技術確立」、「 ${}^6\text{Li}$ 濃縮基盤技術開発」のアクションには支援が必要である。

8. 核融合炉材料と規格・基準

(1)ブランケット構造材料

CR1 に向け、低放射化フェライト鋼に関しては、大量製造技術の確立や関連する要素技術開発など極めて順調であると言えるが、コールド試験設備を用いた腐食実験データベースの拡充、照射効果に関するデータ取得や照射による劣化モデルや関連する規格基準の構築などについては、照射場の確保を含めて、CR1 後に加速が必要な状況である。

(2)その他材料

先進 BLK 材料については、利用方法やデータベースの構築について NIFS や大学の協力を得つつ検討が始まっている。CR1 後は、この項目に加え、DIV 材料や計測・制御機能材料について、照射場を確保しつつ照射効果関連の評価を行う必要がある。

(3)核融合中性子源

核融合中性子源の概念設計に関しては、極めて順調に進捗しており、CR1 後に工学設計を加速するために、大学や他機関等との連携を深めることが必要である。また、核融合中性子源の価値の発信についても CR1 後に強化する必要がある。

9. 安全性

安全に関する活動については日欧協力も活用し順調に推移している。安全性解析・評価に関しても特別チームにおいて基本的なコードの整備が行われている。特別チームにおいては、若手人材を確保し技術伝承にも取り組んでいる。CR1 後、将来の工学設計において無駄が出ないよう、安全規制についても早目にその考え方の検討を進めておく必要がある。

10. 稼働率と保守

CR1 に向けた 2019 年までの基本概念設計は要求条件をおおむね満足している

と判断している。一方、2020 年からの概念設計は、基本概念設計の中から抽出された技術課題(DIV やバックプレートの再利用構造、ホットセル機器など)に検討を加え、炉構造と遠隔保守機器の設計統合を 2024 年までに行う必要があり、CR1 後は加速が必要であると判断した。

11. 計測・制御

本項目内のアクションは主に3つに分類でき、①制御パラメータに対する理論的な検討、②計測手法・装置の設計検討、③ITER・JT-60SA を利用した理論・計測手法・制御ロジックの検証である。いずれのアクションについても、CR1 までに完了すべき事項を順調に達成している。しかしながら、CR2にむけて完了すべきアクションについては、検討項目が増えるとともに詳細化されるので、現在の体制では遅れが生じる恐れがある。また、照射試験のアクション完了には、中性子源による照射が必須である。

12. 社会連携

アウトリーチ HQ が設置され、具体的に社会連携活動に着手している。

13. ヘリカル

プラズマ実験、炉工学・炉設計、数値実験炉の各課題について、概ね順調に進展しており、トラス系に関する理解が進んでいる。今後は、LHD を用いたプラズマ実験の、炉設計や数値実験炉への反映や連携の強化により、信頼性の高い炉設計や、精度の高いシミュレーションモデルの構築が求められる。

14. レーザー

パワーレーザー及びレーザー方式で培った技術を原型炉開発に活用する研究が着実に増加している点が評価でき、CR1 に向けてはおおむね順調である。原型炉開発共同研究の一環として、大学としては最大規模の T 取扱施設を利用した固体 DT の物性評価の研究が、計画より遅れたものの、開始されたことは注目に値する。また、複数の研究成果が、原型炉開発や核融合エネルギー開発を最終目標としていない研究のバイプロダクトであることは特筆すべきである。

課題名: 0. 炉設計

CR1までに完了予定のアクションはほとんど達成されており、進捗は順調と判断できる。CR1以降、原型炉TBMに向けた先進BLKの成立性検討が必要であるが、NIFSや大学が参画するなど作業加速の下地ができている。

報告日: 令和2年12月15日

小課題名	アクション	期限	CR1までの要完了事項	実施期待機関	進捗状況	CR1への進捗度	進捗状況の評価	課題達成のために必要な措置
炉概念と建設計画	物理・工学ガイドライン	19	※	特	原型炉のパラメータを決めるための基本となる物理・工学の基準値と設定理由を共有するためのガイドラインとして設計根拠集を整備。今後も設計検討結果を随時反映する。	順調	設計根拠集として整備が行われた。CR1後も継続的改定が必要。	
	基本概念設計	19	※	特	既存技術からの飛躍を最小限に各主要コンポーネント(BLK、DIV、VV、SC等)及びプラント設備仕様の明確化を行い、その成果のプレス発表を実施。トカマク核融合炉設計システムコードTPCを改良。	極めて順調	レファレンスとしてのパラメータは決定したが、CR1後は、コストの解析や今後のJT-60SAの進展等により改良していく。	
	概念設計	26		特/産	開始に向け準備中		CR1後は概念設計を裏付けるための炉設計R&Dを並行して実施する必要がある。	
	燃料サイクル戦略	26		特/TF	特) 初期装荷T入手法を検討中。燃料サイクルシステム設計についても検討中。 TF) 日本の戦略として、7: 燃料システムとの整合性にも配慮しつつ進めている。		CR1に向けての進展は順調。26年に向けて進展中。DDスタートと高温ガス炉等での製造が検討されている。	
	統合シミュレータ	26		Q/N/大/特	Q)平衡制御シミュレータMECSの開発を進め、3次元渦電流を考慮するように改良を実施。機械学習を用いたPID制御手法を開発中。DIV、ディスラプション関連も開発中。 N/大/特)上記に協力		CR1に向けては順調。 CR1後は全体統合へ向け取り組みが必要	
	コスト評価	31		特/産	特/N)システムコードレベルのコスト評価モデルを改良。物量コスト/製作コストの分離、ITERに無い発電所としての機器も含めたモデル構築を実施。建設コストを概算。 産)プラントモデルの構築に寄与		CR1に向けては順調。 産業界と連携して検討を進めている。	コスト積算の詳細化には、さらなる産業界との連携強化が必要。
機器設計	SC概念の基本設計	19	※	特/Q	特)ITER方式に基づき、低温構造材の設計耐力の向上を前提とした基本概念を検討を実施。コスト低減のためITER以外の方式(ラジアルプレートを使わない方式)の概念検討を実施 Q)特と協力	極めて順調	基本設計は無事完了し、次に進むことができる。	
	原型炉TBM目標	19	※	特/Q	特/Q)共同研究にて、先進BLKの概念を検討し、原型炉TBMとしての目標の目途を得た。	順調	CR1に向けての成果は十分である。 CR1後に向けて、今ある概念を比べるだけでなく、原型炉TBM用として判断条件と制約条件が必要。N・大の参画が始まっていることから、CR1後の大きな進展が期待できる。	CR1後には、原型炉TBMの合理的な目標設定のための先進BLKの技術的成立性の検討を進める。
	BOPを含む機器構成案	19	※	特/産	特/産)主熱輸送系(1次系、タービン系)、電源系の概念素案を構築した。	極めて順調	核融合特有のプラントシステムについて検討が進んだ。	CR1後のBOP概念設計でも継続的な産業界の協力が必要。
	安全確保方針案	19	※	特/産	特/産) 深層防護の適用、多重障壁による防護、基本安全機能の達成の方針に沿って、安全解析による影響度分析や影響緩和・防止方策案の評価を実施。	順調	CR1に向けては十分な成果と判断した。	

	安全要求・解析・評価	31		特	開始に向け準備中		これまでの検討結果に基づき安全要求項目の整理が開始されている。	
安全確保指針	原型炉プラントの安全上の 特徴整理	26		特/産	特) 安全解析による影響度分析、事故事象の防止と緩和方 策案の評価に着手した。		真空容器内の安全にかかわる物質のソースターム 評価精度の向上を目指し、大学にデータ取得を委 託しており、順調に滑り出した。	
	安全規制法令予備検討	26		TF/特	特) 国内外の原子力規制等を参考に、核融合建設にあつ てどのような法規制が適切かについて検討を進めている。		CR1後、将来の工学設計において無駄が出ないよ う、早め検討を進めていく必要がある。	
物理・工学・材料DB	原型炉物理DB 工学・材料DB	26		Q/大/F/特	Q) 様々なトカマクの物理DBにJT-60SA及びITERのデー タを加えることで対応予定。 材料DBについては、300、400、550°Cの疲労データ及び板 材衝撃特性の異方性に関するデータを拡充。今後特性の 確率関数を与えるだけのデータ整備を進める。 大) 共同研究で材料DBに参加 F) 核融合エネルギーフォーラムにおけるクラスター活動 を通して、DB作成を支援。 特) とりまとめを予定		確率分布に基づく構造健全性の確保手法は日本 独自のアイデア。 合理的な手法であるため世界標準になる可能性が あり、今後に期待できる。	

課題名: 1. 超伝導コイル

CR1までの要完了事項は概ね対応したと判断できる。結果として立案された概念基本設計は、ITER方式をベースとしているものの同一品ではないため、CR1後に試作・試験による検証は必須である。また、コスト低減案を織り込む場合には、ITER方式(RP方式)とのコスト低減比の評価と合わせて、ITERには無い耐放射線絶縁材の検討等、新たな知見が必要となるため、CR1後に試験装置まで含めたR&D全体の予算計画を立てる必要があると考えられる。

報告日: 令和2年12月15日

小課題名	アクション	期限	CR1までの要完了事項	実施期待機関	進捗状況	CR1への進捗度	進捗状況の評価	課題達成のために必要な措置
SC設計	SC概念基本設計	19	※	特/Q/産	ITERからの技術的飛躍を最小とすることを基本方針とし、WG活動により国内の専門家の意見を集約。ITER同様のNb3Snケーブルインコンジット導体を用いたラジアルプレート(RP)方式を基本概念として立案。 産業界からの要望に沿い、製作簡略化(コスト低減)に向けた検討も並行実施、以下の見通しを得た。 ①誤差磁場補正コイルを使用し、TFコイルの製作精度をITERの2-4倍に緩和可能。 ②矩形導体方式に長方形ジャケットを採用することにより、導体絶縁材の剪断応力を大幅に低減可能。	順調	ITER方式を採用した一つ概念基本設計を立案し、設計パラメータを決定した。並行してコスト低減策も検討を進められた。SC概念設計に引き継がれる。	
	SC概念設計	26		特/Q/産	コスト低減に向けたオプション検討の更なる深掘りとして、'20年度は、矩形導体レイヤー巻き方式の検討とRP方式を基準としたコスト評価を開始。		SC概念基本設計で行ったコスト低減策のブラッシュアップと合わせて、SC概念基本設計案に関するR&Dを行う必要がある。	
	SC線材検討・主案選定	19	※	特/Q/N/物/大	主案であるNb3Sn素線は、導体内歪値によっては成立しない恐れがあったが、ITER-CSインサートコイル試験結果からの外挿により、ITER-CS導体並の短ピッチ燃線導体であれば成立する見通しを得た。	順調	Nb3Sn素線を主案として選定。SC導体概念設計に引き継がれる。	
	SC導体概念設計	26		特/Q/N	20年度は、'19年度までの項目との連続性を持ちつつ、撚り線構造など導体設計の詳細化に着手。 (21年度より、「導体電流劣化機構の解明」に関する共同研究テーマを実施予定)		前アクションで選定したNb3Snに対し、SC導体設計の詳細化と、R&Dにより導体成立性の検証を行う必要がある。	
	R&D計画の策定	19	※	特/Q/大/産	概念基本設計により立案したSCコイルに対し、下記のR&Dが必須であることを提案。 【SC導体の成立性検証のため】 ①短ピッチ燃線の施工性を、導体試作により確認 ②導体性能はあくまで外挿値を用いてのものであるため、試作した導体の実測が必要 【コイル仕様(磁場強度)実現のため】 ③極低温構造材料の高強度化	順調	矩形導体方式を採用する場合には、そのためのR&D計画が必要。	導体試作には、線材メーカーの設備の再立ち上げも考慮する必要あり。
SC導体・コイル試験	SC導体試験設備検討	19	※	Q/N/特	既存試験設備は外部磁場12-13Tが上限であるため、使用条件である14T以上のSC特性評価のためには、新たな高磁場・大型SC試験設備の整備が必要であることを提案。	順調	SC導体試験設備に引き継がれる	
	SC導体試験設備	26		Q/N/特	'20年度は、「SC導体概念設計(20→26)」および「SC導体試験(20→33)」と合わせて、試験内容の詳細について検討を開始。		CR1後には以下に対する加速が必要。 ・具体的な試験装置の仕様 ・導体試作、モデルコイル製作 → 導体試験装置への活用 といった、R&Dと試験設備の全体計画の立案。	
	SC導体試験	33		Q/N/産	'20年度は、「SC導体概念設計(20→26)」および「SC導体試験設備(20→26)」と合わせて、導体試作・試験内容の詳細について検討を開始。		CR1後には以下に対する加速が必要。 ・Nb3Sn素線の電磁力による性能低下を正しく評価する導体試験方法の検討	

高強度構造材料・耐放射線絶縁材料	高強度構造材料検討	19	※	Q/物/特	ITERより高強度(4K:0.2%耐力1,200MPa以上)の高強度構造材を'20年度以降に本格開発すべく、準備を実施。 ・開発目標設定と開発体制構築 ・開発に向けた既存材料の特性評価試験、新材料の試作開始 ・JSME規格化に向けた準備	順調		
	高強度構造材料試作・試験	33		Q/産/特	'20年度は、新材料の試作および特性評価試験を実施中		CR1後は、スムーズな本格開発立ち上げが重要。	
	耐放射線絶縁材検討	19	※	Q/特	国内専門家によるWG活動にて、特に矩形導体方式採用を念頭に置いた耐放射線絶縁材の高強度化の要求仕様と実現可能性を検討。	順調		
	耐放射線絶縁材試作・試験	33		Q/産/特	'20年度より共同研究にて「原型炉に向けた絶縁材の設計基準策定」の検討を開始		CR1後は、スムーズな本格開発立ち上げが重要。	
関連BOP (冷却系、コイル電源)	冷却系、コイル電源概念基本設計	19	※	特/Q	ITERの設計・知見をベースに下記の概念基本設計を実施。 ・冷却系:冷凍能力と必要消費電力を試算 ・コイル電源系:プラントシステム設計の一環で、パルス運転の対応も考慮した電源構成を検討。	順調		
	冷却系、コイル電源概念設計	26		Q/特	'20年度は、'19年度までの項目との連続性を持ちつつ、概念設計としてITERをベースに次段階の検討を開始。		CR1後、設計を詳細化するとともに、合理化の検討も必要。	

