

核融合研究開発基本問題検討会における主要論点

この報告の趣旨は、検討会において、これまで審議された主な検討事項、論点を要約したものであり、今後、更に検討を深めて意見を集約する予定であることに留意していただきたい。

平成 1 5 年 1 2 月 9 日

核融合研究開発基本問題検討会

まえがき

- ・ 原子力委員会核融合専門部会技術WGの下に設置された核融合研究開発基本問題検討会では、平成4年に策定された第3段階計画について、その後10年の研究進展についてのチェック・アンド・レビューを行い、今後の核融合基本計画について審議を行っている。

主要検討項目は、

エネルギー・環境問題解決への核融合の役割

原子力エネルギー政策の中での核融合開発の位置付け

(核分裂(高速増殖炉等)との関係をどう考えるか)

核融合エネルギー実現のための開発戦略

ITERを最大限利用するにはどうすべきか

各種閉じ込め、大学等の研究の意義・位置づけ

研究者の育成、人材確保の方法

- ・ 21世紀の世界規模での人口増加、エネルギー需要増加、さらには地球環境問題への関心が高まり、環境に優しいエネルギー開発研究に関する関心が高まった。
- ・ 核融合についてはITER計画への参加と我が国への誘致が閣議了解され、ITER計画推進の国際機関の設立に向けて政府間交渉が大詰めを迎えている。
- ・ 文部省と科学技術庁の文部科学省への統合により核融合政策の一元化が行われ、科学技術・学術審議会核融合研究ワーキンググループにおいて国内研究の推進方策が審議された。
- ・ 我が国の核融合研究の主体である大学、核融合科学研究所については法人化、日本原子力研究所においては他研究機関との統合が進行中である。
- ・ 核融合研究がエネルギー開発として大きく踏み出す段階であり、産業界(エネルギー産業、製造業等)との一層の緊密な連携協力が要請される時期に来ている。
- ・ 本検討会では、エネルギー・環境・原子力分野の専門家と核融合分野の専門家によって第3段階計画のチェック・アンド・レビューを行い、核融合研究開発の意義、進捗と今後の進め方について審議を行い報告書をまとめている。

第 1 章 核融合研究開発の意義

1) エネルギー・環境問題解決への核融合の役割

- ・ エネルギーは人類の活動の基本要素であり、環境と調和し安全なエネルギーの安定確保は我が国のみならず人類全体にとって継続的な重要課題である。
- ・ 化石燃料については、ここ百年程度の枯渇は予想されないが、長期的には原子力と再生可能エネルギーへの転換は不可欠である。一方で、大気中二酸化炭素濃度の上昇等に伴う地球環境問題への対応の重要性を考えると、今世紀中葉には更に積極的に、これらのエネルギーを導入する事が望まれる。
- ・ 核分裂エネルギーの利用・開発、および再生可能エネルギーの研究開発を促進することは必要であるが、その社会受容性、資源偏在等を考慮すると、21世紀後半以降の環境と調和したエネルギー供給は楽観できない。
- ・ 核融合エネルギーは安定供給、環境適合性、社会受容性、核拡散防止、放射性廃棄物の処理・処分、資源量等の観点で多くの利点を有している。
- ・ このような特長を持った核融合エネルギーの早期実現は、今後深刻化するであろう地球環境問題解決への寄与とエネルギーセキュリティの確保の観点から重要である。
- ・ 核融合研究は、トカマクによるゼロ出力条件（臨界プラズマ条件）の達成を含め核融合エネルギープラント条件を満たす高温プラズマ閉じこめの物理・技術等に多くの研究進展が得られ、ITER 計画で核融合エネルギーの科学的・技術的実現性の実証を目指せる段階に達した。
- ・ 日本は科学技術創造立国として世界の繁栄のために積極的に貢献すべき立場にあり、エネルギー・環境問題の世界的見地からの解決を目指して核融合エネルギーの早期実用化に努力する事が重要である。

