

ここまで進んだ核融合エネルギー研究
50万キロワットの熱出力の発生を目的とする核融合実験炉計画 ITER について
(パリティ原稿)

2011年10月

ITER 機構 本島 修 機構長

カダラッシュ・フランス

現在フランス南プロバンス地方のカダラッシュで核融合実験炉計画 ITER の建設が急ピッチで進んでいる。装置本体の断面図を図 1 に示す。ITER 計画は、重水素と三重水素を燃料とする D-T 燃焼による核融合 (fusion;フュージョン) 反応の点火の実証を 2027 年に目指し、熱出力 50 万キロワットを目指している。装置完成は 2019 年から 2020 年の間である。フュージョンの実現に必要な科学・技術の開発と実証を目指している。燃料の重水素は海水の中に通常 0.03% (重量比) 含まれるため、言わば無尽蔵のエネルギー源の可能性を秘めた新しいエネルギー源の開発計画である。不幸にして起こった福島原発の事故を受けて、核融合エネルギーの安全性の実証という観点がより重みを増してきているが、フュージョンでは原発の燃料であるウラニウムを使わないため、同様な事故は決して起きず、その安全性の高さの評価が今後定まっていくことが期待できる。

ITER 計画は、プラズマ物理学を中心とする物質の第 4 の状態を調べるサイエンスと超伝導・材料・真空・大電力制御等の最先端の技術を統合する壮大な科学技術プロジェクトである。2007 年に中国、EU、インド、日本、韓国、ロシア、米国の 7 地域・国の参加の下、正式にプロジェクトがスタートし、コスト増、設計の遅延等の問題から一時計画が停滞した時期があったが、今年の 7 月に計画のベースラインが ITER 理事会で承認されて名実ともに建設期に入った。私はそれと同時に機構長の就任要請を受け、即刻カダラッシュに赴任した。

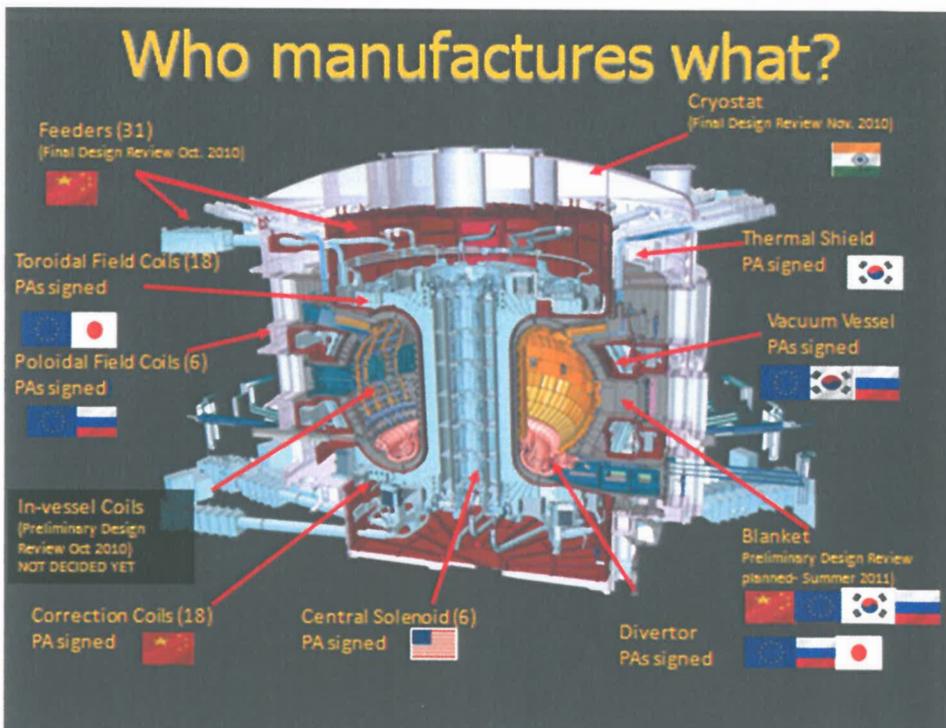


図 1 ITER 本体の鳥瞰図と各国の分担；装置基本スペックは、ドーナツ半径 $R=6.2$ m, 断面半径 $a=2.0$ m, プラズマ電流 $I_p=15$ MA, 中心磁場 $B_T=5.3$ T, 総重量 23,000 tons, プラズマ体積 815 m³, エネルギー 350 MJ。

ITER 本体の鳥瞰は図 1 に示すように、ドーナツ型の真空容器の周りに超伝導のトロイダル磁場(TF)コイルとポロイダル磁場(PF)コイル、中心にトランスの原理で 1500 万アンペアの電流を流すための中心ソレノイド(CS)コイルが設置されて、全体がクライオスタットの中に装着される。もちろん本体の周りには電源装置、真空装置、液体ヘリウム発生装置、制御装置、加熱装置、冷却水装置、トリチウム除去装置などのプラント機器が設置されて全体が完成する。図 1 には各国の分担を大きな

装置について示した。これらの装置の製作では物納方式がとられ、最初のプラズマまでの建設期に ITER で必要な装置のほとんどを製作して据え付ける。ITER の基本スペックは、ドーナツ型のプラズマの半径が 6.2 m, 断面の半径が 2.0 m, プラズマ電流が 15 MA, 中心磁場が 5.3 T, そして全体の重量が 23,000 トンという巨大な科学技術の塊である。部品は数え方にもよるが、約 2 万点もあり、各国と結ぶ契約の数は 128 にもなる。現在までに 7 極と締結した契約は 60 にのぼり全体コストの 71.5%に達している。これも ITER 計画の進展を示す一つの側面である。

ITER 本体の中心で強い磁場に閉じ込められてフュージョンを起こすのは一億度を超すプラズマである。水素が電離してプロトンと電子からなる高温のプラズマは高エネルギー密度状態を作り出し、非常に強い非線形現象を伴う複合複雑系の典型であり、未だに解けていない問題がいくつもある。別の言葉でいえば遠非平衡状態にあり、いわゆる渦つまり、乱流の集合体である。磁場中のプラズマが不安定を起こすと磁力線と強い相互作用を起こし、磁力線を切断したり再結合したりする。その際、典型的な緩和現象が起こりプラズマは自己組織化といわれる現象によって別の安定な状態に移ろうとする。であるから、これらの難しい問題は今でも多くの若手の研究者の興味を引き付けている。ITER の実験では、プラズマを詳細に観察してその温度や密度の変化をレーザー、サイクロトロン放射、軟 X 線などを使う計測の最新技術を駆使して 2 次元、3 次的に計測して真理に迫るが、今急速に進んでいるイメージングサイエンスの分野にも大いに貢献する。ITER は、ビックサイエンスとして大きな使命も持っている。

ITER 計画の物理面のミッションは、明確に定義できる。それは、プラズマの磁場中での動きつまり輸送現象、電磁流体的な安定性、周辺部の制御、そしてフュージョンによって発生するヘリウム粒子つまり、高速のアルファ粒子の物理等の解明である。現在までの解析で、H-mode と呼ばれる良好な閉じ込めを実現するために、5 テスラの強い磁場での実験で 73MW の加熱パワーが必要になることがわかってきた。1500 万アンペアの電流が流れるプラズマのエネルギーは 350 メガジュールにも達し、種々の不安定性の制御のための物理の理解と制御技術の開発が必要である。そして、この実験計画を支え、実現するために超伝導、真空、材料、加熱そのほかの巨大技術が必要になる。種々の理論と実験研究の結果、科学的精度も随分上がり、 $Q=10$ と $Q=5$ を達成できる予想値が確定してきた。 Q は加熱パワーに対するフュージョンの熱出力の大きさである。又、 $Q>5$ の条件を 1000 秒以上保つ運転シナリオ、完全に非誘導つまり、必要な電流を外部からの駆動と自己電流で補う方式等も確立されてきている。

もう一つ重要な決定事項がある、それは、真空容器の底部に設置されるダイバータと呼ばれるプラズマのエンド処理装置である。中心で 2 億度の温度を持つプラズマも数秒で外に出てくる。それまでに温度は低くなるがそれでも数万度以上ある。これを最終的に受けて冷却するのがダイバータである。これまで特に熱が集中する部分については、炭素複合材を使う方向で検討されていたが、D-T 反応を起こす 2027 年以降のフェーズではトリチウムの吸収量が総量 1 kg を超えるため、安全基準から炭素複合材は使えず、タングステン(W)を使う計画だった。しかし、これは問題の先送りに他ならないため、W を材料として使うダイバータを最初から使う案で計画を見直した。慎重論のある中、大きな決断だったが、ITER のリスクとコストを下げるために必要な決定であったと考えている。今イギリスのカラム研究所にある JET という装置で W を使った実験が始まり、順調に進展しているから、近々実験デ

