

日本の核融合研究開発政策

Research and Development Policy on Fusion Energy in Japan

岩渕 秀樹
IWABUCHI Hideki

文部科学省 研究開発戦略官(核融合・原子力国際協力担当)
Director, International Nuclear and Fusion Energy Affairs Division,
Research and Development Bureau, MEXT



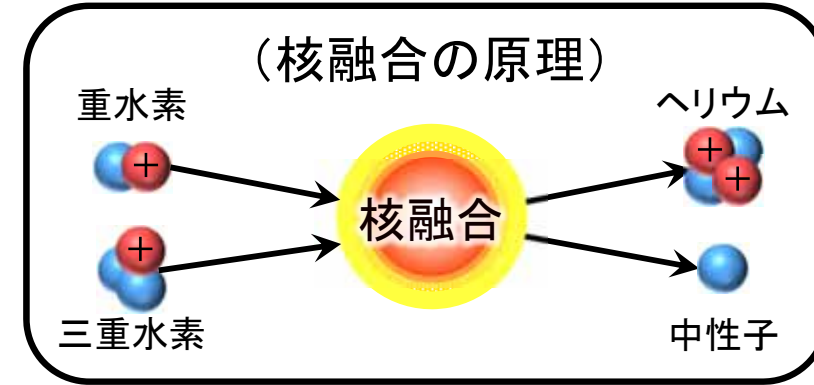
令和2年12月22日
核融合エネルギーフォーラム
ITER/BA成果報告会

- 核融合の政策的な位置付け
- 核融合研究開発の進捗状況
(ITER計画、BA活動、学術研究)
- 原型炉に向けた検討状況

核融合エネルギーについて (Fusion Energy)

<核融合エネルギーとは>

軽い原子核同士(重水素、三重水素)が融合して別の原子核(ヘリウム)に変わる際に放出されるエネルギー。太陽と同じエネルギーで、ウラン燃料を用いる原子力発電と全く異なる。



<核融合エネルギーの特徴>

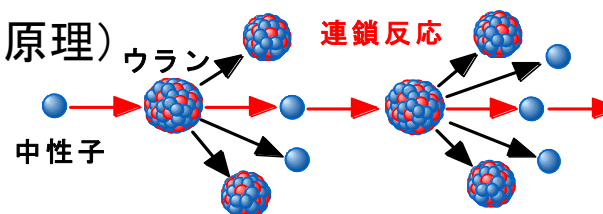
- ・**豊富な燃料** : 燃料となる重水素は海水中に豊富に存在し、三重水素は海水中に豊富に存在するリチウムより生成可能。燃料資源に地域的な偏在がなく豊富に存在し、少量の燃料から膨大なエネルギーを発生(燃料1gで石油8tに相当)。
- ・**固有の安全性** : 燃料の供給や電源を停止することにより、核融合反応を速やかに停止することが可能。
- ・**高い環境保全性** : 発電の過程において地球温暖化の原因となる二酸化炭素を発生しない。高レベル放射性廃棄物は発生せず、低レベル放射性廃棄物は発生するが、従来技術で処理処分が可能。

<国際的位置付け>

欧米やアジアの主要国も、将来的なエネルギー源の有望な選択肢の一つとして、核融合研究開発を着実に推進。

※参考

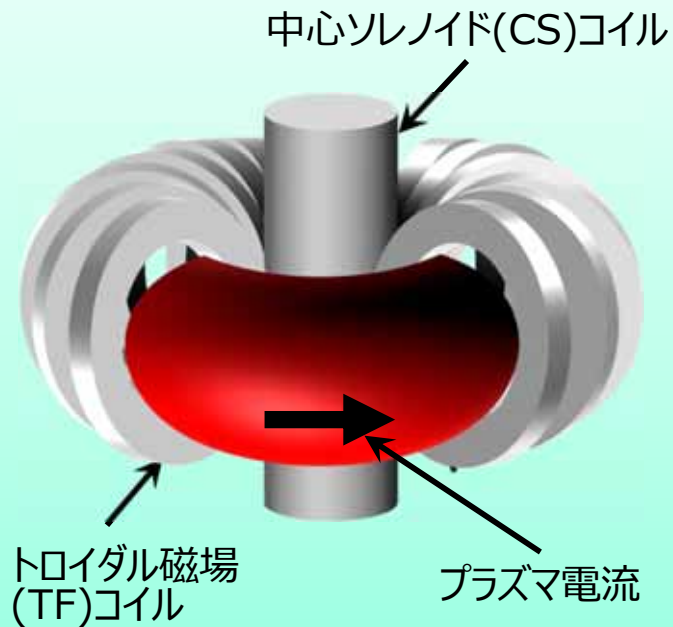
(原子力発電所の原理)



- ・連鎖反応を制御棒で制御
- ・万年単位の管理を必要とする高レベル放射性廃棄物が発生

核融合の主な閉じ込め方式について (Confining the plasma)

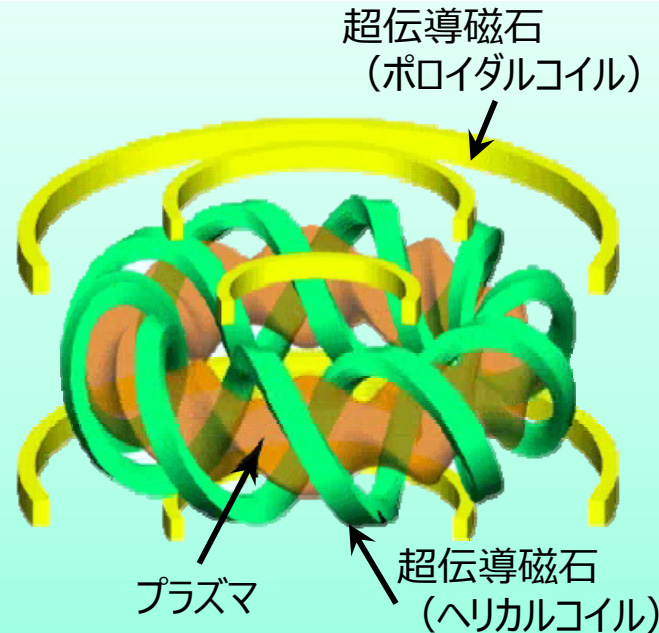
●トカマク型 (磁場閉じ込め)



- TFコイルが作る磁場と、プラズマ電流が発生させる磁場を重ね合わせ、ドーナツ状のねじれた磁場のかごを形成
- 閉じ込め性能が高く、核融合反応に必要な条件のプラズマ生成に成功 ⇒ITERで採用
- プラズマ電流はCSコイルや加熱装置により発生 ⇒プラズマの安定性に課題
- 日本は、JT-60でイオン温度5.2億度(世界記録)達成など、世界トップレベル

核融合実験炉ITER <ITER機構>
大型トカマク装置JT-60SA
<(国研)量子科学技術研究開発機構>

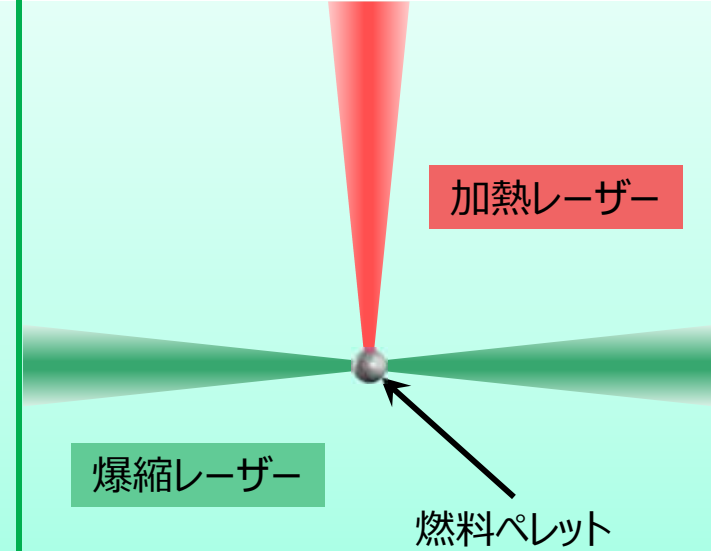
●ヘリカル型 (磁場閉じ込め)



- ドーナツ状のねじれた磁場のかごを作るためにねじれたコイルを使い、プラズマ電流を必要としないことが特徴
- プラズマの安定性に優れ、長時間運転に優位性 ⇒LHDによる定常運転(約1時間)は世界記録
- プラズマはコイルに沿ってらせん状になる ⇒粒子が飛び出しやすく、閉じ込め性能に課題

大型ヘリカル装置LHD
<(共)核融合科学研究所>

●レーザー方式 (慣性閉じ込め)

