



サロン

核融合原型炉開発に向けた 新推進方策・ロードマップの策定にあたり

Establishment of a New Promotion Policy and a Roadmap toward Fusion DEMO Reactor

松浦重和, 小川雄一¹⁾, 岡野邦彦²⁾, 上田良夫³⁾, 秋山毅志⁴⁾

MATSUURA Shigekazu, OGAWA Yuichi¹⁾, OKANO Kunihiko²⁾, UEDA Yoshio³⁾ and AKIYAMA Tsuyoshi⁴⁾

文部科学省 前研究開発戦略官, ¹⁾核融合科学技術委員会主査, ²⁾原型炉開発総合戦略タスクフォース主査,

³⁾文部科学省科学官, ⁴⁾文部科学省学術調査官

(原稿受付: 2018年9月9日)

文部科学省核融合科学技術委員会では、核融合原型炉開発に向けた新たな推進方策として、「核融合原型炉研究開発の推進に向けて」を平成29(2017)年12月18日に策定した。併せて、これを具現化するためのアクションプランを作成すると共に、それを支える人材育成・確保についても検討した。さらに、開発の重要度と緊急性および国際協力の観点に基づいた「原型炉研究開発ロードマップ」を取りまとめた。ここでは、核融合原型炉開発に向けて核融合科学技術委員会が策定した新たな推進方策やロードマップなどの概要について紹介する。

Keywords:

MEXT, fusion DEMO reactor, new promotion policy, roadmap, action plan, human resource, all Japan

1. はじめに

平成4(1992)年6月、原子力委員会は「自己点火条件の達成及び長時間燃焼の実現並びに原型炉の開発に必要な炉工学技術の基礎の形成」を主要な目標とする「第三段階核融合研究開発基本計画」(以下「第三段階計画」)を策定した。その後、研究の進捗やITER(国際熱核融合実験炉)計画実現に向けた政府間交渉の進展等に鑑み、同委員会核融合専門部会は、ITER協定発効から2年先立つ平成17(2005)年10月、「今後の核融合研究開発の推進方策について」(以下「推進方策」)[1]を策定し、今後の研究開発の基本的な進め方や第三段階計画における研究開発の内容についての見直しや詳細化を行った。

推進方策の策定から約10年が経過し、その間、国内外で超伝導コイルのプラズマ装置の開発・運転が進展するなど研究開発の進展が見られるとともに、国内でも産学官のオールジャパン体制として原型炉設計合同特別チームが平成27年6月に結成されるなど、第三段階計画から原型炉の実現に向けた次の段階への移行を現実的に見据える時期に入ってきた。こうしたことから、文部科学省科学技術・学術審議会核融合科学技術委員会(以下「核融合科学技術委員会」)の前身である同審議会原子力科学技術委員会核融合作業部会の要請により、原型炉開発のために必要な技術基盤構築の在り方を我が国の核融合コミュニティの総意を踏まえて検討するための「合同コアチーム」が発足し、平成26年7月に報告書が取りまとめられた。また、核融合科学技術委員会においても、同委員会に原型炉開発総合戦略

タスクフォースを設置し、原型炉に必要な技術課題を分類し、各課題の発展と課題間の連関を整理・分析するため、平成28年2月に最初の「原型炉開発に向けたアクションプラン」(以下「アクションプラン」)を策定した。一方、ITER計画は、推進方策策定後にその仕様が一部見直され、さらに、設計や建屋建設の遅延によって初プラズマが当初計画より7年遅れの2025年となる計画が平成28年11月にITER理事会で暫定合意される等、推進方策策定時の前提条件に変化があったと認められる。

こうした昨今の環境変化を踏まえると、最新の研究開発の進捗状況とITER計画の最新のスケジュールを始めとする内外の状況を考慮し、また、広く我が国核融合コミュニティの意見を反映させた原型炉研究開発の在り方を新たに示すことの必要性が高まっていた。しかしながら、第三段階計画や推進方策を策定した原子力委員会は、東日本大震災と東京電力福島第一原子力発電所事故を受けてその在り方が見直され、核融合については科学技術に関するものとして文部科学省が中心的に担うべきとされたことから、同省に置かれた核融合科学技術委員会は、我が国の原型炉に向けた新たな政策を示すため、平成28年11月より調査審議を開始し、平成29年12月18日、「核融合原型炉研究開発の推進に向けて」(以下「新推進方策」)を策定した(併せて、アクションプランも改定)。新推進方策は、その策定に当たって核融合コミュニティの総意を踏まえて検討された合同コアチーム報告を基本とし、さらに、コミュニティ内外の声を可能な限り取り入れるためにパブリックコメントも

corresponding author's e-mail: ogawa@ppl.k.u-tokyo.ac.jp

実施した。こうした策定経緯から、新推進方策が核融合コミュニティ内外から支持され、原型炉の実現に向けた道標となることが期待される。

新推進方策やアクションプランは、原型炉に向けた必要な取り組みや解決すべき技術課題が網羅的に整理されているが、限られたリソースの中で原型炉開発をタイムリーに進めるためには、さらに、優先的に実施すべき課題を抽出し、予算要求等に反映していくことが求められている。そのため、核融合科学術委員会は、課題抽出の際に特に重要となる、①開発の重要度と緊急性、②国際協力の観点に基づいて、「原型炉研究開発ロードマップ」(以下「ロードマップ」)を検討し、平成30年7月に一次まとめとして整理した。ロードマップ一次まとめにおいては、産学官によるオールジャパン体制の強化についての方策を取りまとめるとともに、ロードマップとは別途検討されてきた長期的な人材育成・確保の提言についても触れ、産学官一体となった取り組みの必要性を指摘した。