ータもこの決定をサポートしてくれると期待している。

今各国で装置・機器の製作が始まり、サイトの建設が急ピッチで進み、ITER 計画が大変 exciting なフェーズに入っている。図 2,3 で装置とサイト建設の進展振り写真を写真でお見せる。



図2 建設の進む、トロイダル磁場コイルの超伝導導体を収納するラディアルプレートの製作現場 (EU)。



図3 建設の進むサイト建屋

Photo 1: ITER オフィスビル: 来年夏に竣工予定。5層で全長 180 m。職員のオフィス、会議室、講堂、食堂などを含む。
 Photo 2: ポロイダル磁場 (PF) コイル建屋: 全長 257m。ITER サイトの 39 の建屋のうちの最初の建屋で、全ての PF コイル (6ヶ) を製作する予定。ITER 創立記念日の写真を添付。
 Photo 3: 本年8月9日に、トカマク建屋のコンクリート打ちを開始。耐震構造物の基材が下部に見える。

図 2 は TF コイル用超伝導導体を装着する TF コイルの中の溝状のステンレス構造物であり、ラディアルプレートと呼ばれる。すべて機械加工で作られ、溶接されて全体を構成する。フランスで製作された。図 3 は ITER サイトでの建物の建設の様子である。オフィスビルは来年夏に竣工予定であり、現地での PF コイルを製作するための PF コイル建屋はほぼ完成している。ここで先日 ITER 創立記念日を祝った。職員がほぼ全員集まったのは最近になく、写真を付けた。小さいが、一番前中心にいるのが私である。そして、ITER の本体棟である。20m のピットはすでに掘削を終え、1.5m 厚さのコンクリート基盤が建設されている。この上に耐震構造物が設置され、建物全体がその上に乗る設計であり、図中に示した。

このように ITER 計画は急速に前進している。50 万キロワットの大きな熱出力を得るために、5 万キロワットの加熱パワーを使うから ITER はパワーの増幅装置だと言える。そして大変高額な予算を使う。しかし、ITER は次の実証型フュージョン発電所の実現に必要なステップであるから、十分に投資価値のあることをいろいろな機会に皆さんの支援を得るために訴えていきたいと考えている。

最後に、私はより一層の若手の皆さんの活躍に期待している。世界中から若い技術者・研究者・事務職の人たちに集ってもらい、より強力に ITER 計画を推進したい。そのため、今後も若手の皆さんにより一層 ITER の門戸を開いていくつもりである。

ITER 未来のためのエネルギー

核融合実験炉

500 MW の核融合エネルギーの達成 → 燃焼
核融合エネルギーの科学的、技術的な実現可能性及び安全特性の実証



$R=6.2\text{ m}$, $a=2.0\text{ m}$, $I_p=15\text{ MA}$,
 $B_T=5.3\text{ T}$, 23,000 tons

カダラッシュュに太陽を

本島 修
ITER機構長



1.4 km x 1 km

なぜITER?

ITERはトカマク方式の核融合実験炉

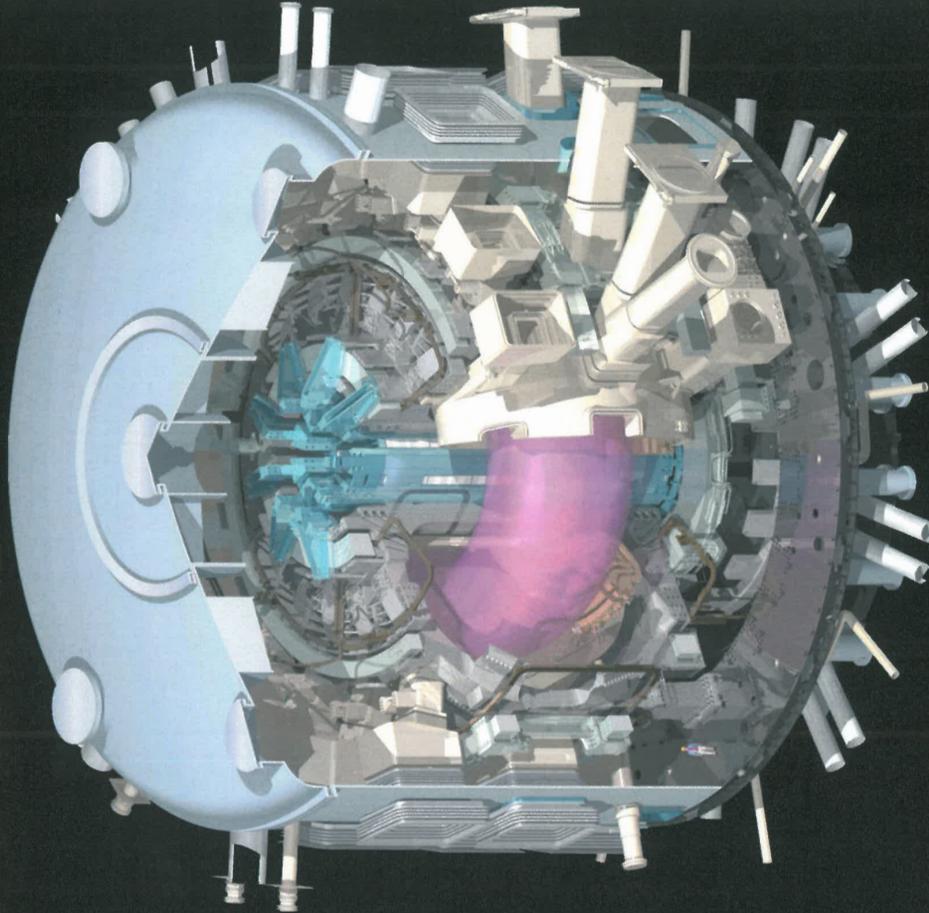
ITERでの核融合反応で発生するエネルギーは、投入するエネルギーの10倍

インプット50 MW → アウトプット500 MW

ITERはエネルギーを増幅する

ITERは核融合商業炉のための必要なステップ

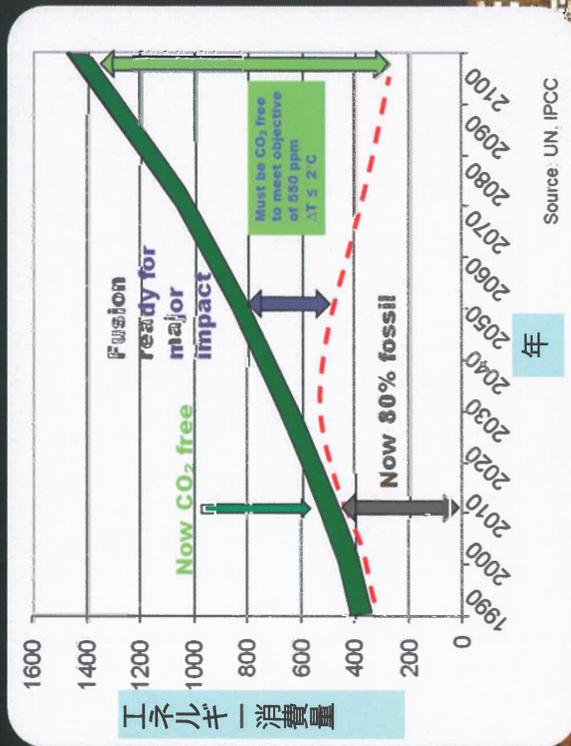
ITERは核融合炉の実現可能性と重要な技術の総合的確立を実証する。



カダラツシユに太陽を!

