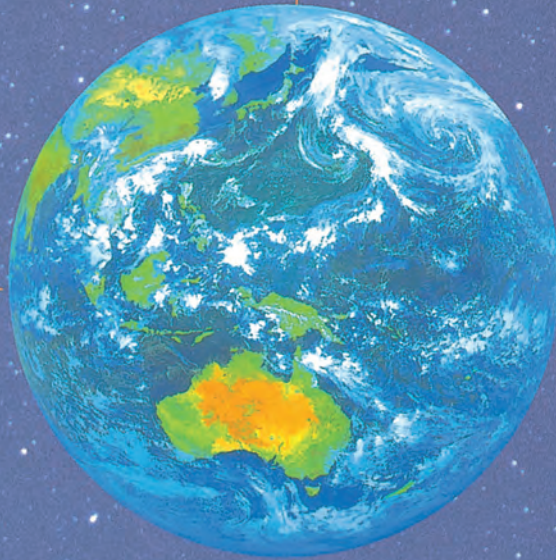


FUSION

地球の未来エネルギー…核融合

核融合エネルギー研究開発部門
那珂核融合研究所
六ヶ所核融合研究所



国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構

核融合 エネルギー への期待

FUSION—核融合とは、軽い原子核同士が衝突して重い原子核へと〈融合〉することです。星や太陽が輝き続けるのも、実はこの核融合エネルギーによるものです。

このエネルギーは、地球上でも発生させることができます。水素の仲間の重水素と、三重水素の原子核を高温で融合させるのです。

この核融合エネルギーによって、われわれ人類は枯渇することのないエネルギー資源を手に入れることができるのです。

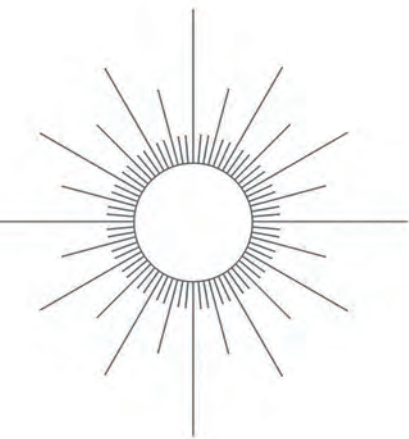
豊富な燃料資源

核融合の燃料となる重水素は、海水1m³に約33g存在します。三重水素はリチウムを核融合炉の中で反応させて作ります。このリチウムは鉱石として存在するほか、海水1m³に約0.2gと豊富に存在しているので、燃料は無尽蔵であると考えられます。

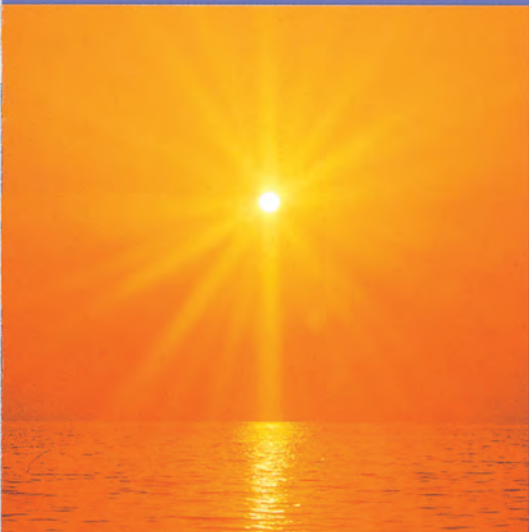
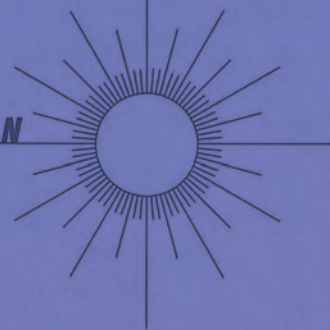
F 海の水から… U 安全に… S

環境、安全性に優れたエネルギー

核融合の燃えかすは、ヘリウムです。この反応からは、地球環境の悪化の原因となる二酸化炭素や窒素酸化物などは発生しません。また、ガスバーナーのように、燃料の元栓を締めて反応を直ちに止めることができます。



F U S I O N



高いエネルギー発生率

核融合は、重水素と三重水素の燃料1gで
石油8トンに相当するエネルギーを発生することができます。
100万kWの発電所を1年間運転するために必要な
核融合燃料はおよそ0.2トン(稼働率70%)です。
(同じ発電量を得るには、およそ140万トンの石油が必要です。)

強い力を…そして未来へ…

先端技術開発を促進

核融合装置は、超伝導、ロボット、耐熱材料、
粒子ビーム、マイクロ波など、先端技術の集合体です。
核融合エネルギーを実用化するなかで、
こうした未来に向けた先端技術の開発を促進し、
広く社会に役立ちます。



核融合エネルギーの実用化をめざして

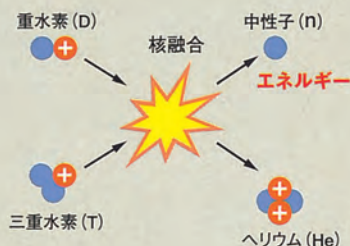
核融合エネルギー研究開発部門では、国際協力により核融合エネルギーの科学的・技術的成立性を実証する「ITERの研究開発」、核融合反応で燃料を燃やし続ける研究をする「核融合プラズマの研究開発」及び核融合プラズマの実現を支える「核融合工学の研究開発」の3本の柱からなる総合的な核融合エネルギーの研究開発を行い、近年、世界をリードする著しい成果と進展を遂げています。

燃料を プラズマという状態にする。

核融合エネルギーを取り出すには、燃料を1億度以上に熱してプラズマという状態にして原子核を融合させ、核融合反応を持続させる必要があります。

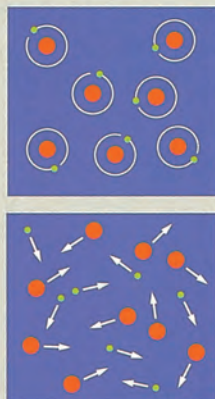
●核融合

軽い原子の原子核同士がぶつかりあって、より重い原子核になることを言います。この時、大きなエネルギーが発生します。最も起こしやすい反応は重水素(D)と三重水素(T)の反応です。



●プラズマ

気体とは物質の分子・原子が空間を自由に飛び回っている状態です。1万度以上の高温になると、原子を構成している電子と原子核が、ばらばらになって飛び回る状態(プラズマ)になります。



気体

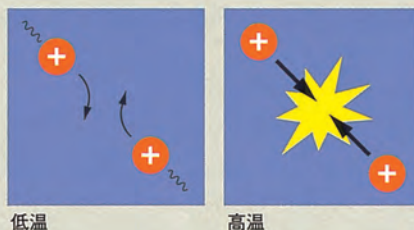
プラズマ

プラズマを 高温に保持する。

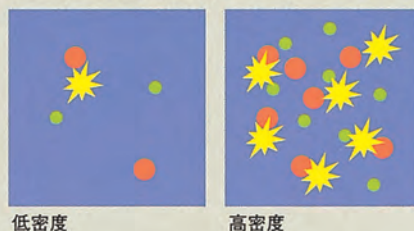
核融合反応を発生・持続させるには、プラズマを高温に保持する必要があります。

●核融合反応の発生条件

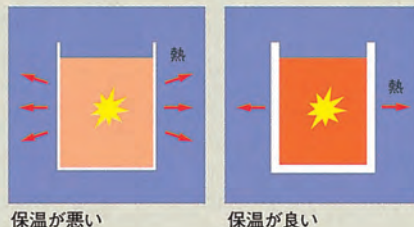
プラズマの温度を高くし、正の電気を持つ原子核同士の反発力に打ち勝って原子核同士がぶつかり合うようにします。



