

# 核融合 x ITER

組立が進む「ITER」の現状を語る

杉本誠 ITERジャパン国内機関長 x 大前敬祥 ITER機構首席戦略官

# 自己紹介

- 杉本 誠 (すぎもと まこと)
- イーター日本国内機関長 (2017年4月～)
- 日本原子力研究所 > 日本原子力研究開発機構  
> 量子科学技術研究開発機構
- 専門: 機械工学 x 低温工学 x 超伝導工学  
x 研究開発マネジメント
- 50代 配偶者有、子供はすでに独立



<https://twitter.com/sugimo2010>



<https://www.facebook.com/makoto.sugimoto.5439>

# 自己紹介

- 大前 敬祥（おおまえ たかよし）
- ITER首席戦略官・機構長副官房長（2018年4月～）
- NTTコミュニケーションズ > Strategy& (ex-PRTM)
- 専門：グローバル x テクノロジー x 経営戦略
- 40代 フランス在：子供3人（高校生、小学生）



<https://twitter.com/takaomae>



[www.linkedin.com/in/takaomae](http://www.linkedin.com/in/takaomae)



ITER計画とは、核融合エネルギーが科学技術的に成立することを  
実証する為、人類初の核融合実験炉を実現しようとする世界7極  
35カ国で行う地球上最大の超大型国際プロジェクトです

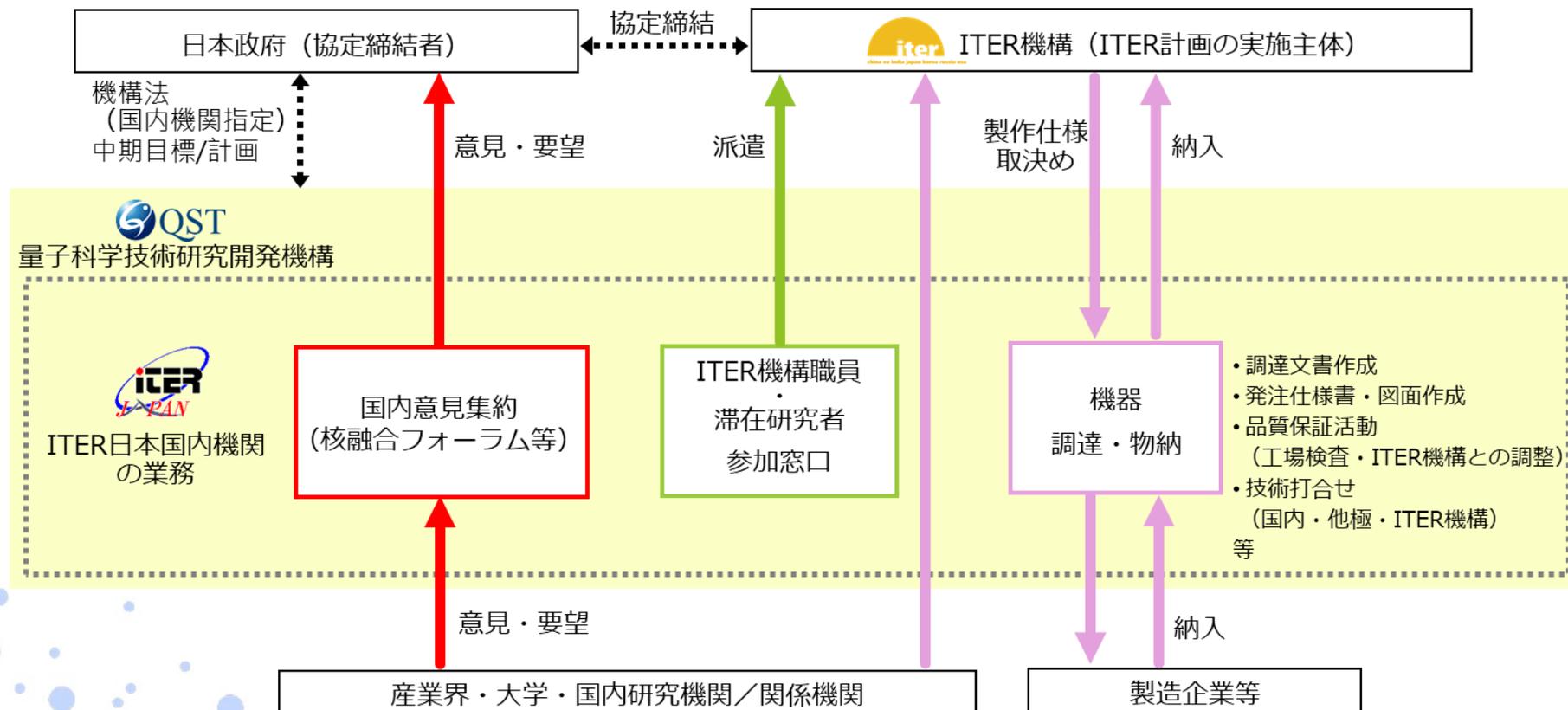


ITERとはラテン語で道や旅を意味します  
人類の未来への旅が始まっています

# JADAってなんだ？

## ITER計画における量研機構（QST）の役割（国内機関）

- ・日本の国内機関として、日本が分担する超伝導コイルなどの機器・装置を製作してサイトに物納する
- ・ITER計画に対する日本からの人的貢献の窓口（人材派遣）を行う



# 今日の献立

---

- フュージョン/核融合ってなに？
- ITER計画ってなに？
- ITER建設の最新状況は？
- 世界の核融合最新事情 & この先どうなる？

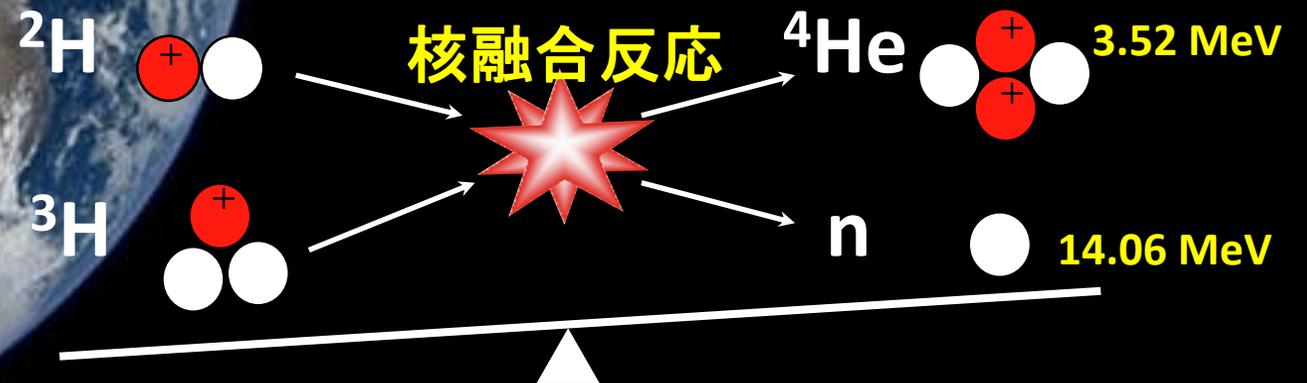
# 宇宙における核融合

- 宇宙空間においては何億年にも渡って核融合反応が発生中
- 太陽や恒星の活動は核融合反応による
- 核融合反応: 水素系原子核同士が融合し、より重い原子核に変わりエネルギーを放出
- この反応を如何に地球上で再現するかがチャレンジ

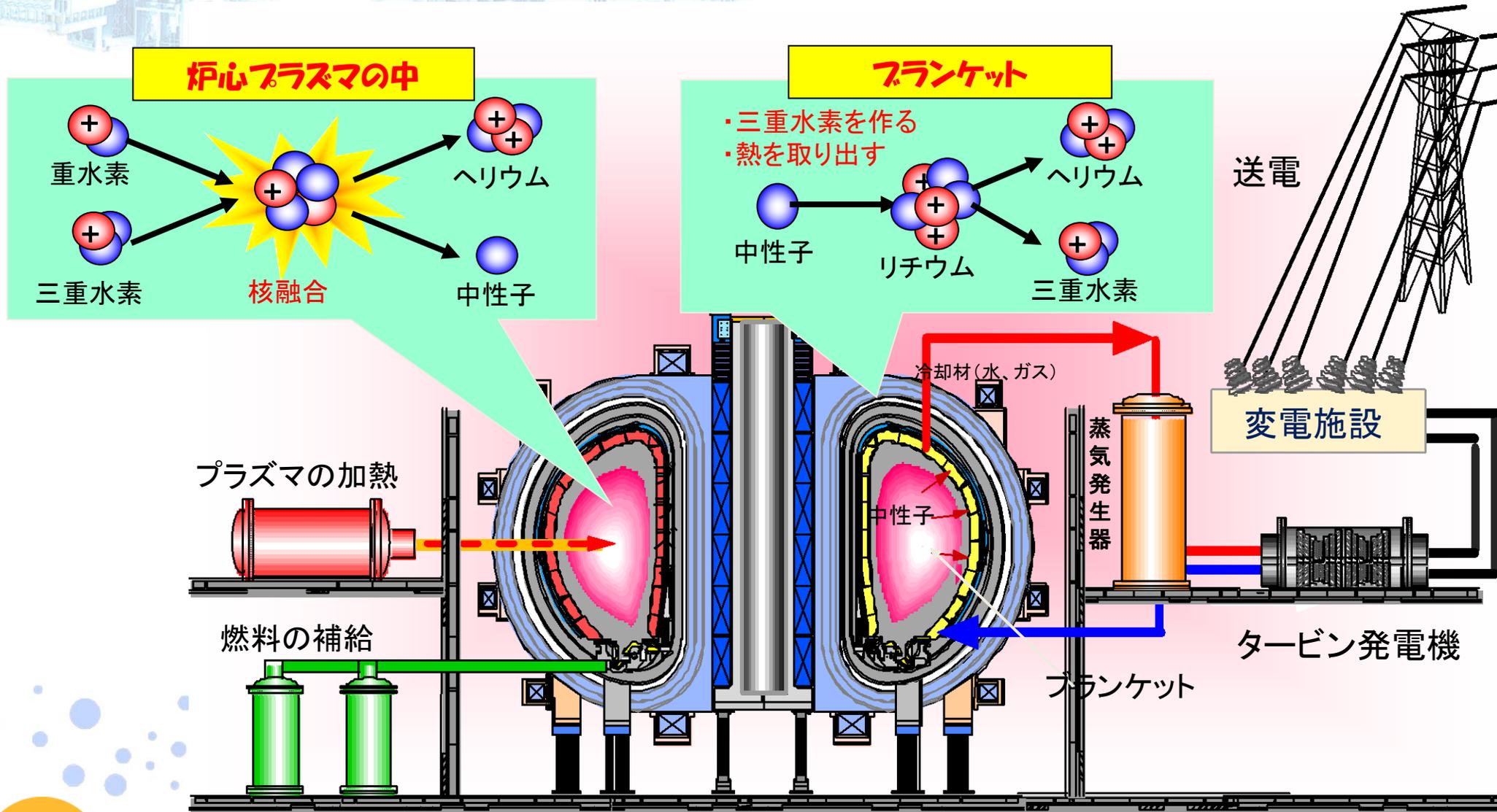
$$\Delta E = \Delta mc^2$$

# 地球上の核融合

- D二重水素( $^2\text{H}$ )とT三重水素( $^3\text{H}$ )を加熱しプラズマ状態へ(～約6000度)
- 更にプラズマを1億5千度まで加熱し、原子核が秒速1000km以上(反発できない速度)で動き回るようにする
- 2つの原子核がぶつかり融合反応が発生



# 核融合反応(エネルギー)で発電するとは？



1. 膨大なエネルギーを創出し、  
継続運転可能、ベースロード候補
2. 安全、メルトダウンの可能性がゼロ
3. CO<sub>2</sub> 又はその他の温室ガスの排出がゼロ
4. 高レベル放射性廃棄物がゼロ
5. 燃料源の枯渇する可能性がほぼゼロ