エネルギー課題

世界のエネルギー消費量は1973年と比べて50%増加。2030年までにはさらに60%増加する見込み。(国際エネルギー機関: IEA)



考えられる将来の選択肢

- 化石燃料: CO₂の回収と貯蔵技術の開発が必要
- 再生可能エネルギー: 生産、貯蔵技術のブレイクスルーが必要

CO₂を発生しないエネルギーを大量に生み出す必要がある

- 核分裂: 国民理解が課題
- 核融合: 科学的・技術的実現可能性の実証が必須

ITER 世界規模の挑戦, 世界規模の対応



- ITER参加メンバーは、2005年6月28日、カダラッシュにおけるITERの建設に全会一致で合意
- 2006年11月21日には、パリ・エリゼ宮においてITER協定を署名

ITERには、世界の人口の50%以上と世界のGDPの80%以上を占める7極が参加している。

China EU India Japan Korea Russia USA

ベースライン・スケジュール

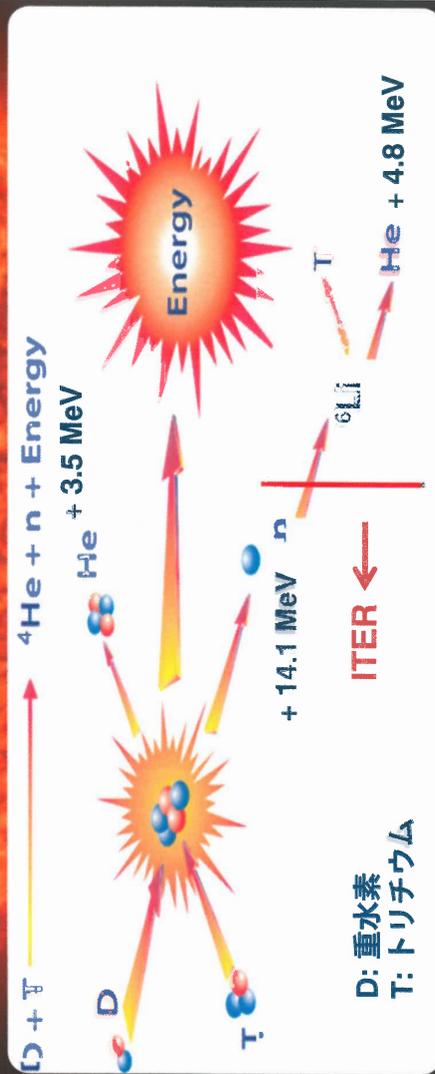
- 2019年11月 (早期完了)、ファースト・プラズマの達成を持って建設期間の完了;
- 日本における地震災害による遅れを極力抑える対策の必要性、
- DT運転開始の目標時期は、2027年3月

ベースライン・コスト

- ITERの総建設見積額は、4584.7 kIUA (1 kIUA = ~ 1.55M€);
- 追加費用115.3 kIUA を加え総建設見積額を 4,700 kIUA にキャップ。
- 更なるコスト削減が必要

宇宙における核融合

- 太陽や星は核融合工ネルギーによって輝いている
- この核融合反応では、2つの軽い原子が結合し、より重い原子に変わり、エネルギーを放出している
- 磁気核融合は、同様の反応を地球上で再現することを目指す



地上に太陽を

1グラムの重水素・トリチウム燃料は8トンの石油に相当する。

- 重水素+トリチウムプラズマを1億度以上に加熱する。
- 強力な磁場により、熱いプラズマが壁に触れないようにする。
- “高エネルギー”ヘリウム原子核(アルファ粒子)自己燃焼プラズマ。
- 中性子がエネルギーをリチウムブランケットに運ぶ。
- 核融合発電所では、従来型の蒸気発生器、タービン及び発電機を用いて熱を電気に変換する。

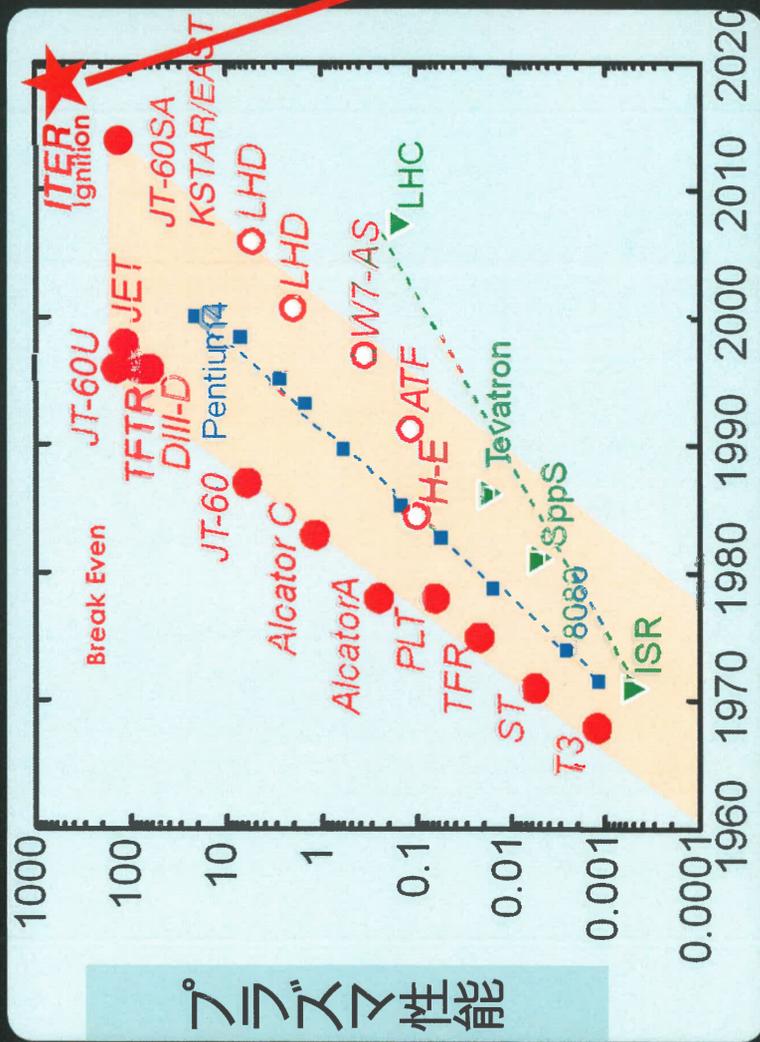
プラズマとは？

- プラズマとは、物質の4番目の状態
- 最先端の複雑系
- 高エネルギー密度状態
- 自己構造形成
- プラズマ物理の探求及び核融合工学の統合が必要。

“ n τ T ” (密度、エネルギー閉じ込め時間、及び温度)の積が必要条件
 $n > 100$ 兆個/cm³, $\tau > 1$ 秒, $T > 1$ 億°C

