

我が国の核融合研究開発の 現状について

平成24年4月10日

文部科学省研究開発局

研究開発戦略官付(核融合・原子力国際協力担当)

核融合研究開発の位置づけ

- 我が国の核融合研究開発は、原子力委員会の方針に基づき、進められてきている。
 - 「第三段階核融合研究開発基本計画」(平成4年6月 原子力委員会決定)
 - 「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報告書)
- また、原子力政策大綱(平成17年10月 閣議決定)やエネルギー基本計画(平成22年6月 閣議決定)においては、ITER計画をはじめとする核融合について、長期的視野に立って推進することとされている。
- 昨年8月に閣議決定された第4期科学技術基本計画においては、以下のように規定。

「核融合の研究開発については、エネルギー政策や原子力政策と整合性を図りつつ、同時に、その技術の特性、研究開発の段階、国際約束等を踏まえ、これを推進する。」

原子力科学技術の推進方策について

(平成24年1月24日 文部科学省科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会承認)

【核融合関係部分の概要】

- 核融合エネルギーは、長期的・安定的供給、環境、安全性等の観点で優れた特性を有し、その実現は人類共通の課題である。
- 国際約束であるITER(国際熱核融合実験炉)計画、BA(幅広いアプローチ)活動、国内の重要施策(トカマク方式、ヘリカル方式、レーザー方式及び炉工学)を、引き続き着実に推進していく必要がある。

(国際約束に基づくITER計画等の推進について)

- ITER計画：世界7極(日米欧露中韓印)による、核融合エネルギー実現に必要不可欠な国際共同プロジェクト。東日本大震災後のスケジュールの遅れを最小化し、早期にITER建設が実現するよう、我が国が分担する調達活動等を積極的に行う必要がある。
- BA活動：ITER計画を補完・支援する日欧協力による重要プロジェクト。ITER計画の進捗を踏まえつつ、確実に進める必要がある。

原子力科学技術の推進方策について

(重点化計画における推進4分野)

- ・ トカマク(トカマク国内重点化装置JT-60SA、JAEA)計画：
高ベータ定常運転※¹実現。BA活動におけるサテライト・トカマクの進捗を踏まえ、安全の確保に最大限の注意を払いつつ、解体・改修を進めていくべき。
- ・ LHD(大型ヘリカル装置、NIFS)計画： プラズマ学理構築。より臨界プラズマ条件※²に近い高性能定常プラズマ実現のための重水素実験に向けた準備、プラズマ学術研究の中核拠点として大学等との共同研究を引き続き推進していくべき。
- ・ レーザー方式(大阪大学等)： 高速点火方式第1期実証実験(FIREX-I)進行中。次段階への移行判断のため、核融合点火温度5千万°C以上達成等の研究成果を確実にあげることが重要。
- ・ 炉工学： ITER計画及びBA活動との連携、JAEAにおける炉工学技術開発、大学等における幅広い基礎研究を総合的に推進、技術基盤を着実に形成。

※¹: ベータ値(プラズマ圧力/磁場圧力)が高い状態での連続運転で、高ベータ化は、核融合炉の経済性を高める上で、必要不可欠な要素となる。

※²: プラズマイオンが同数の重水素と三重水素で構成される時に、プラズマに注入したパワーと等しいパワーが核融合反応で発生する条件。

核融合研究開発への今後の取り組みについて

核融合研究開発への今後の取り組みについて

平成23年11月
核融合研究作業部会

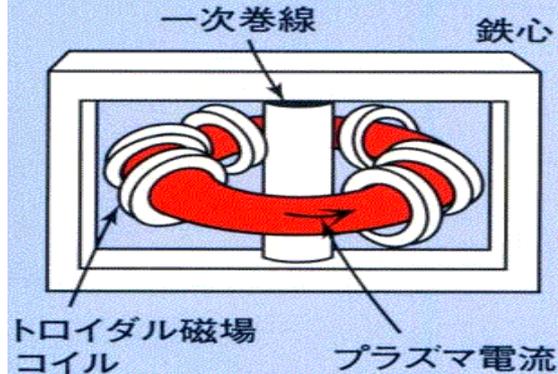
核融合エネルギー技術は、将来においてエネルギーを長期的・安定的に確保するとともに、環境問題を克服する可能性を有するものであり、究極のグリーン・イノベーションの実現につながるものである。また、安全性等の観点で優れた特性も有しており、その実現は人類共通の課題である。

このため、その実現を目指して、世界の人口の半分以上、GDPの8割以上を占める7極（日・欧・米・露・中・韓・印）が参加して、ITER(国際熱核融合実験炉)計画が進められており、我が国は準ホスト国として主導的な役割を担っているほか、我が国において日欧協力によるBA(幅広いアプローチ)活動を進めているところである。また、これら国際約束による取組に加え、国内の重要施策として、トカマク方式、ヘリカル方式及びレーザー方式並びに炉工学の推進を図っているところである。

現在進められているエネルギー政策及び原子力政策の再検討において、今後、核融合研究開発への取組も含め、検討されていくことになるものと考えられる。当作業部会としては、上述の核融合研究開発の意義は変わるものではなく、核融合エネルギーの早期実現に向け、長期的視野に立って、関連する様々な技術分野とも連携しつつ、これらの核融合研究開発を着実に推進していく必要があると考える。その際には、安全性の確保が何よりも重要との認識の下、核融合の特性を活かした安全性の研究をさらに深めていくことも重要である。さらに、こうした核融合研究開発の意義について、専門家のみならず、広く認識が共有されることを期待するものである。

核融合の主な閉じ込め方式

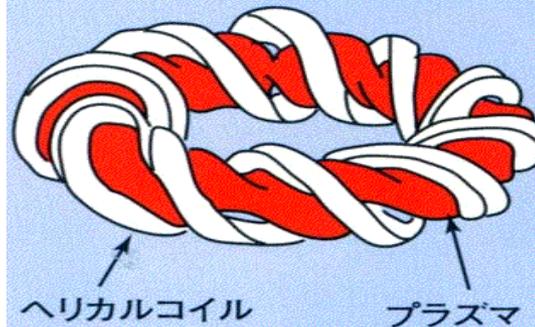
●トカマク型



- ドーナツ状の磁気のかごをつくり、その中にプラズマを閉じ込める
- プラズマ中に電流を流して、ねじれた磁場を形成
- 旧ソビエトで考案され、世界が追随した方式
→現時点で最も進んだ方式

ITER (国際熱核融合実験炉)
JT-60【日本原子力研究開発機構】

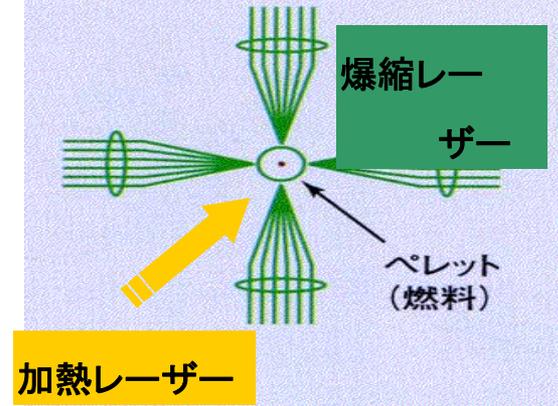
●ヘリカル型



- トカマク型と同様にドーナツ状のかごをつくるが、ねじれたコイルを使うのが特徴
- 磁場は外部コイルのみで形成されるため、プラズマ中に電流を必要としない
→経済的な運転、長時間運転が可能

大型ヘリカル装置 (LHD)
【核融合科学研究所】

●レーザー方式



- 左の2つの方式と全く異なり、燃料を高出力レーザーで爆発的に圧縮・加熱し、その圧力でプラズマを閉じ込める
→原理実証完了前の基礎的段階
- 米仏では、国防関係機関が推進

激光XII号・LFEX
【大阪大学】

我が国における核融合政策の現状

磁場閉じ込め方式

☆トカマク・ヘリカルともに原理実証段階を完了

トカマク

○工学的実証段階

○現段階では最も進展しているとの国際的認識
→ 実験炉ITER、JT-60SA

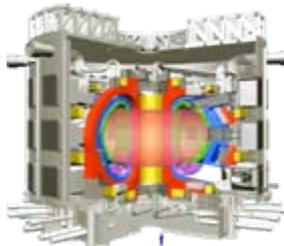
<主な実験成果(JT-60)>

- ・エネルギー増倍率: 1.25 (世界記録)
- ・イオン温度: 5.2億度 (世界記録)
- ・運転時間: 28秒間 (約1億度)

JT-60SA
(JAEA)



ITER



知見を反映

ヘリカル

○工学的実証を目指す段階

○磁場で閉じ込める考え方はトカマクと同じ。
プラズマの安定性という長所を持つため、
ヘリカルが原型炉段階で採用される可能性
→ LHD (大型ヘリカル装置)

<主な実験成果(LHD)>

- ・エネルギー増倍率: 0.075
- ・イオン温度: 0.8億度
- ・運転時間: 54分28秒 (約0.1億度)
(世界記録)



LHD

(核融合科学研究所)

