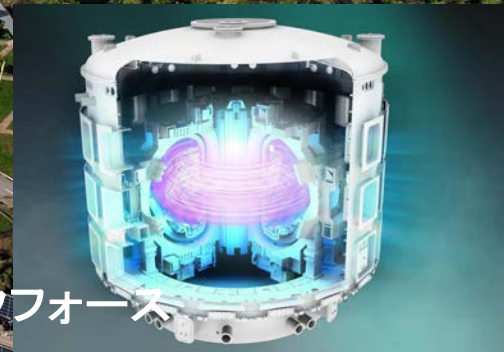




ITER計画の進捗状況

鎌田 裕 ITER国際核融合エネルギー機構 副機構長(科学技術担当)

2024年7月10日 第38回核融合科学技術委員会 & 第35回原型炉開発総合戦略タスクフォース

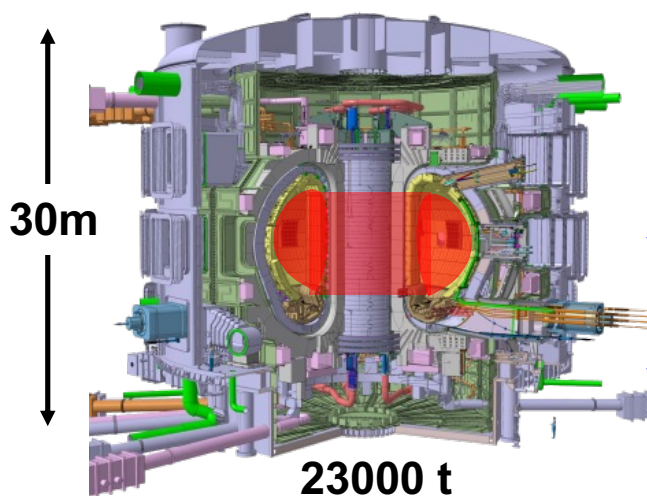


ITERが拓く道

人類の幸せ:エネルギー問題の解決:

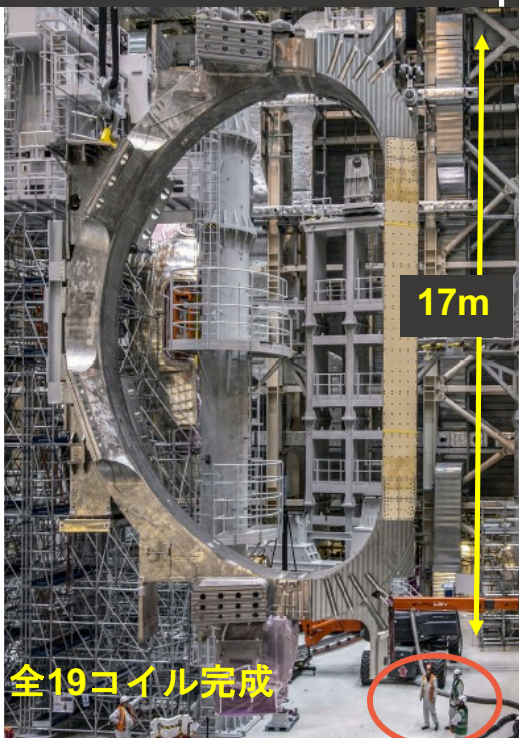
- * 核融合運転: 燃焼プラズマ(エネルギー増倍率10、核融合出力50万kW)の維持
- * 核融合炉に不可欠な技術の供用性(超伝導磁石など)と統合の実証、
将来の原型炉に必要な構成機器(ダイバータなど)の試験

