

ITER計画、幅広いアプローチをはじめとする  
我が国の核融合研究の推進方策について

平成19年6月27日

科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会  
原子力分野の研究開発に関する委員会  
核融合研究作業部会

# 目 次

はじめに	1
第1章 核融合研究の現状と課題	2
1. 核融合研究の必要性・意義	2
2. 核融合研究開発に関する基本方針	2
3. 核融合研究の現状	4
(1) 核融合研究の重点化課題にかかるチェック・アンド・レビューと共同利用 ・共同研究	4
(2) ITER 計画、幅広いアプローチ	4
4. 我が国の産業界の現状	5
5. 人材の育成・確保	5
第2章 今後の推進方策	7
1. ITER 計画及び幅広いアプローチを中心とした研究開発の推進	7
(1) 国際協力の視点からの意義	7
(2) 具体的推進方策	7
ITER 計画を中心とした研究開発	7
幅広いアプローチを中心とした研究開発	8
国内における研究開発の推進	8
(3) 推進に当たっての環境整備	9
核融合エネルギーフォーラム	9
全国的な研究推進の充実	9
2. 学術研究の推進	10
(1) 学術研究を推進する際の課題	10
(2) 具体的推進方策	10
重点化課題の推進	10
共同利用・共同研究の推進	10
ITER 計画、幅広いアプローチに関する共同研究	11
(3) 様々な分野との学術的連携	11
3. 産業連携	12
4. 人材の育成・確保及び国民への説明	13
(1) 人材の育成・確保	13
(2) 国民への説明	13

(参考)

核融合研究作業部会委員名簿	15
審議の経過	16
核融合研究の重点化に関するチェック・アンド・レビュー実施結果概要	17
核融合研究の重点化に関するチェック・アンド・レビュー実施結果	18
ITER テストブランケット・モジュールの検討結果	28
国内実施・協力体制	29
用語解説	30
「ITER 計画、幅広いアプローチをはじめとする我が国の核融合研究の推進方策 について」概要	43

## はじめに

核融合研究は、現在、大きな発展・転換期にある。ITER 計画の本格化や幅広いアプローチの始動等により、核融合研究が新たなフェーズに入ったことに伴い、今後、我が国としてどのように ITER 計画等の国際共同研究に取り組むのか、また国内計画の推進と連携させていくのが重要な課題となっている。

平成 15 年 1 月の科学技術・学術審議会学術分科会基本問題特別委員会核融合研究ワーキンググループ（以下、「核融合研究 WG」という。）による報告書「今後の我が国の核融合研究の在り方について」で示された核融合研究の重点化等についても、これまでの進捗状況を確認した上で、今後の進め方について検討する必要がある。

このため、科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会原子力分野の研究開発に関する委員会に核融合研究作業部会（以下、「作業部会」という。）が設置された。主な検討課題として、

- (1) ITER 計画に関する国内における推進体制の構築等について
- (2) 核融合研究の重点化等について
- (3) その他、核融合研究に関する諸課題について

をあげ、平成 18 年 5 月に開かれた第 1 回会合以来、調査審議を重ねてきた。

本報告書は、作業部会で行われた検討結果と、今後の推進方策について取りまとめたものである。

## 第1章 核融合研究の現状と課題

### 1. 核融合研究の必要性・意義

人類は、エネルギーを巧みに利用することによって、現在の高度な科学技術産業社会を維持してきた。しかし、将来に向けた新しいエネルギー源の開発は、世界共通の最重要課題の一つといえる。

一方で、人類は、太古から核融合エネルギーを太陽光として日常的に活用してきた。核融合を地上で実現することができれば、海水中に含まれる重水素を燃料とすることができるため、恒久的なエネルギー源を手に入れることができると考えられている。

また、大気中の二酸化炭素濃度の上昇等に伴う地球温暖化問題をはじめとした地球規模での環境問題への懸念が高まりつつある。

核融合炉は、核分裂発電と同様に発電の過程において温室効果ガスや大気汚染物等を排出しないことから、地球規模の環境保護の観点からも重要な役割を果たすと期待される。

核融合エネルギーは、資源量・供給安定性、安全性、環境適合性、核拡散抵抗性、放射性廃棄物の処理・処分等の観点で、恒久的な人類のエネルギー源として魅力的な候補である。

核融合の研究は、これまで世界の主要国において精力的に行われ、高温プラズマの生成及び制御に成果を挙げ、核融合炉実現の科学的見通しが得られるところまで到達してきた。

特に我が国における核融合研究は、これまでの経験と実績を基盤として、世界をリードできる科学技術分野という点で大きな意義がある。

また、その研究推進の必要性について、平成17年10月の原子力委員会核融合専門部会（以下、「原子力委専門部会」という。）の報告書「今後の核融合研究開発の推進方策について」の中では、「核融合エネルギー開発においては、地球環境問題の解決への早期貢献を目指し、ITERでその科学的・技術的実現性を着実に実証するとともに、原型炉に向けた研究開発を並行して推進することにより、21世紀中葉までに実用化の目処を得るべく研究開発を促進する必要がある。」と記載されている。

### 2. 核融合研究開発に関する基本方針

我が国の核融合研究開発について、平成4年6月、原子力委員会は「第三段階核融合研究開発基本計画」を策定した。本計画の中で、トカマク方式の実験炉による自己点火条件（外部から加熱しなくても核融合反応が続く状態）の達成と長時間

燃焼の実現を目指した開発、実験炉以外の炉心プラズマ研究開発(トカマク方式、ヘリカル方式・レーザー方式など各種閉じ込め方式の研究)、実験炉に必要な炉工学技術と原型炉に向けた炉工学の基礎に関する研究、などを実施することとして現在に至っている。

平成15年1月には、核融合研究WGから「今後の我が国の核融合研究の在り方について」が報告され、我が国の核融合研究全般にわたり、今後を見据えて、研究評価に基づき、核融合研究計画の重点化、共同利用・共同研究の強化、重点化後の人材育成の在り方、を主な内容とする核融合研究の在り方と方向性が示された。

平成17年10月の原子力委員会による「原子力政策大綱」では、核融合研究開発の位置づけについて、長期的な視点に立った研究開発が必要である「革新的な技術概念に基づく技術システムの実現可能性を探索する段階」にあると整理されている。

さらに、平成17年10月の原子力委専門部会の報告書においては、トカマク方式については開発研究として、ITER計画を進めることを含め、原型炉建設に必要な研究開発を進める、ヘリカル方式、レーザー方式については、トカマク方式に無い特長を持ち核融合エネルギーの選択肢を広げる観点から、引き続き大学等において学術研究に重点をおいて研究を進める、開発研究と学術研究の相乗効果によって開発を加速する観点から、ITERを最大限活用しつつ実用化に向かって、開発研究と学術研究からなる総合的な研究開発を推進する、などが提言されている。

ITER計画及び幅広いアプローチは、原子力委員会が定めた原型炉に向けた開発研究の多くを実現するものであるが、それに加えて先進的な目標を掲げるトカマク国内重点化装置計画、ITERでの試験を目指したブランケット開発等の国内計画を並行して実施することが計画されている。

平成18年度から22年度を期間とする第3期科学技術基本計画(平成18年3月閣議決定)において、エネルギーについては引き続き「推進4分野」として位置付けられているが、重点推進4分野(ライフサイエンス、情報通信、環境、ナノテクノロジー・材料)及び推進4分野(エネルギー、ものづくり技術、社会基盤、フロンティア)のうち、各分野において「分野別推進戦略」を策定し、「重要な研究開発課題」が選定されている。

このうち、エネルギー分野では、「核融合エネルギー技術」が重要な研究開発課題の一つとして選定されている。

さらに、重要な研究開発課題の中でも基本計画期間中に重点投資する対象を「戦略重点科学技術」として選定しているが、「国際協力で拓く核融合エネルギー：ITER計画」が戦略重点科学技術として位置付けられ、計画的かつ着実に推進することと

されている。

これまで、我が国における核融合研究は、日本原子力研究開発機構（以下、「原子力機構」という。）を中核とした開発研究と、大学や自然科学研究機構核融合科学研究所（以下、「核融合研」という。）を中核とした学術研究とが推進されている。今後とも、開発研究と学術研究が、研究段階に応じてそれぞれの特長を生かしつつ、一層融合・連携させながら推進していくことが重要である。

### 3. 核融合研究の現状

#### (1) 核融合研究の重点化課題にかかるチェック・アンド・レビューと共同利用・共同研究

核融合研究 WG の報告書では、核融合分野の研究を迅速かつ効果的・効率的に進めるため、以下に重点を置くことが必要であるとされた。

- a. 既存装置の整理・統合と、研究者コミュニティに開かれた新たな研究の展開を可能にする共同研究重点化装置の導入
- b. 共同利用・共同研究と連携協力研究の促進
- c. 新たな可能性への挑戦を目指した研究の創生

審議の結果、トカマク（JT-60 及びそれに続くトカマク国内重点化装置）、ヘリカル（LHD）、レーザー（激光 XII 号及びそれに続く高速点火レーザー装置）及び炉工学が重点化の柱として策定された。

このうち、3つの装置については共同研究重点化装置として位置付け、共同利用・共同研究を積極的に促進することが提案された。

核融合研究 WG で策定された重点化課題の状況等を踏まえ、今後の核融合研究を推進するために必要な評価・検討を行うため、作業部会の下に「重点化に関するタスクフォース」を設置するなどしてチェック・アンド・レビューを実施した。

チェック・アンド・レビューに当たっては、特に「重点化課題以外の実施機関も含めて我が国の核融合研究全体への貢献度（重点化前後の状況の変化）」、「核融合エネルギーの実現に向けたあらゆる取組の中における当該研究の位置付け」、「学術的な波及や学際性」に留意することとされた。

チェック・アンド・レビューの結果、別添資料のとおり全般的には重点化以後、原子力機構と大学、核融合研と大学の協力が強化されていること、大阪大学レーザーエネルギー学研究センター（以下、「阪大レーザー研」という。）が全国共同利用化されたこと等、共同利用・共同研究、人材育成、国際的視点からの寄与、社会的な視点からの寄与が着実に進んでいることが確認された。

#### (2) ITER 計画、幅広いアプローチ

ITER 計画は、実験炉の建設・運転を通じて、核融合エネルギーの科学的・技術的実現可能性を実証する国際協力プロジェクトであり、昭和60年11月の米ソ

首脳会談における核融合開発研究推進の共同声明から始まり、概念設計活動、工学設計活動の後、平成13年11月からは建設に向けた政府間協議が開始された。

平成17年6月のITER閣僚級会合において、ITERのサイト地が欧州（フランス・カダラッシュ）に決定した。

また、原型炉の開発に必要な研究開発のうち、日欧の共通の関心課題について、幅広いアプローチの名で日本での共同実施が決定し、文部科学省に設置されたITER計画推進検討会による検討を経て、平成17年10月、文部科学省が国際核融合エネルギー研究センター（青森県六ヶ所村）サテライトトカマク装置<JT-60の改修>（茨城県那珂市）国際核融合材料照射施設の工学実証及び工学設計活動（青森県六ヶ所村）を幅広いアプローチのプロジェクトとして選定した。

国際核融合エネルギー研究センターはITER遠隔実験研究センター、核融合計算センター、原型炉設計・研究開発調整センターからなる。

平成18年11月にはITER協定への署名が行われ、平成19年2月には幅広いアプローチ協定への署名が行われ、現在に至っている。

#### 4. 我が国の産業界の現状

我が国の産業界は、核融合開発草創期から核融合機器開発・機器製作を中心に国の核融合開発に協力・貢献してきた。しかし、ITER工学設計活動が平成13年に終了した頃から、我が国の産業界における核融合技術者は減少している。同時進行が予想されるITER建設及びJT-60超伝導化改修計画を見据え、ITER計画や幅広いアプローチ等のプログラムと産業界との連携を強化することが必要である。

#### 5. 人材の育成・確保

原子力分野の研究開発を発展させていくためには、次世代において原子力の研究開発及び利用を支える人材の育成が不可欠である。そのため、平成19年度から、「原子力人材育成のためのプログラム」を構築した。

特に、原子力分野の中でも核融合研究は、長期にわたる学際的及び総合科学技術的なプロジェクトであることから、これを推進するためには、幅広い基礎学術と産業技術を有した人材の育成が必要不可欠である。

さらに、ITER計画及び幅広いアプローチといった国際プロジェクトにおいて、我が国がリーダーシップを維持、発展させていくためには、その基盤となる国内の研究（重点化課題や幅広い基礎研究）を一層強化し、これらを通じて優秀な人材を育成し、確保することが重要となる。

作業部会では、核融合分野の人材に関する現状調査を行い、ITER計画及び幅広いアプローチにおいて今後必要となる研究体制を検討した。現在、ITER計画及び幅広いアプローチに関する開発研究及び学術研究に携わる研究者は300名程度であるが、ITERの実験が開始される10年後には様々な分野から700名程度が活躍することが期待される。このため、他分野の研究者との連携を進めるなどして、様々