レーザー方式

☆原理実証を目指す段階

○原理実証を目指す段階

○磁場閉じ込めと質的に異なる方式であるため、将来、磁場閉じ込め方式に
限界がみえた場合に、新しい角度から代替する可能性 → 激光XII号・LFEX

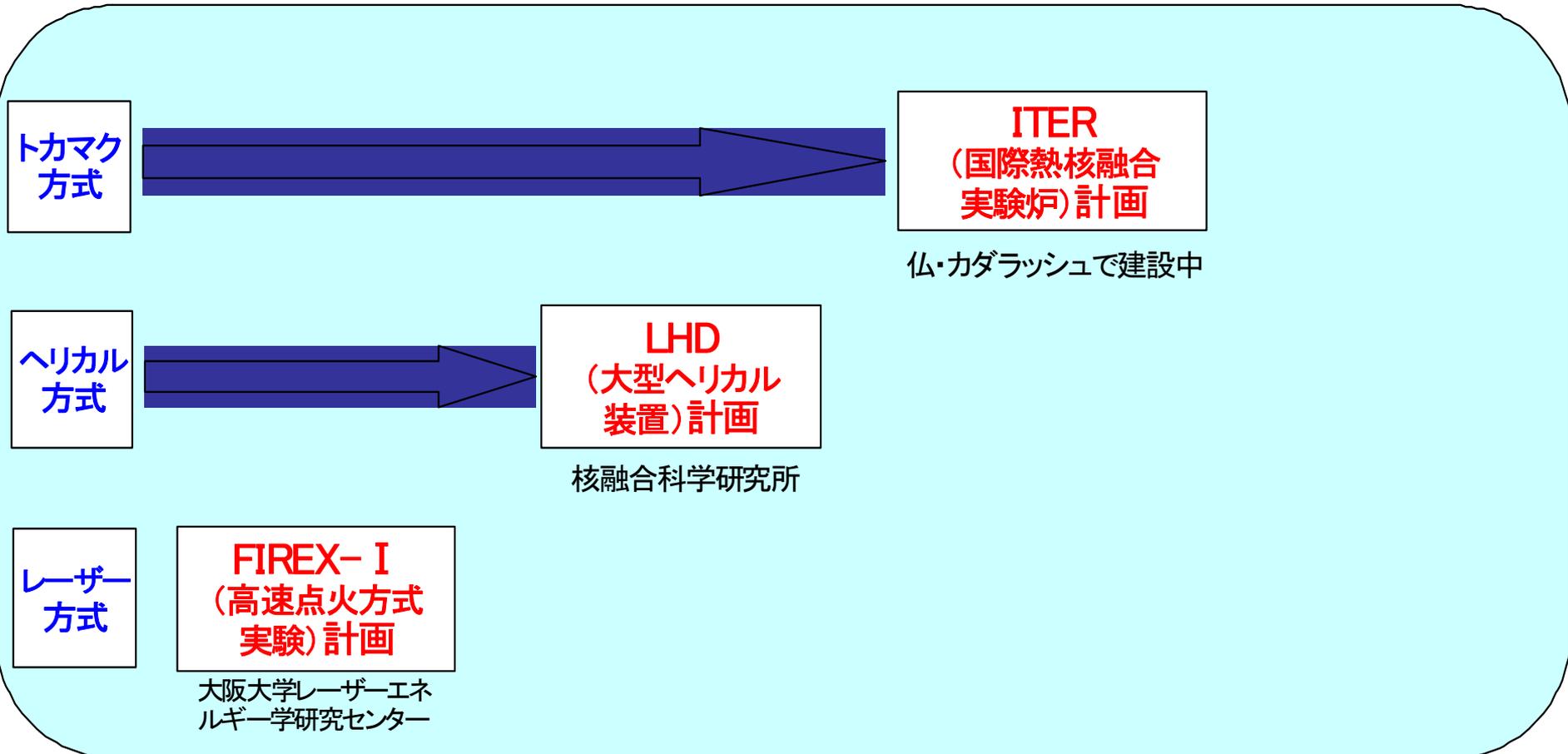
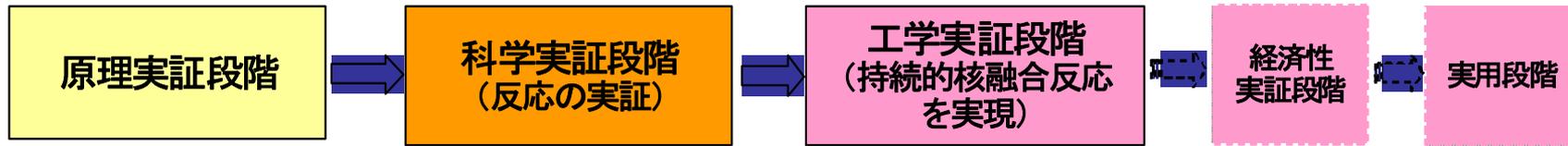
<主な実験成果(激光XII号)>

- ・イオン温度: 1億度



(左) 激光XII号と(右) LFEX
(大阪大学)

核融合方式の発展段階



核融合エネルギーの段階的研究開発

今世紀中葉までに実用化の見通し
を得ることを視野に

技術的実証・経済的実現性

- ・発電実証
- ・経済性の向上

科学的・技術的実現性

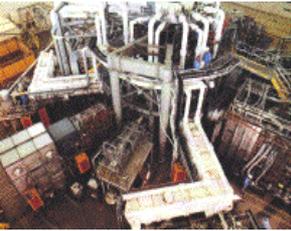
- ・燃焼プラズマの達成・長時間燃焼の実現
- ・原型炉に必要な炉工学技術の基礎の形成

科学的実現性

臨界プラズマ条件の達成



原型炉



JET(EU)

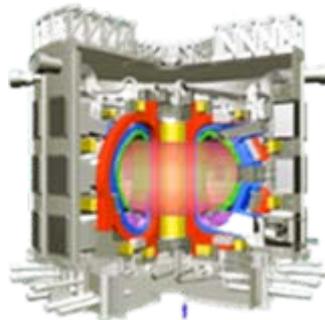


TFTR(US)



JT-60 (JA)

【主要実験装置】

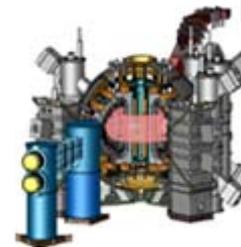


ITER
(実験炉)

ITER計画



IFMIF



JT-60SA

BA 活動

核融合研究作業部会における検討状況

第5期の作業部会(平成21年2月1日 ～平成23年1月31日)検討内容

原型炉を将来製作するとして、ITER計画やBA活動以外の視点から見て解決が必要となる技術的諸課題を整理。議論の前提として、以下を考慮。

○ITER計画やBA活動等の核融合研究開発の進展状況

○平成17年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」

・トカマク方式(研究が進展):

ITER計画(第三段階計画核)、トカマク方式の原型炉建設に必要な研究開発を推進。(原型炉:定常炉心、プラント規模での発電実証、一定の経済性)

・核融合関連学術研究:

重点化計画であるヘリカル方式とレーザー方式を中心として今後チェック・アンド・レビュー後、研究の展開を定める。

第6期の作業部会(平成23年2月1日 ～平成25年1月31日)検討内容

第5期の議論を基に、「原型炉概念の構築と設計作業」を今後どのように行っていくのが望ましいか、以下の各技術的課題毎に議論し、報告書を取りまとめる予定。

(技術的課題)

- 1.原型炉概念の構築と設計作業
- 2.超伝導コイル用線材開発
- 3.ブランケット開発
- 4.ダイバータ開発
- 5.理論・計算機シミュレーション研究
- 6.炉心プラズマ研究
- 7.核融合燃料システム開発と環境安全性評価
- 8.核融合材料開発と規格・基準・信頼性
- 9.加熱・電流駆動システム開発

今後期待される核融合研究開発の波及効果

核融合分野にとどまらない幅広い分野における成長力・競争力の強化、震災からの復興、再生にも応用

震災からの復興、再生

○放射線から命を守る

中性子技術

- ・ゲル状中性子遮へい材のガンマ線遮蔽への応用
- ・ホウ素入り中性子遮蔽コンクリート



○放射線に立ち向かう

遠隔保守技術

- ・耐放射線性ロボット技術への応用
- ・巨大重量物遠隔操作耐放射線ロボット
- ・高温・高放射線下で長時間の観測ができる光学式ペリスコープ



○生活インフラの安全性向上をサポート

遠隔保守技術

- ・配管内から作業を行う溶接・切断ロボットによる配管保守
- ・免振要素のリアルタイムモニタ
- ・高耐熱材料
- ・低放射化材料
- ・異種材料接合



超耐熱構造材料

計測技術

材料技術



溶接・切断ロボット

グリーンイノベーション

○蓄電技術へ応用

超伝導技術

- ・電力貯蔵(SMES)の大型化



リチウム回収技術

- ・電気自動車用及び蓄電池用大型リチウムイオン電池のリサイクル技術の確立



○高効率輸送機器の研究開発をサポート

超伝導技術

- ・リニアモーターカーの高速化

○エネルギー利用の高効率化を支援

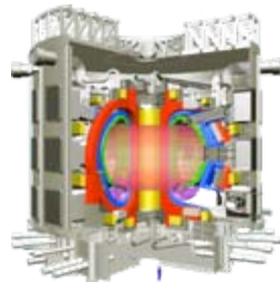
粒子ビーム技術

- ・低損失/長距離伝送可能な直流送電の技術開発
- ・核融合用大電力変換技術の応用

核融合研究開発

ITER計画

幅広いアプローチ活動



国際核融合エネルギー研究センター

材料照射施設設計



衛星・トカマク

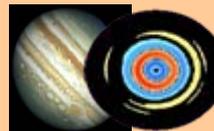
高周波技術

- ・環境破壊物質無害化処理への応用



シミュレーション技術

- ・木星の渦とプラズマ帯状流のシミュレーション



ライフイノベーション

○早期診断の技術を支える

超伝導技術

- ・医療診断用MRIの高性能化



○放射線医療技術をサポート

加速器技術

- ・重イオンビームによるガン治療
- ・ポジトロン断層法によるガン診断
- ・ホウ素中性子捕捉療法への応用
- ・医療用RI製造



○新しい医療技術などへ応用

遠隔保守技術

- ・ロボット手術機器、生活支援ロボットなどへの応用

遠隔実験技術

- ・遠隔診断、遠隔治療技術への応用

核融合研究開発の推進のあり方に関する 検討の方向性について

【今後の核融合研究開発の推進方策(平成17年10月)における主要な指摘】

1. トカマク方式に関して原型炉建設に必要な研究開発を総合的に推進するとともに、ヘリカル方式及びレーザー方式について、核融合炉の選択肢を拡げる観点から学術研究に重点を置いて研究を推進。
2. 多様かつ魅力ある研究の機会を提供することにより、優れた人材を育成するとともに、核融合基盤技術の持続的な発展(先端技術の他分野への活用も含む)を図る。
3. 国際貢献や開発リスクおよびコスト低減の観点から、積極的に国際協力を推進する。