課題名 2. ブランケット

CR1に向け、固体増殖・水冷却BLKについては、原型炉BLKの概念基本設計としてはおおよその見通しは得られた。ITER-TBMについては、製作性設計検討を開始した。BLK工学試験棟が着工され、導入される安全性試験装置群の設計は順調であり、導入後に速やかなデータ取得が求められる。T工学試験についてはITERのT除去系の設計は順調に進捗しているが、大型T取扱施設については設計検討に着手したところであり、CR1後の加速が必要である。先進BLKについては、設計検討や基礎データ取得などに着手されてはいるが、体制構築含めた加速がCR1後に必要。

報告日：令和2年12月15日

小課題名	アクション	期限	CR1までの要完了事項	実施期待機関	進捗状況	CR1への進捗度	進捗状況の評価	課題達成のために必要な措置
固体増殖・水冷却BLK	基礎・標準データベースの構築	35		Q/特	BA活動およびITER-TBM開発において、設計に必要な材料特性データベースの蓄積、及び標準化に向けた作業を実施中。		材料特性データベースの蓄積作業は着実に進んでいるが、設計評価に要するデータベース(故障率DB等)の蓄積は方針の検討を含め加速する必要がある。	実環境対応データを含めた、設計対応データベース整備に向けた措置が必要である。
	原型炉BLKシステムの概念基本設計	19	※	特/Q/産	ハニカムリブ付き箱型BLKにおいて、一通りの概念基本設計を完了。	順調	概念基本設計としてはおおよその見通しは得られた。	
	原型炉BLKシステムの概念設計	26		特/Q/産	原型炉BLKの簡素化を目指し、耐圧性、製作性に有利な円筒形状を採用した筐体案の検討を開始。T増殖性能の最適化、熱輸送解析の評価に着手		原型炉BLKに対する設計要求条件を整理するとともに、構造材料・機能材料の信頼度と使用限界を明確化し、稼働率を含む目標性能達成にむけた課題整理を進める必要がある。	実験炉ITER-TBMの設計グループおよび国内製造メーカーとの積極的且つ継続的関与が必須である。
	ITER-TBM製作実績	35		Q	F82Hを部材とする製作性検討については、溶接性検討も含めた予備的検討が進んでいる。本格的な製作性設計検討については2021年度から具体的に着手する予定。		製作性の観点での設計検討を加速し、ITER機構の設計承認を着実に達成していく必要がある。	国内製造メーカーの積極的且つ継続的関与が必須である。
	TBSと補完試験装置の設計と試験計画、及びコールド試験施設によるデータ取得	21		Q	量研六ヶ所核融合研究所においてBLK工学試験棟建設が開始され、2021年3月に竣工予定。導入される安全性評価試験装置群についても設計はほぼ完了し、2022年前半には整備が完了する予定。	順調	CR1に向け、建屋および装置整備は順調に進捗しているが、データ取得は2022年以降となる。最終設計承認にむけた設計活動と平行して実施することになる。	BLK工学試験棟施設を利用した研究活動を軸とする国内協力体制の確立が必要。
	T工学試験の計画と設備設計	21		Q	ITER-T除去系の設計は順調に進捗しており、2025年度までに最終設計が完了する予定。特別チーム T諸課題検討WGにおいて、大型T取扱施設設計検討に着手	順調	CR1に向け、ITERのT除去系の設計は順調である。ただし、原型炉に向けた大型T取扱施設概念設計はCR1後の加速が必要。	T諸課題検討WGでの検討活動を加速する必要がある。
先進BLK	原型炉TBMのための先進BLK概念検討と素案提示	26		特/N/大	QST共同研究にて、原型炉内条件の整理を行い、液体金属自己冷却BLKの磁場下熱流動計算に着手。		引き続き原型炉条件における第一壁除熱設計の成立性評価を急ぎ、冷却方式の比較検討を進める必要がある。	構造解析の連成等、数値計算の高度化を進める。
	小型試験体製作、機能・特性試験	26		N/大	NIFS共同研究にて、MHD圧力損低減技術、配管異材接合部の材料共存性、液体増殖/冷却材の純化技術についての試験を開始。		先進BLK概念検討において、技術・材料選択、設計条件設定の根拠となる実験データの取得が開始された。	取得データの概念検討へのフィードバック。概念設計検討の進捗を反映した今後の試験項目の設定。
	実環境相当の統合循環ループ試験	31		N/大	NIFS・液体金属/熔融塩統合循環ループ装置 Oroshhi-2を用い、磁場下熱流動特性評価、水素同位体回収技術試験等が進行中。		ループ装置での試験方法改良等により実験コスト低減、実施サイクルの短縮、実施課題数の増加を図る必要がある。	

原型炉の初期フェーズでW/銅合金水冷却DIVを選択するのであれば、デタッチメントプラズマの実時間制御は不可欠な要素である。デタッチメントプラズマの素過程の理解とそれに基づく制御シナリオの確立を目指した研究開発が、CR1に向け着実に進歩している。一方で、最終的な目標達成には、多くの項目でCR1後の長期的な加速が必要である。また、「DIV級定常高密度プラズマ実験装置」やホットラボに設置する「中性子照射材料・機器の熱負荷試験装置」に関しては、CR1後、今後の研究進展を見ながら展開を判断していく必要がある。

小課題名	アクション	期限	CR1までの要完了事項	実施期待機関	進捗状況	CR1への進捗度	進捗状況の評価	課題達成のために必要な措置
DIV開発目標の整合性確認と炉設計への適用	W水冷却DIV機器の原型炉適用性の判断	26		特/Q/N/大	(特) ITERベースによるDIV概念の構築を実施中(原型炉DIV設計の現状を特別チーム原型炉設計報告書に記載) (Q) BA原型炉設計活動において共通課題の比較検討を実施中(BA・DDA最終報告書に記載)		高熱負荷ターゲット部にW/銅合金が使用可能ならば、ITERと同等な技術で対応可能である。ただし、W/銅合金が使用できない場合やデタッチメントによる放射割合が達成できない場合は、今後の再検討が必要となる。	ITERDIVの妥当性を実機で確認する。
	先進DIVの評価と開発推進の判断	19	※	特/Q/N/大	(特) 先進磁場DIV設計に関する物理・工学課題の検討は完了。プラズマ平衡形状制御およびTFC & PFCの強化設計・設置に影響が及ぶ。また熱・粒子負荷低減などの利点が予想されるが、物理モデルの原型炉への外挿性は不十分。 (Q) 先進磁場DIV設計に関する物理・工学課題の検討をBA原型炉設計活動において実施(BA・DDA最終報告書に記載) (大/N) 先進冷却DIVについては、日米科学技術協力事業核融合分野プロジェクト研究PHENIX計画のもと、ジョージア工科大学の高温高圧Heループを用いた熱伝達試験を行い、Heガス衝突噴流冷却による熱伝達メカニズムと課題を明らかにした。	順調	CR1後、DEMOの初期DIV以降のためには、先進冷却DIVの継続的な検討が必要。	
	中性子照射材料・機器の熱負荷試験装置の開発とコールド試験	26		Q/N/大/特	(Q) コールド試験装置: 現在使用可能なJEBIS(那珂研)は主にITERのDIV開発に使用。原型炉のターゲット(W・銅合金配管、W・フェライト鋼配管)の製作・試験R&Dは未着手(予算と人手なし)。 (Q) ホットラボの高熱負荷試験装置に関する検討は未着手。 (大) 日米共同研究で中性子照射W中のT挙動を評価。高温中性子照射についても進捗中		ホットラボでの高負荷試験装置の計画や設計を組み込むためCR2後に具体的な進展が必要。	
プラズマ運転シナリオ	DIVプラズマシミュレーション開発	26		Q/特/N/大	(Q/特) 理論シミュレーションWGにて、開発計画と提案を策定。原型炉プラズマ設計の熱排出シナリオを設定し、SONICによる定常運転時のDIV運転条件(領域)を検討中(原型炉DIV設計の現状を特別チーム原型炉設計報告書に記載)。DIV物理検討WGを設定して優先研究課題を検討し、その提案に基づき非接触DIVモデルの改善を検討中。SONICの多種不純物化は完了した。SONIC-SOLPSコード間のベンチマークを準備中(JT-60SAおよび原型炉)。JT-60Uでのベンチマークは過去に実施済(各種モデルの改善後に再度実施する)。 (大) ディスラプション等の非定常熱負荷印加時の蒸気遮蔽効果について、PICシミュレーションの開発と、SONICとの結合を実施中 (大) 流体コード(LINDA)、衝突輻射コード、中性粒子輸送コードを結合したプラズマデタッチメントシミュレーションの高精密化と実験との比較研究を実施中。 (大/N/Q) 3次元流体コード(EMC3-EIRENE)を用いてJT-60SAのDIVプラズマの摂動磁場による3次元構造変化の解析を実施中。		シミュレーションコードの開発と非接触プラズマモデルの改善は進められているが、その妥当性の検証は不十分。日本でのシミュレーション開発とともに精度の高い予測のためには類似シミュレーション間での比較と実験による検証が必要である。設計に必要な優先順位を考える必要がある。	実験結果を用いてシミュレーションモデルの検証を行い、シミュレーションコード開発に反映する。
	DIV級定常高密度プラズマ実験装置の開発と実験	26		Q/N/大/C3	(特) DIV物理検討グループを設置して位置付けと目標を検討。共同研究などによる設計や実験への寄与は可能。 (C3) 原型炉DIV級定常高密度プラズマ装置の実現に向けて必要となる外挿性の高いデータベースを得ることを目標として、新たな装置(パイロット装置: Pilot GAMMA PDX-SC)の建設に着手した。 (C3) GAMMA10/PDXの開放端磁場配位を活用したDIV模擬実験において、高温プラズマを用いた非接触プラズマ生成・制御実験とモデル(LINDA、B2-EIRENE、中性粒子輸送)検証・開発を進めることにより、パイロット装置設計に資するプラズマ加熱手法や高密度プラズマ生成に関わる予備的な実験を引続き行っている。		パイロット装置建設に関しては、年次計画に基づき準備が進められている。一方、DIV級定常高密度装置については、必要とするプラズマのパラメータ等は検討されているものの、具体的な設計・建設計画は進んでいない。	
	デタッチメントプラズマの実時間制御法の開発	26		Q/N/大	(Q) 時間発展対応のSONICを開発中(JT-60SADIVでの接触・非接触遷移を計算開始)。開発を進めると共にプラズマと不純物輸送プロセスを検証中。JT-60SAの実際のプラズマと不純物で検証予定。 (N/大) 直線型装置を用いた熱パルスに対するデタッチメントプラズマの動的応答過程の実験研究とモデリングを実施中。		デタッチメントプラズマの実時間制御は不可欠な要素であり、現状のままでは不十分である。現状設計しているDIVでの非接触プラズマ制御が可能であることを、シミュレーションとITER・JT-60SA等による実験を組み合わせ示していくことが必要。	JT-60SAの実験開始を待たず、他の実験装置やシミュレーションを通して、早急の実施する必要がある。

	ITER/JT-60SAにおけるデタッチメントプラズマの制御手法の実証	35		Q/N/大	開始に向け準備中。			
	ITER, JT-60SAにおけるDIVシステムの最適化	35		Q/N/大	開始に向け準備中。			
材料・機器開発	DIV機器構成材料の中性子照射影響	35		Q/N/大	(Q)構造材F82Hの疲労データ及び板材衝撃特性の異方性に関するデータを拡充。今後、特性の確率関数を得るに十分なデータ整備を進めている。 対向材Wのうち、ベースライン純Wの材料特性ハンドブック整備に着手。また、摩擦攪拌プロセスを用いた被覆・表面改質技術の開発に着手(中性子照射試験を予定)。 ヒートシンク銅合金(CuCrZr)材料の5pda(照射温度100~350°C)までの照射試験を完了、照射後試験の準備を開始。 (大/N)日米科学技術協力事業核融合分野プロジェクト研究PHENIX計画のもと、米国研究炉HFIRを用いたWおよびW合金の大規模な中性子照射(500、800、1100°C、1 dpa、熱中性子遮蔽)を完了し、照射後試験を開始した。今後、熱伝導度、耐熱負荷特性、機械的特性、微細組織、水素同位体蓄積などに関するデータベースを取得する。 (大/N)東北大学金属材料研究所附属量子エネルギー材料科学国際研究センター共同研究および核融合科学研究所ネットワーク型共同研究(直線型プラズマ照射装置CDPSの整備)により、ベルギーの研究炉BR2炉を用いてWおよびW合金の中性子照射を行い、照射後の重水素の拡散および捕獲を実験的に明らかにするとともに、水素同位体挙動を予測するモデルの精度向上をはかった。 (大)低放射化フェライト鋼、CuCrZr合金、酸化物分散強化Cu合金について重イオン照射試験を行い、水素同位体捕獲に及ぼす照射欠陥の影響を系統的に明らかにした。 (大)日米共同研究、東北大共同研究で実施中。米国HFIRやベルギーBR2炉で中性子照射を実施中。		米国HFIRやベルギーBR2を用いて、着実に研究が進められている。引き続き、データベース拡充を加速する必要がある。 材料開発とともに実際の対向機器形状での熱負荷試験、対向機器への設計の課題等の検討が必要。 ホットラボでの高負荷試験装置の計画や設計を組み込む必要がある。	
	DIV機器の保全や補修技術の評価と開発	26		特/Q/大/産	(特・Q)原型炉DIVおよびカセットの遠隔保守方式、冷却手法と構造を検討中(原型炉DIV設計の現状を特別チーム原型炉設計報告書に記載)。 原型炉での検査及び補修方法の検討は未着手。ITERでの検査及び補修方法の情報の入手から開始予定。 (大)レーザー誘起超音波による表面損傷のその場観察法を開発中		定期的な保守のみならず、様々なイベント時を想定した補修技術の検討が不十分。	早急に実施責任者を決めて、検討を進める必要がある。
粒子制御	炉内粒子挙動シミュレーションコード	35		Q/N/大/特	(特・Q)共同研究と委託研究で、実験装置の容器内での水素同位体の挙動モデル検討と対向材の蓄積特性の研究を実施中。		粒子バランスは、燃焼制御のみならず、デタッチメントプラズマの制御にも依存するため、現時点で詳細な検討を進めるのは難しいが、その重要性を鑑みて継続的な見当が必要。	
	原型炉で使用可能な排気システムの検討	26		特/Q/N/産	(特)原型炉DIVにおけるTMPによる排気設計評価を候補例として検討(サブDIVで2Pa以上、各ポート外に5.5m ³ /s程度ポンプが1-2台程度必要)。		DIVにおける粒子排気は最も重要な機能であるので、CR1後も遅れなく進める必要がある。	