日本は最も枢要で高い技術が必要な機器製作を担当:
超伝導コイル、加熱機器、受熱機器(ダイバータ)、
遠隔保守、トリチウム設備、計測、テストブランケット



核融合の「科学・技術・人材」育成に世界が活用する場
大型国際科学技術事業の成功と世界平和への貢献

超伝導トロイダル磁場コイル



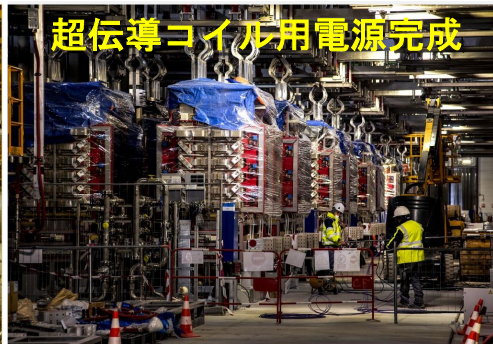
全6コイル完成



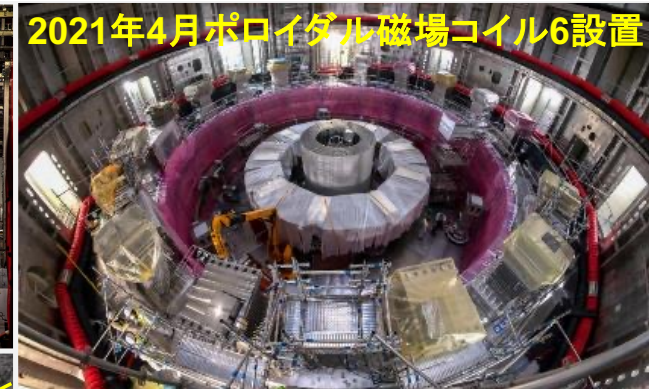
世界最大のヘリウム冷凍プラント完成



超伝導コイル用電源完成



2021年4月ポロイダル磁場コイル6設置

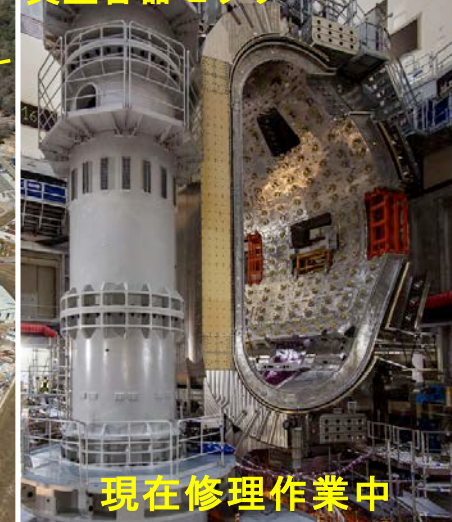


建屋85%完成.