プラズマの密度を高くし、十分な頻度で反応が起きるようにします。



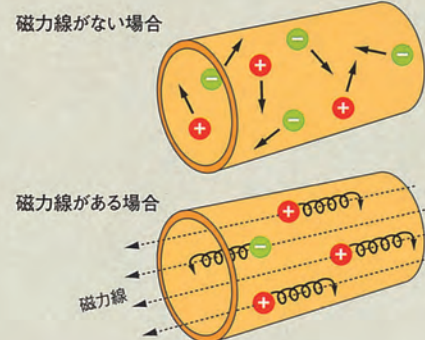
プラズマの閉じ込め(保温)を良くし、高温状態を保つようにします。



プラズマを 磁場で閉じ込める。

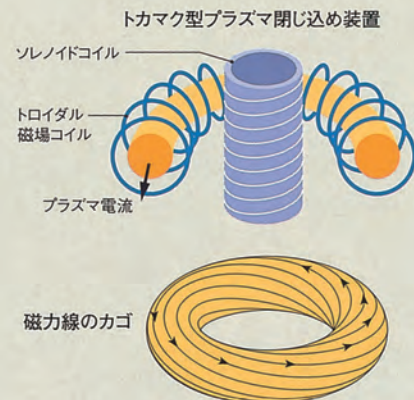
●磁場による閉じ込めの原理

プラズマを校正する原子核と電子はともに電荷を持ち、磁力線に巻きつく性質があります。



●トカマク方式

プラズマを生成・保持するのに優れているトカマク方式と呼ばれる方法を用いて核融合エネルギーの開発を進めています。トカマク方式では、高温のプラズマが容器に触れないように、容器の周りに電磁石を並べて作る磁場と、プラズマ中に大電流を流して作る磁場を合わせて磁力線のカゴを作り、プラズマを閉じ込めます。



ITERの研究開発

ITER project

国際協力で進めているITER（国際熱核融合実験炉）計画に我が国の国内機関として貢献しています。

核融合プラズマの研究開発

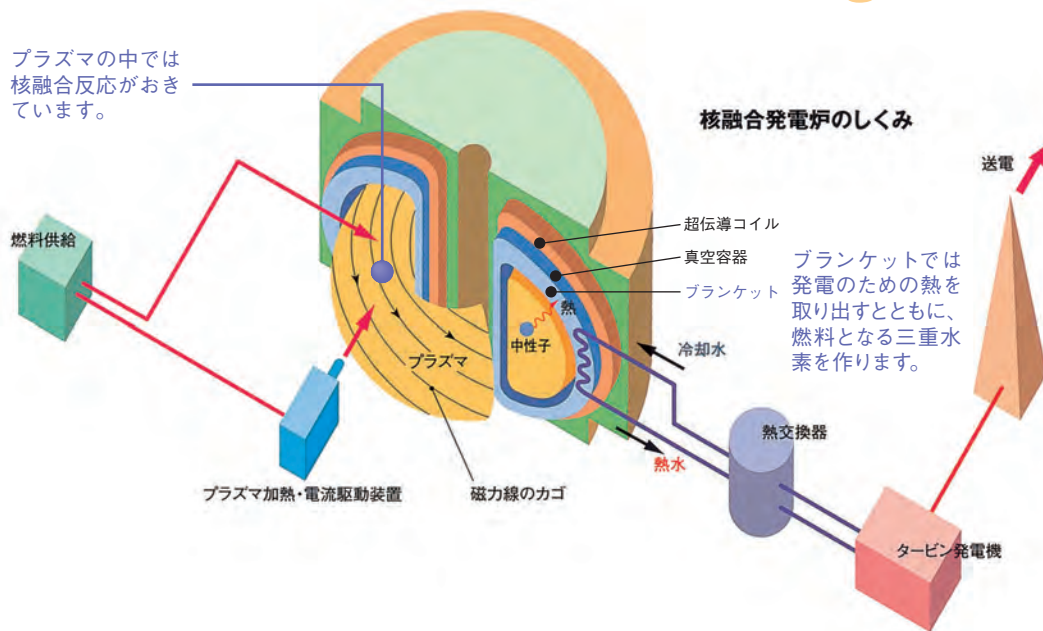
Plasma physics

ITER計画と並行して日欧協力で実施する幅広いアプローチ（BA）活動を活用して、核融合エネルギーを取り出す高温プラズマを生成・保持するための研究開発を行っています。

核融合理工学の研究開発

Fusion science and technologies

BA活動等により、核融合発電炉の開発に必要な技術基盤の構築を進めています。



ITER計画と幅広いアプローチ活動

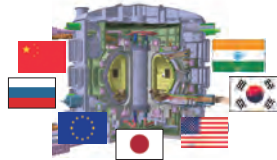
ITER計画

日本、欧州、ロシア、米国、中国、韓国、インドの7極が参加する巨大な国際共同プロジェクトです。フランスにITERを建設し、50万kWの核融合出力を300～500秒間にわたって実現することにより、核融合エネルギーの科学的・技術的実現性を実証します。

幅広いアプローチ（BA）活動

ITER計画と並行して、日欧共同で、核融合原型炉の実現のために必要な理工学研究やITERだけでは実施できないプラズマ物理研究等、ITER計画を補完・支援する先進的核融合研究開発を行います。

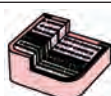
ITER



日本は準ホスト国として貢献
(約18%の機器の調達、人員の派遣)



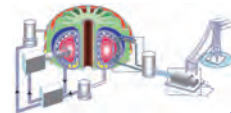
炉心プラズマ
JT-60



核融合炉工学・材料、
ブランケット開発等

原型炉

核融合発電の実証

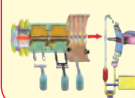


幅広いアプローチ活動

ITER建設と並行して我が国がホスト



国際核融合エネルギー研究センター(IFERC)
計算機、原型炉設計R&D調整、
ITER遠隔実験への試験、準備、
早期実現への戦略的取組



国際核融合材料照射施設の工学
実証・工学設計活動 (IFMIF-EVEDA)
施設の工学設計とR&D
国際共同設計チームをホスト



サテライト・トカマク
JT-60の超伝導化 (JT-60SA)
トカマク改良研究
人材育成

青森県六ヶ所村

茨城県
那珂市

ITER [国際熱核融合実験炉] 計画

核融合エネルギーの利用は、将来のエネルギー確保という人類に共通の願いに応える有力な方法のひとつです。ITER（国際熱核融合実験炉）計画は、この核融合エネルギーの実現を目指して世界の人材と資金を出しあって共同で進めている研究開発活動です。

ITER主要諸元

核融合出力 50万kW
プラズマ主半径 6.2m
プラズマ電流 1500万A
トロイダル磁場 11.8テスラ

燃料の循環および安全取扱い技術

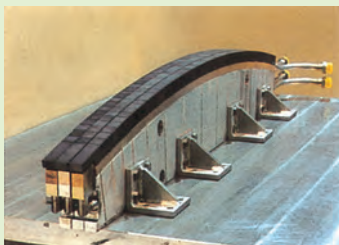
核融合反応の燃料である三重水素（トリチウム）は β 線という放射線を出す水素の同位体です。その β 線のエネルギーは弱く紙一枚で止まりますが、管理は厳しく行わなければなりません。トリチウムの安全な取扱いと、厳格な管理のシステムを確立するための研究開発を進めています。