2. 「核融合原型炉研究開発の推進に向けて」(新推進方策)[2]

核融合科学技術委員会は、「今後の核融合研究開発の推進方策について」(平成17年10月原子力委員会核融合専門部会)が策定されて10年以上が経過すると共に、ITER計画は、計画遅延等の様々な困難を乗り越え、2025年の初プラズマに向け各極分担機器の調達やITERサイトでの建設・組立が着実に進捗しており、幅広いアプローチ(BA)活動では、超伝導トカマク装置JT-60SAや国際核融合材料照射施設(IFMIF)のための工学実証・工学設計活動(IFMIF/EVEDA)での原型加速器の完成が見通せる段階まで至り、次のフェーズに向けた議論が日欧間で進んでいる、など国内外における核融合研究の着実な進展を鑑み、今後の原型炉研究開発の在り方について、新たに取ることが必要であると判断し新推進方策を策定した。

新推進方策をまとめた報告書ではまず、昨今のエネルギー情勢と社会的要請の変化を鑑み、今後の核融合エネルギー開発において留意すべき点について思考した。東京電力福島第一原子力発電所事故以降、原子力に対する国民の信頼は揺らぎつつあるという点を踏まえ、核融合炉も中性子や放射性物質を扱う点では同じであるため、上記事故は教訓として学ぶべきである。一方、核融合は核分裂と異なる原理に基づいた固有の安全性を有する点を活かして、国民の信頼が得られる核融合原型炉を設計しなければならない。また他の温室効果ガス排出削減技術と比べた経済合理性を重視しつつ、核融合エネルギーが経済発展と温室効果ガス排出の相関を変え得る革新技術として位置づけられるよう、その研究開発を進めるべきである。

原型炉に向けた核融合技術の基本的な開発戦略では、現在最も開発段階の進んでいるトカマク方式を炉型とし、第四段階への移行条件を満足させる技術課題の達成を、産学官の核融合研究開発コミュニティ全体の共通目標と設定した。なお原型炉では安全性を大前提とし、炉工学技術の技術的成立性を実証するとともに、実用化時の経済性を情勢

に応じた現実的なものとする研究を行う。また併せて、研究開発の加速と課題達成を促すため、一定の多様性を持った総合的な取組を進めるべく、相補的・代替的なヘリカル方式・レーザー方式、革新的概念の研究を並行して行う。

原型炉に求められる基本概念については、核融合エネルギーの実用化に備え、1.数十万kWを超える定常かつ安定した電気出力、2.実用に供し得る稼働率、3.燃料の自己充足性を満足する総合的なトリチウム増殖を実現することを原型炉の目標とする。そのため留意すべき設計要件として、1.ALARA(As Low As Reasonably Achievable)、2.受容され得る建設コスト、3.柔軟なブランケットとダイバータ設計を、また運転開発期の要件として、1.熱・粒子制御とプラズマ制御、2.実用に供しうるメンテナンスシナリオと稼働率、3.ブランケットとダイバータの高性能化、の実現が挙げられる。

これら原型炉開発に求められる技術課題を解決していくための研究開発の進め方について、以下のような方針を提言している。

○開発計画の立案に当たっては、技術の整合性だけでなく、プラントの建設・運用費や運用シナリオなども考慮した上で、確定した技術仕様に基づいて課題を挙げ、その開発目標を設定する。開発計画は、超伝導コイルなどの項目毎に技術課題を分類し、「アクションプラン」として各課題の発展と課題間の連関を整理・分析する。

○これら技術課題を着実に解決するには、産学官のオールジャパン体制を構築して研究開発を強化する必要がある。それを実効的なものにするため、六ヶ所サイトを原型炉開発に向けた中核的ハブ拠点として発展させる。

○長期に亘る研究開発を推進するため、ITER計画・BA活動や先進的な学術研究を有機的に連携させ、原型炉研究開発に必要な人材を産学官の緊密な連携のもと育成する。他分野からの参画を促すと共に、人文社会系も含めた様々な連携を通し、複合的視点を持った多様な人材から成る炉設計体制を構成する。

○国際協力を推進するに当たっては、我が国単独で進める課題と国際協力で進める課題を戦略的・合理的に区分する。また、国際貢献の観点から、世界の原型炉開発の中で主導的な役割を果たす。

○固有の安全技術が求められる核融合原型炉の安全設計ガイドラインと安全要求基準を、国民と環境の視点に立ち早期に策定する。その際、広い分野の国内外の専門家と協力して、総合的な核融合安全性研究を推進すべきである。