2024年6月



真空容器セクタ2022年5月



ITER 新基本計画 (ITER機構提案)
2035年: 重水素-重水素核融合運転
2039年: 重水素三重水素核融合運転

サイト水冷却設備完成



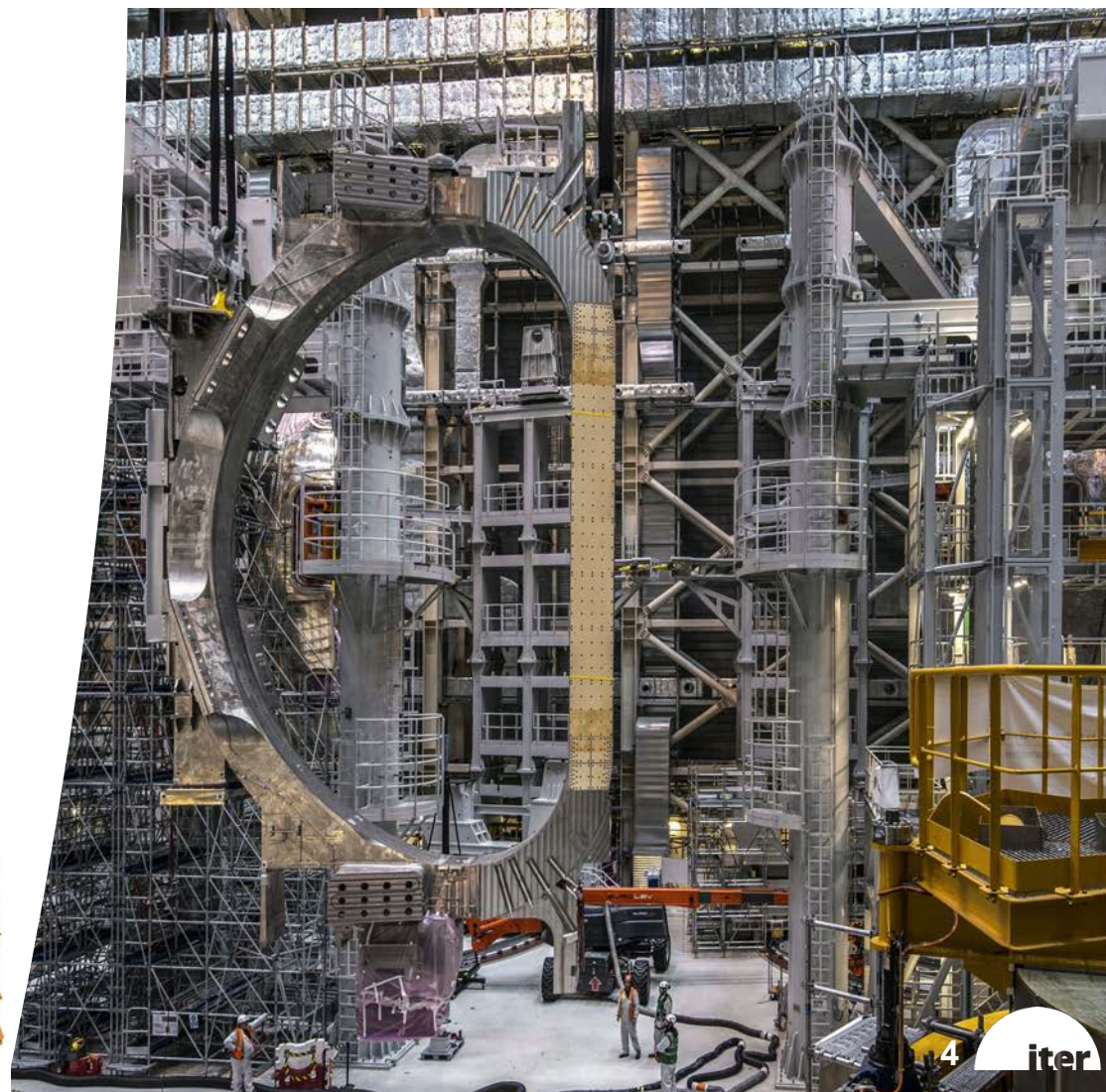
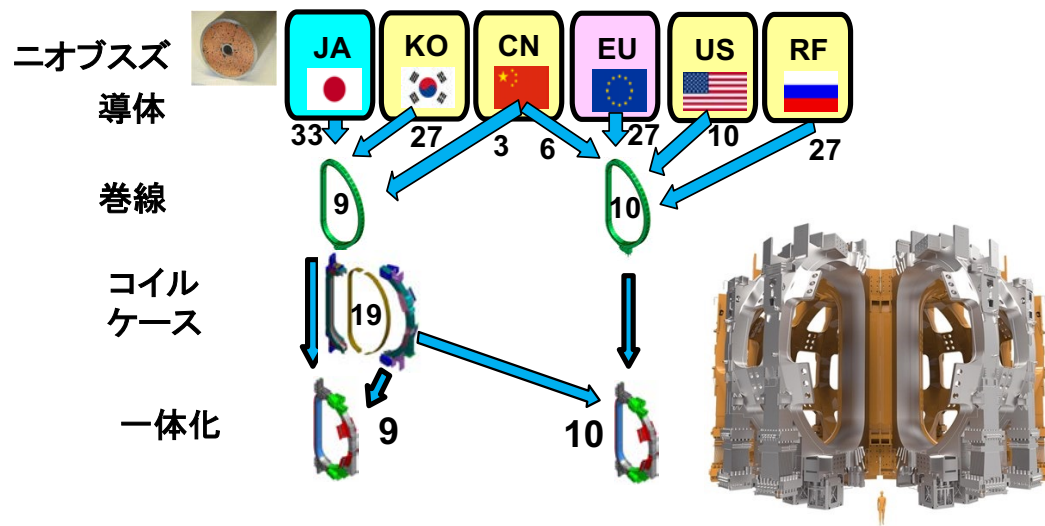
超伝導トロイダル磁場コイル: 全コイル製作・搬入完了

2023年12月、18 + 1 (スペア)機の全コイルが到着。
(日本 9機 (三菱重工5 + 東芝4)、欧州10機)

ITER工学実証フェーズ以来30年間の技術開発の結晶

ニオブスズ超伝導, 11.8テスラの強磁場を発生
高さ16.5m、幅9m、総重量360トンの巨大な超伝導コイル
許容誤差1万分の1以下の高精度(誤差1mm以下)で製作

原型炉に向けて大型超伝導コイルの
'サプライチェーンと量産化' を確立



超伝導トロイダル磁場(TF)コイル完成式典を開催

主賓:

日本国盛山文部科学大臣

イタリア国環境エネルギー安全保障大臣

出席者:

各極代表、日欧研究開発リーダー

並びに製作メーカー幹部

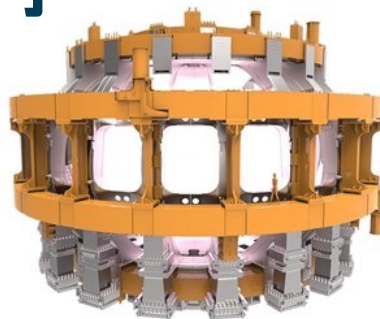
2024年7月1日



超伝導ポロイダル磁場(PF)コイル: 全コイル製作・搬入完了

ニオブチタン超伝導,
最大コイルの直径24 m、重量400 t.