な角度から関心を持ってプロジェクトに参加する研究者や技術者を増やし、幅広い推進基盤を構築していくための取組が重要である。ITER 計画の国内機関と幅広いアプローチの実施機関に予定されている原子力機構が、長期にわたる建設及びその後の実験実施について主体的に担当していくために必要な人材を育成・確保するとともに、さらに関連する研究者・技術者が共同研究を通じて積極的に参加するための円滑な運営体制が求められている。

## 第2章 今後の推進方策

### 1. ITER 計画及び幅広いアプローチを中心とした研究開発の推進

#### (1) 国際協力の視点からの意義

ITER 計画は、核融合エネルギーの実現に向け、大きく段階を進めるものであり、大規模国際協力事業として、これまでに例のない、新しい事例となるものである。

国際関係から ITER 計画及び幅広いアプローチを見た場合、その実施の上では国家主導による国際的優位性（国益増進）と、国際的協調の観点が必要となる。

一方、ITER 計画及び幅広いアプローチに関わるものとして、国家、国際機構、学術的・技術的専門家集団、民間企業、自治体、地元住民という多様なアクター（社会を構成する行為主体）が存在し、それに関わる問題も複雑化・重層化しているという状況にあるが、アクター間の「非集中化（権限の分配）」と「パートナーシップ（共通問題の解決や資源の効率的使用のための連携・協力）」を実現することが重要である。

ITER 参加極の7極のうち、アジアにおける4極（日本、韓国、中国、インド）は、幅広いアプローチを拠点としてアジアにおける連携活動の可能性を有しており、そこでは我が国の存在感、リーダーシップを示していくことが期待される。我が国が地域連携の旗手として名乗りをあげる余地は大きく、ITER 計画及び幅広いアプローチは重要である。

#### (2) 具体的推進方策

##### ITER 計画を中心とした研究開発

核融合の開発段階は、科学的・技術的実現性を目指す現在の第三段階から、核融合研究開発の総合的な進捗状況を踏まえ、原型炉建設の是非を判断した上で、技術的実証・経済的実現性を目指す第四段階を経て、核融合エネルギーの実用化段階へと進むこととなる。

このうち、ITER 計画は、第三段階において、自己点火条件の達成及び長時間燃焼の実現、原型炉の開発に必要な炉工学技術の基礎の形成という主要な目標を達成するための研究開発として着実に推進する必要がある。

ITER を活用した研究活動のうち、国際トカマク物理活動（ITPA）は、プラズマ物理の観点から ITER 計画を支援する重要な国際的取組である。ITER の実験において我が国が存在感を示し、さらにはリーダーシップを取る舞台として ITPA を認識し、我が国として ITER 計画を支援する活動の一環として位置付ける必要がある。

また、核融合エネルギー利用の中核機器であるブランケットの開発研究は、ITER 参加の各極がそれぞれ国内において開発することになっており、ITER にテストブランケット・モジュール（TBM）を取り付けて実施する総合機能試験は我が国にとっても重要なマイルストーンである。ブランケット技術開発にお

いても先進国として ITER 計画での我が国の主要な立場を示すとともに、原型炉の主導権確保を目指しながら原型炉の根幹となる技術で世界をリードする機会となる。

なお、従来、TBM 計画は各極独自の活動との位置付けであったが、ITER 参加極の増加などの新しい状況に伴って、国際協力での実施が不可欠な状況となっている。そのため、国益及び投資対効果等の視点に基づいて幅広い国際協力を模索するとともに、ITER 運転開始当初から、我が国が主体的・主導的に TBM 計画を実現できるよう、開発計画を加速することが必要である。

「炉工学ブランケットの研究開発の進め方（平成12年8月原子力委員会核融合会議）の報告を踏まえ、我が国としては、主案として固体増殖（水冷却）方式を原子力機構が中心となって全日本的に研究開発を推進するとともに、液体増殖などの先進ブランケット方式については、大学等を中心に学術研究として実施しつつ、ITER の TBM への参加に向けた努力も継続させることが適切である。

今後、学術研究についても ITER を活用することによりさらに積極的に進展させることを目指して、原子力機構と核融合研との一層の連携・調整が望まれる。

#### 幅広いアプローチを中心とした研究開発

ITER 計画を支援するとともに、将来の原型炉の建設に向けた研究開発を日欧の協力により我が国において実施することとしている幅広いアプローチについては、ITER と並ぶ国際的な核融合研究拠点を我が国に整備する必要がある。

このため、事前に日欧間で調整を図りつつ、日欧の研究者のみならず、他の ITER 参加極である米国、ロシア、中国、韓国、インドからの研究者の幅広い参加を促すために、茨城県那珂市に加えて新たに核融合の研究拠点が設置される青森県六ヶ所村においても研究者の長期滞在のための受入体制の整備が重要である。

また、ITER 計画同様、幅広いアプローチにおいても、学術研究とのより一層強力な協力関係を構築することが重要である。

#### 国内における研究開発の推進

ITER 計画への支援と原型炉に向けたプラズマ開発として一定の経済的見通しを得るために、より出力密度の高い先進定常トカマクプラズマの開発研究を JT-60 施設の改造により着実に進めるとともに核融合理論シミュレーション研究を推進することが必要である。

また、原型炉に向けた炉工学技術開発としては、ITER 計画や幅広いアプローチとの連携を図ることにより、ブランケット技術開発、構造材料開発、国際核融合材料照射施設計画、超伝導・加熱機器等の高性能化、安全性研究を進め、

原型炉の建設判断に必要な工学基盤技術を効果的・効率的に確立する必要がある。

このうち、ブランケットの開発は、原型炉における燃料自給性（外部から燃料を供給せずに運転を継続する性能）、発電実証に不可欠な技術開発であり、また経済性見通しに関わる重要な研究開発課題である。

### （３）推進に当たっての環境整備

#### 核融合エネルギーフォーラム

今後、ITER 計画及び幅広いアプローチが実施段階に入ると、原子力機構をはじめ、学术界・産業界など様々な関係者が議論した上で、機動的に意見集約を行っていく必要がある。このため、これまで核融合研究・技術開発に関する情報交換や討議の場として活動してきた「核融合フォーラム」の性格も残しつつ必要な改変を行い、「核融合エネルギーフォーラム（以下、「エネルギーフォーラム」という。）」を新たに設置することが適切である。

エネルギーフォーラムでは、ITER 計画と幅広いアプローチに関し、研究推進の母体としての提案等、関連する情報の頒布、研究活動に関する国内意見の集約・調整、国内連携協力の調整等を行う。

特に、研究活動に関する意見の集約・調整を図り、国や国内機関・実施機関に対して意見具申するための協議、産業界との連携協力、及びその他技術的な諸課題への対応等を行うための組織として、「ITER・BA 技術推進委員会」をエネルギーフォーラムの中に設置することが適切である。また、エネルギーフォーラムの中のクラスター活動として、ITPA や TBM 関連活動をこれまで以上に強化していかなければならない。

なお、エネルギーフォーラムの事務局については、原子力機構と、大学における核融合研究コミュニティの中核機関である核融合研が連携して行うことが適切である。

#### 全国的な研究推進の充実

ITER 計画と幅広いアプローチを成功させるためには、開発研究と学術研究とを相互補完的に推進することが必要不可欠である。

このため、全国的な研究体制として、全国に広がった主体性を持った拠点が ITER 計画と幅広いアプローチを含めてネットワークを形成し、それぞれの拠点が特長を生かし、拠点間の人的流動性を図りつつ、我が国全体としての相乗効果を発揮していく必要がある。

今後、国及び核融合関係者が協力して、これらの実施を可能とする体制の構築及び適切な資金の確保に向けて努力することが必要である。

幅広い研究者の参加を可能とし、効率的なネットワークを形成するために、e サイエンス（ネット上でのデータのやりとり等）などの方法を積極的に取り入れることも重要である。

## 2. 学術研究の推進

### (1) 学術研究を推進する際の課題

核融合研究は、様々な学術研究と先端技術を統合する巨大なプロジェクト研究を積み重ねて推進する必要があり、その中核となる大型実験装置へ研究資源を集中するための重点化・効率化が常に求められる。しかしながら、こうした「集中化」の傾向の一方で、「自由な発想」を本質とする学術研究や他分野との相互作用の重要性にも十分留意する必要がある。

より魅力ある核融合エネルギーの実現のためには、開発現場からの課題設定と学術基盤からの新たな知見の両方が相互作用しつつ研究開発が進められる必要がある。

具体的には、学術研究におけるネットワークと、プロジェクト研究の間で「双方向的な知の循環」が形成される必要がある。すなわち、ネットワークを通じて多様な分野から知を吸収するプロセスと、プロジェクトの先端からネットワークへ学術的課題が還元されるプロセスである。

### (2) 具体的推進方策

#### 重点化課題の推進

核融合研究の重点化に関するチェック・アンド・レビューの結果、全般的に各重点化課題の研究成果、共同利用・共同研究、人材育成、国際的・社会的視点からの寄与が着実に推進されてきており、重点化が我が国における核融合研究全体に貢献していることが確認された。

一方で、今後留意・改善すべき点等(別添資料参照)も指摘されているため、原子力機構、核融合研、阪大レーザー研をはじめとする関係者がこれに対応するとともに、重点化課題を中核とした一層強力な連携体制の構築に向けて、取り組んでいくことが重要である。

#### 共同利用・共同研究の推進

大学共同利用機関である核融合研を中核とした共同利用・共同研究は、同研究所が設置されて以来、研究者コミュニティが培ってきたものであり、重要な役割を果たしている。このうち、核融合研究WGの報告を受けて平成16年度から開始されている双方向型共同研究は、核融合研と各大学の核融合科学関係の研究施設の両者の共同研究者が互いに往来し、それぞれの研究資源の相乗的活用を図るもので、他分野に先駆けて行われている新しい共同研究の仕組みであり、順調に進展しており、今後一層の活用が望まれる。

また、重点化課題の策定後には、核融合研のLHDはもちろんのこと、原子力機構のJT-60や阪大レーザー研の激光XII号等高出力レーザー群を活用した共同研究もより活性化している。

これらの共同利用・共同研究を引き続き推進して学術研究の成果を上げてい

くとともに、今後、開発研究において原子力機構と大学等が強い連携協力関係を築き、推進する必要がある。

これに関連して、学術研究間においても大学や核融合研との連携が一層システム化され、オープンな連携強化への展開が望まれる。

その際、学術研究に関わる共同研究経費と合わせて、今後増大する開発研究に関わる共同研究（ITER 計画、幅広いアプローチや TBM に関連するもの等）を可能とする経費の確保に留意する必要がある。

#### ITER 計画、幅広いアプローチに関する共同研究

新たに始まる ITER 計画及び幅広いアプローチを成功に導き、同時にこれらのプロジェクトが学術研究一般にとってもその進展に資するものとしていくためには、多様な専門分野の研究者・技術者が研究に参加するための国内体制を早急に整備できるよう関係者が協力する必要がある。

これらの国際研究プロジェクトで我が国が十分な存在感とリーダーシップを示すためには、国内実施機関として見込まれる原子力機構がプロジェクトの根幹を支えるための組織体制を構築するとともに、大学等から十分な数の研究者がプロジェクトに参加し、同時に人材を継続的に育成するための資金とシステムを構築していくことが重要である。

学術研究と教育を本分とする大学等の研究者が、ITER 計画及び幅広いアプローチという国際研究プロジェクトに参加するためには、様々な学術分野の専門知識をプロジェクトへ集中すると同時に、プロジェクトから学術へ、例えば理論・シミュレーション等の新たな課題が提示され、大学の中で実施する基盤研究に資するものであるという双方向の関連が必要となる。

また、大学の研究者が共同研究に参加する場合、個々の研究者が所属する大学側にもメリットがあると同時に大学側から評価されることが重要である。

### (3) 様々な分野との学術的連携

核融合エネルギーの開発研究は、極めて広範な要素科学技術を統合する総合的科学技术であることから、様々な分野の知見を吸収するために、多様な分野で育った専門家を集める必要がある。

ITER 計画及び幅広いアプローチは他分野との知識の交換、さらにそれを担う人の交流という基盤の上に提案された先導的な計画であり、それを実行するためには学術研究や産業技術との密接な連携が必要である。

このような最先端研究からは、核融合科学へ直接新しい課題が提起されるとともに、広い知識の還流はこの分野に留まらない領域へも及び、新たな研究分野を萌芽させる種となり得る。

これまで、例えば原子力機構、核融合研、阪大レーザー研等において、他分野

との連携による活動が活発に行われ、その波及効果として、多様な学術分野の研究が進んでいる。

特に、阪大レーザー研がレーザー核融合研究による知見や基盤技術を活用して、平成15年度から実施している文部科学省リーディングプロジェクト「極端紫外（EUV）光源開発等の先進半導体製造技術の実用化」は、総合科学技術会議の第3期科学技術基本計画においてナノテクノロジー・材料分野の戦略重点科学技術として位置付けられ、世界的な成果を上げている。

この事業等のように、核融合研究で得られた知見や基盤技術の活用によって、幅広い科学技術分野への貢献を積極的に推進していくことが重要であり、今後とも、このような分野融合型の研究活動が行われる必要がある。