○技術基盤構築の体制を整備するに当たり、アクションプランを策定するとともに、開発の優先度やマイルストーン、国際協力項目なども含めて総合的に開発工程をまとめ上げた原型炉開発ロードマップを策定する。

我が国は核融合エネルギー開発を段階的研究開発として推進してきており、現在は核融合炉の科学的実証・技術的実現性をめざした第三段階計画にあり、その中核となる実

験炉として ITER 計画を国際プロジェクトとして推進している。引き続き、技術の実証・経済の実現性をめざして、原型炉を中核とする第四段階計画へと移行していくにあたり、その判断基準となる基本的な考え方および具体的な時期について以下のようにまとめた。また併せて、下記のチェックアンドレビュー（以下 C&R）での達成目標、および原型炉への具体的な移行判断条件も取りまとめた[3]。

○原型炉への移行判断は、ITER の核融合運転（DT）が見込まれる2030年代に行う。原型炉段階に移行する際には、実用炉段階で経済性を達成できる見通しを得ておく必要がある。

○中間 C&R を見直し、2 回に分けて実施する。

- (1) JT-60SA の運転が開始する2020年頃
- (2) ITER のファーストプラズマが予定される2025年から数年以内（原型炉に必須のコンポーネントの工学開発活動の開始の適否も判断）

○アクションプランの時系列展開、及び中間チェックアンドレビュー項目と時期は、コミュニティ内外での議論のもと、ITER 計画の進捗状況や BA 活動の成果を踏まえて随時タスクフォースが見直していくこととする。

○核融合に対する国民の信頼が得られ、選択され得るエネルギー源とするため、アウトリーチ活動を戦略的に推進する。そのため、日本全体を統括して活動する。

本報告書では一貫して、核融合エネルギー開発には核融合コミュニティ外との協働や広く社会との相互理解が不可欠であるとの認識に基づいてまとめられている。したがって、核融合分野以外の技術・学術分野との連携強化を、また人文社会系との交流や人材育成の必要性を訴え、さらにはアウトリーチ活動のより一層の促進を踏まえた社会との連携強化を、多くの技術課題と同等に C&R 項目の一つに加えた点が大きな特徴であると言えよう。

3. アクションプラン[4]

原型炉開発に向けたアクションプランは、原型炉設計を含めた15の原型炉開発の技術分野から構成されている。原型炉設計は開発全体を統括する意味から0番とし、以後、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・計算機シミュレーション、6.炉心プラズマ、7.核融合燃料システム、8.核融合炉材材料と規格・基準、9.安全性、10.稼働率と保守性、11.計測・制御、12.社会連携、13.ヘリカル方式、14.レーザー方式となっている。13と14については、それぞれの方式の原型炉開発ではなく、トカマク原型炉への学術的または工学的寄与が可能な項目が記載されている。そうはいっても、ヘリカル方式については、ほとんどの研究開発はトカマク原型炉の開発にもつながる。一方、レーザー方式についてはレーザー方式特有の開発項目がある。それらはトカマク原型炉のためのアクションプランには含まれないのではあるが、レーザー方式の全体像も見えるように、15番に「参考」としてレーザー方式特有の開発項目も添付されている。

技術項目はいずれもなじみあるものと思うが、12番に社会連携が各技術項目と同等の重要度で記載された点には注目されたい。社会への説明責任を果たすと同時に、社会のニーズや動きを正しく把握し、一般社会（他学界も含む）との連携を強めていかなければ、核融合原型炉の建設はできないとの認識のもとに導入された非常に重要な項目である。

アクションプランは、全体では18ページにわたる規模で示されており、ここでそのすべてを掲載することはできないため、全体を統括する点で重要な「炉設計」の項目におけるアクションプランの例を、**図1**に示しておく。アクションプランは以下4つの期間ごとに示されている。

① 2015年～2020年頃

これはすでに実施中、またはすぐに開始すべきアクションである。2020年頃に第1回 C&R を実施して進捗を確認する。

② 2020年頃～2025年頃

2025年に予定される ITER の運用開始から数年以内の実施される第2回 C&R までに確認すべき、または完了すべきアクションが示されている。

③ 2025年頃～2035年頃

ITER の DT 燃焼実現の確認後に行われる原型炉建設への移行判断までに実施／完了しておくべきアクションが示されている。2025年頃以後、一部の中規模 R&D は順次実施に移していく必要がある。

各項目の前にある括弧付の数字は開始年を表し、それに続く略号は責任をもって実施することが期待される機関等を示す。略号と機関等の対応は図の下部に示した。項目の後に示される括弧付の数字は、その開発項目の終了期限である。

2035年頃に予定される ITER の燃焼確認後、速やかに第四段階への移行判断を行う必要があるが、その移行には、ITER の自己点火実験の成功と、国内に建設中の超伝導定常トカマク JT-60SA による成果の達成が必須である。加えて、いくつかの工学実証のための設備も必要である。大きなものだけを述べると、現在、A-FNS として検討が進行中の加速器型の中性子照射試験装置は2020年代中盤には建設を判断する必要がある。また、ダイバータの高熱負荷を試験する設備も必要とされている。2030年代に入ると、大量トリチウムの取扱設備も必要になる。原型炉の建設判断前には、その保守システムを実機大で実証確認する設備も必要である。一方、ITER や JT-60SA の成果を原型炉に適用するためには、統合シミュレーションコードの実現も含めた理論・シミュレーションの大きな進展も必須である。