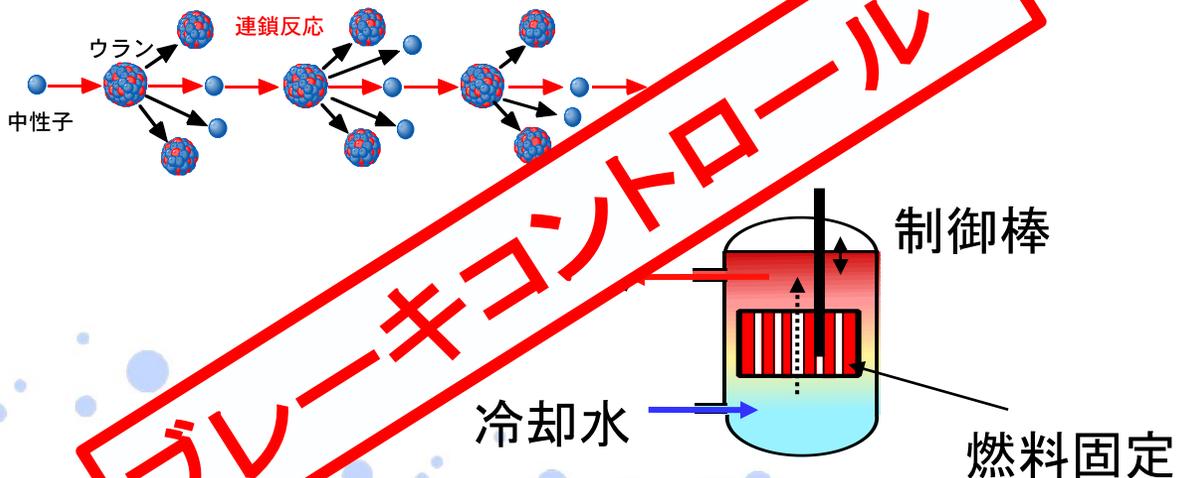


## 核分裂 (いわゆる原発)

重い原子核が分裂してエネルギーを発生

- ・前の反応が次の反応を起こさせる
- ・燃料を数年分炉の中に置いておく
- ・過度な反応を防ぐよう制御する

⇒止める、冷やす、閉じ込める

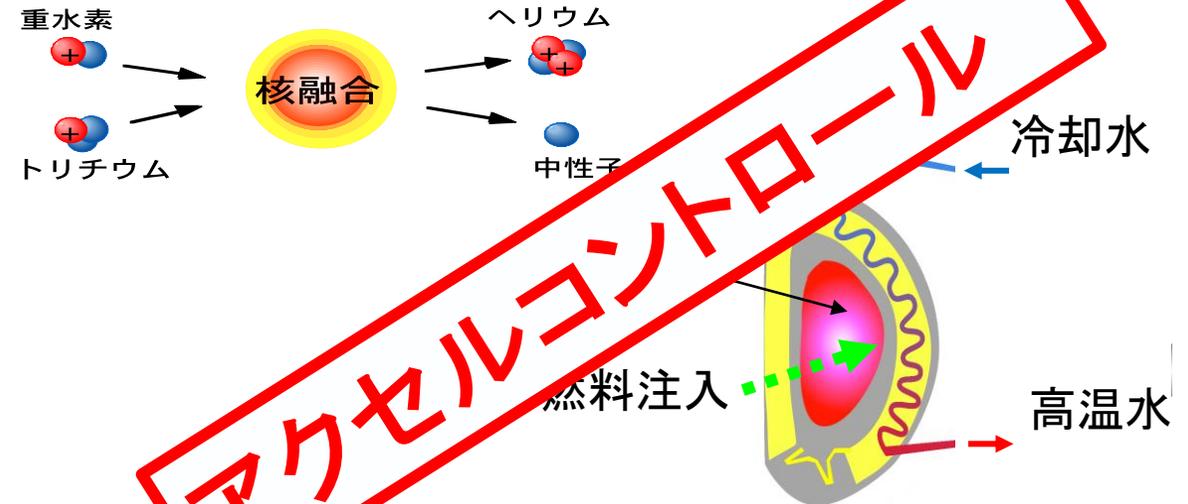


## 核融合

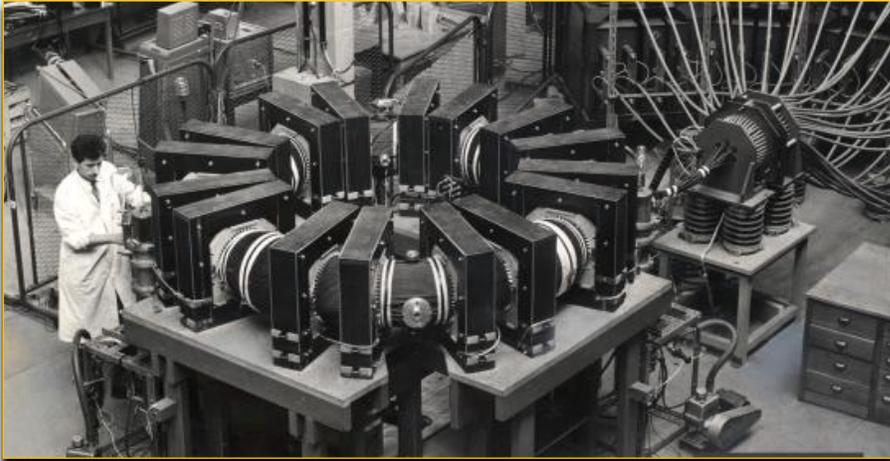
軽い原子核同士が融合してエネルギーを発生

- ・前の反応は次の反応と関係しない
- ・その時に必要な量しか炉の中に存在しない
- ・反応を持続するよう制御する(自動的に停止)

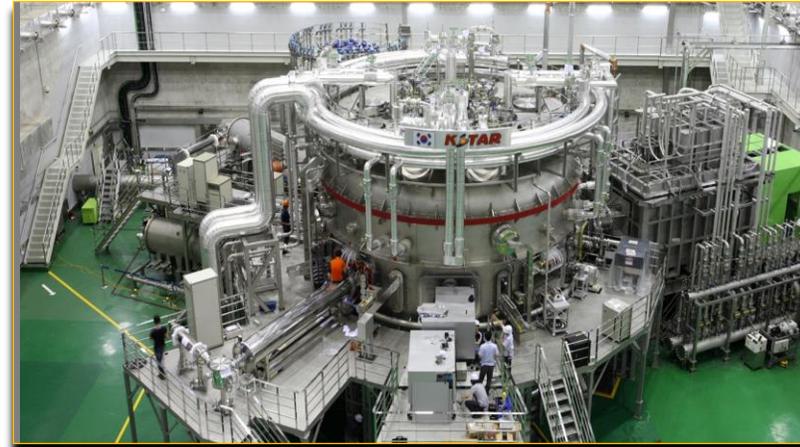
⇒止まる、冷える、閉じ込める



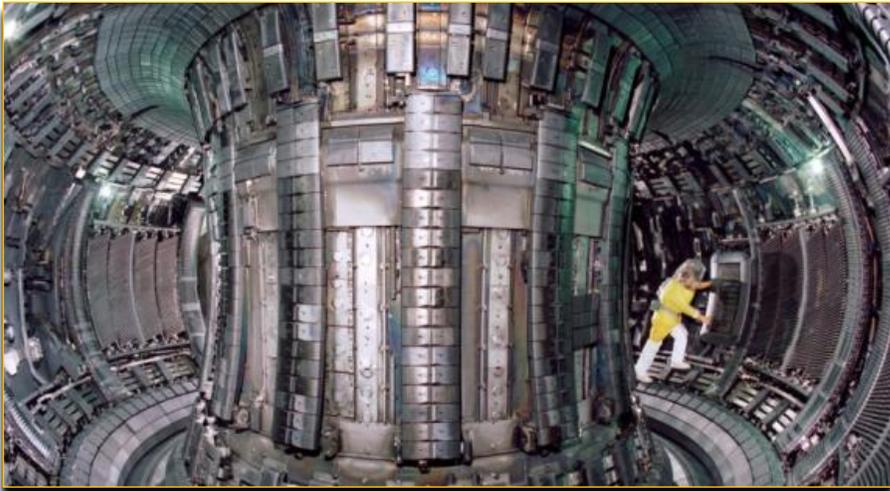
# 過去60年超に渡る科学技術の結晶



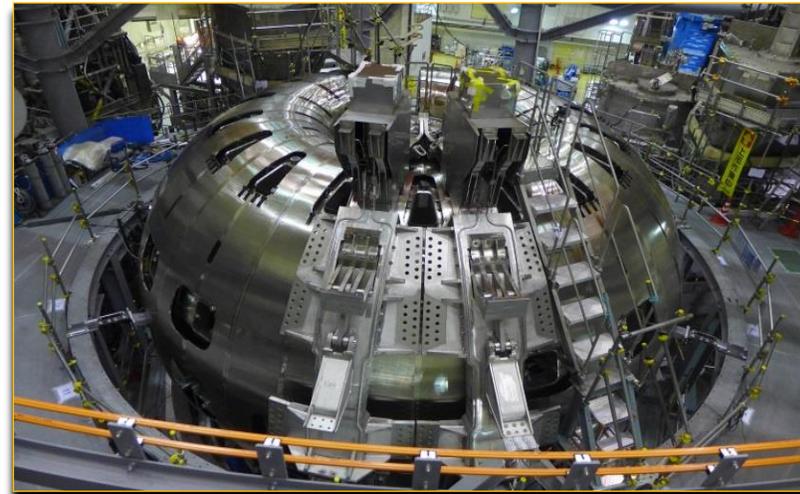
フランス  
TA-2000  
1957



韓国  
KSTAR  
2007(稼働中)



欧州  
JET  
1983  
(稼働中)



日本  
JT60  
1985-2010  
JT60-SA  
2020(組立完成)

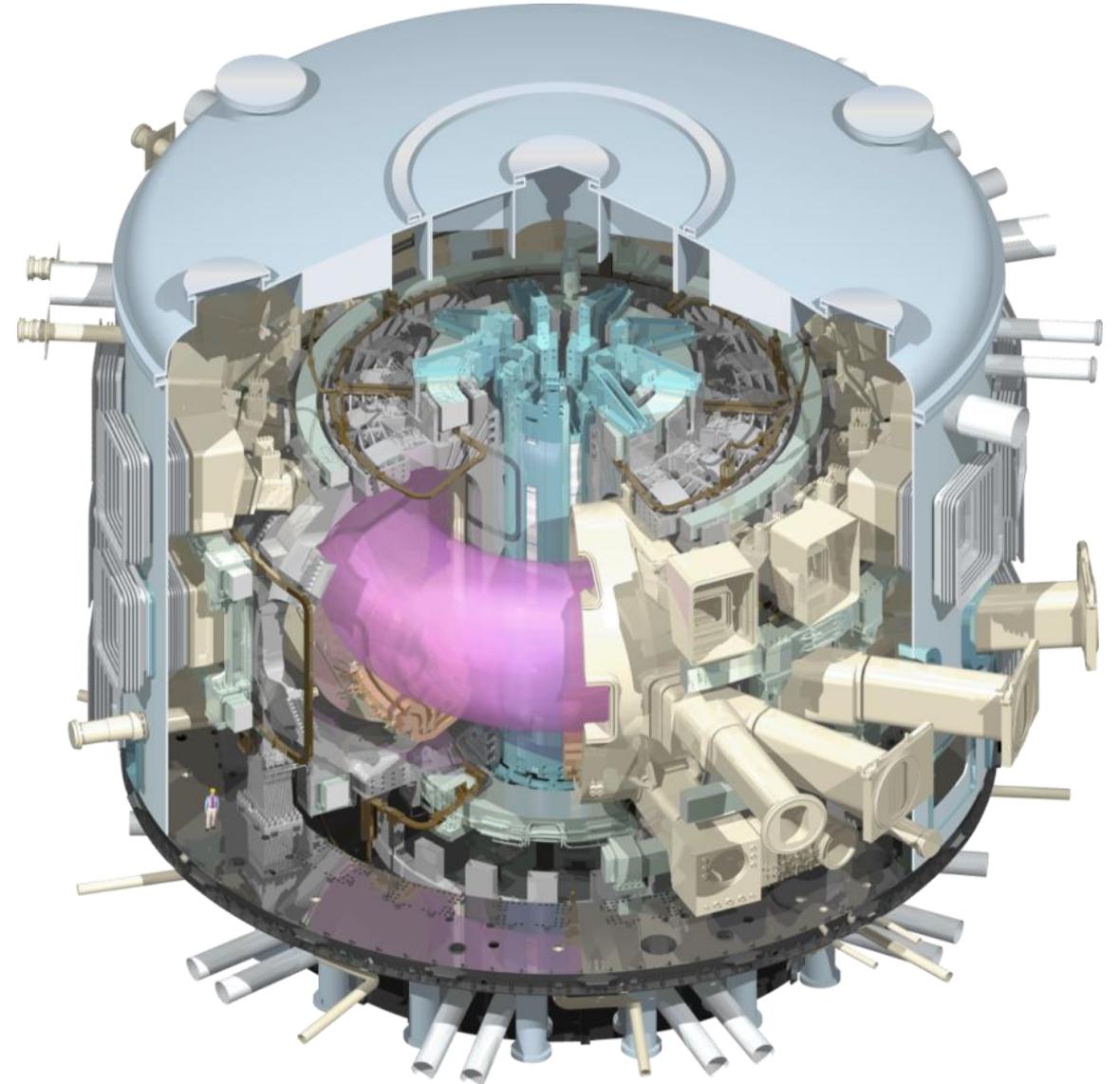
人類は既にMW単位で核融合反応を実証済: JET (欧), TFTR (米), JT-60 (日)  
核融合エネルギー: ~ 16MW  
エネルギー増倍率(入出力比):  $Q \sim 0.65$  (DT) to  $1.25$  (DD)

- ✓ (ほぼ)無制限に利用できる究極のエネルギー源を人類が入手
- ✓ 現代文明の「電気社会」への移行の加速と地球温暖化問題の解決
- ✓ 化石由来燃料(石炭、石油、天然ガス等)の保有／埋蔵に基づく地政学的パワーの消滅とそれを求める紛争の消滅
- ✓ (超長期的に見て)世界各地における電力入手コストの実質的低廉による二次効果として各種諸問題(食糧、水、貧困、教育等)の解決
- ✓ 人類の宇宙進出に必要なエネルギー源の確保

# ITER計画のミッション

トカマク型と呼ばれる、  
最も核融合エネルギーの実現の  
可能性の高い方式を通じ、  
実規模大のプラントにおいて  
核融合反応によるエネルギー  
増倍率 $Q \geq 10$ を実現する

