

令和3年4月20日(火)
原子力委員会定例会

第13回原子力委員会資料第2号



核融合研究開発の現状

文部科学省 研究開発局

研究開発戦略官（核融合・原子力国際協力担当）付

1. 核融合研究開発の現状

2. 核融合研究開発に必要な人材育成・産業展開

1. 核融合研究開発の現状

第6期科学技術・イノベーション基本計画（令和3年3月閣議決定）

◇第2章 Society 5.0の実現に向けた科学技術・イノベーション政策

1. 国民の安全と安心を確保する持続可能で強靱な社会への変革

（2）地球規模課題の克服に向けた社会変革と非連続なイノベーションの推進

（c）具体的な取組

②多様なエネルギー源の活用等のための研究開発・実証等の推進

○現在見直しに向けた議論が進められている「エネルギー基本計画」等を踏まえ、省エネルギー、再生可能エネルギー、原子力、核融合等に関する必要な研究開発や実証、国際協力を進める。

第5次エネルギー基本計画（平成30年7月閣議決定）

◇第2章 2030年に向けた基本的な方針と政策対応

第3節 技術開発の推進

2. 取り組むべき技術課題

（略）また、核融合エネルギーの実現に向け、国際協力が進められているトカマク方式のITER計画や幅広いアプローチ活動については、サイトでの建設や機器の製作が進展しており、引き続き、長期的視野に立って着実に推進するとともに、技術の多様性を確保する観点から、ヘリカル方式・レーザー方式や革新的概念の研究を並行して推進する。

■ 菅総理の所信表明演説（令和2年10月）

菅総理は、国会における所信表明演説（令和2年10月26日）において、2050年までにカーボンニュートラル社会を実現すると表明。カーボンニュートラル社会を実現するための政策議論が活発化しているところ。

国会における菅総理所信表明演説（令和2年10月26日）（抜粋）

菅政権では、成長戦略の柱に経済と環境の好循環を掲げて、グリーン社会の実現に最大限注力してまいります。

我が国は、二〇五〇年までに、温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、すなわち二〇五〇年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指すことを、ここに宣言いたします。

もはや、温暖化への対応は経済成長の制約ではありません。積極的に温暖化対策を行うことが、産業構造や経済社会の変革をもたらし、大きな成長につながるという発想の転換が必要です。

鍵となるのは、次世代型太陽電池、カーボンリサイクルをはじめとした、革新的なイノベーションです。実用化を見据えた研究開発を加速度的に促進します。

→所信表明演説を受け、カーボンニュートラル社会を実現するため、政府会議においてグリーン成長戦略の作成に向けた政策議論が活発化

2050年カーボンニュートラルに向けた核融合の位置付け②

2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略（令和2年12月25日成長戦略会議報告）において、今後の産業としての成長が期待される重要分野であって、2050年カーボンニュートラルを目指す上で取組が不可欠な分野の一つとして、核融合について記載。

（前略）2050年のカーボンニュートラル実現に向けては、原子力を含めたあらゆる選択肢を追求することが重要であり、軽水炉の更なる安全性向上はもちろん、それへの貢献も見据えた革新的技術の原子力イノベーションに向けた研究開発も進めていく必要がある。

（中略）目標として、①2030年までに国際連携による小型モジュール炉技術の実証、②2030年までに高温ガス炉における水素製造に係る要素技術確立、③ITER計画等の国際連携を通じた**核融合**R&Dの着実な推進を目指す

④原子力産業の成長戦略「工程表」

- 導入フェーズ： 1. 開発フェーズ → 2. 実証フェーズ → 3. 導入拡大・コスト低減フェーズ → 4. 自立商用フェーズ
- 具体化するべき政策手法： ①目標、②法制度（規制改革等）、③標準、④税、⑤予算、⑥金融、⑦公共調達等