今後、これらの開発を遅滞なく進め、2040年前後には原型炉の建設に入りたい。原型炉の運用開始後は、10年程度で、安定した電気出力、商用化に十分な設備利用可能率（Availability）、持続運用可能なトリチウム増殖率、そして保守を含めた十分に信頼性の高い運用性の実現を示し、商用化への道を開くのが原型炉の役割である。

合同特別チームの
活動フェーズ

	概念設計の基本設計	概念設計	工学設計
	2015	2020頃	2025頃 2035頃
0.炉設計	概念設計		工学設計
	物理・工学設計ガイドライン構築		サイト評価 建設向け設計 建設地候補選定 ▲
	安全確保方針案の策定	安全要求・解析・評価ならびに法令準備	安全法制の整備と候補サイトでの安全評価
	物理・工学・材料データベース構築		JT-60SAや材料照射成果にそったDB更新
炉概念と建設計画	(15)特:物理・工学ガイドライン →(19) (15)特:基本概念設計 →(19) (16)特/TF:燃料サイクル戦略(26) (17)Q/N/大/特:統合シミュレータ(26) (18)特/産:コスト評価(31)	(20)特/産:概念設計 →(26) ----->(16)特/TF:燃料サイクル戦略(26) ->(17)Q/N/大/特:統合シミュレータ(26) (23)特/Q/F:目標プラズマ性能更新 →(28) ----->	(27)産/特:炉本体設計 →(35) ----->(18)特/産:コスト評価(31) (29)国/TF:候補地選定 →(31) (32)国:建設サイト評価・選定 →(35)
機器設計	(15)特/Q:SC概念の基本設計 →(19) (19)特/Q:原型炉TBM目標 →(19) (17)特/産:BOPを含む機器構成案→(19)	(21)特/産:BOP概念設計 →(26)	(サイト評価向け) (27)産/特:プラント・建屋・機器設計 →(31) (27)学/特:規格・基準 →(31) (規格基準とサイト候補決定後) (32)産/特:プラント・建屋・機器設計 →(35)
安全確保指針	(16)特/産:安全確保方針案 →(19)	(20)特:安全要求・解析・評価(31) (20)特/産:原型炉プラントの安全上の 特徴整理→(26) (20)TF/特:安全規制法令予備検討 →(26)	----->(20)特:安全要求・解析・評価→(31) (27)国/TF:安全規制法令 →(35) (32)国:安全評価 →(35)
物理・工学・材料DB	(16)Q/大/F/特:原型炉物理DB(26) (16)Q/大/F/特:工学・材料DB(26)	----->(16)Q/大/F/特:原型炉物理DB(26) ----->(16)Q/大/F/特:工学・材料DB(26)	(27)Q/特:物理・工学DB更新 →(31) JT-60SAを反映 (32)Q/特/産:材料DB更新 →(35) 14MeV重照射データを反映

国：政府
特：原型炉設計合同特別チーム
Q：量子科学技術研究開発機構(核融合)
N：核融合科学研究所
大：大学
産：産業界
F：核融合エネルギーフォーラム

C1～C5：大学研究所・センター等(右記)
学：学協会
I|J：ITER機構(全日本としての関与)
物：物質・材料研究機構
QW：量子科学技術研究開発機構(関西研)
TF：原型炉開発総合戦略タスクフォース
HO：社会連携活動ヘッドクォーター

大学研究所・センター等
C1：大阪大学レーザー科学研究所
C2：京都大学エネルギー理工学研究所
C3：筑波大学プラズマ研究センター
C4：九州大学応用力学研究所
C5：富山大学水素同位体科学研究センター

図1 アクションプラン、炉設計の例。

ここでは、非常に簡略にアクションプランを説明したが、詳細については、参考文献[4]の「原型炉開発に向けたアクションプラン」と「項目別解説」をぜひ参照されたい。同サイトに直接行くためのQRコードも示しておく。



4. 人材の育成・確保[5]

第2章で述べた原型炉研究開発を着実に推進するには、それを担う人材を連続的かつ長期的に育成・確保しなければならない。そこで、報告書「核融合原型炉研究開発の推進に向けて」(平成30(2018)年3月)では、今後の原型炉時代が必要とされる人材像と人員数に対し、人材育成環境の現状を踏まえた上で、望まれる人材育成・確保の環境とそれを実現するための課題を整理し、課題を解決するための具体的な取り組み案を示した。

原型炉で必要となる技術は、高度な上に広範囲に及ぶだけでなく、それらが有機的に統合されて初めて原型炉として機能する。そのため、プロジェクトをリードする人材は、個々の技術開発能力だけでなく、全体を俯瞰して個々の技術を統合する能力が求められる。また、原型炉に向けた研究開発の柱であるITER計画・BA活動は、いずれも国際プロジェクトで実施されている。そのため、国際的にもリ-