2) 原子力政策における核融合研究開発の意義・必要性

- ・ 我が国における核融合研究開発は、原子力研究開発の重要分野と位置付けられ、原子力委員会の下で着実な進歩をとげ、世界のトップレベルの実績を上げて来た。
- ・ 原子力エネルギーの分野では、軽水炉は実用化され、高速炉は技術的成立性の実証を経て実用化を計る段階にある。一方、核融合研究開発は、今後 ITER 計画での核燃焼プラズマ研究という新たな領域において核融合エネルギーの科学的及び技術的実現性を実証する段階にある。
- ・ 核融合エネルギーは、ITER でその技術的実現性を実証し、並行して実用化のための研究開発を促進することにより、21世紀中葉に実用化の可能性がある。
- ・ ITER の実現が現実的となることを踏まえ、ITER を最大限活用しつつ実用化に向かって必要となる研究課題を吟味し、総合的な研究開発計画を構築・推進する必要がある。
- ・ 人類未踏の領域への大いなるチャレンジである核融合研究開発は、これまでの研究開発を基盤として我が国が世界をリードできる貴重な科学技術分野であり、科学技術創造立国としてグローバルスタンダードの確立を目指し積極的に研究開発を促進する意義がある。

第2章 第三段階核融合研究開発基本計画の進捗状況

- ・ 原子力委員会は、国際協力による ITER 計画を第三段階核融合研究開発基本計画における実験炉と位置づけて開発することを決定した。
- ・ ITER の国際協力の下に技術目標を設定、設計と物理・工学 R&D を実施し、必要な技術的準備を整えた。また、ITER の建設、運転・利用、廃止措置に関わる共同実施協定の締結に向けて政府間交渉が進められるとともに、サイト選定作業が進められている。
- ・ 実験炉の建設のための炉心プラズマ研究開発では、実験炉の設計・建設のために必要な種々の物理課題（エネルギー閉じ込め、プラズマの安定性、電流駆動、熱・粒子制御）の理解とデータベースの整備が概ね完了した。
- ・ またトカマク方式の改良研究については、多くの研究進展があり、高効率の定常運転方式の原理実証が行われ、実験炉での実現が見込める段階に達した。
- ・ トカマク以外の研究については、大型ヘリカル装置（LHD）が実験を開始し良好な閉じ込め性能を実証し、またレーザー方式では新方式の高速点火による1千万度の加熱に成功し、点火を目指した研究を開始できる段階に達した。
- ・ 核融合科学の学術基盤の強化を目指し、中小規模の装置を用いた閉じ込めの研究、熱・粒子制御やプラズマ基礎過程等の研究、種々の閉じ込め方式の異同についての理解を深めた。
- ・ 核融合プラズマ理論の分野においては、計算科学手法の進展によって第一原理に基づく理論・シミュレーション研究や非線形プラズマ理論の分野において著しい進歩が得られた。
- ・ 炉工学研究に関しては、超伝導コイルや遠隔保守機器等、実験炉の開発に必要な主要構成機器の大型化・高性能化に関する研究開発を進め製作技術を確立するとともに、機器単体の性能を実証し、実験炉の建設着手を確実なものとした。
- ・ 核融合エネルギー実現に向けた長期的開発課題に関しても、発電ブランケットや材料の研究開発が進展し発電ブランケットの成立性を見通すための技術基盤が整備された。また、国際核融合材料照射施設の概念設計と主要機器要素の R&D を完了した。
- ・ 核融合炉システムの研究においては、トカマク型核融合炉の設計検討を中心に、経済性や環境適合性の改善などを目指した研究が進展した。
- ・ 安全性に関する研究では、ITER を対象に工学安全データの蓄積や解析・評価手法の整備が進み、また、ITER の国内建設に向けて安全確保に関わる基本的な考え方が整備された。
- ・ 核融合研究の開発研究と学術研究の多様な展開により、次世代を担う若手研究者の育成が行われてきたが、ITER を中心とする今後の核融合研究を牽引する若手の研究者の育成が一層求められる。
- ・ このように、これまでの研究開発により、第三段階核融合研究開発基本計画の中核装置である実験炉の詳細仕様が確定し、いよいよ計画後半の実施段階に入ろうとしている。また、実験炉の先を目指して必要となる研究開発要素の検討も行われ、これらを総合的に俯瞰しつつ、核融合エネルギー実現に向かって効率的・合理的な核融合研究開発計画の策定が定められる段階に達した。
- ・ 実験炉については、平成4年の時点では2005年頃稼動開始と想定されたが、国際協力上の合意形成等に期間を要したために想定時期での実現が困難となり、産業界における技術の継承・発展にも影響している。ITER の建設開始が近々に期待されてことから、改めて産業界の技術者維持・養成に留意する必要がある。