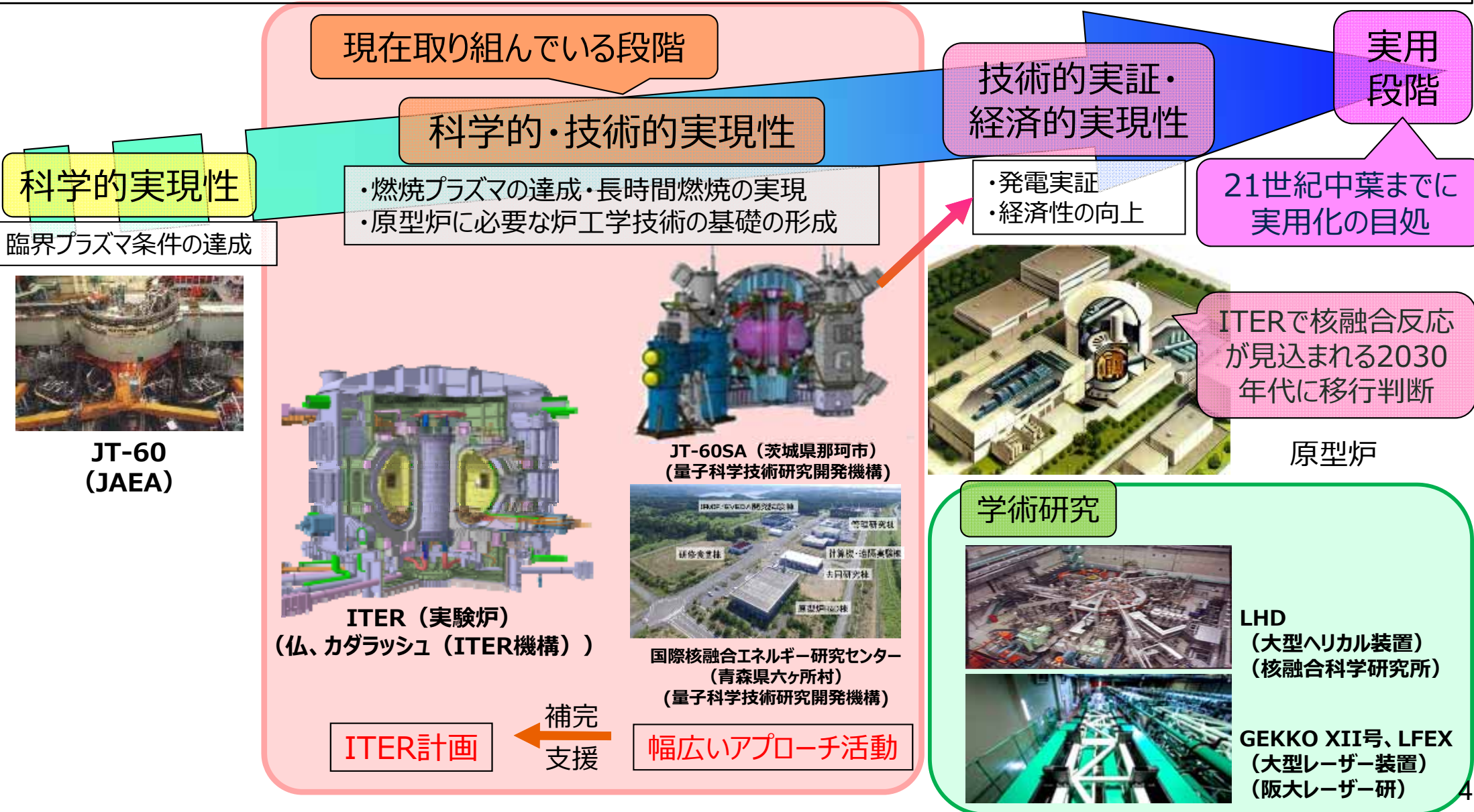


- 燃料ペレットをレーザーで瞬時に加熱し、超高密度・超高温のプラズマを生成、慣性力でその場に留まるほんの一瞬の間に反応を終わらせることが特徴
- GEKKO・LFEXレーザーでは世界最高効率で200億気圧のプラズマ生成に成功
- 燃料ペレットに10Hz程度の繰り返しレーザーを精密に照射し続けること等が課題

GEKKO XII号・LFEX
<大阪大学>

核融合エネルギーの段階的研究開発 (Staged approach toward Fusion Energy)

- 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。



核融合研究を国の重要施策として位置付け (Fusion Science in National Policy)

第5期科学技術基本計画(平成28年1月閣議決定)

◇第3章 経済・社会的課題への対応

(1) 持続的な成長と地域社会の自律的な発展

① エネルギー、資源、食料の安定的な確保

i) エネルギーの安定的な確保とエネルギー利用の効率化

(略) さらに、**将来に向けた重要な技術である核融合等の革新的技術、核燃料サイクル技術の確立に向けた研究開発**にも取り組む。

◇第4章 科学技術イノベーションの基盤的な力の強化

(2) 知の基盤の強化

① イノベーションの源泉としての学術研究と基礎研究の推進

iii) 国際共同研究の推進と世界トップレベルの研究拠点の形成

(略) **核融合、加速器、宇宙開発利用などのビッグサイエンスについては、国内外施設の活用及び運用を図り、諸外国との国際共同研究を活発化する仕組みを構築するなど、国として推進する。また、二国間、多国間協力を強化し、相互に有益な関係を構築するため、共通課題の抽出など相手国と戦略的に連携しつつ、マッチングファンドや海外共同拠点の運営の充実を図る。**

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。**

直近の政策文書における核融合に関する記載① (Recent Policy Reviews 1)

- 成長戦略フォローアップ（令和2年7月17日閣議決定）において、エネルギー・環境分野の取組の一つとして、以下のとおり核融合技術について記載。

6. 個別分野の取組（2）i) エネルギー・環境

(略)「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」(令和元年6月11日閣議決定)に基づき、ポスト・コロナの社会においてビジネス主導で非連続なイノベーションを通じて環境と成長の好循環を加速し、環境ビジネス分野で雇用を創出し、脱炭素社会、循環経済、分散型社会への移行を加速化させるべく国内外の取組を強化していく。

① 強靱かつ持続可能な電気の供給体制の確立

(略)廃炉を含めたバックエンド問題の解決に向けた技術開発、人材育成や国際連携を進めるとともに、高速実験炉や高温ガス炉等の試験研究炉の活用や**核融合技術の開発**…(略)…取り組むものとする。

- 統合イノベーション戦略2020（令和2年7月17日閣議決定）第4章（2）国際ネットワークの強化 に以下のとおり I T E R 計画等について記載。

<国際共同研究の推進、大学等の国際化>

- ビッグサイエンスに関しては、**核融合分野の I T E R 計画等**や宇宙・海洋分野等の大型国際共同研究プロジェクトについて、長期的視野に立ちつつ、投資に見合った研究開発成果が得られるよう、戦略的に取組を推進する。

- 経済財政運営と改革の基本方針2020（令和2年7月17日閣議決定）第3章3（2）科学技術・イノベーションの加速に以下のとおり革新的エネルギーについて記載。

最先端の基盤的技術であるデジタル化・リモート化、A I ・ロボット、量子技術、再生医療、バイオ、マテリアル革新力、**革新的環境エネルギー**、…(略)…の研究開発を戦略的に進める。

直近の政策文書における核融合に関する記載② (Recent Policy Reviews2)

- 革新的環境イノベーション戦略（令和2年1月21日統合イノベーション戦略推進会議決定）において、エネルギー転換の一つとして、核融合エネルギー技術の実現を記載。

I. エネルギー転換

非化

革新的原子力技術／核融合の実現

⑪ 核融合エネルギー技術の実現

【目標】

- 今世紀中に実用化の目処を得ることを目指し、国際熱核融合実験炉（ITER）計画及び幅広いアプローチ（BA）活動を着実に推進しつつ、これらの進捗状況を踏まえて、2030年代に原型炉（DEMO）¹⁾ への移行判断を行う。世界全体におけるCO₂削減量は2100年時点で約5.9億トン。²⁾

【技術開発】

- ITER計画において、我が国が担当する加熱装置、遠隔保守機器等の主要機器の開発を行うことで、機器製作技術を確立するとともに、ITERの実験フェーズにおいて、日本の研究者コミュニティが先導して核融合エネルギーの実現に向けて知見を集積する。
- BA活動において、ITERの運転シナリオを開発するとともに、核融合発電の安全性、信頼性、経済性の検証を行うため、先進超伝導トカマク装置「JT-60SA」により、高圧力プラズマの生成及び制御のための研究開発を実施するとともに、長期間に及ぶ研究開発や実用化を支える若手研究者の人材育成を推進する。また、核融合中性子への耐久性、低放射化特性を有する構造材料等の開発・評価のため、核融合中性子源等の試験施設の整備、燃料を十分に生産するため、海水等からのリチウム回収技術及びリチウムから三重水素を生産する技術の研究開発等を推進する。
- 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推進する。

【実施体制】

- ITER協定の国内機関及びBA活動の実施機関である量研機構を中心として、大学及び産業界も巻き込んだオールジャパンの体制を構築しており、DEMOに向けた技術基盤構築やDEMOへの移行段階等、計画の進捗に応じて、産業界の参画強化等の見直しを行う。

- パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略（令和元年6月11日閣議決定）において、重点的に取り組む横断的施策の一つとして、核融合を記載。

（前略）

核融合エネルギーについては、トカマク方式のITER計画や幅広いアプローチ活動の着実な推進と並行して、我が国独自のアイデアに基づくヘリカル方式等の研究を推進し、科学的・技術的実現性の確立を目指す。