核融合研究開発の着実な進展

1958年に第2回IAEA核融合エネルギー会議が開催されて以降、世界中の研究者がプラズマ物理を研究し、核融合技術への挑戦をしてきた。



加速器：
3年毎にエネルギーが2倍に。

スーパーコンピューター：
2年毎にトランジスタの数が2倍に。

核融合装置：
18ヶ月毎に性能が2倍に。

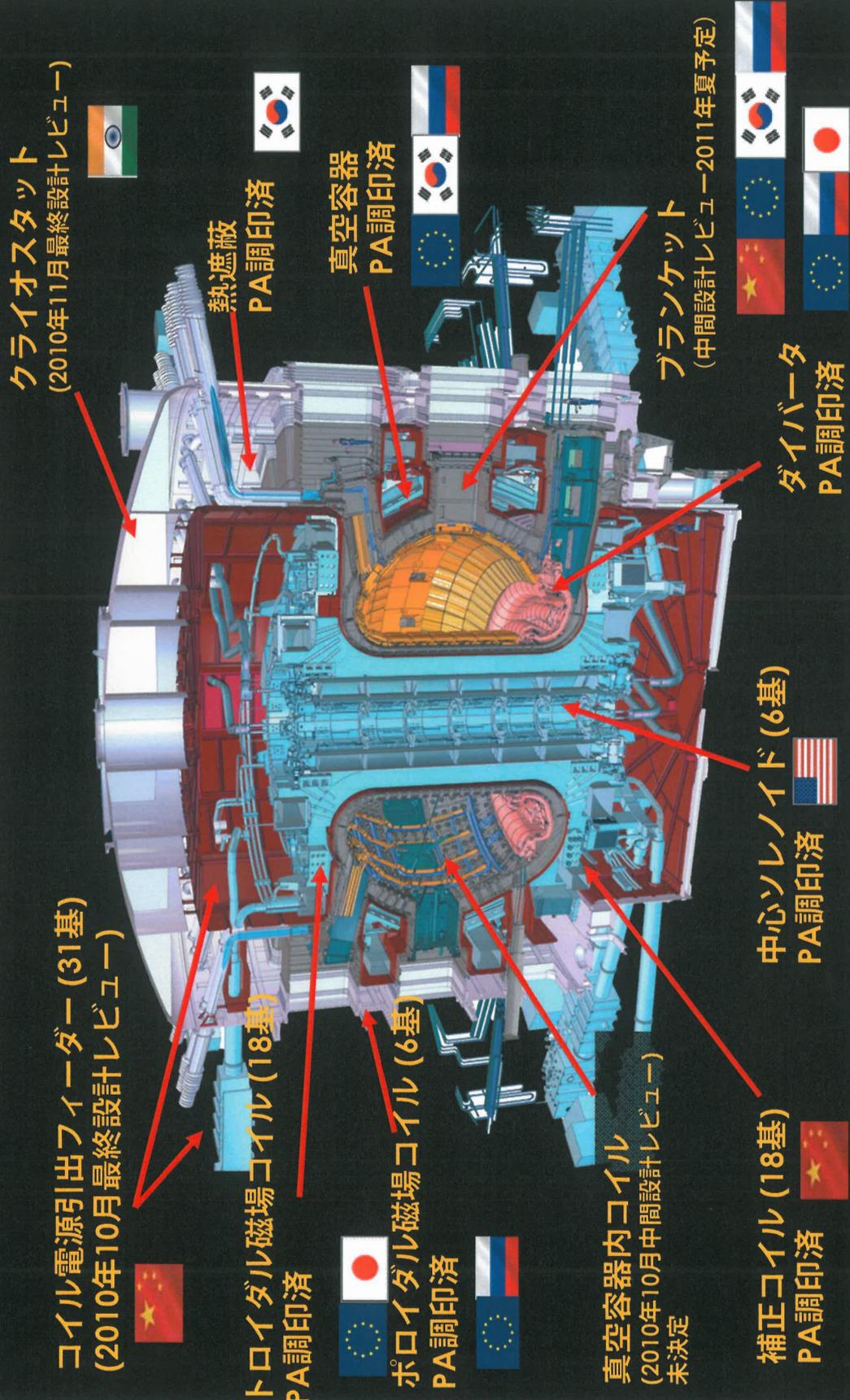
ITERは、核融合エネルギーの科学的、技術的な実現可能性及び安全特性を実証する

各国のトカマク装置がITERに貢献



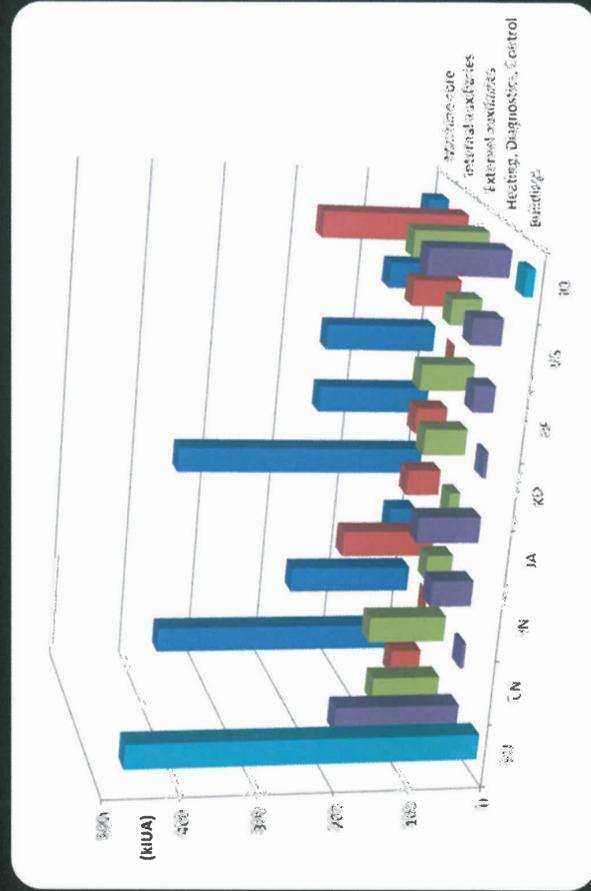
衆議院子エルブイリ原子力発電所事故等調査議員団 2011年10月11日 カダラツジュ・フランス

主要機器の分担



独自の調達方式

ITERは参加7極それぞれ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。



・世界最大級の科学技術協力

- ・分担割合は、
 - 欧州 45% (ホスト国)
 - 中国、インド、日本、韓国、ロシア、米国がそれぞれ9%

各極の調達機器の価格見積もりはITER特有の単位「KIUA」を使用

合理化された新たなマネジメント体制

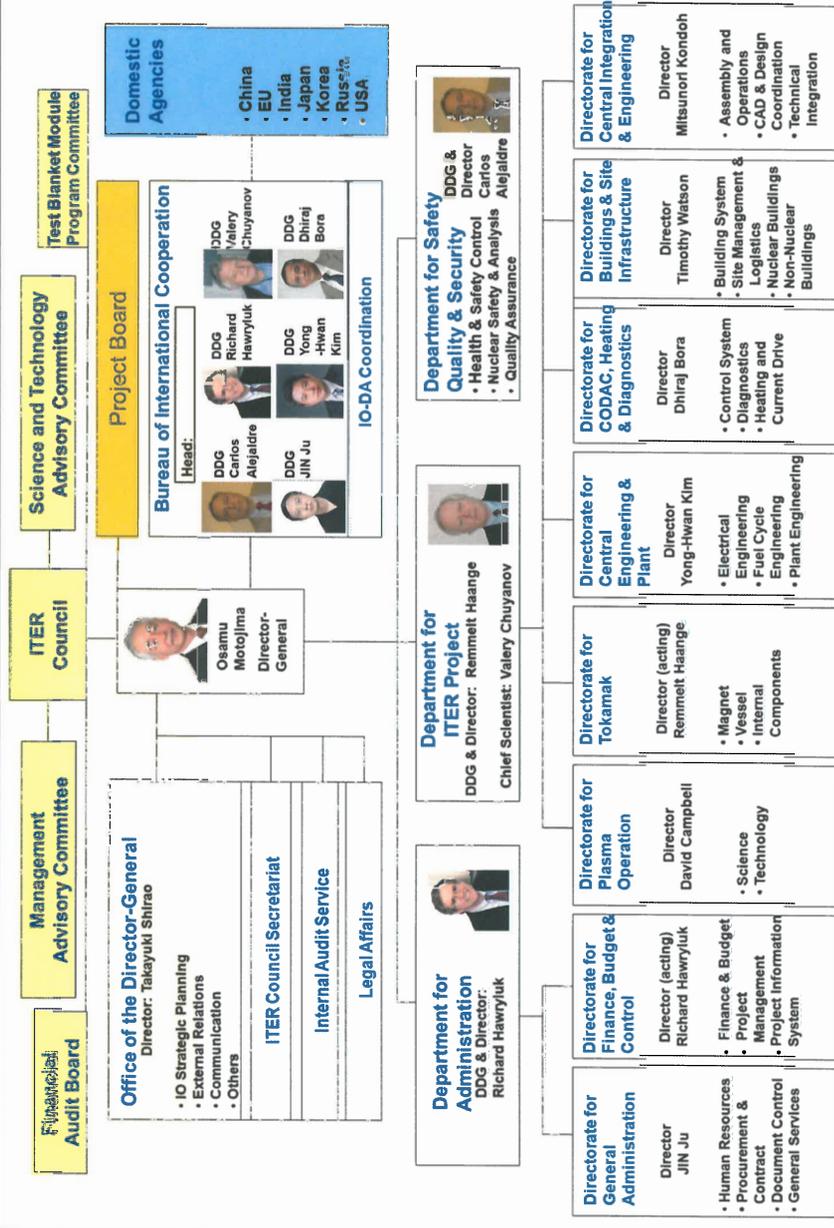
2010年7月のITER理事会においてスリム化された体制が承認された

◎強いリーダーシップ

◎意欲的、専門的、中立的

◎タスクフォースを目標としたシンブルな体制

◎迅速で的確な意志決定と実行



Version of 6 October 2011

機構の職員

- 総員470名（2011年9月末現在）、うち専門職員 299名、支援職員 171名；
- ITER理事会の要請により、建設期間における費用の低減を追及するため人材確保政策が取りまとめられ、昨年11月の理事会において承認された



	専門職員	支援職員	合計
中国	16	4	20
欧州	179	125	304
インド	13	16	29
日本	28	7	35
韓国	21	5	26
ロシア	19	3	22
米国	23	11	34
合計	299	171	470

専門職員のメンバー別分布

機器の製造開始

現在、機器の試作や製造が本格化



ITER機構と国内機関は、全部で128の調達取決（PA）のうち、これまで60を署名済み。見積もり額の合計は、2,119.13 kIUA、ITER建設における全調達の71.5%に相当する。1 kIUAは、1.55M ユーロに相当。

プラズマ物理研究所（中国、ハイフエイ）にて超伝導修正コイルを立ち上げているところ

導線の製作

- JA has completed the manufacture of 5 x 415 m (sDP) and of 7 x 760 m (rDP) conductor Unit Lengths (UL's).