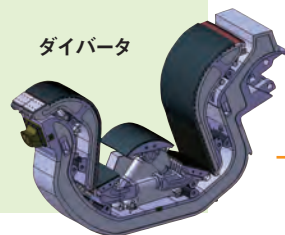
グローブボックスを用いてトリチウムを取り扱っている様子

耐高熱負荷機器の開発

プラズマの高い熱から機器を守るための表面材料と冷却の機構には特に高度な技術が必要です。火力発電所のボイラーの50倍の熱量に耐える必要があります。



耐熱タイルの実規模試験体（全長：約1.3m）

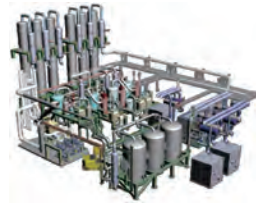


ダイバータ

ITER概念図

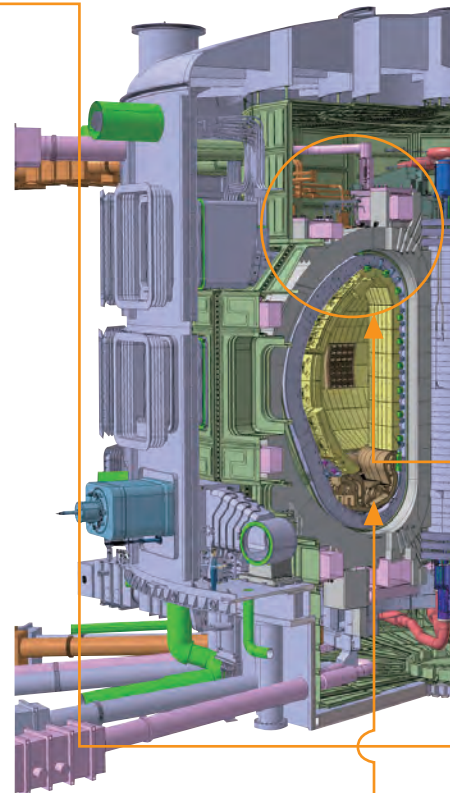
30m

トリチウムプラント設備



ITERの3つの目的

- ① 核融合燃焼の実証：実際の燃料で核融合による長時間燃焼（400秒程度）を実証します。また、入力エネルギーと出力エネルギーの比（エネルギー増倍率）が10を超える核融合燃焼を目指しています。
- ② 炉工学技術の実証：核融合による燃焼に必要な工学技術を実証します。
- ③ 核融合エネルギーの取り出し試験：核融合による燃焼で発生する核融合エネルギーから熱を取り出す試験を行います。また、燃料である三重水素のリサイクルを行うための試験を行います。



ITER建設地

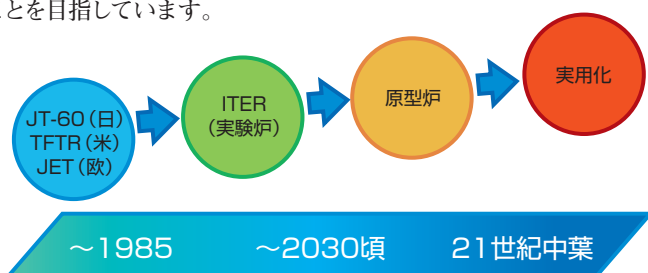


※ITER建設地については、ITER機構の表記に合わせ、これまでの「カダラッシュ」（地元の呼称）から「サン・ポール・レ・デュランス」へ変更しました。

核融合エネルギーの開発ステップ：ITERは実験炉

我が国では、ITERを核融合研究開発における実験炉と位置付け、その研究開発に参画しています。

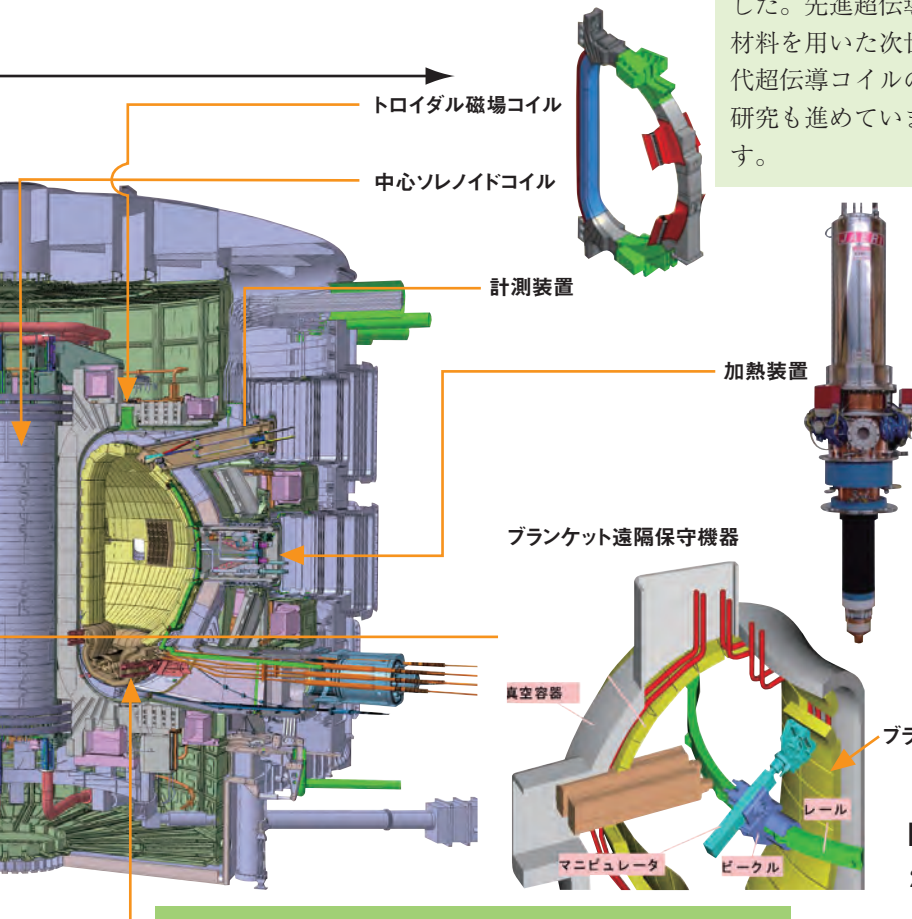
ITERが目的を達し、その次の開発ステップである原型炉段階を経て、今世紀中葉までに核融合エネルギーの実用化の見通しを得ることを目指しています。



ITER project

日本が調達を分担する主な機器

日本は、ITER機構や他の参加極と協力してITERの主要機器（いわゆるハイク機器）を調達し、ITER建設に貢献します。



炉構造・遠隔保守操作技術の開発

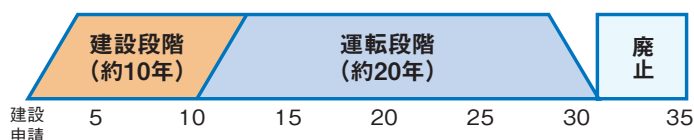
炉内部の点検保守や部品交換を遠隔操作で行う技術や、遠隔操作がやり易いような炉構造の開発が不可欠です。数トンの重量物をミリ単位の精度で動かせるマニピュレータをはじめ、さまざまな機械の研究開発を進めています。

ITER実規模遠隔保守装置



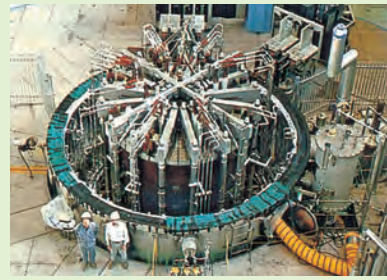
ITERのスケジュール

ITERは35年間（建設期約10年、運転期約20年、廃止措置約5年）に及ぶ長期研究開発プロジェクトです。



超伝導コイルの開発

プラズマを閉じ込めるための磁場を発生する超伝導コイルの開発は、代表的な先端技術です。ITER用超伝導モデル・コイルを製作し、ITERの最大磁場13テスラの発生に成功しました。先進超伝導材料を用いた次世代超伝導コイルの研究も進めています。