○関連する技術の例

- ・核融合 実験炉、超伝導トカマク装置、ヘリカル方式等

菅総理の所信表明演説 (The first policy speech to the Diet by the Prime Minister SUGA)

- 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、グリーンイノベーション戦略推進会議で、グリーン成長戦略の作成に向けの政策議論が活発化しているところ。

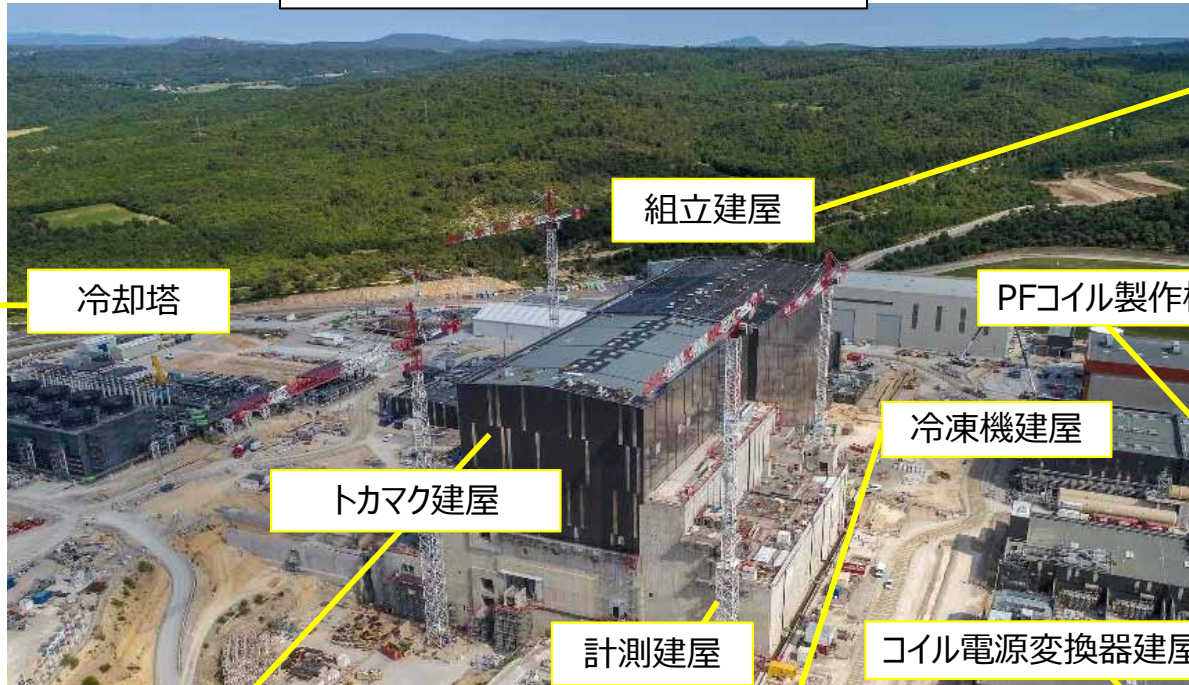
ITERサイトの現状 (ITER Site)

トカマク建設現場(2020年3月)

冷却システム



冷却塔



組立建屋

PFコイル製作棟

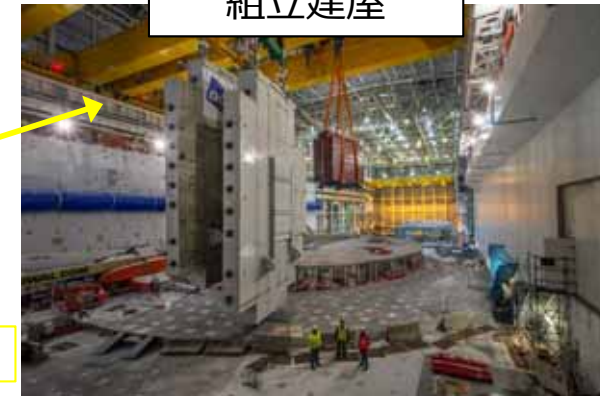
冷凍機建屋

コイル電源変換器建屋

計測建屋

トカマク建屋

組立建屋



ポロイダル磁場(PF)コイル巻線



トカマク設置場所



計測建屋



冷凍機建屋



コイル電源変換器建屋



各極におけるITER機器の製作状況① (Manufacturing of the ITER Components by each member 1)

○ビゴ機構長の下でITER機構と各極との連携「One ITER文化」の浸透が進んでおり、一部機器に遅れが発生した場合も、機構長と各極国内機関長（日本はQST ITERプロジェクト部長）が、進捗管理と遅延回復措置の検討を毎月協議すること等を通して、一体となって2025年運転開始に向けて取り組んでいる。現在、建設は70.9%（2020年9月末時点）まで進捗している。

●超伝導トロイダル (TF) 磁場コイル



ITERに到着したTFコイル2号機

TFコイル1機目は2020年4/25に、2機目は7/3にITER機構に到着した。



欧州に搬出されるTFコイル構造物7号機

欧州向けTFコイル構造物は既に7機目が完成し、欧州へ輸送済。既に製作技術は確立している。

●中心ソレノイド (CS) コイル



ITERに到着した欧州のTFコイル2機目

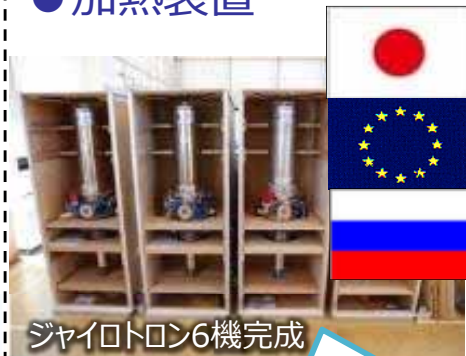
欧州のTFコイル2機目が2020年9月にITER機構に到着した。



CSモジュール1の4K試験

CS最終機の納期は2022年6月。モジュール1の4K試験が完了した。

●加熱装置



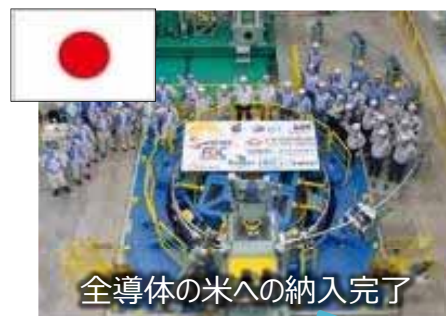
ジャイロトロン6機完成

既にジャイロトロンは6機目までが完成しQSTに納入済みで、3機目までの性能確認試験を完了した。全8機の納入を、予定どおり2023年5月までに完了見込み。



試験準備中のNBTF高電圧機器

ITER機構に設置するNBI（中性粒子入射加熱装置）実機製作に向けた試験をするため、イタリアに建設中の施設「NBTF」の高電圧機器について、2017年11月に予定どおり納入済。NBTFの試験等を踏まえて順次実機製作に着手予定（高電圧機器の実機の納期は2028年5月）。



全導体の米への納入完了

2018年4月に米国に納入済。

欧州が製作中のNBTF用加速器を格納する真空容器が完成し、2019年5月に据付完了。加速器は2023年運転開始見込み。



各極におけるITER機器の製作状況② (Manufacturing of the ITER Components by each member 2)

● 真空容器



溶接作業中の#5セクター

欧州が担当する5つの真空容器セクターは、並行して製作が進行している。



#6セクターのヘリウムリークテスト通過

韓国が担当する4つの真空容器セクターのうち、最初の#6セクターが完成し、8月にサイトに到着。ヘリウムリークテストに合格し、現在TFコイルとの部分組立の準備をしているところ。

● 計測装置



中性子フラックスモタ用
サポートフレーム

中性子フラックスモニターのサポートフレームが3月にITERに到着した。

● クライオスタット



インドが担当する全てのクライオスタットパーツが完成。

● 超伝導ポロイダル (PF) 磁場コイル



#5 ワインディングパックの最終組立

PFコイル#2～#5を欧州が製作。#5のワインディングパックの含浸が完了し、最終組立作業が間もなく完了。



#6 コールドテスト準備中

PFコイル#6 (中国) が完成し、6/26にITER機構に到着。現在コールドテストの準備中。



2020年12月完成予定のPFコイル#1 (ロシア) は順調に進展中。

● 建屋



組立ピットに据付られたクライオスタット下部胴

9/2にクライオスタット下部胴の組立ピットへの据付が成功。



屋外の電気系統

トカマク建屋内の整備も順調に進捗。



2020年3月時点



2020年7月時点

第27回ITER理事会の議題等 (The 27th ITER Council Meeting)

日程： 令和2年11月18日（水）・19日（木）

※新型コロナウイルスの感染拡大のため、前回に引き続きテレビ会議により開催。

議長： ルオ 中国科学技術部核融合エネルギー計画執行センター長

出席者：

（日本）松尾 文部科学審議官、鎌田 QST那珂研副所長（文部科学省参与）ほか

（欧州）ガリバ 欧州委員会エネルギー総局副総局長ほか

（米国）ビンクリー エネルギー省科学局次長ほか

（ロシア）ボロフコフ 連邦政府官房副補佐官ほか

（中国）ホワン 科学技術部副部長ほか

（韓国）イ 科学技術情報通信部宇宙・原子力・巨大科学政策局長ほか

（インド）グローバー 原子力委員会委員ほか

（ITER機構）ビゴ機構長、多田副機構長ほか

議題：

（1）開会挨拶（議長、各極首席政府代表、機構長）

（2）ITER計画進捗報告

（3）ITER建設活動のマネジメント

（4）その他



（令和2年11月時点・ITERサイト）

第27回ITER理事会の結果概要 (Summary Report of IC-27)

