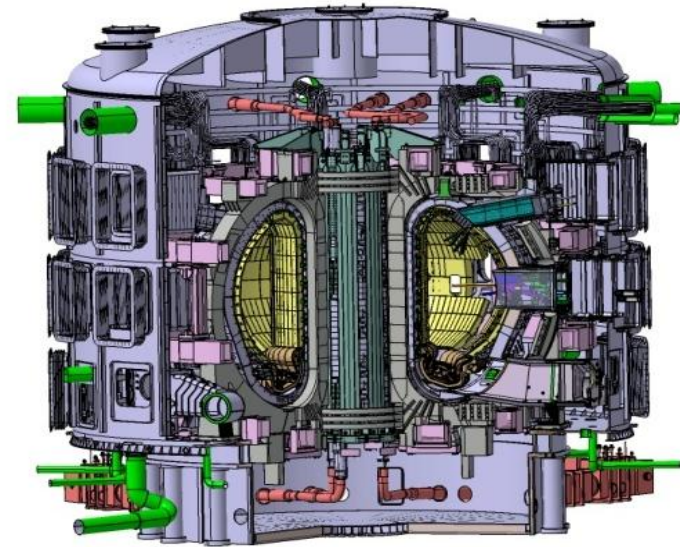


ITERの現状と展望

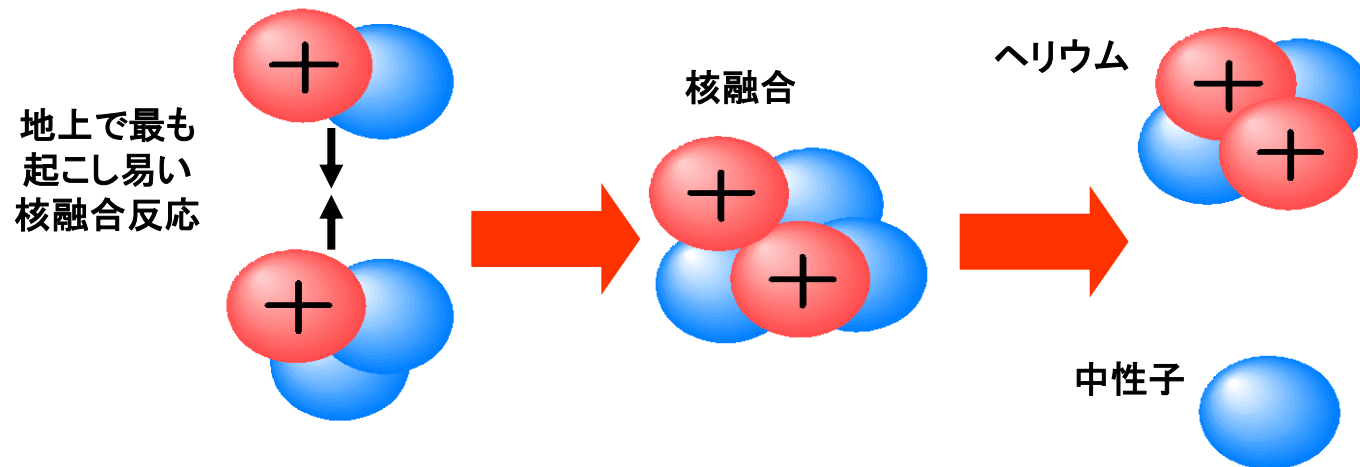
1. 建設計画
 - 概要・目的
 - 運営管理
2. 建設の進展
 - サイト整備
 - 超伝導コイル
 - 真空容器内機器
 - 周辺機器
3. 工学技術の展望



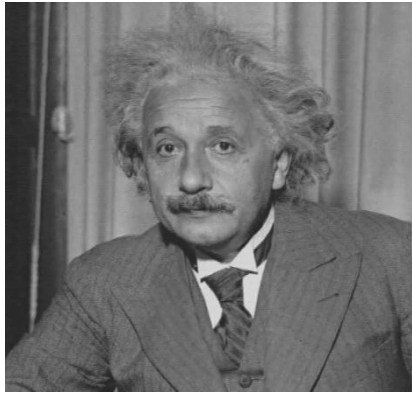
原子力機構核融合開発部門
ITERプロジェクト・ユニット
多田栄介

核融合反応

- 核融合反応では、2つの原子核どうしが衝突して融合する。
- 原子核は両方とも正の電荷を持っているため、早い速度でぶつけないと正の電荷どうしの反発力(クーロン力)で衝突しない。
- 衝突させるために必要な速度は、約1,000km/sec 以上。この速度は重水素(D)と三重水素(T)を1億度以上の高温(プラズマ)に加熱することにより得られる。
- 核融合反応は連続的に起こすためには、核融合の燃料である原子核を高密度かつ長時間一定の領域に閉じ込めておくことが必要。



反応前後の重さの違いが核融合エネルギー

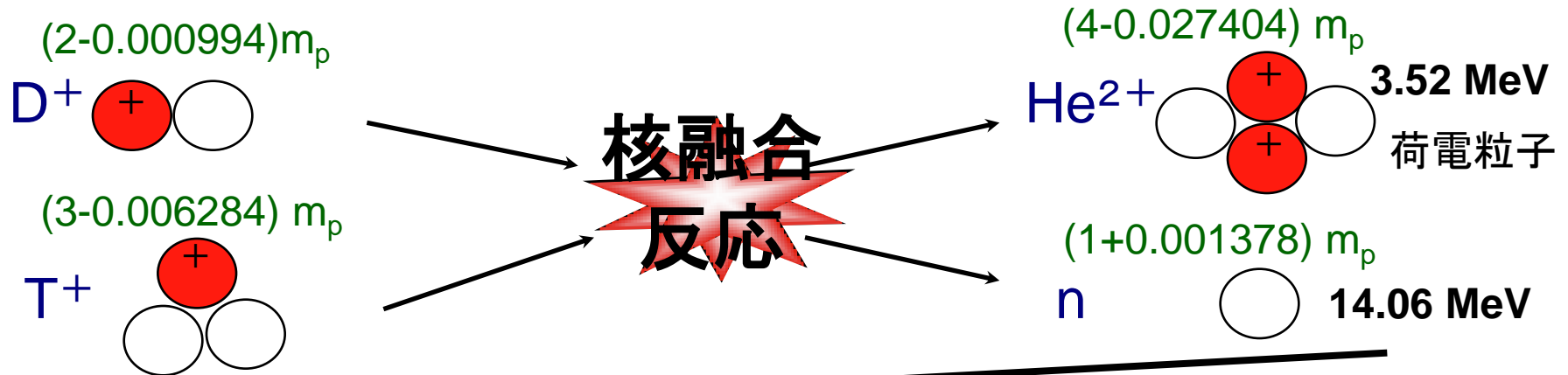


アインシュタインの原理

$$E=mc^2$$

エネルギーと
質量は等価

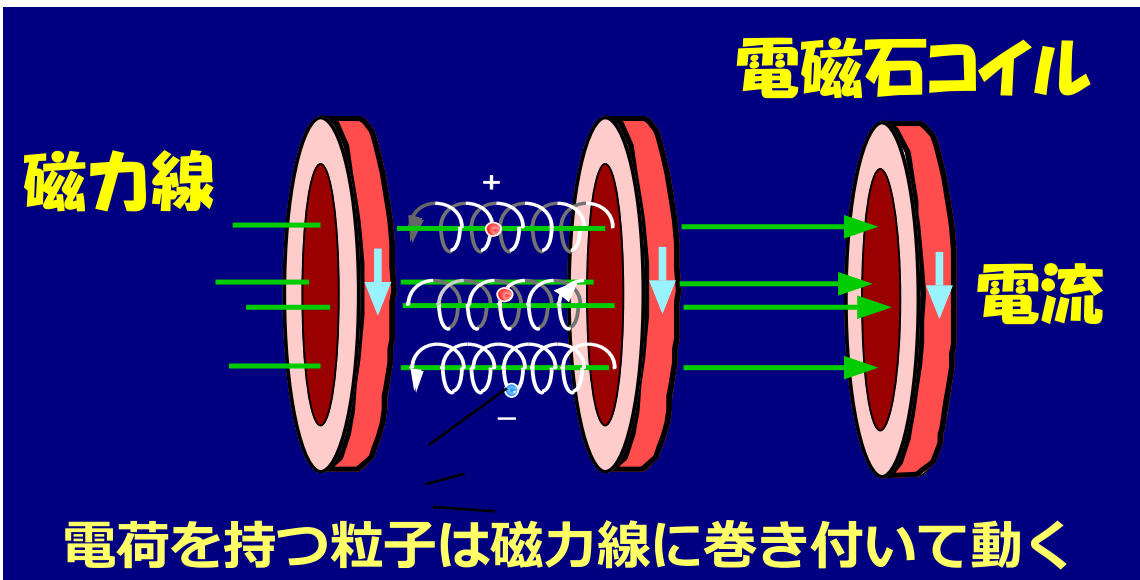
重水素と三重水素の燃料1グラムで
石油8トンに相当するエネルギーが
発生



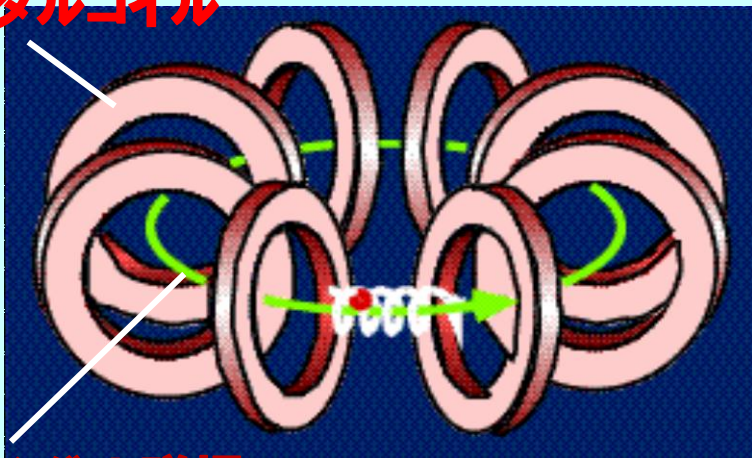
反応後 $0.01875 m_p$ 質量が減少 (m_p :陽子質量=938MeV)
 $0.01875 m_p = 17.6MeV \rightarrow He, n$ の運動エネルギー