【検討の方向性】

1. 原型炉概念の構築と設計作業に向けた技術的な課題については、科学技術・学術審議会核融合研究作業部会において検討を進める予定。
2. 人材育成・核融合基盤技術の発展(産業界との連携を含む)については、ITER計画・BA活動や学術研究の動向を考慮しつつ、産学官の関係者の参画を下に幅広い観点で検討。
3. 国際協力については、IAEAなどの多国間協力や日米などの二国間協力の枠組みを最大限活用し、着実に実施。

參考資料

1. ITER·BA

ITER（国際熱核融合実験炉）計画等の実施

平成24年度予算額	: 9,335百万円
（うち復興特別会計	: 4,189百万円）
（平成23年度当初予算額	: 11,395百万円）
（平成23年度4次補正予算額	: 12,182百万円）

○エネルギー問題と地球環境問題を同時に解決する可能性を有し、将来のエネルギー源として期待されている、人類究極のエネルギーである核融合エネルギーの実現を目指して、国際協定（国会承認条約）に基づき、国際熱核融合実験炉（ITER）計画および幅広いアプローチ（BA）活動を実施

〔 ITER計画 : 核融合実験炉の建設・運転を通じて、科学的・技術的実現可能性を実証
幅広いアプローチ活動 : ITER計画と並行して補完的に取り組む先進的核融合研究開発

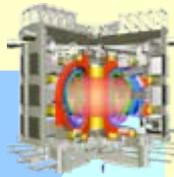
ITER計画

- 協定：2007年10月24日発効
（建設期間中は脱退することはできない）
- 参加極：日、欧、米、露、中、韓、印
- 建設地：フランス・カダラッシュ
- 核融合熱出力：50万kW（発電実証はしない）
- ITER機構長：本島修氏（2010年7月28日就任）
- 各極の費用分担（建設期）：
欧州、**日本**、米国、韓国、中国、ロシア、インド
45.5% **9.1%** 9.1% 9.1% 9.1% 9.1% 9.1%
- 計画：35年間
運転開始：2020年（予定）
核融合反応：2027年（予定）

平成24年度予算額：51億円（54億円）

※平成23年度4次補正予算額：122億円

- ITER機構の分担金 23億円（26億円）
- ITER機器の製作や試験、国内機関の活動、人員派遣等 28億円（28億円）



幅広いアプローチ（BA）活動

- 協定：2007年6月1日発効
- 実施極：日、欧
- 実施地：青森県六ヶ所村、茨城県那珂市
- 総経費：920億円で半額は欧州が支出
（2005年5月時点で換算）
- 計画：10年間
- 実施プロジェクト
 - ①国際核融合エネルギー研究センター
 - ・原型炉設計・研究開発調整センター
 - ・ITER遠隔実験センター
 - ・核融合計算機シミュレーションセンター
 - ②国際核融合材料照射施設の工学実証・工学設計活動
 - ③サテライト・トカマク計画（予備実験等の実施によるITER支援）

平成24年度予算額：42億円（60億円）

- 国際核融合エネルギー研究センター 12億円（16億円）
- 国際核融合材料照射施設の工学実証・工学設計活動 5億円（8億円）
- サテライト・トカマク計画 25億円（35億円）

ITERの概要

●意義

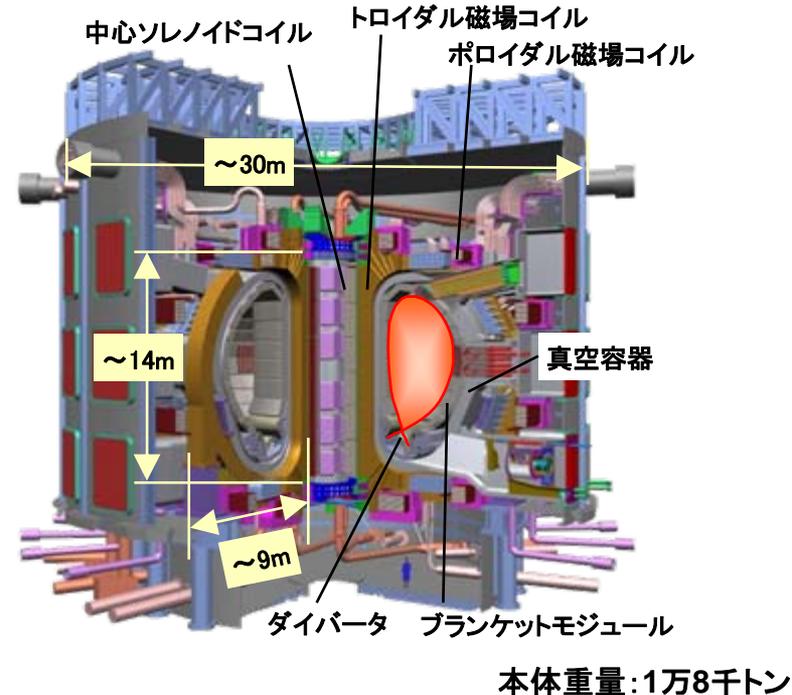
◇核融合エネルギーの実現の見通しを得る。

●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。 等

ITER本体概要図

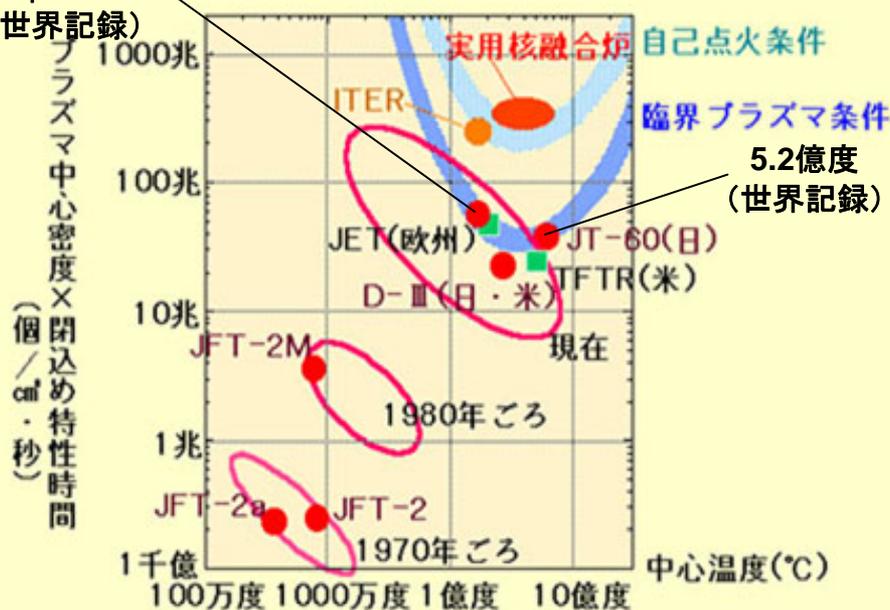


主要パラメータ

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

核融合実験炉の目標

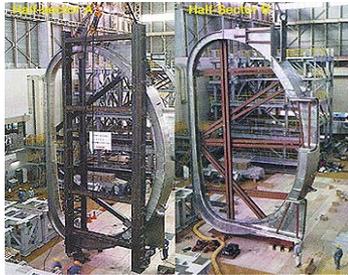
エネルギー増倍率
1.25(世界記録)