- 50 MW の入力エネルギー
- 500 MW の出力エネルギー

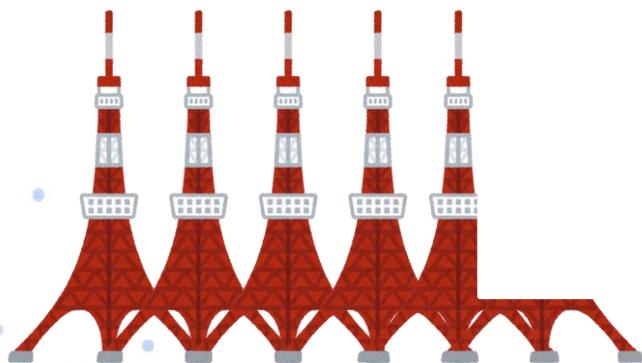


# ITERトカマクマシン

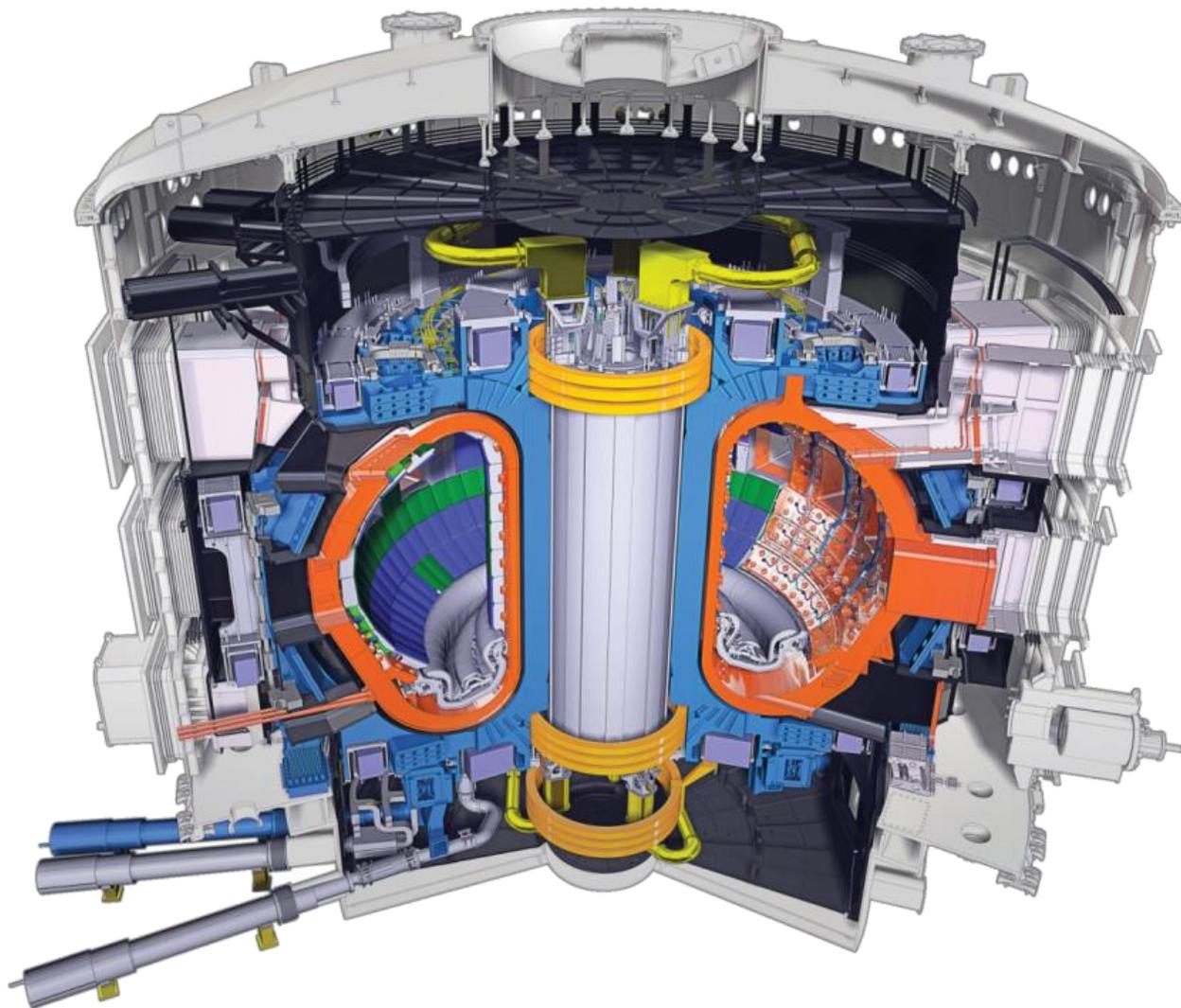
ITERとは

[総重量: ~23,000トン]

- 真空容器: ~8,000トン
- 超伝導TFコイル: 18機 x 360トン
- 中心ソレノイドコイル: ~1,000トン
- 超伝導PFコイル: 6機 直径8-25m
- クライオスタット: 直径~30メートル
- プラズマ半径: 6.2 m
- プラズマ容積: 830立米



東京タワー5.7個分



china eu india japan korea russia usa

2022.6.10 ITER Webinar

# アイデアから現実へ

ITERとは



概念設計活動:  
1988年-1990年

工学設計活動:  
1992年-1998年

建設サイト選定:  
2001年-2005年

....

1985年11月ジュネーヴサミット  
米国レーガン大統領 - ソ連ゴルバチョフ書記長会談

# 世界人口の50%、グローバルGDPの85%を占める世界7極35カ国によるITER発足



- 2005年6月: 建設サイトがフランスに決定
- 2006年11月: パリにてITER協定調印

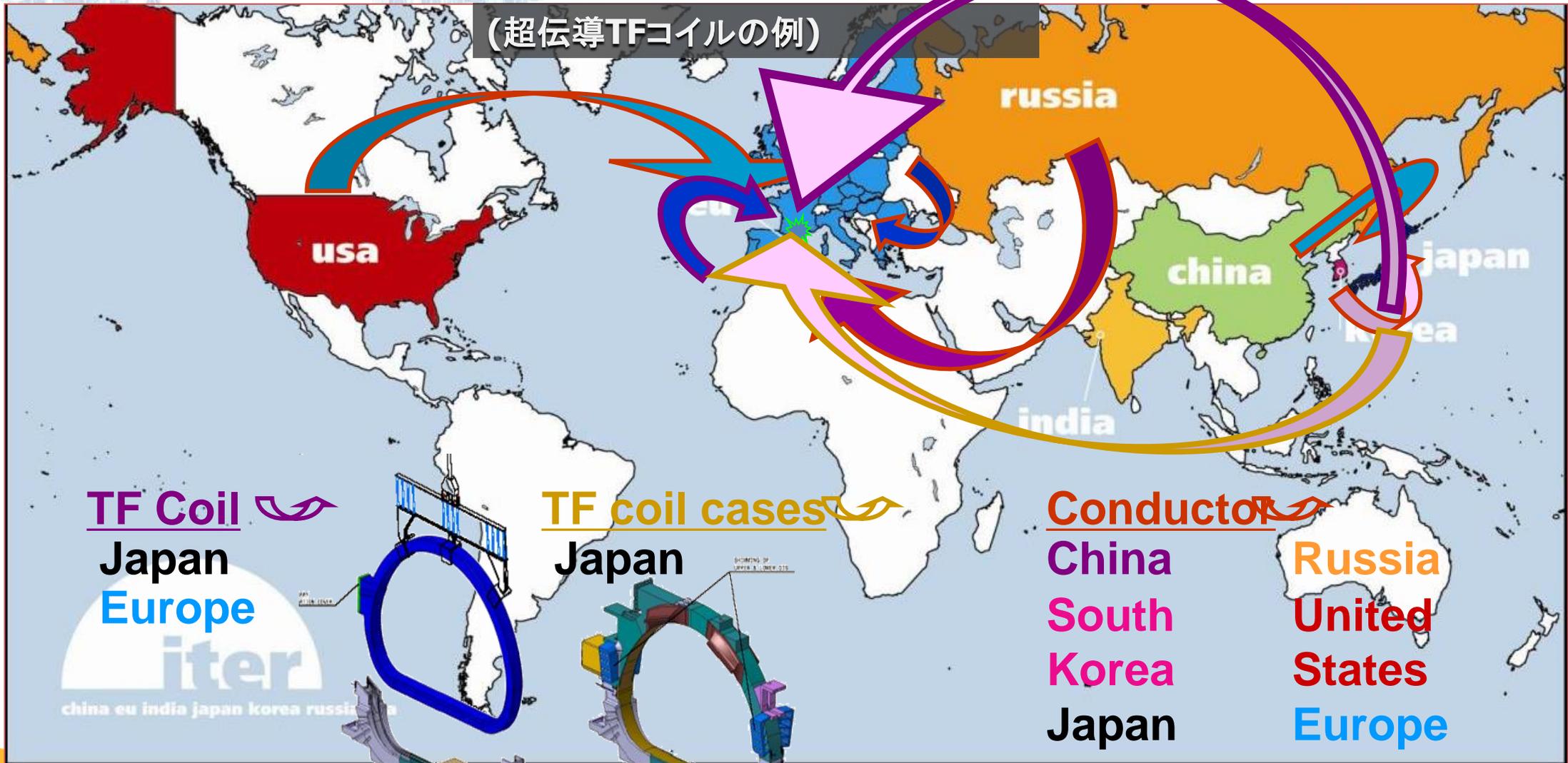
**China EU India Japan Korea Russia USA**

# 南フランス(プロヴァンス)の田舎にあります



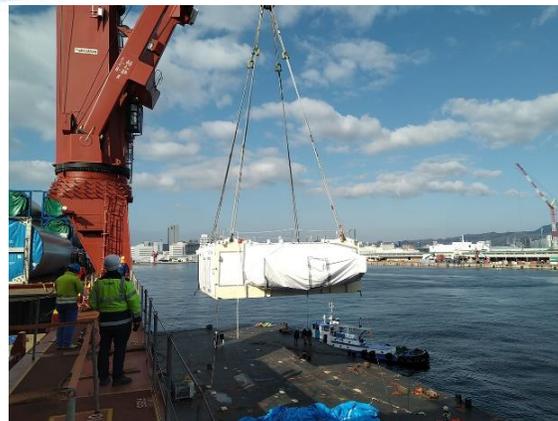
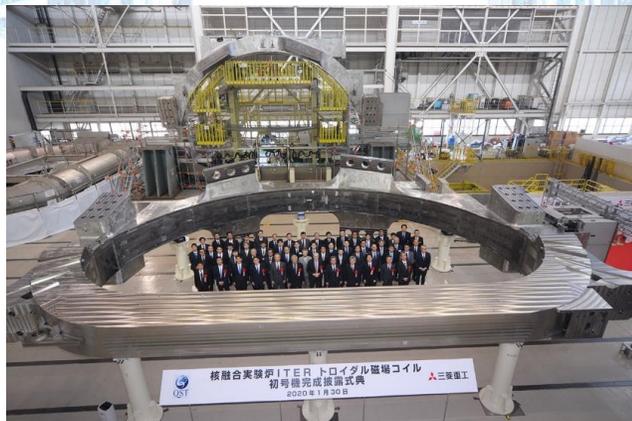
# ITER参加極それぞれの企業が参画し 各国で部品／システムを製作し統合