PF6 (中国)
PF5、PF4、PF3、PF2 (欧州)
PF1 (ロシア)



PF3 コイル完成 2024年5月

センターソレノイド: 製作 & 組立順調

ニオブスズ超伝導

(導体の全数を日本が製作)

全7モジュール (6+1 スペア) 米国が製作
第4モジュールまで製作・搬入済み
第3モジュール組込み開始 2024.4月



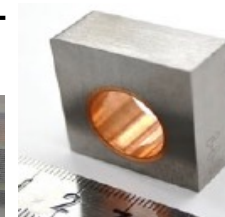
1000 t



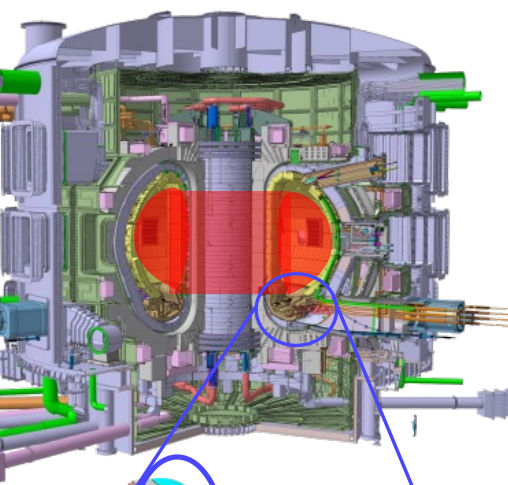
ダイバータ外側垂直ターゲットプロトタイプ搬入

プラズマから来る大きな熱流($20\text{MW}/\text{m}^2$)を受け止める
最も過酷な場所：原型炉に向けた最大の技術課題の一つ

1600個のタングステンモノブロックを
0.3ミリの精度で加工 & 組み上げた



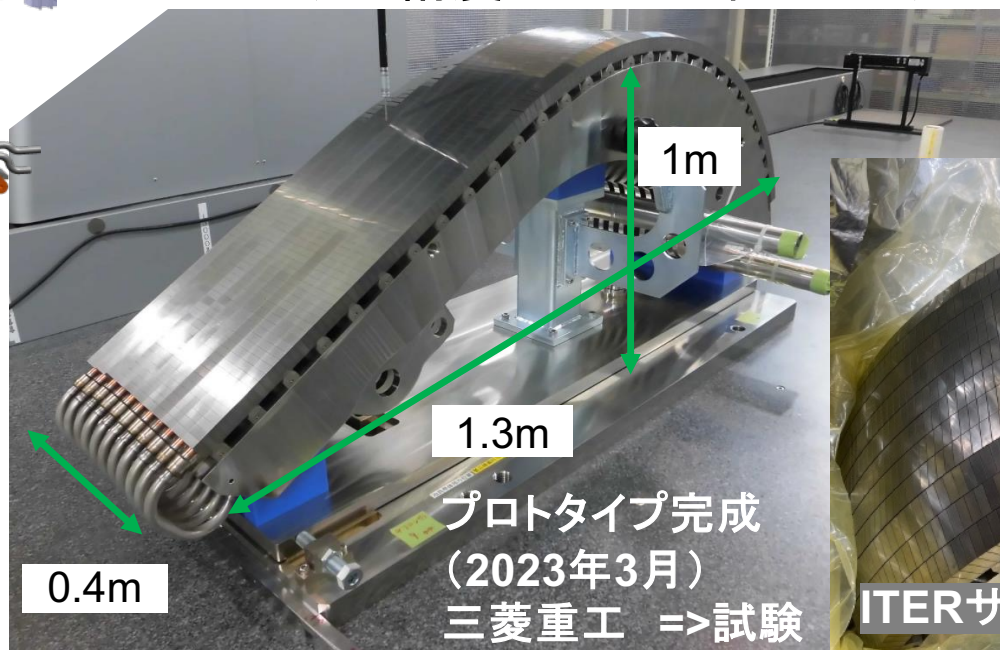
タングステンモノブロック：
アライドマテリアル社
最終的に20万個必要



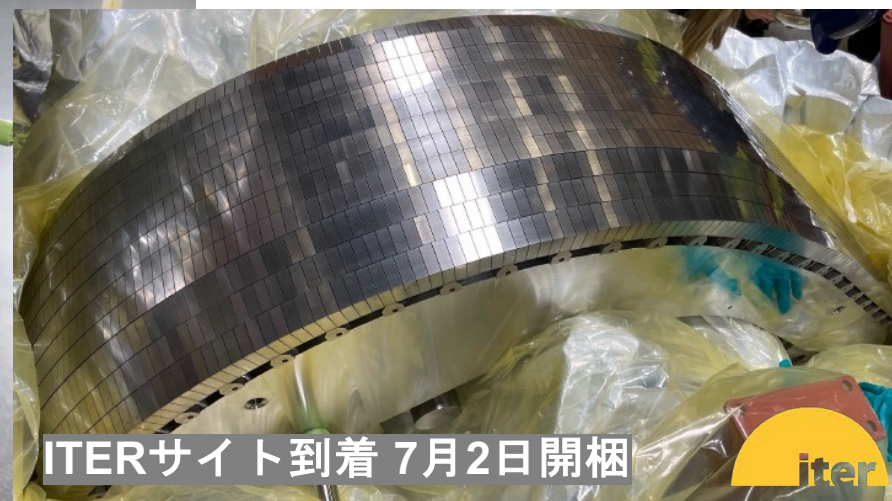
内側垂直
ターゲット
(欧)