ITER計画において我が国が分担する装置・機器



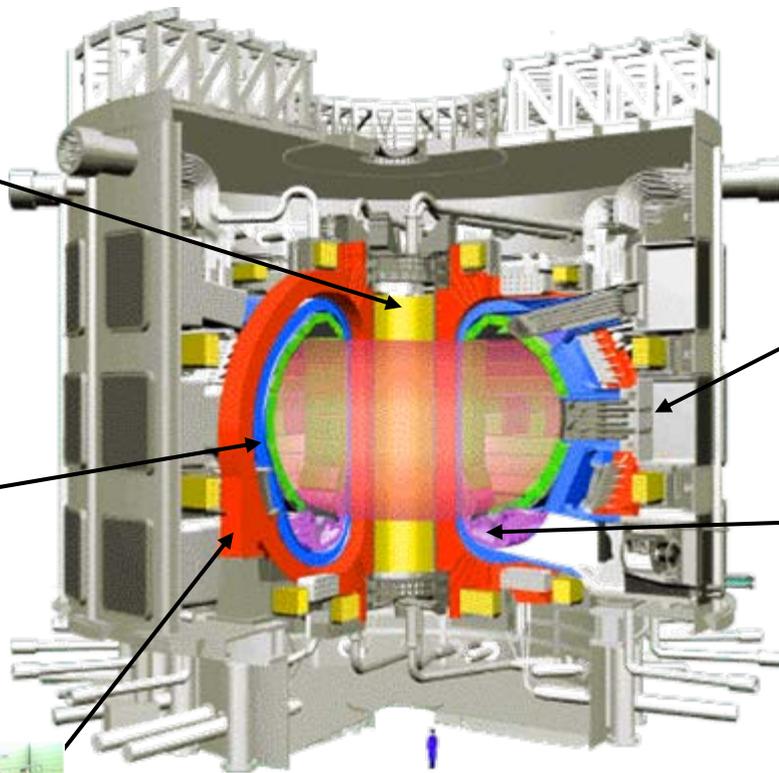
CSコイル (日,米)



真空容器 (欧,韓,印,露)



TFコイル
(日,欧,米,露,中,韓)



遠隔保守機器
(日,欧)



ダイバータ
(日,欧,露)

※ITERの機器については、各極が物納し、ITER機構はその組立を行う

装置組立 (ITER機構)

建屋 (欧)

ブランケット
(欧,露,中,韓)

トリチウムプラント
(日,欧,米,韓)

PFコイル
(欧,露,中)

冷却・冷凍系
(欧,米,印)

真空排気
(欧,米)

加熱装置
(日,欧,米,露,印)

計測装置
(日,欧,米,露,中,韓,印)

超伝導コイルの製作の流れ

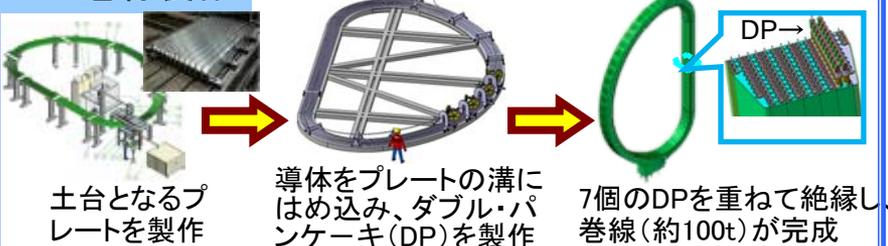
全体スケジュールに沿って、6極がそれぞれ役割を分担して協力し、19個の超伝導コイルを製作

○製作工程

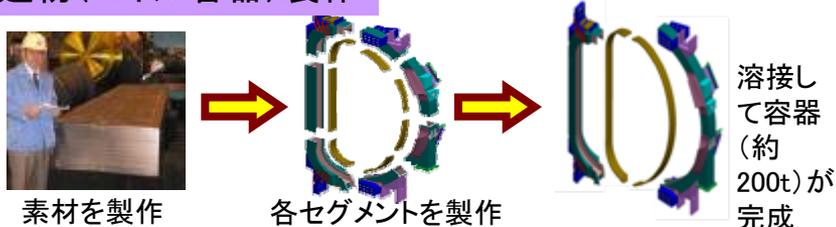
超伝導導体製作



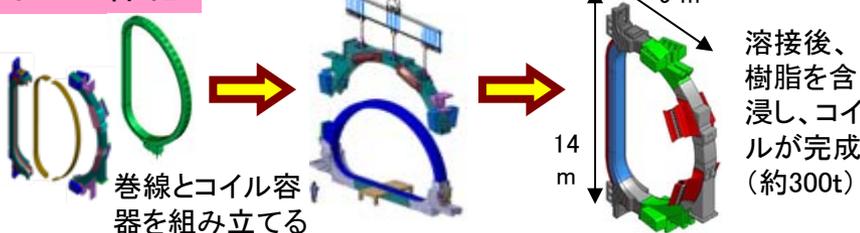
コイル巻線製作



構造物(コイル容器)製作



コイル一体化



○調達分担

超伝導導体製作



63導体

70導体

日本
9個製作

欧州
10個製作

構造物製作

日本
19個製作

日本が製作した構造物10個をEUへ納入

日本
9個製作

欧州
10個製作

コイル一体化

実機製作開始



ITERサイト(仏)納入
2015年5月～2018年3月



ITERベースライン合意からの主な動き

- ・ 2010年7月の臨時ITER理事会にて、ベースライン4文書を承認。
 - 全体事業スケジュール(OPS): 2019年11月(から2021年7月までの間)に初プラズマ達成。2027年3月に核融合反応実現。
 - 全体事業コスト(OPC): 建設費用4,700kIUAを上限値とする。
 - 事業仕様(PS)、事業計画及び資源評価(PPRE)
- ・ スケジュールについて、昨年、震災影響等のスケジュール遅れの緩和の方策を特別作業グループ(STG)で検討。初プラズマ達成が1年遅れの2020年11月となったが、核融合反応実現は2027年を維持との作業スケジュールを策定。昨年11月の理事会で、本スケジュールがOPSの範囲内であることを確認。
- ・ コストについて、スケジュールと整合をとった上でコストを上限値内に納めるために、様々なコスト削減の提案がなされた。(例:一部機器の調達を運転期に先延ばし(デファール)することで、建設期の費用を削減。)

欧米のITER予算状況

欧州:

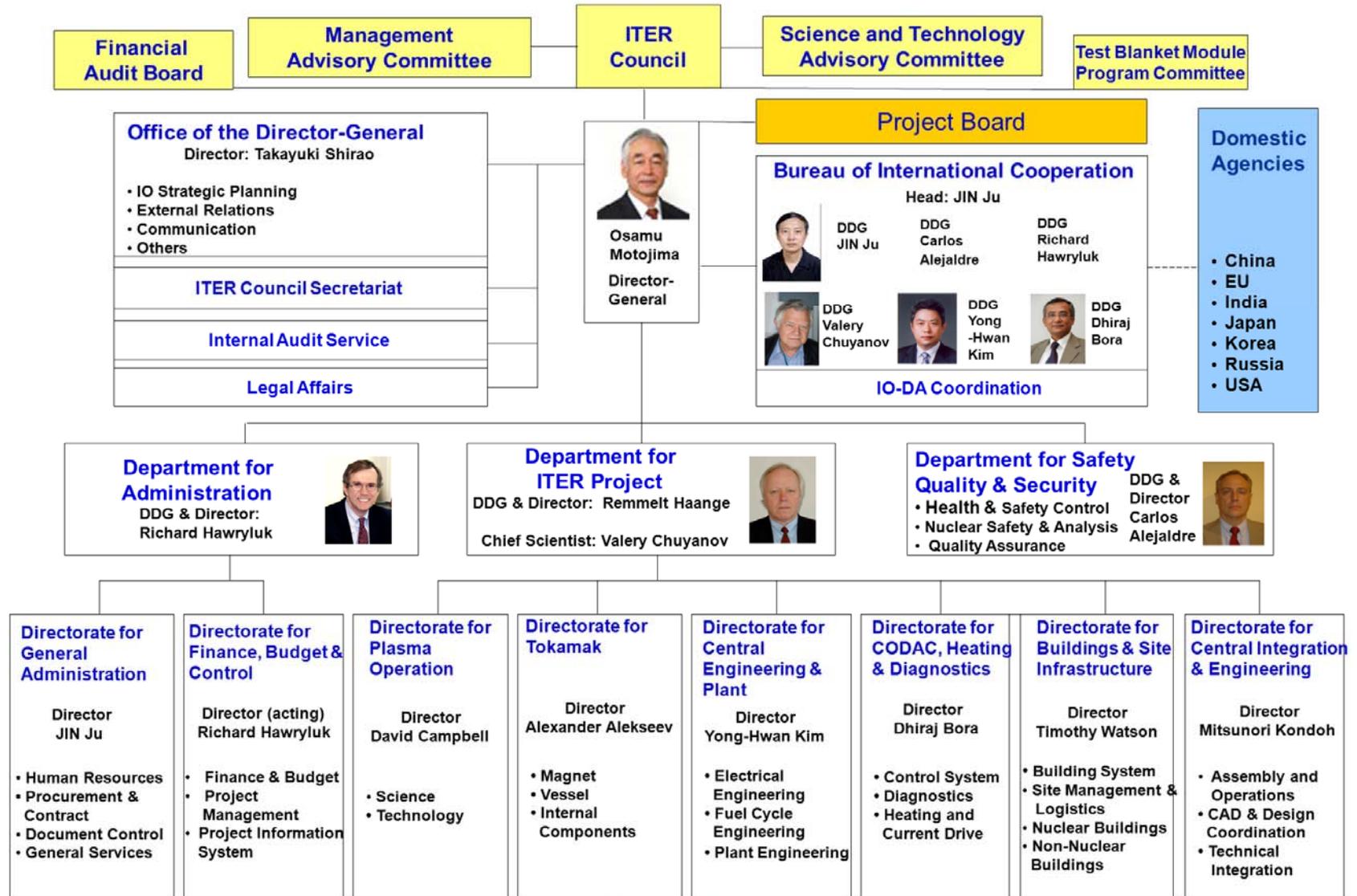
- 2012～2013年に不足している13億ユーロの追加予算の確保が欧州の当面の課題となっていたが、昨年末に決着。
- 2014年からの予算については、今後引き続き欧州内で交渉。