グローバルサプライチェーン



# ドアーツードアでの輸送

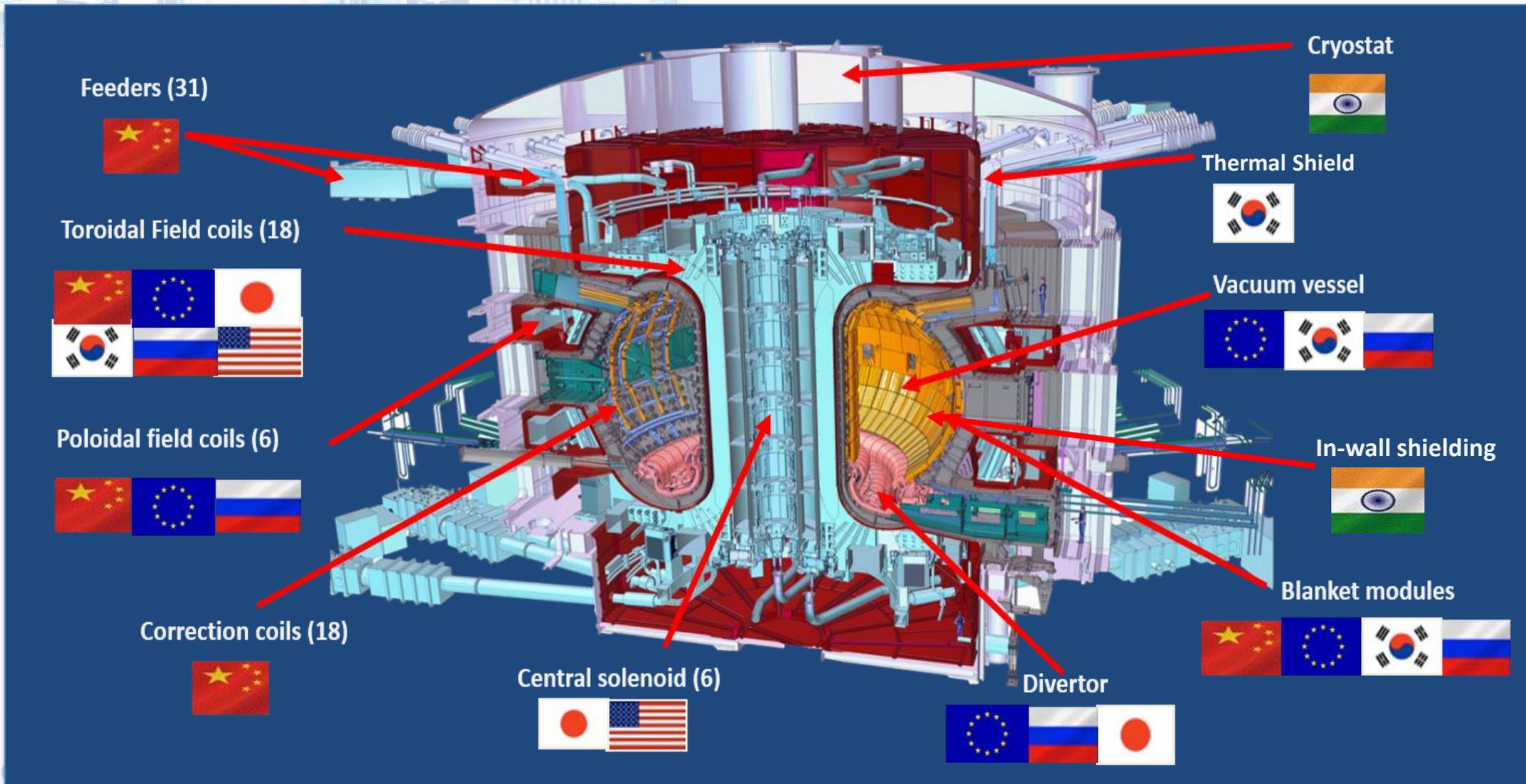
グローバルサプライチェーン



2025年末までに218個の重量物 (Highly Exceptional Loads, HEL)がITERサイトへ搬送予定

# 参加極による分担製作・物納貢献方式

## ITER マシン製作分担



\*この他にも加熱関係やプラント関係、そして先進的実験としての「TBM (Test Blanket Module)」というプログラムがあります

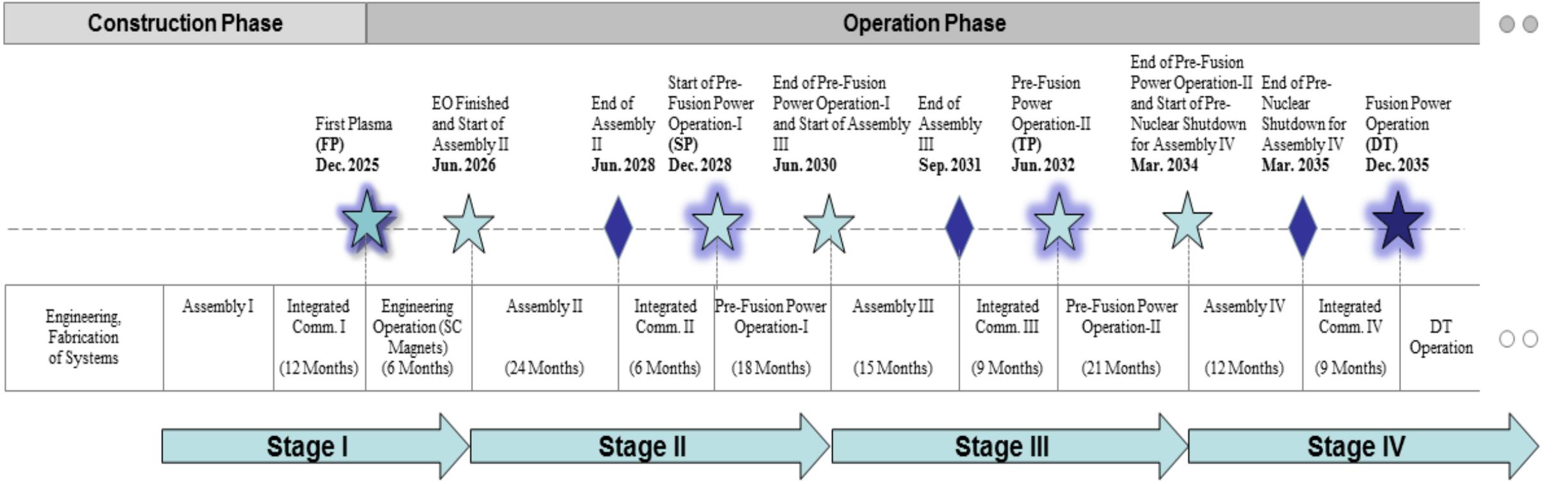


# ステージアプローチ

# ITERスケジュール

\*COVID前

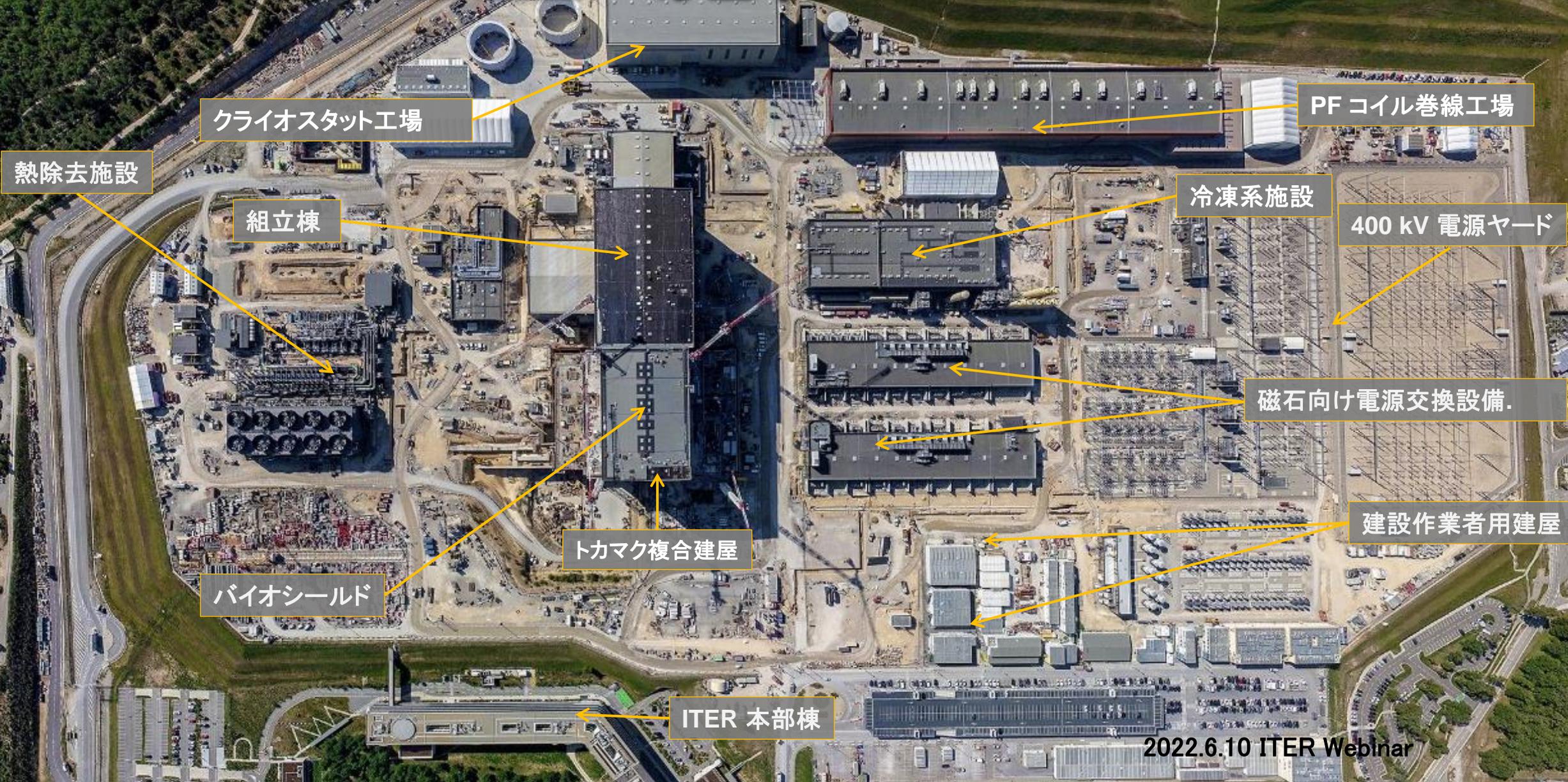
公式版



# 2022年5月 初期稼働（初プラズマ）まで76.4%以上到達

厳密に定義されたプロジェクトパフォーマンス測定の結果、「初プラズマまでに計画された全ての建設計画のスコープ」のうち76.4%が達成されています

# 主要な建屋・施設はほぼ完成



# 日本はマシンのコア機器調達を担当 オールジャパンで遅延なく順調に設計・製作を進行中

## 日本の貢献(機器製作)

### 超伝導TFコイル

TF導体: 25% (製作済)  
TF巻線、組立: 47%  
TF構造物: 100%

### ブランケット遠隔保守

全システム(設計中)

### ダイバーター

外側ターゲット(設計中)

### トリチウム除去

ITER機構との共同調達(設計中)

### 中心ソレノイド

CS導体: 100% (済)

### 計測装置

マイクロフィッションチャンバー  
ポロイダル偏光系  
周辺トムソン散乱  
ダイバーター不純物モニタ  
IRサーモグラフィー  
上部ポート統合  
下部ポート統合

### 中性粒子ビーム加熱

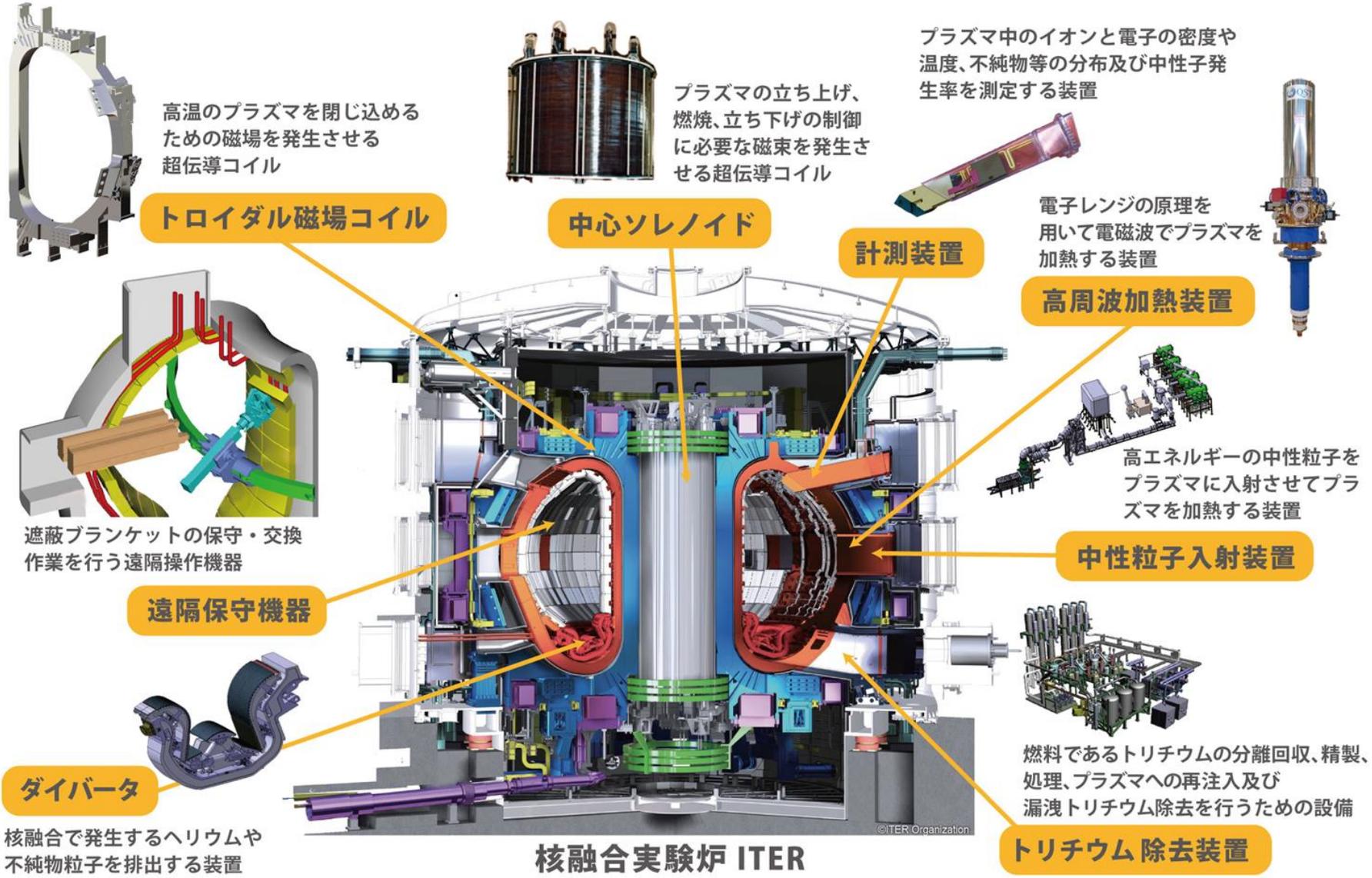
HVブッシング: 100%  
1 MV 電源 HV part: 100%  
1 MeV 加速電源: 33%

### 高周波加熱

ジャイロトロン: 8機/24機中(8機完成)  
水平ランチャー: 71%

# 日本が調達する機器の一覧

## 日本の貢献(機器製作)



# 日本が調達する機器の進捗

# 日本の貢献(機器製作)

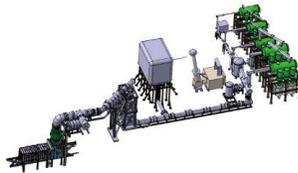
## トロイダル磁場(TF)コイル ※一部



| 日本が製作する機器(装置)   | 数量(割合)       | 進捗状況           |
|-----------------|--------------|----------------|
| 導体              | 33 導体 (25%)  | 全量製作完了 (2015年) |
| 構造物             | 19 機分 (100%) | 全機製作           |
| TF コイル (巻線・一体化) | 9 機分 (47%)   | 6 機分の製作完了      |

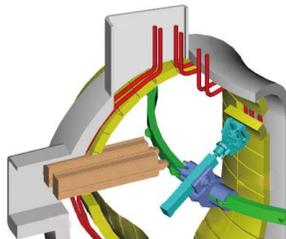
**出荷状況** 9 機中 6 機が出荷  
6 機が ITER サイトに納品完了

## 中性粒子入射加熱装置 ※一部



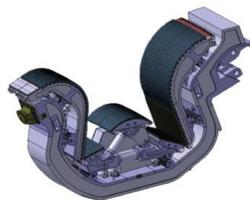
| 日本が製作する機器(装置) | 数量(割合)     | 進捗状況       |
|---------------|------------|------------|
| 1MV 電源高電圧部    | 3 基 (100%) | 最終設計 80%達成 |
| 高電圧ブッシング      | 3 基 (100%) | 最終設計 60%達成 |
| 加速器           | 1 基 (33%)  | 最終設計 72%達成 |

## ブランケット遠隔保守機器

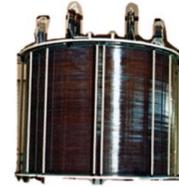


| 日本が製作する機器(装置)       | 数量(割合) | 進捗状況       |
|---------------------|--------|------------|
| ブランケット遠隔保守システム、ツール類 | 100%   | 最終設計 55%達成 |

## ダイバータ ※一部



| 日本が製作する機器(装置) | 数量(割合)      | 進捗状況                     |
|---------------|-------------|--------------------------|
| 外側ターゲット       | 54 基 (100%) | 最終設計が完了<br>2021 年度から製作開始 |



## 中心ソレノイド(CS) ※一部

| 日本が製作する機器(装置) | 数量(割合)       | 進捗状況           |
|---------------|--------------|----------------|
| 導体            | 49 導体 (100%) | 全量製作完了 (2017年) |

**出荷状況** 全量出荷・納品完了

## 計測装置 ※一部



| 日本が製作する機器(装置)   | 数量(割合)    | 進捗状況                     |
|---|-----------|--------------------------|
| 5つの計測装置<br>・マイクロフィッションチェンバー<br>・周辺トムソン散乱計測装置<br>・ポロイダル偏光計<br>・ダイバータ不純物モニター<br>・ダイバータ赤外サーモグラフィ | 全計測装置の14% | 最終設計 42%達成<br>機器製作 15%達成 |
| 下部ポート統合機器   |           | 初期設計を完了                  |

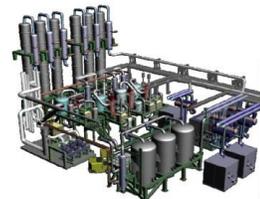
## 高周波(EC)加熱装置 ※一部



| 日本が製作する機器(装置)          | 数量(割合)    | 進捗状況           |
|------------------------|-----------|----------------|
| ジャイロトロン                | 8 機 (33%) | 全機製作完了 (2021年) |
| 高周波加熱ランチャー (ポートプラグを含む) | 50%       | 最終設計 80%達成     |