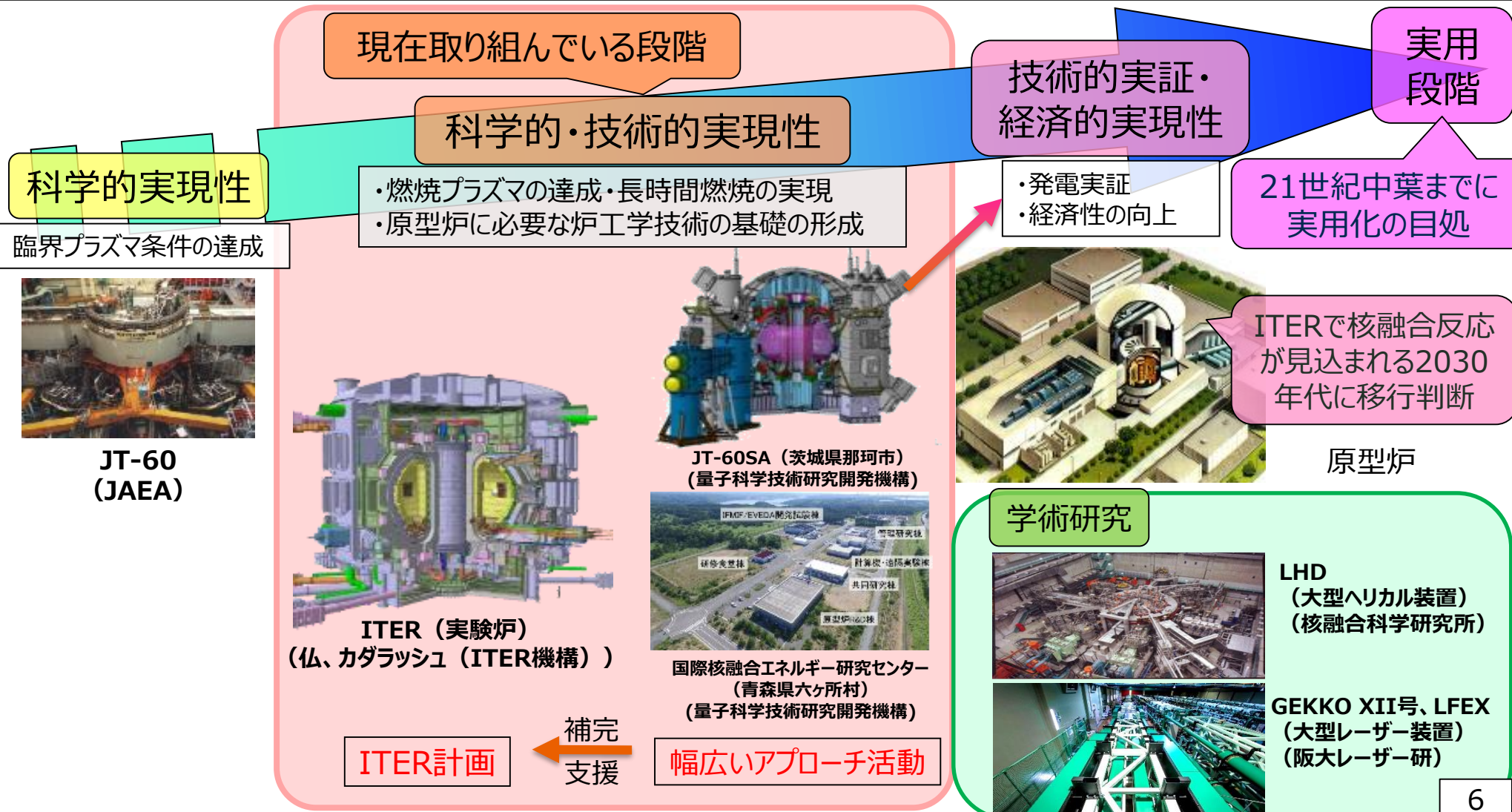
	2021年	2022年	2023年	2024年	2025年	～2030年	～2040年	～2050年	
核融合	国際協力の下、核融合実験炉（ITER）の建設・各種機器の製作					ITER運転開始 ・核融合反応に向けたプラズマ制御試験		ITER核融合運転開始 ・重水素-三重水素燃焼による燃焼制御・工学試験 ・核融合工学技術の実証	
	・JT-60SAを活用したITER補完実験、 ・原型炉概念設計・要素技術開発					原型炉へ向けた工学設計・実規模技術開発		実用化スケールに必要な実証	
	人材育成、学術研究の推進								
	米国、英国等のベンチャーが2030年頃までに実用化目標 海外プロジェクトに日本のベンチャー等が研究開発・サプライヤーとして参画、 機器納入								