ITER: 磁力線の器でプラズマを閉じ込める

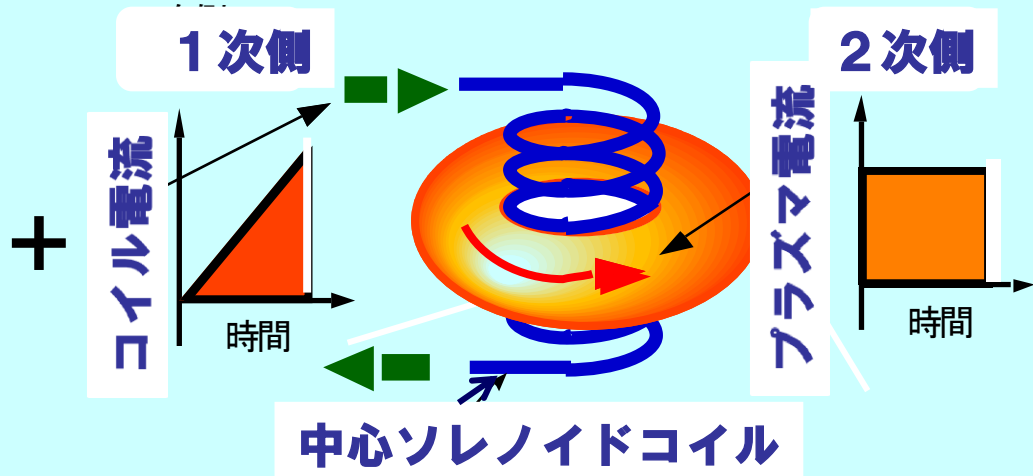
トカマク方式



トロイダルコイル



トロイダル磁場



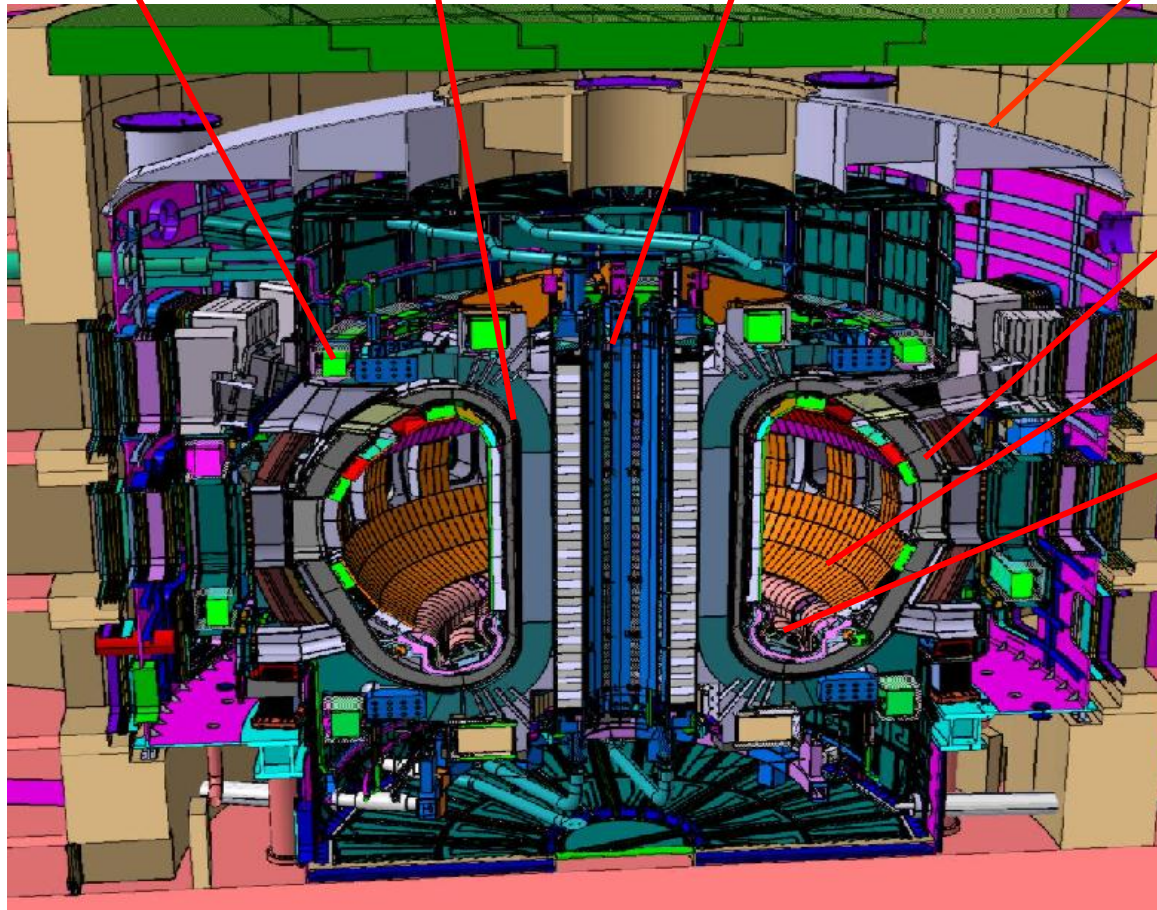
ITERトカマクの構成と主な諸元

ポロイダル
磁場コイル
Nb-Ti

トロイダル
磁場コイル
Nb₃Sn

中心ソレノイド
Nb₃Sn, 6 modules

クライオスタット
24 m high x 28 m dia.



真空容器
9 sectors

ブランケット
440 modules

ダイバータ
54 cassettes

プラズマ大半径 6.2 m
プラズマ体積: 840 m³
プラズマ電流: 15 MA
核融合熱出力: 500 MW

重量: 23350 t (クライオスタット、真空容器、マグネット)

ITER計画の位置付け

試験装置の段階

(科学的実現性)

実験炉の段階

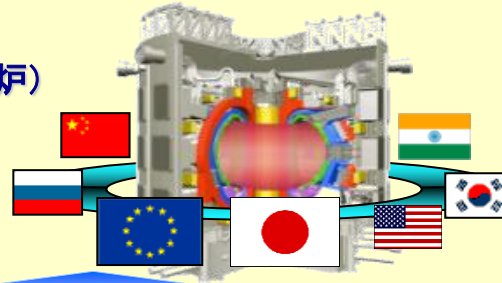
(科学的・技術的実現性)

原型炉の段階

(技術的実証・経済的実現性)

ITER計画 (国際熱核融合実験炉)

- ・50万kWの核融合エネルギー出力
- ・持続的な核融合燃焼の実証



原型炉



実用化

- ・発電
- ・経済性見通し

ITERの効率的な運転に貢献

超高温プラズマの実現

JT-60



幅広いアプローチ(BA)活動

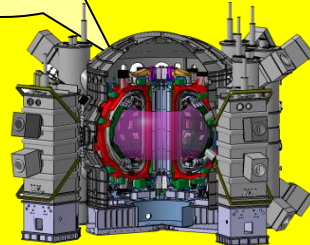
2007年6月～ 10年間

- ・原型炉に向けた技術基盤の構築
- ・ITER運転シナリオの検討 等

小さな装置で高出力化を追求

【茨城那珂】

【青森 六ヶ所】



- ・サテライト・トカマク (JT-60の超伝導化)

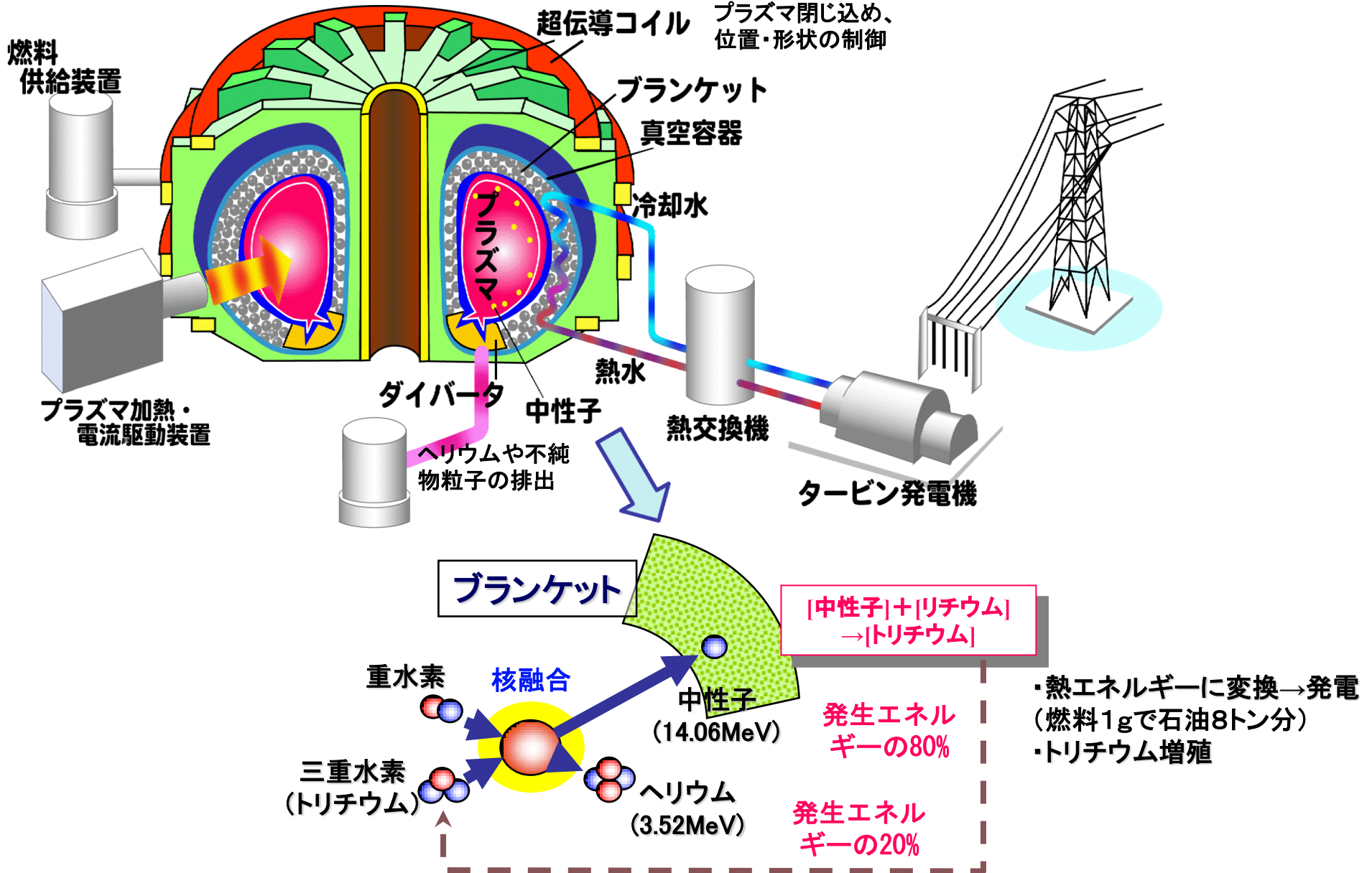


- ・国際核融合エネルギー研究センター
- ・国際核融合材料照射施設 工学実証・工学設計

ITERでは入手できない原型炉建設に必要なデータの取得

原型炉に必要な先進的な材料開発やシミュレーション研究等を実施

核融合発電のしくみ



ITER計画の目的と概要

- 環境問題とエネルギー問題を同時に解決する可能性を有する核融合エネルギーは、長期的な将来のエネルギー源の選択肢の一つ。
- ITER計画は、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・技術的実現可能性を実証する国際プロジェクト。