日本は実導体を製作開始し、サイド導体分(単位長さ415m)を5セット、センター導体(単位長さ760m)を7セット製作完了。



超伝導ケーブルをジャケットに挿入
Cable Insertion



ジャケットの縮径及び導体を輸送用治具に仮巻き
Compaction & Spooling



導体のヘリウムリーク試験と浸透探傷試験
Global He Leak Test & Dye Penetrant Test

欧州におけるTF コイルの製作



Radial plate mock-up at CNIM
(Forged segments joined by EB welding)

仏CNIMにおけるラジアル・プレート
クックアップ



Radial plate welding mock-up at SIMIC
(Powderhipped segments joined by narrow gap
TIG welding)

ラジアル・プレートの溶接



2011/05/04 14:58

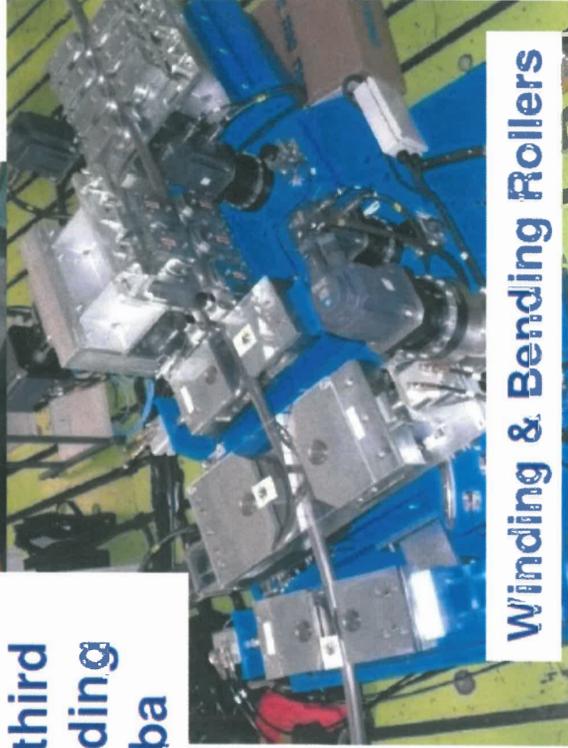
仏CNIMにおけるラジアル・プレート

日本におけるTFコイルの製作



Completed one third scale 3-turn winding trials at Toshiba

東芝にてTFコイルの1/3縮小サイズの試巻線(3ターン)が完了



Winding & Bending Rollers

導体巻線機の曲げローラ

Winding Support Jig

巻線用の導体支持治具

ITER建設サイト

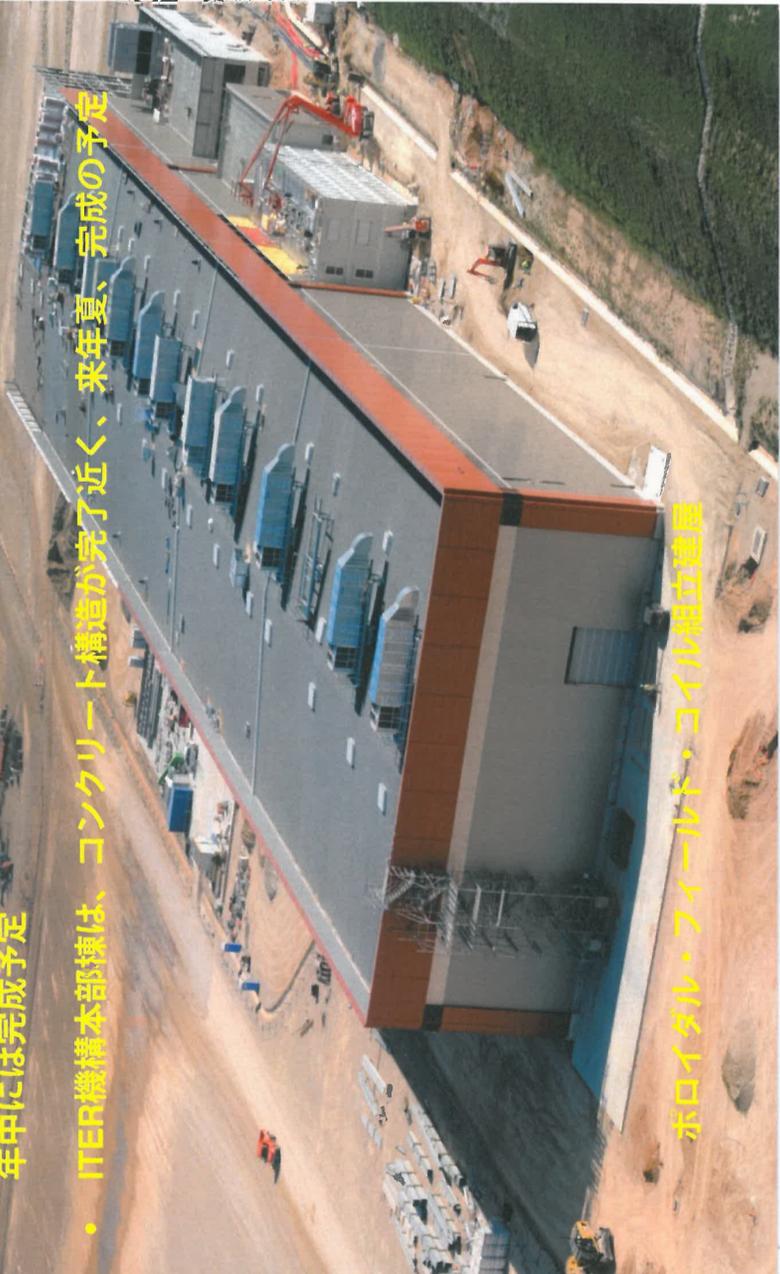
- 通常の建屋（非原子力関係）の建設が2010年8月4日に開始。
- 今夏、トカマクの掘削口におけるコンクリート打設作業開始
- ホロイダル・フィールド・コイル組立建屋は、屋根、側壁の工事に入り、本年中には完成予定
- ITER機構本部棟は、コンクリート構造が完了近く、来年夏、完成の予定



