

核融合発電の実施時期の前倒しに関する検討を踏まえた
原型炉開発に向けたアクションプランの検討について

令和 5 年 2 月
原型炉開発総合戦略タスクフォース

1. はじめに

2050 年のカーボンニュートラル達成を目指して、核融合エネルギーに対する期待がかつてないほどに高まっている。米国では商業核融合発電の実現を加速するための 10 年戦略を策定することを宣言し、安全規制体系の整備に向けた動きを始めている。英国では国家核融合戦略を発表し、2040 年代の核融合発電の建設を目指すとしている。中国においては、ITER と同規模の工学試験炉 CFETR の建設を独自に進め、2030 年代までに原型炉に改造する計画を進めている。民間セクターにおいても、欧米を中心に我が国でも核融合スタートアップ企業に対する投資が活発化しているという状況にある。

我が国では、科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 核融合科学技術委員会（以下、「委員会」という）に設置された「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）」において、2017 年 12 月に「核融合原型炉研究開発の推進に向けて」を策定し、

- (1) 核融合原型炉の開発に必要な戦略、
- (2) 原型炉に求められる基本概念と技術課題解決のための開発の進め方、
- (3) 原型炉段階への移行に向けた考え方、

を示すとともに、同年 12 月に、原型炉の技術開発課題の項目毎に解決のためのアクションプラン（以下、「AP」という）を作成し、実効的なフォローアップと時宜を得た体制整備の進捗確認を実施することとした。2018 年 7 月には、「原型炉研究開発ロードマップ（一次まとめ）」を示し、①開発の重要度と緊急性、②国際協力の観点に基づいて整理した。

その後、原型炉の目標（①数十万 kW の電気出力、②実用に供し得る稼働率、③燃料の自己充足性）に見通しを得るための概念設計の基本設計が原型炉設計合同特別チームによってまとめられた。2021 年度委員会においては、核融合原型炉に関する第 1 回中間チェックアンドレビュー（以下、「C&R」という）の報告書が取りまとめられ、第 1 回中間 C&R の項目はおおむね達成されていると評価されたところである。この中で、核融合発電の実現時期の前倒しが可能か検討を深めること、前倒しを行う場合第 2 回中間 C&R 時点での達成目標や原型炉研究開発の優先順位を再検討することと指摘された。

本報告書は、タスクフォースにおいて核融合発電の実施時期の「前倒し」を検討した結果をまとめたものである。検討にあたっては、以下のような考え方で進めた。

- まず、前倒しの検討の前提となる原型炉計画の目標や実施時期の変更について議論した。

- 続いて、現行 AP の項目である 0.炉設計、1.超伝導コイル、2.ブランケット、3.ダイバータ、4.加熱・電流駆動システム、5.理論・シミュレーション、6.炉心プラズマ、7.燃料システム、8.核融合炉材料と規格・基準、9.安全性、10.稼働率と保守、11.計測・制御、12.社会連携に加え、新たに「サイト整備」を取り扱って、前倒しに伴う変更点を議論した。なお、13.ヘリカル方式、14.レーザー方式については、前倒しによる変更がないため、今回は対象としなかった。
- 最後に、前倒しに対応する第 2 回中間 C&R 及び AP の見直しを行い、加えて原型炉研究開発ロードマップの更新について検討した。

2. 核融合発電の実施時期の前倒しの検討における第 1 期の目標設定と実施時期

前倒しでは、2040 年代の原型炉運転開始を仮定し、そこから概念設計、工学設計、建設、組立の期間をバックキャストして設定した。この場合、段階的に原型炉の性能を上げる（運転領域を広げていく）として、表 1 に示すように第 1 期（発電実証）と第 2 期（定格発電実証）を設定した。第 1 期は、第 2 期目標を速やかに達成できるようにしつつ、増殖ブランケット（BLK）による発電を早期に実証する「マイルストーン」とした。この新たに設定した『低出力&パルス運転』に必要な技術開発を加速・重点化することで、2035 年の ITER 燃焼実験の直後から、原型炉建設に着手、10 年後に原型炉による発電実証を目指すことが可能となり、現在の計画から 5 年程度の前倒しの可能性が示された。