課題名

4. 加熱・電流駆動システム

ITER、JT60-SAに向けてQSTが担当する課題に関してはECH、NBIともCR1に向けて順調に進捗している。CR1後については、2022年以降に本格化させる必要があるITER核融合運轉向けの機器開発の経験を活用していくことが不可欠である。欧州担当のITER NBIのRF負イオン源開発に関して高出力・長パルスの観点で克服すべき問題が発生しているが、NIFSを交えた国際共同研究による解決が図られている。またメンテナンスレスセシウムフリー負イオン源開発はNIFSも交え大学での基礎研究が進められており、高信頼性に関するNBIの課題に取り組む国内体制が構築されつつあり、CR1後も推進する必要がある。高信頼性に関するECHの課題は、ジャイロトロン周波数可変、高周波数帯域における大電力化、ミラーレスアンテナの設計に関しては進捗がある。しかし、ITER、JT60-SAに向けた計画に直接取り込まれていない高速周波数切替・高効率運轉・完全連続運轉・アンテナ保守・伝送系に関する設計や開発は国内の取り組み体制を早急に構築しCR1後の進捗を加速させる必要がある。

報告日：令和2年12月15日

小課題名	アクション	期限	CR1までの要完了事項	実施期待機関	進捗状況	CR1への進捗度	進捗状況の評価	課題達成のために必要な措置
技術仕様の決定	ECH/NBI技術仕様の決定	26		特/Q	NBIについては、基本仕様(ビームエネルギー、入射パワー、効率、等)に加え、ビーム偏向入射、真空排気系等の検討が進められている。 ECHについては、EC入射位置最適化、電流駆動効率改善、プラズマ着火・立ち上げアシスト、ランチャー概念の検討に加え、発振源プラントの検討に着手している。		物理設計に基づく要求仕様の検討に加えて、炉工学的観点からの技術仕様の検討が開始された。 CR1に向けては順調	炉心、炉工学技術の開発と整合を取るための枠組みの構築が必要。
原型炉試験用設備整備	メンテナンスレス負イオン源試験施設整備	26		Q/N	開始に向け準備中。			
高出力・定常化	ITER用ECHシステムにおける高出力化・長パルス化	26		Q	ITERジャイロトロン実機1号機にて、1MW/300秒の性能確認を実証。引き続き、残りの4機について、高出力・長パルス試験を進める。		ITER、JT-60SAに向けた開発計画の中で計画通り進捗しており、CR1に向けては順調。	
	原型炉用高出力・定常ECHシステムの技術開発	35		Q/N/大	開始に向け準備中。			電子ビーム速度の低分散化、空洞の大口径化、ジャイロトロン内部の光学系機器の低損失化などの開発を進める必要がある。 完全連続運轉の実現には、ジャイロトロン内部機器の熱変形低減のための冷却強化対策、構造設計の改良などを検討する必要がある。
	ITER用NBIシステムにおける高出力化・長パルス化	26		Q	ITER NB試験施設(NBTF)でITERフルサイズ(16.5MW)のビームを試験する装置(MITICA)では、1MV高電圧電源のサイト受け入れ試験のうち、最終段階となる直流1MV電圧発生試験(日本と欧州調達機器の統合試験)を進めており、2021年2月までに試験完了予定。その後、負イオン源周辺の1MV真空耐電圧を実証する実規模耐電圧試験を実施し、2024年からビーム加速試験を開始予定。 QSTの試験装置(MeV級イオン源試験装置、耐電圧試験装置)では、1MeV負イオン加速器設計最終化に必要な開発試験を進めており、NBTFへ成果を反映する。 JT-60SAの大型負イオン源(5MW)は、2023年からフルパワービーム、その後のDIV改良後に100秒連続試験を実施する計画。2019年までは、小型負イオン源を用いて負イオン生成安定化、異常放電時保護、高耐電圧改造を試験し、要求仕様(0.5MeV、130A/m ² 、100秒)を超える0.5 MeV、154A/m ² 、118秒を達成。2020年から実機大型負イオン源にこれらの技術を適用した試験を進行中。 ITERで採用されたRF負イオン源は、大電流化は進捗しているが、QSTとNIFSのフィラメントアーク(FA)負イオン源と比べ、ビーム発散角が2倍以上大きく、ITERの要求を満足しておらず、「高出力・長パルス」の観点で課題が発生。これを解決するため、FA、RF負イオン源を同じ加速器に乗せて直接比較し、問題解決を図る試みが探られた結果、NIFSとIPPの共同研究の下、NIFSにおいてFA・RF両放電形式を切替可能な負イオン源を構築し、ビーム発散を調査する試験計画が進んでいる。		ITER、JT-60SAに向けて、日本が直接調達に関わることは比較的計画通り進捗しており、CR1に向けては順調。 一方、欧州調達のRF負イオン源に由来する課題がある。これを早急に解決するための計画が進み始めた。 日本調達機器以外についても全日本体制で推進できる試みを開始した。	原型炉に向けて、NBIの専門家を有するNIFSの支援を維持する措置が必要。

高信頼性	高信頼性ECHの概念設計 (ミラーレス、周波数高速可変、保守)	26		Q/N	(特)アンテナのミラーレス化のための概念設計検討(リモートステアリング位相アレイアンテナ)に着手。 (Q)ITERジャイロトロンにおいて、104GHz、138GHz、170GHz、203 GHzの4つの周波数で1MW発振を実証。 (Q)200GHzを超える周波数での1MW以上出力が可能な概念設計検討を進めた。例:236 GHz: 1.2 MW出力(空洞での発振出力は1.35MW)。 アンテナ保守方法検討については未着手。		実施体制を構築し、CR1後の進捗を加速させる必要がある。	未着手課題と、さらなる推進が必要な課題の実施体制の構築が必要。 ・CR1後のアクションである高効率化には、マルチステージのエネルギー回収技術、空洞における発振モードロックによる発振効率の向上などの開発が必要であり、今後実施体制の構築が必要。
	ECH、NBI 耐放射線性材料の開発	35		Q/N/大	開始に向け準備中。			
	高信頼性NBIの概念設計(メンテナンスレス負イオン源、遠隔保守)	26		Q/N/大	メンテナンスレス負イオン源の一つでITERに採用されているRF負イオン源開発では、IPPガルヒンクのITER ハーフサイズ負イオン源(ELISE)の試験が進み、長パルス(400秒以上)時の負イオン電流値は、要求値に対し、水素で約90%、重水素で約70%まで到達。重水素時に電流が低いことに対し、NIFSと協力して解決を図ろうとしている。またNIFSでは、負イオン引出部に畝状構造物を設置することで随伴電子電流の抑止に成功している。 NBTFのフルサイズRF負イオン源試験装置(SPIDER)が2018年から試験開始した。初期的な不具合があったが、解決する方向で調整が進んでいる。その後に本格運転の見込み。 NIFSではNBI高信頼性の基礎となる、負イオン源内プラズマとビーム引出と形成を対象とした計測システムを構築し、学術研究を推進している。 セシウムフリー負イオン源研究が進捗中。 2MeV級のビームを生成し得る空洞加速器を用いたNBIのビームシミュレーションによる設計を開始している。 遠隔保守については、ITER用遠隔保守についてITER機構で設計中。		ITER調達枠の下、RF負イオン源の開発は欧州が担っているが、ITERの要求性能を未達成。 NIFSがIPPと協力して支援研究を実施する。RF負イオン源、セシウムフリー負イオン源等の開発に対するNIFS/大学での取り組みをCR1後さらに加速させる必要がある。	
高効率化	ECHエネルギー回収技術の高度化	35		Q/N/大	開始に向け準備中。			
	電子ビームの高品質化	35		Q/N/大	開始に向け準備中。			
	CR1後のアクション: NBI高効率化概念設計	26		Q/N/大	光中性化セルについては、原型炉設計合同特別チームの共同研究で大学と連携した、原理実証の試験計画が検討されている。 DT混合ビームについては、設計のみで特に進捗なし。 コンパクト化技術については、特に巨大な電源について、NBTFからITER実機への設計にあたり、コンパクト化要因があるか洗い出しを検討中。		試験計画立案作業が動き出した。	

課題名：5. 理論・シミュレーション

原型炉設計合同特別チーム(以下、特別チーム)理論シミュレーションWG等における2025年頃までの開発・利用計画の議論・提示を踏まえつつ、アクションプランの進捗は全般的に堅調でありCR1に向けて成果が出ているが、加速が必要な項目もある。特に、DIVシミュレーションコード(SMC)のJT-60SA、ITER実験への適用、検証及び継続開発、炉心プラズマ統合SMCのJT-60SA、ITER実験への適用、検証及び継続開発、及びディスラプション・核燃焼プラズマ・乱流輸送・プラズマエッジ第1原理系SMCの継続開発・利用は、CR2までのC&R項目の達成と強くリンクしており、今後、さらに重点化していかないとCR1後の進捗が遅れる可能性があり、対策が必要と考える。

報告日：令和2年12月15日

小課題名	アクション	期限	CR1までの要完了事項	実施期待機関	進捗状況	CR1への進捗度	進捗状況の評価	課題達成のために必要な措置
炉心プラズマ第1原理系SMC群	プラズマエッジ第1原理系SMCの重点開発・利用	19	※	Q/N/大/特	(特)理論シミュレーションWGにて具体的な開発・利用計画を策定。この計画に基づき、 (Q)周辺ペDESTAL領域における線形MHD安定性解析のための数値コードの高度化を進め、日米欧の実験装置のデータを用いたELM発生条件やQH-mode観測条件に係る妥当性検証を進めた。また、輸送コードにペDESTAL分布予測モデルを組み込み、炉心から周辺までの定常プラズマ分布予測を実現した。さらに、非線形MHDコードの高度化に着手し、ELM発生によるペDESTAL崩壊やエネルギー放出量に係る物理機構の解析を進めた。 (N/Q) MHD平衡とELMへの3次元外部摂動磁場の影響の解析を進めた。	順調	プラズマエッジに関する研究で求められる、「ELMの抑制につながる物理機構の解明」や「ELM発生条件および発生後のペDESTAL崩壊・熱放出量の定量的な評価・予測」に関連したコード開発や妥当性検証が進み、さらに、運転シナリオ検討に求められるプラズマ閉じ込め領域全体のプラズマ分布予測を可能としており、CR1に向けて成果が出ている。 CR1後には、非線形MHDコードとDIVコードとの統合化やモデル・コード開発をさらに進め、妥当性検証などを行う必要がある。	着実な進捗があったが、継続して開発し、得られた成果で「炉心プラズマ統合SMC」の高度化に貢献する必要がある。このような状況を鑑み、小課題「炉心プラズマ第1原理系SMC群」の2020年以降の記載を、「(20) Q/N/大/特:ディスラプション・核燃焼プラズマ・乱流輸送・プラズマエッジ第1原理系SMCの重点開発・利用(*)」と改訂し、継続的な活動を確保する。
炉心プラズマ第1原理系SMC群	ディスラプション・核燃焼プラズマ・乱流輸送・プラズマエッジ第1原理系SMCの重点開発・利用	*		Q/N/大/特	(特)理論シミュレーションWGにて具体的な開発・利用計画を策定。この計画に基づき、 (Q) ディスラプション統合コードの開発を継続。 (N) 高エネルギー粒子・運動論的熱イオン・MHDハイブリッドシミュレーションコードを開発。 (Q/N/大) トカマクおよびヘリカルプラズマにおける高エネルギー粒子駆動MHD不安定性に対する妥当性検証を継続するとともに、核燃焼プラズマの予測研究に着手。 (N/大) 乱流輸送第1原理系「局所」SMC、及び (大) 乱流輸送第1原理系「大域」SMCを開発。 (Q/大) 局所コードによるJT-60等の実験解析を進めるとともに、 (大) 大域コードによる内部輸送障壁形成のシミュレーション研究、 (Q) 実平衡を用いたコード間ベンチマークに着手。 (N/大) 多粒子種プラズマを扱う乱流輸送SMC開発を推進。		比較的順調に研究開発が進捗している。AP中期(2020-2025)、後期(2026-2035)では、人的資源や計算資源等、多くの研究資源が必要となるアクションであり、バーチャル核燃焼プラズマの実現に向けて今後も現状の先行的アクションを支援していく必要がある。	ジャイロ運動論に基づく乱流輸送の第一原理計算には多大な計算コストが必要であり、計算機資源の確保が重要。2021年までは計算機資源確保の目的がたつが、その後は不透明。一方、他の小課題で必要とされる輸送コードへの適用には計算コストの削減が必要であり、輸送係数のモデリング(第一原理計算結果のモデル化や実験データからの経験則や機械学習を併用したモデル化)が必要であるため、他の小課題とのより一層の連携が重要。
DIV-SMC	DIV-SMCの重点開発・利用	19	※	Q/N/大/特	(特)理論シミュレーションWGにて具体的開発・利用計画を策定。この計画に基づき、 (Q/大) SONICの非定常化改良を行い、不純物輸送や非接触DIVプラズマ形成等の過渡的解析・制御手法検討を可能とした。SOL上流側の低衝突度領域の不純物に適用可能な拡張熱力モデルを高度化し、SONICへ導入した。放射輸送と中性粒子弾性散乱のモデルを開発してSONICへ導入し、原型炉での非接触プラズマへの影響を評価した。 (大/N/Q) SONICとEMC3-EIRENEコードとの軸対称磁場での検証を行い、EMC3-EIRENEで3次元外部摂動磁場の影響の解析を進めた。	順調	不純物入射による非接触プラズマ形成と炉心への不純物混入抑制に関わるモデル・シミュレーションコードの開発を着実に進めており、CR1に向けて成果が出ている。	
	DIV-SMCのSA、ITER実験への適用、検証及び継続開発	35		Q/N/大/特	開始に向けて準備中。 (Q/大) 既存実験やJT-60SA実験で検証予定。		CR1後、プラズマドリフトの導入や非接触プラズマに関わるモデルの高度化等、進めるべき開発課題が多い状況であり、加速が必要である。	原型炉での重要性が高く、開発すべき課題が多いにも関わらず、現時点で人的資源が非常に少ない領域であり、人的資源の増強が急務。 開発および原型炉設計やJT-60SA・ITERの予測・検証のために、利用可能な計算機資源の継続的確保も必要である。