米国:

- 2011年度予算は0.8億ドル、2012年度は1.05億ドルを確保。
- 2月13日に発表された2013年度予算案では、1.5億ドルを計上。

ITER機構の体制

- ・2011年10月末現在、全職員数469名。〈うち専門職員298名、支援職員171名〉
 (日本人専門職員数は28名、支援職員は7名)



ITER建設スケジュール

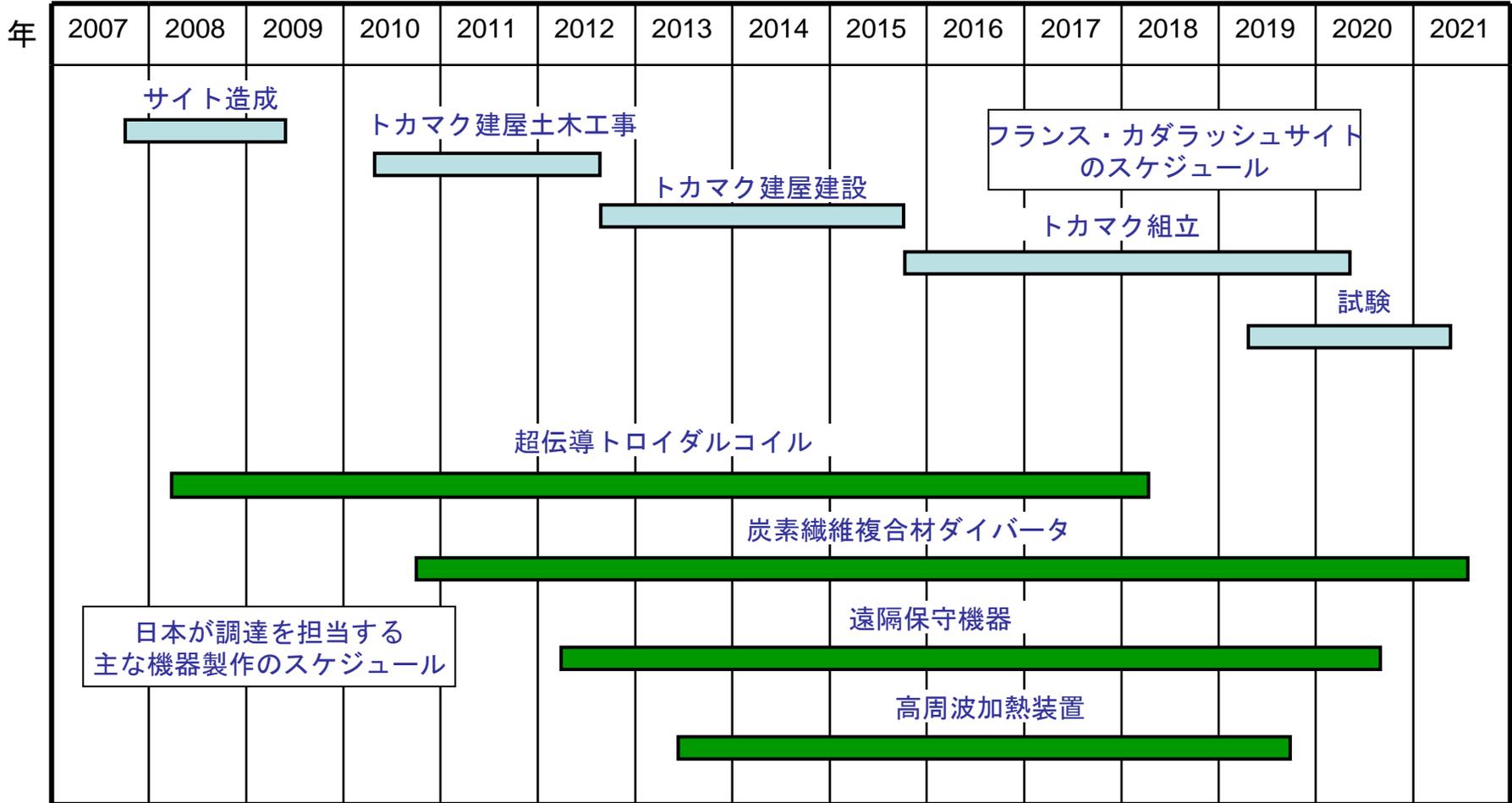
2007年10月24日

ITER協定発効

ITER機構設立 建設認可

トカマク組立開始

トカマク主要部 初プラズマ
組立完了▼ ▼



ITERサイトの建設状況等

- 整地作業は2007年1月に開始し、2009年5月に幅400m長さ1kmのプラットフォームが完成。2010年に建屋の建設を開始し、順調に進捗。
- 建設に必要な機器の7割を超える部分について、すでにITER機構と各極とで調達取決を締結。

ITER機構本部(今年夏に完成予定)



ポロイダル磁場コイル組立建屋(2012年2月に完成)



ITERチーム(500名弱の職員が7極から集結)

トカマク本体建屋(基礎工事終了、免震装置敷設中)



ITER計画に関する我が国の進捗状況

- 超伝導コイル導体の製作やコイルの試作、加熱装置の技術開発など、分担機器の調達に必要な活動を確実に進めてきたところ
- 平成24年度は建設に必要な機器の本格的な製作段階に移行

超伝導トロイダルコイル

- 世界に先駆けて平成20年に導体の製作を開始
(これまでに我が国分担分の70%以上を製作済み)



(上) 導体断面図
(左) 完成した導体

- 平成22年には実規模試作を開始し、実機製作に必要な技術的知見を確立



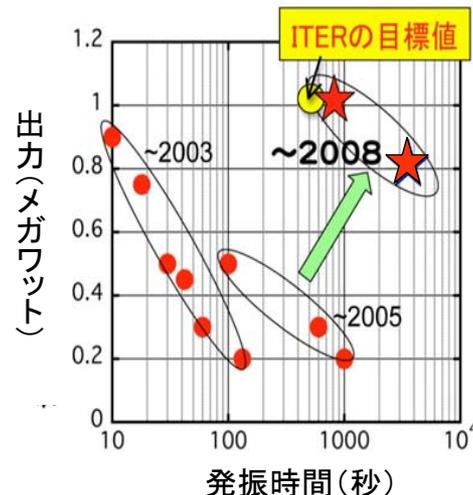
導体を巻いた巻線の試作



コイルケース部品の試作

加熱装置

- 高周波加熱装置部品の高性能化に取り組み、世界で唯一、ITERに求められる高出力と持続性を実現



高周波加熱装置

- 中性粒子入射加熱装置部品の改良に取り組み、ITERに求められる絶縁性能を実証するとともに、高エネルギー(約1MeV)の負イオンビームの加速を達成



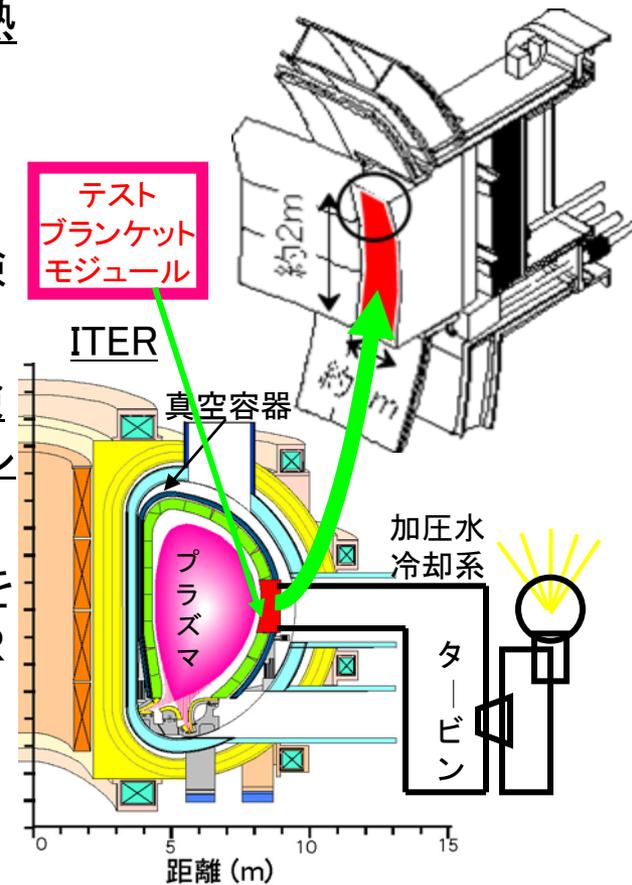
中性粒子入射加熱装置 4

TBM試験計画について

- ・核融合ブランケット: 将来の核融合実用炉で、放射線遮蔽、熱の取り出し、トリチウム燃料の増殖を行う重要機器として想定。
- ・平成12年8月、核融合会議
「核融合炉ブランケットの研究開発の進め方」
原型炉の前段階である実験炉にブランケットのモジュール試験体を設置し、・・・試験を行うことが不可欠である。
- ・ITERを用いて、各極独自に開発する核融合ブランケットの試験モジュールの実証試験を行うべく、テストブランケットモジュール(TBM)試験計画を第3回ITER理事会で承認。
- ・日本では、原子力機構を中心に固体増殖水冷却方式の検討を進めている。2012年度より概念設計を開始し、2021年ITER据付を目指す。