他方、核融合エネルギーの実現が近づくにつれて、核融合分野と原子力分野との連携協力が今後ますます重要となってくる。例えば、核融合炉で発生する放射性廃棄物の処理・処分の考え方は、原子力分野での知見に倣うものと考えられ、中性子による構造材料の照射損傷に関する研究は、研究アプローチとして共通的な要素が多く、研究者も両分野にまたがっている。

この他にも、原子力関係試験施設の利用、計算科学、安全性・許認可体系の検討、安全性評価に代表される熱流動関係の解析・実験、核データの評価、液体金属技術やトリチウム技術等、原子力分野とのより一層の連携協力を図っていく必要がある。

また、当然のことながら、他分野との連携協力の前提として、プラズマ核融合科学、炉工学、理論・シミュレーション科学等の分野内連携を十分に図っていくことが必要である。

### 3. 産業連携

産業界が核融合に関してこれまで蓄積してきた機器開発・機器製作を中心とした技術は、ITER計画や幅広いアプローチにとって不可欠であり、産業界との連携は極めて重要である。従って、産業界における技術力の維持等も含め、エネルギーフォーラムのITER・BA技術推進委員会等を通じた産業界と国及び実施機関との連携体制の構築が必要である。

一方、これまで原子力機構、核融合研、阪大レーザー研等において、産業連携による研究活動が活発に行われ、産業界において様々な産業技術の実用化が図られてきた。

今後とも、各研究機関と産業界との間において、それぞれの特長を生かしつつ、連携協力をより一層推進する体制を構築・強化することが必要である。

#### 4. 人材の育成・確保及び国民への説明

##### (1) 人材の育成・確保

核融合エネルギーの実現は、長期間を要する研究課題であり、長期的な視点で、特に若手研究者の育成・確保に向けた取組を、学校教育における人材確保も視野に入れつつ、幅広い観点から進める必要がある。

このため、大学、核融合研、原子力機構が固有の機能を活かし、主体的な役割に基づいた人材育成・確保のネットワークを形成することが必要である。

特に、大学共同利用機関である核融合研においては、大学の人材育成機能の強化にさらに貢献することが、原子力機構においては、大学院教育への協力や、連携大学院制度の活用をより一層推進することが望まれる。

また、広い学術分野及び産業界との連携・交流活動を活発に行いながら、他分野からの人材の流動を一層進めていく必要がある。

さらに、ITER 計画や幅広いアプローチへの参加を人材育成の観点からも積極的に活用するべきである。特に若手研究者にとっては、その参加がキャリアパスとして位置付けられることが重要である。

このような状況をも踏まえ、平成19年度に「原子力人材育成プログラム」を新設したところであり、このような制度も活用しつつ、人材の育成等に努めることが重要である。

将来を見据えた人材育成という観点から、核融合については、ITER のカダラッシュ、幅広いアプローチの那珂市、六ヶ所村を拠点として、国際プロジェクトに関わることができるという点が、研究者のみならず学生への魅力の一つとなる。

また、総合的な科学技術を担う人材の育成という点では、学生をある段階までは専門付けせずに、幅広い視野を持たせるという視点も重要である。

##### (2) 国民への説明

核融合研究には大型研究施設が必要となり、その場合には多額の予算が必要となるため、研究者は社会に対して説明責任がある。

このため、現在取り組んでいる研究課題の魅力や、今後目指すべき研究の方向性について分かりやすい言葉で説明しつつ、積極的に社会に向けて、核融合研究に関する情報発信に努めることが重要である。

また、研究施設への見学者の受入れ、大学や初等中等教育機関との連携活動、市民を対象とした講演会の実施等を通じて、国民の核融合に対する理解増進に資する活動の充実に努める必要がある。

今後の留意点として、将来の核融合エネルギーでは安全性の問題が重要な課題となる。特に、放射線やトリチウムに関する安全性については、今から十分に説明していく必要がある。核融合が社会に対してどのような問題があり、どのように解決していくのかを示していくことで、信頼を得るように努めていくことが重



要である。

未来のエネルギーは地球規模の問題である。このため、この問題を核融合だけで議論するのではなく、新たなエネルギー源として期待され、研究開発が進められている多様なエネルギー対策全体の中で核融合が議論されることが重要である。

その結果、様々な新たなエネルギー源の選択肢の中で、特に核融合が優れているとの認識が得られ、国民から大きな理解と支持を得られることを期待したい。

科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 原子力分野の研究開発に関する委員会  
核融合研究作業部会 構成員名簿

(敬称略)

(委員)

飯 吉 厚 夫	中部大学総長
石 塚 昶 雄	社団法人日本原子力産業協会常務理事
大 島 ま り	東京大学大学院情報学環教授
椛 島 洋 美	横浜国立大学大学院国際社会科学研究所助教
菊 池 満	独立行政法人日本原子力研究開発機構 先進プラズマ研究開発ユニット長
小 森 彰 夫	自然科学研究機構核融合科学研究所大型ヘリカル研究部 研究総主幹
香 山 晃	京都大学エネルギー理工学研究所長
坂 内 正 夫	情報・システム研究機構国立情報学研究所長
笹 尾 眞實子	東北大学大学院工学研究科教授
高 村 秀 一	愛知工業大学工学部電気学科電子工学専攻教授
田 中 知	東京大学大学院工学系研究科教授
東 嶋 和 子	サイエンス・ジャーナリスト
平 山 英 夫	高エネルギー加速器研究機構理事兼任共通基盤研究施設長
松 田 慎三郎	独立行政法人日本原子力研究開発機構執行役
三 間 囿 興	大阪大学レーザーエネルギー学研究センター長
本 島 修	自然科学研究機構核融合科学研究所長

(科学官)

吉 田 善 章 東京大学大学院新領域創成科学研究科教授

(学術調査官)

山 田 弘 司 自然科学研究機構核融合科学研究所大型ヘリカル研究部研究主幹

は、座長

(平成19年4月1日現在)

科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 原子力分野の研究開発に関する委員会  
核融合研究作業部会の審議経過

回	日 時	議 題
第1回	平成18年5月11日(木)	審議事項について討議
第2回	平成18年6月21日(水)	I T E R計画及び幅広いアプローチに関する国内検討体制及び国内推進体制について審議
第3回	平成18年8月31日(木)	以下の検討課題について審議 <ul style="list-style-type: none"> <li>・ I T E R計画、幅広いアプローチに関する国内推進体制</li> <li>・ 核融合研究の重点化</li> <li>・ 共同利用・共同研究の進捗状況</li> </ul>
第4回	平成18年10月25日(水)	以下の検討課題について審議 <ul style="list-style-type: none"> <li>・ I T E R計画、幅広いアプローチに関する国内推進体制</li> <li>・ 今後の共同利用・共同研究</li> <li>・ I T E R計画におけるテストブランケット</li> </ul>
第5回	平成18年12月26日(火)	以下の検討課題について審議 <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 国際関係から見る I T E R計画及び幅広いアプローチ</li> <li>・ 他分野との学術的な連携、産業連携</li> <li>・ 人材育成</li> <li>・ I T E R計画におけるテストブランケット</li> </ul>
第6回	平成19年1月31日(水)	以下の検討課題について審議 <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 人材育成</li> <li>・ 報告書素案</li> </ul>
第7回	平成19年3月22日(木)	以下の検討課題について審議 <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 核融合研究作業部会の議事運営</li> <li>・ 報告書(案)</li> </ul>

## 核融合研究の重点化について

○今後の我が国の核融合研究の在り方について(平成15年1月:科学技術・学術審議会学術分科会核融合研究WG)

・我が国の核融合研究全般にわたり、今後を見据えて、学術的評価に基づき、核融合研究の在り方の方向性について取りまとめ。

(1)核融合研究計画の重点化:トカマク(JT-60)、ヘリカル(LHD)、レーザー(激光X II号、レーザー核融合)、炉工学

(2)共同利用・共同研究の強化

(3)重点化後の人材育成の在り方

核融合研究作業部に「重点化に関するタスクフォース」を設置し、評価・検討を行うなどしてチェック・アンド・レビューを実施

### チェック・アンド・レビュー実施結果

トカマク  
(JT-60)

研究成果は着実に進展しており、重点化後、大学等との共同研究が推進され、人材育成等の成果もあがっており、十分に評価できる。  
今後は、大学や核融合研との連携が一層システム化され、オープンな連携強化への展開が望まれる。大学の学術的な共同研究や国際企画が活かされるよう運転時間を増強することが望ましい。

ヘリカル  
(LHD)

研究成果は着実に進展し、大学共同利用機関としての共同利用・共同研究の役割がより強化されており、実験データをオープンに利用できる体制の構築等、重点化後の成果は期待通りありっていると評価できる。  
今後の課題として、学術分野での重要ターゲットの解明に向けた一層の努力が望まれる。

レーザー  
(激光X II号、  
レーザー核融合)

高速度火に大きな成果があり、パワーフォトリクスをベースとした特徴的な貢献や、共同利用・共同研究の強化の面で、重点化後、十分な成果をあげつつあり評価できる。  
今後はオールジャパンの課題や体制の構築に向けた一層の取り組みが望まれる。  
次段階へ進むためには、FIREX-Iにおける原理実証に加えて、炉システムの実現性を示す炉工学研究の展開が必要である。

炉工学

(原子力機構)着実に進展している。オールジャパンの視点から核融合研、大学等との役割分担を明確にした一層強力な連携体制の構築が望まれる。  
(核融合研)特徴のある成果やオープンな共同研究が推進されている。  
大学や原子力機構との役割分担を明確にした一層強力な連携体制の構築が望まれる。

各重点化課題は着実に推進されており、さらに留意事項への対応が望まれる。  
引き続き、重点化課題を中核とした一層強力な連携体制の構築に向けて取り組むことが重要。



# 核融合研究作業部会 核融合研究の重点化に関するチェック・アンド・レビュー実施結果

【JT-60】

観点	意見	留意点等
重点化後の研究の進展	<ul style="list-style-type: none"> <li>●重点化後、積極的な努力がなされており、研究成果も着実に進展している。大学の学術的な共同研究や国際企画が活かされるよう運転時間を増強することが望ましい。今後、ITERへの貢献や大学等の研究者との共同の取り組みを一層進めることが望ましい。</li> <li>・予算・人員等の厳しい制約の下にも関わらず、大きな成果を挙げていることは高く評価出来る。</li> <li>・60-SA計画へ向けた努力も確に行われておりと評価できる。</li> <li>・BAとの関連についても全日本的な取り組みが見られ、ITER以降も見据えた魅力的な装置横断がなされている。</li> <li>・共同研究および、全日本的な人材育成には大きな貢献があったと評価される。</li> <li>・重点化後の研究テーマであるJT-60の高ベータ化に関する研究は着実に進展している。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・大学の学術的な共同研究や国際企画が活かされるよう運転時間を増強することが望ましい。</li> <li>・本来的な目標である、核融合エネルギーの早期実現やITERへの貢献がおろそかにならないように留意すべきである。</li> <li>・JT-60SA計画に向けての取り組みも、大学等の研究者を含めた取り組みがなされているが、BAの一環として日欧で取り組むことになったことを考慮し、より一層大学等の研究者との共同の取り組みを進める必要があると思われる。</li> </ul>
共同企画・共同研究の強化	<ul style="list-style-type: none"> <li>●共同企画において優れた成果を挙げると共に、大学等との共同研究や工学分野との協力が推進されている。今後は、大学や核融合研との連携が一層システム化され、オープンな連携の強化が望まれる。</li> <li>・重点化後の大学等との共同研究は全般に強気に推進されており、十分に評価できる。</li> <li>・60-SA計画において共同企画の成果が認められる。</li> <li>・共同研究の実績も上がっており、フェライト鋼の利用によるプラズマ維持特性の改善など、工学分野との協力も見られ高く評価できる。</li> <li>・共同研究成果の発表が機構外部の研究者により行われる比率が高く、共同研究が実質的に成果を挙げつつ拡大していることが認められる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・今後は、大学や核融合研との連携が一層システム化され、オープンな連携の強化への展開が望まれる。</li> <li>・大学独自の学術研究成果を正当に認識し、評価することが望まれる。</li> <li>・機構内での理解を得て、大学等の学術研究に必要な運転時間を確保することが望まれる。</li> </ul>
重点化後の人材育成	<ul style="list-style-type: none"> <li>●若手研究者を積極的に活用するなど、内部での人材育成の努力がなされている。今後、若手研究者の採用や原子力機構外との人材の流動化のための取り組みが望まれる。</li> <li>・人材育成の成果があがっていると十分に評価できる。</li> <li>・人材育成の余裕が少ない中、限られた範囲での若手研究者の教育成果は上がっているといえる。</li> <li>・内部での若手の育成・登用の努力により、いくつかのすぐれた成果が見られる。研究協力に参加する学生数が飛躍的に伸びた結果、修士論文、博士論文数も増加していると思われる。</li> <li>・重点化以前に比較して、大学等との共同研究が進んでおり、研究の進め方においても、大学の若手研究者が責任者になったり、論文の筆頭著者になる例が増えるなど、共同研究にふさわしい体制が強化されている。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・若手研究者の採用枠を増大することが望ましい。</li> <li>・博士研究員をはじめとする若手研究者の採用実績は上がっているが絶対数が少ないことが問題であり、根本的な改善が必要と思われる。</li> <li>・大学等との連携・協力での人材育成の枠組みの具体的な検討はこれからの課題であり、柔軟性と多様性を有する人材育成の枠組みの構築が求められる。</li> <li>・育成した人材を外部の研究機関、大学、企業等へ送り出す努力、人材の流動化が望まれる。</li> <li>・ITERやBAIに向けて必要な人材を考えると、大学との共同を含め、ポストク等若手研究者を増やす取り組みが必要と思われる。</li> </ul>