**出荷状況** ジャイロトロン 8 機中 2 機を出荷

## トリチウムプラント ※一部



| 日本が製作する機器(装置) | 数量(割合) | 進捗状況       |
|---------------|--------|------------|
| トリチウム除去系      | 50%    | 最終設計 35%達成 |

# 世界各地での製作進捗その

## 各国の貢献(機器製作)



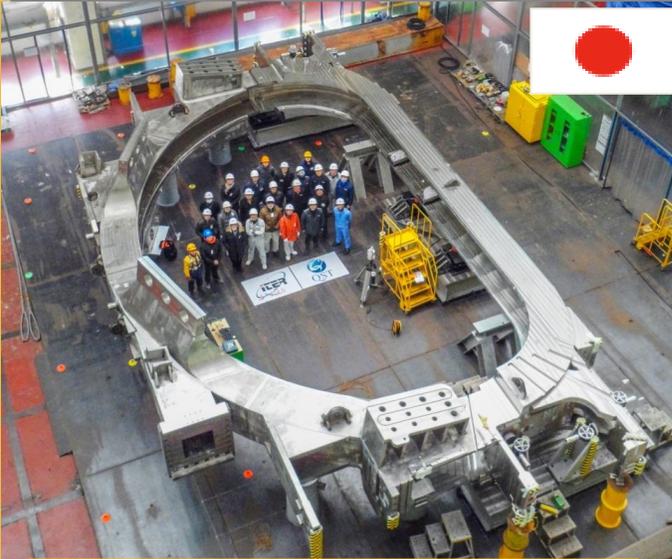
Vacuum Vessel Sector Assembly



Cryolite production



Magnet clamp fabrication



TF coil structure



High heat flux testing



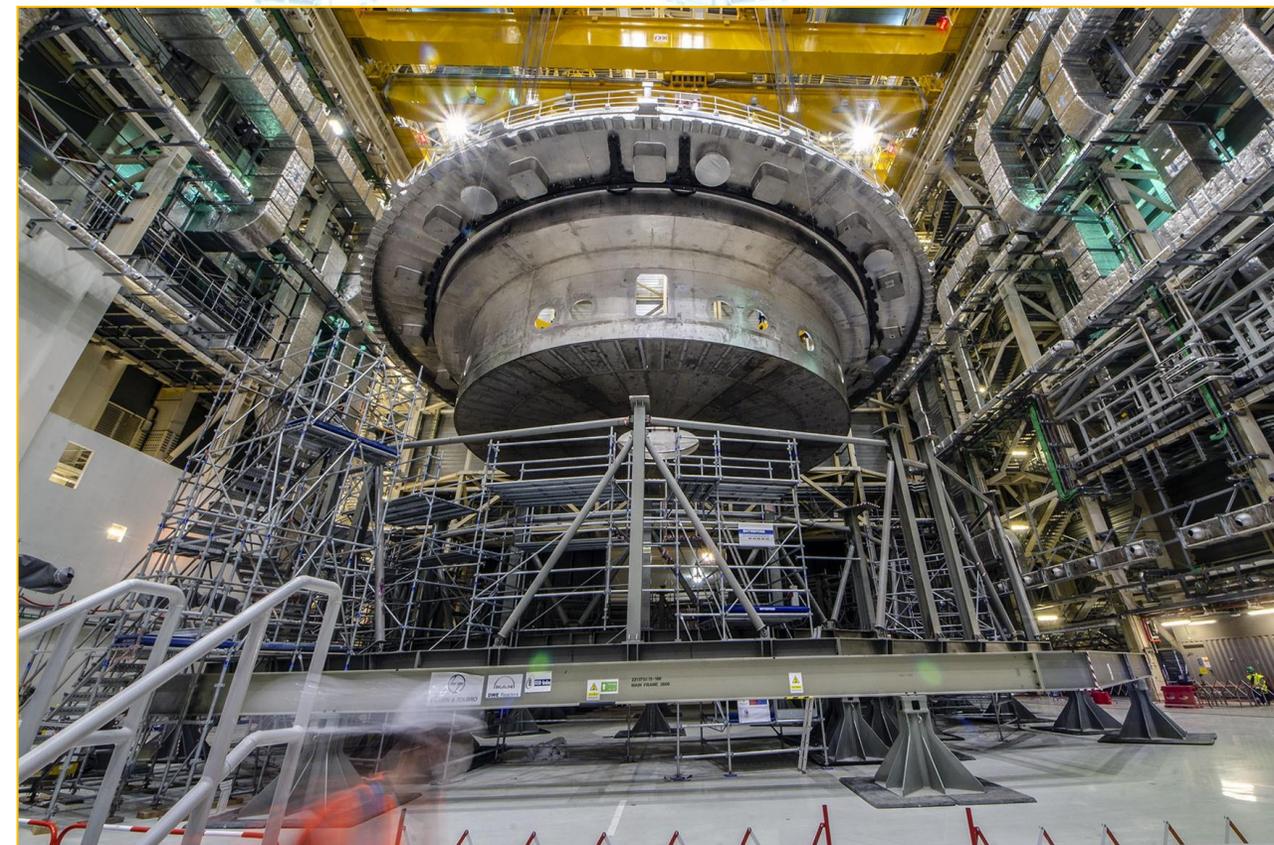
CS supports



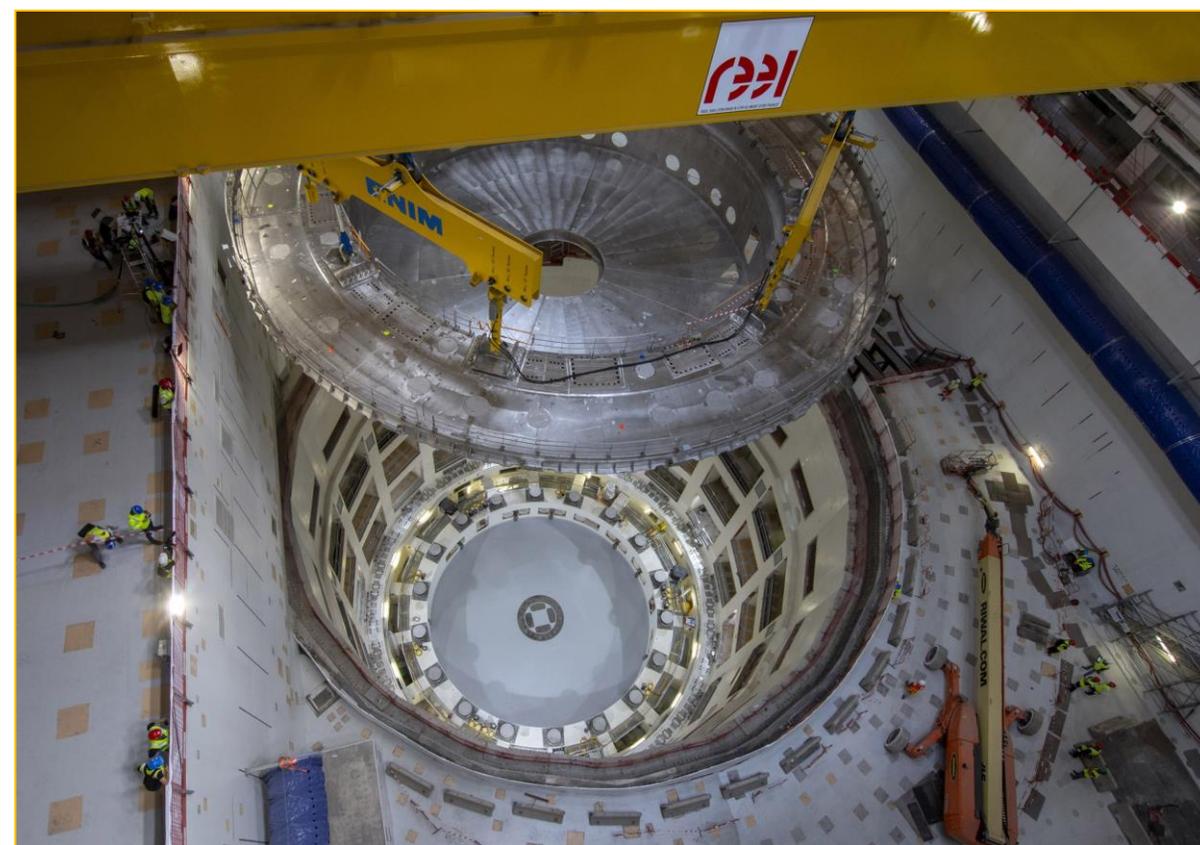
PF Coil #5

# 巨大クレーンによる初作業 クライオスタットベース吊り上げ & 設置

初クレーン作業



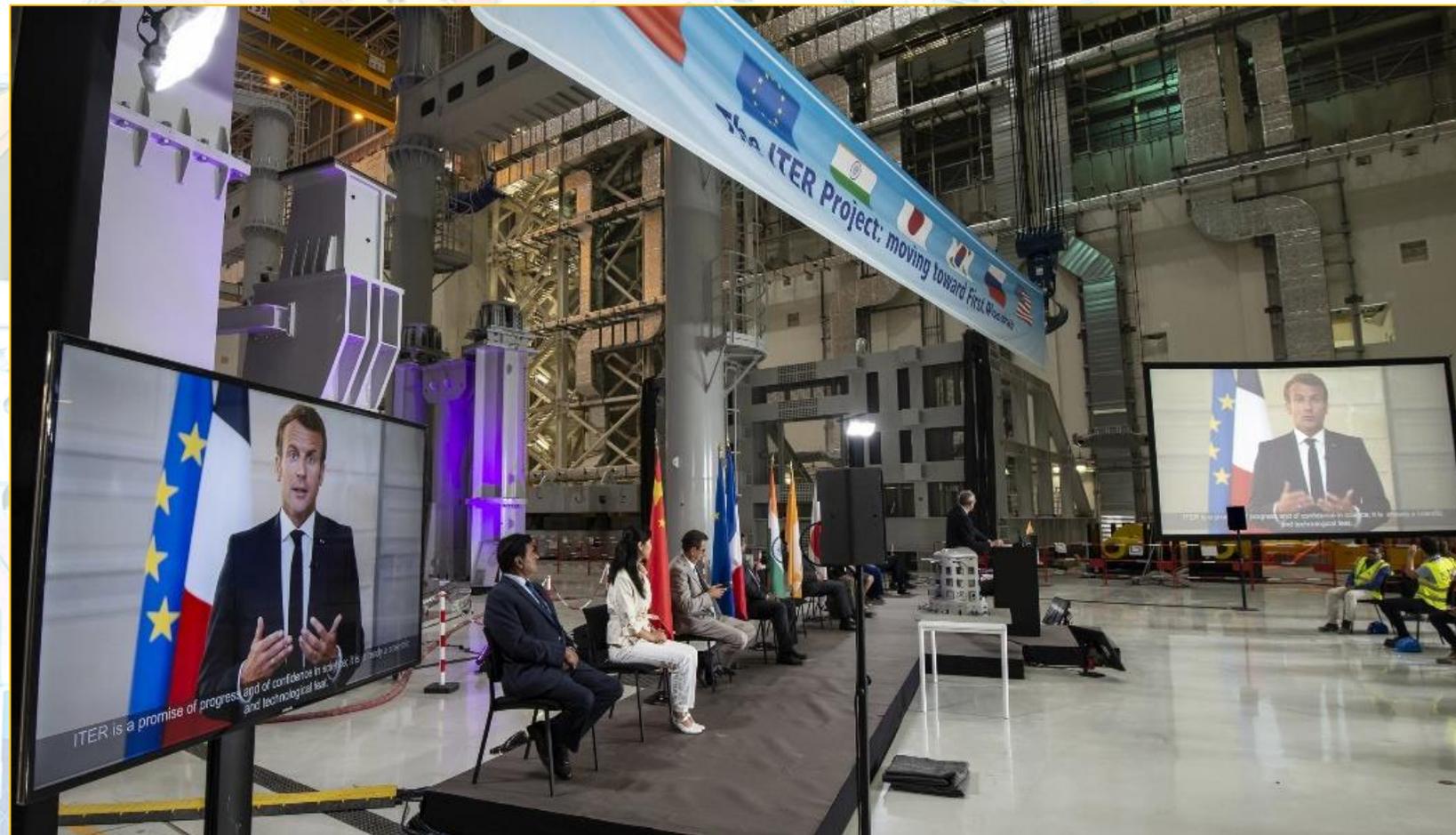
クライオスタットベースの吊り上げ(組立棟)  
2020年5月26日



クライオスタットベースの吊り下げ(ピット)  
2020年5月26日

# 誘致国フランス・マクロン大統領による ホストにて組立開始式典を開催

核融合マシン組立開始



## ITER加盟極の首脳陣祝辞

- 日本
  - 安倍 首相
- 欧州連合
  - メルケル理事会議長(独)
  - シムソン エネルギー長官
- 中国
  - 習近平 国家主席
- インド
  - モディ 首相
- 韓国
  - 文 大統領
- ロシア
  - プーチン 大統領
- 米国
  - ブリエット エネルギー長官