炉心プラズマ統合SMC	炉心プラズマ統合SMCの開発・利用	19	※	Q/N/大/特	(特)理論シミュレーションWGにて具体的開発・利用計画を策定。この計画に基づき、 (Q) 非定常の統合コードTOPICSと相補的に使える高速な定常輸送コードGOTRESS、それに基づく統合コードGOTRESS+を開発し、高度な乱流輸送モデルを用いた定常プラズマ分布予測を実現し、JT-60SA予測に利用した。 TOPICS, GOTRESSに導入する粒子・熱輸送モデルを開発し、JT-60U実験で検証した。 (Q/N/大) 第1原理局所乱流コードに基づく大域的輸送コードTRESS+GKVの開発を進めた。 (大) 統合コードTOTALで原型炉での不純物蓄積とプラズマ性能への影響評価を進めた。	順調	トカマク用の炉心プラズマ統合コードに関しては、QSTを中心にJT-60SAとITERのプラズマ性能予測や運転シナリオ構築、実験での検証を目指して着実に開発が進められており、CR1に向けて成果が出ている。	
	炉心プラズマ統合SMCのSA、ITER実験への適用、検証及び継続開発	*		Q/N/大/特	2020年より開始。 (Q) JT-60SA実験で検証予定。		CR1後、DIVSMCとの不純物を含めた統合化や高エネルギー粒子の不安定性・輸送モデル開発を加速する必要がある。	炉心プラズマ統合SMCを高度化していく必要があり、「DIVを含む統合シミュレーションのJT-60SA等による検証」に向けて、人的資源の増強が急務。また、統合シミュレーションとその検証、モデル開発のため行う第1原理系SMC群のためには、利用可能な計算機資源の継続的確保も必要である。
核融合炉材料SMC	材料シミュレーション要素コードの開発・利用	26		Q/N/大/特	(特)理論シミュレーションWGにて具体的開発・利用計画を策定。この計画に基づき、下記事項が進展した。 ●BLK構造材料:(Q) 照射スエリング評価コードの要素モデルの構築、(大/Q)析出物中の水素挙動の電子論解析、及び(大/Q) 各種照射場の定量化に向けた照射欠陥形成挙動の統計解析に着手。 ●DIV材料:(N/大) 壁材料を含めた中性粒子輸送コードにより、水素原子分子のポピュレーション評価手法確立。また、DIV材料についてアクションプランの詳細化に着手。		BLK構造材料については、主要照射欠陥であるヘリウムキャビティの形成挙動のモデル化、析出物中の水素挙動の素過程及び原子はじき出し欠陥生成挙動の理解が進展している。 水素キャビティ・転位ループの形成挙動のモデル化及び強度特性評価コードの開発はCR1後の課題である。 DIV材料については、タングステン材・炭素材をターゲットとしたプラズマ粒子リサイクリング評価コードの要素モデルの構築が進展している。 CuCrZr合金及びタングステン材の照射劣化機構のモデル化(両材料とも実施機関は検討中)はCR1後の課題である。	
	材料統合解析コードの開発・利用・検証	35		Q/N/大/特	開始に向けて準備中。			
原型炉システム統合SMC	工学基礎コード群の開発・利用	20	※	Q/N/大/特	(特/Q) BLK熱核解析コード、誤差磁場評価コード、BLK筐体用の構造解析汎用コード、熱流体汎用コード、T燃料システムコード、T透過コード等を開発・整備中。Tインベントリ評価コードのBLK熱核解析コードへの統合化作業を実施中。また、第一壁へのプラズマ熱負荷解析コードを開発し、第一壁形状の最適化や保護リミターの検討を実施中。	順調	特別チームを中心に原型炉システム統合SMC開発に必要な要素コードの開発が行われるとともに、一部コードの統合化作業が開始されている。	
原型炉制御シミュレータ	プラズマ応答特性・制御系モデリング	19	※	Q/N/大/特	(Q) 原型炉制御シミュレータのベースになる平衡制御シミュレータMECSを高度化。 (特)3次元渦電流効果を考慮した平衡制御シミュレータMECS_3D及び初期励磁解析コードOH_3Dを開発。 (Q) 機械学習を用いたイオン温度勾配制御手法の開発を進めた。	順調	QSTと特別チームが連携し、原型炉制御シミュレータの炉心プラズマ部分の中心的な要素コードと想定される平衡制御シミュレータの開発が着実に進められるとともに、導体構造物の3次元効果モデルの構築が行われている。また、機械学習を用いた実時間制御手法の開発が行われている。	
	プラント挙動を予測可能な制御用シミュレータの開発・利用	35		Q/N/大/特	2020年より開始している。 (Q) MECSによる、JT-60SAでの検証に向けて磁気センサー等の計測制御系及びコイル電源制御系を用いた運転シナリオの検討を実施中。 (特)MECS_3D及びOH_3Dによる、高橋円度プラズマ立ち上げシナリオや着火シナリオの検討を実施中。 (Q) JT-60Uの実験データを用いて、機械学習を用いたイオン温度勾配制御手法の検証を実施中。			

課題名: 6. 炉心プラズマ

CR1までに完了すべきアクションについては、概ね順調であることを確認できた。特に、「JT-60SA研究計画」や「JT-60SAファーストプラズマ」のアクションは極めて順調である。粒子制御技術については、CR1後も高度化に向けた取組が必要である。また、モデリング/シミュレーション研究には計算機資源の継続的な確保も必要である。

報告日: 令和2年12月15日

小課題名	アクション	期限	CR1までの要完了事項	実施期待機関	進捗状況	CR1への進捗度	進捗状況の評価	課題達成のために必要な措置
プラズマ設計	物理設計と炉心プラズマパラメータ設定	19	※	特	必要なコードを開発して進めた物理設計活動を基に、原型炉の炉心プラズマパラメータを設定。	順調	JT-60SAやITERのプラズマパラメータに反映できるものであり、さらに、次のアクションである炉心プラズマパラメータの最適化にも着手できており、本アクションは完了。	
	炉心プラズマパラメータ最適化			特	2020年より開始。		シミュレーションによる炉心プラズマパラメータの最適化には既に着手できており、加えて、JT-60SAの運転が2020年より開始しており、今後の進展が十分に期待できる。	
	プラズマ設計DB構築	19	※	特	国内外の既存装置での実験結果に基づくプラズマ設計データベース(DB)を構築済。	順調	原型炉で想定するプラズマパラメータ領域へ外挿できるプラズマ設計DBを構築できており、本アクションは完了。	
	プラズマ設計DB改訂			特	2020年より開始。		2020年より運転を開始したJT-60SAの実験結果を取り込むとともに、遅れ気味ではあるものの理論・シミュレーション研究の最新DBを反映して行ける状況にあり、今後の進捗が期待できる。	必要なサーバーの確保など、原型炉のプラズマ設計に利用可能なDBの改訂に向け、理論・シミュレーション研究の着実な進捗が必要である。
ITER	ITER研究計画の改定	24		Q/N/大/J	(Q/N/大/J)2025年FP、2035年DTとするベースラインに基づいて運転計画の詳細化を進め、2018年にITER研究計画を改訂。		進捗は順調。JT-60SAなどから創出される最新の研究成果を反映させるため、継続的に計画の見直しを検討している。	ITER実験参加に向け、本アクションに全日本的に取り組む必要がある。
JT-60SA	JT-60SA研究計画の改定	19	※	Q/N/大	(Q/N/大)最終版であるJT-60SAリサーチプラン Ver.4.0は、2018年に完成。	極めて順調	共著者数435名(日本174名で18研究機関、欧州261名で14ヶ国、33研究機関)で最終版を完成させており、本アクションは完了。	
	ファーストプラズマ	20	※	Q/N/大	(Q/N/大)2020年より開始。	極めて順調	統合試験運転が順調に進んでおり、2020年度のファーストプラズマ達成は十分に期待できる。Q/N/大は、協力を強化するためJT-60SAオンサイトラボラトリーを開始。	
	プラズマ制御手法確立	21		Q/N/大	(Q/N/大)2020年より開始。	順調	統合試験運転が順調に進んでおり、今後の進展が期待できる。Q/N/大は、協力を強化するためJT-60SAオンサイトラボラトリーを開始。	
LHD、ヘリオトロンJ	トーラス系物理の理解	25		N/C2	(N)乱流が閉じ込め性能に与える影響を調べるため、実験及び理論シミュレーションを密接にリンクさせた解析を展開し、トカマクプラズマの3次元磁場効果の物理機構解明に寄与。 (C2)局所プラズマ計測器の整備を精力的に進め、異常輸送の解明や輸送障壁の成立条件の解明などの研究を通して、トーラス系プラズマの3次元磁場構造の役割について理解がさらに進展。		進捗は順調。LHD及びヘリオトロンJの寄与により、3次元磁場効果の理解がさらに進み、核融合燃焼プラズマの性能予測の高度化が期待できる。	共同研究等によるトカマクとヘリオトロンJの研究者間におけるさらなる連携強化。
	重水素実験	25		N	イオン温度10keVの達成とともに、同位体効果の存在及び高エネルギー粒子の良好な閉じ込めを確認。		系統的なデータを蓄積しつつあり、重水素実験は順調に進展。	

	粒子制御技術(D,He,不純物)の実証	19	※	N	イオン温度の高い領域において、“不純物ホール”という不純物を自動的に排出する現象が存在することを示した。また、軽水素と重水素の混合プラズマにおいて、粒子補給の条件や乱流揺動輸送の程度に応じて同位体混合比を制御することが可能であることを示した。低温・炭素壁環境下においては、共堆積層の形成によりヘリウムを含め、壁による粒子吸蔵は飽和しないことを明らかにした。	順調	CR1後、アクション「重水素実験」の中で粒子制御技術の高度化に向けて取り組む必要がある。より長時間(3時間程度)放電での粒子制御技術の検証が必要である。能動的な粒子制御ツールである排気可能なDIVの整備はほぼ完了しているものの、より長時間の放電に適用できるかは、今後の課題である。	
プラズマ壁相互作用研究	W材のPWI基礎データの獲得	26		大/C3/C4	(阪大)水素同位体と不純物(ヘリウム、窒素、希ガス等)同時照射時のW中の水素同位体挙動、非定常熱負荷による溶融W層挙動の研究を継続。 (名大)中性子照射損傷W材料及びW堆積層の水素同位体及びヘリウムの吸蔵特性を評価。吸蔵量はバルク材に比べ大きく増加することを確認。 (C3)小型PWI模擬実験装置APSEDASにて、W表面のヘリウムバブル形成と水素同位体吸蔵の関係や照射損傷Wの水素同位体吸蔵特性について評価を継続。 (C4)W再堆積層とW母材の水素吸蔵能を評価するなど、W材の基礎研究を継続。		進捗は順調。 大阪大学、名古屋大学、筑波大学プラズマ研究センター、九州大学応用力学研究所における基礎実験や基礎データ取得は順調に進展し、PWIに関するデータが蓄積されている。	引き続き、各大学で得られたデータの統合に向けた大学間の連携強化。
	W材DIV長時間特性での課題の明確化	26		大/C3/C4	(阪大)水素同位体/不純物同時照射時の水素蓄積・透過挙動のモデリングと評価を継続。 (名大)ヘリウムプラズマ照射による材料構造変化を評価。照射により大きな構造ができ、アーキング点弧に寄与することを確認。 (C3)GAMMA10/PDXDIV模擬実験では、W-V字ターゲットに対する複数ガス入射の効果を評価しているなど、非接触プラズマ生成に関する研究が進展。 (C4)QUESTでは、プラズマに曝される時間や壁温度の違いによるW材の水素吸蔵及び水素リサイクリングの相関データを取得し、その原因が損耗・堆積挙動によるものであることを明らかにするなど、W材の長時間特性データの蓄積が進んでいる。		進捗は順調。 大阪大学や名古屋大学等における基礎実験やモデリング、基礎データ取得は順調に進展。 また、筑波大学プラズマ研究センターのGAMMA10/PDXでは、W材に対するDIV模擬実験が進むとともに、九州大学応用力学研究所のQUEST装置では、プラズマに長く曝されたW材に対するデータが蓄積されており、順調に進展。	引き続き、基礎実験・モデリング研究と実機実験との連携強化。
モデリング/シミュレーション研究	物理モデル構築と性能予測コード高度化	19	※	Q/N/大	(Q)乱流輸送モデル、ペDESTAL分布モデルを組み込んだ非定常統合コード改良と定常輸送コード開発、これらを組み合わせて炉心から周辺なまでの定常プラズマ分布予測を実現。DIVコードの多種不純物化及び非定常化に対応。線形MHD安定性解析コードの高度化、非線形MHDコードの高度化とこれと高エネルギー粒子コードのハイブリットコードの高度化、ディスラプション統合コードを開発するなど、モデリングとシミュレーションの統合化も進んだ。また、これらはJT-60SAやITERの各種評価に適用された。 (N/大)トラスプラズマに対する物理モデル構築と性能予測コード高度化を実施。詳しくは、課題「5. 理論・シミュレーション」を参照。	順調	様々な現象に対するモデリング/シミュレーション研究は順調に進展し、本アクションは完了。更なる開発や高度化を必要とするものは、課題「5. 理論・シミュレーション」とのリンクによる実施や、次のアクション「制御シミュレータ開発」にて継続的に実施されることを期待。	
	制御シミュレータ開発(ITER、JT-60SA等への適用含む)			Q/N/大	(Q/N/大)2020年より開始。		複数物理量の統合PID制御や自動ゲイン制御、機械学習を利用した知的制御の開発に既に着手するなど、今後の進展が期待できる。	計算機資源はモデリング/シミュレーション研究に不可欠であるが、QST六ヶ所研の計算機JFRS-1は2022年3月末で運用終了を予定しており、その後継の計算機資源の確保が必要。

課題名: 7. 燃料システム

CR1までに完了すべきアクションについては、全て完了していることを確認できた。CR1後、新たな課題が顕在化した「燃料循環システム要素技術(不純物除去、同位体分離など)の開発」、規模拡大が必要な「パイロットプラント規模でのLi確保技術確立」、「⁶Li濃縮基盤技術開発」のアクションには支援が必要である。