13テスラ発生に成功したITER用超伝導モデル・コイル(外径3.6m)

プラズマ加熱・電流駆動装置の開発

1億度を超える高温プラズマを実現する装置の開発を行っています。



中性粒子ビーム入射加熱装置
高いエネルギーを持った水素負イオンビームを発生するMeV級イオン源試験装置



高周波加熱装置
ジャイロトロンと呼ばれる大電力ミリ波の発振管

ITER国内機関活動

2006年11月に、日本、欧州、ロシア、米国、中国、韓国、インドにより、イーター協定が調印され、ITER建設サイト（フランス）に設立されたITER機構のもと、ITERを建設するための活動が行われています。量子科学技術研究開発機構は、ITER計画における我が国の国内機関としての指定を受け、我が国が分担する機器・装置の調達を行うとともに、ITER計画に対する我が国からの人的貢献の窓口としての役割を果たしています。

これまでの経緯

- 1985年
米ソ首脳会談で核融合研究開発推進の共同声明
- 1988年～1990年
ITER概念設計活動(CDA)
- 1992年～2001年
ITER工学設計活動(EDA)
(米国は1999年～2003年2月の間、計画から一時撤退)
- 2001年～2002年
ITER調整技術活動(CTA)
- 2003年～2006年
ITER移行措置(ITA)
- 2006年11月
イーター協定署名式
- 2007年10月
イーター協定発効・ITER機構設立

核融合プラズマの研究開発

核融合プラズマの研究では、核融合によって発生する熱だけで、核融合の火が燃え続ける状態(自己点火条件)を実現するためのプラズマ制御技術の開発を行っています。この研究開発は、大型トカマク装置JT-60を用いた実験研究等により進めています。

トカマク装置による研究開発

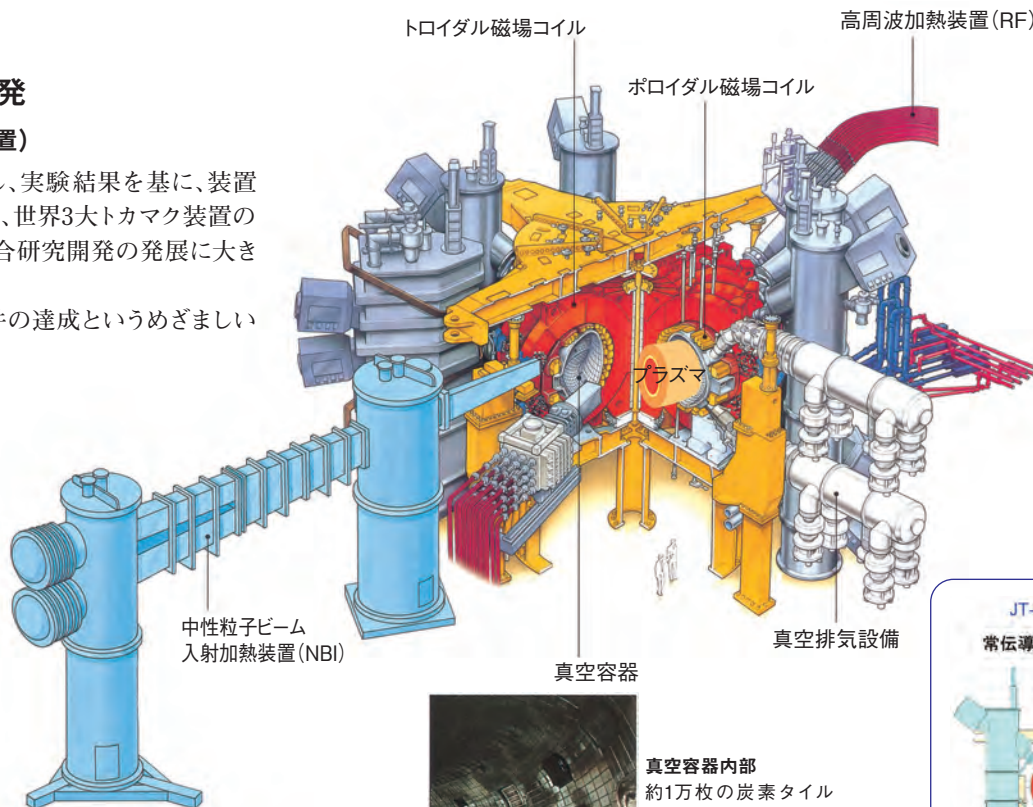
●JT-60(臨界プラズマ試験装置)

JT-60は、1985年に運転を開始し、実験結果を基に、装置の改造や制御方法の工夫を重ね、世界3大トカマク装置の一つとして、ITERの設計や核融合研究開発の発展に大きな貢献をしています。

1996年秋には、臨界プラズマ条件の達成というめざましい成果をあげています。

●国際・国内研究協力

JT-60の研究には米、欧、露、豪、中、韓等の世界中の研究者が常時参加するとともに、新しい計算機ネットワークを使った遠隔実験参加も行われています。大学等との協力・共同研究を拡充し、JT-60との有機的協力のもとに共同実験を推進しています。



JT-60主要諸元

直径 約15m
プラズマ電流 600万A
トロイダル磁場 4.4テスラ
プラズマ主半径 3.2m



真空容器内部

約1万枚の炭素タイルにより、高温のプラズマから保護されています。1997年に真空容器下部のダイバータ改造を行うなど、熱・粒子制御の性能を向上させています。



臨界プラズマ条件を達成

1996年10月31日、閉じ込め時間1秒、温度1.9億度、イオン密度49兆個/立方cmの重水素プラズマを実現しました。これは、重水素と三重水素が等分に混ざり合ったDTプラズマであれば、超高温プラズマの生成に要した外部加熱入力に対する、DT核融合反応で発生する出力の値(エネルギー増倍率)が1となる、臨界プラズマ条件を達成するものです。

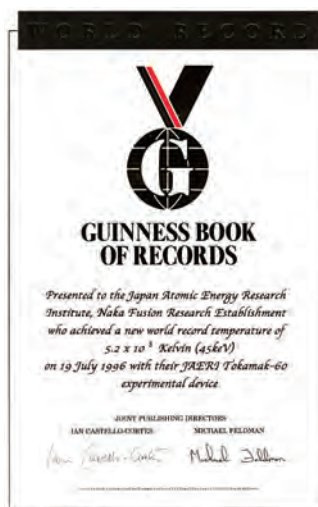
この成果は、プラズマ内部で熱が逃げにくい断熱層を形成し、高い閉じ込めを実現する画期的な方法によるもので、将来の定常核融合炉の標準的な運転方法として考案したものです。

その後のダイバータ改造によりプラズマ中の不純物を低減させて、プラズマ性能向上の研究を進め、1998年6月10日には世界最高のエネルギー増倍率1.25のプラズマの生成に成功しました。