核融合エネルギーの段階的研究開発



文部科学省

- 核融合エネルギーの実用化に向けて、ITER計画等への参画を通じて科学的・技術的実現性を確認した上で、原型炉への移行判断を行っていく。
- 文部科学省では、「核融合原型炉開発の推進に向けて」、「原型炉研究開発ロードマップ」（科学技術・学術審議会 核融合科学技術委員会）等を踏まえ、原型炉に必要な技術開発の進捗を定期的にチェック・アンド・レビューしつつ、研究開発を推進。



ITER（国際熱核融合実験炉）計画について

令和3年度予算額
（前年度予算額）

: 17,803百万円
: 16,494百万円



【概要】

エネルギー問題と環境問題を根本的に解決するものと期待される核融合エネルギーの実現に向け、国際約束に基づき、核融合実験炉 ITERの建設・運転を通じて、核融合エネルギーの科学的・技術的実現可能性の確立を目指す。

● ITER協定 2007年10月24日発効

● 経緯

1985年 米ソ首脳会談が発端
1988年～2001年 概念設計活動・工学設計活動(日欧米ソ)
2001年～2006年 政府間協議
2007年 ITER協定発効、ITER機構設立

● 参加極 日、欧、米、露、中、韓、印

● 建設地 仏、サン・ポール・レ・デュランス市（カダラッシュ）

● 計画スケジュール

運転開始 : 2025年12月
核融合運転開始 : 2035年12月

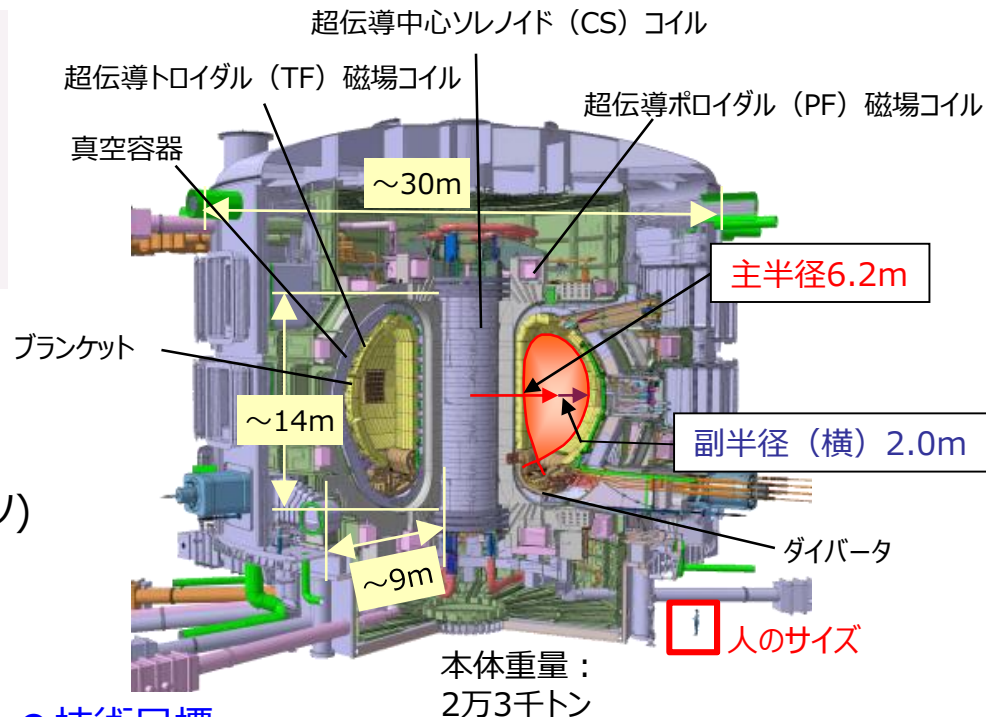


● 各極の費用分担（建設期）

欧州、日本、米国、ロシア、中国、韓国、インド
45.5% 9.1% 9.1% 9.1% 9.1% 9.1% 9.1%

※ 各極が分担する機器を調達・製造して持ち寄り、ITER機構が全体を組み立てる仕組み

● ITER機構執行部 ビゴ機構長（仏）、多田副機構長（日）



● 技術目標

- ◇ 入力エネルギーの10倍以上の出力が得られる状態を長時間（300～500秒間）維持する。
- ◇ 超伝導コイル（磁場生成装置）やプラズマの加熱装置などの核融合工学技術を実証する。