<p>国際的 視点から の寄与</p>	<p>●世界を先導する成果が認められ、ITER計画を実施する上で、国際的に大きく貢献している。今後は国際的競争力の維持と併せて、アジア地域との協力のさらなる強化が望まれる。</p> <p>・重点化後の大きな研究の成果は、ITERを実施する上で国際的に大きな貢献となっている。</p> <p>・海外の主要な装置との共同企画をさらに進めること、それを大学等との連携で計画して行くこと等が期待される。</p> <p>・高ペーター一定常化研究の進展には世界を先導する成果が認められる。</p> <p>・JT-60SAは、トカマク装置の研究の上で大きな貢献をすることが期待される。</p>	<p>・独自の重要な寄与をしつつあるが、運転時間の短さが十分に行うべき研究を阻害し、競争力を弱める傾向を生み出しているのではないかと懸念されている。</p> <p>・我が国が研究開発の内容、質において高いレベルを維持するように、全日本的な支援体制を含めさらに検討の余地はある。</p> <p>・相互に競争している関係という難しい側面があるが、韓国や中国などアジア地域との協力も強化することが必要ではないかと懸念されている。</p>
<p>社会的 視点から の寄与</p>	<p>●社会への広報活動は積極的に進められているが、一層の努力が望まれる。核融合エネルギーの位置づけや大学等との連携方策を明確にすることが望まれる。</p> <p>・地元をはじめとした社会への説明や新聞報道等の活動が積極的に進められている。</p> <p>・原子力他分野への発信や連携が望まれる。</p>	<p>・核融合に関する社会の認知度の低さはほとんど改善されていないため、更なる努力が求められる。</p> <p>・(原子力関係者を含む)社会に対して、核融合エネルギー早期実現の中で、JT-60がどのような位置づけにあるのか、核融合研究開発の中核であった原研がどのように研究開発を進めていくのか、大学等との責任ある連携をどう進めていくのか、明快でない。</p>
<p>その他</p>	<p>・さらなる共同研究、国際企画等ができるよう、十分な運転時間を確保されることが望まれる。</p> <p>・ITERへの参画において、大学・NIFSとの共同研究体制を構築するという意欲にやや欠けているのではないかと懸念されている。</p> <p>・ITERおよび我が国核融合エネルギー研究開発への貢献をさらに考えてほしい。</p>	<p>・できる限り運転期間を確保されることが望まれる。JT-60 SA建設期でも、できる限り運転期間を確保されることが望まれる。</p> <p>・学術研究が開発研究の基盤になることへの認識を深めてほしい。</p>
<p>総評</p>	<p>研究成果は着実に進展しており、重点化後、大学等との共同研究が推進され、人材育成等の成果もあがり、十分に評価できる。今後は、大学や核融合研との連携が一層システム化され、オープンな連携強化への展開が望まれる。大学の学術的な共同研究や国際企画が活かされるよう運転時間を増強することが望ましい。</p>	

# 核融合研究作業部会 核融合研究の重点化に関するチェック・アンド・レビュー実施結果

【LHD】

観点	意見	留意点等
重点化後の研究の進展	<p>●重点化後、優れた成果をあげ、着実に研究が進展している。パラメータ数値の向上のみならず、今後の課題として、学術分野での重要ターゲットの解明に向けた一層の努力が望まれる。</p> <p>・すぐれた成果をあげ、研究の進展があった。プラズマ物理としての学術的側面、トロイダルシステムの理解、ひいてはトカマク物理への貢献等の面で今後研究を進展させていくことが望まれる。</p> <p>・各大学がオープンに実験データを利用できる体制が構築されている。</p> <p>・LHD実験は、着実に成果をあげており、環状プラズマの総合的な理解に大きく貢献している。</p>	<p>●今後の課題として、学術分野での重要ターゲットの解明に向けた一層の努力が望まれる。</p> <p>・学術データ・ベースの質と量の拡充を旨としたパラメータの向上と、学術研究の体系化への努力をバランスよく進めること。</p> <p>・ITER及びBBAが展開される状況において、LHD独自の課題と共にトカマク装置との関連についても明確にすることが必要ではないか。</p>
共同利用・共同研究の強化	<p>●重点化後、双方向型共同研究の実施等により、大学共同利用機関としての共同利用・共同研究が、我が国の核融合エネルギー開発に貢献することを期待する。双方向型共同研究において、参加機関の自由な発想及び学術的評価の確保に留意すること。</p> <p>・双方向型共同研究の実施や、実験データ共有にネットワーク利用を図ったオープンな体制を構築する等、重点化後の成果は期待通りありつつあると評価できる。</p> <p>・大学共同利用機関として、LHD実験を大学等の研究者との共同利用・共同研究として推進すると共に、双方向型共同研究により大学における施設の相互利用を含めた共同研究が開始されるなど強化されている。</p>	<p>●共同利用・共同研究の役割が強化されている。</p> <p>・双方向型共同研究はセンターへの予算をNIFSが関わることで確保されているが、センターの自由な発想と学術的に厳しい評価とを担保するよう努力していくことが大切である。</p> <p>・双方向共同研究、LHD共同研究を初めとする共同研究により大学の核融合研究が進んでいることは理解されるが、我が国の核融合エネルギー開発にどこまで貢献しているのかの検討も必要ではないか。</p>
重点化後の人材育成	<p>●総合研究大学院大学の大学院生の受け入れや、共同研究を通じて全国の学生若手研究者の自由な発想による企画を促す研究環境の確保が望まれる。</p> <p>・総合研究大学院大学の学生のみならず、全国の大学からの学生の教育、共同研究参加の学生の教育、独自のセミナーの企画等、日本の当分野の人材育成で重要な役割を果たしている。</p>	<p>●我が国の核融合分野の人材育成に重要な役割を果たしている。</p> <p>・若手が自由な発想で研究企画ができる自由度が確保されているか。学問的にプロードな視点の積極的育成が学術としての価値を高める方向に寄与する形で、格段の努力が望まれる。</p>
国際的視点からの寄与	<p>●数多くの国際共同研究が推進されている。引き続き国際的に重要な役割を大学等と連携して果たすことが期待される。</p> <p>・数多くの国際共同研究がなされている。海外の主要な装置との共同研究をさらに進めること、それを大学等と連携で計画して行くこと等が期待される。</p> <p>・政府間協定や研究所間協定に基づき国際協力や国際共同研究が展開されており、国際的にも重要な役割を果たしている。</p>	<p>●最近学術的に高く評価されたのはCHSで発見されたZonal Flow 関連の研究である。CHSはシャットダウンしたため、これを凌駕する世界レベルの学術的成果がLHDから生まれることを期待する。</p>

<p>社会的視点からの寄与</p>	<p>●核融合研究に対する理解を深めるための活動が積極的に行われている。また、他分野との連携のための努力が認められる。今後は、核融合エネルギーの実現に向け、ITERや原子力機構との関係をさらに分かりやすく説明することが望まれる。</p> <p>・社会への説明、特に地元への説明が積極的に行われている。</p> <p>・様々な広報活動や見学受け入れを通じて、核融合研究に対する理解を深める活動を精力的に行っている。また、研究途上で生まれた成果を社会に還元する努力を意識的に行っていることも評価できる。</p>	<p>・学術他分野への発信・連携に関しては自然科学研究機構の中で拠点形成などの努力がなされているが、なおいっそうの努力が期待される。</p> <p>・核融合エネルギーの実現に対して、ITER、原子力機構での研究開発との関係を明確にした説明が社会に対して必要。</p>
<p>その他</p>	<p>・ITERとの関連における学術研究への取り組みを積極的に行うためJAEAとの調整が望まれる。</p>	
<p>総評</p>	<p>研究成果は着実に進展し、大学共同利用機関としての共同利用・共同研究の役割がより強化されており、実験データをオープンに利用できる体制の構築等、重点化後の成果は期待通りあがっていると評価できる。</p> <p>今後の課題として、学術分野での重要ターゲットの解明に向けた一層の努力が望まれる。</p>	



# 核融合研究作業部会 核融合研究の重点化に関するチェック・アンド・レビュー実施結果

## 【激光XII号、レーザー核融合】

観点	意見	留意点等
重点化後の研究の進展	<ul style="list-style-type: none"> <li>●重点化後、高速度点火において大きな成果を挙げており、学術研究としてのプラズマ物理や宇宙物理等へも貢献している。また、他分野や産業技術への展開が進んでいる。次段階へ進むためには、FIREX-IIにおける原理実証に加えて、炉システムの実現性を示す炉工学研究の展開が必要である。</li> <li>・パワーフォトリクスをベースにした特徴的な貢献の観点から、十分な成果を挙げつつあると評価できる。</li> <li>・高速度点火における成果はセンターの規模から見ると高く評価でき、独自研究での成果の大きさも高く評価できる。</li> <li>・研究目標設定が具体的にあり、成果も高い水準で対応していることは評価できる。</li> <li>・プラズマ物理としての学術的側面、宇宙物理へ貢献があった。今後さらに研究を発展させていくことが期待できる。</li> <li>・微細加工光源への応用などの努力が見られる。</li> <li>・レーザーエネルギー学研究中心への改組、全国共同利用化により、レーザー核融合研究で得られた成果の他分野や産業技術への展開が進んでいると見える。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・次段階へ進むためには、FIREX-IIにおける原理実証に加えて、炉システムの実現性を示す炉工学研究の展開が必要である。</li> </ul>
共同利用・共同研究の強化	<ul style="list-style-type: none"> <li>●重点化後、全国共同利用施設化などを通じて、共同利用・共同研究が強化されている。今後は、分野の展開を含めてオールジャパンの課題や体制の構築に向けた一層の取り組みが望まれる。</li> <li>・共同研究や共同利用の成果も確実に上がっており、核融合分野外からの研究資金の獲得等においても高く評価できる。</li> <li>・新たに全国共同研究を開始するなど努力が見られる。</li> <li>・全国共同利用施設化して間がないが、共同研究の代表者にセンター以外の研究者が増えるなど共同利用・共同研究が強化される方向が見える。全国的にも特色ある装置であり、有効に利用されるようにより広い分野に働きかけると共に、センターのこれまでの研究活動を共同利用・共同研究により一層充実する様なバランスのとれた取り組みをすることが望まれる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・今後は、オールジャパンの課題や体制の構築に向けた一層の取り組みが望まれる。</li> <li>・全国共同利用としての活動は限定的な内容にとどまっていないか。炉工学など幅広い共同研究が望まれる。</li> <li>・レーザー核融合分野以外の核融合研究者を含める共同研究の展開も必要ではないか。例えば、チェンバー技術、トリチウム技術、炉設計など。</li> </ul>
重点化後の人材育成	<ul style="list-style-type: none"> <li>●若手研究者育成への積極的な取り組みや、国内外の研究機関等への人材派遣によって人材育成に貢献している。</li> <li>・大学内にある組織として、重点化後も引き続き若手研究者には大きな貢献がある。特に人材を国内外の研究機関、企業へと送り出している。</li> <li>・大学院生を含む若手研究者に国内外での発表の機会を与えたり、優れた若手研究者に独自の賞を設ける等人材育成に積極的に取り組んでいると言え</li> </ul>	

<p>国際的視点からの寄与</p>	<p>● 高速度点火方式の研究成果等により国際的にも重要な役割を果たしている。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・高速度点火という魅力的な方式の実現性を示しつつあることは国際的にも高く評価されており、着実な成果の積み上げも高く評価できる。</li> <li>・高速度点火の技術課題を整理し、国際協力も含めて研究を先導することでの寄与を期待する。</li> <li>・「高速度点火」方式においては世界的にリーダーシップを取りつつある。</li> <li>・国際的にも特色ある装置として重要な役割を果たしている。海外との積極的な国際共同研究を実施している点も評価できる。</li> </ul>	
<p>社会的視点からの寄与</p>	<p>● EUV光源開発等、核融合外への技術や知見の波及効果が大きい。今後はレーザー核融合と磁場閉じ込め核融合との相違点を明らかにしつつ、研究の位置づけを社会へ発信する必要がある。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・国際的にも国内的にもニューースとして取り上げられることが多く核融合の社会的認知に関する寄与は大きい。</li> <li>・核融合外への技術や知見の波及効果は大きく貢献度も高い。</li> <li>・上記の成果は、多くの科学技術上の挑戦の上に築かれている。その成果はEUV光源の開発をはじめとする数多くの例に見られるように産業応用として展開されている。</li> <li>・一般社会のみならず他分野への発信に大きな努力を払っている。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・将来の核融合エネルギーの実現という観点からは物理・工学を含めて一層の努力が必要である。</li> <li>・磁気閉じ込め核融合との相違点を明確にしつつ、研究の正確な位置づけを社会に発信することが望まれる。</li> </ul>
<p>その他</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高速度点火関連の成果を受けて実験炉に向けて研究の拡大を図るためには炉システムの実現性を必要最低限示すための炉工学研究が必要であり、研究部門の要求と研究努力の強化が求められる。</li> </ul>	
<p>総評</p>	<p>高速度点火に大きな成果があり、パワーフォトニクスをベースとした特徴的な貢献や、共同利用・共同研究の強化の面で、重点化後、十分な成果をあげつつあり評価できる。 今後はオールジャパンの課題や体制の構築に向けた一層の取り組みが望まれる。 次段階へ進むためには、FIREX-IIにおける原理実証に加えて、炉システムの実現性を示す炉工学研究の展開が必要である。</p>	