●ITER協定 2007年10月24日発効

●経緯

- 1985年 米ソ首脳会談で核融合の国際共同開発に合意
- 1988年～2001年 概念設計活動・工学設計活動
- 2001年～2006年 政府間協議(2005年サイト決定)
- 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 フランス・カダラッシュ

●各極の分担(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%

※ 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



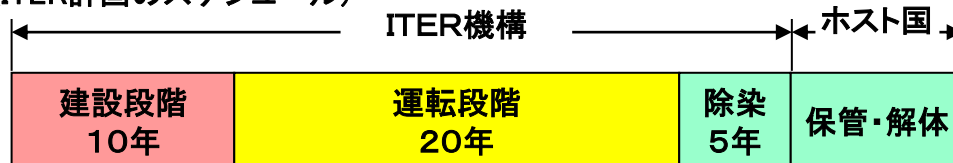
●計画 35年間

運転開始:2020年(予定)

核融合反応:2027年(予定)

●ITER機構長 本島修氏(2010年7月28日任命)

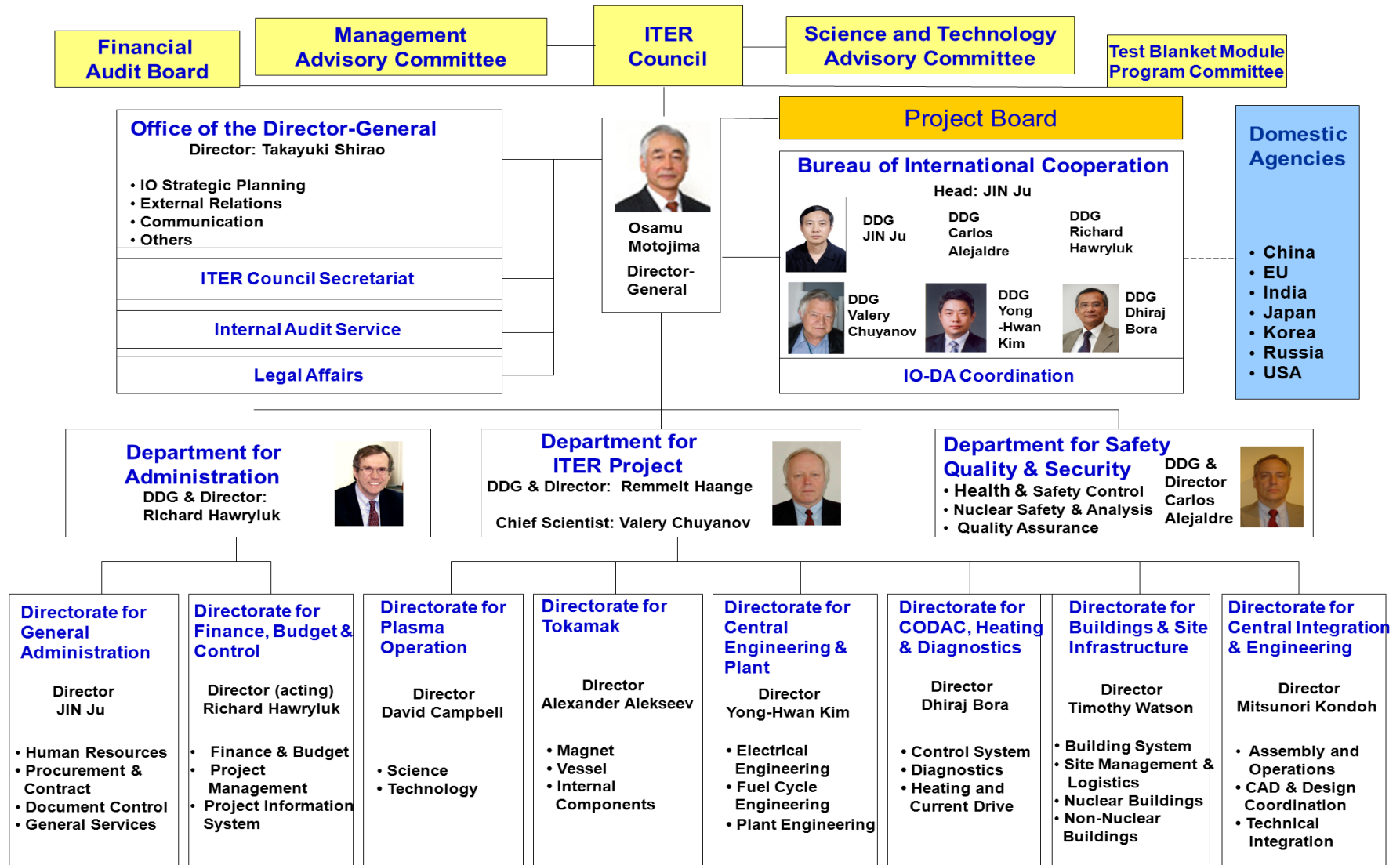
(ITER計画のスケジュール)



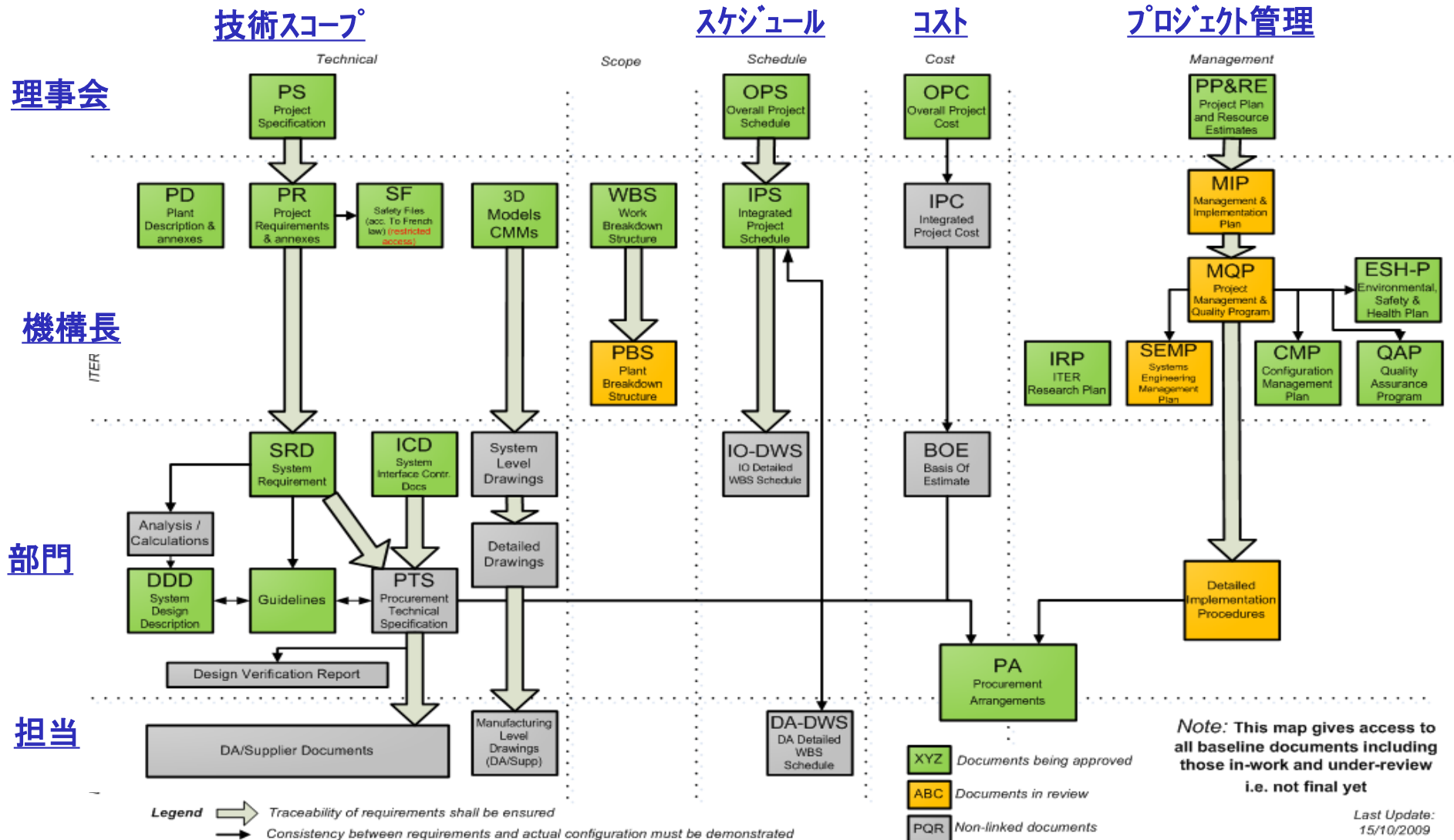
ベースライン設定
 機器調達の本格化
 サイト整備進展

ITER機構の体制

2012年3月:471名



ITERベースラインの構成



ベースライン: 技術スコープの管理

核融合出力: 50万kW

主要な技術目標(PS)

プラズマ性能

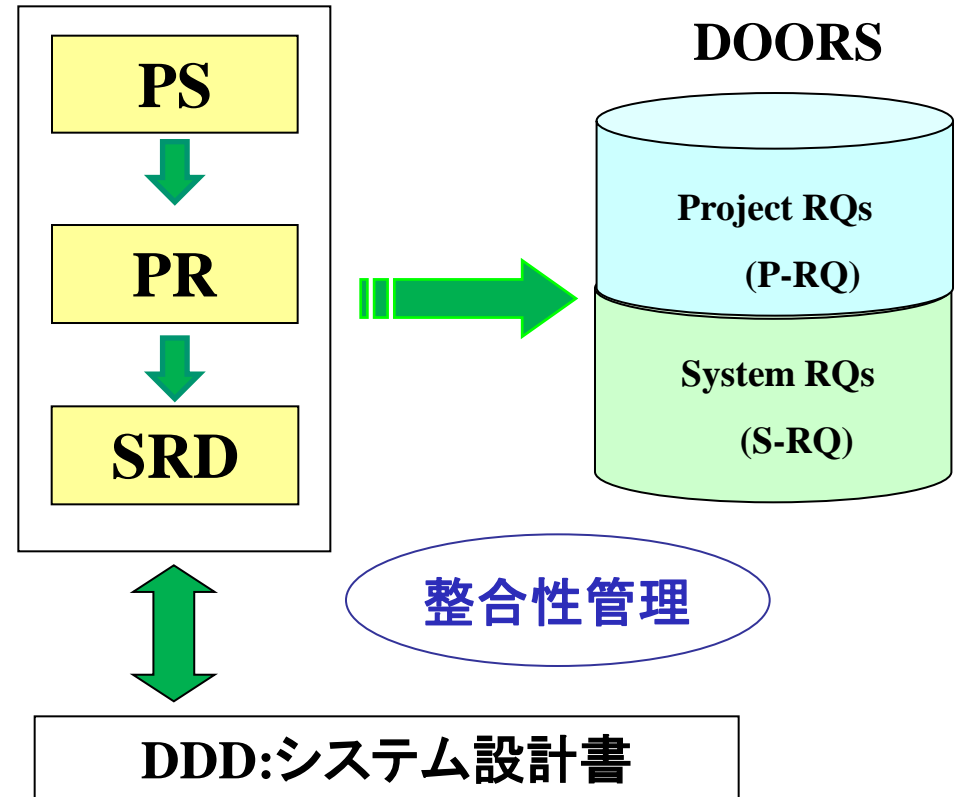
- ・誘導運転において、エネルギー増倍率 $Q \geq 10$ 、300~500秒間の核融合燃焼を達成 ($Q=30 \sim 50$ の可能性を含む設計)
- ・誘導によらない $Q \geq 5$ の定常運転実証を目指す