ダーシップを取り、共創力を発揮して相乗効果を生み出すことが求められる。ここで、技術的能力と共に、核融合エネルギー開発の意義を国民に伝える対話能力をも養うことが必要であり、人材育成の両輪なることを強調したい。多くの候補から開発すべきエネルギー源を選択するのは国民であり、核融合が選択されうるエネルギー源となるには、社会へ分かりやすい説明を行い、双方向で理解を深めることが必須であるからである。これらの人材を育成する環境を整える上で、大学・大学院での核融合研究・教育、人材流動性、そしてアウトリーチの3つのポイントが挙げられる。

【大学・大学院教育】 大学・大学院は、人材育成の起点とすべきものである。博士課程学生を増加させるべく、魅力的な学術研究を推進できる基礎研究・教育環境の維持・拡充が必要である。総合工学である原型炉開発を進めるためには、多様な専門を習得するプログラムの構築や、今後重要となるものづくり・システム統合を経験するための産学の連携強化などが挙げられる。これに対する具体的な取り組み例として、大学に留まらない分野横断的でグローバルな専門教育システムの構築が望まれる。国内外大型装置との教育連携は、充実した設備利用に加え、交渉能力など将来組織でリーダーシップを取るための訓練機会となる。ITER等の海外装置であればグローバルな視点も育まれる

ため、既存の制度の有効利用や更に強固な連携の枠組み構築が望まれる。原型炉に向けては、研究者もシステム統合の視点を持ちながら要素技術開発していくことが求められる。そのため、大学院教育でメーカーの視点でのシステム工学を学ぶことは非常に有益であり、企業の技術者・OBらによる大学院教育が期待される。一見非効率にも思えるが、核融合分野の博士課程進学者を増やすためには、核融合の博士取得者が核融合に限らず広く産学官で活躍できることが重要である。博士号取得者の企業就職で重要な、両者のマッチングを図るため、学会等が企業と学生のマッチアップの場を提供することなどが期待される。

【人材流動性】 ITER 計画や BA 活動などの国際的開発研究は、国内の学術研究や民間も含む技術開発研究と連携し、知の循環システムとして互いを発展させるべきである。これらは、人材育成の面でも極めて重要なプラットフォームであり、産学はそれらを有効かつ戦略的に利用すべきである。それを実現させる上で、ITER 機構を含む産学で広範囲な人材流動性の構築と、魅力的なキャリアパスの確立が課題である。取り組み案として、ITER 計画への参画を促すためには、大学院生、若手、シニア等の階層毎に戦略を立てた人材派遣制度の設計が必要と考えられる。制度設計において、任期終了後のキャリアパスにも配慮することは、ITER で得た貴重な知見・経験を原型炉設計を含む国内核融合研究に十分活かす上で重要である。また、他分野の即戦力を呼び込むため、効果的な広報も必要である。総合工学である核融合にとって、関連分野と接点を持つことは、新たな技術や視点を持つ人材の確保につながる。特に原子力分野は、技術的な共通点が多いことのほか、人材交流を通して即戦力となる人材が得られることが期待される。

【アウトリーチ】 アウトリーチ活動は、核融合が国民に選択されうるエネルギーとなるためだけでなく、核融合研究開発に将来関与する人員の増加、及び継続的・安定的な人材輩出の観点からも不可欠である。具体的な取り組みとしては、核融合研究開発全般に関する視点でアウトリーチを行うヘッドクォーターを早期に設置し、活動推進計画の立案を急ぐべきである。さらに、アウトリーチ活動を担う人材の育成・確保にも目を向けるべきである。一部の大学で実施されている科学コミュニケーションプログラムなども利用し、アウトリーチ活動でリーダーシップが取れる人材育成をめざすべきと考える。関係機関内での育成に加え、広告会社などの利用も検討すべきであろう。これらアウトリーチ人材育成と、推進活動計画に基づき、着実にアウトリーチ活動を実施することが期待される。

以上のように、ここでは人材育成に関する現状の課題と、それに対する取り組み案を示した。しかし、人材育成にはこれをやれば良いという特効薬があるわけではなく、多様な取り組みの結果、成果が見えてくるものであることは周知の通りである。ここでまとめた課題整理や取り組み案

を基に、コミュニティで問題意識を共有し、各組織で将来を見据えた人材育成の取り組みを検討し、実行に移されることを期待するものである。

5. ロードマップ^[6]

原型炉開発に必要な開発課題やその推進プロセスは、アクションプランに詳細に示されている。ここで示すロードマップは、そのアクションプランに沿った原型炉開発の全体戦略を、核融合分野以外の方々にもできるだけわかりやすく説明できることを意識して描かれている。

一方、アクションプランには示されていない内容として、ロードマップには、開発の重要度と緊急性の観点で特に重要なマイルストーンを明記した。また、開発が国際協力で実施することが望ましい項目にその指針を示してある。