トカマク耐震ヒット



ITER 機構本部棟

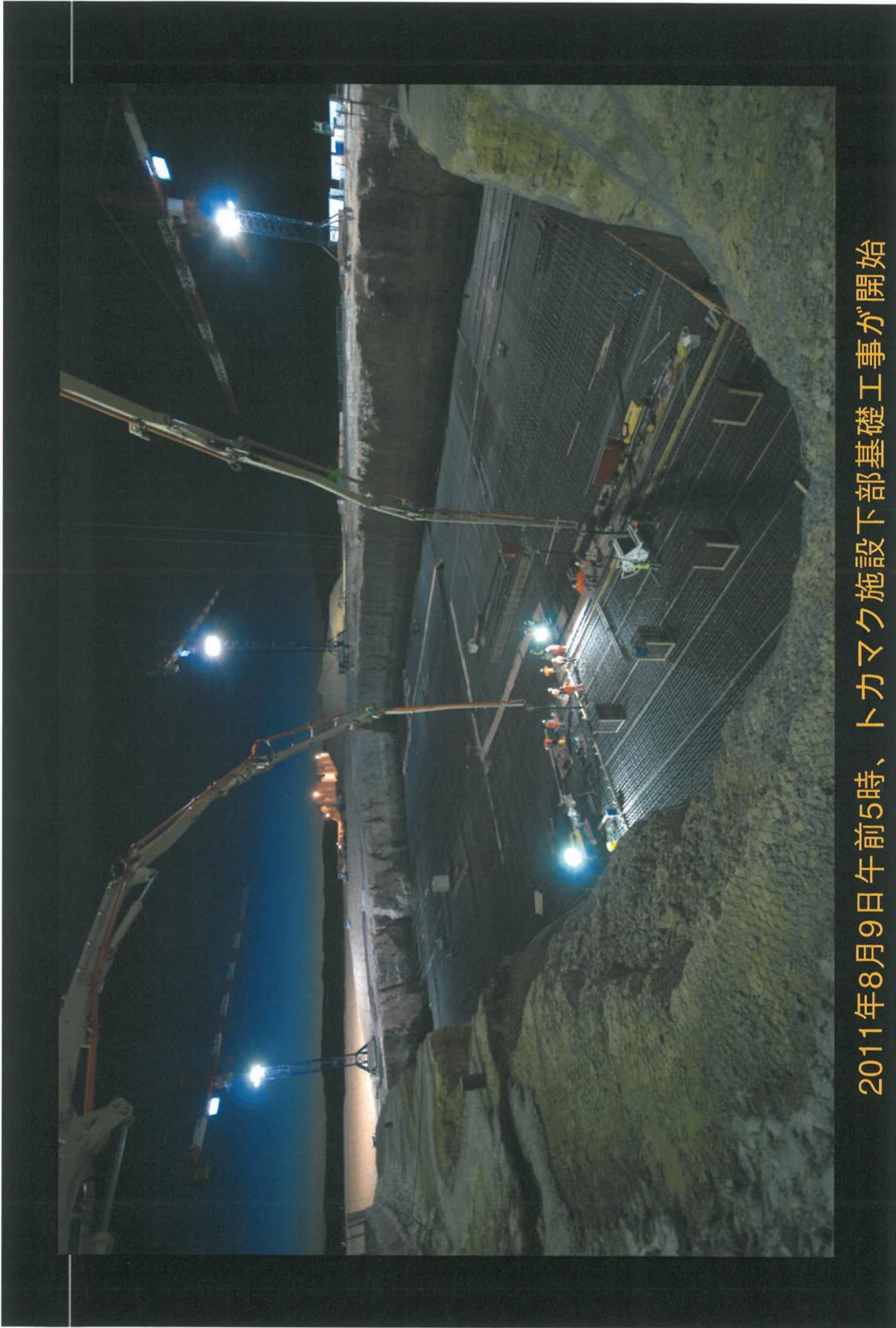


ホロイダル・フィールド・コイル組立建屋

ITER機構本部棟起工式

2010年11月17日





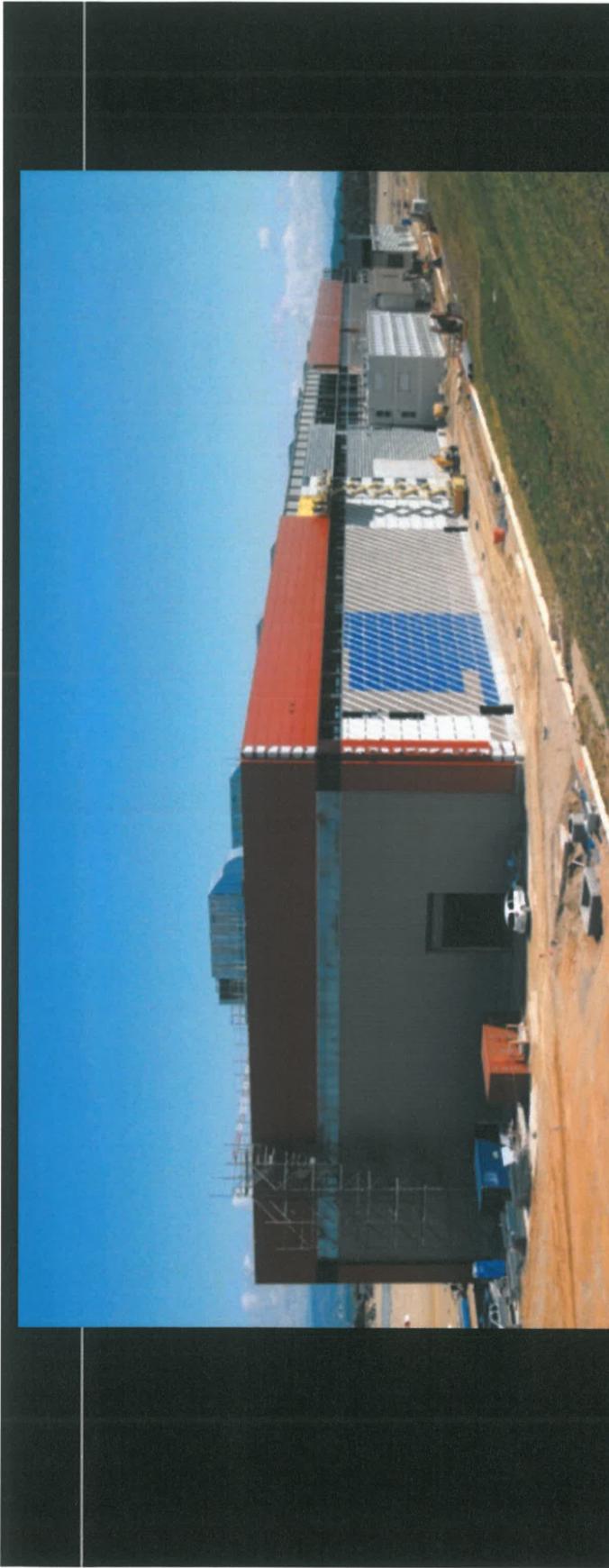
2011年8月9日午前5時、トカマク施設下部基礎工事が開始



耐震ピット設置作業を開始、初日、800 m³のコンクリートを注入。この作業を向こう3ヶ月の間、21回繰り返し、トカマク施設の基礎工事が完成する予定。(F4E写真提供)



2011年8月、ポロイダル・フィールド・ワイールド・コイル組立建屋の建設作業が急速に進展。3階建てビルの建屋の側壁工事が完了間近。



今後の予定

組み立て: 2014年-2018年 (⇒2019年)
ファーストプラズマ: 2019年11月 (⇒2020年11月)
核融合反応: 2027年

東日本大震災がITER建設に与える影響の調査

- スケジュールやコストへの影響評価のため、日本へ調査団を派遣
- スケジュールへの影響は近々明らかになる予定
- 今後、建設コストの上限を堅持しつつ、スケジュールの遅延を最小限にするために最大限努力する
- 更なるコスト抑制策が必要

コスト抑制

「機器やプロセス等の簡素化」

- 意志決定プロセスの簡素化
- 設計や組立の簡素化
- 試験作業の簡素化
- ITER機構と国内機関間の調達取決の簡素化
- コスト抑制タスクフォースの設置
- etc.

コスト抑制の実現:

71.6 KUA

調達分 (国内機関と調整済み)

- 設計の簡素化
- コスト見積もりの精査

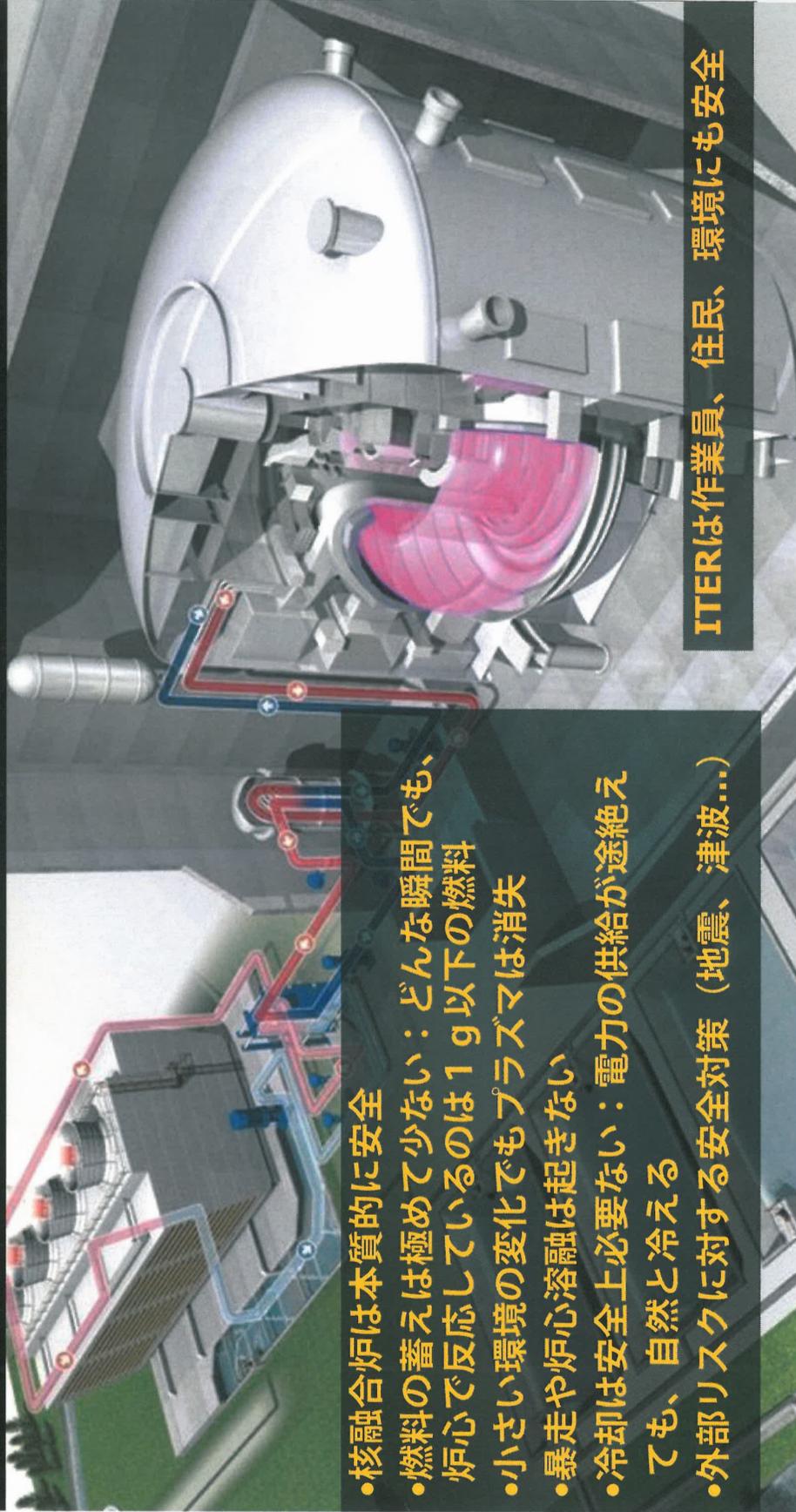
39 KUA

ITER機構

- 外部業務の15%削減
- 出張旅費の予算を25%削減

ITERは安全?