$$Q = \frac{\text{核融合出力}}{\text{外部入射パワー}}$$

発電プラントでは $Q=30 \sim 50$ の定常運転が必要

工学性能と試験

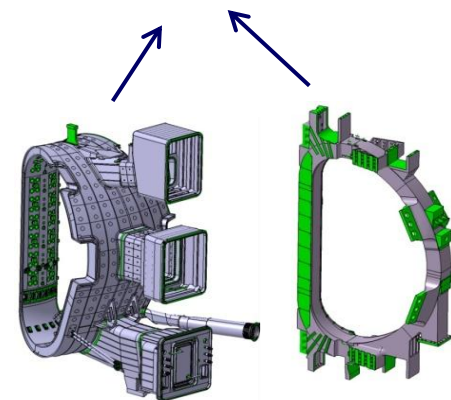
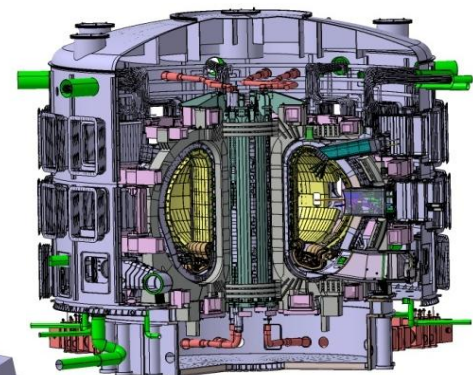
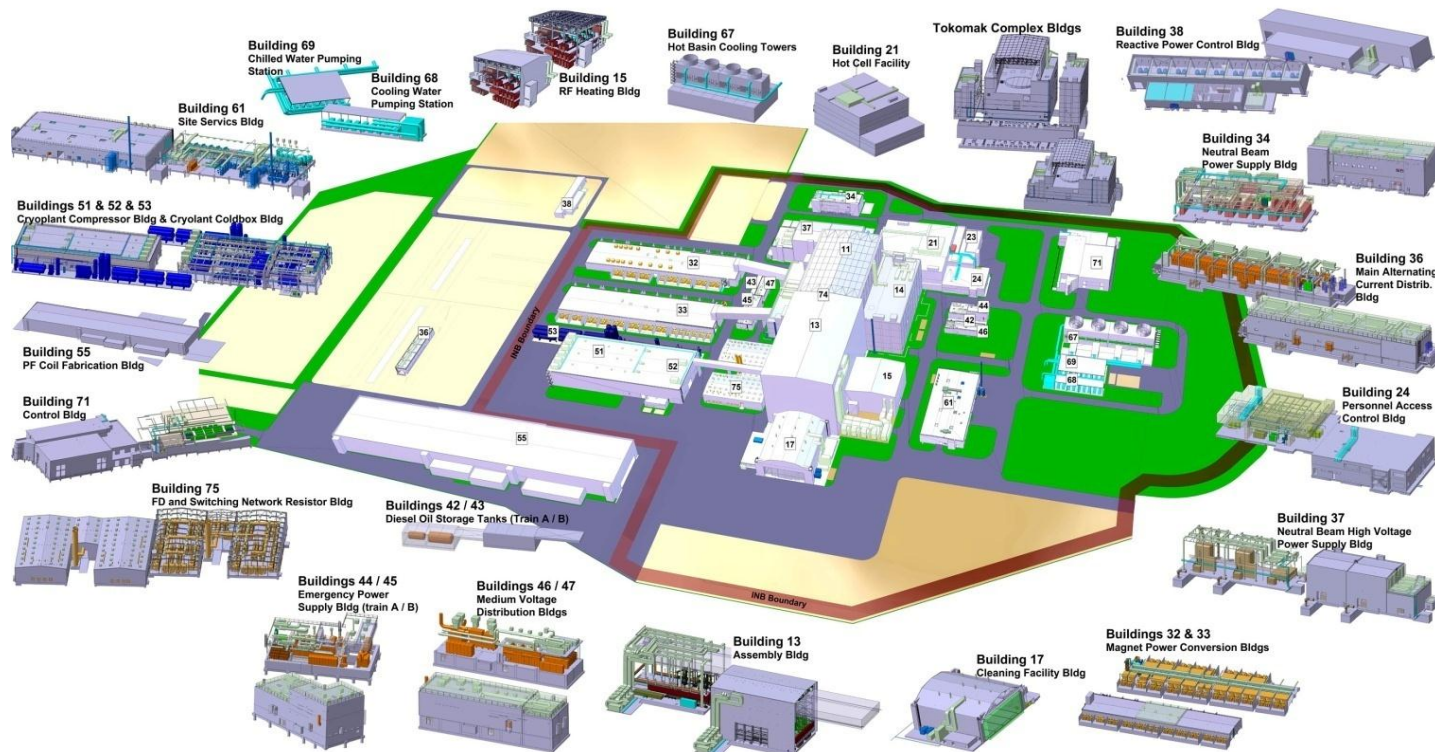
- ・核融合基盤技術を統合し、その有効性を実証
- ・将来の核融合プラントのための工学機器(熱・粒子制御機器等)の試験
- ・トリチウム増殖ブランケットモジュールの試験



- PS:** ITERのミッションに基づく運転 及び性能への要求仕様
- PR:** 上記要求仕様を達成するためのプロジェクトレベルの要求
- SRD:** PRに基づくシステムレベルの要求

構成(取合)管理用3Dモデル (CMM)

- ・ ベースラインに対応した単純3Dモデル (空間、形状、取合)
- ・ システム間の取り合いチェックと管理
- ・ 干渉解析及び公差 (tolerance) 解析



CMMの例

規格・基準：既存及び技術的な妥当性

超伝導コイルに対する新しい構造規格の開発・適用

日本機械学会・ 発電用設備規格委員会組織図



超伝導マグネット構造規格 開発の経緯

平成18年 核融合専門委員会 で
開発開始

平成20年
3月 最終原案
6月～8月 公衆審査
10月 **規格発行**
核融合設備規格
超伝導マグネット構造規格
(2008年版)

平成21年 英訳版作成

平成22年
9月 **規格英訳版発行**

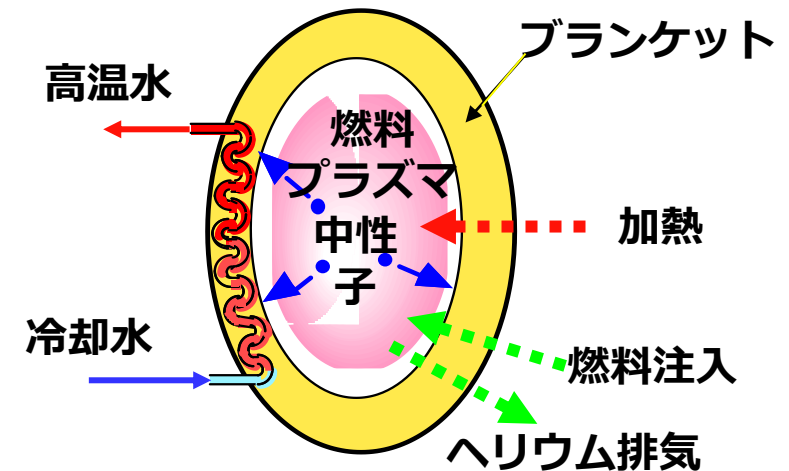
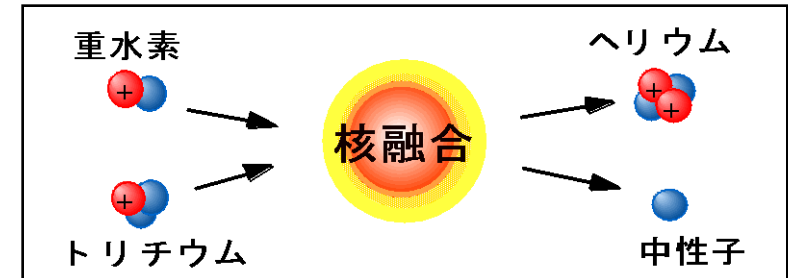
日本におけるITER関連規格・基準類の整備概要

ITER建設に向けて整備した基準類

- ・ ITER施設の安全確保の基本的な考え方
平成12年7月 科技庁原子炉安全技術顧問の会合
- ・ ITERの安全確保について
平成13年8月 原子力安全委員会
- ・ ITERの安全規制のあり方について
平成14年6月 原子力安全委員会
- ・ ITERの安全設計・評価の基本方針、技術基準
平成15年11月 文科省ITER安全規制検討会
- ・ ITER耐震・免震設計基準案
平成15年 原子力安全研究協会
- ・ ITER安全設計・評価の方針案
平成16年 原子力安全研究協会
- ・ ITERの安全審査に関する調査検討
平成17年 原子力安全研究協会
- ・ 核融合設備規格：日本機械学会核融合専門部会
平成20年、22年 超伝導マグネット構造規格
真空容器、真空容器内機器等(検討案)

核融合反応

- ・ 連鎖的に誘発しない：暴走がない。
- ・ 外乱で容易に停止。
- ・ 崩壊熱密度低い。



ITERサイトの建設工事状況(2012年4月)

プラットフォーム
~1kmx400m

PFコイル組立建屋

トカマク複合建屋ピット

2012年2月完成
幅45m、長252m、高17m

PFコイル組立建屋

1
5

2012年4月免震マットの設置完了
(幅87m、長123.6m、深17m)

トカマク建屋の基礎

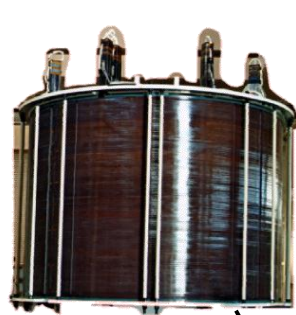
2012年中頃竣工予定
(長さ180m、高さ20m、500人)

ITER機構本部建屋

日本の調達分担機器

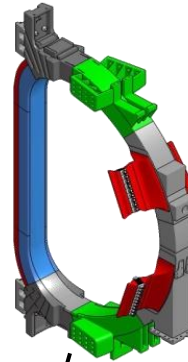
中心ソレノイドコイル用導体

プラズマの立ち上げ、燃焼、立ち下げの制御に必要な磁束を発生する超伝導コイル



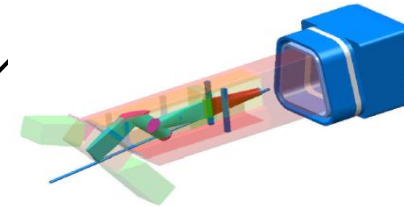
超伝導トロイダル磁場コイル (一部)