1. ITER計画の進捗

- 運転開始（ファーストプラズマ）までの建設作業は約71%進捗。
- コロナ禍においても、**主要機器がITERサイトに納入**されるなど、組立作業が進展。

- **日本・欧州の超伝導トロイダル磁場(TF)コイル4機が順次サイトに到着。**

日本のTFコイルの到着状況：1号機（世界初号機）2020年4月25日到着
2号機 同年7月3日到着

- 韓国の真空容器が8月にサイトに到着。



（運搬中の日本のTFコイル2号機）

- 他方、新型コロナウイルスの感染拡大がプロジェクトの進捗に影響。
 - 新型コロナウイルスによる影響を全体的に評価できるまで、現行のスケジュール（※）を維持。
- ※ 2025年 運転開始（ファーストプラズマ）、2035年 核融合運転開始
- 影響を最小化する対策を講じるとともに、次回理事会（2021年6月）において新型コロナウイルスによる影響を更に評価。

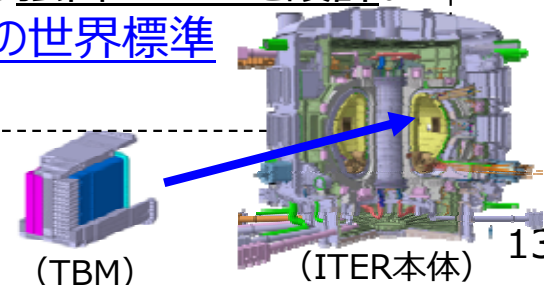
2. TBM試験計画への参加極の決定

- **TBM（テストブランケットモジュール）** は核融合炉からエネルギーとして熱を取り出すための機器。

- TBMは核融合発電を実現する上で重要な機器であり、計画に参加する各極は独自のTBMを設計。
- 最も優れた性能のブランケットが、核融合発電の実用段階（今世紀中葉）での世界標準となる可能性が高い。

- ITERの設計上、TBM試験を実施できるのは4個の機器に限定。

⇒ 日本の提案するTBMの参加が決定。 ※他の参加極はE U・中・韓



(TBM)

(ITER本体)

BA活動の現状 (Progress in BA Activities)

BA活動においては、ITER計画を補完・支援するとともに、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しており、高性能加速器の据付・調整やサテライト・トカマク (JT-60SA) の組立が完了するなど、主だった研究環境の整備が進む。

核融合中性子源用原型加速器の建設と実証(青森)

- ◆ 原型炉を目指した材料開発のための高性能加速器の据付・調整が大きく進展。
- ◆ 令和元年7月、8系統高周波源を用いた高周波四重極加速器による世界最高強度の重陽子ビーム加速試験に成功。
- ◆ RFQを用いた5MeV・長パルスビーム試運転に向け調整中。



先進超伝導トカマク装置JT-60SAの建設と利用 (茨城)

- ◆ ITERに次ぐ規模の超伝導トカマク装置JT-60SAにおいて、主要機器の据付を高精度で完了し、その実績をもってITERの組立期間の短縮に貢献する等、ITERを支援するという目的を着実に達成。
- ◆ JT-60SAは令和2年3月末に組立を完了し、令和3年春には初プラズマ達成を記念する式典を実施予定。



JT-60SA



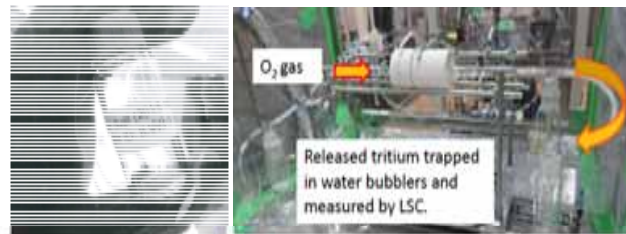
TFコイルの組立中



組立が完了したJT-60SA

国際核融合エネルギー研究センター事業等 (青森)

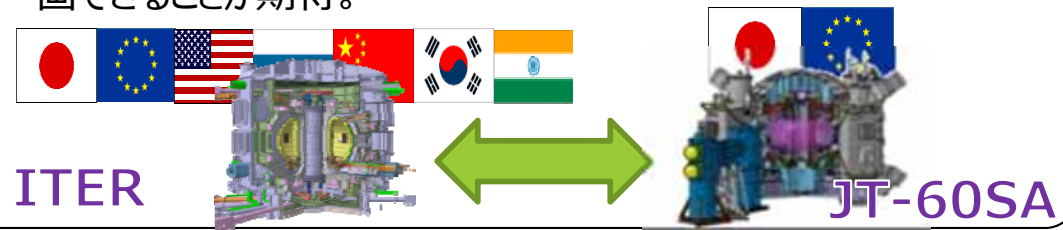
- ◆ 原型炉に必要となる重要機器の設計活動、研究開発が進展。



大型トカマク装置JET(英国)のタイルとダストの分析を継続し、ITERの運転シナリオを検討に貢献する三重水素の蓄積に関するデータを世界で初めて取得。

ITER・BAの協力の取組

- ◆ 令和元年11月のITER理事会において、ITER機構と日欧の実施機関 (QST,F4E) の間で協力取決めに署名。
- ◆ 日欧は①ITER用の解析ソフトを利用できるほか、②ITER機構との人的交流が活発になり、より有利な立場でITER計画に参画できることが期待。



第26回BA運営委員会の結果概要 (Summary Report of BASC-26)

BA運営委員会(審議官級)では、IFMIF/EVEDA、IFERC、サテライト・トカマク計画の3事業について、事業の進展を確認するとともに、2021年の作業計画等について議論。(令和2年12月1、2日オンライン開催)

1.① 国際核融合材料照射施設の工学実証・工学設計活動 (IFMIF/EVEDA) 事業

- 長パルスビーム試運転に必要な機器の据付が終了し、試運転に向けた調整が進展。
- 新型コロナウイルス感染拡大によるスケジュールの遅延が生じたが、遅延を最小化するための事業チームの努力を確認。
- IFERC事業の協力の下、新しいLIPAc遠隔実験制御室の整備が完了。

1.② 国際核融合エネルギー研究センター (IFERC) 事業

- 新型コロナウイルス感染拡大による影響は非常に小さく、事業が順調に進展。
- ITER機構、IFMIF/EVEDA事業、STP事業との遠隔参加システムの開発に貢献。

1.③ サテライト・トカマク計画 (STP) 事業

- 新型コロナウイルス感染拡大によるスケジュールの遅延が生じたものの、初プラズマに向けた調整が順調に進展。
- JT-60SAの組立、初プラズマに向けた調整運転の知見がITERの運転に貢献することを確認。

2. JT-60SA運転開始記念式典

- JT-60SAの初プラズマに向けた調整運転が順調に進展していることから、組立完了等これまでのマイルストーン達成及び運転開始を記念する式典を来春日本で実施。

3. その他

- 六ヶ所サイトにおける欧州研究者、技術者及びその家族への高い水準の生活支援・教育支援に対する青森県及び六ヶ所村の多大な努力に感謝の意を表明。
- 次回第27回BA運営委員会は、2021年4月に日本(茨城県那珂市)にて開催予定。



LIPAc遠隔実験制御室



JT-60SA

BAフェーズIIについて (Start of BA Phase II)

- 日欧政府間のBA活動継続に対する強い意欲やBA運営委員会での議論を踏まえ、事業内容・予算見積り等について協議。
- 上記協議を踏まえ、合意した内容につき、**現行のBA協定に基づく日欧共同宣言を補完する共同宣言**として、**本年3月2日に日欧代表により署名。**



署名式（2020年3月2日、ブリュッセル）
左：兒玉特命全権大使
右：シムソン欧州委員（エネルギー担当）

<共同宣言のポイント>

- ✓ 事業期間中の**日欧BA貢献割合は1 : 1**とする。
- ✓ 両極は、**毎年50kBAUA（約48億円）を上限とする貢献**を行う。
- ✓ 日本はホスト分として、上記貢献分の**3分の2以上を負担**する。
- ✓ 活動は**両極の法規制及び予算の範囲内**で行う。

※ 日欧協議の結果、当面5年間は、日本側は平均で年間74億円程度（事業貢献分46.5kBAUA、ホスト分31kBAUA）、欧州側は年間約3,825万ユーロ（46.5kBAUA）の負担を想定。

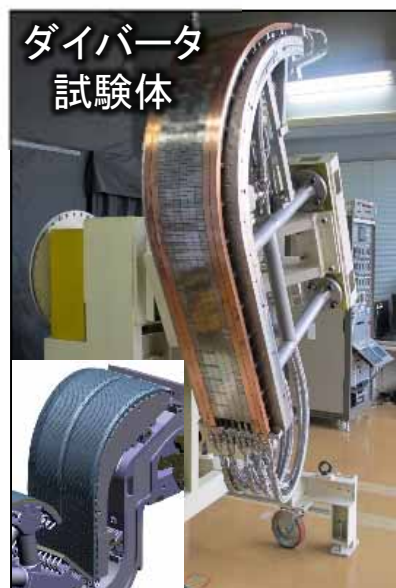
ITER機器の製作や試験、国内機関の活動等 (物納貢献)