外側垂直
ターゲット(日)

ダイバータカセット
全54個

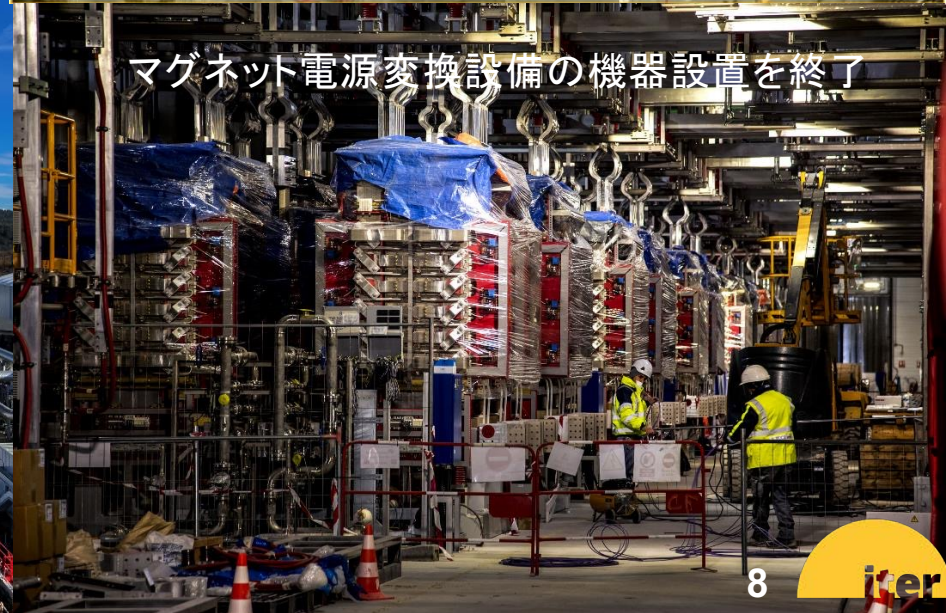


プロトタイプ完成
(2023年3月)
三菱重工 => 試験



ITERサイト到着 7月2日開梱

プラント システム： 順調に 運転・試運転 を開始



世界初機器の製作課題：真空容器と熱遮蔽の修理

真空容器セクター

隣接セクター間を溶接
するための溶接継手開
先の製作精度不足

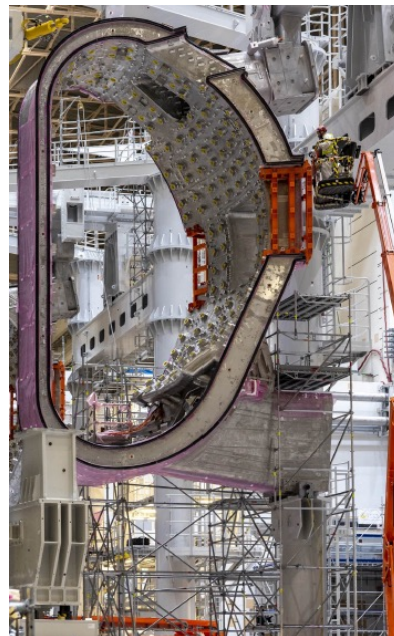
R&Dを経て修理を開始



熱遮蔽板

応力腐食割れ

銀メッキを取り去る
修理と再製作を開始



ITER新ベースラインをITER理事会に提案

すでに合意されている最終プロジェクト目標を維持しつつ、ITER の主要目標をできるだけ早く達成することに焦点を当て、組み立て、統合試運転、運用に関する包括的かつ実現可能な計画を策定。

計画の見直し

Covid-19の影響、各国の世界初機器の製作の難度、真空容器などの修理（左記複合遅延6年）
現実的な組立工程の設定

段階的放射線安全実証: DT運転を2期に分け、第1期(DT-1)の総中性子発生量を全事業値の約1%とし、その結果を踏まえて第2期(DT-2)の許認可を得る。

初期運転期: 当初から十分な加熱装置や受熱構造(ダイバータ)を備えた本格的な科学研究を開始。
重水素核融合運転を開始。
磁場エネルギーの最大定格に到達: 核融合炉統合システムを実証。