・開発の重要度と緊急性

アクションプランに示される開発課題は、いずれも必須の項目ではあるが、以下の観点に基づき、特に重要なマイルストーンを抽出した。

- 1) アクションプランに示された2020年頃と2025年頃に予定される中間チェックアンドレビュー（以下 C&R）に向け、ただちに着手することが必要な喫緊の課題とマイルストーン。
- 2) 開発の推進のため早期に建設や設計を開始する必要がある、時宜を得た予算措置が必須の課題とそのマイルストーン。
- 3) 課題間の相関関係の視点から重要な戦略的課題とそのマイルストーン。

・国際協力で実施すべき課題

以下のような視点から国際協力で実施すべき課題を選定した。

- 1) 我が国に高度の研究開発基盤があり、世界で指導的立場に立つことができる課題。
- 2) 国内研究開発との相補性により、国際協力での実施が効率的と考えられる課題。
- 3) リソース的に我が国単独では実施が困難な課題。

ただし、ここで選定した以外の項目でも国際協力を行わないという意味ではない。

上記で示した観点に基づいて課題を抽出しまとめたロードマップは、報告書^[6]では別紙として一枚の図にまとめられている（図2）。その各項目について、考え方の概要を以下に示す。

① ITER 計画（国際協力で実施）

ITER 計画は、もっとも優先して開発を進めるべき事業である。最初の重要なマイルストーンは2025年の初プラズマ点火であり、その先に予定される核融合研究にとってもっとも重要なマイルストーンがDT 燃焼着火である。それに向けて、プラズマ制御試験を開始する必要がある、JT-60SA による先行研究は重要である。

② 幅広いアプローチ（BA）活動 フェーズ II（国際協力

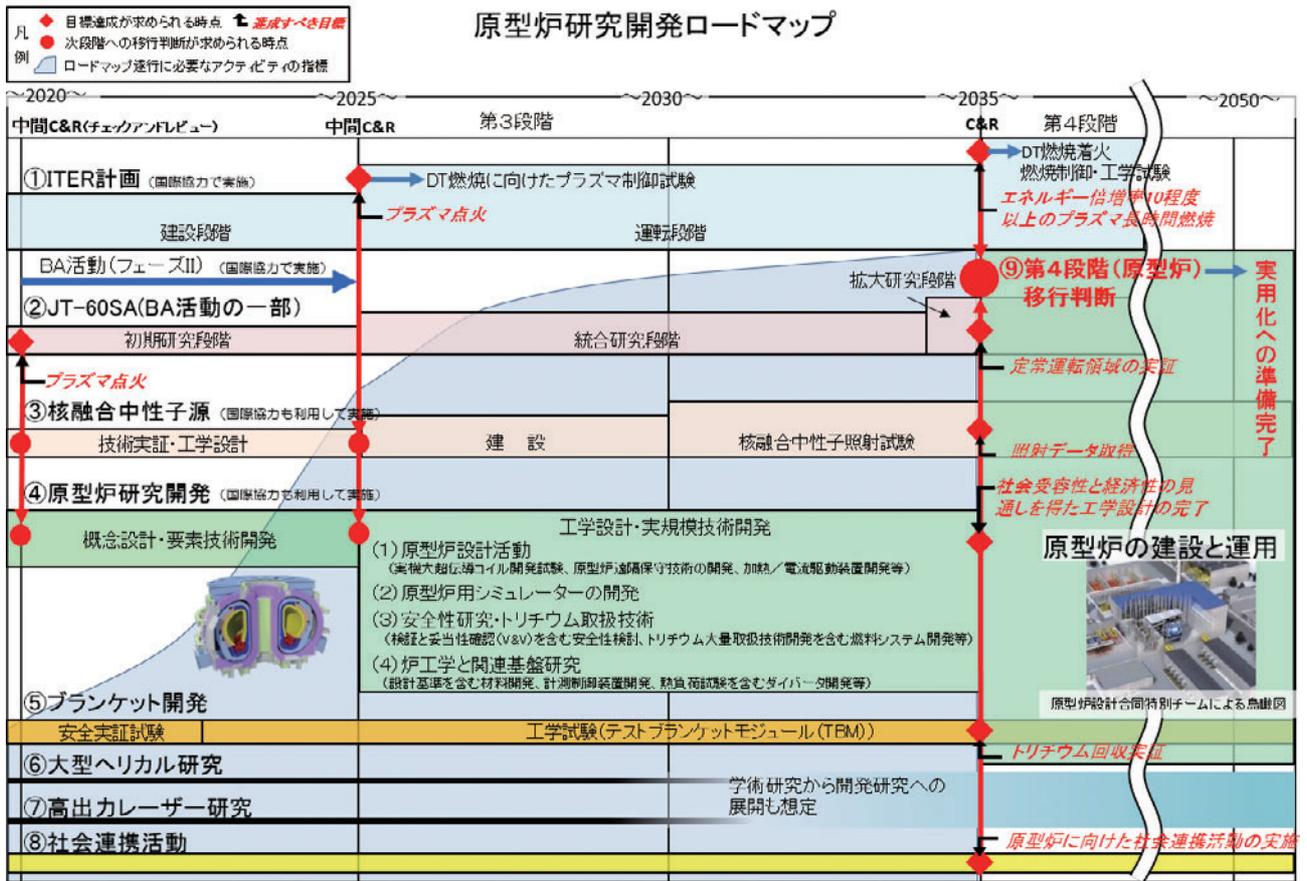


図2 原形炉研究開発ロードマップ。

で実施)