● 主要パラメータ


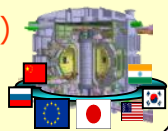


熱出力（発電はしない）	50万 kW
入力エネルギーに対する出力の割合	10以上
プラズマ体積	約840m ³

幅広いアプローチ（BA）活動等について

令和3年度予算額 : 4,073百万円
 (前年度予算額 : 4,854百万円)
 令和2年度第3次補正予算額 : 1,792百万円



文部科学省

幅広いアプローチ（BA）活動とは	幅広いアプローチ（BA）活動等の位置付け
<p><u>ITER計画を補完・支援するとともに、核融合原型炉に必要な技術基盤を確立するための先進的研究開発を実施する、国会承認条約に基づく日欧の国際科学技術協力プロジェクト</u></p> <p>実施極 : 日、欧 協定 : 2007年6月1日発効 (日欧いずれかが終了を提起しない限り自動延長) 実施地 : 青森県六ヶ所村、茨城県那珂市 事業期間 : 2020年3月 フェーズⅠ完了 (JT-60SA組立等) 2020年4月～フェーズⅡ</p> 	<p>(科学的・技術的実現性) (技術的実証・経済的実現性)</p> <p>ITER計画 (実験炉) ・燃焼プラズマの達成 ・長時間燃焼の実現 等</p>  <p>核融合原型炉 ・発電実証 ・経済性見通し</p>  <p>実用化段階</p> <p>BA活動等 ・ITER運転シナリオの検討 ・核融合原型炉に向けた技術基盤の構築 等</p>  <p>核融合エネルギー 実現までのロードマップ</p>

各拠点における具体的取組内容

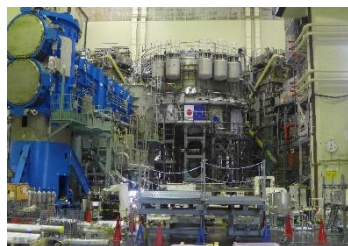
(1) 先進超伝導トカマク装置JT-60SAの建設と利用

【茨城】

- 以下の研究開発を実現するため、臨界プラズマ試験装置JT-60を超伝導化し、先進超伝導トカマク装置JT-60SAを建設。
 - ITERではできない高圧力実験を実施し、核融合原型炉に求められる安全性・信頼性・経済性のデータを獲得。
 - ITERに先立ち様々な予備的データを取得し、ITERの運転開始や技術目標達成を支援。
- 令和3年度は、初プラズマ達成に向けた統合コミッシング等を実施。



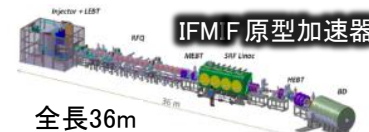
JT-60SA



組立が完了したJT-60SA

(2) 核融合中性子源用原型加速器の建設と実証【青森】

- 核融合原型炉に必要な高強度材料の開発を行う施設の設計・建設に係る知見を獲得するため、主要機器となる高性能原型加速器の製作プロセス開発や性能実証を実施。
- 令和2年度は、コロナウイルス対策のため欧州からの遠隔実験参加が可能な環境を構築し、RFQを用いて5MeV・長パルスビーム試運転に向けた調整を実施。令和3年度は、RFQを用いた5MeV・長パルスビーム加速試験に向けた調整を継続。



全長36m

(3) 国際核融合エネルギー研究センター事業等【青森】

- 核融合原型炉に向けた総合的な取組として、以下の研究開発を実施。
 - 核融合原型炉の概念設計や技術検討
 - シミュレーション研究
 - ITER等の遠隔実験解析 等
- 令和2年度は、フェーズIIの開始に伴い、スパコンを利用した日欧のシミュレーション研究、原型炉概念設計・要素技術開発の完了に向けた活動、遠隔実験システムの改良と他のBA事業のコロナ対策への協力を実施。令和3年度は、これらの活動を本格化。