# 核融合研究作業部会 核融合研究の重点化に関するワークショップ・アワード・レビュー実施結果

## 【炉工学(日本原子力研究開発機構)】

観点	意見	留意点等
<p>重点化後の研究の進展</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●ブランケット研究の進展をはじめ、ITERに必要な主要機器の開発を主軸とした炉工学研究に大きく貢献している。ITER建設および原型炉に向け、オールジャパンの視点から核融合研、大学等との役割分担を明確にした一層強力な連携体制の構築が望まれる。</li> <li>・着実な進展が行われている。</li> <li>・現行の日米協力での材料照射研究の強化や連携したIFMIF計画の推進等において大学との協力関係や役割分担の適正化が進み、大きな進展が認められる。</li> <li>・ブランケット工学のシステム化の進展など評価できる。</li> <li>・ITERに必要な主要機器の開発を主軸とし炉工学の基盤的研究と合わせて、重要な成果をあげ、研究の進展があった。ITER建設基盤技術を構築する上で大きな貢献があった。</li> <li>・少ない予算、人員の中で材料開発、ブランケット研究を中心に研究が進展していることは評価できる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・オールジャパンの視点から核融合研、大学等との役割分担を明確にした一層強力な連携体制の構築が望まれる。</li> <li>・IFMIFの加速器技術に関して、自ら行っていくのか、JAEAの他の部門と協力してやっていくのか明確にすることが望まれる。</li> <li>・原型炉に向けた研究の進展は超伝導や加熱機器について見られるものの、トリチウム技術や炉全体としての総合化の点を明確にすることが望まれる。</li> <li>・ITER・BAIについて核融合工学全体にわたる研究開発の展開が期待される。</li> </ul>
<p>国際的視点からの寄与</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●ITER建設、BAへの基盤構築において、国際的に重要な貢献がなされている。国際的研究の展開が重要であり、今後とも核融合工学全体のレベル向上に努めることが望まれる。</li> <li>・着実な進展が行われている。</li> <li>・ITER建設、BAへの基盤を構築した面において国際的にも重要な貢献があった。</li> <li>・低放射化フェライト鋼に関しては大きく寄与している。</li> <li>・IFMIF、TBMにおいて国際的な寄与が大きい。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・炉工学の要素技術や材料開発における国際的な優位性と先進性は明白であるが、技術の統合やシステム化における戦略や長期的な視点の脆弱さは問題である。</li> <li>・IFMIF等の活動における指導力の発揮においても改善が求められる。大学等からの関与や参加がより強化される必要が感じられる。</li> <li>・ブランケットに関しては戦略を十分に検討する余地がないか。</li> <li>・ITER、BAIは国際的研究の展開で重要であり、ここでは核融合工学全体のレベル向上に努めることが望まれる。</li> <li>・EVEDA及びブランケットの研究は、いずれも国際的に重要な課題であるが、特にEVEDA計画において我が国が果たす役割を明確にし、そのために必要な大学を含む研究者が協力しやすい体制を作ることが必要である。</li> </ul>

<p>社会的視点からの寄与</p>	<p>●材料開発やプランケット工学の成果は他分野への貢献も大きく、我が国の科学技術の牽引につながっている。全日本的な研究開発の展開を進めていくことが望まれる。</p> <p>・着実な進展が行われている。</p> <p>・材料開発の成果やプランケット工学等における要素技術の多くは原子力分野のみならず、超耐環境性システムの性能向上や魅力の付加に寄与しており、社会への貢献は大きい。</p> <p>・特に、次世代原子力開発や原子力発電における工学課題の解決の鍵となる学問的な基盤やデータベースの提供などで高く評価される。</p> <p>・これらの成果は科学技術上の挑戦の上に築かれており、いくつかの成果は直接産業応用として展開されている例もある。その他直接的ではないにしろ、日本の科学技術の牽引力となつていふと思われ。</p>	<p>・原型炉設計における課題の洗い出しとシステムインテグレーションの全貌を示す必要がある。</p> <p>・核融合エネルギー実現にはプランケット開発が必須であり、この観点から、産業界、原子力関係者を含む全日本的な研究開発の展開を核融合フォーラムを中心に展開しているが、さらに進めるべき。</p>
<p>その他</p>	<p>・低放射化材料分野やプランケット工学分野における世界を牽引する先進性の維持と更なる指導力の確保のためにも工学研究の強化が求められる。</p> <p>・核融合エネルギー実現にはプランケット工学など核融合工学の進展が必須であり、原子力機構は我が国の核融合工学研究開発の中核となることが期待される。そのためには、予算、人員を強化するほか、核融合科学研究所等との連携を強め、全日本的な体制整備が必要。</p>	
<p>総評</p>	<p>着実に進展している。オールジャパンの視点から核融合研、大学等との役割分担を明確にした一層強力な連携体制の構築が望まれる。</p>	

# 核融合研究作業部会 核融合研究の重点化に関するワークショップ・アランド・レビュー実施結果

## 【炉工学(自然科学研究機構核融合科学研究所)】

観点	意見	留意点等
重点化後の研究の進展	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 大学とのオープンな共同研究を通じて様々な特徴ある成果を挙げている。大学、原子力機構との役割分担を明確化した一層強力な連携体制の構築が望まれる。</li> <li>・ 特徴のある成果やオープンな共同研究が推進されている。</li> <li>・ 限られた炉工センターの活動としての努力は評価できる。</li> <li>・ いくつかの成果があげられている。</li> <li>・ バナジウム合金の製造に関して進展があった。</li> <li>・ Fibelに関する要素技術において進展があった。</li> <li>・ Li冷却バナジウム構造絶縁被覆材において進展があった。</li> <li>・ 少ない人員、予算のなかで研究が進展していることは評価できる。</li> <li>・ 大学との共同研究は評価される。また、大学での核融合工学の研究維持に貢献をしている。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 大学、原子力機構との役割分担を明確化した一層強力な連携体制の構築が望まれる。</li> <li>・ 学術としての工学研究として優先度の高い研究を選択し、努力を集中させる姿勢が見られるが更なる努力が求められる。</li> <li>・ 限られた体制の中で成果をあげているといえるが、先進的なブランケット主ジェーブルの作成という課題をITERに向けて実現していくのであれば、共同研究の体制を含めた強化が必要と思われる。</li> <li>・ 我が国の核融合エネルギー実現、ITERとの関係の明確化が望まれる。</li> </ul>
国際的視点からの寄与	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 世界をリードする研究が展開されており、日米協力をはじめとした国際協力が積極的に行われている。ITER、BAへの貢献のための方針を明確にすることが望まれる。</li> <li>・ JUPITER-IIなどの日米協力や日韓・日中との共同研究、IEA活動等における貢献は高く評価できる。</li> <li>・ 液体ブランケットにおける重要な材料となるバナジウム研究は世界をリードするものがあり、工学センターの国際的な寄与は大きい。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ITER、BAへの貢献のための方針を明確にすること</li> <li>・ 顕著な成果が得られたのか明白でない。</li> <li>・ BAIにどのように貢献していくのか、今後方針を明確にして取り組んでいくことが期待される。</li> </ul>
社会的視点からの寄与	<ul style="list-style-type: none"> <li>● いくつかの成果は産業応用として展開されているが、さらなる努力が必要である。今後は我が国の核融合工学研究開発における位置づけを明確にすることが望まれる。</li> <li>・ いくつかの成果は直接産業応用として展開されている例もある。その他直接的ではないにしても、日本の科学技術の牽引力となっていると思われる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 今後我が国の核融合工学研究開発における位置づけを明確にすること</li> <li>・ ヘリカル炉のエネルギー源としての可能性や魅力を社会に知らせる努力は見られるが更なる努力の傾注が望まれる。</li> <li>・ 窯業等の地場産業への貢献なども見られるが、更なる努力が必要と思われ</li> <li>・ 我が国の核融合工学研究開発の中での位置づけ、原子力機構との関係、ITERへの貢献、などを明確にし、全日本的観点で研究が行われる必要があるのではないか。</li> </ul>

その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>・核融合以外での競争的資金の獲得等の努力が求められる。</li> <li>・炉工学を独自研究で進めるにしても共同研究を進めるにしても、炉工学センターの強化は必要であり、強化の方針については更なる議論とそれに基づく方針の適正化が必要であろう。</li> <li>・今後日本全体の炉工学のロードマップを描き、その中で大学における炉工学研究の位置づけを行い、その上で核融合研の役割を明確にする必要があるのではないか。</li> <li>・NIFSにおける炉工学研究をどのように位置づけるのかに関しては議論が必要である。共同研究に重点を置くのはよいが、原型炉を目指すのかへリカル炉なのかもう少しターゲットを明確にすることが望まれる。</li> </ul>
-----	--

総評	<p>特徴のある成果やオープンな共同研究が推進されている。大学や原子力機構との役割分担を明確にした一層強力な連携体制の構築が望まれる。</p>
----	---

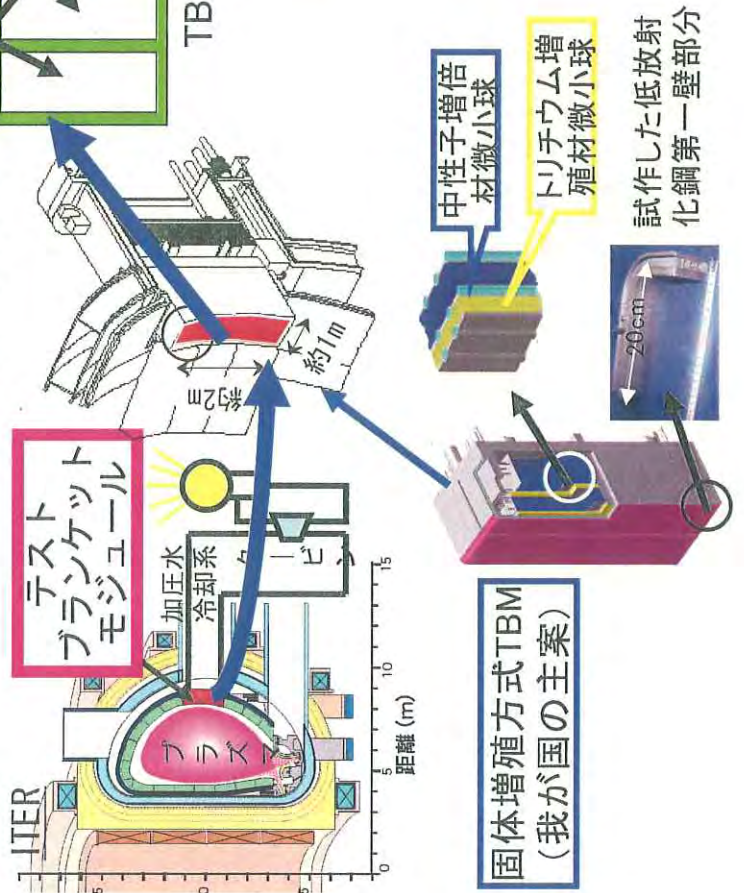


# ITERテストブランケット・モジュールの検討結果

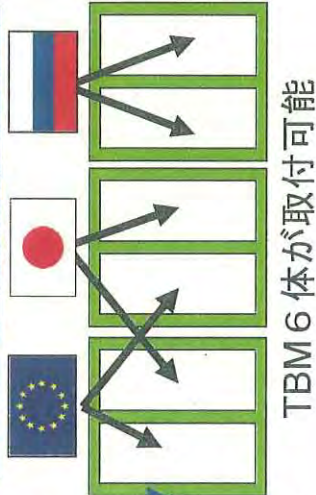
- ITERにテストブランケット・モジュール(TBM)を取りつけて実施する総合機能試験はブランケット開発の重要なマイルストーン。
- 従来、TBM計画は各極独自の活動との位置付けであったが、ITER参加極の増加など新しい状況に伴って、国際協力での実施が不可欠な状況。
- 我が国としては、主案として固体増殖(水冷却)方式を原子力機構を中心に全日本的に研究開発を推進。液体増殖などの先進ブランケットについては大学等を中心に学術研究として実施。
- 今後、これらの実施を可能とする体制の構築および適切な資金の確保が必要。