第3章 核融合研究開発の基本的進め方

- ・ 人類未踏領域への挑戦を含む核融合エネルギーの開発は、核融合エネルギーの早期実現を目指した開発研究と、核融合の可能性を広げる学術研究をバランス良く進めることが必要である。
- ・ これまでの研究の進展を踏まえ、早期実現に向けた開発研究としてはトカマク方式と炉工学の研究を推進する。その際、国際協力による ITER 計画と国内計画の連携体制の構築に留意する必要がある。また、学術研究として、ヘリカル方式とレーザー方式に重点化しつつ、大学における炉心・炉工学の自主的・自律的研究の強化を図る。
- ・ 研究開発の推進にあたっては、核融合エネルギーの実用に繋がる計画の経済合理性に留意する必要がある。
- ・ 今後の核融合研究開発においては、産業界の育成の観点から核融合エネルギーの多様な応用や開発成果の実用への応用を含めた研究等の幅広い展開が重要である。

1) 核融合エネルギー早期実現のための開発戦略

- ・ 核融合発電を実用に供するには、発電システムとして技術的に成立させるとともに、エネルギー源としての競争力を持たせることが必要である。
- ・ ITER 計画の進展、トカマクにおける定常運転方式の原理実証、発電に向けた炉工学の基礎の確立、大学等における学術研究の進展を踏まえ、トカマク方式による核融合エネルギーの早期実現を目指す。
- ・ トカマク型の実用炉は、ITER 程度の炉心寸法と発電電力百万 kW レベルを持つことが期待される。実用化に向かって重複を避け、最も合理的な計画を作成するため、必要な技術開発の中で ITER のような統合装置でしか実現し得ない課題と要素技術開発によって実現し得るものを精査し、統合装置の数を最低限に絞ることが重要である。
- ・ そのため、核融合エネルギーの開発段階は実験炉段階と発電実証プラント段階の2つに集約し、実用化の前段階である発電実証プラント段階においては、連続的な発電を実証するとともに経済性や運転信頼性などの実用炉の建設に必要な諸要件の見通しを得る。
- ・ 実験炉段階においては ITER で自己点火領域での燃焼制御技術や定常運転法による長時間燃焼プラズマ制御技術を確立する。また、超伝導技術や核工学技術を含めたシステム統合技術の確立や、試験体等によるトリチウム増殖・発電ブランケット機能実証を進める。さらに増殖・発電実証を含めた ITER の一層の有効利用を図る。
- ・ また、高性能の発電実証プラントを目指しつつ ITER 計画を主導的に進める観点から JT-60 施設を改良・活用して循環電力割合が低く経済性に優れた連続発電の基盤となる高ベータ・定常運転等のトカマクの改良研究を国内の重点化計画として推進する。
- ・ さらに、ITER の建設・運転を通じた核融合炉工学技術の取得を図るとともに、発電実証に不可欠な増殖・発電ブランケットの開発、プラズマ・熱粒子制御手法や炉内材料・機器の高度化、加熱、超伝導磁石技術の高度化を進めるとともに、国際協力による核融合材料照射施設 (IFMIF) の実現を図り、耐中性子材料の開発とその特性の確認を行う。
- ・ 以上の研究開発と並行して、実用炉に繋がる経済性見通しと安全性・環境適合性を高めたトカマク型発電実証プラント概念の設計研究を進める。
- ・ なお、上記の研究開発に当たっては、多階層複合系の理論・シミュレーション研究により燃焼プラズマを中心とした非線形自律系プラズマの動特性の理解を進めることが重要である。
- ・ ITER 計画で 2020 年代初頭に所期の目的が達成されれば、それを受けて発電実証プラントの建設を進める事により、2030 年代には核融合発電の実現を世に示す事ができる。従って、ITER の基本性能が達成される時期 (ITER 運転開始後 7 年程度：～ 2020 年頃) までにトカマク