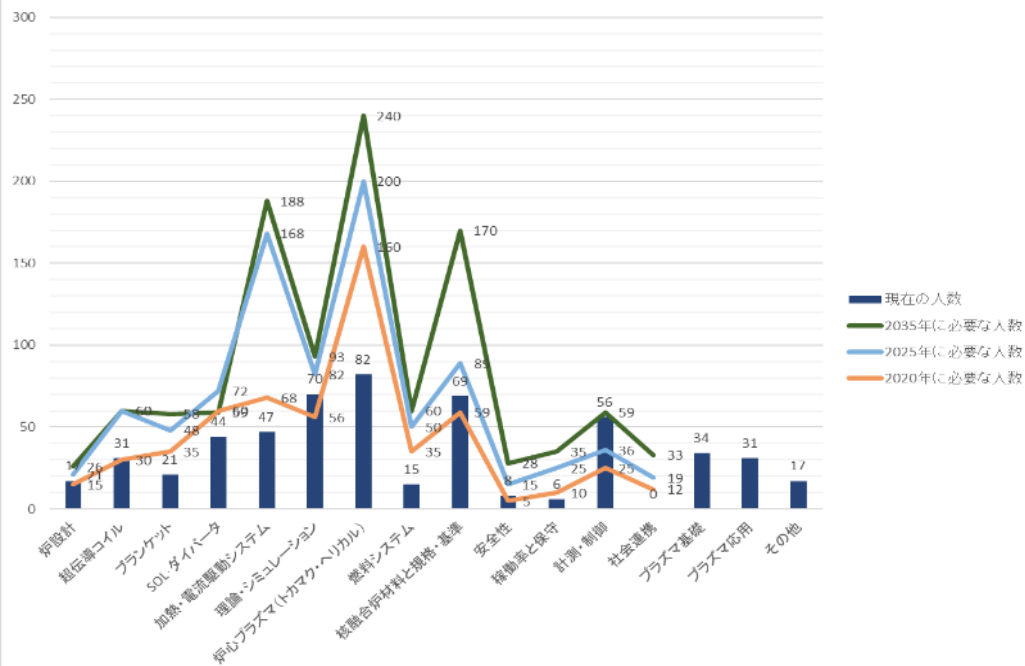
新スパコン「六ちゃん-Ⅱ」

2. 核融合研究開発に必要な人材育成・産業展開

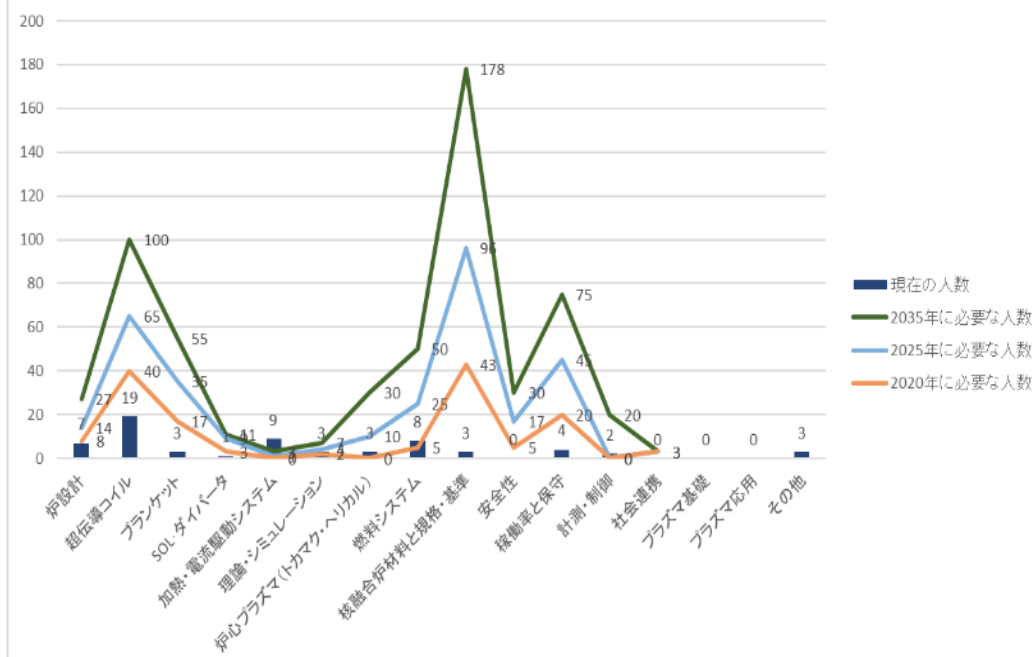
- 将来必要とされる人員数と、現在主に核融合開発に携わる人員数に大きな隔たり。
- 大学でのプラズマ研究に占める核融合研究のウエイトは減少。博士課程進学率は、平成18年と比較して、低下傾向。