第一壁材料を熔融リスクの高いベリリウムからタングステン(原型炉に直接貢献するプラズマ対向材)に変更

リスク低減: TFコイル低温試験の追加、各国装置での試験、研究協力の増強など

品質管理の強化: 機構長方針: 品質最優先を徹底(過去の事例: スケジュール優先)。
ITER機構-極内機関合同の品質管理活動開始(高い透明性で)

ITER研究計画書: 7極の研究者が合同して策定: STACが承認

ITER研究計画ワーキンググループ (各極 5 名+ITER機構10名=45名)
ITER研究計画(IRP) Levrl-1を策定 (2023年12月-2024年4月)

国際トカマク物理活動(ITPA)によるタングステン第一壁選択に関する評価
(2023年10月-2024年5月: 報告書)

全7専門グループはタングステン第一壁選択を支持

タングステン (高Z) 不純物の混入による $Q=10$ 到達へのリスクは許容範囲

必要な第一壁調整 (ボロニゼーション)

今後の各極研究機関・装置とのR&D協力推進を勧告

ITER科学技術諮問委員会(STAC)による新ベースライン審議 (2024年5月)

ITER研究計画Level-1を承認

Level-1建設計画を承認

タングステン第一壁選択を支持

全体事業スケジュール（目標日程）

建設期: 2007年11月 – 2034年10月

- 組立-I: クライオスタット閉止で完了: 2033年3月
- 統合試運転 (Integrated Commissioning: IC)-I: 2033年3月 – 2034年10月
全構成機器の試運転完了、組み合わせ試験、各超伝導コイルの定格励磁など

電子サイクロトロン加熱 40MW,
イオンサイクロトロン加熱 10MW,
ダイバータ, 垂直位置安定化コイル,
ELM制御コイル,
ディスラプション緩和システム

運転期: Oct. 2034 –

- 研究運転開始期 (Start of Research Operations : SRO): 2034年10月 – 2036年12月
(ダイバータ、ディスラプション緩和、ELM緩和を含む全てのプラズマ制御を実証)
ダイバータプラズマ運転開始: 2034年12月
DD(重水素-重水素)核融合運転 & 高性能モード(Hモード)研究の開始: 2035年8月
最大定格磁場エネルギー(プラズマ電流15 MA, トロイダル磁場5.3 T): 2036年第3四半期

- 組立-II: 2036年12月 – 2038年12月
- 統合試運転-II (IC-II): 2038年12月 – 2039年9月
トリチウムプラント & ホットセル試運転完了 など

電子サイクロトロン加熱 60–67MW,
イオンサイクロトロン加熱 10–20 MW,
中性粒子ビーム加熱 33MW,
テストブランケットシステムx4

- DT-1 (重水素–三重水素) 核融合運転 (FPO - I ~ V): 2039年9月 –
核融合エネルギー増倍率 $Q \geq 10$ (核融合出力500 MW)
短パルス(50秒): 2044年後半, 長パルス:(≥ 300 秒): 2046年後半
テストブランケットモジュール(TBM)運転

- DT-2 (FPO-VI ~ X)
 $Q \geq 10$ (300–500 秒)高繰り返し、 $Q \geq 5$ 長パルス(1000 秒)と 定常運転 (3000 秒)