高温のプラズマを閉じ込めるための磁場を発生する機器



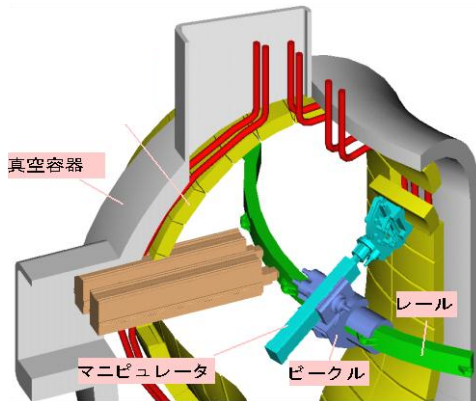
計測装置 (一部)

プラズマ中のイオンと電子の密度や温度、不純物、中性子等の分布を測定する機器



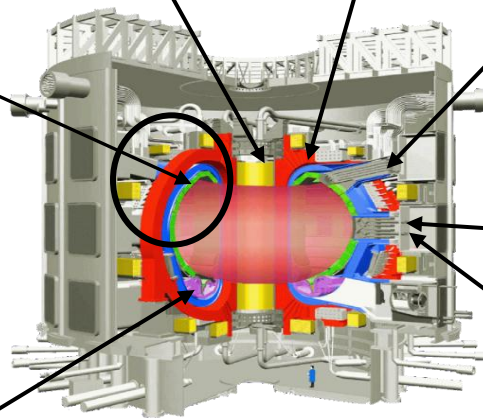
ブランケット遠隔保守機器 (一部)

遮蔽ブランケットの保守・交換作業を行う遠隔操作機器



高周波加熱装置 (一部)

電子サイクロトロン波帯システムの一部：電子レンジの原理で電磁波でプラズマを加熱する装置



中性粒子入射加熱装置 (一部)

高エネルギーの中性粒子をプラズマに入射させてプラズマを加熱する装置



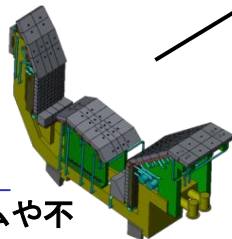
トリチウムプラント設備 (一部)

燃料であるトリチウムの分離回収、精製、処理及びプラズマへの再注入を行うための設備



ダイバータ (一部)

核融合で発生するヘリウムや不純物粒子を排出する装置

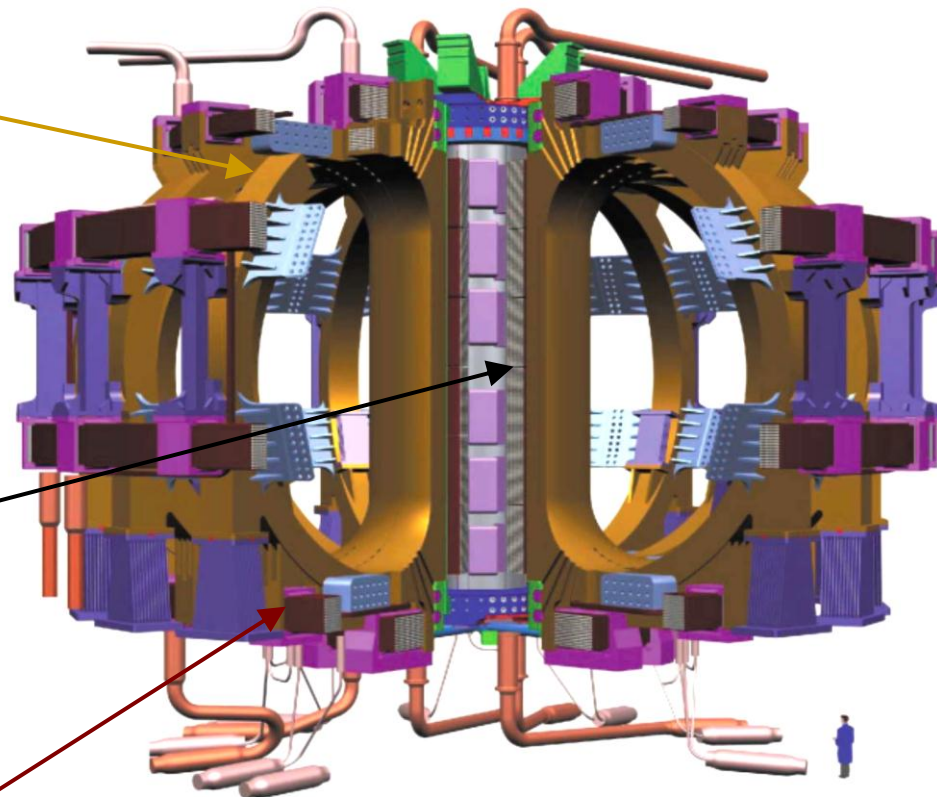


超伝導コイル・システムと日本調達分担

トロイダル磁場 (TF) コイル (周方向に18個配置)

- コイル19個(1個予備)のうち
 - TF導体: 全体の25%
 - TFコイル構造物: 100%
 - TFコイル巻線: 9個分
 - 構造物と巻線一体化: 9個分

直流運転、
11.8T、68kA、
Nb₃Sn導体



中心 (CS) ソレノイド (同じ大きさのコイル6個を積重ねた構造)

- コイル7個(1個は予備)のうち
 - CS導体: 100%
 - CSコイル巻線は米国が担当

パルス運転、
13.5T、42kA、
Nb₃Sn導体

ポロイダル磁場 (PF) コイル (TFコイルの外側に6個配置)

- EU、ロシア、中国が担当
- 日本は調達分担しない

パルス運転
6T、45kA
NbTi導体

コイル・システム総重量	10,000トン
Nb ₃ Sn素線重量	550トン
NbTi素線重量	250トン
TFコイル容器重量	3,600トン

TF導体：実機導体の約8割製作終了

素線製作

(1~20km/本)



素線断面
(φ 0.82mm)



ポビンに巻
かれた素線

撚線製作



ポビンに巻
かれた撚線

超伝導線：900本
銅線：522本
(415m, 760m)



導体製作



- ・ 760 m (7.3ton) x 24本
- ・ 415 m (4.0ton) x 9本

950m

導体製造工場全景
(竣工：H22年1月12日)



43.7mm

日本分担分33本のうち

- ・ 素線26導体分 (81%)
- ・ 撚線26導体分 (79%)
- ・ 導体26導体分 (79%)

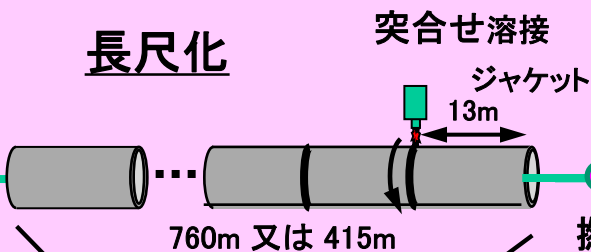
の製作を完了

(H24年6月末現在)

ジャケット(13m/本)



長尺化



撚線引込み
圧縮成形
曲げ成形

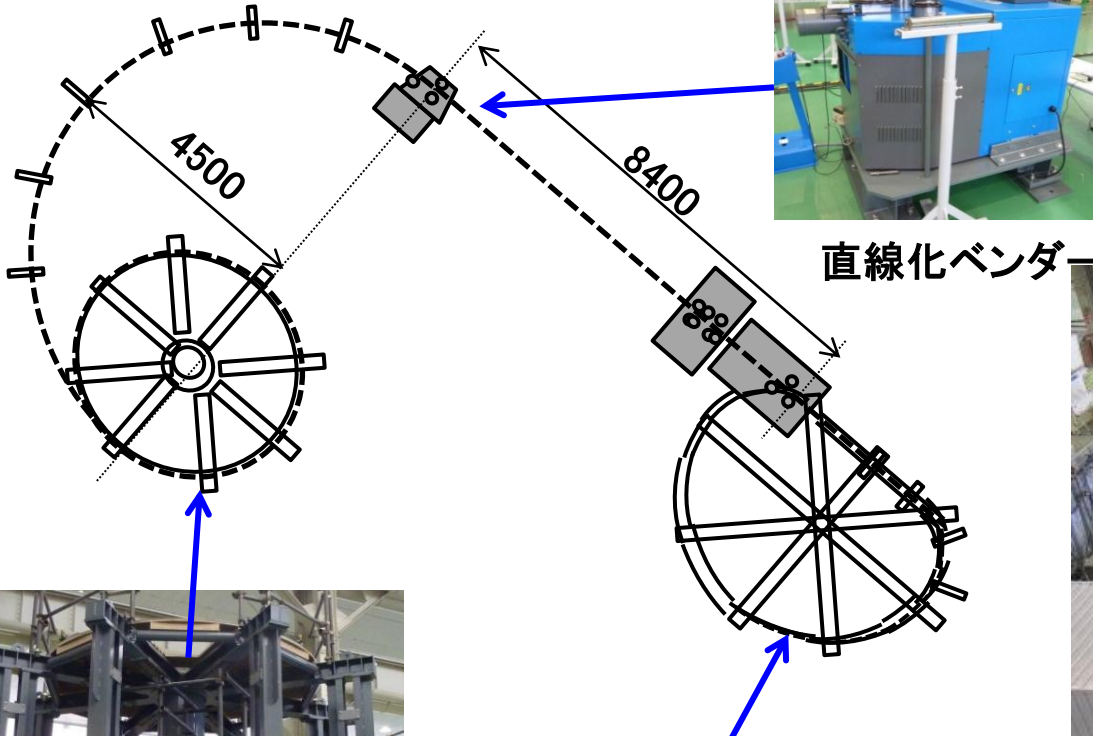


完成した導体

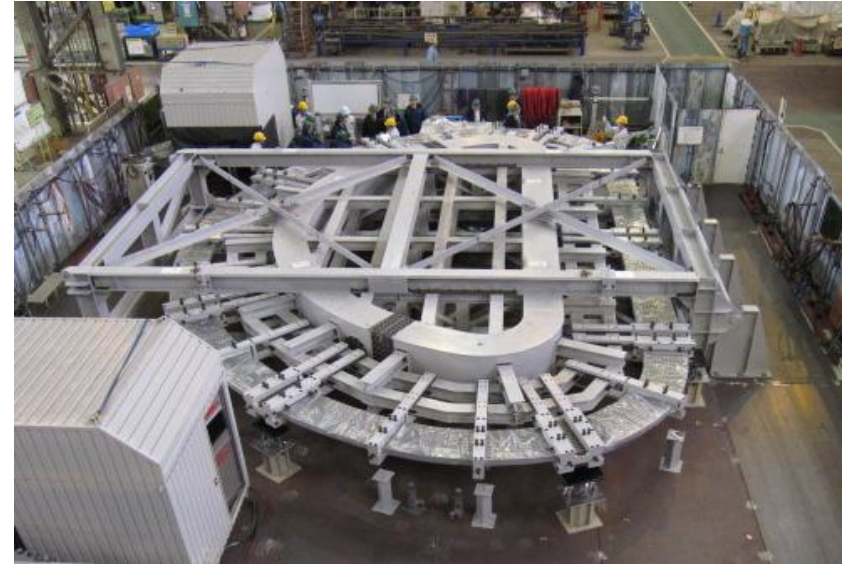
(ITER計画で最初の物納)