専門分野別の現員数と今後の必要人数(研究機関)



専門分野別の現員数と今後の必要人数(産業界)



(出典) 平成30年3月28日 科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 第13回 核融合科学技術委員会 資料2参考2

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 概要



文部科学省

(「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年3月28日 核融合科学技術委員会)

▶▶▶ 長期的な計画に基づき、原型炉開発を担う人材を継続的・安定的に育成・輩出し、その人材を確保し、更に育成する環境整備が必要

大学院教育

博士課程学生を増加させるため、学術研究を推進し、基礎研究環境の維持・充実が必要

▶▶ 広範で多様な専門を習得する教育プログラムの構築や、ものづくりやシステム統合を経験するための産学の連携

人材流動性

ITER計画・BA活動と国内研究開発を連携させ、知の循環システムとして発展させることが必要

▶▶ ITER機構を含む、産学で広範囲な人材流動性構築と、魅力的なキャリアパスの確立

アウトリーチ

子供を含む広い世代に対する、核融合研究開発への興味喚起と相互理解が必要

▶▶ 即戦力・将来の人材の確保、並びに核融合の社会受容性向上の観点から、アウトリーチなどの社会連携活動

アウトリーチヘッドクォーターの設置

■ 目的
戦略的なアウトリーチ活動を立案し、機動的に推進することを目的として、核融合エネルギーに関するアウトリーチヘッドクォーターを設置（平成31年2月）。

■ 活動方針
一般国民・産業界・学術コミュニティなど、異なる対象に合った多様なアプローチ、いわゆる「刺さる」アプローチを戦略的に進める。

■ 実施体制

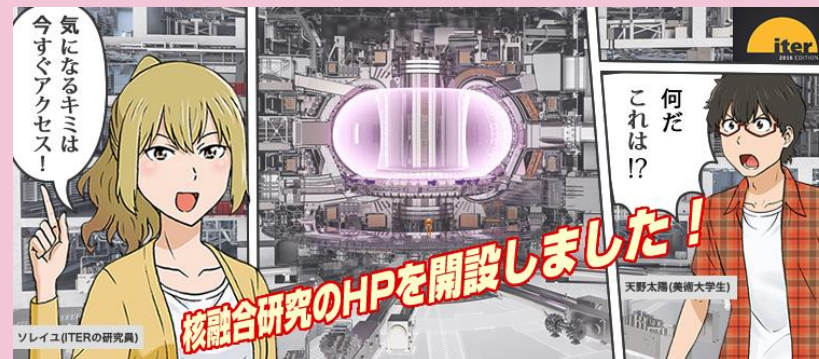
- 核融合科学技術委員会
- 原型炉開発総合戦略タスクフォース
- 文部科学省
- 量子科学技術研究開発機構
- 自然科学研究機構核融合科学研究所
- 大学等

の若干名で、情報共有や意見交換を実施。

⇒ コミュニティ全体が一体感を持って活動していくことを念頭に、プラズマ・核融合学会誌において、コミュニティからの要望や企画等を募集。

具体的な活動

■ 核融合研究のホームページ開設



- ◆ 核融合エネルギーを理解する10のキーワード
- ◆ 国内装置のPhoto Gallery
- ◆ 研究者・技術者・企業の皆さんからのメッセージ、キャリアパス紹介
- ◆ 国内の研究所見学
- ◆ プラズマ・核融合を学べる大学一覧（NIFSのHP）
- ◆ 関連施策 など