(各極の状況)

- ・現在のTBM持込予定極: 欧州(2体)、中国、インド、日本。
- ・韓国は1月に極としてTBM持込宣言し、次回TBM計画委員会での承認を目指す。
- ・米国は大学等で検討中であるが、極としてはTBM持込の意思表示なし。
- ・ロシアはTBM持込の予定なし。



- 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。

幅広いアプローチ(BA)活動

平成24年度予算案：42億円
(平成23年度予算額：60億円)

幅広いアプローチ(BA)活動

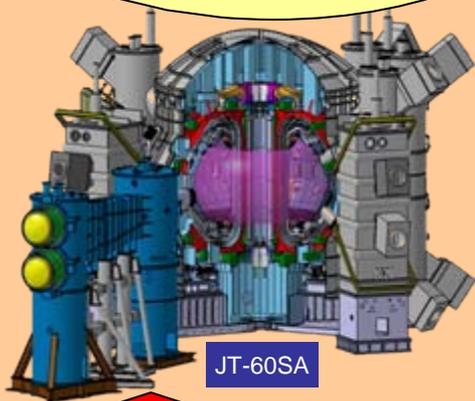
ITER計画と並行して補完的に取り組む先進的核融合研究開発



【茨城】

サテライト・トカマク計画

ITER予備実験を行い、ITERでの効率的な運転に貢献。原型炉建設に求められる安全性・信頼性・経済性のデータを獲得。



JT-60SA

実施極：日、欧

協定：平成19年6月1日発効(国会承認条約)

実施地：青森県六ヶ所村、茨城県那珂市

総経費：920億円で半額は欧州が支出(H17年5月時点換算)

計画：10年間

【青森】

国際核融合エネルギー研究センター事業(IFERC)

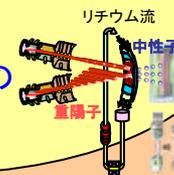
原型炉の概念設計・研究開発、ITER等の実験の遠隔操作、シミュレーション研究など

シミュレーション研究

原型炉R&D

国際核融合材料照射施設の工学実証及び工学設計活動(IFMIF/EVEDA)

原型炉に必要な高強度材料の開発を行う施設の設計・建設への取組

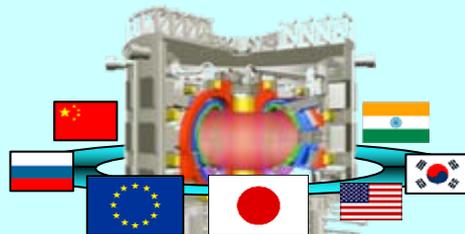


超伝導化

臨界プラズマ試験装置(JT-60)



国際熱核融合実験炉(ITER)



原型炉



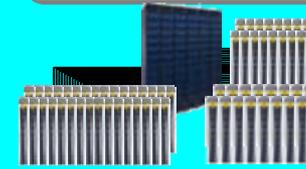
定常発電及び経済性の実証

国際核融合エネルギー研究センター(青森県六ヶ所村)

平成19年にサイトの整備を開始し、平成22年にすべての建屋が完成

計算機・遠隔実験棟

核融合計算機
(IFERC事業)



高性能計算機を用いたシミュレーション

ITER 遠隔実験
(IFERC事業)



実験条件設定



データ収集・解析

- ・核燃焼プラズマの特性解明
- ・六ヶ所からITER遠隔実験を実施

IFMIF/EVEDA 開発試験棟

国際核融合材料照射施設
工学実証・工学設計活動



- ・原型加速器の工学実証等
- ・核融合材料照射施設の工学設計

原型炉R&D棟

原型炉設計・R&D調整
(IFERC事業)



- ・原型炉国際設計チームによる概念検討
- ・核融合材料等の原型炉日欧共同R&D

BA活動スケジュール

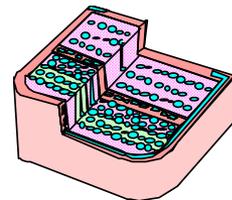
年	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29	
六ヶ所サイト整備及び建屋の建設	サイト整備、建屋建設 											
国際核融合エネルギー研究センター事業(IFERC) <青森県六ヶ所村>	<計算機シミュレーション> 機種選定/ベンチマークソフト選定 ▼ 計算機の運転開始 											
	<原型炉設計研究開発調整> ワークショップ・技術会合 ▼ 原型炉研究開発等の本格化 											
	<ITER遠隔実験> システム設計、ITERとの整合性検討、整備 ▼ 試運転 											
国際核融合材料照射施設の工学実証及び工学設計活動 (IFMIF/EVEDA) <青森県六ヶ所村>					▼ 機器搬入開始 				▼ 統合試験開始 			
サテライト・トカマク計画事業 <茨城県那珂市>					JT-60SAの建設 				▲ 組立開始 			
											▲ JT-60SAの運転 	

▲2007年6月1日BA協定発効

IFERC事業(青森県六ヶ所村)

○六ヶ所村の国際核融合エネルギーセンターにおいて、以下の研究活動を実施する。

- 原型炉概念設計に向けた研究活動
原型炉の共通概念を確立すべく、安全性等に関する検討を行う。
- 核融合計算機シミュレーションセンター
プラズマ挙動や材料開発等に関連するシミュレーションを行う。
- ITER遠隔実験センター
ITERの実験条件の提案や実験データの収集、解析等を行う。
- 原型炉R&D(研究開発)活動
原型炉に関する以下の5つの研究開発を行う。
 - SiC/SiC複合材
 - トリチウム技術
 - 原型炉ブランケット用材料工学
 - 原型炉ブランケット用先進中性子増倍材
 - 原型炉ブランケット用先進増殖材



原型炉ブランケット

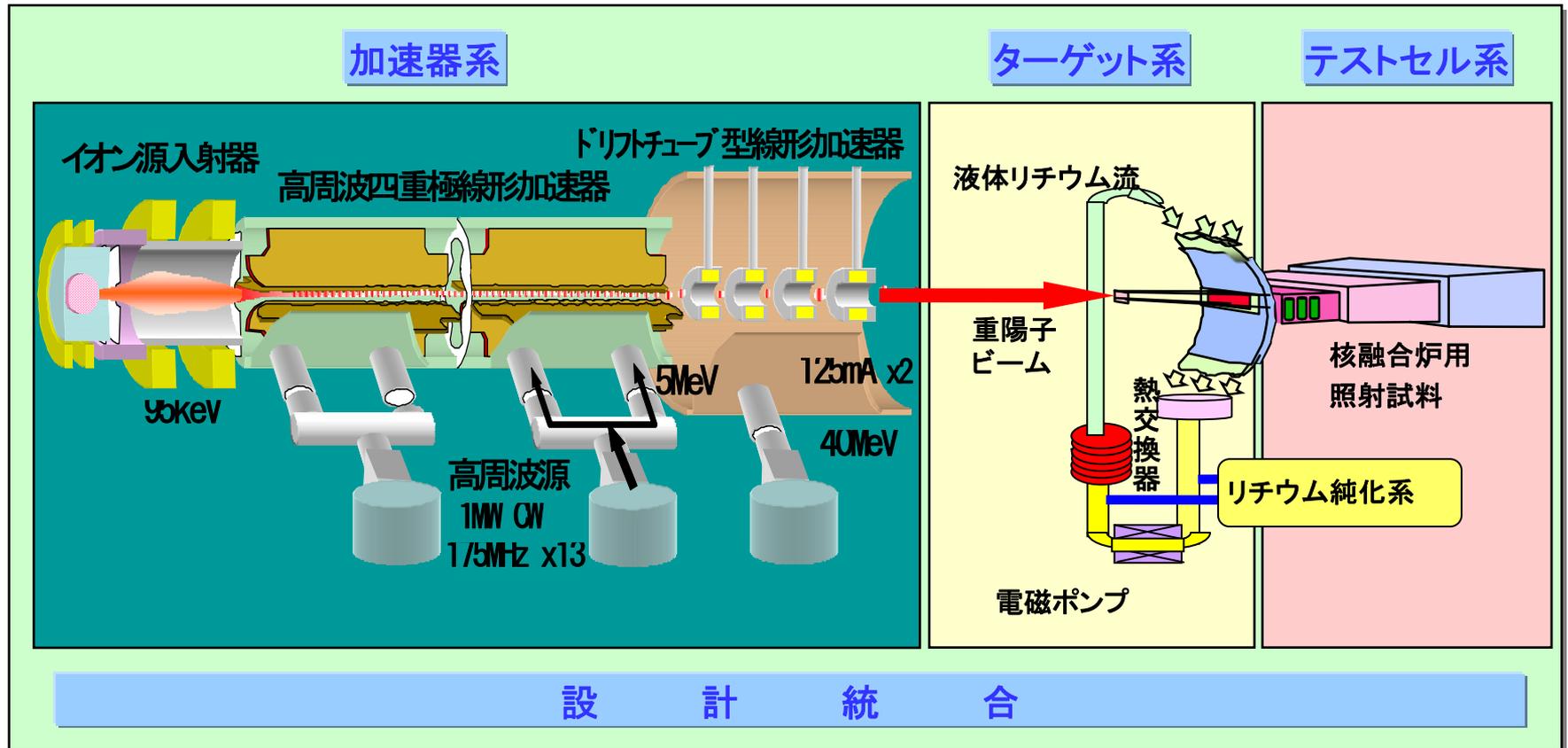


○欧州が調達した高性能計算機の本格運用を開始。

○日欧共同の原型炉設計作業を開始するとともに、5つのR&D活動も本格化

IFMIF/EVEDA事業(青森県六ヶ所村、茨城県大洗町)