令和2年度予算額 11,313百万円

- ITERの機器について、日本が担当するTFコイル全9機中2機がITERサイトに納品済、残り7機は製作中など、各極において製作活動が着実に進展。
- 令和3年度も、ITER計画の全体スケジュールに従い、最重要機器であるTFコイルの実機製作や、ダイバータ等の機器の開発を本格化。



ITERサイト納入ミニ式典
(2020年4月)



ダイバータ
試験体



ITERサイトに到着した
TFコイル1号機

ITER機構への分担金(現金貢献)

令和2年度予算額 5,181百万円

- 令和2年7月には、組立・据付開始式がITERサイト(仏)で開催され、日本からは萩生田文科大臣が安倍首相(当時)からのメッセージの代読を含めビデオメッセージを送付。
- 令和2年11月に開催された第27回ITER理事会では2025(R7)年の運転開始に向けて着実に建設作業が進捗していることを確認(10月時点で約71%)。
- ITERの組立経費や人件費等をまかなうITER機構予算案に従い引き続き要求。



(ITER機構提供)

ITERサイト全景 (2020.3)



(ITER機構提供)

ITER組立・据付開始
式典会場(仏・ITERサイト)

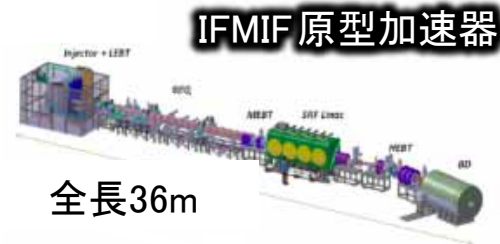


総理からのメッセージを
手にする萩生田大臣

核融合中性子源用原型加速器の建設と実証

令和2年度予算額 622百万円

- 核融合原型炉に必要な耐照射性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を開始。令和3年度は、RFQを用いた5MeV・長パルスビーム加速試験を継続。

国際核融合エネルギー研究センター事業等

令和2年度予算額 2,452百万円

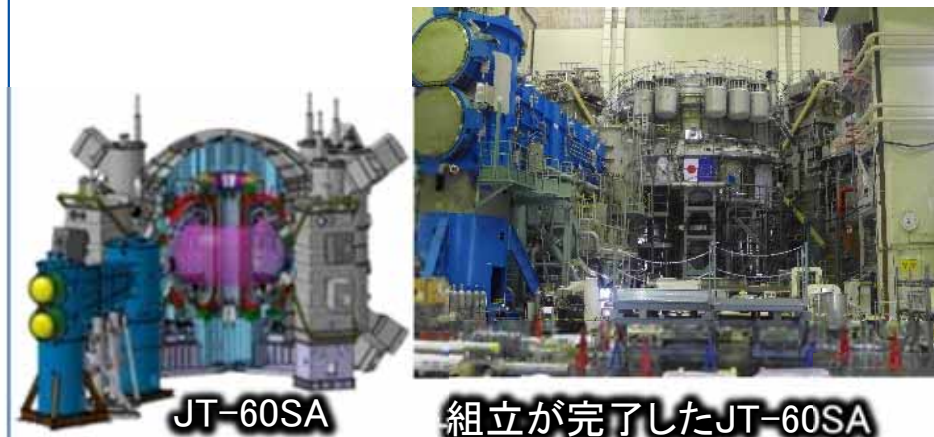
- 核融合原型炉に向けた総合的な取組として、以下の研究開発を実施。
 - 核融合原型炉の概念設計と技術開発
 - シミュレーション研究、ITER等の遠隔実験解析 等
- 令和2年度は、フェーズIIの開始に伴い、スパコンを利用した日欧のシミュレーション研究、原型炉概念設計・要素技術開発の完了に向けた活動、遠隔実験システムの改良と他のBA事業のコロナ対策への協力を実施。令和3年度は、これらの活動を本格化。



先進超伝導トカマク装置JT-60SAの建設と利用

令和2年度予算額 1,779百万円

- 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2年度は、初プラズマ達成に向けた統合コミッショニング等を実施。令和3年度は、プラズマの制御性を確認する試験運転を実施後、プラズマ加熱運転に必要な装置整備に着手。



大型ヘリカル装置(LHD)について (Research on Large Helical Device)

事業概要

核融合エネルギーは 将来の核融合炉の早期実現のため、定常運転が原理的に可能なヘリカル型装置で高温プラズマを実現することにより、超高性能プラズマの定常運転の実証をする。これとともに、学術的に未解明な現象の探求とその体系化を図る。

そのために、プラズマを長時間保持できる大型ヘリカル装置 (LHD) で重水素を使用した高温プラズマを実現させ、定常運転の実証による研究の推進を行う。

基礎データ

- 建設：LHD 約507億円 (1990～1997年度、8年計画)
- 実験：1998年度から本格実験を開始
- 共同利用研究者数：1,592人※2019年度実績

実施体制

- 事業実施主体：自然科学研究機構核融合科学研究所
- 連携研究機関：
筑波大学プラズマ研究センター、京都大学エネルギー理工学研究所等
国立大学等66機関、公立・私立大学54機関、外国機関56機関等(合計243機関)

主な成果

- 2008年度：核融合炉に必要なプラズマ密度の条件を10倍以上上回る
1,200兆個/cm³を達成 **【プラズマ密度の世界最高値(現在まで)】**
- 2013年度：2,300万度のプラズマの48分間連続保持に成功
【プラズマ保持の世界最高値(現在まで)】
- 2014年度：イオン温度7,000万度、電子温度8,800万度を同時達成
- 2016年度：重水素実験開始
- 2017年度：イオン温度1億2,000万度、電子温度4,200万度を同時達成、
同位体効果を確認
- 2018年度：イオン温度1億2,000万度と電子温度6,400万度を同時達成
- 2019年度：電子温度1億5,000万度とイオン温度8,000万度を同時達成

研究計画

<2020年度>

- ・ 将来の核融合炉心プラズマに最低限必要なイオン温度と電子温度がともに1億2,000万度を超える高温プラズマの実現を目指して、イオン温度1億2,000万度、電子温度1億度の同時達成を実現する。
- ・ 核融合炉心プラズマの状態をより正確に予測するために、メカニズムが未解明の「同位体効果」(※)を明らかにするための研究を進める。

※ 軽水素よりも重水素のプラズマの性能が良くなる現象

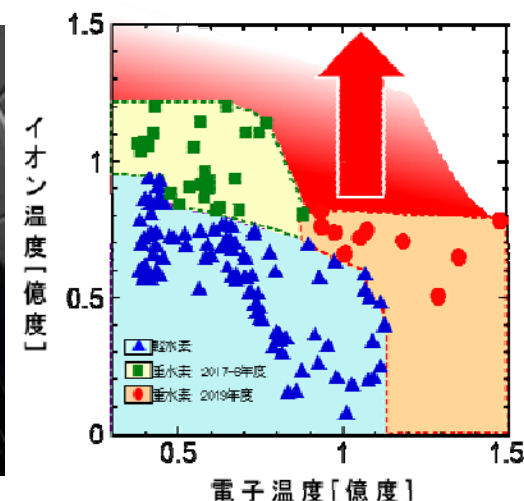
- ・ 国際共同研究により導入した高性能レーザーを最大限に活用して計測を強化し、プラズマ中の揺らぎがプラズマ性能に及ぼす影響を明らかにする。

<2021年度以降>

- ・ 加熱の増強・最適化を進め、核融合燃焼プラズマに必要なイオン温度と電子温度がともに1億2,000万度を超える超高性能プラズマの実現を目指して、プラズマの高温化を進める。
- ・ プラズマ中の揺らぎ(揺動)の計測装置の整備を進め、プラズマ中の小さな渦(乱流)が関与する同位体効果などの核融合炉の早期実現に必要な現象の解明をする。



大型ヘリカル装置 (LHD)



LHDにおけるイオン温度と電子温度の変遷

レーザー核融合研究について (Research with High-power Lasers)

経緯とこれまでの成果

- 2001年、高速点火方式の有効性が我が国により初めて実証され、2008年に爆縮レーザー（激光XⅡ号）と加熱レーザー（LFEX）を用いて原理を実証するFIREX-I計画を開始
- 220億気圧以上の圧縮加熱実験に成功し、中心点火方式より約10倍の高い効率であることを実証
- 高速点火方式に適した流体不安定性がほとんどない安定な核融合燃料爆縮法：中実球爆縮法を考案し、爆縮実験を行うとともに点火燃焼に必要な技術確立し、2D爆縮シミュレーションで核融合点火燃焼、実験炉に必要な密度を実現
- 核融合点火条件での加熱物理を理解し効率的な加熱に成功（爆縮コアエネルギー/レーザー～30%）するとともに、効率的な加熱を実現するための技術（レーザー短波長化、パルスペダスタル抑制）を確立した。
- 安定なエネルギー輸送が可能な条件下で、核融合点火に必要なイオン温度を実現できる条件を明らかにした。
- 米国ローレンスリバモア国立研究所との研究者の交流、大型レーザーを用いた共同研究などの協力