欧州との協定にもとづくこれまでのBA活動により、青森県に国際核融合エネルギー研究センター (IFERC) が国際的な研究開発拠点として確立された。IFMIF/EVEDA 原形加速器が六ヶ所村に設置される見通しであり、また超伝導トカマク装置 JT-60SA も 2020 年頃、那珂市に完成する予定である。今後は、幅広い研究成果を創出する段階で、2020 年 4 月以降の活動を、BA フェーズ II として位置づけ、実施計画等を日欧間で検討中である。なお、JT-60SA は、トカマク国内重点化装置計画にも位置づけられており、国内の研究計画をオールジャパン体制で共同企画・立案しつつ実施していくことも重要である。

③核融合中性子源 (国際協力も利用して実施)

IFMIF/EVEDA の成果に基づいた高エネルギー中性子照射試験設備 A-FNS の国内での建設を具体化する。第 1 回 C&R (2020 年頃) では、A-FNS の建設推進判断を行う。第 2 回 C&R (2025 年頃) では、A-FNS の建設移行判断を行う。2030 年頃からの中性子照射試験を開始し、原形炉の建設判断に必要な材料等の初期照射データを取得する。

④原形炉研究開発

1) 原形炉設計活動 (国際協力も利用して実施)

第 1 回 C&R では、概念設計とそれに必要な要素技術開発の開始判断を行う。第 2 回 C&R では、原形

炉概念を設定し、工学設計・実規模技術開発の開始判断を行う。原形炉へ適用可能な加熱・電流駆動装置の開発も実施する。

2) 原形炉用シミュレーターの開発

原形炉の効率的な制御や運転領域の拡大などを目的し、原形炉用シミュレーターの開発を進める。そのため、核融合専用の計算機資源の確保が重要である。

3) 安全性研究・トリチウム取扱技術

安全性研究のデータ蓄積のため、検証と妥当性確認 (V&V) 実験等を着実に推進する。トリチウムの大量取扱技術は、ITER の知見を活かしつつ、国内技術として蓄積していく必要がある。第 2 回 C&R で、トリチウム大量取扱技術開発設備の建設判断を行う。

4) 炉工学と関連基盤研究

第 1 回 C&R で、高密度ダイバータ試験設備の設置判断を行う。また、第 2 回 C&R の判断に沿い、ダイバータ熱負荷試験のための設備の設置を判断する。

これら成果を踏まえ、社会受容性と実用化段階における経済性を見通しを得て、技術開発と整合をとった原形炉工学設計を完了させる。一方、大学等を中心として取り組む必要がある先進的、基礎的研究課題も存在するので、早期に炉工学研究の基盤を

形成する必要のある事項を優先し、炉工学基盤研究を推進する。

⑤ブランケット技術

ITER用テストブランケットモジュール(TBM)をITERに装荷するために必要な試験等を通してTBMの開発を実施し、その成果を原型炉用ブランケットの開発へ展開する。

⑥大型ヘリカル研究

学術研究から開発研究への将来展開も想定しつつ、今後も様々な学術的視点から、大型のヘリカル研究を推進する。これらを通じて、核融合炉に共通する技術課題を解決することによって、原型炉研究開発に貢献する。

⑦高出力レーザー研究

レーザー方式は、激光XII号、LFEXなどの大型レーザー装置を駆使しつつ、学術的成熟度の高い研究推進方策の検討を進めている。今後、学術研究から開発研究への将来展開も想定しつつ、上記原型炉開発への寄与も含めて推進する。

⑧社会連携活動

核融合エネルギーが国民に選択され得るエネルギー源となるためには、社会との情報の共有と不断の対話が必須である。戦略的なアウトリーチ活動を実施するため、アウトリーチヘッドクォータを設置する。

⑨第4段階への移行

2030年代のC&Rにおいては、原型炉建設段階である「核融合研究開発第4段階」への移行を判断する。この時点で、国民的な理解が形成されていることは、第4段階への移行に大変重要な判断条件である。

このようなロードマップに沿った開発の実現には、以下に示すオールジャパン体制の構築は必須となる。

6. オールジャパン体制に向けて（核融合科学研究所・大学の寄与など）

前章で述べたロードマップに沿ったアクションプランの実現にあたっては、炉工学の基礎研究等や次世代の研究開発を担う人材育成において、大学等の貢献が不可欠である。自主・自律を前提とした大学等の優れた取組みを支援するためには、これまでの量子科学技術研究開発機構を中心とした体制に加えて、大学等を対象とした原型炉に向けた共同研究をとりまとめる新たな体制を整備することが必要である。

大学等を対象とした新たな共同研究のとりまとめ体制の整備にあたっては、その中核を担う機関、つまり中核機関を設けることが望ましい。中核機関の要件としては、核融合に関して、①大学等が自主・自律のもとに取り組む共同研究をとりまとめた実績や、②研究を通じた人材育成にも取り組んできた実績が十分にあり、③世界最先端の大型核融合装置の設計、建設、運用まで取り組むことのできる能力を有し、その能力を原型炉設計等にも生かすことのできる機関であること、があげられる。これらの条件を満たす