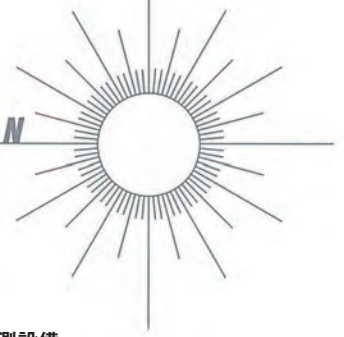
断熱層が形成された高温プラズマの映像

ギネスブックに掲載



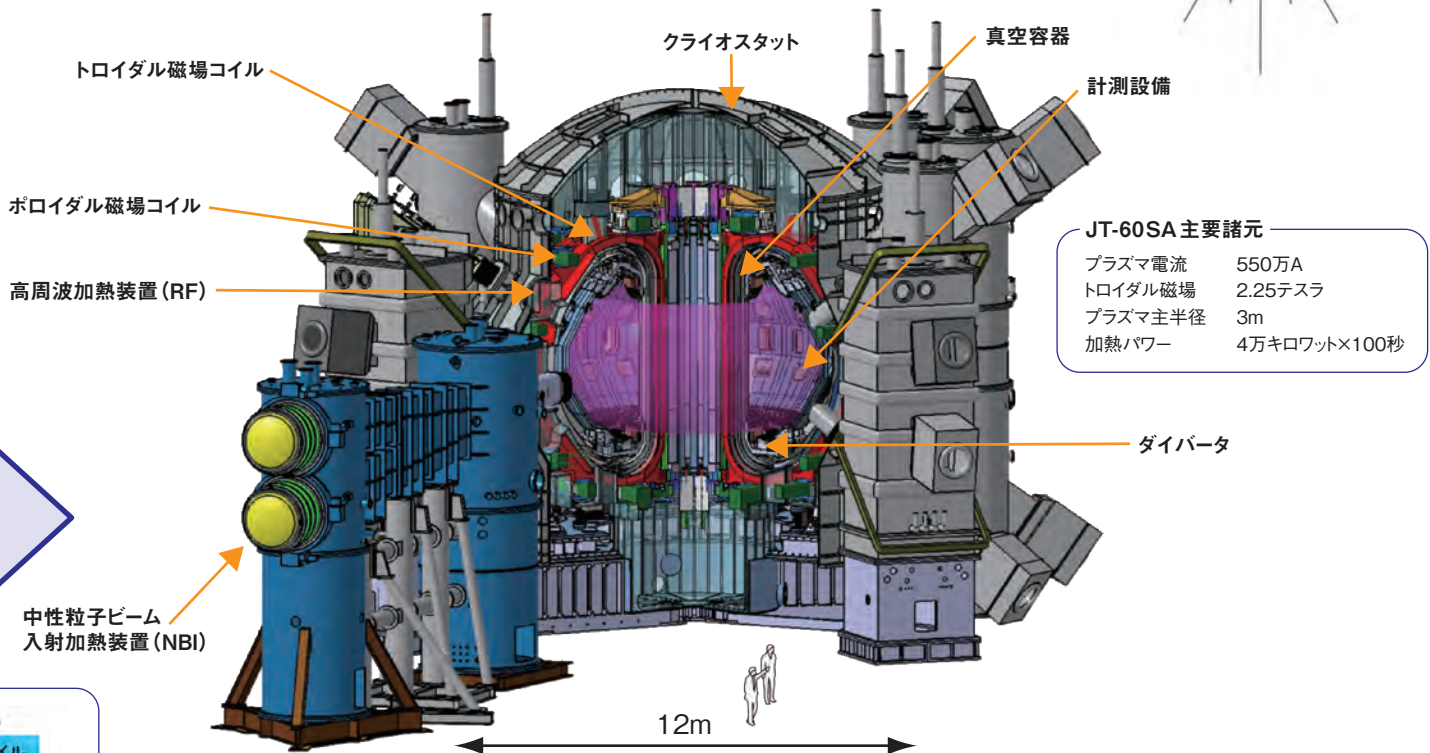
JT-60では1996年にイオン温度5.2億度を達成し、人類が地上で作った世界最高の温度としてギネスブックに登録されました。

Plasma physics



JT-60からJT-60SAへ

BA活動を活用してさらに先進的な研究開発を行うため、JT-60を
超伝導装置 (JT-60SA) に改造します。



JT-60SA主要諸元

プラズマ電流	550万A
トロイダル磁場	2.25テスラ
プラズマ主半径	3m
加熱パワー	4万キロワット×100秒

機動性の高い装置によるITER支援研究を行うことによりITERにおける試験研究を効果的・効率的に行うとともに、原型炉に向けたITERの補完的研究を国際的に行うことにより核融合エネルギーの早期実現を図ります。

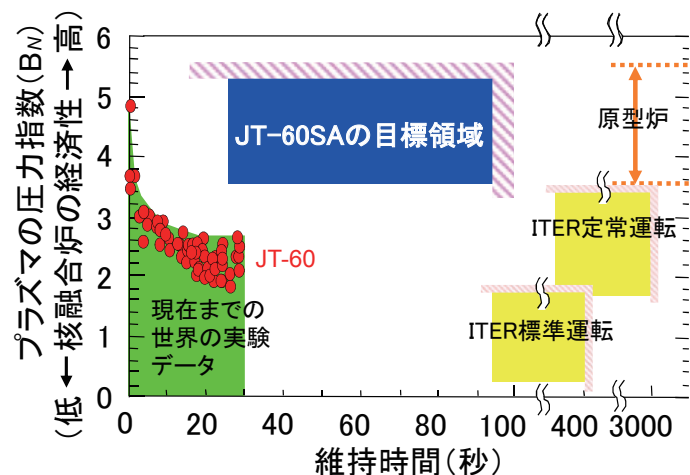
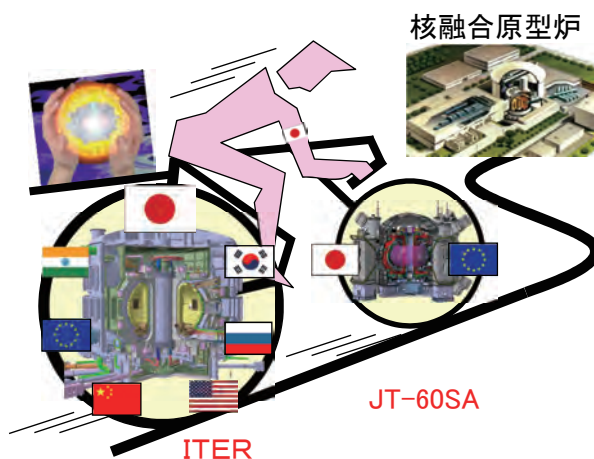
- ・ ITER支援研究：ITERのプラズマ運転シナリオ開発支援と物理的な課題の解決支援
ITER改造等の実施前試験
ITERプロジェクトに従事する科学者、技術者の育成
- ・ ITER補完研究：定常運転法、高ベータ運転法及び熱・粒子制御法の開発

2019年の運転開始を予定

2009	2010	2012	2019
準備・環境整備	JT-60 解体	JT-60SA 組立	運転

JT-60SAはITERを先導する先駆輪

ITERや原型炉を見通すことができる装置規模、かつ機動性に富んだ装置として最適化することで、ITERの技術目標達成のための支援研究、原型炉に向けたITERの補完研究を行い、原型炉に向けた最適ルートを切り拓きます。また、我が国唯一の大型トカマク装置として世界をリードする人材を育成します。



核融合理工学の研究開発

核融合エネルギーの実用化に必要な
さまざまな先端技術の開発をBA活動を中心に進めています。

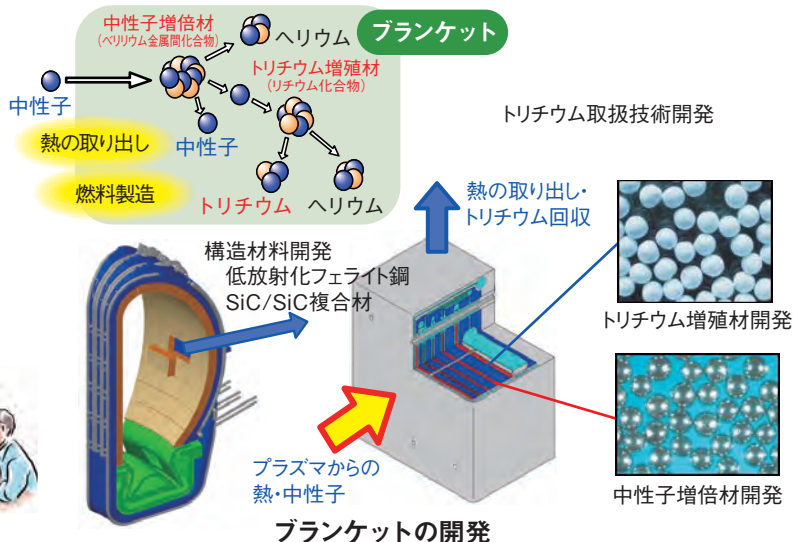
国際核融合エネルギー研究センター (IFERC) 事業

原型炉設計・研究開発

原型炉の基本的な設計を行うとともに、必要な材料や発電のための研究開発を行います。特に、発電用の熱を取り出し、燃料である三重水素(トリチウム)を製造するための装置(ブランケット)の構成要素に関する製作・取扱技術の研究開発を実施しています。