ITERでは福島原発のような事故はあり得ない



- 核融合炉は本質的に安全
- 燃料の蓄えは極めて少ない：どんな瞬間でも、炉心で反応しているのは1g以下の燃料
- 小さい環境の変化でもプラズマは消失
- 暴走や炉心溶融は起きない
- 冷却は安全上必要ない：電力の供給が途絶えても、自然と冷える
- 外部リスクに対する安全対策（地震、津波...）

ITERは作業員、住民、環境にも安全

放射線と廃棄物

- ITERでは長半減期/高レベル廃棄物はでない
- ITERの通常運転中、周辺住民の被ばく量は高くても自然界で通常被ばくする量の千分の一
- トリチウム関係施設での火災が起きるといふ最悪の場合でも、近隣の放射線量は自然界の量よりも少ない
- フランスの安全規制当局がITERを管轄

ITER 新たな時代へのステップ

破壊されつつある地球の環境を
守りながら、エネルギー需要の
増大にどう対応するのか？

核融合エネルギーによる大規模
なエネルギー生産の可能性は、
この問題の主要な解決策

ITERは、人工的に安全で無尽蔵に
生産可能なエネルギーの実現に向
けた、新たな時代へのステップ



Thank you for your attention



衆議院子エルノブイリ原子力発電所事故等調査議員団 2011年10月11日 カダラッシュユ・フランス

これは、放射線のリスクを示す図です。

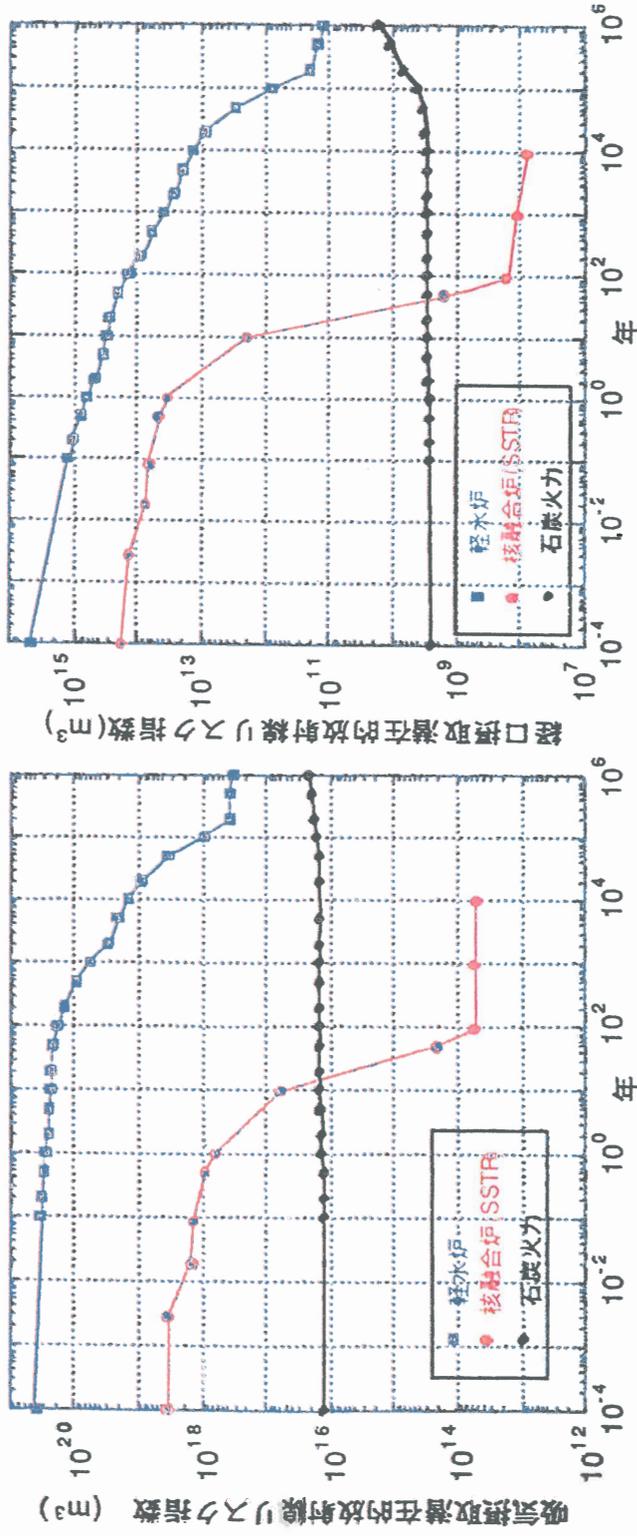


図 1.3.3-2 核融合炉、軽水炉、石炭火力発電所の吸気、経口摂取による潜在的放射線リスク指数の比較
 (基準は、米国 10 CFR Pt.20, App. B Table2 (Effluent Concentration)を使用した)が、文献[1.3.3-9]とほぼ同じ)

この図は核融合炉の放射線問題における安全性を示しています。

ITER計画について

平成23年9月30日
文部科学省

ITER (国際熱核融合実験炉) 計画について

【概要】

環境問題とエネルギー問題を同時に解決する核融合エネルギーの実現に向け、国際協力の下、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。

- **ITER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)
- **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
 - 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
- **建設費** 約9千億円(2010年7月末時点で換算)
- **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%
- ※ 各極が分担する機器を調達・製造して持ちより、ITER機構が全体を組み立てる仕組み
- **計画(予定)**
 - 建設 2007年～2019年
 - 運転 2019年～2037年
 - 除染 2037年～2042年
- **ITER機構長** 本島修氏(平成22年7月28日任命)



現在のITER建設サイト
(2011年1月時点)



ITERサイト予想図

建屋 39棟
敷地 180ha

ITERの概要

●意義

◇核融合エネルギーの実現の見通しを得る。

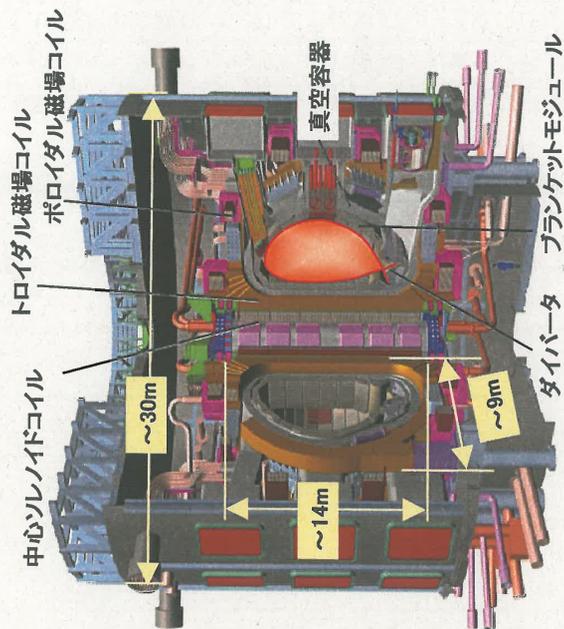
●技術目標

◇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(400秒以上)維持する。

◇超伝導コイル(磁場生成装置)やブ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
本体重量	1万8千トン