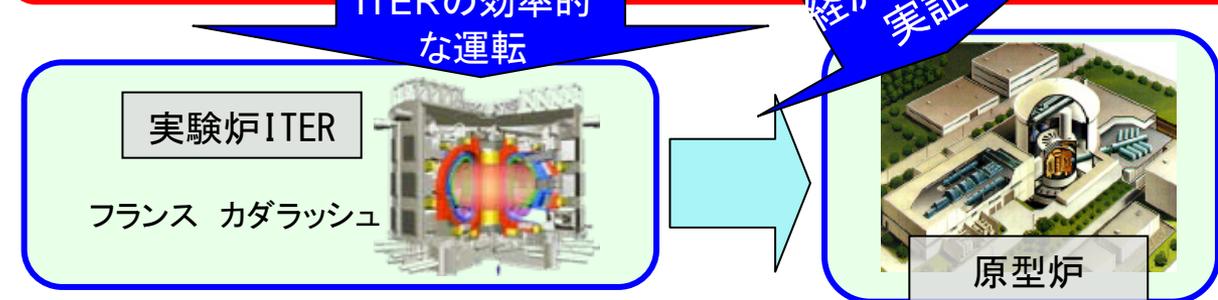
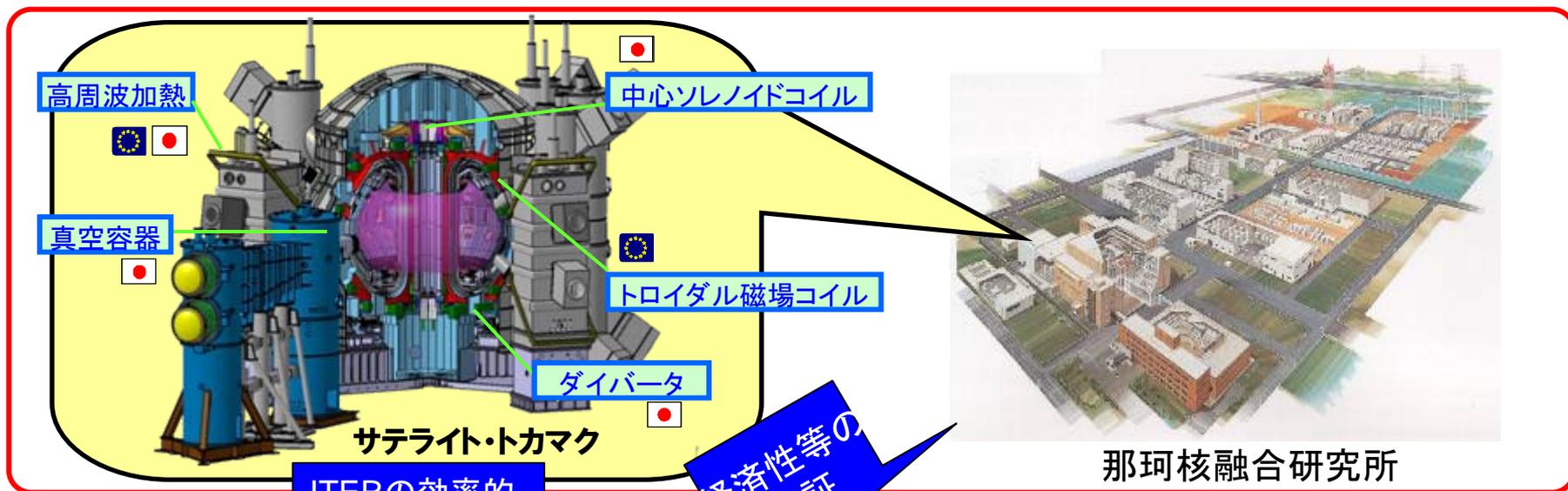
- 国際核融合材料照射施設(IFMIF)^[注]の建設判断に必要な主要機器の工学実証(原型コンポーネントの製作プロセスの開発とIFMIFの運転上クリティカルとなる長時間耐久性などの性能実証)と工学設計を行う。 【注】原型炉の候補材料に中性子を照射し、材料の試験を行うための施設



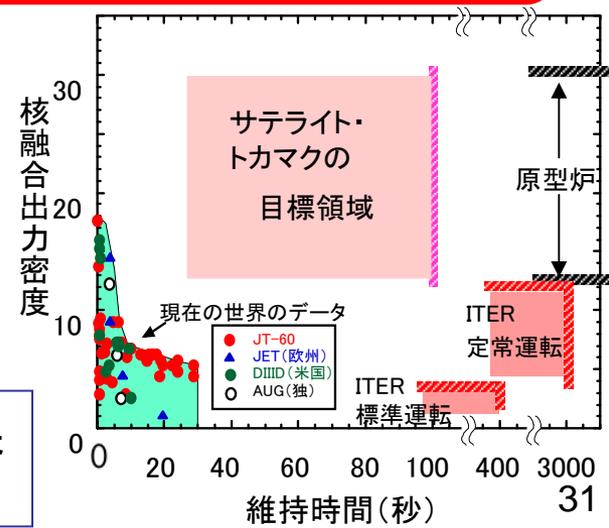
- ターゲット系のリチウムループが完成するとともに、欧州で六ヶ所に搬入予定の加速器からのイオンビームの引き出しに成功するなど、各活動は順調に進捗(ただし、リチウムループは震災で被災しており、復旧後に試験を開始する予定)

サテライト・トカマク事業(茨城県那珂市)

- 超伝導トカマク装置(サテライト・トカマク)を建設し、ITERの運転前に予備的実験を行ってITERでの効率的な運転に資するとともに、原型炉を建設する場合に必要な安全性、信頼性、経済性の実証のため、様々な条件下で実験を実施する。



※サテライト・トカマクではITERより高い、原型炉レベルの出力密度の実現が可能(右図)



- 真空容器の最初のパーツが完成するなど、機器製作が進展(今年度に組立てを開始する予定)

臨界プラズマ試験装置 (JT-60) の経緯・成果

経緯

- 1976年 建設開始
- 1985年 運転開始
- 1990年 重水素運転開始
- 1996年 臨界プラズマ条件達成
- 2008年 超伝導化改修のため、運転停止

成果

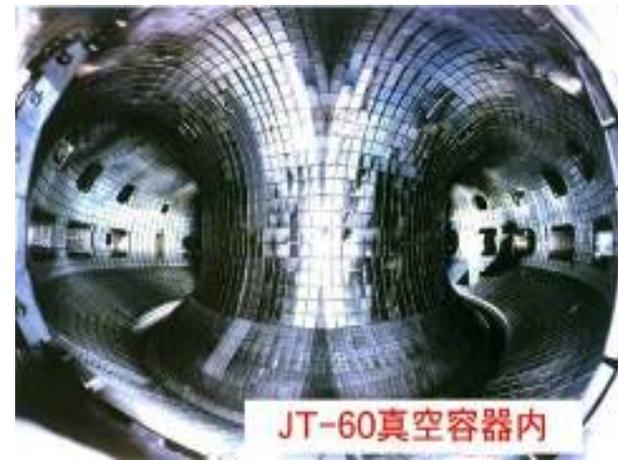
- 1996(平成8)年 臨界プラズマ条件達成、イオン温度5.2億度(世界最高値)
- 1998(平成10)年 エネルギー増倍率1.25(世界最高値)
- 2005(平成17)年 高自発電流割合(75%)の長時間維持(7.4秒間)(世界最長)
- 2006(平成18)年 負イオンNBIの入射エネルギーで6300万ジュール達成(世界最高)
- 2007(平成19)年 ITERの高出力密度化をもたらす高圧カプラズマの安定維持(28秒間)(世界最長)

現在、サテライトトカマクJT-60SAへの改修中



臨界プラズマ実験装置JT-60

装置直径:約15m、高さ:13m
プラズマ大半径:3.4m、小半径:1m
プラズマ電流: 3MA
常電導型、磁場強度:4T



JT-60真空容器内

世界のトカマク型核融合の研究開発の状況について

諸外国の動向

- ・EUは現在のJET計画において、ITER設計の確定及びITER運転の準備に焦点を当てており、ITER-like-wall 計画(2011~2012)、ITER 相当条件に達するプラズマシナリオの開発(2013)、DTを用いた統合実験(2014-2015)を予定。
- ・米国においては、世界初の大型トカマク装置TFTR(1982-1997)により、多くの成果を得た後、DIII-DやAlcator C-MODなどの中型装置を駆使して、トカマク方式の先進的な研究開発を推進。
- ・中国においても、将来のエネルギー消費量の増大への対応として核融合研究開発を国家を挙げて精力的に推進。
- ・韓国では、第2次核融合エネルギー開発振興基本計画(2012年~2016年の5年計画)を策定。今後、KSTARとITERの活用による原型炉に向けた核融合基盤技術の研究開発を本格的に推進の予定。