## ITERテストブランケット・モジュール試験

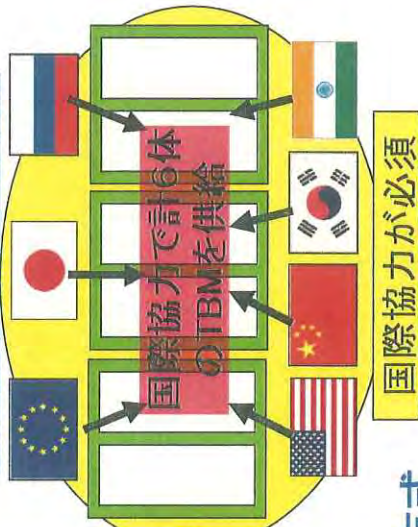
- ITERはTBM試験のために3本の水平ポートを準備。
- 1つのポートで2体のTBMを試験。最大6体を試験。



## これまでの研究開発の枠組み



## 新たな研究開発の枠組み



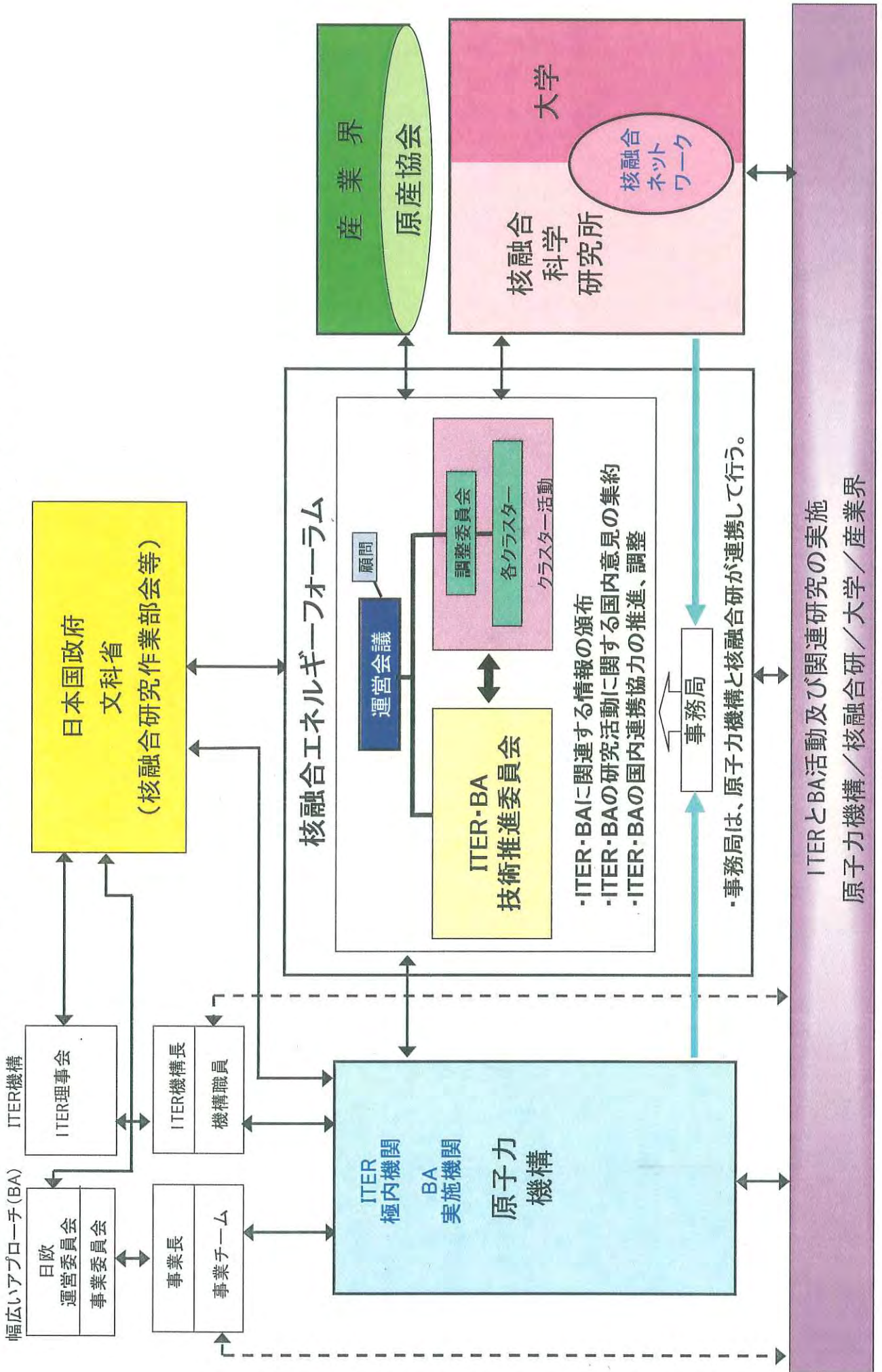
## 各極が検討中のTBMの方式

(●は主案を示す)

	日	欧	米	露	中	韓	印
固体増殖/He冷却	○	●	○	○	●	○	○
LiPb増殖/He冷却	○	○	●		●		●
固体増殖/水冷却	○	●			○		○
液体Li増殖	○			●		●	
溶融塩増殖	○						



# ITER-BAに関する国内実施・協力体制





## - 用語解説 -

### ITER 遠隔実験研究センター

幅広いアプローチ活動における3つのプロジェクト。国際核融合エネルギー研究センターにおいて、高速ネットワーク設備等を使って、ITERの遠隔実験のための準備を日欧で行う。本格的な活動は幅広いアプローチ実施期間の後期に開始予定。最終的には、フランス・カダラッシュのITER実験施設と日本の六ヶ所村のITER遠隔実験センターを高速ネットワークで結び、日本のセンターからITER参加極の研究者が、ITERの実験条件の提案・データ収集・解析等を行うことを可能にするが、ITERの運転が始まる前では、サテライトトカマク等と遠隔実験の試験を行うこととしている。

### ITER 計画

制御された核燃焼プラズマの維持と長時間燃焼によって核融合の科学的・技術的実現性を実証することを目指したトカマク型の核融合実験炉計画。1992年から日本・米国・欧州・ロシアの国際協力として推進され、9年間の工学設計及び、主要機器の技術開発を行った。平成13年11月からは、政府間協議を開始し、平成17年6月にモスクワで開催された第2回6極閣僚級会合においてITERの建設地がフランス・カダラッシュに決定するとともに、平成18年5月の閣僚級会合（ブラッセル）において、ITER機構設立のための協定案への仮署名を行った。現在の参加極は日本、EU、米国、韓国、中国、ロシア、インドの7極である。

### ITER 計画推進検討会

ITER及び幅広いアプローチについて、我が国の役割と責任を適切に果たし、ITER計画の円滑な実施に寄与することを目的に専門的に必要な検討を行うため、平成17年8月に文部科学省研究開発局が設置した検討会。

### JT-60

臨界プラズマ試験装置 JAERI Tokamak-60 の略称であり、日本原子力研究所那珂研究所で稼働している世界最大級のトカマク装置である。米国の TFTR（シャットダウン）、欧州の JET 装置と併せて3大トカマクといわれた。JT-60で達成された5億度を越える世界最高温度は、ギネスブックにも登録されている。

## LHD

岐阜県土岐市の自然科学研究機構核融合科学研究所で稼動中の世界最大規模のヘリカル型実験装置。LHDとはLarge Helical Deviceの略。LHDは、プラズマの閉じ込めに、ねじれた磁場コイル（ヘリカルコイル）を用い、我が国で独自に開発された磁場配位（ヘリオトロン配位）を採用した。2本の超伝導ヘリカルコイルと3対の円環超伝導コイルから構成される。平成10年3月から実験が開始された。ヘリカル方式は本質的に制御性が優れており、将来の発電炉に必要な定常運転に適している。また、トカマク方式と磁場構造が基本的に異なっていることなどから、トカマク方式と相補的な研究を行うことなどにより、ITER計画推進のための支援装置としての役割が期待されている。

## 液体金属技術

高速増殖炉では、金属ナトリウムや鉛ビスマス合金などの液体金属が冷却材の候補とされ、金属を液体の状態に保つための高温の維持、主冷却系の循環方式、液体金属による構造材の腐食対策、安全対策などでの技術の蓄積がある。このような液体金属技術は、将来の核融合炉の冷却材のオプションとされるリチウム鉛合金及び金属リチウム利用技術と共通点が多い。

## 液体増殖

核融合炉のブランケットでは、核融合炉で発生する中性子とリチウムによる核反応を利用して燃料となるトリチウムを生産（増殖）する。このため、ブランケット内にリチウムを含む物質を入れる必要があるが、固体のリチウム化合物を用いるものが固体増殖ブランケットであるのに対し、液体リチウム、Li-Pb合金、熔融塩Flibeなどの液体状態で用いるものを液体増殖ブランケットという。液体増殖ブランケットにおいては、増殖材を連続的に循環流動させることにより、トリチウムを連続的に回収し、反応で失われたリチウムを連続的に補給することができる。これにより、トリチウム回収用ガスラインやバーンアウトによる定期交換が不要になるという利点がある。また、液体増殖材が冷却材を兼ねることができれば（自己冷却ブランケット）、ブランケットの構造を単純化できるという利点もある。一方、液体増殖ブランケットの多くの場合、増殖材と構造材との腐食が重要課題となる。

## 温室効果ガス

地球からの熱放射を遮断し、いわゆる温室効果を起こす気体の総称。二酸化炭素、フロン、メタン、一酸化二窒素など。

### 概念設計活動（ITER 概念設計活動）

概念設計活動(CDA)は、IAEAの後援のもとで、1988～1990年にガルヒンク(独)で、日欧露米の4極により実施され、核融合実験炉が概念として成立することが示された。その結果は、続いて実施された1992年～2001年にかけての工学設計活動(EDA)へと引き継がれた。

### 核拡散抵抗性

核兵器への転用が困難であることをいう。核融合炉の燃料は核燃料物質ではなく、核兵器への転用は技術的に難しい。世界規模で利用されるエネルギー源には、不適切な利用に対する安全保障を担保するため、このような核拡散抵抗性が不可欠と考えられている。

### 核分裂発電

軽水炉、重水炉、高温ガス炉、高速増殖炉など、ウラン又はプルトニウムを燃料として発電する原子炉の総称。

### 核融合計算センター

幅広いアプローチ活動における3つのプロジェクトのうちの一つ。国際核融合エネルギー研究センターにおいて、次世代スーパーコンピュータを使って、核融合炉(原型炉)の概念設計のための研究を日欧で実施する。本格的な活動は幅広いアプローチ実施期間の後半で行う予定。このサブプロジェクトでは、原型炉設計、原型炉のための材料開発等に関連するシミュレーションを実施するだけでなく、遠隔実験センターと連携して、サテライトトカマクの先進定常プラズマ拳動、ITERの燃焼プラズマ拳動についての評価、予想を行う予定。

### 核融合理論シミュレーション研究

核融合に関わるプラズマや材料の従う基礎物理法則から、実験とは独立に、理論的に、あるいは、物理法則を記述する方程式を計算機で解き、それらの拳動の説明、模擬、予測を目指す研究。特に、核燃焼プラズマは、様々な時空間スケールと物理過程を持つ階層間の矛盾のない相互作用の結果として、その時空間的全体構造が決定される極めて自律性の高い非平衡、非線形、非孤立的な系として特徴付けられる。このような核燃焼プラズマの全体像を数値的に再現し、更に、その振る舞いを正確に予測するシミュレーションが、実験、理論に対して、第三の知の方法論として求められている。温度や密度等の巨視的な実験観測の全時間変化の解析・予測に重点を置くシミュレーションと、各階層を中心とした個別物理現象に対する階層間相互作用の影響の解析・予測に重点

を置くシミュレーションとを融合させる理論シミュレーションを構築する試みが進められている。幅広いアプローチの枠組みでも、国際核融合エネルギー研究センター内に核融合計算センターが設置され、理論シミュレーション研究が実施される予定である。

#### 核融合炉

水素などの軽い元素の原子核を融合させてエネルギーを発生させる炉を核融合炉という。核融合炉で必要とされる燃料資源は地球上に偏在することなく豊富に存在し、二酸化炭素や窒素酸化物の発生が無く、また、炉心の暴走がないなどの特長がある。

#### 極端紫外 (EUV)

電磁波のうち、おおよそ 1nm から 100nm の波長の領域を極端紫外と呼ぶ。英語では extreme ultra-violet と表現され EUV と略される。物質に対する透過率が極めて低いため、透過光学系が使えず、斜入射光学系あるいは多層膜反射鏡が光制御に用いられる。ノード幅 32nm 以下を目指す次世代半導体製造のためのリソグラフィ技術には波長 13.5nm の高出力 EUV 光源が必要とされ、スズやキセノンを材料としたレーザー生成プラズマやパルスパワー放電プラズマ、あるいは両者のハイブリッド型光源の開発研究が進行中である。磁場閉じこめプラズマでは、ダイバータ材料がプラズマ中に混入し極端紫外領域にも強い発光があり、不純物輸送やプラズマパラメータの診断に有効である。