本年組立開始式典は世界101カ国41言語で3000記事(TV・新聞・Web等)を記録  
世界中のあらゆる言語・媒体でITER計画の進捗・核融合関連のニュースが増加



china eu india japan korea russia usa

クライオスタット・ベース及び下部胴据付

PFコイル6&5仮据付

水平で輸送

水平→垂直

組立棟

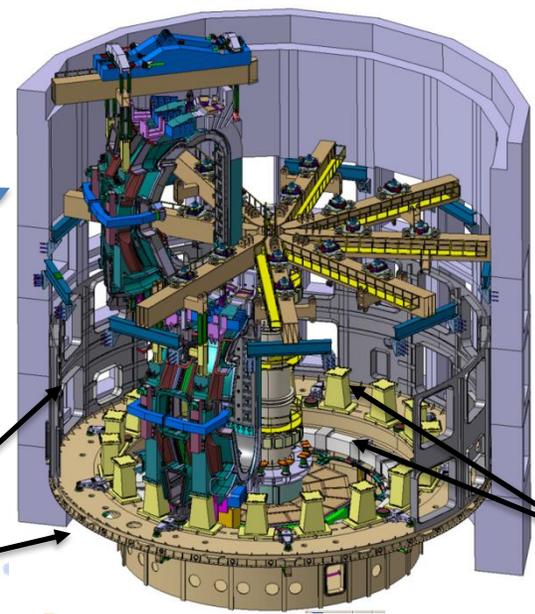
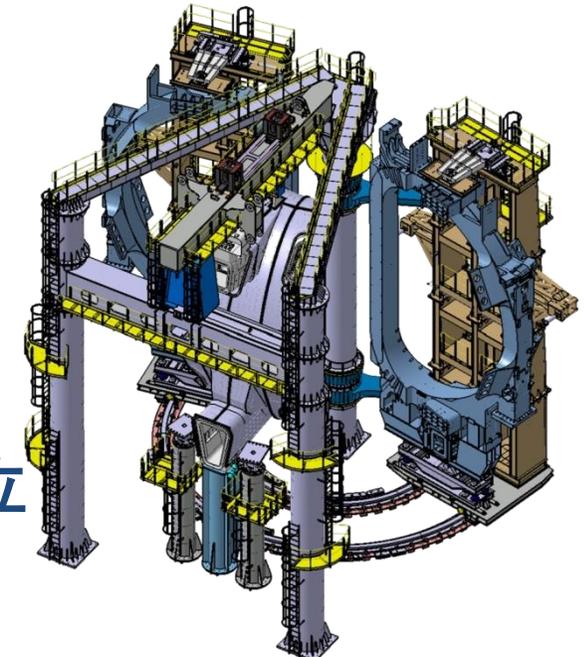
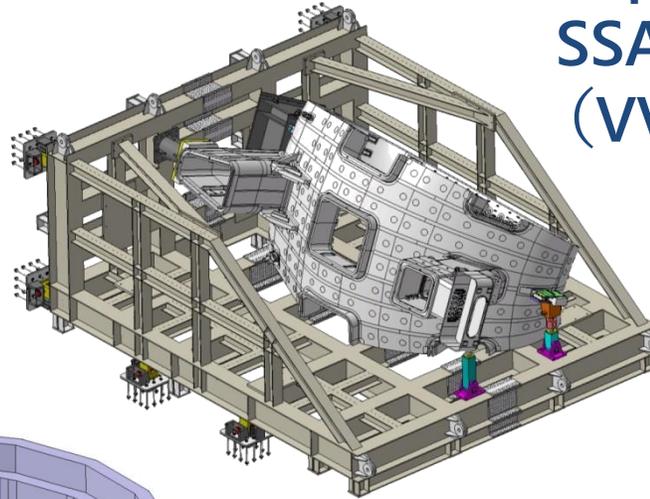
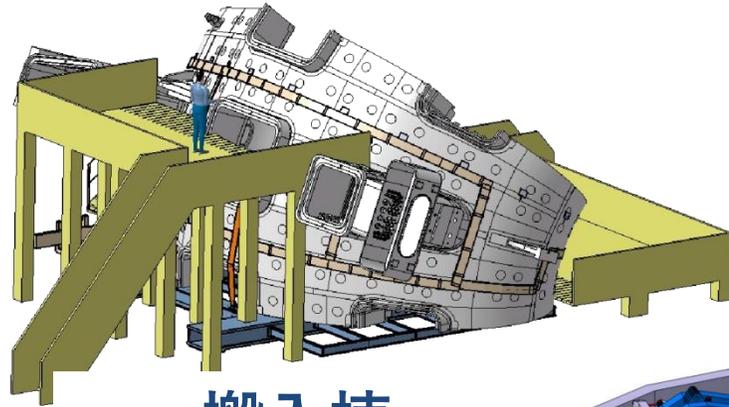
Upendingツールで姿勢変更  
SSATにてセクタ（40度）組立  
（VV,熱シールド、TFコイル2機）

セクタ組立

トカマク組立

トカマク棟  
セクタ据付→トカマクに組立

PFコイル6&5



搬入棟

クリーニング

トカマク・ピット

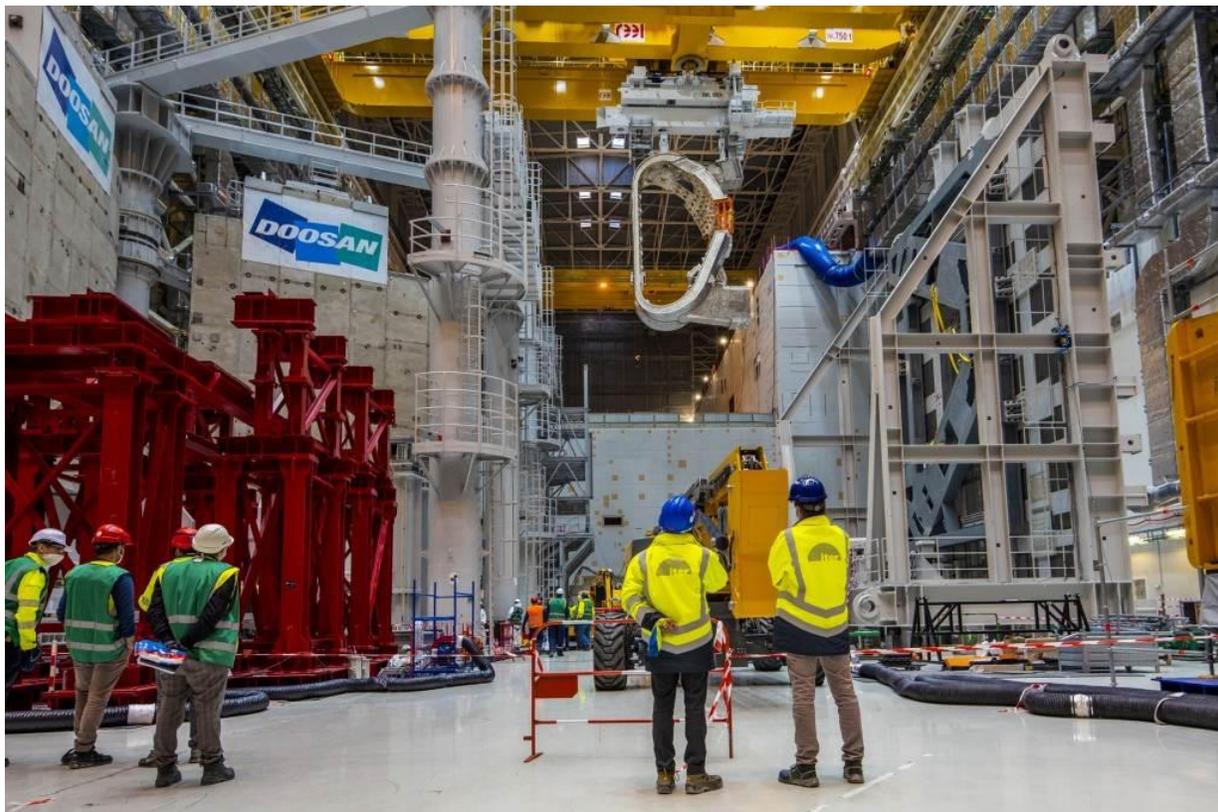
クライオスタット

下部胴

ベース

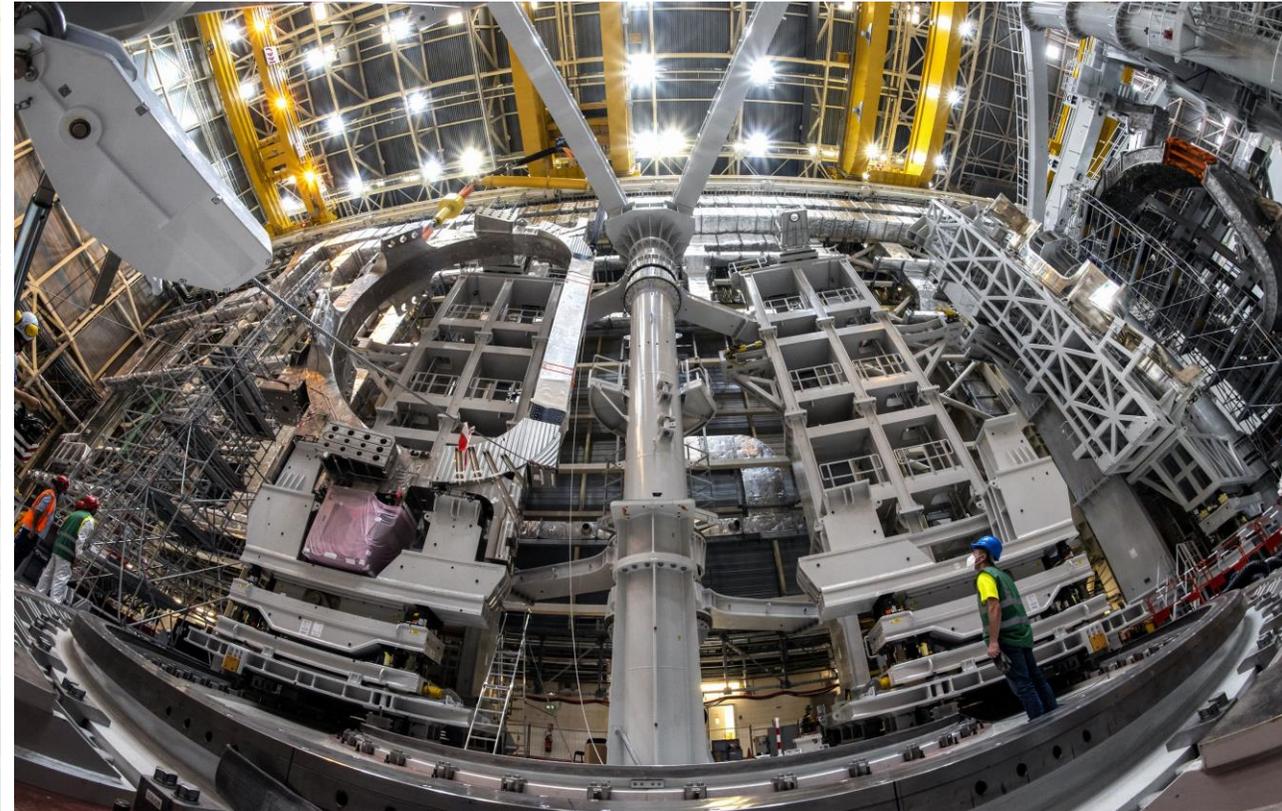
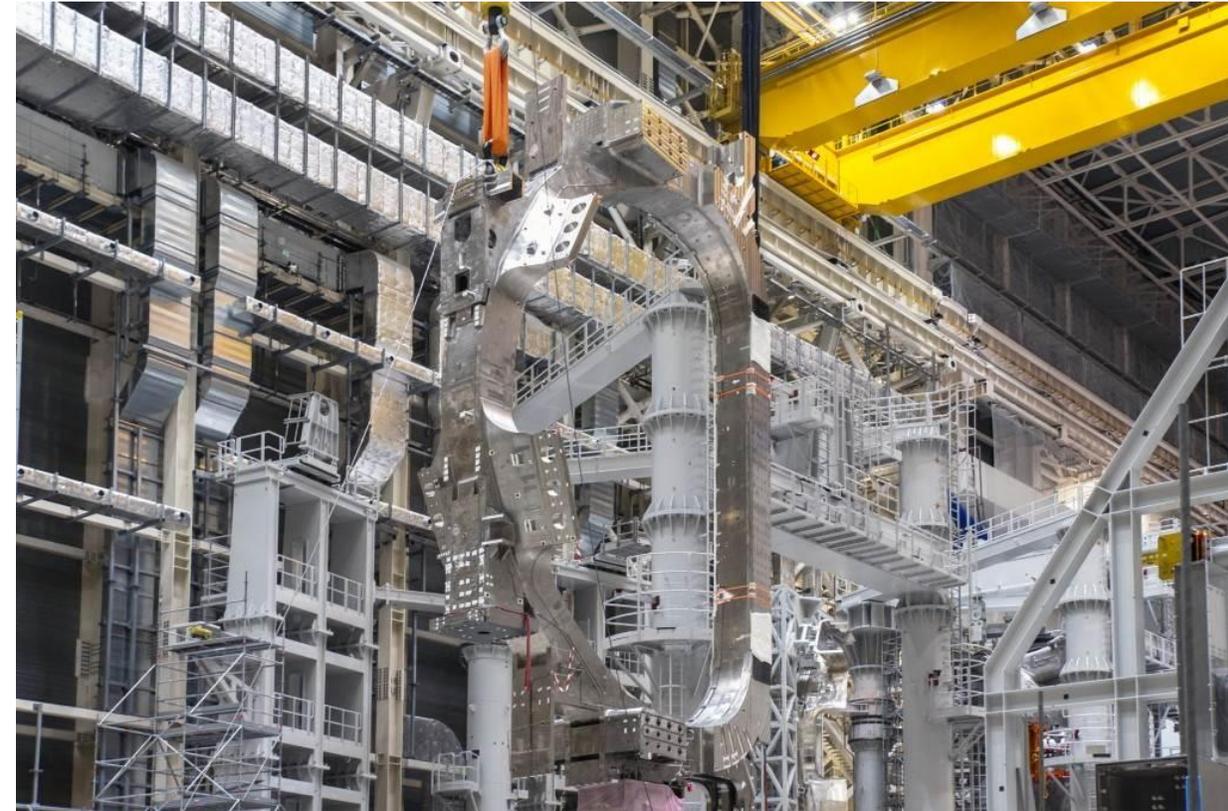
# 核融合マシンの初セクターに必要な 真空容器#6を組立治具に据え付け完了