今後の展開

- FIREX- I 計画として核融合点火へ向けた加熱物理および比例則を明らかにする。
- レーザー核融合炉の基盤技術である高繰り返し高出力レーザーを開発し、核融合炉工学への貢献とともに、学術、医療、産業、社会基盤に渉る非常に幅広い分野への応用を視野に、学際連携、産学連携、国際連携のもと高エネルギー密度科学分野を推進する。

高出力レーザー研究

大阪大学レーザー科学研究所を中心に研究開発が推進



LFEX (左) GEKKO-XII (右)



実験チャンバー



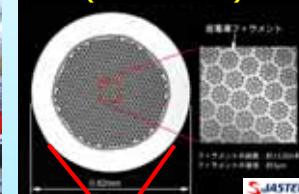
核融合の実験装置のため、

- ✓ 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



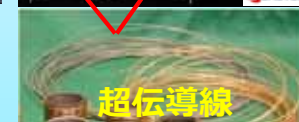
超伝導線断面
(直径 0.8mm)



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



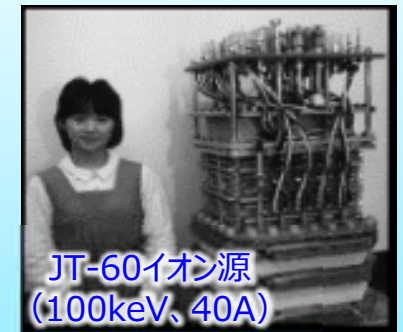
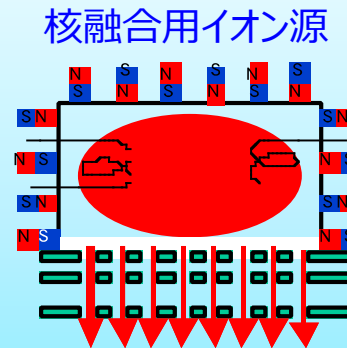
医療用MRI



小型NMR装置

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)

核融合の実験で使われる加熱装置のため、従来の1,000倍を超える電流のイオン源を開発。



産業用イオン源に応用

大口径イオン源
(直径580mm、1keV、~2A)



イオンビーム加工機
(提供：日立製作所)



半導体製造用イオン注入装置
(提供：日新電機)

半導体製品の製造に活用

磁気ヘッド拡大写真



5ミクロン

イオンビーム加工面拡大



システムLSI





- 電気自動車だけでなく、ハイブリッド自動車、プラグインハイブリッド自動車や家庭・再生エネ用蓄電池に必要な**大型リチウム電池の市場は急拡大**。
- 海外リチウム生産量には限界があり、遅くとも2030年には需給バランスが崩れ、**リチウム資源が枯渇する予測**。

リチウム生産性を大幅に高める新技術「LiSMIC*」を開発



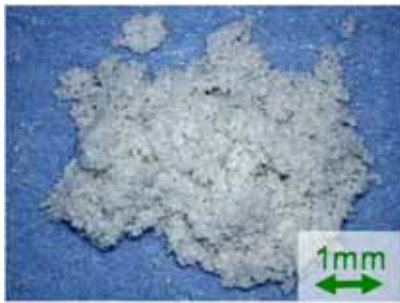
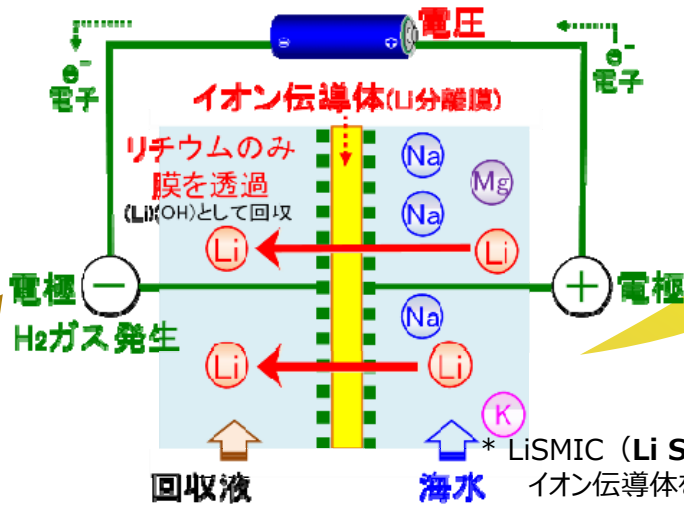
目標：電池原料の炭酸リチウム

輸入価格約1,500円/kg⇒**製造コスト約300円/kg**

QSTアライアンス



LiSMICにより、リチウム資源の枯渇問題を解決へ



電池の原料となる
高純度リチウム

* LiSMIC (Li Separation Method by Ionic Conductor)
イオン伝導体をLi分離膜とし、Liのみを選択的に回収する技術

核融合技術の産業展開具体例④～水素爆発災害を防ぐ核融合発の革新技術～ (Application of Fusion Technology to Industry 4)

核融合施設で使用する三重水素は、「**閉じ込める**」「**再利用する**」ことで安全性を確保。

- ・三重水素を「**触媒**で酸化」させ、水(T水)として核融合施設に**閉じ込める**
- ・核融合施設で発生するT水を「**触媒**で濃縮」して、三重水素を**再利用**

従来の触媒では、水や水蒸気が表面に吸着すると性能が劣化するという問題があり、触媒を熱して、水や水蒸気を除去する必要があった。

→課題 災害や事故等により停電が発生した場合、触媒が機能しなくなる可能性

解決策

量研と田中貴金属工業(株)は、無機物質に水の吸着を防止する「疎水化」処理を施す新たな触媒製造法により、**熱しなくても触媒の性能を維持できる「疎水性貴金属触媒」**を共同開発



疎水性貴金属触媒
商品名：TKK-H1-P
田中貴金属工業(株)
(写真は粒形3mm)

産業応用

水素エネルギー社会の進展により、一般産業での利用が期待



(出光興産・成田水素ステーション)

水素ステーション

水素取扱い施設の水素爆発未然防止装置



水素取扱いプラント

水や水蒸気が関係する化学反应用触媒や水素同位体分離用触媒



原子力発電所

原子炉の格納容器内可燃性ガス処理設備向け触媒

原型炉開発の技術基盤構築を進めるための体制（All-Japan framework for Fusion DEMO）

核融合科学技術委員会

- ・原型炉開発に向けた技術基盤構築のための体制整備について
- ・トカマク方式以外の核融合研究の在り方について
- ・原型炉開発ロードマップの策定

政策提示・評価

アクションプランの策定・承認

原型炉開発総合戦略TF

- ・原型炉開発に向けたアクションプランの策定
- ・原型炉設計合同特別チーム等の進捗状況の把握・助言等
- ・技術基盤構築の進捗状況及び課題解決への取組の取りまとめ

活動方針提示・
各要素技術の状況把握

情報共有・要請等

公募テーマの提案・了承

原型炉概念設計

原型炉に向けた共同研究

原型炉設計合同特別チーム

@QST六ヶ所研究所

QST, NIFS, 大学, 企業

連携

共同研究ワーキンググループ

TF, QST, NIFS, 大学, 特別チーム

・関連学協会と連携しつつ、原型炉概念に必要な
様々な技術要素の基盤構築を目指す

・原型炉研究開発体制強化のための大学等の連
携強化

核融合開発に係る研究開発政策の検討状況 (Japan's Policy on DEMO Reactor)

2017年12月

➤ 「核融合原型炉研究開発の推進に向けて」策定

➤ 「原型炉開発アクションプラン」改訂 ※科学技術・学術審議会 核融合科学技術委員会

2018年7月

➤ 「原型炉研究開発ロードマップについて(一次まとめ)」策定

※科学技術・学術審議会 核融合科学技術委員会

原型炉段階への移行に向けた考え方

➤ ITERの核融合運転(DT)が見込まれる2030年代に原型炉移行判断

➤ 原型炉段階移行時に、実用炉段階で経済性を達成できる見通し

➤ 中間チェック・アンド・レビュー(C&R)を2回に分けて実施

#1 C&R JT-60SAのファーストプラズマ実現後、2021年に実施予定。

核融合科学技術委員会(第10期) 令和元年度 アクションプランの進捗状況確認

令和2年度 第10期における進捗評価の取りまとめ

第1回C&Rに向けた検討

核融合科学技術委員会(第11期) 令和3年度 第1回C&Rに向けた検討

(核融合科学技術委員会で第1回C&R)

#2 C&R ITERのFP(2025年) から数年以内

※原型炉工学設計・必須のコンポーネントの工学開発活動開始も判断

➤ 産業界の意見を踏まえ、また主要国の政策動向を注視しつつ対応

「原型炉研究開発ロードマップ」の概要 (Summary of a Roadmap toward Fusion DEMO Rector)

開発優先度・国際協力

➤ ITER 計画

2025年初プラズマ点火、2035年重水素の三重水素燃焼着火が重要なマイルストーン(日本担当機器の着実な製造・搬入、円滑な組立が不可欠)