方式による核融合発電実証プラント建設に必要な研究開発を総合的に進め、その他の研究開発の進捗も踏まえ、発電実証プラント段階への移行を判断する。

2) 各種閉じ込め、大学等の研究の意義・位置づけ

- ・ 核融合炉の可能性を広げる等の観点から、連続運転に外部入力を要しないという特長を持つヘリカル方式や、磁場核融合と原理的に異なるレーザー方式の研究が重要である。重点化計画としてヘリカル方式のLHD計画とレーザー高速点火方式のFIREX計画を学術研究として進め、トカマク方式とは独立にその方式に適した研究推進を図るが、得られる学術的知見は相互に有効である。
- ・ 現在進められているLHDとFIREX計画は学術研究として推進し、その進捗によっては、適切な時期に核融合炉としての可能性に関する評価を実施し、その後の計画の進め方を検討する。
- ・ また、ヘリカル方式、レーザー方式以外の新たな可能性への挑戦の機会も適切な規模で確保するとともにプラズマ・熱粒子制御等の大学における核融合科学の基盤研究や理論・シミュレーション研究、及び、人材育成を強化する。
- ・ 大学等における炉工学研究においては、先進的な耐中性子照射材料・プラズマ対向材料や先進ブランケットの研究を含む炉工学の基礎的・先進的研究を包括的・総合的に推進する。
- ・ 大学等における学術研究については、1. 核融合炉の可能性を広げる、2. 学術的な普遍化、3. ITERへの貢献、4. 人材育成の観点から重要であり、その自主性・自律性を尊重しつつ研究開発を推進する。

3) ITERと国内研究の連携

- ・ ITER計画推進主体であるITER国際核融合エネルギー機構（仮称）に参加し、ITERを通して我が国の実験炉計画を実現するとともに、国内の核融合研究と有機的に連携する体制を確立する。
- ・ ITER計画と国内研究の連携においては、国内重点化装置を中心として先進的な研究成果を上げることにより、ITER研究を先導しリーダーシップを発揮できる有能な人材を多数育成し、計画に派遣する。
- ・ 国際核融合エネルギー機構（仮称）の運営においては、参加極としての貢献に応じた実験研究の機会を確保し、また、最大限の成果が国内へ還元・蓄積されるよう留意すると共に、対応しうる国内体制を構築する。
- ・ ITER計画の推進にあたっては、国内実施機関、大学等、産業界の連携の下、建設と実験運転を進めるとともに、核融合フォーラム等を充実発展させITER計画及び核融合研究への幅広い科学者、一般国民の参加を促進する。
- ・ また、ITERを用いた幅広い応用・学術研究（水素製造、中性子利用等）の可能性を追求することも重要である。

4) チェック・アンド・レビュー

- ・ 研究開発の進捗や内外の情勢等を考慮した総合的な視野でのチェック・アンド・レビューを適宜行い、弾力的に開発を進める。大きな基本方針に関わるチェック・アンド・レビューは十年程度毎に実施し、中間段階でも適宜実施する。その際、トカマク以外の研究の進捗をも含めて行う。

第4章 核融合研究開発の基本計画

1. 研究開発の内容

1) トカマクによる発電実証プラントに向けた開発研究

核融合エネルギーの早期実現を目指して、トカマク型発電実証プラントに向けた技術基盤を形成するために、ITER による開発研究、トカマク改良研究、炉工学研究、核融合炉システム研究を進める。