表 1 前倒しにおいて設定した原型炉の第 1 期及び第 2 期の目標

	第 1 期目標	第 2 期目標
概要	ITER からの技術ギャップが小さい『低出力&パルス運転』による早期発電実証（BLK 発電の早期実証）	商用炉段階に向けた『定格出力&連続運転』による発電実証
電気出力	・パルス運転（電子サイクロトロン共鳴加熱 ECH が主加熱） ・正味（パルス中）の電気出力の実証	・連続運転（中性粒子入射加熱 NB による電流駆動&高自発電流割合） ・数十万キロワットの安定した電気出力
稼働率	保守シナリオの実証	実用に供し得る稼働率
TBR	三重水素自己充足性（ $TBR \geq 1$ ）の確認	三重水素自己充足性（ $TBR \geq 1$ ）の実証

3. 核融合発電の実施時期の前倒しの検討

前項の検討結果を基に、前倒し AP を検討した。まず、検討の基本となる項目である「0.炉設計」において、下記のような前倒しの実施が必要となることが示された。

- ・ 移行判断までに製造設計を完了するため、ITER 技術ベースに概念設計段階で高水

準まで進め、炉本体設計を3年短縮する。

- コスト評価、候補地選定、建設サイト評価・選定を2-3年前倒して実施し、製造設計の開始前に完了させる。
- 建設サイト評価に必要となるため、安全規制法令及び安全評価についても3年前倒す。
- 中性子照射データの取得のために、第1期（パルス運転）においてもデータベース更新を継続する。

以上の炉設計の前倒しを基に、各項目の前倒しを検討したアクションプラン構成表及びアクションプラン項目別解説を示す。

これまでのAPと同様に、アクションプラン構成表はアクションプランを表形式で示したものであり、アクションプラン項目別解説は項目別の補足説明を附属するものである。本検討の中で示された項目別の特に留意すべき点について以下に列記する。

- 0.炉設計： 原型炉の立地要件が設計において重要であり、候補地候補選定を前倒しする必要がある。
- 1.超伝導コイル： 超伝導導体の試験をはじめとする一連の試験の前倒しとそれに必要な試験施設の整備が必要である。
- 2.ブランケット： 新たに採用する保護リミターと、増殖ブランケットからタービンへ繋がる発電システムを開発・整備することが重要である。
- 3.ダイバータ： 第1期目標に対応すべく銅合金系冷却ユニットを採用するなど、前倒しにより大きく変更する一方、第2期目標に向けて低放射化フェライト鋼 F82H を用いる冷却ユニット開発を実施することが重要である。
- 4.加熱・電流駆動システム： 第1期目標に対応すべく ECH を主加熱とするなど、前倒しにより大きく変更する一方、第2期目標に向けて NBI 加熱の定常化に関する研究開発を実施することが重要である。
- 5.理論・シミュレーション： ITER などの解析及び原型炉の設計のために、核融合研究開発用のスパコンが必要である。
- 6.炉心プラズマ： JT-60SA は統合試験運転中に超伝導コイルの接続部が破損し初プラズマの生成が遅れているが、これから得られた経験を ITER や原型炉へ水平展開して有効活用することが重要であることが指摘された。
- 7.燃料システム： 許認可データ取得に必要な三重水素大量取扱施設の段階的な整備が必要である。また、第2期目標に対応する燃料サイクルシステムの研究開発を実施することが重要である。
- 8.核融合炉材料と規格・基準： 第2期目標に対応するように核融合中性子源 A-FNS 建設時期を後ろ送りとする一方で、第1期目標に対応できる中性子照射場を確保し、十分な統計データを得る必要がある。三重水素の閉じ込め境界である炉構造（真空容器及び配管）と構造規格の重要性を認識し、新たに小項目として追加した。