報告日: 令和2年12月15日

小課題名	アクション	期限	CR1までの要完了事項	実施期待機関	進捗状況	CR1への進捗度	進捗状況の評価	課題達成のために必要な措置
燃料循環システム設計	燃料供給シナリオの策定	18	※	特/Q/大	(特/Q)中心プラズマ輸送コードを用いてペレットの仕様(入射速度、入射ペレットサイズ、入射位置等)の同定を行うとともに、DIV輸送コードを用いて粒子供給量(コア用ペレット・周辺用ガスパフ)と粒子排気量の同定(粒子バランスの解析)を行い、燃料供給シナリオを策定。	順調	解析結果を含む技術情報も論文発表済みであり、アクションとして完了。	
	燃料供給シナリオの実証	26		Q/N/C5/大	(Q/N/C5/大)2020年より開始。		ガスパフやペレット入射による燃料供給を実施できるJT-60SAの運転が、2020年より開始されており、今後確実な進捗が期待できる。	
	燃料インベントリーの評価	18	※	特/Q/大	(特/Q/大)既存の実験データの解析を基に整備したデータベースにより原型炉でのインベントリーを評価。さらに、原型炉の第一壁温度におけるTインベントリーの実験データを拡充中。	順調	原型炉のインベントリーを評価できるようになっており、当初想定したアクションは完了。さらなる取組みである、QST・大学・NIFS・富山大(C5)の協力による実験データの拡充も順調で、2022年程度までに終える予定。	
	燃料循環システム仕様の決定	19	※	特/Q/大	(特/Q/大)上記アクション「燃料インベントリーの評価」を踏まえ、燃料循環システムの仕様を決定。	順調	当初想定したアクションは完了。上記アクション「燃料インベントリーの評価」における実験データの拡充にあわせ、2022年程度まで見直しを続ける予定。	
燃料循環システム要素技術(不純物除去、同位体分離など)の開発	燃料循環システム要素技術(不純物除去、同位体分離など)の開発	26		Q/C5/大	(Q)Tインベントリーの低減を考慮した原型炉向け燃料循環システム構成概念の提示やTを効率的に回収する触媒を開発する等、要素技術の開発は着実に進展。 (C5)2018年の時点で、要素技術は開発済。		Q及びC5の連携により、要素技術の開発は進んでいるが、新たな課題として「D/T混合固体ペレット入射供給技術の開発」が顕在化しており、その対応のために、CR1後には加速が必要である。	新たな課題である「D/T混合固体ペレット入射供給技術の開発」への対応が必要。レーザー方式のTの貯蔵・ハンドリング技術と共通の技術であることから、連携を図る。
	T除去系、計量管理の確証試験	24		Q/C5/大	(Q)ITER-DSの共同調達で実施しているT除去系の要素開発・確証試験が進展するとともに、付随する計量管理技術も開発が着実に進んでいる。 (C5)β線誘起X線計測、液体シンチレーションカウンターの高度化を進め、これらを用いてLHDのタイル分析を進めるなど、着実に進展。 (静岡大)BA、NIFS共同研究にて、引き続き実施。		順調に進展。 ITER除去系の調達やBA活動を中心に研究が進展。富山大学水素同位体科学研究センターでは高度化した計測装置を用いた分析等が進められている。	レーザー方式のTの貯蔵・ハンドリング技術と共通の技術であることから、連携を図る。

T安全取扱技術・ 機器開発	Tと材料の相互作用な ど基礎データ取得	19	※	Q/C5/大	(Q)イオン照射したタングステンに対するT保持量及び放出に関する知見、低放射化フェライト鋼及びタングステンにおける照射損傷が水素同位体保持に与える影響、先進タングステン材料での水素同位体挙動、Tを含む核融合炉材料の除染法の実用化研究、T透過防止膜に関する研究、JETタングステンコーティングカーボンタイル及びダストのTインベントリ等に関する研究が進展し、必要な基礎データは取得できた。 (C5)タングステン及びその合金、低放射化フェライト鋼、Cu合金中のTを含む水素同位体の溶解・拡散・捕獲挙動及び同位体効果に関するデータについて蓄積。また、JETタングステンコーティングカーボンタイル及びダストのTインベントリ等のデータを取得。 (九大)プラズマ対向壁、特にWへのT保持インベントリ研究に進展。固体・液体各増殖材料についても基礎研究を実施。 (静岡大)日米共同研究、BA共同研究、NIFS共同研究などでデータを蓄積。中性子照射WIについても基礎的な知見を取得。 (茨城大)BA共同研究及びDEMO共同研究において、核融合炉材料の基礎物性データを取得。 (京大)SiC系材料のT透過拡散データについて取得。	順調	順調にデータ取得でき、本アクションは完了。 新たな知見としての基礎データの取得は、次のアクション「T含有ガス・水を取り扱う機器(燃料系)の要素試験」の一環として継続されることを期待する。	
	T含有ガス・水を取り扱う機器(燃料系)の要素試験	26		Q/C5	2020年より開始。		要素試験の実施に向けて検討に着手しており、今後の進展が期待できる。	
T大量取扱施設	T大量取扱施設設計検討	26		Q	2020年より開始。		検討に着手しており、今後の進展が期待できる。	
Li確保	⁶ Liの確保方策の検討	17	※	Q	イオン伝導体膜による海水からのLi回収、 ⁶ Li濃縮技術開発の基礎研究が進められ、特許も取得。多くの産業界及び公的機関との連携も進展し、完了。	極めて順調	本アクションは既に完了し、次のアクションである「パイロットプラント規模でのLi確保技術及び ⁶ Li濃縮基盤技術開発」へと移行済。	
	パイロットプラント規模でのLi確保技術確立	26		Q/産	(Q)選択した ⁶ Li製造プロセスについて、その基盤技術となるイオン伝導体膜によるLi回収技術におけるパイロットプラント概念の構築に着手。 (Q/産)イオン伝導体膜によるLi回収技術について、QSTと企業が協力して開発中。		パイロットプラント規模での技術実証の実施は現時点で見通せない状況であり、CR1後に加速が必要である。	
	⁶ Li濃縮基盤技術開発	26		Q	要素技術開発に着手。		要素技術開発に着手しているものの、プラント規模の開発に向け、より多くの企業の参画も得る必要があり、CR1後に加速が必要である。	

初期装荷T	T製造プロセスの検討	19	※	特/大	(特)ITER運転開始以降にカナダの重水炉から初期装荷分を入手することは、現時点で十分に想定可。 (京大)初期装荷Tが不要な起動方法の検討が進み、60日～100日程度での定格運転到達を予測。 (九大)高温ガス炉での製造量を評価。	順調	次のアクションである「初期装荷用燃料の確保方策の検討」の開始に必要な成果は得られており、本アクションは完了。	
	初期装荷用燃料の確保方策の検討	23		特/Q/大	2020年より開始。		前アクションを踏まえ、検討を開始しており、今後の進展が期待できる。	

課題名 8. 核融合炉材料と規格・基準(1)
ブランケット構造材料

(1) CR1に向け、低放射化フェライト鋼に関しては、大量製造技術の確立や関連する要素技術開発など極めて順調であると言えるが、コールド試験設備を用いた腐食実験データベースの拡充、照射効果に関するデータ取得や照射による劣化モデルや関連する規格基準の構築などについては、照射場の確保を含めて、CR1後に加速が必要な状況である。
 (2) 先進BLK材料については、利用方法やデータベースの構築についてNIFSや大学の協力を得つつ検討が始まっている。CR1後は、この項目に加え、DIV材料や計測・制御機能材料について、照射場を確保しつつ照射効果関連の評価を行う必要がある。
 (3) 核融合中性子源の概念設計に関しては、極めて順調に進捗しており、CR1後に工学設計を加速するために、大学や他機関等との連携を深めることが必要である。また、核融合中性子源の価値の発信についてもCR1後に強化する必要がある。

報告日: 令和2年12月15日

小課題名	アクション	期限	CR1までの要完了事項	実施期待機関	進捗状況	CR1への進捗度	進捗状況の評価	課題達成のために必要な措置	
低放射化フェライト鋼	原型炉に要求される材料スペックの明確化、技術仕様様の提示	26		Q/特/大	これまでの低放射化フェライト鋼F82Hの板材製作実績を整理し、現状での許容値及び熱処理条件を設定し、材料調達仕様案としてまとめた。管材・鍛造材等の他形状については試作に着手し、今後結果を反映することで技術仕様の確定を進める。		板材を中心に順調に進捗している。管材・鍛造材等の他形状の技術仕様に関する検討が開始され、今後の進捗が期待される。	原型炉に用いられる形状を設計活動において明確化していく必要がある。	
	大量製造技術の確立	26		Q/産	欠陥除去のための再溶解工程における組成制御性の課題を検討した。20t級溶解の実績をもとに材料調達仕様案を定め、新たに5t級溶解を計画し、再現性確認のための検証に着手した。		BA活動等の成果をもとに、実機製作に向けた工業規模の大量製造技術の確立に向けた着実な進捗が認められる。	原型炉に要求されるスペックを参照しつつ適用製造技術の確立を進める。	
	BLK構造体製作技術の確立	26		Q/産	HIP接合及び鍛造によるBLK構造製作技術の適用可能性を検討した。BLK設計検討と連動して、製作技術の確立を進めることとし、具体的にはF82Hを用いたTBM構造部材の製作性確認試験に着手した。また、大学との共同研究により、摩擦撹拌接合、線形摩擦接合などの新しい技術導入を検討するなどして、同種材・異材接合技術の開発が進捗した。		順調に技術開発が進み、特に新たな接合技術の導入検討が進むなど、選択肢の広がりを確認した。HIP接合体の評価については方針を定めるため、CR1後も継続して検討を進める必要がある。	HIP接合体の健全性評価法の確立を加速するとともに、代替技術の適用可能性の検討についても着実に進める。	
	微小試験片技術の信頼性評価・規格化	26		Q/産/学	主要な微小試験片技術についてQST/大学の共同研究で信頼性評価を進めるとともに、微小試験片技術に関するIAEA-CRP活動に参加してガイドライン整備活動が進捗し、ガイドラインの初案が2020年度内に完成する見通し。今後さらに日欧、日米協力を通して規格化を進める。		国内外の枠組みによって広く進められているが、CR1後には規格化に向けた戦略を明確化する必要がある。	国内外における規格化に向けてステークホルダーとの継続的な関与が重要である。	
	コールド試験による接合被覆部・環境影響データ取得	22			Q	溶加材を用いたレーザー接合技術の適合性検討を実施。強度特性も含めた技術適合性の評価を継続した。特に、溶接性確認試験を仏国規制対応の一環として実施し、第三者機関による妥当性が確認された。また、高温高圧水腐食に関するデータ蓄積を進め、水化学管理指針案を提示した。		大学等との協力により接合技術の進展が見られる。一方、環境影響については水化学管理指針案が示されるなど進展が見られる。引き続き、材料側、プラント設計両者からの水化学管理指針の最終化と妥当性検証が必要。CR1後の加速が必要と判断される。	水化学管理指針の検討を設計チーム・メーカーとともに進める。
	原子炉による80dpa照射データの取得	19	※		Q	70~80dpa/300~350℃の引張・靱性・微細組織評価を実施した。	極めて順調	機械的特性評価の結果が得られており順調である。	
	原子炉による80dpa照射データの検証	26			Q	より信頼度の高い80dpa/300~500℃データ取得を目標とする照射実験を進める。具体的には、照射データ検証のための異なるヒートを用いた新規照射試験計画を確定し、照射キャプセルの組立てを開始した。		照射データ検証試験の開始を確認した。	取得した機械的特性データを有効に活用するためにも、微細組織評価を進めることが必要。信頼性の高いデータ取得も必要である。海外炉を利用した事業計画であり、着実にデータを得るための工程管理が重要である。
接合被覆部・環境影響に関する照射データ取得	31			Q	TIB、EB接合部に対する20dpaまでの照射を終了した。今後データ取得を進めるとともに、設計に対応したデータ取得及び照射環境下腐食試験を進める。		原子炉照射実験は順調に進んでいるが、想定される接合被覆部の照射全てをカバーしているわけではない。CR1後には加速が必要である。	接合技術オプションについても照射試験を進める必要がある。	

	He影響の理解の進展、核融合中性子照射影響の解明、照射劣化モデルの構築	35		Q/N/大	照射材料劣化因子であるHeキャビティの形成動モデルを構築し、形成挙動の照射場影響評価を継続した。特に、設計基盤データである体積スウェリング評価に向けた活動をBAフェーズII活動において開始した。		モデル構築については順調に進んでいるものの、モデルの妥当性、外挿性等を含めて原型炉設計に利用可能なものとして信頼性を示す必要があり、CR1後の加速が必要である。	海外の研究者を含めた体制が構築されつつあるが、大学等との連携をより強化する必要がある。そのため、人材育成を着実に進めることが重要である。
	照射効果を踏まえた構造設計基準の在り方を提示	26		Q/産/学	確率論設計を含む炉内構造機器の構造設計基準の検討をBAフェーズII活動の重要課題として日欧共同活動を立ち上げた。また日米協力において、基盤となる統計解析を目的とした新たな照射試験の準備に着手した。今後設計基準の検討の深化、DB整備の加速を進める。		重要な取り組みであり、基本的な考え方については提示されている。研究実施体制の立ち上げや試験準備が着実に進んでいることから、今後の議論の進捗が期待される。CR1後の加速が必要である。	具体的に構造設計基準として落とし込んでいくための統合的な戦略を明確化する必要がある。
	材料規格化に向けた学協会活動	35		Q/産/学	ITER-TBM計画を中心に、仏国規制への対応として、構造設計規格RCC-MRxに準じた書類整理をしつつ、材料特認に向けた第三者機関との議論についても開始した。米国ASTM-A01(鉄鋼材料)会合に参加しF82HIについての説明を実施した。		CR1後も、規格化に向けた学協会活動の加速が必要である。	継続的な関与が必要である。
先進BLK材料	特/Q/N/大: 先進材料の利用方法を明確化	26		特/Q/N/大	先進BLKに関して、共同研究の枠内にて検討を進めている。SiC材料の液体増殖BLK流路インサート応用に係る主要な機能データの取得を進め、特に電気特性の照射効果、水素透過、リチウム鉛腐食に関する挙動理解が進展。また、宇宙航空産業分野での開発の進展を参照している。 バナジウム合金は液体リチウム増殖BLKでの利用が最も現実的であるが、酸素制御技術、耐酸化素材開発により溶融塩、リチウム鉛BLKでの使用可能性も検討されている。 耐環境性、耐照射性向上が期待されるAl添加型酸化物分散強化(ODS)鋼の利用可能性についてLHD計画共同研究が立ち上がった。		先進材料の利用方法の絞り込みを、先進BLK概念の検討等とともに進めている。 CR1後の加速が必要である。	先進BLK設計や関連する要素技術と併せて開発を促進するとともに、設計案の絞り込みに向けて先進材料の利用方法を明確化するための枠組みを構築する必要がある。
	先進材料のデータベースの充実	35		Q/N/大	SiC/SiC複合材料の機械的・物理的・化学的データの蓄積とともに、複合材料特性ハンドブックの整備に着手。 バナジウム合金については、接合法、低放射化性の向上、高温強度特性データの充実が進められている。 酸化物分散強化(ODS)鋼については、先進原子カシステムや事故耐性燃料開発のデータを参照している。		CR1に向け、現状の枠組みにおいては最大限の努力が払われているが、アクションプランで想定されている先進BLKの位置付けに対応可能なデータベースとはまだなっていない。CR1後の加速が必要である。	先進材料に関するデータベースをまとめるハンドブックの方針について、引き続き検討が必要である。