(1) ITER による開発研究

- ・ **核融合燃焼制御**：ITER 参加各極との協力の下、ITER 国際核融合エネルギー機関（仮称）を構成し、自己点火領域($Q \sim 20$ 程度以上)での燃焼制御、定常運転法による $Q = 5$ の燃焼プラズマの長時間（ ~ 1000 秒以上）維持を目指す。
- ・ **小規模発電技術実証**：我が国の提案に基づき、高温ブランケット試験体を設置しトリチウムの生成・回収試験、増殖材、増倍材、構造材料の試験、高温熱の取り出しを行うとともに、小規模の発電実証を、ITER 参加極との協力の下でその実現を目指す。
- ・ **システム統合技術**：ITER 国際核融合エネルギー機関（仮称）による、ITER の建設、運転と機器の改良を通じて、システム統合技術の取得を目指す。
- ・ **安全技術**：ITER で核融合システムの安全技術を実証する。
- ・ **ITER の一層の有効利用**：ITER が核融合システムとして高度の機能を保持することを考慮し、ITER による長時間大規模発電実証を含む核融合エネルギーの実現に向けた一層の有効利用の可能性を検討する。

(2) トカマク改良研究

- ・ **高ベータ定常運転法の開発**：高出力密度が必要とされる発電実証プラントの基盤を確立するため、高ベータ（ $\beta_N = 3.5\text{--}5.5$ ）プラズマの長時間安定維持の研究開発を重点的に進める。その課題は、プラズマ形状・帰還制御・分布制御による高ベータ・定常運転制御、ダイバータ熱・粒子制御、デイスラプション制御等である。
- ・ **ITER と連携した開発研究**：ITER に連携した国内トカマク研究による先進的な研究成果に基づいて ITER 研究を先導し、ITER プラズマ性能の向上と一層の有効利用に寄与する。
- ・ **JT-60 施設を用いた研究開発の展開**：上記の研究開発を進めるため、JT-60 を高ベータ・定常化を目指すトカマク国内重点化装置へ改修し、その目標を達成する。今後、JT-60 を用いた準備研究を大学、大学共同利用機関、独立行政法人研究機関等の研究者との共同企画・共同研究の下に進めるとともに、ITER の動向を踏まえ、トカマク国内重点化装置へ転換する。

(3) 炉工学技術開発

- ・ ITER のための炉工学技術開発とその統合・高度化を進めることに加えて、発電実証プラントに向けた以下の技術開発を行う。
- ・ **増殖・発電ブランケット技術開発**：ITER 用試験モジュールに関する原子炉での試験・炉外での工学試験を進める。ITER 実験段階においてモジュール試験を行い、工学データを取得する。
- ・ **構造材料開発**：低放射化フェライト鋼の開発を進め、原子炉等を用いた照射試験により重照射データを取得する。また、先進構造材料の開発を着実に進める。
- ・ **国際核融合材料照射施設（IFMIF）計画**：低放射化フェライト鋼や先進構造材料の重照射デ

ータ（80 dpa 程度以上）等を取得するために必要な施設としての IFMIF については、工学実証・工学設計活動を進め、技術基盤の整備を行い、チェック・アンド・レビューによる判断を経て国際協力の下でその建設を目指す。

- ・ 超伝導・加熱機器の高性能化：発電実証プラントに向けて超伝導コイルの高磁界化、加熱機器の高度化を進める。

（４）核融合炉システム研究

- ・ 実用炉に繋がる経済性見通しと安全性・環境適合性を高めたトカマク型発電プラント概念の設計研究を産業界と協力して進める。実用プラントの具体的構想を策定し発電実証プラント設計への反映を行う。また、核融合エネルギーについてもその多目的利用の研究を進める。

（５）プラズマ理論・シミュレーション研究

- ・ 多階層かつ複雑・複合系としての特性を有する ITER における燃焼プラズマや、構造形成を伴う高ベータ高自発電流プラズマの動特性の理解とその制御のために、最先端の計算科学手法に基づくシミュレーション手法の開発と非線形・開放系プラズマに関する理論研究を進める。

２）核融合エネルギーを目指した学術研究

理学的・工学的にも人類未踏領域へのチャレンジである核融合エネルギー開発は、開発研究と学術研究の両輪からなる。学術研究は、研究の重点化をはかるとともに学術的多様性を確保しつつ、その基盤の充実を計る。また、核融合理工学としての学問体系化を図り、人類の知的財産とする。