#### 激 光 号

大阪大学のガラスレーザーを用いた慣性閉じ込め装置。レーザーのビーム数は 12 本、エネルギーは 30kJ (レーザー波長 1.05  $\mu\text{m}$ )、15kJ (同 0.53  $\mu\text{m}$ )、10kJ (同 0.35  $\mu\text{m}$ ) である。

#### 原型炉

ある形式の動力炉を開発する場合、原子炉及びそのプラントについて、技術的性能の見通しを得ること、その原子炉の大型化についての技術的問題点ならびに経済性に関する目安を得ること等を目的として作られた原子炉を原型炉という。核融合の場合、プラント規模での発電及び燃料増殖の実証と、一定の経済性を見通せる目安を得る事を目的に建設される。

### 原型炉設計・研究開発調整センター

幅広いアプローチ活動における3つのプロジェクトのうちの一つ。国際核融合エネルギー研究センターにおいて、次世代核融合炉(原型炉)の概念設計研究を日欧で実施する。このサブプロジェクトでは、原型炉の概念設計、コスト、工程、安全性の確立等を統一的に検討し、共通概念を確立するとともに、原型炉の早期実現へ向けてのロードマップを確立するため、物理及び工学研究開発課題を確認し、概念設計及び関連する研究開発活動を調整するとともに予備的研究開発を実施する。

### 高温プラズマ

核融合の燃料となる水素だけでなく、炭素や酸素などの低い原子価を持つ不純物も完全電離し、荷電粒子間の衝突がほとんど無視できるような数百万度以上の温度を持つプラズマ。核融合反応を起こさせるためには数億度に及ぶ高温が必要であり、そのような炉心プラズマの挙動を理解するための基礎として、高温プラズマを対象する研究が進められている。

### 工学実証・工学設計

国際核融合材料照射施設(IFMIF)計画における工学実証・工学設計段階を指す。現在の要素技術確証段階(KEP)活動に続く活動であり、IFMIFの重要なシステム要素についての工学的な実証、及びIFMIF建設に必要な工学設計を完成させることを目的としている。

### 構造材料

広義にはブランケット構造材料、真空容器構造材料、超伝導コイルケース材料等をさすが、最も厳しい中性子環境で使用されるため、主要な開発対象であるブランケット構造材料をさす場合が多い。ブランケットは、ブランケット構造材料で製作された容器の中に、トリチウム増殖材と中性子増倍材を充填する構造であり、ブランケット構造材料としては、低放射化フェライト鋼が最も有力な候補として開発が進められている。先進的なブランケット構造材料としては、バナジウム合金や炭化ケイ素繊維複合材(SiC/SiC コンポジット)、酸化物強化型低放射化フェライト鋼(低放射化 ODS 鋼)の開発も進められている。

### 高速点火

レーザー核融合における点火方式の一つ。多数のレーザーで圧縮した核融合燃料小球（ペレット）に、点火プラグの役割をする超高強度レーザーを照射して点火、燃焼させる方式。従来方式である中心点火方式（核融合燃料をレーザーで圧縮することにより、中心にできた高温領域が点火する方式）よりもはるかに低出力のレーザーで、高い核融合利得を実現することができる。大阪大学レーザーエネルギー学研究中心において、世界に先駆けてこの方式の原理検証が進められている。

### 国際核融合エネルギー研究センター

幅広いアプローチのプロジェクトの一つ。原型炉設計・R&D 調整センター、ITER 遠隔実験研究センター、核融合計算機シミュレーションセンターから構成され、これらが連携しつつ核融合エネルギーの実現に向けた研究開発を効果的・効率的に実施するもので、青森県六ヶ所村に設置される予定。

### 国際核融合材料照射施設

IEA のもとで、日、米、EU、ロシアの協力で検討を進めている国際核融合材料照射施設。40MeV に加速した重水素イオン・ビームをリチウム標的に照射すると、核反応の結果、14MeV 付近の中性子が効率よく発生するため、これを材料に照射して核融合炉環境を模擬した状態での特性の変化を試験する。

### 国際トカマク物理活動（ITPA）

ITER/EDA 期間中に行っていた ITER 物理 R&D を継承し、2001 年から EU、米国、ロシア、日本の 4 極の研究者が トカマクプラズマの物理解明および ITER 等の核燃焼プラズマの性能検討を行う国際的な研究活動。閉じ込め、輸送物理、ダイバータ、周辺、定常運転、MHD、計測に関連する 7 つの専門グループと調整委員会がある。

### 固体増殖方式

核融合炉のブランケットでは、核融合炉で発生する中性子とリチウムによる核反応を利用して燃料となるトリチウムを生産（増殖）する。このリチウムを固体の状態にして使用する方式のブランケットのこと。Li<sub>2</sub>O、Li<sub>2</sub>TiO<sub>3</sub> などが代表的な材料で、化学的活性度が低く、トリチウムの生成・放出特性や照射特性に関するデータベースが比較的豊富である。このため、高い固有の安全性を有し、データベースが豊富な固体増殖方式ブランケットは、ITER に取りつけて試験する我が国のテストブランケット・モジュールの主要な案に選定されている。

### サテライトトカマク装置

幅広いアプローチのプロジェクトの一つ。日本原子力研究開発機構の臨界プラズマ試験装置 JT-60 を活用し、プラズマの長時間維持や ITER を模擬したプラズマ配位が可能なように、JT-60 のコイルを超伝導化する等の改修を行い、ITER の運転シナリオの最適化等の ITER 支援研究や、原型炉に向けて ITER を補完する研究を実施する。

### 重水素

最も軽い原子である水素の安定同位体で質量数が 2 のものをいう。通常の水素が陽子 1 個の原子核を持つことに対して、重水素は陽子 1 個と中性子 1 個からなる原子核を持つ。存在比が 0.015%あり、地球上に豊富に存在する。核融合炉では、最も核融合炉反応が起こりやすい重水素と三重水素（トリチウム）を燃料として用いる。

### 実験炉

原型炉の建設の是非に向けて、科学的技術的な可能性を実証する炉。すなわち、制御された点火と定常状態を究極の目標とした重水素・三重水素の燃焼を実証し、統合されたシステムにおいて核融合炉に本質的な技術を実証し、更に核融合炉の実用化に必要な高熱負荷と核工学要素の統合された試験を行うことを目標とする炉。

### 出力密度

炉心プラズマ単位体積当たりの核融合出力のこと。出力密度を高めるには、トロイダル磁場またはプラズマベータ値を高くすることが必要になる。出力密度が高くなると、所定の核融合出力を小規模な炉で実現できるので経済性の向上が期待できる。

### 全国共同利用

大学共同利用機関法人や国立大学法人の附置研究所や研究施設において、所有する大型研究設備や資料・データを全国の研究者の共同利用に供し、または共同研究を行い、大学等の枠を越えた当該分野の研究を効果的かつ効率的に推進していくことを目的としたシステム。

### 先進定常トカマクプラズマ

核融合炉の経済性を高める上で不可欠な高い出力密度や、外部駆動電流割合

を軽減する高い自発電流割合などの特性を同時に備えた、トカマクの先進的な定常運転を行うためのプラズマ。このようなプラズマの実現は、将来の定常核融合炉（連続的に核融合反応を持続する核融合炉）への展望を拓く上で大変重要である。

#### 先進ブランケット方式

先進的な概念に基づくブランケットや先進的な材料を利用するブランケットのこと。ブランケットでは、発生した熱を冷却材により取り出し炉外で発電に利用するが、発電効率は冷却材の温度、種類によってほぼ決まる。例えば、高温高压水を用いる場合は、現有軽水炉なみ(30-35%)の効率にとどまる。一方、冷却材温度を500 以上に上げると、発電効率を40%以上に高めることが可能になる。このように、現在の商用発電システムに比べ効率の高い発電を可能とするブランケット方式を一般に「先進ブランケット」と呼んでいる。さらに900 程度まで冷却材温度を上げることにより、発電効率が上昇するだけでなく、水素製造への適用も見込まれるようになる。冷却材としては、高温ガス、液体金属、熔融塩、超臨界水などが考えられている。

#### 中性子

英語ではニュートロン(nとも書く)といい、素粒子の一つ。陽子とともに原子核を構成する。電荷は0、質量は $1.6749 \times 10^{-27}$ kgである。単独では不安定で、半減期12.5分で崩壊して陽子に変わる。電気的に中性で原子核内に容易に入ることができるので、核反応を起こすのに使われる。単位面積を毎秒通過する中性子の数は、中性子束(Neutron Flux)密度と呼ばれる。単位は中性子数/ $(\text{m}^2 \cdot \text{秒})$ である。ちなみに、単位体積に存在する中性子の数は中性子数密度、または中性子密度(Neutron Density)と呼ばれる。

#### 超伝導

ある種の物質をある温度以下に冷やすと電気抵抗がゼロとなる現象。超伝導状態に移る温度は物質によって異なり、-200 以上で転移が起こる高温超伝導体や、NbTi（ニオブ・チタン）やNb3Sn（ニオブ・3スズ）のように-260位まで冷やさなければ転移しない物質（金属系超伝導体）もある。超伝導体を導体にしコイル状に巻線することで、電気抵抗による電力消費が無く、定常的に強い磁場を発生する磁石（超伝導磁石[コイル、マグネット]）が可能となる。LHDは世界最大の超伝導コイルシステムを有し、すでに9年間の運転実績を持つ。サテライトトカマク装置も超伝導コイルを採用する。ITERではNbTiやNb3Snを用いた超伝導コイルで6~13Tの強磁場を発生し、プラズマの立ち上げや閉じ込めを行う。



### テストブランケット・モジュール (TBM)

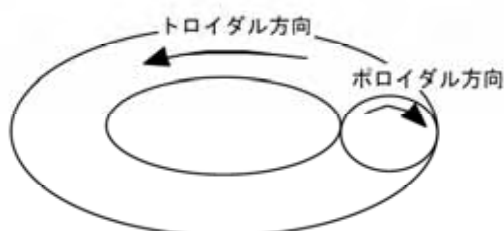
ITER 建設に参加する各極は、ITER の工学的な利用の一つとして、ITER にモジュール規模のブランケットを取りつけて、ブランケットの熱を取り出す機能、トリチウムを生産 (増殖) する機能、中性子を遮断する機能などを試験する計画を持っている。この ITER に取付けて総合機能試験を行うモジュール規模のブランケットのことをテストブランケット・モジュールという。ITER では最大 6 体のテストブランケット・モジュールを同時に試験できる。

### トカマク国内重点化装置計画

核融合エネルギーの早期実現に向けて、トカマク方式の改良 (高ベータ定常運転の実現による経済性向上等) を我が国独自に進めるとともに、ITER 計画での主導権の確保と、数百名規模での人材養成による ITER 計画との有機的連携を図るために、国内のトカマク装置を重点化することが必要であるとし、文科省科学技術・学術審議会が平成 15 年 1 月に策定した計画。本装置は、臨界プラズマクラスのプラズマ性能をもった超伝導装置とし、プラズマアスペクト比、断面形状制御性、帰還制御性において、機動性と自由度を最大限確保できるものとし、原型炉で必要な高ベータ ( $\beta_N=3.5-5.5$ ) 非誘導電流駆動プラズマを、100 秒程度以上保持することを目指すものである。

### トカマク方式

トロイダルな形状の閉じ込め方式でプラズマは磁場により閉じ込められる。主たる磁場はトロイダル方向のトロイダル磁場であるが、これだけではプラズマを閉じ込めることができない。プラズマの圧力と磁力がバランスして平衡を保つためにはポロイダル磁場も必要である。ポロイダル磁場は、プラズマ中にトロイダル方向の電流を流すことにより作られる。プラズマ電流はオーム加熱の原理により、プラズマ加熱としての役割も果たしている。旧ソビエトのクルチャトフ研究所で考案され、その優れた閉じ込め性能のために世界各国の研究所で、この形式のプラズマ実験装置が建設され研究されてきた。



### 閉じ込め方式

核融合反応を起こすためには、核融合反応によって生じたエネルギーの損失を抑え、1億程度になった超高温プラズマを容器から離して壁に接触しないよう保持する必要がある、このような状態を作り出す方法を閉じ込め方式という。核融合炉の閉じ込め方式を大別すると、磁気力でプラズマを閉じ込める磁気閉じ込め方式と、レーザーなどによる加熱・圧縮力を利用する慣性（レーザー）方式になる。さらに、磁気閉じ込め方式は閉じ込め磁場の生成方式によってトカマク方式及びヘリカル方式に分類される。

### トリチウム技術

核融合炉で一度に燃えるトリチウムは供給された量の数%であるため、炉から一度取り出し、燃焼してできたヘリウム、水、水素等不純物を取り除き、高純度のトリチウムとして再び炉に供給する。また、ブランケットで製造されたトリチウムを精製して炉に供給し、燃焼したトリチウム分を補充する。これら、トリチウムの燃料循環技術と、放射性物質でもあるトリチウムを、安全に閉じ込めて取り扱う技術が、核融合炉に必要なトリチウム技術となる