課題名 8. 核融合炉材料と規格・基準(2)
その他の材料

報告日: 令和2年12月15日

小課題名	アクション	期限	CR1までの要完了事項	実施期待機関	進捗状況	CR1への進捗度	進捗状況の評価	課題達成のために必要な措置
増殖機能材料	増殖機能材料の製造及び再使用技術の最適化	35		Q	再使用技術への適用可能な新たなBe低温精製基盤技術の開発に成功し、Be資源安定確保のための当該技術の実用化及び事業化に向けた研究開発及び体制構築を開始している。		Be資源安定確保に向けた新たな技術開発に成功しており、その実用化及び事業化の促進が期待される。CR1後には加速する必要がある。	再使用技術へも適用可能な新低温精製技術の実用化及び事業化を図るため、発展的に体制拡大が必須であり、資金・予算の調達・確保を含め、企業や大学等の関係各所の協力を求める。また、再使用を含めた「Be資源確保」のアクションの追加及び2035までの期限延長が必要。
	増殖機能材料充填体の機械特性評価／製作技術確立	30		Q	BA活動において確立した造粒技術に基づき造粒試験を実施し、微小球充填体の熱機械特性評価を開始している。また、先進中性子増倍材として、ベリライドブロックを用いた新設計案に基づく製作性試験及び機械的特性評価を開始している。		BAの具体的成果として特筆される技術であり、CR1後は加速して開発を進める必要がある。	関係各所の協力を求める。
	Li確保技術開発	35		Q	イオン伝導体膜による海水からのLi回収、 ⁶ Li濃縮技術開発の基礎研究を開始している。Li回収技術に関しては、多くの産業界及び公的機関との連携が進展中。まずは、基盤技術となるイオン伝導体膜によるLi回収技術におけるパイロットプラント概念の構築を開始している。 ⁶ Li濃縮基盤技術の開発として、要素技術開発に着手したところである。		新たな技術開発に成功しており、その実用化及び事業化の促進が期待される。	Li回収及び ⁶ Li濃縮のパイロットプラント規模での技術実証を行う必要があるため、資金・予算の調達・確保を含め、体制拡大のための企業や大学等の関係各所の協力を求める。
DIV材料	原子炉照射影響評価	26		特/Q/N/大	ITERグレードに準拠したCuCrZr合金の板材を製作し、ITER実規模プロトタイプ冷却管用CuCrZrと共に諸特性評価を実施。微小引張試験片の製作が完了し、HFIR炉を用いた照射試験が完了し、照射後試験を開始する予定。摩擦攪拌強化(FSP強化)溶射Wの繰返し熱負荷試験後の欠陥評価を継続。引き続き、耐酸化性を含めた高性能化を進める。		CuCrZr合金の照射試験の準備は引張試験を中心に進んでいるが、原型炉環境でのコンポーネントとしての照射影響については多角的な検討が必要。W材料の照射試験については、大学の日米協力等の枠組みに依存しており、高速中性子照射が可能な照射場を確保し、データベースの拡充が必要である。CR1後には加速する必要がある。	健全性評価に関連する特性評価を進めるための照射試験計画の策定。照射場確保についても強く意識する必要がある。
	耐照射性材料開発と評価	35		Q/N/大	ヒートシンク材料については、大学、NIFSを中心にODS-Cuの開発に着手も基礎的検討段階である。Wについても、大学、NIFSを中心に新たな素材開発や複合材料の開発が進められているものの素材研究段階である。		現時点では、まだ基礎研究に留まる。今後の加速が必要である。	設計の進展とともに、必要スペックの詳細化を進め、材料開発に反映させることが必要。多分野における材料技術発展と連携・導入していくことも大切である。
計測・制御機器材料	照射劣化データベースの整理	19	※	Q/特	未着手。NIFS研究会で整理したものが報告書になっている。それ以上の整理は、原型炉工学フェーズと考える。	継続が必要	現状では、NIFS研究会報告書以上のものは得られない状況である。	NIFS研究会報告書を元に、照射劣化データベースとして整理し、原型炉環境で用いられる計測・制御機器材料が同定された後に、必要に応じて照射試験、代替材料の開発などを進める。
	耐照射性材料の評価	35		Q/N/大	開始に向け準備中。			

その他	Q/N/大:核融合材料ハンドブックの策定	19	※	Q/N/大	低放射化フェライト鋼の物理特性・引張特性を中心としたハンドブックの整備を継続。今後は靱性・疲労・クリープ等の特性について順次策定を進める。ベースライン純タングステンの材料特性ハンドブック整備に着手。また、他の材料についても整備に着手する。	継続が必要	構造材料については、低放射化フェライト鋼以外の材料については未着手である。	関係各所の協力を求める。
-----	----------------------	----	---	-------	---	-------	---------------------------------------	--------------

課題名 8. 核融合炉材料と規格・基準(3)
核融合中性子源

報告日: 令和2年12月15日

小課題名	アクション	期限	CR1までの要完了事項	実施期待機関	進捗状況	CR1への進捗度	進捗状況の評価	課題達成のために必要な措置
核融合中性子源	核融合中性子源の設計・建設	30		Q	核融合中性子源の必要性、施設・設備ならびに機器等の要求仕様、照射試験計画を明確にすることを目的とし「施設全体設計」と「サブシステム」を中心に核融合中性子源A-FNSの概念設計書(図表を含め500ページ)を作成した。年度内には工学設計活動計画書も完成の予定。		「概念設計書」と「工学設計活動計画書」はすでにまとめられており、核融合中性子源の建設に向けた準備は整えられつつある。同時に工学設計における課題も明らかになっており、今後、NIFS、大学、研究機関等との協力が必要である。設計が極めて順調に進んでおり、アクションプランを詳細化し、更なる進展を促したい。	リチウムターゲットや照射モジュール、安全性などのコア技術に関しては、NIFS、大学、研究機関等との共同研究として積極的に進める必要がある。一方で加速器中性子源は、様々な要素を有している事から、社会にとって有益となり得る技術基盤を新たなコミュニティへ展開すべきである。

課題名 9. 安全性

安全に関する活動については日欧協力も活用し順調に推移している。安全性解析・評価に関しても特別チームにおいて基本的なコードの整備が行われている。特別チームにおいては、若手人材を確保し技術伝承にも取り組んでいる。CR1後、将来の工学設計において無駄が出ないように、安全規制についても早目にその考え方の検討を進めておく必要がある。

報告日: 令和2年12月15日

小課題名	アクション	期限	CR1までの要完了事項	実施期待機関	進捗状況	CR1への進捗度	進捗状況の評価	課題達成のために必要な措置
安全法令規制	(15)原型炉プラントの安全上の特徴整理 [既存コードでの評価]	16	※	特/産	Q, 特)BA活動の一環として、欧州の技術者と協力し安全評価が実施された。結果は報告書にまとめられている。	順調	日欧協力により評価手法のレクチャーを受ける等、合理的に活動を完了できた。	
	(17)原型炉プラントの安全上の特徴整理 [安全確保方針案策定]	19	※	特/産	特, 産)安全確保方針案として、深層防護の適用、多重障壁防護、基本安全機能の達成を目指すこととし、検討すべき項目として想定起因事象の同定、ソースタームの同定、事故の防止・緩和方策、安全重要度分類等を設定した。	順調	左記の設定に基づき、現状の知見による解析評価が行われた。	
	(20)原型炉プラントの安全上の特徴整理 [方針に基づく解析評価]	26		特/産	特, 産)安全解析による影響度分析、事故事象の防止と緩和方策案の評価に着手した。		真空容器内の安全にかかわる物質のソースターム評価精度の向上を目指し、大学にデータ取得を委託しており、順調に滑り出した。	安全を担う若手技術者の拡充、育成 原子力規制対応の経験者の支援が受けられる枠組み構築。
	(20)TF/特:安全規制法令予備検討	26		TF/特	特)核融合建設にあたってどのような法規制が適切かについて検討を進めている。		CR1後、将来の工学設計において無駄が出ないように、早めに検討を進めていく必要がある。	
工学安全課題の整理	(15)機器故障のシナリオ確立	26		特/Q/Ij/N/大/産	特)機器故障のシナリオ検討に着手し、オブジェクトツリーを展開し、事故の起因事象の影響度分析を実施中である。		CR1後には、現行の原型炉設計に基づき、必要なデータ項目を整理すると共にデータ取得を進める上での仕組み作りから開始する必要がある。	
安全性解析・評価	(15)特/Q/産:安全性評価コードの開発(31)	31		特	特)特別チームは、基本的なコードを整備済み。 Q)ITERの安全要件を満足する必要があるTBMは、特別チームと独立して実施中。		CR1後には、安全解析に必要な既存コードの整備が完了している。但し、整備したコードは国産コードでなく、ソースコードの開示など、今後の開発を進める上で課題がある。国産コードの開発に向けた開発計画の検討が必要。	
	(20)V&V実験 [化学反応、ダスト挙動評価等]	26		Q/大/特	原型炉建設にあたって、新たにどのようなV&Vが必要となるか有識者の意見を踏まえつつ検討を進めている。		現時点では計画通りと考えられる。CR1後、V&V実験の計画策定と必要な設備の整備が必要であるが、V&V実験の経験者がリタイア間近等、安全性に係る実験経験者の不足が懸念される。	軽水炉等での経験者も含めて人材拡充できる体制の構築が必要。
	(20)原型炉プラントの安全性評価	31		特/産	基本安全機能に関する安全評価を実施しており、TRACE等、新たに取得したコードを利用して継続して実施中。			
	(20)安全性確保の方針と整合する設計条件の策定 [概念設計]	26		特/産	安全性確保の目標と健全性確保の設計基準の策定に着手。		現時点では計画通りと考えられる。	
環境Tの挙動評価	(15)環境Tの規制目標の調査・検討	19	※	特/Q/N/大	特)「T諸課題検討WG」を設置し、タスクチーム1の活動として自主規制の考え方を検討しており、検討結果を今年度中に報告書に記載予定。	順調	CR1に向けては順調とは判断したが、規制という不確定要素を含む課題であるので、できるだけ前倒し検討が望ましく、CR1後は加速する必要がある。また、実験炉ITERでの規制の考え方などを整理する必要がある。	規制の在り方について、意見集約の場の設置が必要。
	(20)定常・異常時の環境への放出量評価と制御	34		特/大/N/産	特)運転時の環境影響評価に着手した。		現時点では計画通りと考えられる。	産業界を含めた評価体制の構築が必要。

課題名: 10. 稼働率と保守

CR1に向けた2019年までの基本概念設計は要求条件をおおむね満足していると判断している。一方、2020年からの概念設計は、基本概念設計の中から抽出された技術課題(DIVやバックプレートの再利用構造、ホットセル機器など)に検討を加え、炉構造と遠隔保守機器の設計統合を2024年までに行う必要があり、CR1後は加速が必要であると判断した。

報告日: 令和2年12月15日

小課題名	アクション	期限	CR1までの要完了事項	実施期待機関	進捗状況	CR1への進捗度	進捗状況の評価	課題達成のために必要な措置
原型炉設計	保守方式暫定	17	※	特/産/Q	垂直引き抜き方式を主案として、BLK・DIV双方の保守方式を詳細化中。BLKについては、保守シナリオ検討による保守条件の明確化、上部引き抜き方式の技術課題と対策設計、保守中の放射化ダストの拡散を防止する保守セルとキャスクの考え方を取り纏めた。DIVに関しては、ITER EDAの日本案であるラジアルムーバーとトロイダルムーバーで構成するDIV保守機器概念を提案した。 一方、DIVは、1~2年ごとに交換するため、放射性廃棄物低減の観点から、DIVボディなどを再利用することを最重要設計条件として位置付けて設計を進めたが、ターゲットとパッフル部の機械的な接続構造に技術課題を残した。	順調		
	炉構造・パラメータ決定	17	※	特/産/Q	水平引き出しと垂直引き抜き方式、ITER方式であるモジュール方式を比較した。炉構造に与える影響の大きさ、および保守時の環境条件である線量率条件の観点から、垂直引き抜き方式を主案とした炉構造(真空容器、バックプレート、DIVカセット、保守セルなど)を暫定的に定めた。 一方、暫定的に定めた真空容器(Tなどの閉じ込め境界)などの構造設計を進めるために、設計の拠り所となる構造設計基準案を整備し、構造健全性を確保する必要がある。	順調		
	保守R&D対象の検討・選択	18	※	特/産/Q	遠隔保守の設計に基づいてR&Dの必要範囲と開発目標を設定した。大重量をハンドリングする遠隔機器の要素技術として①耐放射線機器開発(減速機、潤滑剤、モータ、レゾルバなど)、②高精度な位置決めのための力制御技術開発、③操作性の向上ヒューマン・マシン・インターフェース(HMI)技術の開発、④高温高圧配管の溶接検査ツールの開発などを取りまとめた。	順調		
	作業手順、炉停止期間の検討	24		特/産/Q	2020年から開始済。予定 現段階の保守手順に基づいて、保守時間評価を行った結果、キャスク4台の並行作業で時間稼働率70%の見込みを得た。今後、遠隔保守機器の概念設計を進める過程で、追加される保守項目などを加味し保守時間の見直しを行う。加えて、遠隔機器自体の故障や故障確立、故障からのリカバリ-時間なども考慮するRAMI解析を取り入れて保守時間を再評価する。		上記アクションである「保守方式暫定」「炉構造・パラメータ決定」の技術課題は、このアクションで検討を加え、炉構造・遠隔保守全体の設計にフィードバックするため、CR1後には加速が必要。	