スマートフォンからも閲覧可能→



■ 高校生向け ITERサイトツアー企画



■ 大学生向け ITERインターンシップ周知



SSH・SGH・高専等に配布 体験談や応募の流れを掲載

核融合科学研究所（NIFS）の大学院教育・人材育成の特徴

NIFSが属する総合研究大学院大学、6つの大学との連携大学院（北海道大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、富山大学、九州大学）、特別共同利用研究員制度における教育は、NIFSが保有する最先端の大型ヘリカル装置（LHD）やプラズマシミュレータ等、高度な研究環境を活用し、国内外の第一線で活躍する研究者と日常的に接しながら行われており、世界的にもユニーク。

● 総合研究大学院大学 物理科学研究科 核融合科学専攻

高度な研究環境を活用した5年一貫制博士課程の大学院大学

○核融合科学専攻

・核融合システム講座

（LHD等を用いた高温プラズマ生成実験に関連する先端技術の研究）

・核融合シミュレーション講座

（スーパーコンピュータを駆使した高温プラズマの挙動解明の理論・シミュレーションに関する研究）

○核融合科学専攻在籍者：23名（令和3年4月1日現在）

○博士号取得者：157名（平成6年度～令和2年度）

● 総合研究大学院大学以外の大学院教育（令和2年度）

○連携大学院学生（26名）：名古屋大学（理学研究科・工学研究科）、九州大学（総合理工学部）、東京大学（新領域創成科学研究科）

○特別共同利用研究員（13名）：東北大学、明治大学、東京工業大学、大阪大学、京都大学、名古屋工業大学、京都工芸繊維大学等

○共同研究による全国の大学院生の教育・人材育成：東京大学、京都大学、九州大学 等



核融合研究開発を牽引する卓越した総合理工学者の育成

～大学共同利用機関における特別研究員制度の創設～



文部科学省

特別研究員制度

- トップレベルの研究環境を生かした大規模プロジェクトにおける人材育成制度（**特別研究員制度**）を創設（令和3年度から学生受入れ開始）。所属する大学に在籍したまま本制度に参加可能。
- 特別研究員を全国から公募し、**学生4名程度**を選抜。
- 博士後期課程3年間とポスドク2年間に**経済支援**を行い、シームレスなキャリアを構築。核融合プロジェクトを牽引する次世代リーダーを養成するカリキュラムを提供。
- 核融合研究は大別して3つの専門分野（**プラズマ理工学**、**炉工学**、**理論シミュレーション**）で構成されており、それぞれの専門分野で活躍する教員が協力して学生指導にあたることで、核融合分野全体を俯瞰する能力を養成。

特別研究員の選抜

- 全国の大学（大学院）から募集を行い、書類審査、面接審査を行い選抜。
- 審査基準：学力（大学でのGPA、英語力等）、適性（面接を通じて基礎知識、研究能力、コミュニケーション能力など）を審査。入学後の研究計画の妥当性、遂行能力も審査対象とする。

修了認定

- D3相当時に学位審査、PD2修了時に**特別研究員制度修了証**を授与する。
- 修了証はすべてのカリキュラムを履修した場合に授与される。
- 早期修了も可能。

核融合の実験装置のため、

- ✓ 強い磁場を安定に発生するための**超伝導線**
- ✓ 大型の**超伝導磁場コイル**の製作技術
- ✓ 強力な電磁力による影響を確認する**設計・解析技術**を開発。

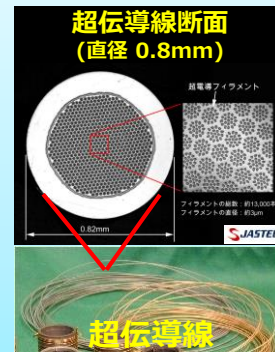
大型の超伝導磁場コイル



超伝導線を900本束ねた導体



直径 44mm



<波及効果>

早期難病発見、先進治療の普及、
材料開発・創薬の基礎研究の促進、電力安定供給の高度化

● 医療用MRIの高性能化・量産化

高い三次元解像度を持つ「MRI顕微鏡」の実現

● 粒子線がん治療装置の開発

重粒子線治療装置の小型化

● 核磁気共鳴装置(NMR)の開発

材料開発・創薬用高磁場NMRの小型化・低価格化

● 電力貯蔵システムの開発

MW級の瞬停補償、系統制御の実現



医療用MRI



電力貯蔵システム (イメージ)
(提供：東芝エネルギーシステムズ)



小型NMR装置