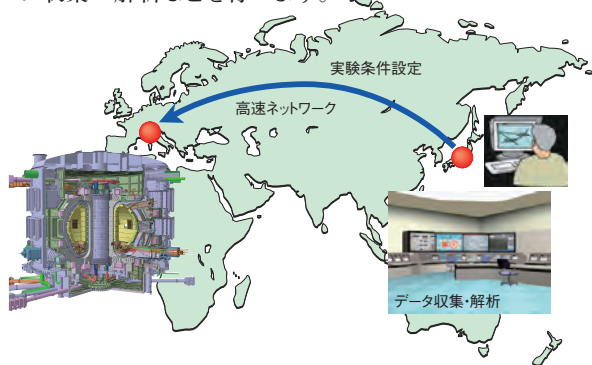


原型炉設計活動



ITER遠隔実験

ITERと高速ネットワークで結び、ITER実験条件の提案やデータ収集・解析などを行います。

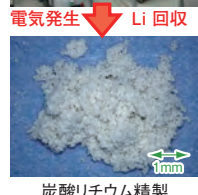


計算機シミュレーション

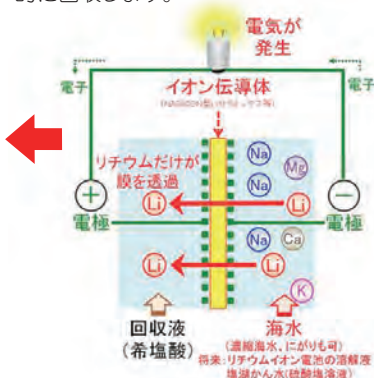
専用的高性能計算機(計算性能: 1.2ペタフロップス)を用いてプラズマのシミュレーションを行い、核融合プラズマの物理的性質の解明を進めています。また、原型炉設計や材料開発に関連したシミュレーションを実施しています。