TFコイル: 実規模試作終了、実機製作開始

1/3規模コイル巻線
高精度巻線の見通し



H24年度から実機
TFコイル製作開始



1/1規模ラジアル板
製作の見通し



スプール



巻線受け台

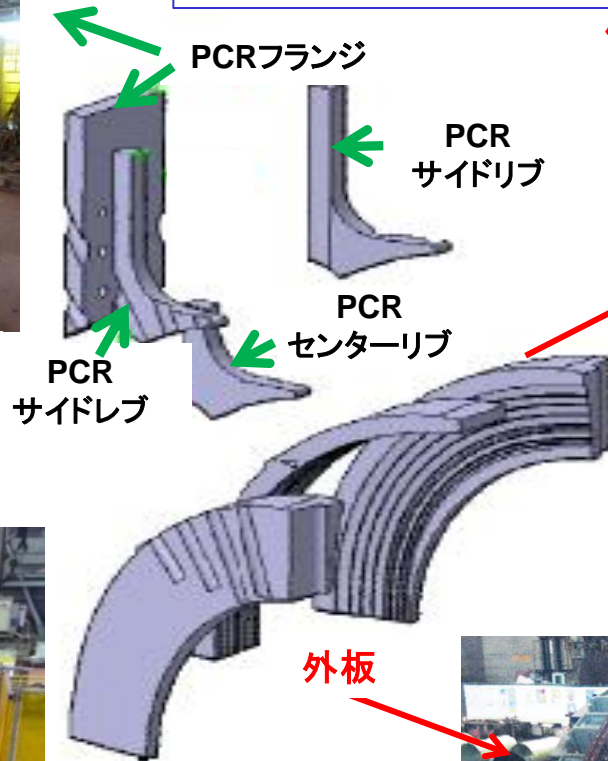
TFコイル構造物: 実規模試作終了、実機製作開始

H24年度から実機TF
コイル構造物製作開始

A1
セグメント



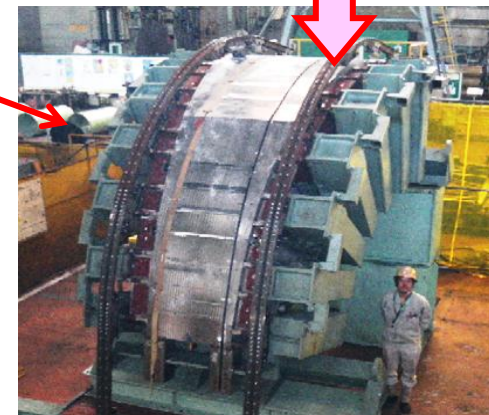
プリ・コンプレッション・
リング (PCR) フランジ



側板



外板



ダイバータ垂直ターゲット:プロトタイプ製作・試験

段階的な調達(4つのStage)

Stage 1: 実規模プロトタイプの製作

- ・ クオリフィケーション(溶接部、ロウ付け部の強度試験等) <=H22年度
- ・ プラズマ対向ユニット/支持構造体製作
- ・ 試験検査
 - 非破壊検査(UT、RT、赤外サーモグラフィ)
 - 高熱負荷試験(エフレモフ研@ロシア)
 - 最終受入検査(JADA/欧州サイト)
- ・ 実施期間: 2009年6月~2013年12月

↓ ITER機構による承認

- Stage 2: 実機ターゲット6カセット分(10%)
- Stage 3: 実機ターゲット18カセット分(30%)
- Stage 4: 実機ターゲット36カセット分(60%)

※Stage 2~4の実施期間:

2014年1月~2020年6月

-炭素複合材部: クオリフィケーション

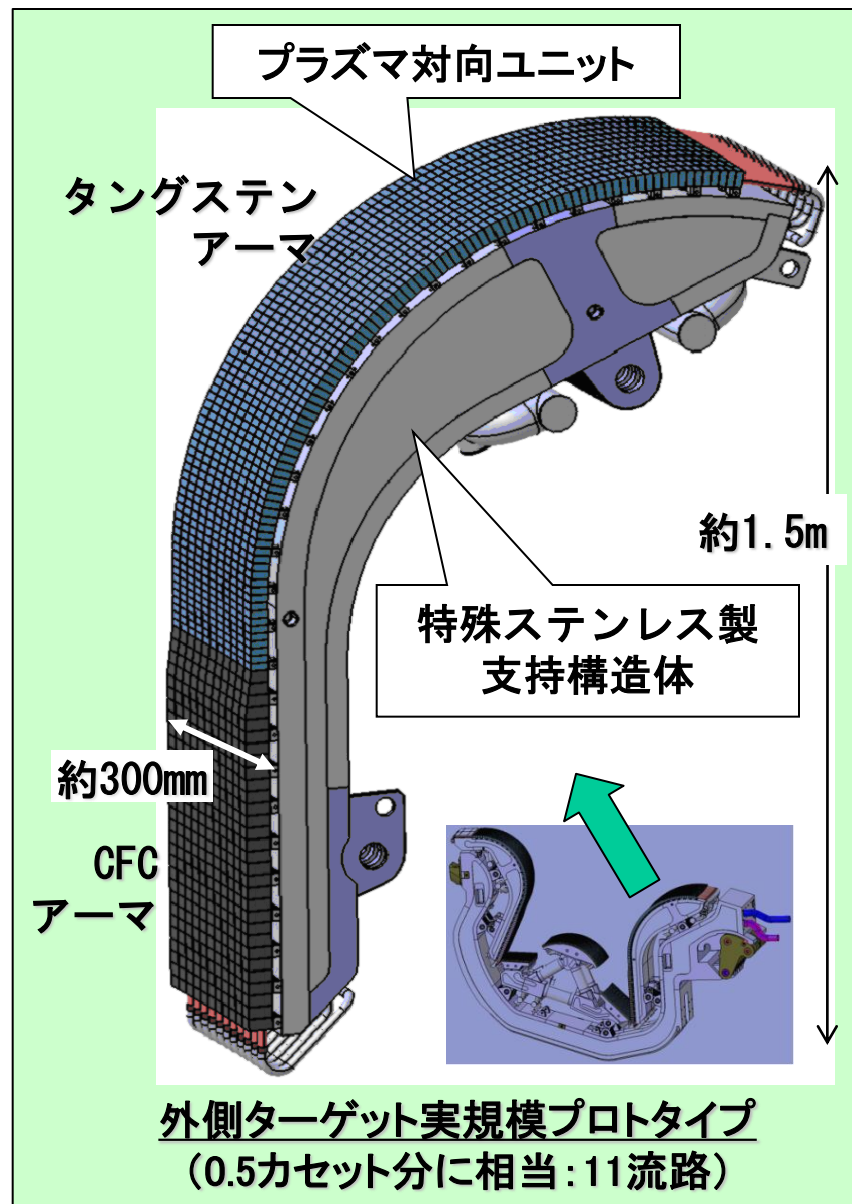
$20\text{MW}/\text{m}^2 \times 1000\text{回} + 10\text{MW}/\text{m}^2 \times 1000\text{回}$

-タングステン部: クオリフィケーション

$5\text{MW}/\text{m}^2 \times 1000\text{回} + 3\text{MW}/\text{m}^2 \times 1000\text{回}$



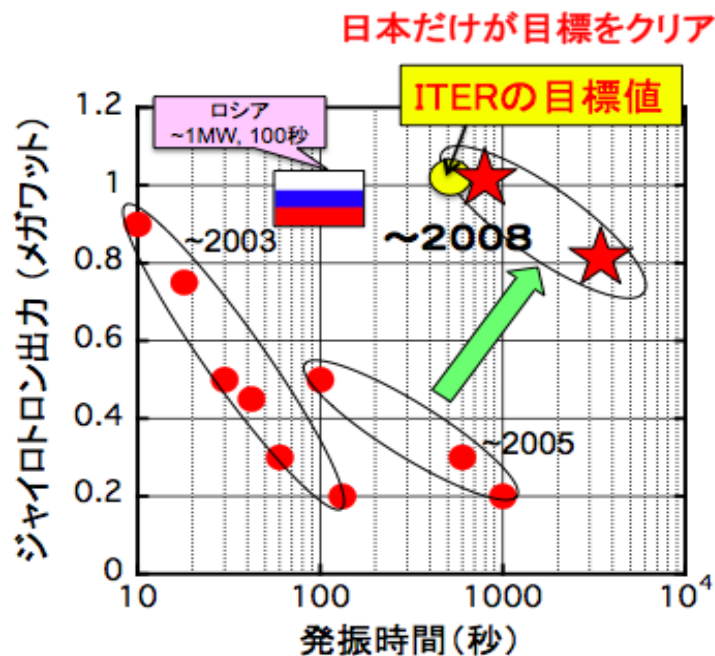
H23年度



加熱・電流駆動装置：実機調達の準備

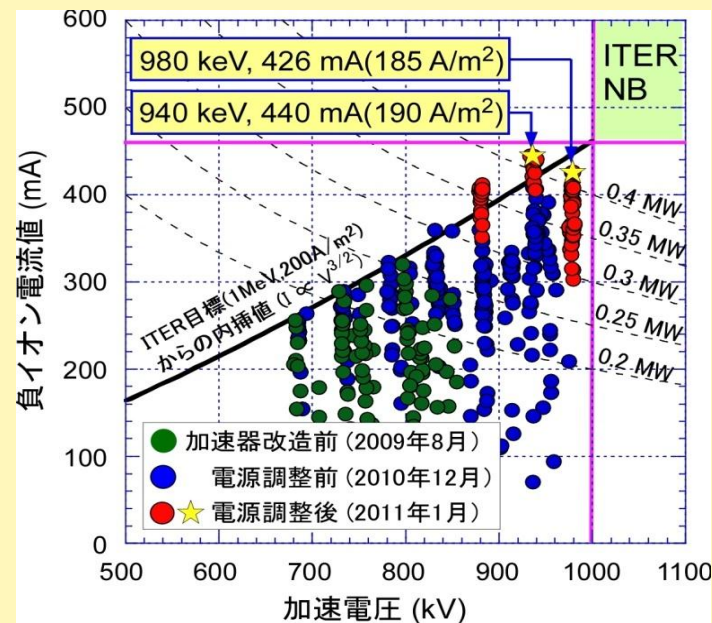
ITER用ジャイロトロンの開発

- ◆ ITER要求値：周波数 170 GHz、出力 1 MW、>500 秒、効率 >50%
- ◆ 170GHz、1MW、800秒、効率50%以上を達成
- ◆ ITERの要請に基づき、複数周波数(170&137GHz)ジャイロトロンを用い、同一の伝送系で高周波伝送試験を実施。