- ITER実験の成果
- JT-60SAによる先行研究

➤ BA 活動

2020年3月までには主な機器整備は完了。2020年4月以降をフェーズ 2 と位置付け、本格的に成果を創出する段階

- IFMIF/EVEDAの完成・運用 → 中性子源の概念設計へ反映
- JT-60SAの運用 → 原型炉に向けた設計・開発活動への貢献

➤ 核融合中性子源

原型炉開発には、炉内中性子環境を模擬し、材料データ取得が不可欠。日欧で構想検討が進む。

- 第2回中間チェック&レビューで建設移行判断
- IFMIF/EVEDAの成果を活かし、国際協力をも得ながら具体化

人材育成

➤ 人材の育成・確保

- 長期的な計画に基づいて、原型炉開発を担う人材を継続的・安定的に育成・輩出し、その人材を確保してさらに育成する環境を整えることが必要

➤ 大学等との連携強化

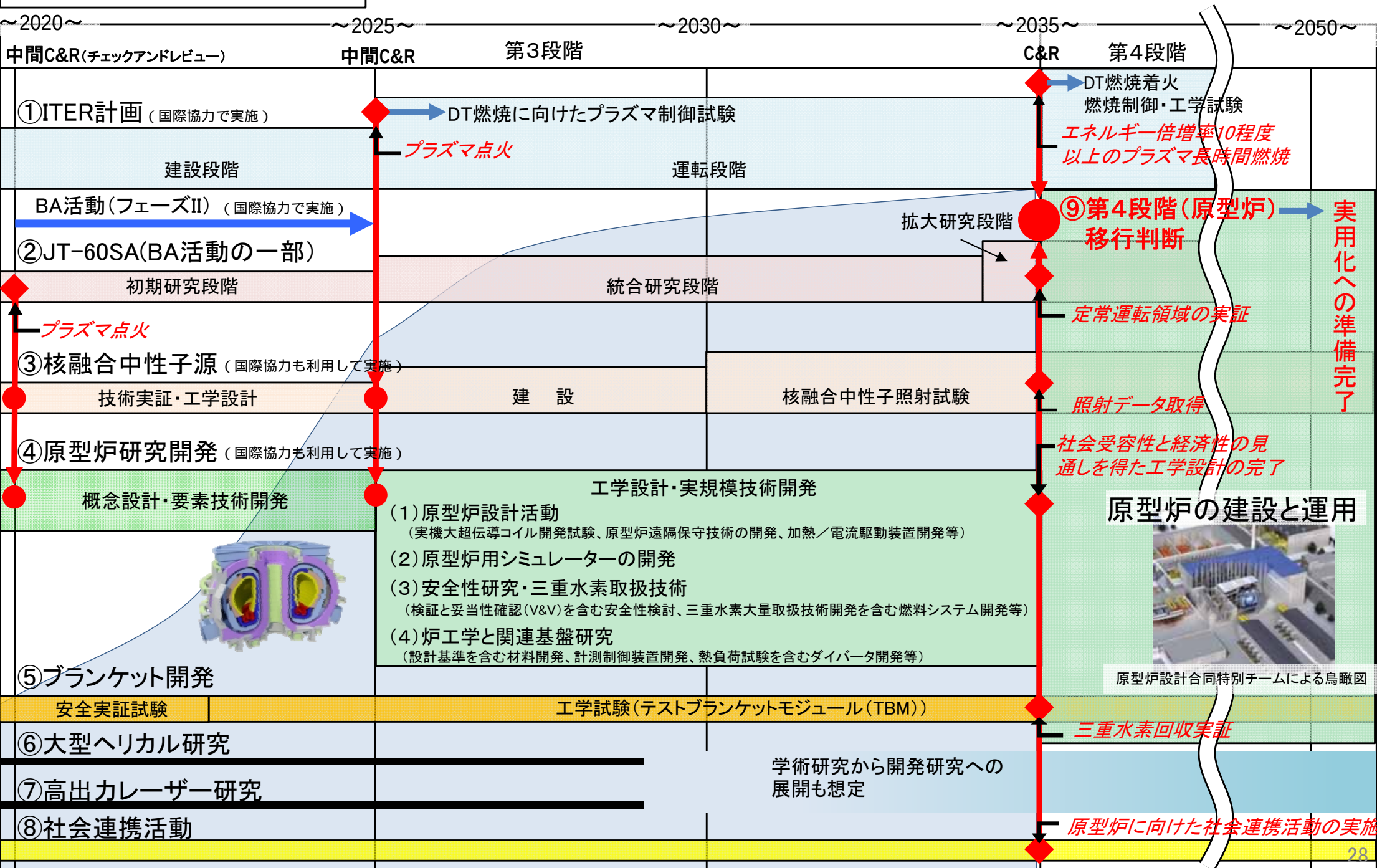
- 原型炉に向けて、人材育成も視野に入れ、自主・自律を前提とした大学等の優れた取組を支援するため、これまでのQSTを中心とした体制に加え、核融合科学研究所を中心とした大学等を対象とした共同研究をとりまとめる体制の整備が必要

アウトリーチ活動

- 核融合が国民から選択され得るエネルギー源となりうるには、核融合エネルギーの特性や有用性・安全性に関し、社会との情報の共有と不断の対話が必須

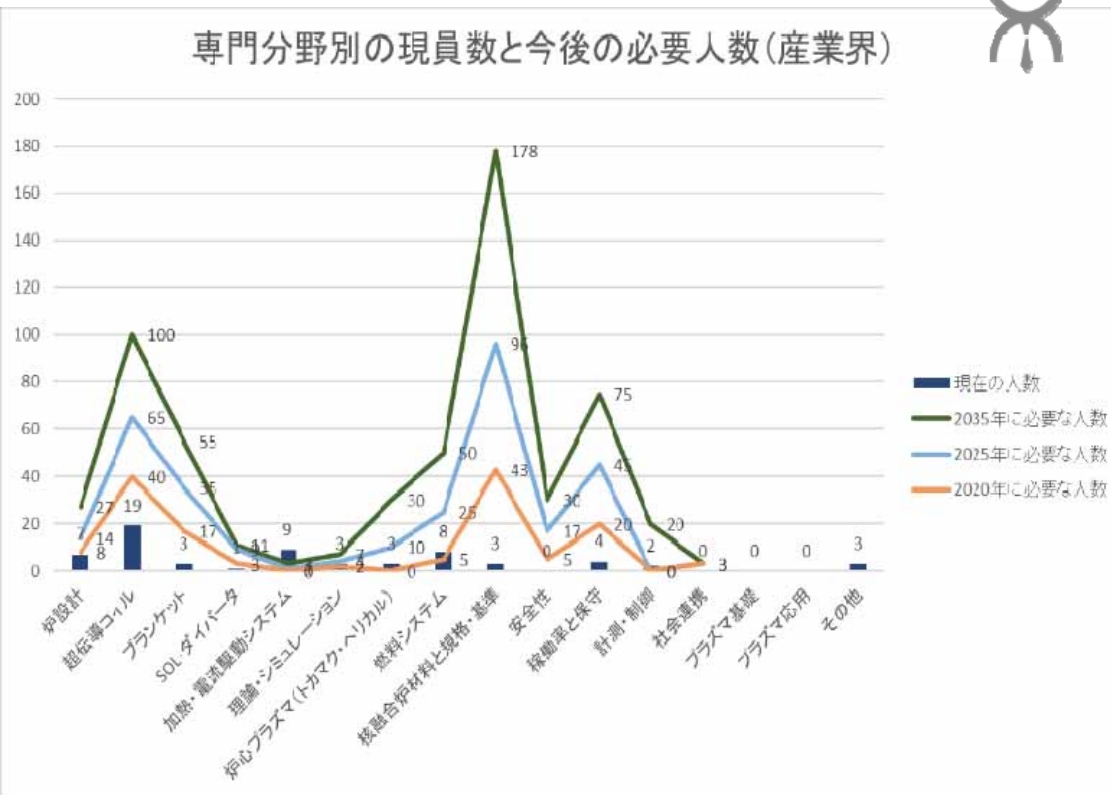
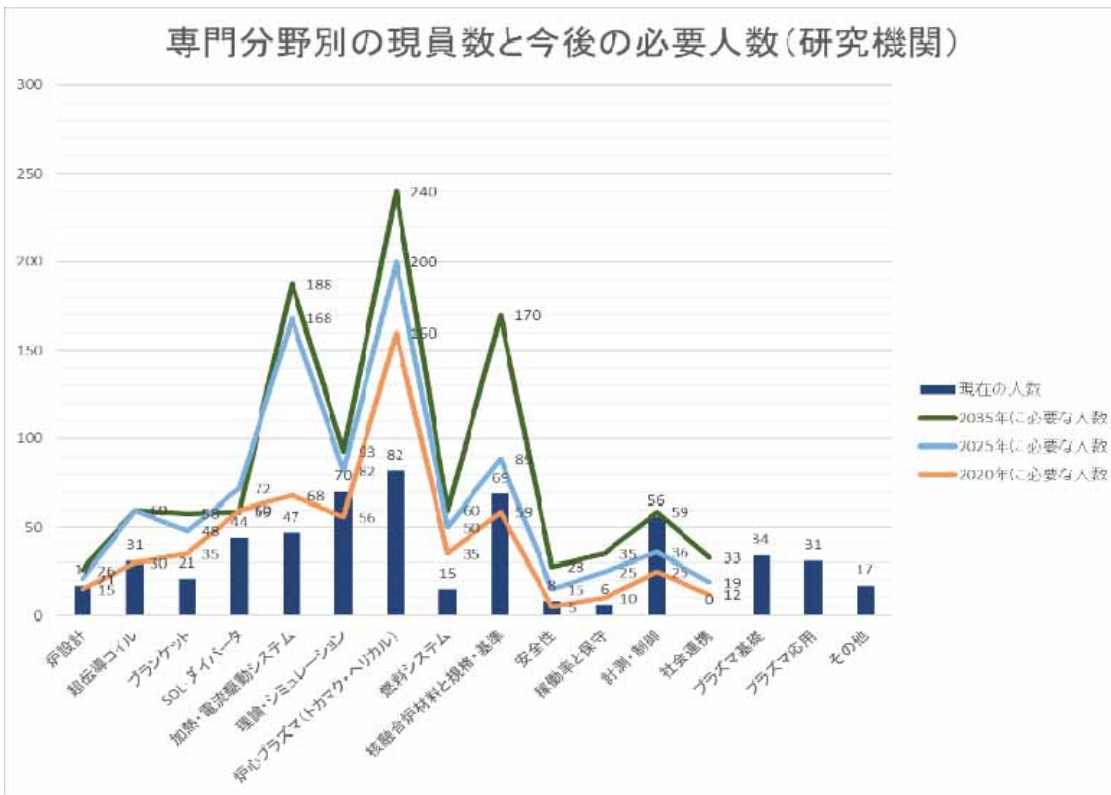
原型炉研究開発ロードマップ (Roadmap toward Fusion DEMO Reactor)