中核機関としては、核融合科学研究所が最適である。核融合科学研究所では、すでにLHD計画共同研究、双方向型共同研究、および一般共同研究の実績があるが、今後さらにアクションプランの実現を目的とした新たな共同研究を立ち上げるべく準備を進めている。

また、産学官が結集して設置した「原型炉設計合同特別チーム」が、核融合科学研究所や大学等との連携を含めたオールジャパン体制構築の鍵となる。今後、同チームの枠組み強化についても検討すべきである。

これらに加えて、2020年に建設が終了する超伝導トカマク装置JT-60SAの共同研究体制についても具体的な検討が始まっており、日欧協力によるBA活動の枠組みの中で、日本の原型炉研究開発や人材育成に貢献できる共同研究を推進すべきである。

一方、ITER機構では継続的に職員採用が行われているが、装置やプラント等の建設の経験を有する技術者が現在特に強く求められている。ITER機構での日本人職員は、近年、減少傾向にあり全体の約3%と低い割合まで低下していたが、2017年度は産業界を含め新たに8名が採用/内定し、改善の兆しが見られる。これは、日本からのITER機構職員応募者への支援体制の強化や、ITER Project Associate (IPA:ITER機構で新たに始まった雇用形態。派遣元組織に籍を置いたままで、派遣期間等が正規職員に比べてフレキシブル。)を通じた設計統合・組立に参画できる技術者の確保・派遣を、日本国内機関(量子科学技術研究開発機構)がITER機構や派遣元企業等と組織的に取り組んだ結果と考えられる。今後もこのような取り組みや体制の強化を続け、研究機関だけでなく、産業界からのITER計画への参画を促進してITER機構での日本人職員割合を増やし、オールジャパン体制でのITERへの取り組みと、それを通じた原型炉に向けた人材の育成、より多くの知見の獲得を進めるべきである。

核融合原型炉開発には、国内の限られたリソースを効率的に活用して最大限の成果を上げるとともに、長期にわたる研究開発のための人材育成を継続的に行っていく必要がある。そのためには、産学官のオールジャパン体制を構築することが不可欠であり、それぞれの組織の特徴を十分に生かしながら、それらが有機的に連携する体制を構築していかなければならない。

7. おわりに

ITER計画は、当初計画より遅延しているものの、各極分担機器の調達やITERサイトでの建設・組立は目に見えて進捗しつつある。日欧協力によるBA活動も、当初目標である超伝導トカマク装置JT-60SAやIFMIF/EVEDAでの原型加速器の完成が見通せる段階まで至り、次のフェーズに向けた日欧間の議論も活発化している。世界の動きに目を向ければ、欧州や中国は、それぞれ各々の戦略の下に国際協力も交えて着実に原型炉に向けた設計活動や技術開発を行っている。一方、米国では、プラズマ燃焼研究戦略を検討している米国科学アカデミーが、原型炉に向けた米国国内戦略の必要性を指摘しており、国際的な競争

と連携が今後加速することが予想される。このような国内外の状況下において、今回、約10年ぶりに原型炉に向けた我が国の戦略が再整理され、さらに、開発の優先度や国際協力の在り方とともに人材育成に関する長期的取り組みがロードマップとして示されたことは、大変有意義である。今後、原型炉に向けた国際的な議論を日本がリードしていけるよう、産学官が一体となった研究開発の推進とともに、その成果を積極的に国内外に情報発信することが重要である。

最後に、精力的に議論を行った核融合科学技術委員会とタスクフォースの委員各位に敬意を表するとともに、その議論の過程において貴重なインプットを与えた核融合コミュニティ内外の方々に改めて感謝の意を表したい。

参考文献

- [1] 「今後の核融合研究開発の推進方策について」平成17(2005)年10月26日 原子力委員会核融合専門部会
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/senmon/kakuyugo2/siryu/kettei/houkoku051026/index.htm>
- [2] 「核融合原型炉研究開発の推進に向けて」平成29(2017)年12月18日 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
http://www.mext.go.jp/component/b_menu/shingi/toushin/__icsFiles/afieldfile/2018/01/10/1400137_001.pdf
- [3] チェック・アンド・レビュー項目(案)
http://www.mext.go.jp/component/b_menu/shingi/toushin/__icsFiles/afieldfile/2018/01/10/1400137_003.pdf
- [4] 原型炉開発に向けたアクションプランと項目別解説
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/074/shiryo/__icsFiles/afieldfile/2017/12/28/1399735_003.pdf
- [5] 「核融合エネルギー開発の推進に向けた人材の育成・確保について」平成30(2018)年3月28日 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
http://www.mext.go.jp/component/b_menu/shingi/toushin/__icsFiles/afieldfile/2018/08/15/1408089_1.pdf
- [6] 「原型炉研究開発ロードマップについて(一次まとめ)」平成30(2018)年7月24日 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
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/074/houkoku/__icsFiles/afieldfile/2018/08/24/1408259_1_1.pdf