国名	研究施設名	装置名	仕様	備考
欧州	英国カラム核融合エネルギーセンター	JET	主半径2.96m 常伝導、磁場強度3.45T	1983年に運転開始。近年はITER運転支援に焦点。2011年からITER-like-wall計画実施中。
米国	ジェネラルアトミックス社	DIII-D	主半径1.67m 常伝導、磁場強度2.2T	先進トカマク運転の開発研究が進められている。
中国	中国科学院プラズマ物理研究所	EAST	主半径1.7m 超伝導、磁場強度3.5T	2006年9月ファーストプラズマ。トカマク型では世界で初めて全てのコイルを超伝導化。
韓国	韓国国立核融合研究所	KSTAR	主半径1.8m 超伝導、磁場強度3.5T	2007年に完成。2010年11月にHモード運転を達成。

EU(JET)



米国(DIII-D)



中国(EAST)



韓国(KSTAR)



2. 學術研究

LHD計画の経緯・成果・今後

経緯

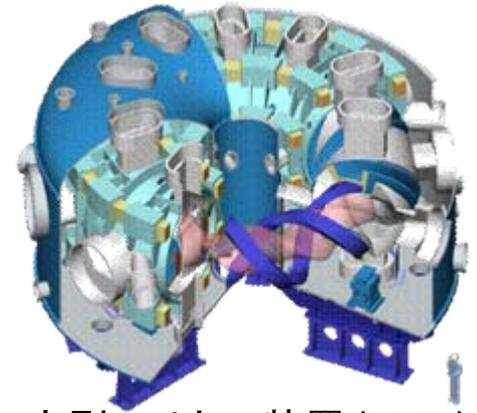
- ・昭和61年2月 文部省学術審議会の核融合部会「大学における今後の核融合研究について」報告
 - …大型ヘリカル装置建設(岐阜県土岐市に建設)、推進母体として新たな大学共同利用機関の設立
- ・昭和63年3月 核融合研究所(仮称)の組織及び次期大型ヘリカル装置計画の概要策定(重水素実験実施を当初計画に)
- ・平成元年 5月 核融合科学研究所設立(名古屋市内)
- ・平成 9年12月 大型ヘリカル装置完成。土岐市へ移転
- ・平成10年 4月 プラズマ実験を開始。

成果

- ・約1時間の長時間プラズマ保持(世界最高値)(平成17年度)
- ・プラズマ密度1,200兆個/ccを達成(世界最高値)(平成20年度)
- ・8,000万度を超えるイオン温度を達成(平成23年度)

今後

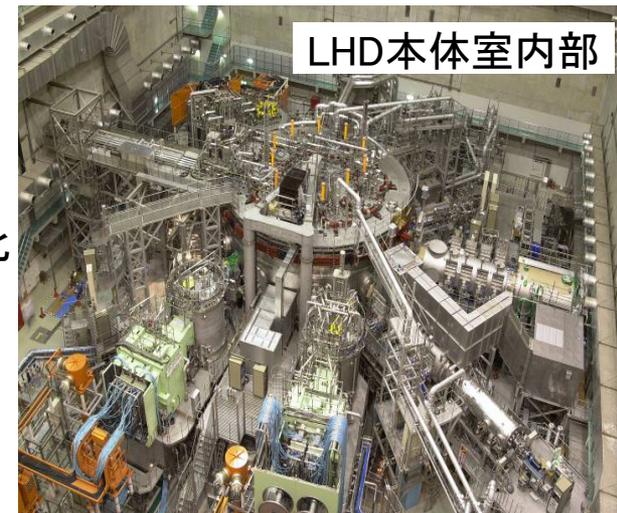
- ・さらにプラズマを高性能化し、環状プラズマの総合的理解や体系化を図るため、重水素実験の実施を目指す。
 - 重水素実験の実施に関わる協定を岐阜県及び地元3市(土岐市、多治見市、瑞浪市)と締結すべく協議中。



大型ヘリカル装置(LHD)

世界最大の定常型実験装置

プラズマ直径	約8m
超伝導磁石	
磁場強度	約3テスラ



世界のヘリカル型核融合の研究開発の状況について

諸外国の動向

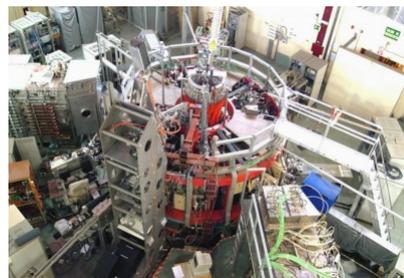
- ・ドイツでは、ITER計画に参画するとともに、国家プロジェクトとしてマックスプランク・プラズマ物理研究所においてベンデルシュタイン(W7-X)を2014年半ばの完成を目指し、建設中で、2015年から実験開始の予定。LHDと並んでヘリカル型核融合炉実現に向けた1億度級の高性能プラズマの定常実証が目的。
- ・スペイン、オーストラリア、米国、日本(ヘリオトロンJ,京大)では数千万度級のヘリカル型プラズマを研究する中型装置が稼働中。LHDを中心として、世界各国の実験からのデータベースの集積・充実、予測コードの妥当性確認を国際協力として進めており、その標準化を我が国が主導。また、ITERの性能予測に極めて重要な課題に対し、ヘリカル型での知見がその解決に活用されつつある。
- ・現在、原型炉に向けた検討が欧米中で進められており、IAEAにおいても国際協力を促進するために原型炉計画ワークショップを開始することとなった。これらのいずれの活動においても、定常トカマク型炉、パルストカマク型炉と並んでヘリカル型炉が選択肢とされている。

国名	研究施設名	装置名	仕様	備考
ドイツ	マックスプランク・プラズマ物理研究所	ベンデルシュタイン7-X装置(W7-X)	プラズマ直径11メートル 超伝導磁石、磁場強度2.5テスラ	2015年に稼働予定。1億度級の高性能プラズマの定常運転実証を目的とする。
スペイン	エネルギー環境科学技術センター	TJ-II装置	プラズマ直径約3メートル 磁場強度1テスラ	W7-Xの実験開始までは欧州、露、ウクライナによる研究協力のプラットフォーム。
オーストラリア	オーストラリア国立大学	H-1NFヘリアック装置	プラズマ直径約2メートル 磁場強度0.5テスラ	計測を充実させるなど、基礎物理と教育に重点化。
米国	ウイスコンシン大学	HSX装置	プラズマ直径約2.4メートル 磁場強度1.4テスラ	対称性を追求した独創的な磁場配位により、先進的な成果をあげている。

ドイツ(W7-X)



スペイン(TJ-II)



オーストラリア
(H-1NFヘリアック)



米国(HSX)



レーザー核融合研究の経緯・成果・今後

経緯

- ・昭和47年 大阪大学工学部附属レーザー工学研究施設発足
(発足当初から我が国のレーザー核融合研究の拠点として同研究に取り組。)
- ・昭和58年 激光X II号完成
- ・平成16年 レーザーエネルギー学研究中心へ改組
- ・平成18年 全国共同利用施設化
- ・平成20年 LFEXレーザー完成(平成15年から建設を開始)
- ・平成21年 FIREX-I計画(爆縮レーザー(激光X II号)と加熱レーザー(LFEX)を用いた高速点火方式(※)の原理を実証する計画)圧縮加熱統合実験を開始
目標: 核融合点火に必要な超高温、超高密度条件の達成
※高速点火方式: 米NIF等の中心点火方式に比べ、10分の1のエネルギーで点火が可能と見込まれる方式。

成果

- ・高速点火方式の有効性を実証(世界初)(平成12年)
- ・LFEXペタワットレーザーを完成(世界最大)(平成20年)

今後

- 平成24年度にLFEXレーザーの出力ビーム数を現在の2ビームから4ビームに増強し、FIREX-I計画の当初目標である加熱温度5000万度以上を目指す。
- その後、FIREX-I計画の成果を核融合研究作業部会等において評価し、次段階へ移行する否かを判断の予定

激光XII	12ビーム／0.53 μ m
	10kJ / ns
LFEX	4ビーム／1.05 μ m
	10kJ / ps



LFEX



激光X II号

世界のレーザー核融合の開発状況について

諸外国の動向

米・仏・中は国家プロジェクトとしてレーザー核融合を推進。

米国はLLNLを中心としてLLE(ロチェスター大学レーザーエネルギー学研究所)に加えロスアラモス研究所、General Atomics 社など産学官が連携して2009年完成のNIFでの点火実験実施中。

フランスは2015年にCEA(フランス原子力・代替エネルギー庁)が主体となってLMJを完成させ、点火実証を予定。欧州での民生用のレーザー核融合施設を標榜するHiPERは現在計画段階。

中国は四川省綿陽に100kJ級の間接照射用レーザー施設「神光III」を2013年の完成目指し建設中。

国名	研究施設名	装置名	仕様	備考
米 国	ローレンスリバモア国立研究所 (LLNL)	国立点火施設 (NIF)	192ビーム / O. 35 μ m 1.8MJ / ns	2009年完成。1-2年内の点火実証を目指す。間接照射。
フランス	CEA研究所(ポルドー)	レーザーメガジュール (LMJ)	160ビーム / O. 35 μ m 1.5MJ / ns	2015年完成予定。NIFとほぼ同機能。
中 国	レーザー核融合研究所(綿陽)	神光III	48ビーム / O. 35 μ m 100kJ / ns	2013年完成予定。間接照射。
E U	(計画段階: 11カ国が参画)	HiPER	32-48ビーム / O. 35 μ m 100-200kJ / ns	最終的に発電を目指す。直接/間接、中心点火/高速点火の選択は検討作業中。3B€級。