初セクタ(#6)組立開始

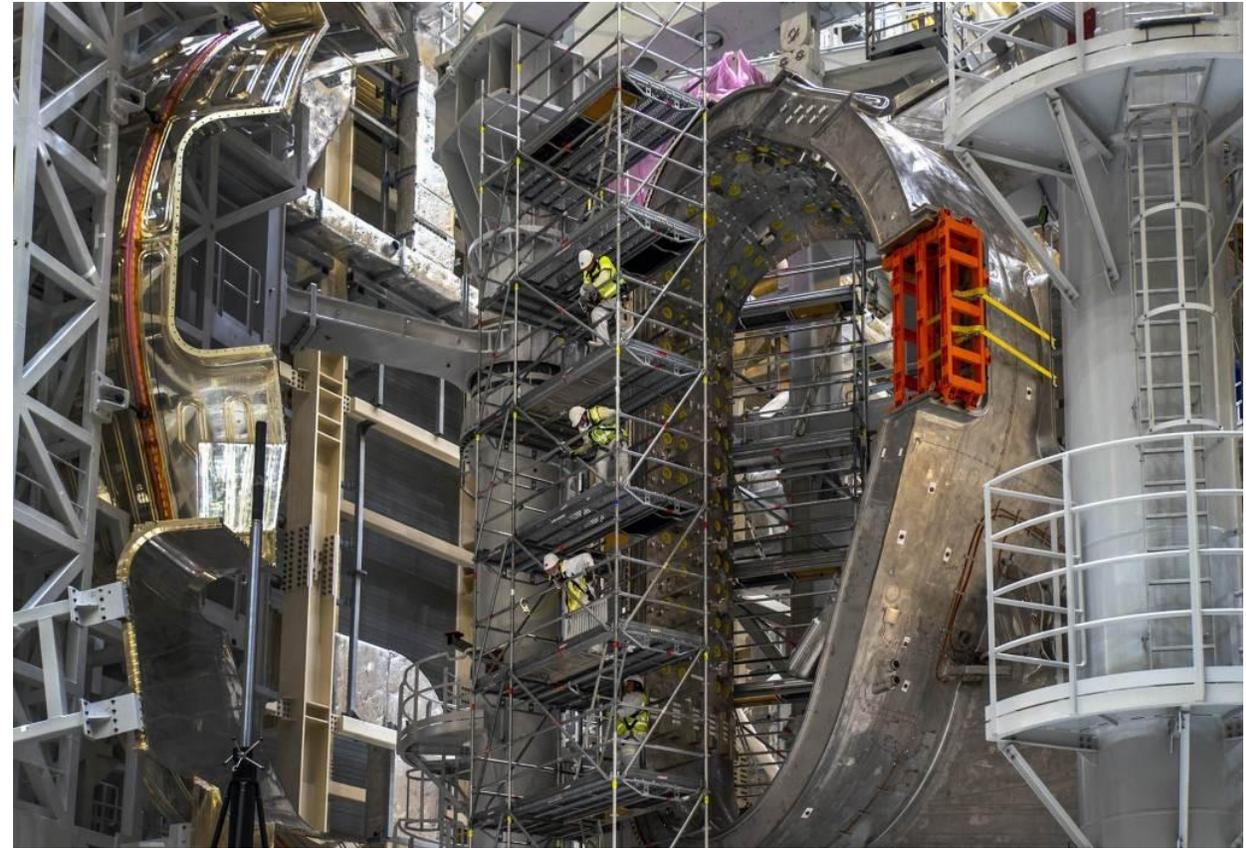
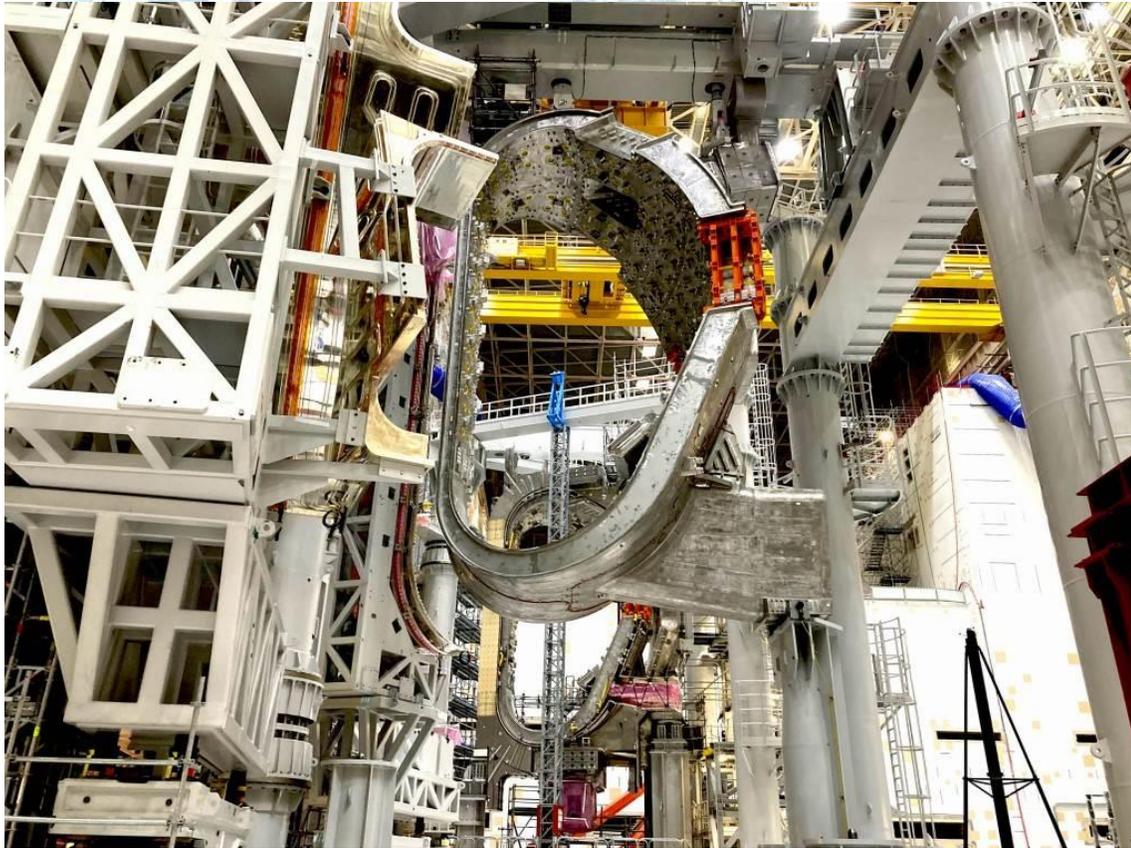