ITER建設スケジュール

○2010年7月のITER臨時理事会において、下記の建設スケジュールに合意

2007年10月24日

ITER協定発効

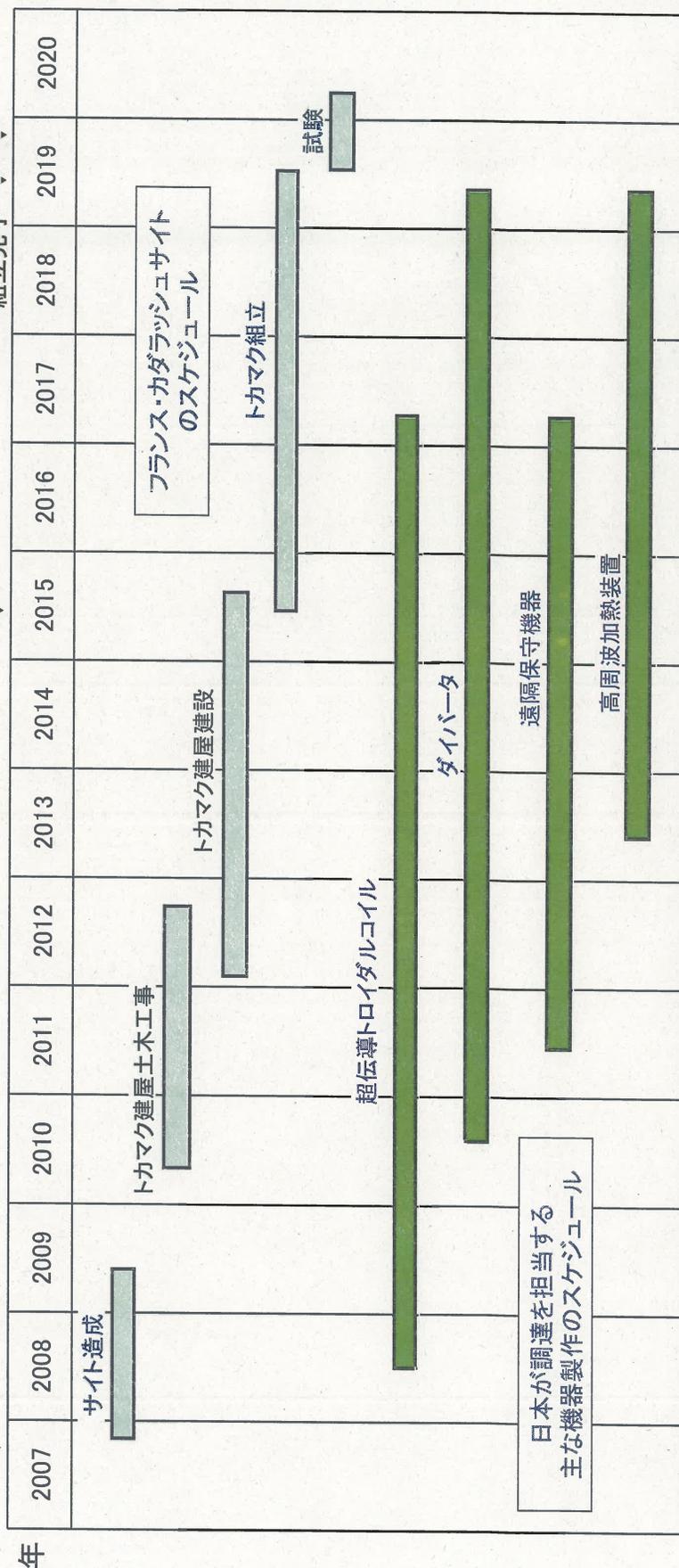
ITER機構設立

建設認可

トカマク組立開始

トカマク主要部組立完了

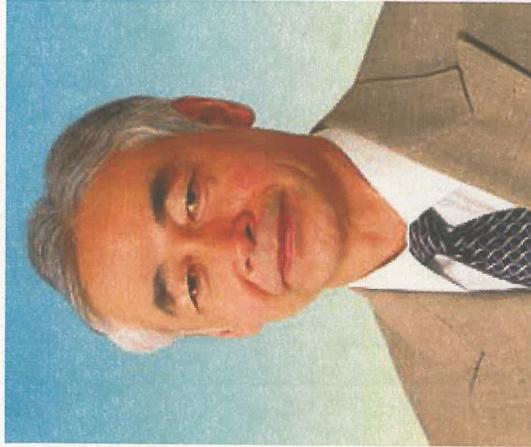
初プラズマ(※)



※初プラズマ……核融合反応に必要なプラズマ状態(高温により気体を構成する元素が電子とイオンに分かれ飛び交う状態)を初めて発生させること

○2011年6月の第8回ITER理事会において、今後、震災影響の緩和を含め、スケジュール回復に向けた戦略的計画を作成することに合意。

ITER機構 機構長



本島 修 (62歳)

【略歴】

- S51. 3 京都大学大学院工学研究科博士課程修了
- S62. 7 京都大学ヘリオトロン核融合研究センター教授

名古屋大学プラズマ研究所教授
核融合科学研究所教授
核融合科学研究所大型ヘリカル研究部研究総主幹
核融合科学研究所長

等を歴任

- H16. 4 自然科学研究機構理事(副機構長)
同機構核融合科学院理学研究所長
総合研究大学院大学物理科学研究科
核融合科学専攻長
国立大学法人総合研究大学院大学
教育研究評議会評議員
- H21. 3 スウェーデン王立科学工学アカデミー外国人会員
- H21. 4 核融合科学研究所 名誉教授、顧問、フェロー
- H21. 5 未来エネルギー研究協会 会長
- H21. 6 プラズマ・核融合学会 会長
- H22. 7 ITER機構長就任

平成23年9月現在

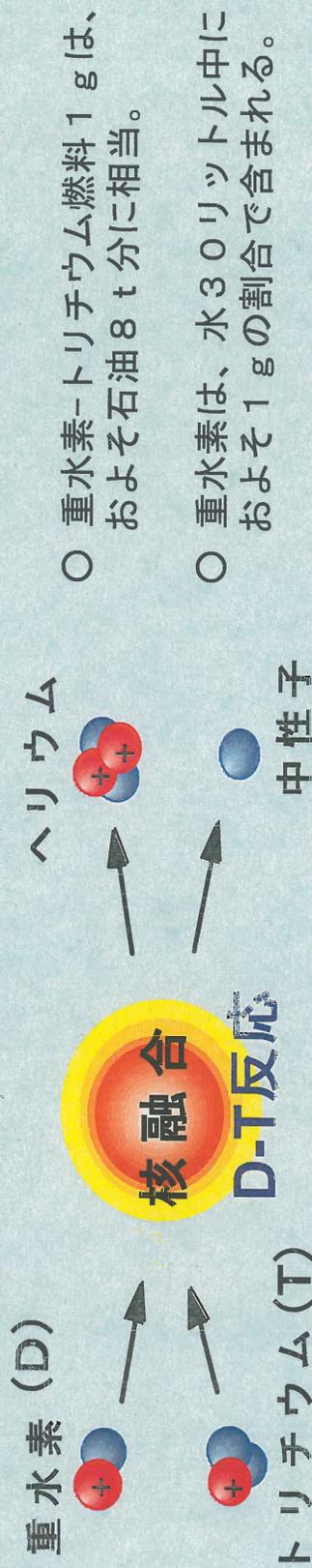
核融合エネルギー

核融合エネルギー：軽い原子核同士（重水素、トリチウム）が融合して別の原子核に変わる際に、質量の差分がエネルギーとなって出るもの（太陽のエネルギーと同じ原理）

<核融合エネルギーの特徴>

- ・ **豊富な資源**：燃料となる重水素は海中に豊富に存在し、三重水素（トリチウム）は埋蔵量の多いトリチウムより生成可能であり、地域的な偏在がない豊富な資源。少量の燃料から膨大なエネルギー。
- ・ **固有の安全性**：燃料の供給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できるなど、安全対策が比較的容易。
- ・ **高い環境安全性**：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。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。

(核融合の原理と発生エネルギー)



核融合原型炉へのロードマップ

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



原型炉

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



JET (EU)

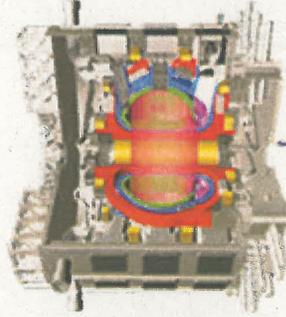


JT-60 (JA)



TFTR (US)

【主要実験装置】

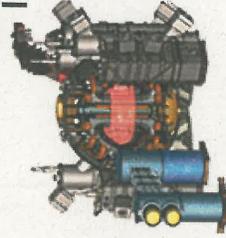


ITER (実験炉)

ITER計画



IFMIF



JT-60SA

BA活動