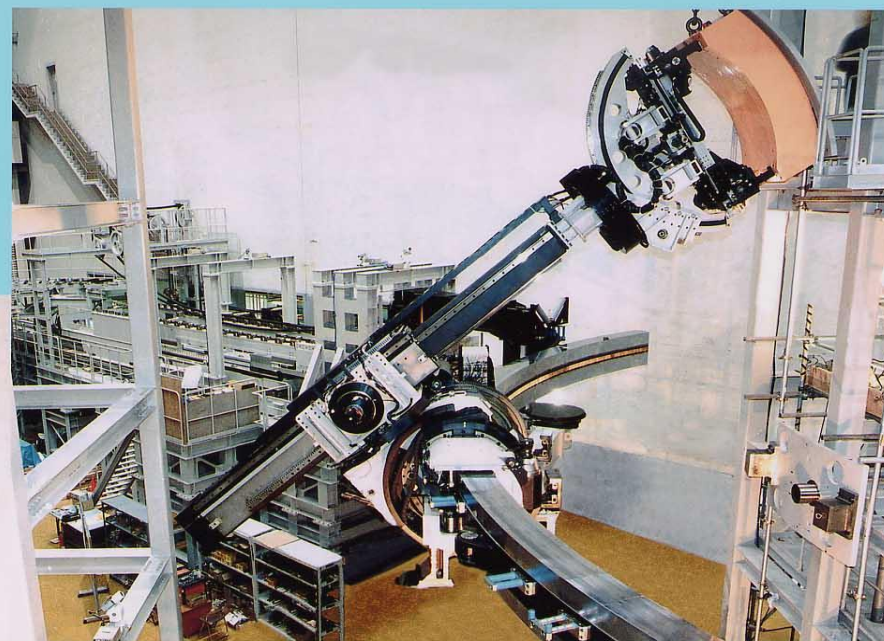
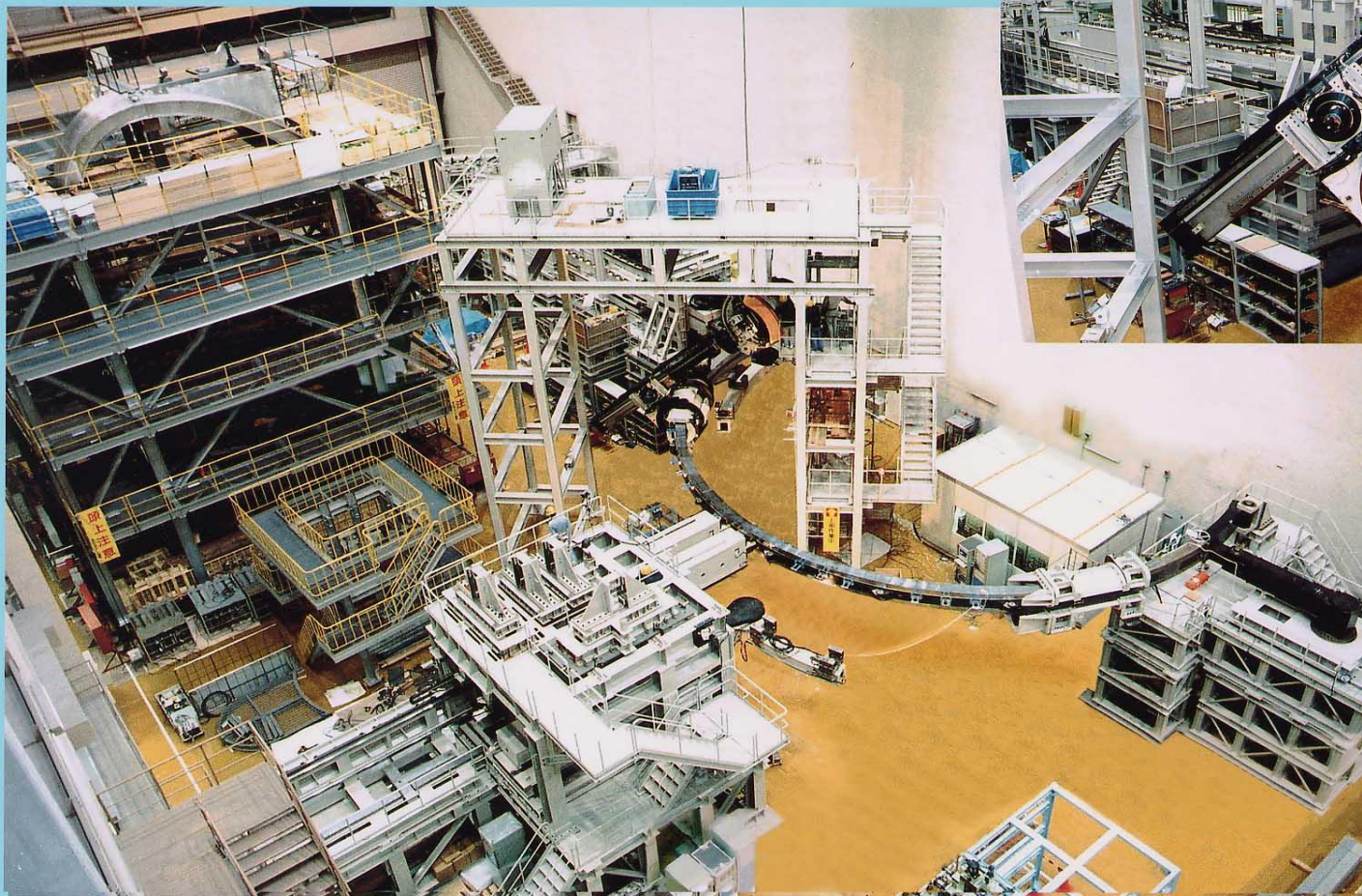
ITER用粒子入射装置の開発

- ◆ ITER要求値：1 MeV, 40 A (200A/m²), >400 s
- ◆ 980 keV、185 A/m² の負イオンビーム加速を達成。
- ◆ 耐電圧改善の成果をMeV級加速器に適用。部品を改良しビーム偏向を補正。3次元電子輸送解析により、負イオンの空間一様性を改善。



ブランケット遠隔保守機器

- 実規模での性能実証 -
重量物(4ton)の高精度ハンドリング



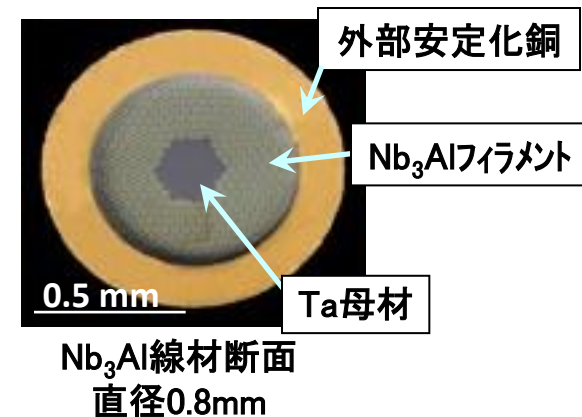
調達取決締結2011

- ・製作設計
- ・詳細仕様(R&D)
- ・実機製作・試験

工学技術の展望：超伝導コイル

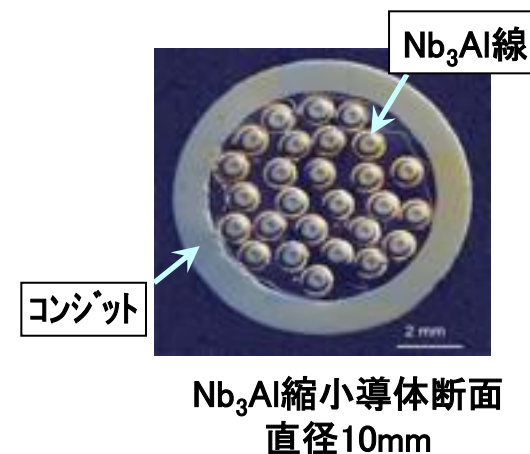
□ 原型炉用超伝導コイルに向けた課題

- ◆ 高出力と炉のコンパクト化両立のため高磁場
 - ◆ Nb₃Al超伝導線材を用いて16T程度を実現する案が、現時点で有力。
- 新たな導体製作技術開発



□ 課題の解決へ向けた取組み

- ◆ ITERを通して核融合用大型超伝導コイル製作技術を確立
- ◆ Nb₃Al導体については、共同研究等で他の研究機関と協力
- ◆ 高温超伝導線材については、フィーダー等の周辺機器への応用



工学技術の展望:ダイバータ

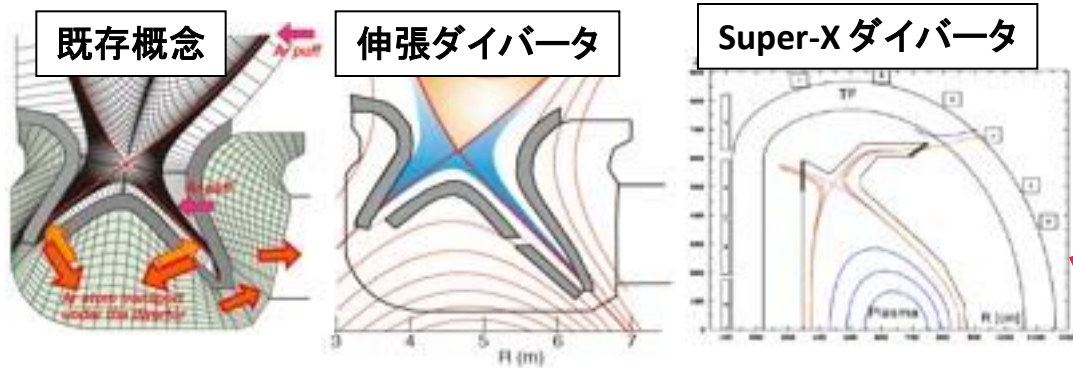
原型炉ダイバータに向けた課題

- ダイバータの熱・粒子負荷をITER以下に抑えるためのダイバータプラズマ制御技術
- 想定される熱・粒子負荷、中性子負荷に耐える原型炉用ダイバータの製作技術
- プラズマへの影響も含むプラズマ、工学両面の整合のとれたダイバータ概念