バックエンド検討	バックエンドシナリオ検討	19	※	特/大/産	<ul style="list-style-type: none"> 最大の放射化レベルであるBLKで発生する1200核種程度に関し、浅地中埋設後の核種移行解析を実施した結果、日本の規制に基づいた浅地埋設の可能性を示した。なお、Beに含まれるウラン不純物は、QSTが考案した製造方法により浅地埋設処分で求められる濃度(0.7 wppm)以下とすることが可能である。 定期交換機器であるBLKとDIVの線量率と残留熱の減衰特性に基づき、保管期間、解体条件、廃棄体化条件を考慮した放射化物の管理・処分シナリオ案を策定した。 当該シナリオ案に基づき、ホットセルなどの放射化物取り扱い施設の概念を検討した。また、定期交換時に発生する放射化物に軽水炉で適用される廃棄体化手法を適応し、廃棄体の総量を同定すると共に、減容化のための充填方法や埋設区分の低減に向けた濃度調整などを検討した。 3つの廃止措置方針(即時解体、安全貯蔵、埋設処分)に基づいて、原型炉における合理的な廃止措置について、コストや安全性の観点で分析中。 	順調	<p>ホットセル設計はコストに与える影響が大きいいため、CR1後は、現段階の予備的設計に対し、さらなる合理化設計を行う必要がある。また、BLKセグメントやDIVカセットは、放射性廃棄物を低減する観点から再利用することを前提として、ホットセル遠隔機器の概念設計を進め、必要なR&Dを整理する必要がある。</p>	
	放射性廃棄物の処分・再利用基準の検討	22		Q/大/産	<p>2020年から開始済。</p> <p>廃棄物の処理、再利用のためのホットセル施設では、一時保管(線量率と崩壊熱低減)、交換(溶断、溶接)・検査、減容(溶断)、廃棄物の一次保管などの処理が行われる。各処理工程におけるTを含んだ炉内機器の放射線管理を行うため、炉内機器のTインベントリを予測するコード開発に着手した。加えて、各処理工程で必要な遠隔機器の機能検討、遠隔機器による交換容易な炉内機器(BLKセグメントとBLKモジュールの取り合い構造)検討を進めている</p>		<p>上記の検討結果を受けて、「放射性廃棄物の処分・再利用基準の検討」を進めるために、既存のホットセル設計に対し、CR1後にはフィードバック設計を加速する必要がある。</p>	<p>ホットセルの各処理工程の設計は産学の支援が必須。予算措置および廃棄処分・利用基準に関わる専門家の補充が必要。</p>
	放射性廃棄物の処理・再利用基準の策定(法規制整備)	26		Q/産/学	<p>2023年開始に向けて準備中。</p>			
保守技術開発・蓄積	原子力施設機器取扱、検査	19	※	産	<p>放射化ダストの拡散を防止するためのキャスク、遠隔機器の保守保全のための除染、耐放射線機器の開発情報、炉内観察技術、トラブル時に状況確認のための移動ロボット技術などを調査し、核融合で必要になるR&Dを取りまとめた。</p>	順調		
	原子力施設機器取扱、検査	24		産	<p>2022年開始に向けて準備中。</p>		<p>ホットセルの設計データとしても有用なため、CR1後に継続して調査する必要がある。</p>	<p>福島第一原発の遠隔技術開発チームとの協力関係を整備する。</p>
	遠隔作業、検査・保守技術の調査	21		特/Q/産	<p>2020年から開始済。</p> <p>検査、保守技術の調査の一環として、構造側(真空容器、BLKセグメント、DIVなど)の健全性維持のための技術について検討中である。例えば、真空容器については、特殊な接手の取り扱い、非破壊検査(最新の溶接手法、検査手法の取り入れ)、維持検査不可能な箇所へのLBBの適用性などについて検討している。</p>			

課題名: 11. 計測・制御

本項目内のアクションは主に3つに分類でき、①制御パラメータに対する理論的な検討、②計測手法・装置の設計検討、③ITER・JT-60SAを利用した理論・計測手法・制御ロジックの検証である。いずれのアクションについても、CR1までに完了すべき事項を順調に達成している。しかしながら、CR2にむけて完了すべきアクションについては、検討項目が増えるとともに詳細化されるので、現在の体制では遅れが生じる恐れがある。また、照射試験のアクション完了には、中性子源による照射が必須である。

報告日: 令和2年12月15日

小課題名	アクション	期限	CR1までの要完了事項	実施期待機関	進捗状況	CR1への進捗度	進捗状況の評価	課題達成のために必要な措置
理論、既存・海外実験による予測、実験による検証	(15) 安定限界の理論特性の理解→(19)	19	※	Q/大/特	(Q・大・特)ベータ限界・ELM・VDE・Locked modeの理論特性を理解した。Greenwald密度限界については理論的に分かっておらず経験則としてそのまま採用している。	順調	本アクションは無事完了した。今後は、RWMの安定化やELMの抑制法といった制御方法の検討を行う。	
	(15) 被制御量の検討→(19)	19	※	Q/N/大/特	(Q/N/大)核融合研共同研究「環状核融合原型炉運転のため計装制御システム検討評価」(2012-2013年、代表者:松田慎三郎)にて、トカマク及びヘリカルそれぞれで測定すべきプラズマ諸量が定性的な観点から検討がなされ、報告書(NIFS-memo68)にまとめられた。	順調	被制御量の定性的な検討が完了している。	
	(17) 遠隔位置磁気計測での平衡精度のシミュレーション→(19)	19	※	Q/大	(Q)ITER、JT-60SAを対象としてシミュレーションが完了している。	順調	ITERやJT-60SAでシミュレーションが実施されよく検討している。原型炉を想定した検討は、次のアクション「遠隔位置磁気計測での平衡精度の検証」に引き継がれる。	
	安定限界、被制御量の検証	26		Q/N/大/特	アクションプランの記載にあるように、本件はITER・JT-60SAの実験を待つ。			
	ITER/JT-60SA等での制御実績(手法、成功率等)と応答時間のDB構築	35		Q/大/特	アクションプランの記載にあるように、本件はITER・JT-60SAの実験を待つ。			
	遠隔位置磁気計測での平衡精度の検証	26		Q/大	(Q)ITERが開発を進めているホールセンサーをJT-60SAで試験することを計画中		QSTとITER機構との共同研究が進んでおり、原型炉にも貢献可能な試験計画策定の下地が出来つつある。	QSTと特別チームが連携し、JT-60SAでの試験が原型炉にも役立つような計画を策定する必要がある。本テーマは大学の装置でも実験できる可能性があるため、共同研究の枠組みなども検討すべき。
	ITER/JT-60SA等における計測運用保守実績DB構築	35		Q/大/特	2027年より開始			
計測開発	(15) 炉設計と整合した候補計測分類と選定→(19)	19	※	Q/N/大/特	(Q/N/大)NIFS共同研究(発電実証原型炉の運転制御のためのシステムの検討)(2014-2016年、代表者:松田慎三郎)にて検討され、報告書(NIFS memo 80)にまとめられた。	順調	現時点で実施可能な選定は行われており、本アクションは完了している。さらなる検討は次のアクション「候補計測器の決定と開発」に引き継がれる。	
	(16) 照射試験も含む計測開発体制の構築→(19)	19	※	Q/N/大/TF	(Q)核融合中性子源設計グループとITERプロジェクト部計測開発グループとの間で計測制御機器照射試験モジュールについて検討が行われている。	順調	現時点で検討可能な照射試験は議論されており、本アクションは完了している。さらなる検討は次のアクション「候補計測器の決定と開発」に引き継がれる。	
	候補計測器の決定と開発	26		Q/N/大/産/特	(特)計測・制御ワーキンググループを立ち上げ中		予定通り2020年から着手すべきワーキンググループが立ち上げられている。	装置保護に関連した計測(表面温度計測、真空度、損耗モニター等)についても検討を開始すべき。
	計測器のプラズマ試験、照射試験、寿命評価	35		Q/N/大/産/特	先行アクション「候補計測器の決定と開発」の後に開始			

	候補計測器の開発と評価	35		Q/N/大/産/特	2027年より開始		
	計測器の仕様策定	35		Q/N/大/産/特	2030年より開始		
	計測保守の開発、試行	35		Q/N/大/産/特	2030年より開始		
運転点と裕度評価	(16) 運転基準点・運転許容範囲の仮設定	19	※	Q/N/大/特	(特)システムコードを用いて運転基準点を設定した。	順調	運転基準点として、システムコードで評価した0次元のパラメータセットを仮設定している。
	運転基準点・運転許容範囲の評価	26		Q/N/大/特	(Q/大/特)QST六ヶ所研核融合炉システム研究グループ(原型炉設計合同特別チーム)・プラズマ理論シミュレーショングループ、QST那珂研先進プラズマモデリンググループおよび共同研究(鳥取大学等)で検討を進めている。		QSTが中心となり順調に進捗している。共同研究の枠組みで大学の貢献も見られ、体制作りがうまく行っている。
	運転基準点・運転許容範囲の決定	35		J/N/大/特	2027年より開始		
オフライン予測	(16) プラズマ運転制御シミュレータの開発→(19)	19	※	Q/大	(Q)MHD平衡制御シミュレータMEGSや統合コードTOPICSを開発した	順調	シミュレーションコードの開発が完了している。
	プラズマ運転制御シミュレータの検証	26		Q/大/特	アクションプランの記載にあるように、本件はJT-60SAの実験を待つ。		
	プラズマ運転制御シミュレータの高度化	*		Q/大/産/特	2027年より開始		
実時間制御システムの開発	(16) JT-60SA用実時間制御開発	19	※	Q/大	(Q)2020年からのJT-60SA実験用に、プラズマ電流、プラズマ位置形状、プラズマ平均密度の実時間制御を開発	順調	JT-60SAの計画に合わせて順調に開発されている。電流分布制御など更なる実時間制御は、順次実装される予定。
	実時間制御の運用	35		Q/大	アクションプランの記載にあるように、本件はJT-60SAの実験を待つ。		
	第一原理計算、シミュレータ、実時間制御の相互検証と高度化	26		Q/N/大/特	2020年以降に開始		
	学習・推定ツールの開発	26		Q/N/大/特	2020年以降に開始		
	実時間制御の運用	35		Q/大	アクションプランの記載にあるように、本件はJT-60SAの実験を待つ。		
	統合コード、シミュレータ、実時間制御の性能(精度、成功率等)評価	35		Q/大/特	アクションプランの記載にあるように、本件はJT-60SAの実験を待つ。		
	実時間制御の仕様作成	35		Q/大/特	2030年より開始		

小課題名	アクション	期限	CR1までの要完了事項	実施期待機関	進捗状況	進捗度	進捗状況の評価	課題達成のために必要な措置
アウトリーチ活動ヘッドクォーター(HQ)設置による活動の推進	核融合OR活動HQの在り方の検討	19	※	TF/特/Q/N/F/学	(TF/特/Q/N)APに示す期限(2019年度末まで)より早い平成31年2月にHQを立ち上げ活動を実施した。	極めて順調	アウトリーチHQが立ち上がっている。	アウトリーチHQが立ち上がり、活動が始まっているため問題ない。
	核融合アウトリーチ活動HQの設置	20	※	TF/特/Q/N/F/学	(TF/特/Q/N)設置以降複数回会議を実施し、社会連携活動を実施した。	極めて順調	アウトリーチHQが立ち上がり、活動戦略の立案、活動の実施が進んでいる。	アウトリーチHQの活動が持続可能な形で継続できる支援策を考える必要がある。
	核融合アウトリーチ活動推進計画の立案	20	※	TF/特/J/N/F/学	(TF/特/J/N)JAXA、JAMSTEC等のアウトリーチ状況調査を実施後、アウトリーチHQ内で活動戦略を立案した。	極めて順調	アウトリーチHQが定めた活動戦略に基づき、アウトリーチ活動推進計画を立案し、三つのカテゴリー毎に活動計画を具体的に企画。	アウトリーチHQ活動内で、今後これまでの活動を評価し、今後の課題、目標設定を行うことが必要。
	核融合アウトリーチ活動の推進	35		HQ/TF/特/Q/N/F/学	(HQ/TF/特/Q/N)2019年より着手。アウトリーチ活動推進計画に基づき、三つのカテゴリー毎に活動を推進。			
アウトリーチ人材育成	アウトリーチ教育体制及びプログラムの検討	19	※	TF/特/Q/N/F/学	(HQ/TF/特/Q/N)アウトリーチHQ内においてアウトリーチ人材育成案が検討された。	極めて順調	インターンシップや高校生向けの研修ツアーなどが具体的に企画され、コロナ禍においてもオンラインを通してイベントや情報発信を実施。	本課題は広く影響を及ぼすテーマなため、アウトリーチHQだけでなく、TFも交えて、広く本課題について議論する機会を設ける必要がある。
	アウトリーチ教育の実施	35		HQ/TF/特/Q/N/F/学	開始に向け準備中。			
社会連携活動	核融合エネルギー開発ロードマップ/原型炉設計活動に関する社会連携活動の実施	19	※	TF/特	(HQ/TF/特)アウトリーチHQを中心に、各ステークホルダー(SH)に対する情報発信を活性化。	極めて順調	アウトリーチHQを中心に、文部科学省HPIに核融合のアウトリーチページを設置したり、核融合の入門書の出版といった具体的な活動が進んでいる。	アウトリーチHQが今後も無理のない活動を続けられるよう、支援の体制、システムの構築や、ネットワークの拡張を検討する必要がある。
	原型炉建設サイト選定に関する社会連携活動の実施	26		HQ/TF/特	開始に向け準備中。			

課題名: 13. ヘリカル

プラズマ実験、炉工学・炉設計、数値実験炉の各課題について、概ね順調に進展しており、トラス系に関する理解が進んでいる。今後は、LHDを用いたプラズマ実験の、炉設計や数値実験炉への反映や連携の強化により、信頼性の高い炉設計や、精度の高いシミュレーションモデルの構築が求められる。