（１）ヘリカル型装置による研究

ヘリカル方式は定常運転に外部入力を要しないという特徴を持つことから、LHD において核融合炉への展望と乱流輸送や閉じ込め改善等に関する普遍的知見の取得を目的とした研究を推進する。また、高ベータプラズマの定常維持に必要な知見を得ると共に、ダイバータに関する研究を進め定常運転の実証を行なう。トカマクとの異同の理解を体系的に進める。海外の先進ヘリカル装置との比較を通じて、ヘリカル磁場配位の最適化に関する研究を進める。

（２）慣性閉じこめ装置による研究

レーザー核融合方式による点火、及び高利得プラズマの実現を目指した研究開発を進める。このため、高速点火方式レーザー核融合の原理実証を目的とする大阪大学を中心とする FIREX 第1期計画を進め、核融合点火温度（0.5-1 億度）への加熱を行う。その成果により、点火・燃焼の実現を目指す第2期計画に発展させるか否かの判断を行う。FIREX 計画を研究者コミュニティ全体の計画とするために、大学共同利用機関との連携を進める。

（３）プラズマ科学の基礎研究

長期にわたる核融合研究の推進には多様な広がりを持つ学術研究の推進が重要である。中小規模装置による斬新な閉じ込め研究や、プラズマ・壁相互作用の研究、理論・シミュレーション研究において幅広く学術研究を展開する。斬新なプラズマ・閉じ込め研究の展開は新たな概念の育成は勿論の事、共通する物理・工学の普遍化・集約化された知見の蓄積により、核融合研究全般に亘る科学的基盤の充実に大きく寄与する。また、創造性に富んだ人材の育成に繋がる。

（４）材料や炉工学の基礎研究

大学等における炉工学の先進的・基礎的研究においては、国際核融合材料照射施設計画 (IFMIF) をを中心とした先進的な耐中性子照射材料・プラズマ対向材料の研究開発や、ヘリカ

ル方式やレーザー方式に固有の炉工学技術開発、先進的な炉システムの研究を含む幅広い炉工学の基礎研究を包括的・総合的に推進する。

2．研究開発の分担

- ・ 日本原子力研究所においては、ITER の極内機関としての役割と国内におけるトカマク方式の炉心プラズマ研究、炉工学開発、トカマク理論・シミュレーション研究、及びトカマク型核融合炉システム研究の分野における中核的機関としての役割と、JT-60 施設を大学等の研究者との共同企画・共同研究に供することが求められる。
- ・ 核融合科学研究所においては、核融合プラズマの学理とその応用の研究を図り LHD を用いた学術研究、理論シミュレーション研究、大阪大学を中心とするレーザー高速点火計画との連携、大学の炉工学研究の取りまとめの役割を果たすことが期待される。
- ・ 大学については、学術研究の推進と学生の教育が大きな柱と位置付けられ、大学の自主的・自律的研究の促進をはかりつつ、核融合科学研究所、日本原子力研究所との連携を強め、核融合理工学の学術基盤の強化と学生教育を通じて核融合研究開発に寄与することが期待される。
- ・ 産業界においては、ITER を中心とした核融合機器の製造技術の蓄積・向上に務め、発電実証プラントに向けた製造技術の確立と経済合理性の追求が求められる。今後の研究開発における産業界の知見と技術の活用と維持・発展の重要性に鑑み、長期的な研究開発計画の下で産業界の積極的参加が得られるよう配慮して研究開発を進める必要がある。
- ・ 核融合フォーラム等において、ITER 計画及び核融合研究への幅広い科学者・一般国民の参加を促進することは、長期に亘る核融合研究に対する理解の促進の観点から重要である。

3．研究開発の期間と資源配分

- ・ 第三段階基本計画の中核装置である ITER の運転開始は 2014 年頃、その技術目標の達成は 2020 年頃までに期待されるが、国内における開発研究についてもプロジェクトの円滑な遂行を促進するとともに、研究資源の適切な配分を行う。
- ・ 核融合発電の早期実現を図る観点から、実験炉の技術目標の達成が期待される時期までに発電実証プラントに向けた炉心プラズマ及び炉工学の研究開発を並行して実施することとし、適切な資源配分を行う。
- ・ 研究開発の進捗のチェック・アンド・レビューと産業界の参加を得た実用化戦略の策定を行い、発電実証プラント段階への移行を判断することが必要である。