中性粒子ビーム 33–50 MW

確認: ITER計画の目的(Project Specification) : ITERの価値

プラズマ性能

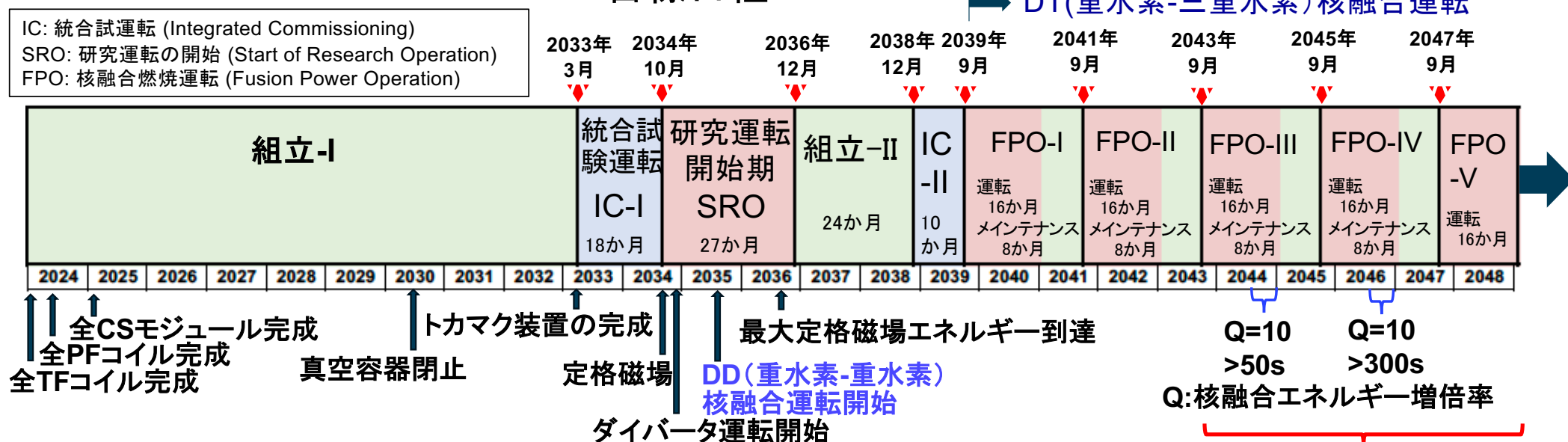
- 定常状態(プラズマ物理過程に特徴的な時間スケールより十分長い時間)、核融合エネルギー増倍率 $Q \geq 10$ の長時間燃焼を達成する。(DT-1)
- 非誘導電流駆動を使用した $Q \geq 5$ の定常運転の実証を目指す。(DT-2)

工学的性能と試験

- 核融合炉に不可欠な技術の供用性と統合を実証する(超伝導磁石など)。(SRO : 最大定格磁場エネルギー)
- 将来の原型炉に必要な構成機器(ダイバータなど)をテストする。(SRO) (DT-1)
- テストブランケットモジュール(TBM)の試験を行う。(DT-1) (DT-2)

ITER新ベースライン全体スケジュール

目標日程



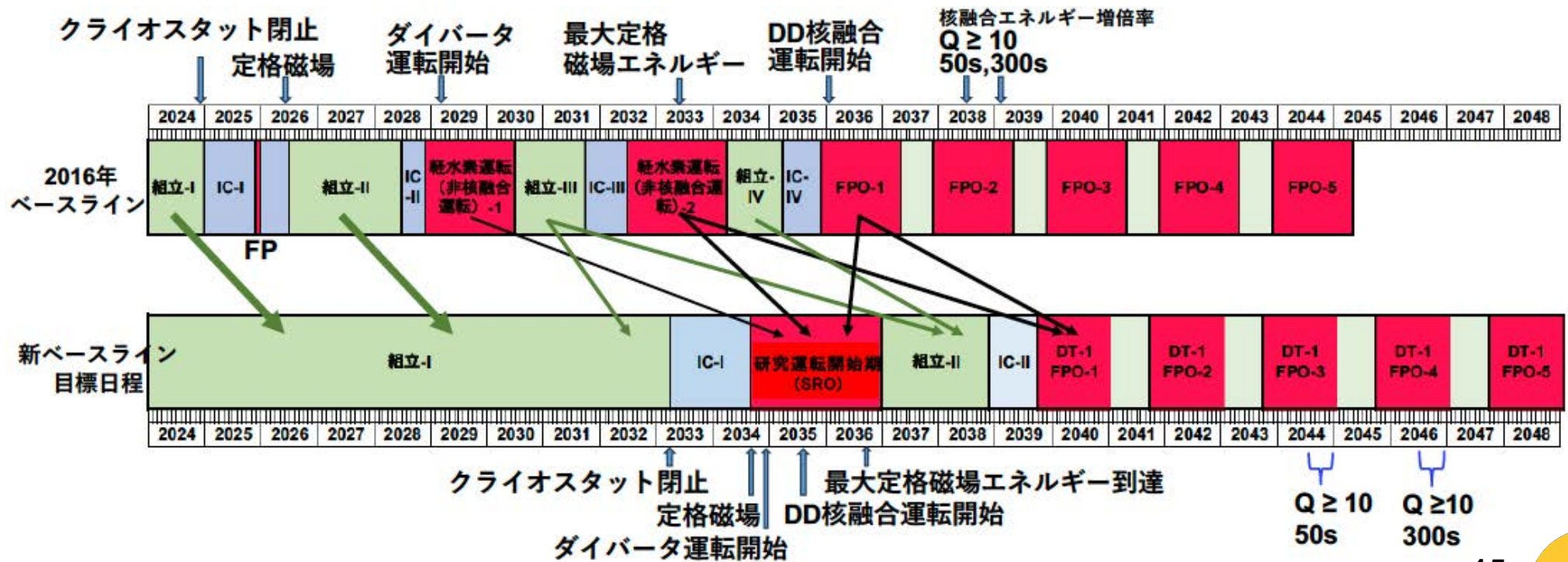
予備日程(目標日程に追加)