報告日: 令和2年12月15日

小課題名	アクション	期限	CR1までの要完了事項	実施期待機関	進捗状況	CR1への進捗度	進捗状況の評価	課題達成のために必要な措置
	DIV部の熱負荷低減と粒子制御	25		N/大	不純物ガスバフや共鳴磁場を用いたデタッチメント放電に関する研究を実施し、デタッチメントプラズマの特性評価や同プラズマの長時間安定保持実験を行っている。		LHDを用いたDIV熱負荷低減運転に関する実験が進められている。	原型炉DIVへの寄与の観点からは、ヘリカルとトカマクのDIV磁力線構造の違いに着目した分析が必要である。
	輸送特性と高エネルギー粒子の閉じ込め特性	25		N/大	NBIの損失イオンや、重水素放電で発生する高エネルギー粒子の計測により、高エネルギー粒子の閉じ込め特性の研究をシミュレーション研究と並行して進めている。		LHDを用いた重水素実験が開始され、高エネルギー粒子研究が順調に進展している。	LHD実験を環状プラズマの体系化に発展させ、原型炉プラズマの予測に寄与することが必要である。
炉工学・炉設計	3次元解析によるヘリカル炉の成立性	19		N/大	小型強磁場化による早期実現炉概念の設計において、10万キロワット級発電炉を新たに対象としてシステムコードを用いた解析が進展。磁場配位の最適化を導入。	順調	LHDのグローバルな閉じ込め特性の相似性に基づく概念設計が進展。システムコードに多数の数値計算モジュールを組み込み、輸送と安定性の詳細評価による核融合利得の算出精度が向上。	LHD実験で得られた同位体効果を正確に取り入れた詳細な分析が必要。
	大型高磁場SCヘリカルマグネットの成立性	25		N/大	高温SC導体を用いたヘリカルコイル巻線の検討と要素開発が進展。大型高温SC導体の短尺サンプル試作と特性試験を実施。接続方式ヘリカルコイル巻線について接合技術の要素開発も進展。		核融合炉マグネットに適用できる本格的な高温SC導体の開発に見通し、世界をリード。大口径高磁場導体試験装置を用いた高磁場・温度制御における大電流導体試験を行うことが必要。	開発が進む3種類の高温SC導体から最適導体の選定と長尺導体の製作実証が必要。ヘリカルコイルの巻線性や接続巻線方式については、小型コイルを製作して実証する必要。
	先進液体BLKの要素技術	25		N/大	溶融塩BLK、および、液体金属BLKの設計検討と熱・物質流動試験装置を用いた要素試験が進展、特に、溶融塩中の高温磁場腐食試験、液体リチウム鉛のMHD圧力損失の特性試験で成果。		熱・物質流動試験装置を用いて新概念を含む様々な実験が進展、世界をリード。	研究の進展を発電炉概念設計に反映するとともに、その成果を開発研究にフィードバックさせる必要。
	低放射化構造材料開発研究	25		N/大	低放射化バナジウム合金を高純度化することにより、高温強度を維持しつつ接合性、加工性が格段に向上することを実証。異種金属との接合研究も進展。		低放射化フェライト鋼の代替となる低放射化構造材料の研究が進展。	バナジウム合金の大規模な製造による実証が必要。
	高熱流プラズマ対向機器・材料開発研究	25		N/大	タングステン・銅合金の先進的ろうづけ接合法の進展により、世界最高の熱除去性能を達成。機械的合金化法と高温静水圧プレス法の組み合わせによるナノ粒子分散銅合金の製作法も進展。並行して、易融金属やセラミックを用いたペブルDIVの流動基礎実験を遂行。		強度の高い銅合金の開発研究が進展、タングステンとの接合で画期的な成果。	タングステン・銅合金DIVについては、さらなる進展のために中性子照射特性を調べる必要がある。ペブルDIVについては、小規模検証実験が必要。
	ヘリカル炉概念設計	26		N/大	2018年度時点でまとまった100万キロワット級発電炉の概念設計もとに小型化・低コスト化を志向した検討を進め、10万キロワット級発電炉の概念設計活動を本格化。BLKとDIVの遠隔保守交換シナリオの検討が進展。		新たに開始した10万キロワット級発電炉の概念設計について、これまでの検討をもとに半年程度で報告書にまとめることが可能と評価。	BLKとDIVの遠隔保守交換シナリオについて中規模要素実験を行うことにより成立性を示すことが必要。
数値実験炉	物理素過程のシミュレーション	26		N/大	プラズマシミュレータ(スーパーコンピュータシステム)を有効活用して、LHD等ヘリカル系装置のコアプラズマから周辺プラズマ・プラズマ対向壁までを含む領域における平衡・安定性・輸送・加熱等の物理過程を扱うシミュレーションコード群や使用する物理モデル群の整備・拡張が進められ、シミュレーション結果とLHD等の実験装置の結果との比較によるモデルやコードの検証が行われている。		様々な現象に対するモデリング/シミュレーション研究が順調に進展している。	理論シミュレーション研究と実験研究とのより一層の連携強化が必要。
	複合物理結合・階層間結合シミュレーション	26		N/大	MHD・高エネルギー粒子・運動論的熱イオン・ハイブリッドシミュレーションコードが開発され、LHDやトカマクの高エネルギー粒子駆動不安定性の解析に応用されている。ヘリカル系プラズマの統合輸送コード(task3D)の開発が進められ、LHD実験の輸送解析や輸送モデルの検証に用いられている。統合輸送コードに組み込むため、ジャイロ運動論的シミュレーション結果に基づく乱流輸送モデルや最新の統計数値手法を応用した輸送モデルの開発が進められている。開発されたモデルやコード群を適用した磁場配位最適化研究が行われている。		様々な現象に対するモデリング/シミュレーション研究が順調に進展している。	理論シミュレーション研究と実験研究とのより一層の連携強化が必要。

課題名 14. レーザ方式

パワーレーザー及びレーザー方式で培った技術を原型炉開発に活用する研究が着実に増加している点が評価でき、CR1に向けてはおおむね順調である。原型炉開発共同研究の一環として、大学としては最大規模のT取扱施設を利用した固体DTの物性評価の研究が、計画より遅れたものの、開始されたことは注目に値する。また、複数の研究成果が、原型炉開発や核融合エネルギー開発を最終目標としていない研究のバイプロダクトであることは特筆すべきである。

報告日： 令和2年12月15日

小課題名	アクション	期限	CR1までの要完了事項	実施期待機関	進捗状況	進捗度	進捗状況の評価	課題達成のために必要な措置
物質・プラズマ相互作用の総合的理解	プラズマによる物体損耗の数値モデル化	27		C1/大/N	レーザー核融合研究で培った、放射流体シミュレーション及びプラズマ粒子シミュレーションを活用した物体損耗の研究が進んでいる。新たに、ディスプリブション制御のために投入される氷状ペレットと逃走電子の相互作用によるプラズマ形成過程の理解に向けた、量研機構との共同研究が開始された。		パワーレーザーの熱負荷によって物体が圧力を受けたり、損耗する過程はレーザー加工への応用もあり着実に進展している。レーザー核融合研究で培った理論・シミュレーションを積極的に原型炉開発に生かす活動が広がっていることが評価できる。	原型炉開発のための計算機リソースを、レーザー核融合及びレーザー核融合から原型炉への貢献に利用できる環境が整うと、研究が更に加速すると期待できる。
	プラズマによる物体損耗のモデル実験	27		C1/大/N	大阪大学工学研究科では、磁場を印加した状態で、レーザー照射による表面溶融層を形成し、溶融層に現れる不安定構造の観測を行った。トカマク実装置での溶融層挙動観測データと比較することで、磁場環境下での溶融層挙動の総合的理解が進んでいる。また、レーザー生成の高Zプラズマを用いて、炉壁で発生する不純物粒子の挙動観測のための分光データの取得も行われた。		熱勾配や高磁場が、壁面への過渡熱負荷で形成される溶融層の挙動に与える影響を理解するための希少なデータが蓄積されたことは高く評価できる。パルスレーザーによる高Zプラズマ生成とその分光計測も、欠落している原子分子データの補填に繋がる貴重なデータである。	レーザーを直接、熱負荷源として用いるだけでなく、レーザーで生成された高フラックスの電子、イオン、中性子ビームを利用したモデル実験も期待される。
	材料試験装置部詳細設計	20		C1/大/N	大阪大学レーザー科学研究所において、熱負荷試験を主眼においた装置設計を行っている。現状の熱負荷試験装置(サブミリ秒パルスガラスレーザー)をベースに、より高繰り返し・高出力の材料試験装置を想定した設計を実施している。	順調	既存の装置をベンチマークとした材料試験装置(レーザー装置)の設計へと移行したことは評価できる。より高繰り返し、高熱負荷の条件が達成可能な100~200 kW級のパルスレーザーの設計を実施しており、期限内に達成できる見込みである。	本試験装置は核融合炉壁の材料試験装置のみならず、パルス熱源・パルス圧力源として一般化した標準装置として広い応用領域が見込まれる。想定される応用領域の関係者を含めた開発が期待される。
液体金属壁開発	液体金属壁基礎実験装置詳細設計	20		C1/大/N	長岡技術科学大学にて、レーザー炉の排気システムとして液体金属拡散ポンプの検討が行われている。これとは別に、パルスパワー装置における電極への応用を目指して、液体金属流の制御実験が行われている。	順調	CR1に向け、他目的ではあるが液体金属流の制御実験が開始された点が評価できる。ただし、原型炉開発を指向した研究は予算の都合で開始されておらず、CR1後には加速が必要である。	液体金属については、核融合科学研究所及び東京工業大学で研究開発が行われている。それぞれの知見と合わせて原型炉に生かす活動が期待される。
ペレット製造・入射技術	ペレット製造法の詳細設計	19		C1/N/大/産	原型炉でのDTペレットの製造及び導入技術開発のため、固体DTの一様性の計測が、原型炉研究開発共同研究として開始された。このデータはペレット製造法の詳細設計に生かされる。	順調	予算の都合で、研究開始が遅れたものの、CR1に向け、原型炉研究開発共同研究の一環として研究活動が開始された。国内で初めて固体DTの製作と観測に成功するなど、物性評価、ペレット品質評価手法の確立が進んでいる点が評価される。しかし、CR1後には予算処置と共に加速が必要である。	レーザー科学研究所のT取扱施設の老朽化が顕著になっている。許可されているTの年間使用数量は2PBq(3か月 500 TBq、一日30 TBq)と国内大学施設では最大級であり、管理機器の更新によって、原型炉開発に向けた有効活用が期待できる。
	ペレット入射装置の詳細設計	19		C1/N/大/産	原型炉でのDTペレットの製造及び導入技術開発のため、固体DTの一様性の計測が、原型炉研究開発共同研究として開始された。これらのデータはペレット入射装置の詳細設計に生かされる。	順調	上記に加えて、原型炉研究開発共同研究として申請準備を進める中で、量研機構及び核融合研とペレット入射装置の設計に関する議論が交わされた点は評価できる。CR1後は詳細設計に向けての加速が必要になる。	量研機構及び核融合研とペレット入射装置に関する議論を継続することで、現在の共同研究で得られる成果の意義を高めることが期待される。
Tの貯蔵・ハンドリング技術	T貯蔵/供給系の詳細設計	18		C1/C5/N/大/Q	富山大学と大阪大学の共同研究として、Tをハンドリングし、レーザー実験用に供給する技術と装置の設計と開発が行われている。	順調	予算の制約により、原型炉開発で想定される大規模な取り扱いの研究ではない。少量ではあるが、T取扱の教育に貢献している点が評価される。予算制約内では順調と評価するが、CR1後の加速が必要である。	レーザー科学研究所のT取扱施設の老朽化が顕著になっている。許可されているTの年間使用数量は2PBq(3か月 500 TBq、一日30 TBq)と国内大学施設では最大級であり、管理機器の更新によって、原型炉開発に向けた有効活用が期待できる。
	T回収系の概念設計	18		C1/C5/N/大/Q	高濃度Tを含む廃棄物から、水素状Tを精製回収する技術の開発を、企業と共同して進めている。	順調	予算の制約により、原型炉開発を指向した研究ではない。核融合開発で培った技術が企業のニーズと合致したことで、共同研究としてT回収技術が進展していることは評価できる。	レーザー科学研究所のT取扱施設の老朽化が顕著になっている。許可されているTの年間使用数量は2PBq(3か月 500 TBq、一日30 TBq)と国内大学施設では最大級であり、管理機器の更新によって、原型炉開発に向けた有効活用が期待できる。
	T回収系の詳細設計	22		C1/N/大/Q	上記の通り、企業と水素状Tの精製回収の設計と開発が行われている。原型炉に向けたT回収装置の詳細設計には至っていない。		予算の制約により、原型炉開発を指向した研究には至っていない。	レーザー科学研究所のT取扱施設の老朽化が顕著になっている。許可されているTの年間使用数量は2PBq(3か月 500 TBq、一日30 TBq)と国内大学施設では最大級であり、管理機器の更新によって、原型炉開発に向けた有効活用が期待できる。

過酷環境下における計測技術	レーザー生成過酷環境の特性評価	18		C1/C5/N/大	超高強度レーザーをプラズマに照射することで発生する中性子、ガンマ線、X線、電磁パルス等、強烈なノイズ及びバックグラウンドが発生する環境下で動作するプラズマ計測技術の開発を行っている。モンテカルロコードを使った計算と計測結果の比較により、過酷環境の定量化が行われた。	順調	モンテカルロコードを用いて、高強度レーザーで発生する過酷放射線環境を定量的に計算できるようになった点が評価できる。	現在はレーザー実験のための計算に留まっている。原型炉開発への貢献には、原型炉研究者と協力した共同研究が立ち上がり、多種多様な計測と計算との比較が進むことを期待する。
	レーザー生成過酷環境の提供	35		C1/N/大	上述の過酷環境を克服するために開発した中性子検出技術を核融合科学研究所の重水素プラズマ実験の計測器に提供している。また、海外機関との共同研究で、過酷環境下で計測機器の動作確認を行う手法の研究が進んでいる。	順調	原型炉開発ではないが、磁場閉じ込め核融合プラズマ計測器の開発に、レーザー生成過酷環境が貢献している点は高く評価できる。上述の通り、原型炉研究者との共同研究により、原型炉で使用される機器の耐放射線試験等に利用されることが期待できる。	高強度レーザーで発生する放射線や電磁パルスは、原型炉のみならず、宇宙環境で使用される機器のテストなどにも応用可能であり、核融合技術の幅広い応用への貢献も期待される。