### 熱流動

伝熱、相変化を含めた流体の動的な流れ、またはこのような流体の特性をいう。軽水炉では、定常時、過度変化時、事故時の燃料棒集合体を流れる冷却材の挙動予測のため信頼性の高い熱流動解析モデルが開発されており、これらの技術は核融合炉の定常運転時及び事故時の解析等に活用可能である。

### 幅広いアプローチ

ITER 計画と並行して補完的に実施する研究開発プロジェクトで、2005年6月にモスクワで開催された第2回6極閣僚級会合において、日欧協力の下、我が国で実施することが決定された。実施プロジェクトは、文部科学省に設置されたITER計画推進検討会における検討を経て、国際核融合エネルギー研究センター、サテライトトカマク装置及び国際核融合材料照射施設工学実証・工学設計活動、の3プロジェクトが選定された。

### プラズマ

通常の温度領域では、物質はいわゆる三態（固体、液体、気体の三つの状態）のいずれかをとる。しかし、さらに高温になると、原子核が捕捉していた電子が自由に運動するようになり、正の電荷を持つイオンと負の電荷を持つ電子が混合した気体の状態となる。この状態をプラズマという。地上の自然環境では、

プラズマは雷やオーロラなど特異な現象の中で過渡的に存在するだけであるが、宇宙や天体の領域では、むしろ普遍的な物質状態である。たとえば自然の核融合炉である太陽も巨大なプラズマの塊である。プラズマ中では、様々な核反応や化学反応、発光・吸光現象、あるいは振動・波動などの集団現象が起こり、これらを利用する様々な技術が開発されつつある。たとえば、蛍光灯は水銀ガスに放電で希薄なプラズマを作って発光させる身近な機器であるが、最近ではマイクロスケールの放電で発光させるプラズマディスプレイが普及しつつある。半導体の集積回路製造などに使われる高強度の紫外線光源や半導体をエッチングする装置もプラズマを用いた技術である。温度が数億に及ぶ高温プラズマでは核融合反応が起きる。

### ブランケット

核融合炉の炉心プラズマは、ブランケットと呼ばれる構造体で取り囲まれている。ブランケットの役割は、核融合炉で発生する 14MeV 中性子の運動エネルギーを熱に変換して取り出すこと、中性子トリチウムによる核反応を利用して燃料となるトリチウムを生産すること、ブランケットの外側にある超伝導マグネット等を保護するために炉心からの中性子を遮蔽することである。

### ヘリカル方式

高温プラズマの閉じ込め磁場を螺旋状のコイル（ヘリカルコイル）によって発生させる方式。プラズマを磁場で閉じ込める環状（トロイダルな形状）の閉じ込め方式としてトカマクと共通点はあるが、トカマクと異なり、プラズマ中に電流を流す必要がない。定常及び高密度運転に優れた特性を示し、代表的な実験装置として LHD がある。

### 放射性廃棄物

核融合炉では、中性子によって放射化された炉内外機器及び建屋、トリチウムを吸蔵した炉内機器、冷却材などが放射性廃棄物になる。核融合炉における放射性廃棄物には高レベル放射性廃棄物の発生がないという特徴がある。ブランケットなど炉心に近いところで利用される機器は余裕深度処分（低レベル放射性廃棄物の中でも比較的放射能レベルが高いものを一般的な地下利用に対して十分な余裕を持った地表下 50-100m 程度に埋設処分すること）の対象となるが、その他の大部分の低レベル廃棄物は浅地中埋設処分が可能である。

### 水冷却方式（ブランケット）

核融合炉のブランケットでは、核融合炉で発生する熱を取り出して発電する。

ブランケットを冷却して熱を取り出す媒体に水（加圧軽水。加熱蒸気や超臨界圧水も含む）を用いる方式のブランケットのこと。水冷却方式は軽水炉や火力発電で豊富な実績があり、高い信頼性を有する基盤技術が確立しており、固体増殖・水冷却方式ブランケットは、ITER に取りつけて試験する我が国のテストブランケット・モジュールの主要な案に選定されている。

#### 要素科学技術

核融合エネルギーのような人類未踏の科学技術開発は、様々な科学知・技術知を動員し、未知の物質状態で起こる現象を予測することによって企画され推進される。それぞれ要素をなす知は、学術や技術の地平で一般化・体系化された知識や方法であり、実験や理論的演繹などを通じて高い蓋然性と精度が獲得される。こうした「要素科学技術」の発展・蓄積と、個別の科学技術開発プロジェクトとは、いわば横系・縦系の関係を形成する。核融合エネルギー開発のためには、プラズマ物理をはじめとする物理学や化学、原子力工学や電気工学、機械工学、さらには環境学、国際協力学、経済学から法学にも及ぶ広範囲の学術・技術分野にある最先端の要素科学技術を集め総合化する必要がある。

#### リーディングプロジェクト

文部科学省で実施中のプロジェクト。我が国の経済活性化を目的に、大学等での研究成果や産学官の技術力の活用等により、実用化を視野に入れた研究開発が行われている。

#### レーザー方式

強度レーザーを用いて、直径数 mm の燃料小球（ペレット）を、等方的に爆縮（断熱圧縮）させ、瞬時に超高密度・高温プラズマを生成し、核融合反応を起こさせる方式をレーザー方式と呼ぶ。固体密度の 1000 倍に及ぶ密度のプラズマを慣性によって閉じ込める。

#### 連携大学院制度

大学院設置基準第 13 条 2 項の規定に基づき、大学院の学生が、所属する大学院以外の研究機関等において研究指導を受ける際に、大学と研究機関等との間で学生の指導方法、研究員の派遣等の協定書を結び、研究機関の研究員に大学院の客員教授の発令を行うなど、組織的に特別研究学生の受入・指導を行う制度。

## 炉工学

核融合炉を開発していく上で不可欠な工学開発（ブランケット技術、超伝導コイル技術、炉構造・遠隔保守技術、加熱・電流駆動機器技術、プラズマ対向機器技術、トリチウム燃料給排気・循環処理技術、計測・制御機器技術、核融合中性子工学技術、核融合材料技術、安全工学技術、等）の研究分野。

## 炉心プラズマ

核融合炉を目指した研究において作られる高温プラズマの総称。



# ITER計画、幅広いアプローチをはじめとする我が国の核融合研究の推進方策について(報告)概要

## 第1章 核融合研究の現状と課題

### 1. 核融合研究の必要性・意義

- ・将来に向けた新しいエネルギー源の開発は、世界共通の最重要課題の一つ。
- ・核融合エネルギーは、資源量、環境適合性等の観点で魅力的な候補。
- ・我が国の核融合研究は、経験と実績から世界をリードできる科学技術分野。
- ・原子力委員会核融合専門部会報告(H17.10)では「21世紀中葉までに実用化の目的を得るべく研究開発を促進する」と方針を提示。

### 2. 核融合研究開発に関する基本方針

- ・原子力委員会第三段階核融合研究開発基本計画(H4.6)が策定されて以後、学術分科会核融合研究WG「今後の我が国の核融合研究の在り方について(H15.1)」、原子力委員会「原子力政策大綱(H17.10)」、原子力委員会核融合専門部会「今後の核融合研究開発の推進方策について(H17.10)」で方策が提示される。
- ・第三期科学技術基本計画(H18.3)において、ITER計画は戦略重点科学技術としての位置付け。

### 3. 核融合研究の現状

- (1)核融合研究の重点化課題にかかるとして、ク・アンド・レビューと共同利用・共同研究・重点化課題の状況等を踏まえたチェック・アンド・レビューの実施等。
- (2)ITER計画、幅広いアプローチ(BA)・ITERサイト地の決定、幅広いアプローチの日本での共同実施の決定を経て、ITER協定、BA協定の署名に至る。

### 4. 我が国の産業界の現状

- ・ITER工学設計活動終了後、核融合技術者が減少。ITER建設等を見据え、ITER/BA等のプログラムと産業界との連携強化が必要。

### 5. 人材の育成・確保

- ・国内研究(重点化課題、幅広い基礎研究)の強化、他分野との連携等による幅広い推進基盤の構築、関連する研究者・技術者が共同研究を通じて積極的にITER/BAに参加するための円滑な運営体制が必要。

## 第2章 今後の推進方策

### 1. ITER計画及び幅広いアプローチを中心とした研究開発の推進

#### (1) 国際協力の視点からの意義

- 国際関係から見ると、ITER/BAの実施には、国際的優位性と国際的協調の観点が必要となるため、ITER/BAに関わるアクター間の「非集中化」と「パートナーシップ」の実現が重要。
- BAを拠点としたアジアにおけるITER参加極の連携活動において、我が国の存在感、リーダーシップを示すことが期待される。

#### (2) 具体的推進方策

- ①ITER計画を中心とした研究開発
  - ITPAをITER計画支援活動の一環として位置付けることが必要。
  - ITERにおけるTBMはブランケット開発における重要なマイルストーンであるが、国際協力で実施が不可欠。我が国は主案の固体増殖(水冷却)方式を原子力機構が、先進ブランケット方式を大学等がそれぞれ中心となって実施しつつ、TBMへの参加に向けて努力することが適切。
  - 幅広いアプローチを中心とした研究開発
    - ・国際的拠点として、日欧以外のITER参加極からの幅広い参加を促すために、研究者長期滞在のための受入体制を整備することが重要。
    - ③国内における研究開発の推進
      - ITER計画への支援及び原型炉に向けた先進定常プラズマの開発研究、炉工学技術開発を推進することが必要。

#### (3) 推進に当たっての環境整備

- ①核融合エネルギーフォーラム
  - ITER/BAの関係者が議論し、機動的な意見集約を行うため、核融合フォーラムを改組して「核融合エネルギーフォーラム」を設置することが適切。
  - 特に、ITER/BAに関する意見集約・調整や連携協力等のため、「ITER・BA技術推進委員会」を置くことが適切。
  - 事務局は、原子力機構と核融合研が連携して行うことが適切。
- ②全国的な研究推進の充実
  - ITER/BAを成功させるためには開発研究と学術研究の相互補完的な推進が不可欠なため、全国の拠点がITER/BAを含めてネットワークを形成し、それぞれが相乗効果を発揮することが必要。今後、国と核融合関係者が協力し、体制の構築や適切な資金の確保に努めることが必要。

### 2. 学術研究の推進

#### (1) 学術研究を推進する際の課題

- 核融合研究は学術研究と先端技術を統合する巨大なプロジェクトであるため、大型実験装置への「集中化」の一方で、「自由な発想」を本質とする学術研究や他分野との相互作用の重要性にも留意することが必要。
- 魅力ある核融合エネルギーの実現のため、学術研究とプロジェクト研究が相互作用しつつ研究開発が進められ、両者間の知の循環が形成される必要がある。

#### (2) 具体的推進方策

- ①重点化課題の推進
  - 各重点化課題は全般的に推進されており、核融合研究全体へ貢献。
  - 今後、留意・改善点へ対応するとともに、重点化課題を中核とした一層強力な連携体制の構築に向けた取り組みが重要。
  - ②共同利用・共同研究の推進
    - 核融合研を中核とした共同利用・共同研究は重要な役割を果たしており、双方向型共同研究も順調に進展。共同研究重点化装置を活用した共同研究もより活性化している。今後、開発研究において連携協力を推進することが必要。
    - ③ITER計画、幅広いアプローチに関する共同研究
      - 原子力機構が根幹の組織体制を構築するとともに、大学等からの参加と継続的な人材育成を可能とする資金とシステムの構築が重要。
      - 大学等の研究者が参加するためには、研究活動が基礎研究に資するものであり、大学側にメリットがあるとともに大学側から評価されることも重要。

### 4. 人材の育成・確保及び国民への説明

#### (1) 人材の育成・確保

- 大学、核融合研、原子力機構が主体的な役割に基づき人材育成・確保のネットワークを形成することが必要。
- 特に核融合研は大学の人材育成へのさらなる貢献を、原子力機構は大学院教育への協力及び連携大学院制度の活用を推進することが望まれる。
- 広い学術分野及び産業界からの人材の流動を一層進めていくことが必要。
- ITER/BAへの参加が若手研究者のキャリアパスとして位置付けられることが重要。
- 「原子力人材育成プログラム」等の制度の活用が重要。
- 将来を見据えた観点から、国際プロジェクトに関わることができるという点が、学生への魅力の1つとなる。
- 総合的な科学技術を担う人材の育成のため、学生をある段階まで専門付けせず、幅広い視野を持たせるといった視点も重要。

#### (2) 国民への説明

- 社会に対する説明責任を果たすため、積極的に情報発信に努めるとともに、国民の核融合に対する理解推進に資する活動の充実にも努めることが必要。
- 将来の核融合エネルギーでは安全性の問題が重要な課題であり、その安全性について十分に説明していくことが必要。
- 核融合が多様なエネルギー対策全体の中心で議論され、その結果、特に優れているとの認識が得られ、国民から大きな理解と支持が得られることを期待。

### 3. 産業連携

- 産業界における技術力の維持等も含め、ITER・BA技術推進委員会等を通じた産業界と国及び実施機関との連携体制の構築が必要。今後とも、各研究機関と産業界との連携強化の推進が必要。