イオン伝導体を用いた世界初のリチウム分離回収技術

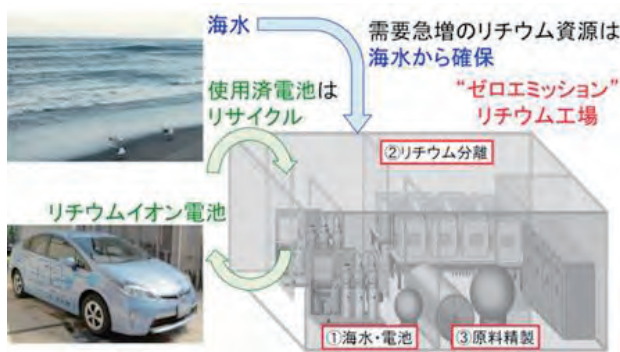


イオン伝導体をリチウム分離膜とし、海水中に無尽蔵に含まれている、核融合燃料(三重水素)製造に必要なリチウムを、効率的に回収します。



海水だけでなく、リチウム電池のリサイクルも可能

➡ リチウム循環型社会実現へ

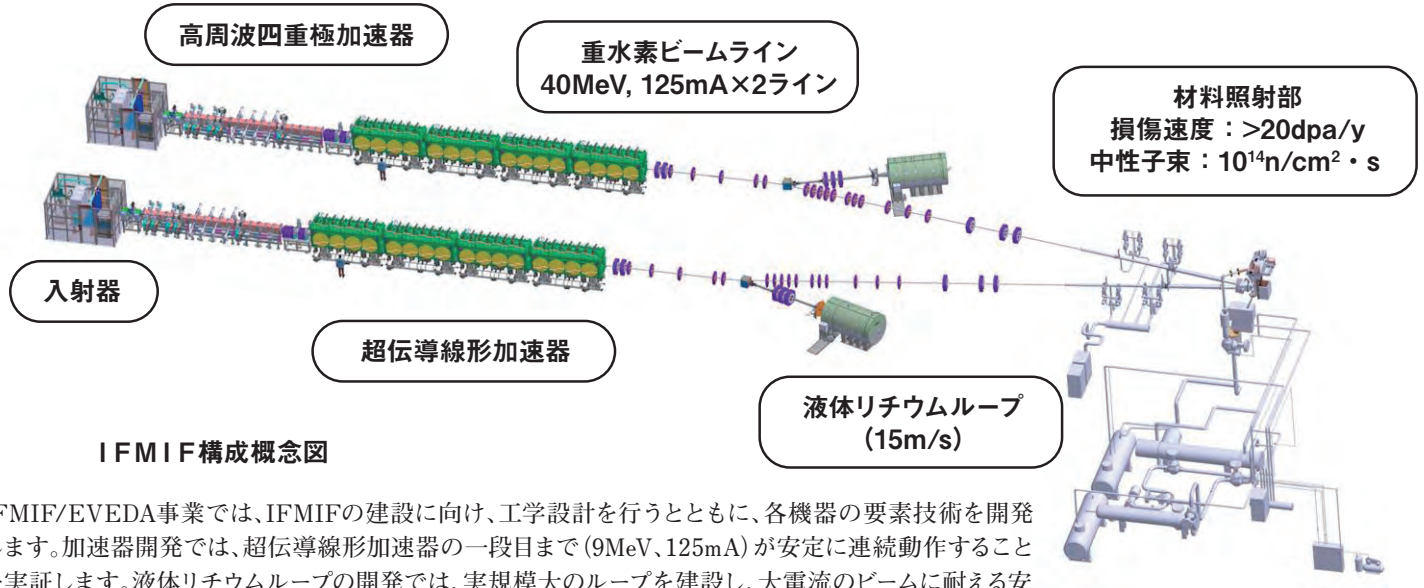


Fusion science and technologies



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

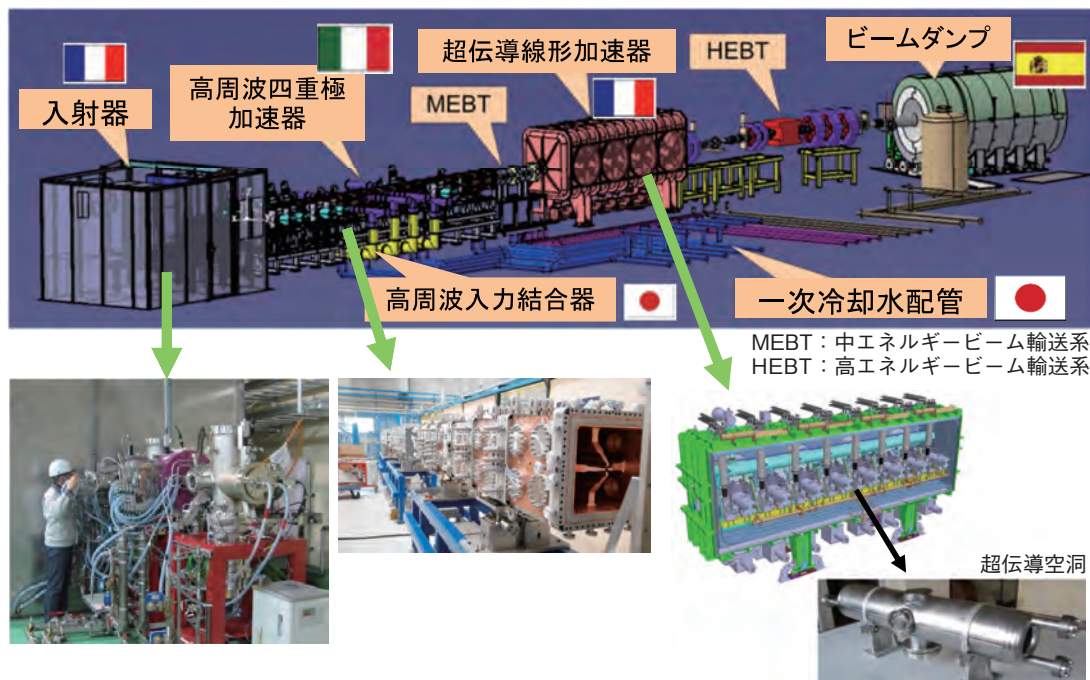
原型炉の材料開発のためには、核融合反応で発生する高エネルギー中性子の照射影響を調べる必要があります。国際核融合材料照射施設 (IFMIF) は、その照射試験を行うための施設で、加速器で生成した強力な重水素イオンビームを液体リチウムターゲットに衝突させ、局所的に高エネルギー・高密度の中性子場を形成します。



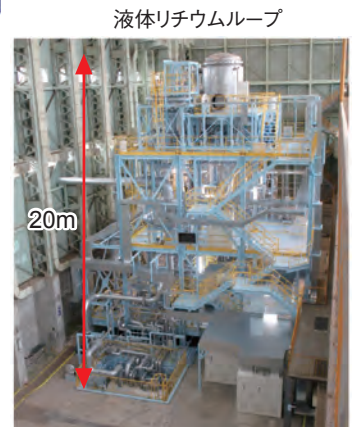
IFMIF構成概念図

IFMIF/EVEDA事業では、IFMIFの建設に向け、工学設計を行うとともに、各機器の要素技術を開発します。加速器開発では、超伝導線形加速器の一段目まで (9MeV、125mA) が安定に連続動作することを実証します。液体リチウムループの開発では、実規模大のループを建設し、大電流のビームに耐える安定な液体リチウム流を実現しました。照射部では、照射モジュールの技術開発、微小試験片試験技術の開発等を実施します。

IFMIF原型加速器構成概念図



液体リチウム流



液体リチウムループ

核融合研究開発の歩み

核融合研究開発は、1961年に開始して以来、JFT-2、JFT-2a、JFT-2M、JT-60と、徐々に装置の規模を大きくしたり、先進的なアイデアを取り入れたりしながら、発展してきました。今後も国際協力により ITER 計画・幅広いアプローチ（BA）活動に取り組むなど、環境にやさしい無尽蔵のエネルギー源である核融合の実現を目指して、さらに研究開発を進めます。

1972
JFT-2 運転開始



1973年3月、中間ベータ値トラス装置 (JFT-2) で、プラズマ長時間閉じ込め (電子温度700万度・閉じ込め時間0.02秒) に成功 (東海研)

1961
原研で核融合研究開発開始

1956
日本原子力研究所設立

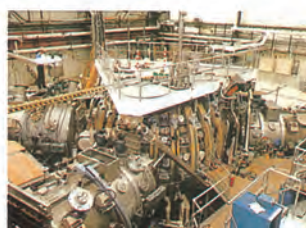
1975
JT-60 設計開始

1974
JFT-2a (世界初のダイバータ付トカマク) 運転開始



1974年8月、世界で初めてのダイバータ装置を備えた高安定化磁場装置 (JFT-2a) 完成

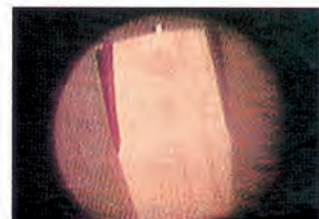
1979
ダブレット-Ⅲ (米国) との
共同実験開始



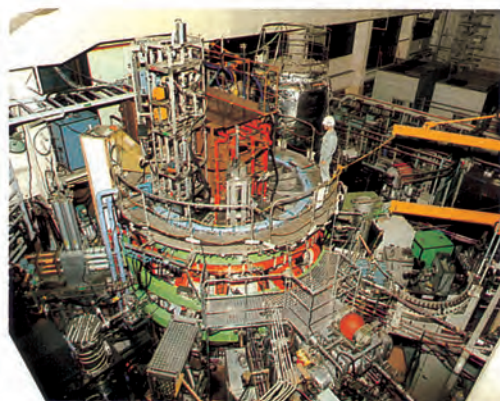
ダブレット-Ⅲ 日米協力で米国GA社に建設された中型トカマク装置

1983
JFT-2M 運転開始

1985
那珂研究所設立
JT-60
実験運転開始



JT-60 ファースト・
プラズマの点火に成功

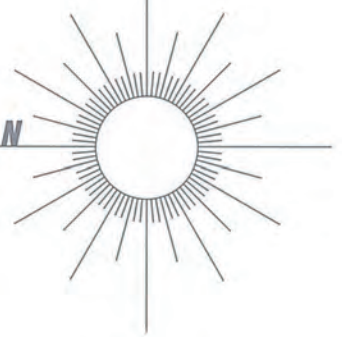


JFT-2M 機動性を生かして先駆的な研究を進める中型トカマク装置



JT-60 臨界プラズマ試験装置

Progress



1988
ITER概念設計
活動開始

1993
JT-60 高周波により
世界最大の非誘導電流
360万Aの駆動に成功

1992
ITER工学設計活動開始

1991
JT-60 大電流化運転開始

1998
世界最高エネルギー増倍率1.25
を達成

1996
JT-60 世界最高イオン
温度5.2億度を達成
JT-60 臨界プラズマ条
件達成

2008
JT-60実験運転
完遂

2007
BA協定の発効
イーター協定の発効
六ヶ所サイト開設

2005
日本原子力研究開発機構
那珂核融合研究所発足

2020頃
ITER ファーストプラズマ(予定)

2019
JT-60SA ファーストプラズマ(予定)

2016
量子科学技術研究開発機構発足

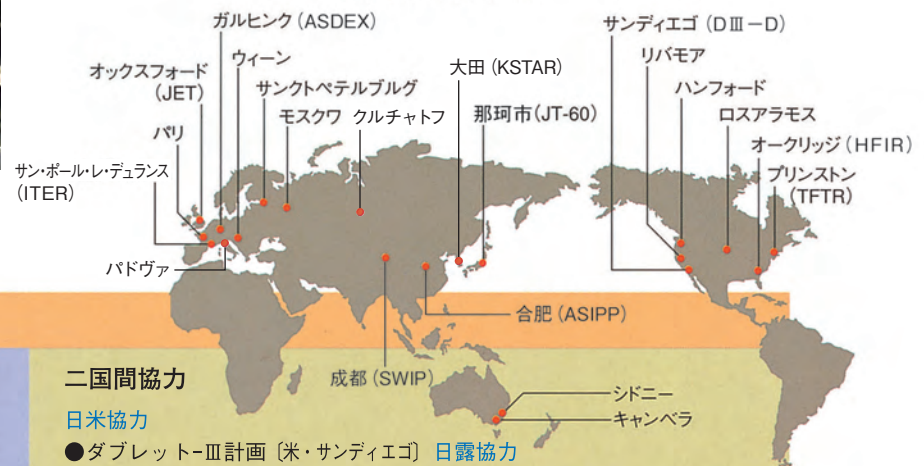
実用プラント

原型炉



JT-60 中央制御室
(2008年8月29日 JT-60 実験運転完遂の様子)