- 凡 例
- ◆ 目標達成が求められる時点
 - ▲ 達成すべき目標
 - 次段階への移行判断が求められる時点
 - ロードマップ遂行に必要なアクティビティの指標



核融合人材を取り巻く現状 (Current Situation Surrounding Fostering of Human Resources)

- 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。
- ITER計画に関して、我が国は国際的に大きな貢献が期待される一方、ITER機構における日本人職員数割合は、約4%という低い割合。



(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

ITER機構日本人職員等について (Current Situation Surrounding Fostering of Human Resources)

1. 現状

- ITER機構では、今後、現地における組立作業が本格化する中で、高い技術力や経験・ノウハウを有する人材がこれまで以上に必要となっているが、ITER機構職員983名（2020年11月末時点）のうち、日本人職員の割合は加盟極中で6位（36名、3.7%）。

EU	中	印	日	韓	露	米	計
670	90	28	36	51	59	49	983
68.2%	9.2%	2.8%	3.7%	5.2%	6.0%	5.0%	100%

- 日本人職員増のため、2017年4月にQSTに「ITER連携推進グループ」を新たに設置し、人材派遣企業との連携による企業からの職員派遣の働きかけなど、取組を強化。

2. 最近の採用状況（2020.3～2020.10）

- ITER機構職員（直接雇用職員※1）：

2名が採用され、計36名。

- IPA（ITER Project Associates）スタッフ※2：

3名が採用され、計9名。

- モナコポスドクフェロー※3：計1名。

3. ITER機構インターンシップ生（2020.11時点）

- 2020年7月まで2名が実施。※2021年インターンシップは2021年2月末まで募集中

※1 最大5年間（更新可）

※2 「ITERプロジェクトアソシエイト計画」（2015年7月機構長決定）及び「ITER機構とQSTとの実施取決め」に基づき、ITER機構に派遣されるスタッフ。

・スタッフの位置づけ：派遣元機関の被雇用者

・派遣期間：原則4年未満

・ITER機構からの支援：赴任等手当、PACA（マノスク）国際学校への入学資格の付与

※3 ITER機構職員（直接雇用職員）数36名に含まれる。



©（国研）量子科学技術研究開発機構

ITERプロジェクトアソシエイト(IPA)等について (ITER Project Associates(IPA))

1. 概要

現在の勤務先を退職せず、QSTに出向した上で、ITER機構で勤務する仕組み。

最先端の技術に触れ、多様な技術者・市場関係者と交流する機会であるとともに、多国籍・英語使用という環境を通じて国際交渉・マネジメントを経験する機会。

- ・求められる経験：プラント技術、人事、広報、調達、法務、知財等
- ・派遣期間：原則4年未満
- ・ITER機構からの支援：赴任等手当、PACA(マノスク)国際学校への入学資格の付与
- ・QSTからの支援：給与、応募時・滞在時のサポート

2. 応募方法

ITER国内機関(QST)窓口に、履歴書・経歴書を添えて、連絡

窓口 (ITER Japan) E-mail: jada-recruiting@iter.jp TEL: 029-270-7739

3. PACA(マノスク)国際学校について

概要: ITER協定に基づき、各極から集まるITER機構職員の子弟に教育を提供するため、フランスがマノスク市に設置した国際学校

形態: フランスの公立学校 (授業料は無料)

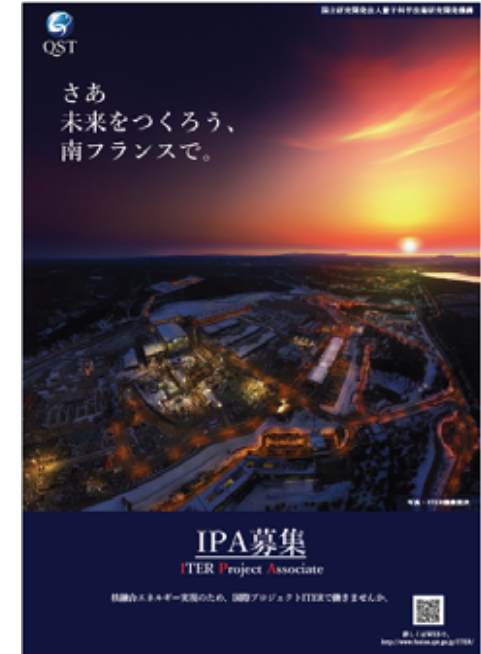
学校種別: 幼稚園、小学校、中学校、高等学校

学校年度: 9月1日 ~ 8月31日

特徴: フランス語教育を基本としつつも、日本語等の各言語セクションも設けたインターナショナルスクール

○日本語セクション児童生徒数 (2020年11月時点)

種別	幼稚園部 (4~6歳)	小学部 (7~11歳)	中学部 (12~15歳)	高等部 (16~18歳)	合計
日本語 セクション 児童生徒数	9	14	7	4	34



2021年ITER機構 インターンシップ募集について (2021 ITER Internship Program)

【背景】

様々な分野の学生、大学院生が ITERにおける実践的な仕事を通して、今までの教育的経験で得た知識を活用できる枠組みを提供。

【目的】

- ・国際的な科学と多様な文化的環境下で、実務経験を積む。

【応募の枠組み】

2021年の場合



© ITER機構

カテゴリー	対象	期間	手当	募集人数
A	修士課程	6ヶ月以内 (1年まで延長可)	1300ユーロ/月 ※5ヶ月未満の場合は 650ユーロ/月	25
B	学部	3ヶ月以内 (1年まで延長可)	650ユーロ/月	20
C	高校生	1～4週間	無し	30
S	博士課程・一般	最大4年 (個別に相談可能)	個別に対応	5

■ 応募の流れ ITER 日本国内機関 (QST) が窓口となり、テーマの選択支援、応募支援を実施。

事前調整
(随時)

支援

公募
(11月～)

Web応募
(～2月末)

支援

書類審査

面接
(Skype)

(支援)

合格通知

渡航準備
(1～3ヶ月)

支援

インターン
ITERへ！

生活支援

2021年インターンシップは2021年2月末日まで募集中

詳細は・・・

➤ 核融合実験炉ITER日本国内機関・量子科学技術研究開発機構HP インターンシップ募集

https://www.fusion.qst.go.jp/ITER/staff/internship_program.html

➤ ITER機構 インターンシップ募集 (英語)

<https://www.iter.org/jobs/internships>

インターン紹介動画等を掲載



<https://youtu.be/M4As3d7JAOI>

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 (Training and securing of personnel for the promotion of fusion energy developments)

➡ 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、さら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

核融合のアウトリーチ活動 (Outreach Activities on Fusion Energy)

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

https://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/fusion/

核融合 文科省



- ◆ 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



SSH・SGH・高専等に配布

■ 大学生向け

ITERインターンシップ周知



体験談や応募の流れを掲載

まとめ (Summary)

原型炉を実現し、核融合エネルギーの実用化を目指すために、

➤ ITER計画、BA活動の着実な遂行

- ITER計画における2025年FP、2035年DTの達成
- BAフェーズⅡ(2020年4月開始)の本格運用 (IFMIF/EVEDA、IFERC JT-60SA)

➤ 中長期的視点に立ち、原型炉を見据えた研究開発・人材育成の展開

- 原型炉段階への移行判断に向けた、チェックアンドレビューの実施
- 産学官が一体となり、人材流動性を確保した人材育成
- 戦略的なアウトリーチ活動の展開・体制整備



ご清聴、ありがとうございました。
Thank you for your kind attention.