- 9.安全性：核融合炉の安全性に関する世界的な対応の加速を見つつ、安全規制法令や安全設計に関する前倒しが必要であることが指摘された。
- 10.稼働率と保守：項目に変更はないものの、必要な検討の前倒しの重要性が指摘された。
- 11.計測・制御：必要な検討の前倒しのみならず、常に最新の知見を取り込んで行く重要性が指摘された。
- 12.サイト整備：サイト選定に関わる諸活動の前倒しが極めて重要であると認識され、新たな項目として加えた。
- 13.社会連携：核融合発電の実施時期の前倒しには社会との連携活動の充実とともに、ますますその重要性が増すことが指摘された。

これらを総合的に検討した結果、項目別の留意事項、今後検討すべき事項などの意見は上記のように出されたが、原型炉の第1期目標の達成に必要な技術開発を加速・重点化することによって、2035年のITER燃焼実験の直後から原型炉建設に着手、10年後に原型炉発電実証に至ることとなり、現在の計画から5年程度の前倒しが可能であると結論付けた。

4. 核融合発電の実施時期の前倒しを受けた第2回中間 C&R 及び原型炉研究開発ロードマップの見直しと今後の課題

核融合発電の実施時期の前倒しを受けた第2回中間 C&R の見直しについては、以下の点が指摘された。第2回中間 C&R の見直しの際には、これらの点を考慮すべきである。

- ・ 「原型炉段階への移行判断」の前に開始する必要がある、かつその後の変更が難しい項目などには、第3回中間 C&R を設けるべき。ただし、第3回中間 C&R の具体的な項目は、第2回中間 C&R の実施を受けて検討すべき。
- ・ 「③ITER による統合化技術の確立」の「第2回中間 C&R までの達成目標」は、「ITER の運転開始」と「ITER の機器製作・据付・調整に関わる統合化技術の取得」の2つの記述をまとめて簡潔明瞭な表現にすべき。
- ・ 「④原型炉に関わる材料開発」の「第2回中間 C&R までの達成目標」は、核融合発電の実施時期の前倒しに対応した核融合中性子源の記載にすべき。また、定常化のための材料開発の C&R について、「原型炉段階への移行判断」の項目を見直すべき。

核融合発電の実施時期の前倒しを受けた原型炉研究開発ロードマップの見直しについては、以下の点が指摘された。原型炉研究開発ロードマップの見直しにあたっては、これらの点を考慮すべきである。

- ・ 第3回中間 C&R の実施についての記載を盛り込むべき。
- ・ 「サイト選定」について記載すべき。
- ・ 「②JT-60SA(BA 活動の一部)」の BA 活動(フェーズ II)の矢印や各段階は、現状に合わせた記載にすべき。

- 「③核融合中性子源」は、核融合発電の実施時期の前倒しに対応した記載にすべき。
- 「④原型炉研究開発」の第4段階の「社会受容性と経済性を見通しを得た工学設計の完了」は、核融合発電の実施時期の前倒しに対応した記載にすべき。
- 「④原型炉研究開発」では、2035年の「原型炉段階への移行判断」の前に、製造設計を行う旨の記載を盛り込むべき。
- 「⑧社会連携活動」の「原型炉に向けた社会連携活動の実施」は、核融合発電の実施時期の前倒しに対応した記載にすべき。

今回のアクションプランの改訂は、核融合発電の実施時期の前倒しを受けたものであり、2045年の原型炉による発電実証（第1期目標）が技術的に可能であることを示す。しかしその前提として、アクションプランの時系列展開において最大のクリティカルパスであるITER計画の着実な進展に努めるとともに、責任をもって実施することが期待される各機関・組織がアクションプランの各項目/小項目を着実に実施できるようにする必要がある。また、今回のアクションプランの改訂では、責任をもって実施することが期待される各機関・組織として新たに原型炉の実施事業者を加えたが、それには事業化に不可欠な実施事業者の設立に向けた体制づくりの議論の加速とともに、適切な社会連携活動を実施して原型炉建設に対する国民理解を得ることが極めて重要である。加えて、核融合エネルギーへの投資が活発化していることも踏まえ、スタートアップ企業のみならず、民間セクターにおける幅広い活動を取り込んで行くことも重要である。