課題の解決に向けた取組み

炉設計研究

- 幅広いダイバータ概念の設計検討
- ダイバータシミュレーション、概念の絞り込み



ダイバータ概念、プラズマ制御、工学開発の整合については、幅広いアプローチで実施

JT-60SA

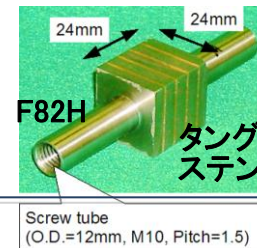
ダイバータプラズマ制御技術

- ダイバータ制御技術の確立
- シミュレーションコードの検証
- 原型炉用金属ダイバータの試験

工学技術開発

原型炉用ダイバータの開発

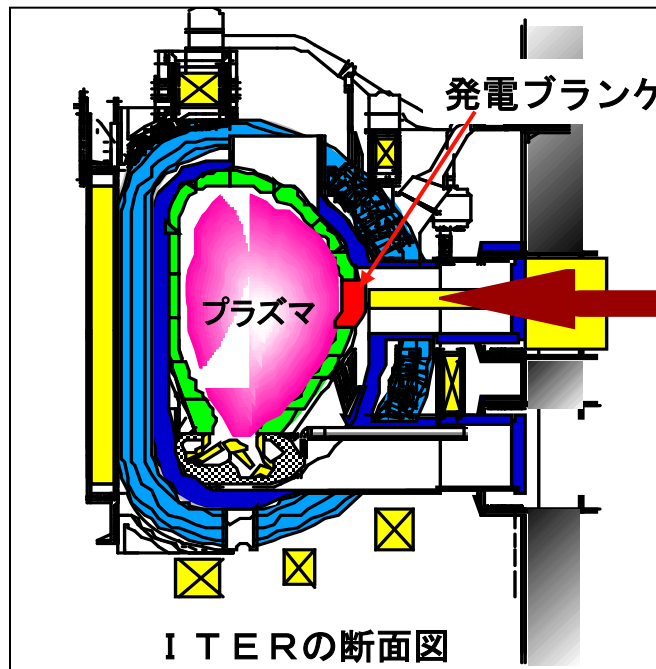
- 対向材接合技術
- 熱・粒子負荷試験



工学技術の展望:ブランケット

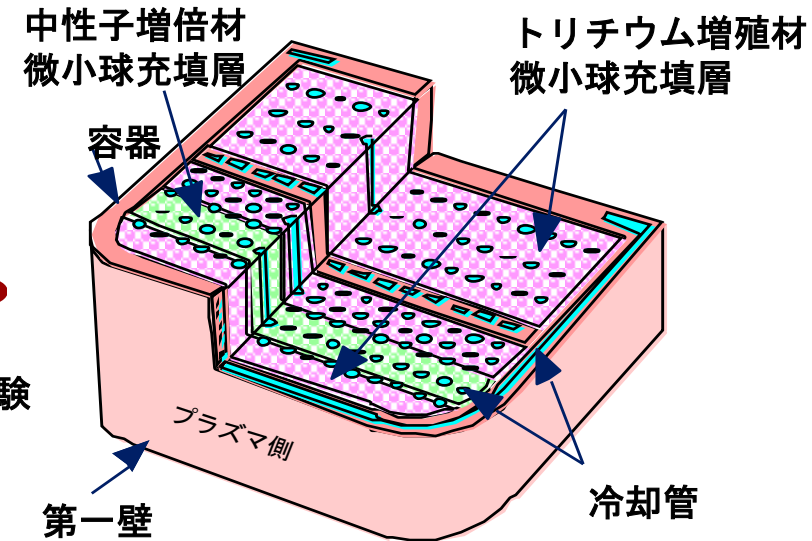
原型炉ブランケットに向けた課題・取組

- ①放射線遮蔽、熱エネルギーの取出、トリチウム増殖:ITERを用いたトリチウム増殖ブランケット性能試験(参加極が独自に開発)、2013年調印、2017年~製作、2022~試験
- ② 高耐照射性能、高温強度を満足する構造材料の実用化:幅広いアプローチ



ITERを用いた
発電ブランケットの工学試験

- ・トリチウム増殖特性
- ・発電特性



テストブランケットモジュール (TBM)

ブランケットの役割

- ・熱エネルギーの取り出し (発電機能)
- ・燃料となるトリチウムの生成 (増殖機能)
- ・放射線遮蔽 (遮蔽機能)

TBMの構成例

- ・トリチウム増殖材 (Li_2TiO_3 微小球)
- ・中性子増倍材 (Be微小球)
- ・構造材 (低放射化フェライト鋼)
- ・冷却材 (水: 出口温度320~510C)

まとめ

- ITERでは、技術スコープ、スケジュール、コスト及びプロジェクト管理に関するベースラインを設定、サイト整備及び調達活動が本格化、2020年1stプラズマ、2027年DT運転開始予定。
- プロジェクト管理計画に基づくスケジュール管理、品質保証、取合管理、リスク管理等の方法は、次ステップでのシステム・エンジニアリングに有効。
- ITER建設のために策定した安全確保の考え方、安全設計・評価の方針、各種基準類は、次ステップの規制や技術基準を検討する上での基盤として活用可能。
- ITERで開発した技術は、次ステップの技術的見通しを示すと共に、高度化への基盤を提供。

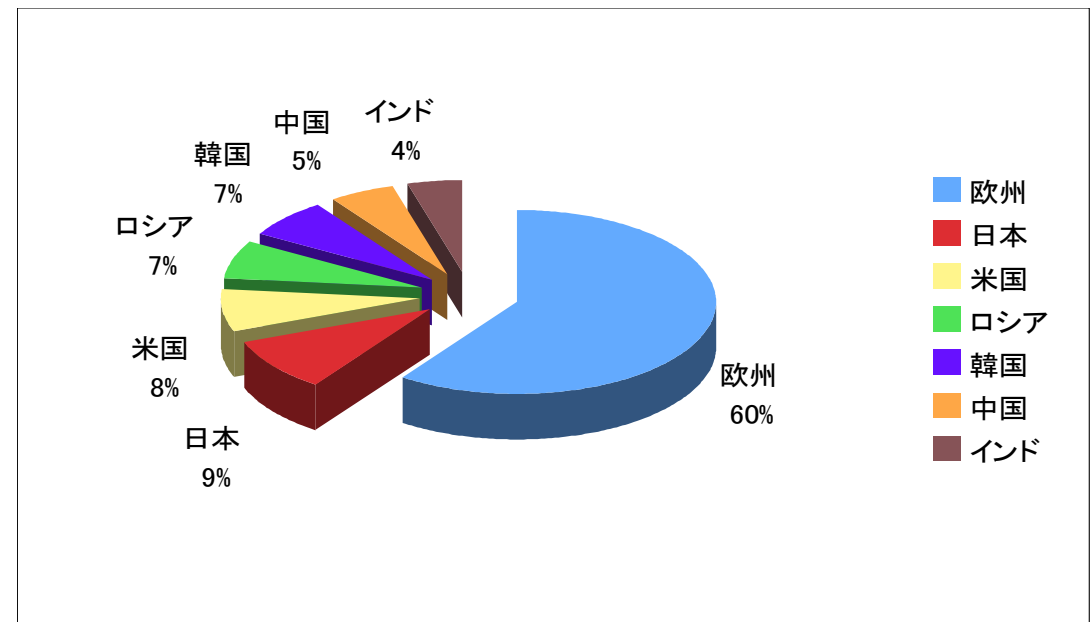
ITER機構職員数の状況

- 2012年3月末時点で、ITER機構は専門職員数303人、支援職員数167人で、合計470人（核融合の専門家に加え、一般機械、電気、プラント工学等を専門とする技術者や事務職の採用）

参加極ごとの職員数(2012年3月末)

参加極	専門職員	支援職員	合計
欧州	184	123	307
日本	28	7	35
米国	23	10	33
ロシア	20	3	23
韓国	21	5	26
中国	14	4	18
インド	14	15	29
合計	304	167	471

専門職員の各極比率(2012年3月末)



- 2012年3月末時点で、日本からの人材は、専門職員28人
このうち、シニア級以上は9人。支援職員7人

ITER機構職員募集への支援

JAEA那珂ITERのHPに募集情報を掲載

<http://naka-www.jaea.go.jp/ITER/index.html>

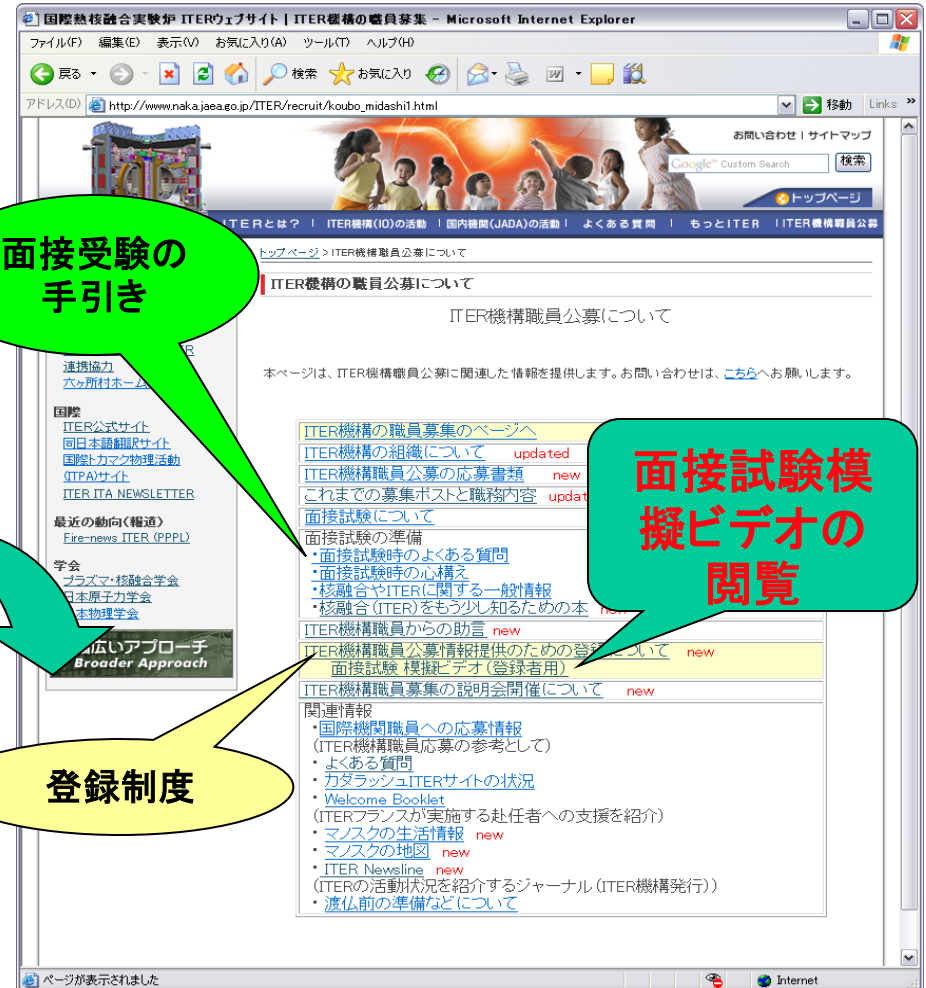
http://naka-www.jaea.go.jp/ITER/recruit/koubo_midashi1.html

koubo_midashi1.html



面接受験の手引き

登録制度



- ・随時、ITER機構職員の募集情報を更新
- ・HPには、応募案内に加え、面接受験の手引きを掲載
- ・公募情報の直接提供希望者のための登録制度を昨年6月から開始、現在204名が登録