組立-I: 2年, 統合試運転-I: 6か月, SRO: 6か月,
組立-II: 6か月, 統合試運転-II: 3か月
(DT-1開始までに全45か月)

実施手順は、研究の進捗と放射線線量評価などの結果に基づいて、 $Q \geq 10$ ミッション目標をできるだけ早く達成できるように最適化する(各 FPO キャンペーンに付随するメンテナンス期間の最小化を含めて)。

マイルストーン達成までの遅延を最小化

- 2016年ベースラインとの比較
- *DD(重水素-重水素)核融合運転開始: 5か月加速. (2035年)
 - *最大定格磁場エネルギー到達: 3年遅延 (2033年=> 2036年)
 - *DT(重水素-三重水素)核融合運転開始: 3年9か月遅延 (2035年=> 2039年)
 - *核融合エネルギー増倍率 $Q \geq 10$ & 50万kW核融合出力
50秒以上維持 6年遅延 (2038年=> 2044年)
- :ITER工學目標
:ITER物理目標

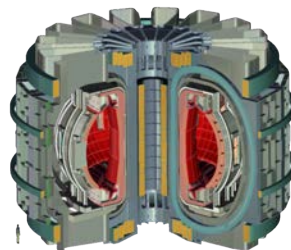
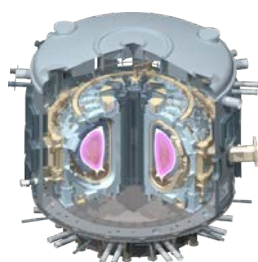


ITERの役割、ITERの活用

科学技術, 規格基準, 人材

産業界・工学・科学コミュニティとの協力

ITER
熱出力
50万kW

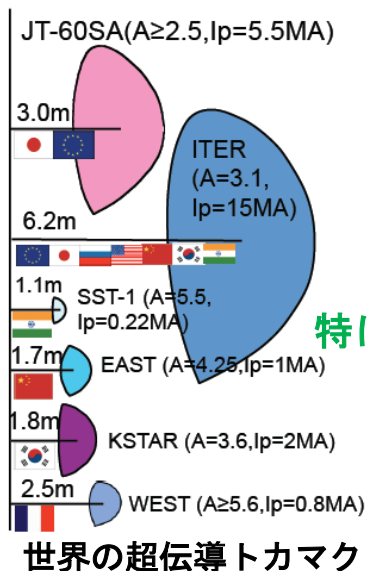


原型炉
熱出力
~200万kW

若手人材育成にも！
第13回ITER国際スクール
本年12月 核融合科学研究所



「実施」に加えて、「評価」が大切。
核融合炉の規制&規格基準作成に貢献



協力

核融合技術	実施	評価
機器製作	◎	◎
組立とシステム統合	◎	◎
コミッショニング・運転	◎	◎



核融合
規制
規格基準

日本は最も枢要で高い技術が必要な機器を担当

- ⇒ 継続して、組立、運転、そして評価に参加
- ⇒ 日本が核融合炉で最も重要な知見を獲得

ITERの活用

⇒ 信頼性・経済性の
高い核融合炉

PUBLIC-PRIVATE WORKSHOP (`公的機関-民間企業` 会合)

2024年5月27-29日, ITER サイト

共催: IAEA、参加者350名超

核融合スタートアップ30社 + 部品供給80社

(日本: 京都フュージョニアリング*、ヘリカルフュージョン、EXフュージョン) * Jフュージョン代表として冒頭講演も

第1 & 2日目:

民間企業からの発表

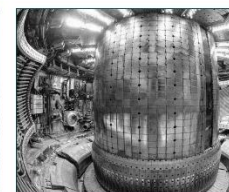
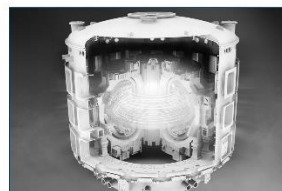
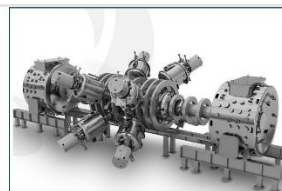
- ・ 自社がどのようなイノベーションやブレークスルーを達成したか? 残された課題は?
- ・ ITER は、どのように支援できるか?

ITER サイトツアー: 全体 & 個別

第3日目: ITER機構専門家との個別議論

ITER機構の目標:

ITER知財の適切な保護・管理の下で、
今後民間核融合企業とどのように関わっていくかについての優先項目を定め、計画を策定する。



ITERの活用を！
ありがとうございました！