核融合の国際協力



核融合の国際協力

多国間協力

OECD/IEA
(経済協力開発機構/国際エネルギー機関、本部：パリ)

- トカマク計画の協力
- 核融合材料照射損傷研究開発計画
- 核融合の環境・安全・経済性協力計画
- 核融合炉工学協力計画

IAEA (国際原子力機関、本部：ウィーン)

- 核融合エネルギー会議
- 原子分子データ情報交換
- その他の専門家会合

ITER協定 (ITER機構 本部：サン・ポール・レ・デュランス)

二国間協力

日米協力

- ダブレット-III計画 [米・サンディエゴ]
- HFIR/ORR 共同実験 [米・オークリッジ]

日欧協力

- 幅広いアプローチ協力協定
- QST-IPP/ASDEX 協力協定 [独・ガルヒンク]
- QST-RFX協力協定 [伊・バドヴァ]

日豪協力

- 日豪共同委員会 [豪・シドニー、キャンベラ]

日露協力

- 日露科学技術協力協定 [露・モスクワ、サンクトペテルブルグ]

日中協力

- QST-ASIPP 協力協定 [中・合肥]
- QST-SWIP 協力協定 [中・成都]

日韓協力

- QST-NFRI 協力協定 [韓・大田]

日カザフスタン協力

- QST-NNC協力協定 [カザフスタン・クルチャトフ]

那珂核融合研究所

1985年に設立され、臨界プラズマ試験装置JT-60を中心とする
さまざまな核融合試験研究施設を用いて研究開発を実施してきました。
現在は、ITER計画とJT-60SAの建設を中心に研究開発を進めています。



(2016年2月現在)



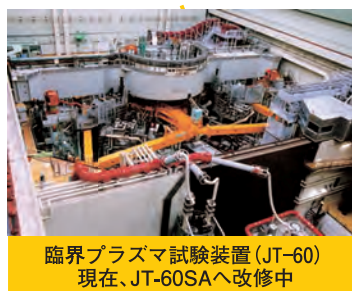
超伝導磁石試験装置



ジャイロトロン試験装置



MeV級イオン源試験装置



臨界プラズマ試験装置 (JT-60)
現在、JT-60SAへ改修中

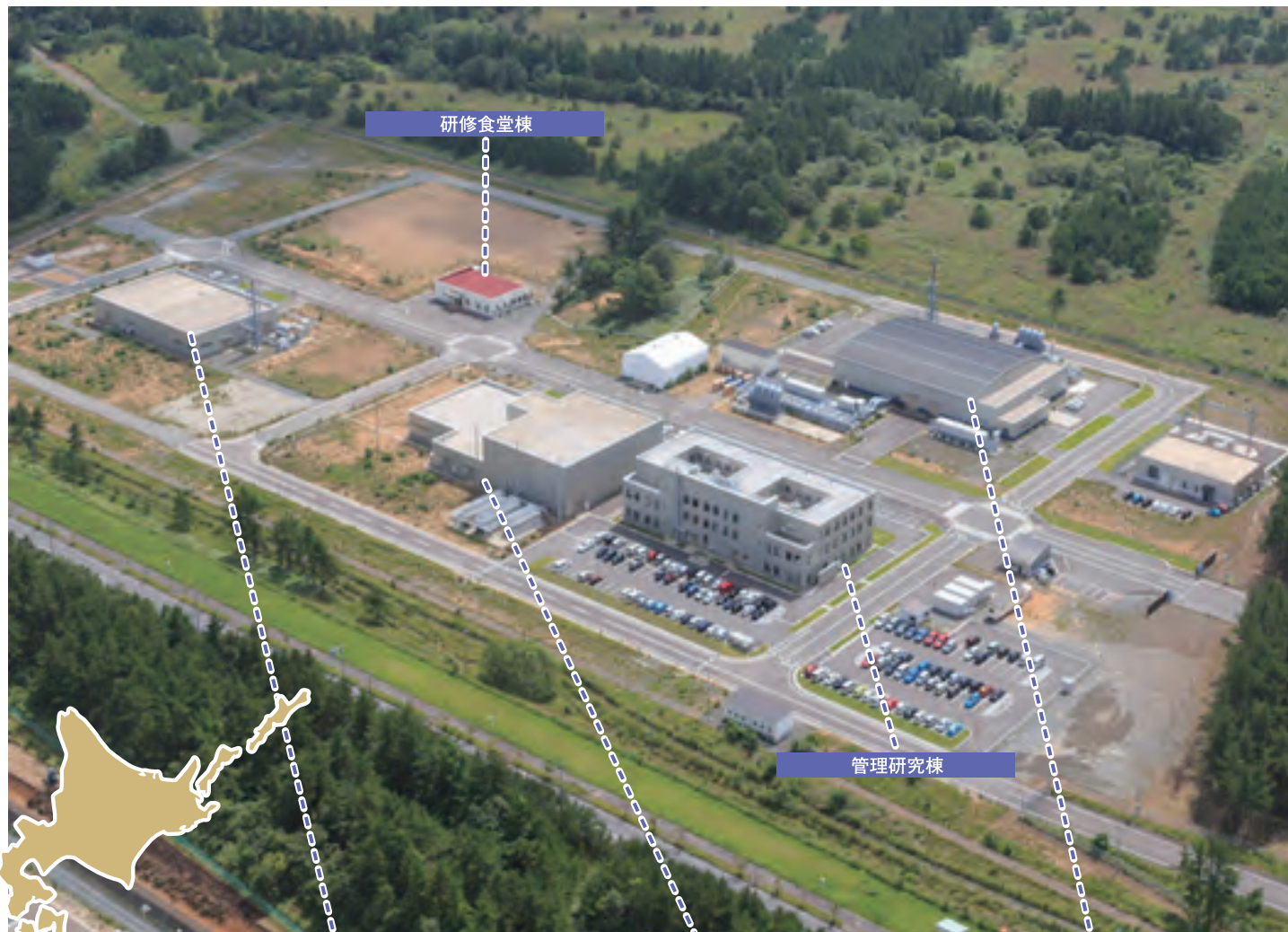


Facilities

那珂

六ヶ所核融合研究所

2007年にBA活動を実施する国際研究開発拠点として開設され、先進的な核融合研究開発を実施しています。



(2014年9月現在)



● 六ヶ所核融合研究所

● 那珂核融合研究所



原型炉R&D棟

多目的RI実験室



計算機・遠隔実験棟

核融合専用計算機



IFMIF/EVEDA開発試験棟

IFMIF原型加速器入射部

六ヶ所

那珂市



市花<ひまわり>



市鳥<白鳥>



市木<八重桜>

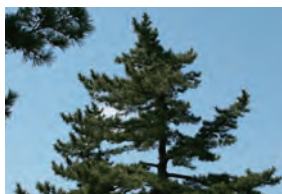
六ヶ所村



村の花<ニッコウキスゲ>



村の鳥<オジロワシ>



村の木<黒松>

茨城県



県花<ばら>



県鳥<ひばり>

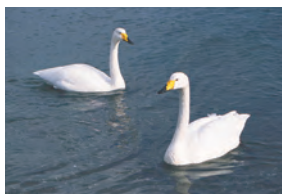


県木<うめ>

青森県



県の花<リンゴの花>



県民鳥<白鳥>



県の木<ヒバ>

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構
核融合エネルギー研究開発部門

<http://www.fusion.qst.go.jp>

那珂核融合研究所

〒311-0193 茨城県那珂市向山801番地1
TEL:029-270-7213 FAX:029-270-7219
ダイヤルイン案内台

六ヶ所核融合研究所

〒039-3212 青森県上北郡六ヶ所村大字尾淵字表館2-166
TEL:0175-71-6500 FAX:0175-71-6501
ダイヤルイン案内台