真空容器#6吊り上げ  
2021年4月6日

# 世界初号機TFコイルの立ち上げ吊上げ完了初セクタ(#6)組立開始



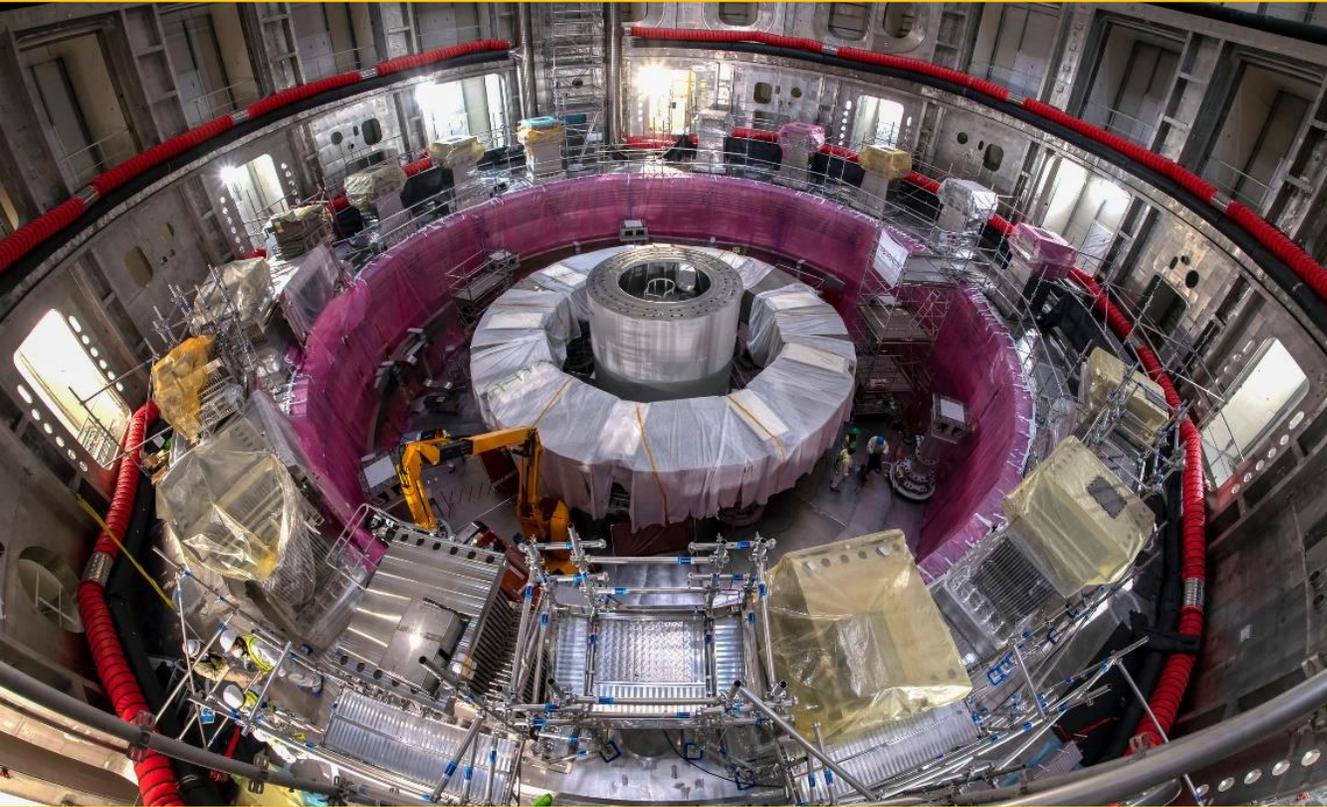
TFコイル12吊り上げ  
2021年6月



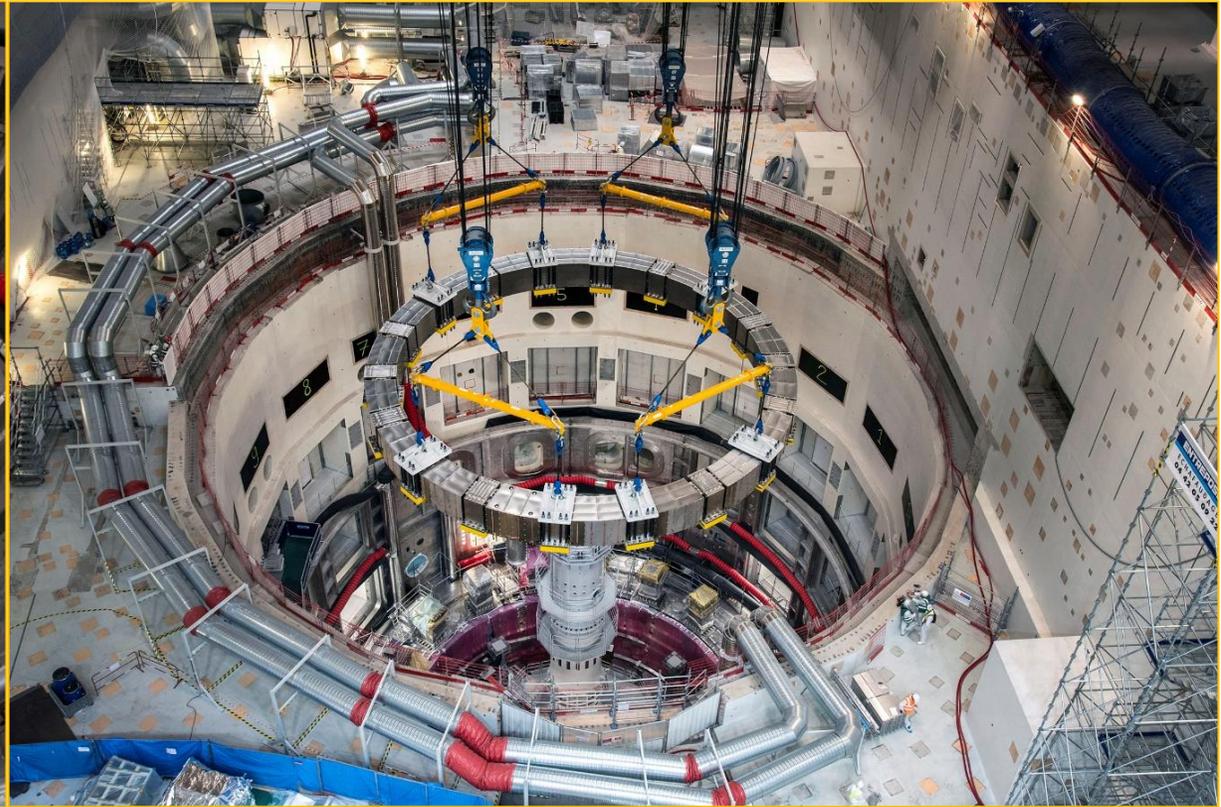
初号機と弐号機セクターモジュール

# トカマクピットにはPFコイルを 既に2機据え付け完了

ピット内部の様子



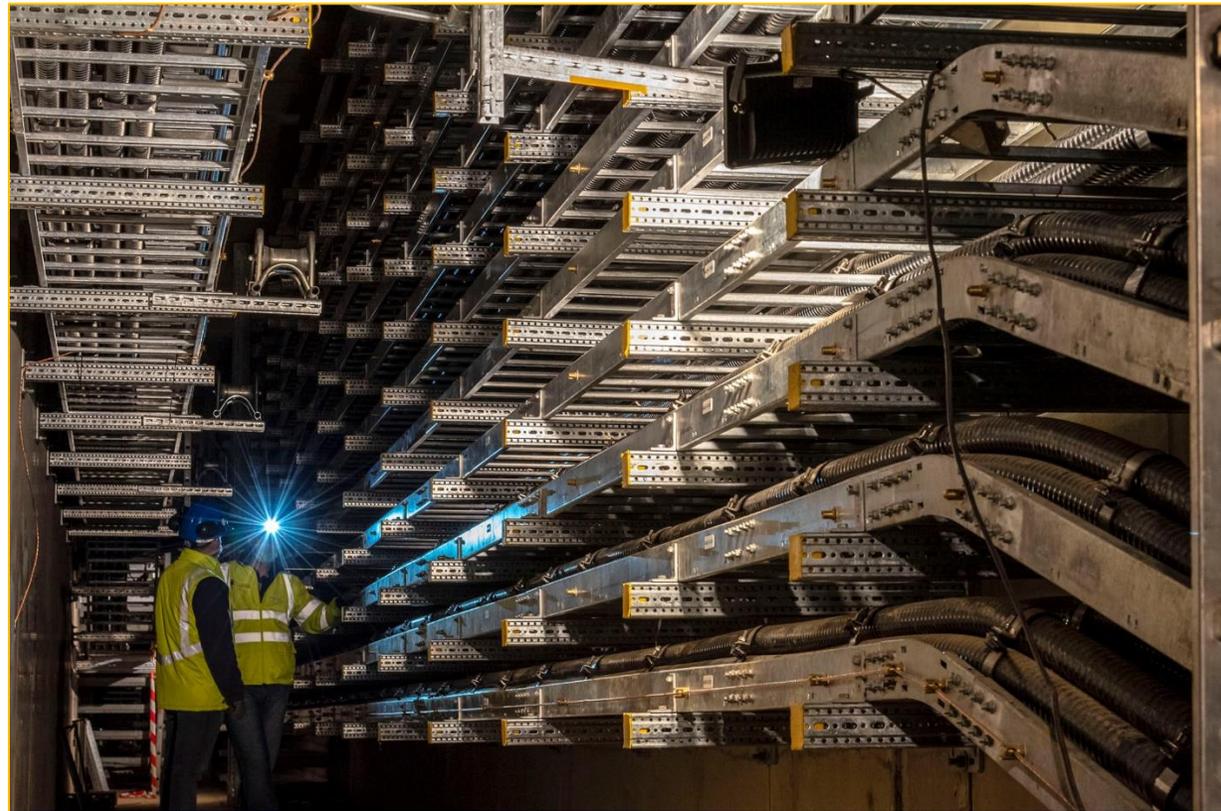
PFコイル#6 設置



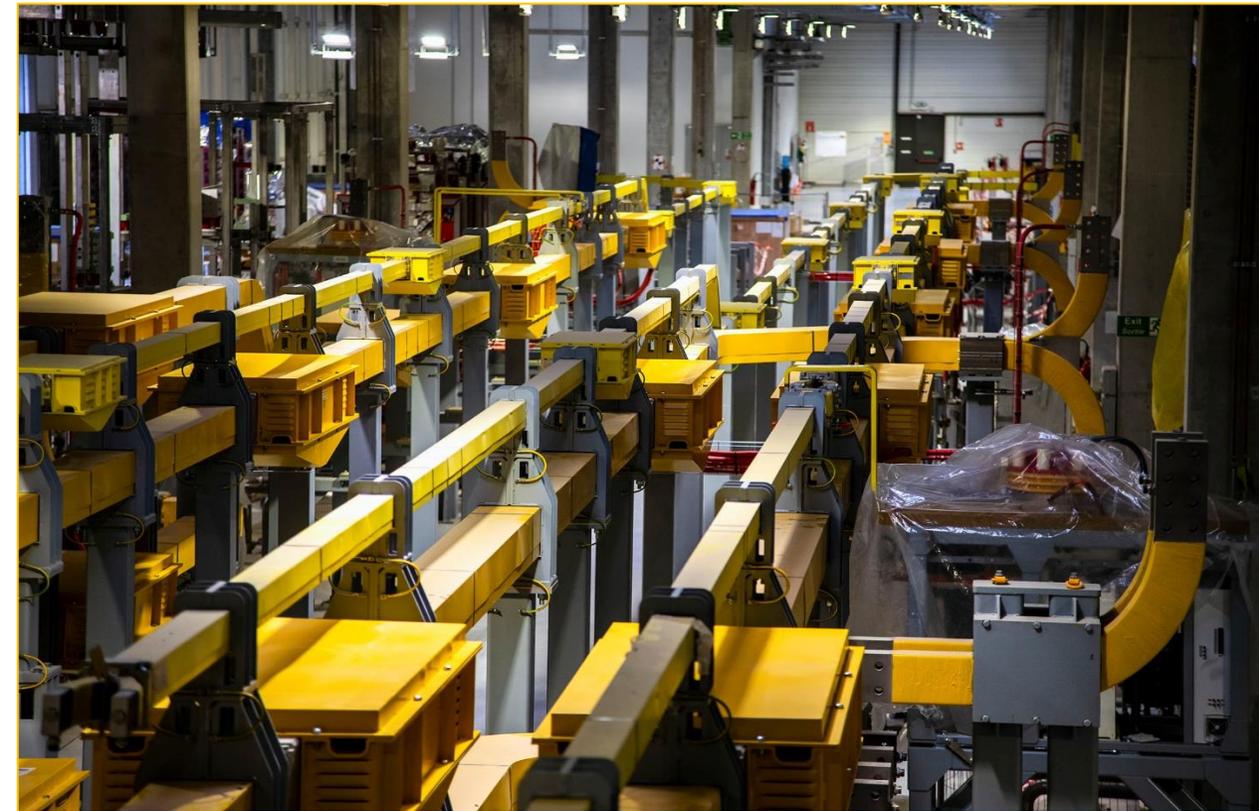
PFコイル#5 設置

# 各種プラント系システムは着実に完成 いよいよコミッショニングへ

プラントシステム



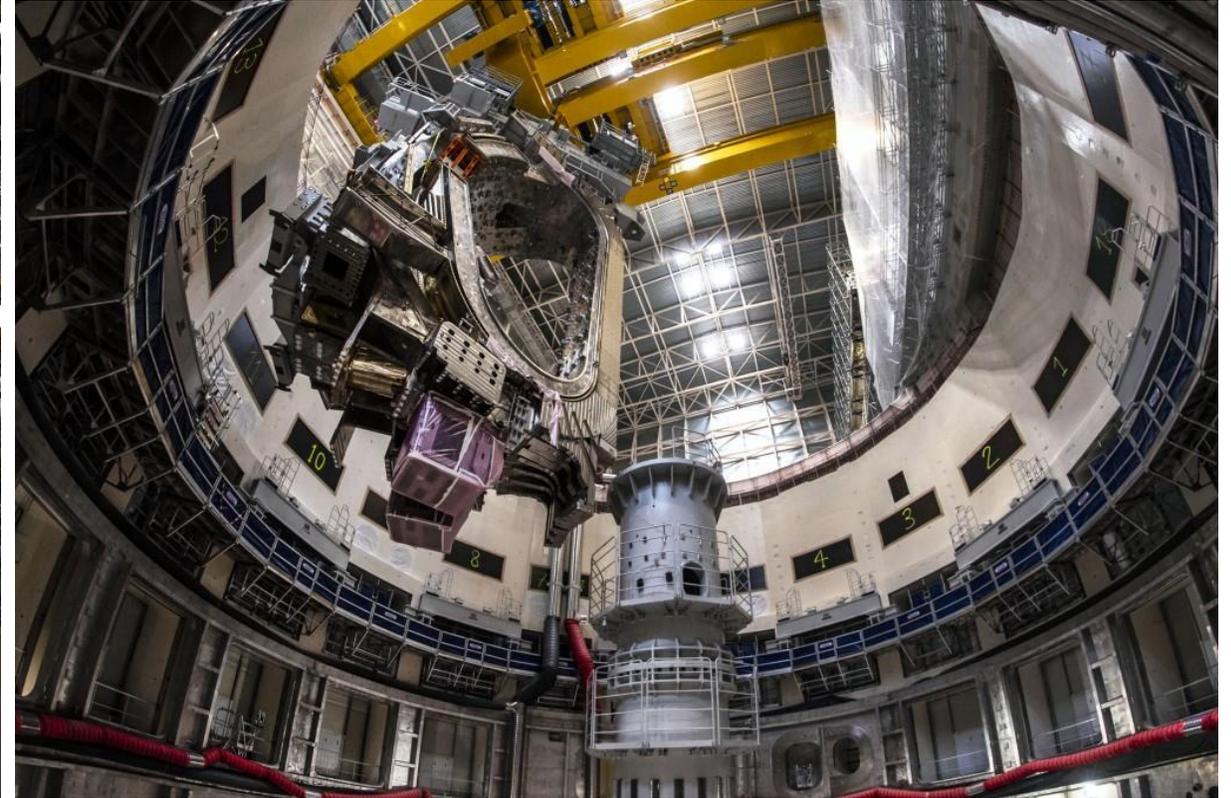
10,000kmに渡るケーブル敷設



AC/DC変換 8kmのバスバー

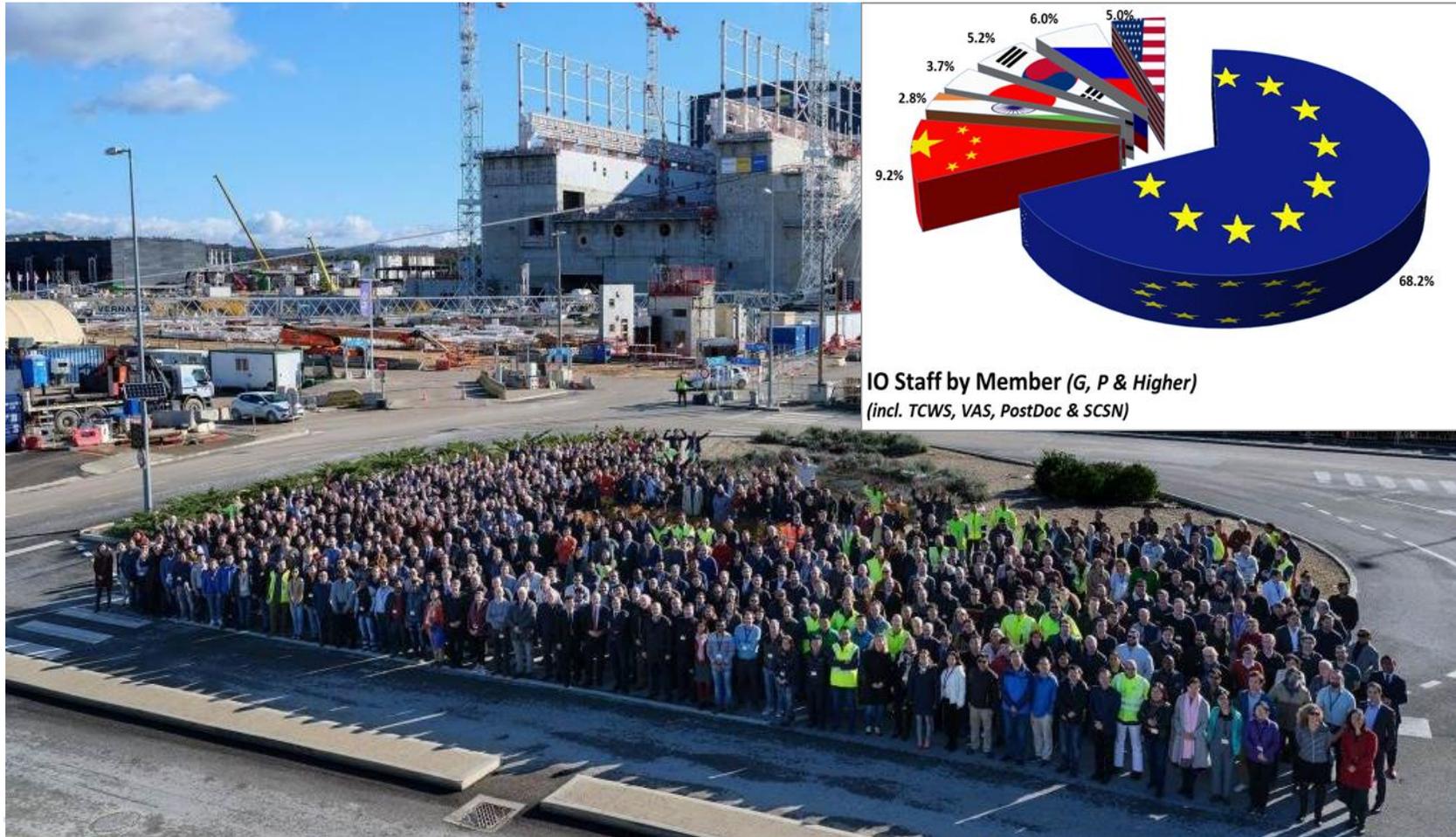
# 初セクターモジュール吊上開始

先月最新状況



## 初セクターモジュールがピットに移設

# 日本による人的貢献は ITER建設推進における中核



2021年頭(職員総数983人): 日本人職員比率が3.7%に増加

# 日本の核融合ロードマップ

ITERの先

研究炉

実験炉

原型炉

商用炉

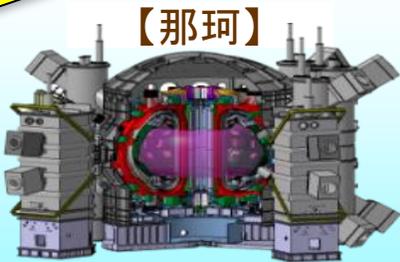
ITER 計画

500MW  
フュージョンエネルギー

JT-60  
プラズマ達成



幅広いアプローチ(BA)



サテライトトカマク  
(JT-60SA)

連携

【六ヶ所】



IFMIF 及び IFERC

デモ  
発電実証



エネルギー問題の解決、  
SDGs\*の実現  
「目標7: エネルギーをみんな  
なりに そしてクリーンに」

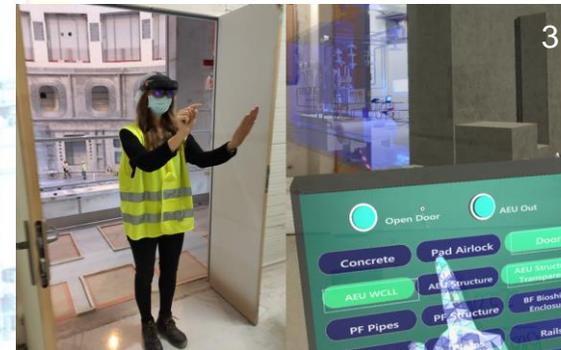
原型炉へ向けた  
エンジニアリング

Note\*: Sustainable Development Goals

## 総合テクノロジーとしての核融合技術群

核融合はエネルギー問題の解決手段であると共に、そのイノベーティブなテクノロジー群は既に世界中で産業応用されており、今後は更に多くの産業の高度化や新市場の創出が期待され、自動車産業・電気産業に次ぐ巨大産業になる可能性が高い

- エネルギー分野
- 医療分野<sup>1</sup>、宇宙分野<sup>2</sup>
- 制限環境下産業分野
- 制御技術
- 画像／映像技術
- VR/AR<sup>3</sup>
- 量子コンピューティング、機械学習
- 高精度加工
- 超電導技術<sup>4</sup> ...



# ITER計画の順調な進捗をベースとして、 世界中で核融合への注目が高まっている

## 世界における核融合の機運

- 米: 核融合業界団体設立(法規制の枠組み整備開始)、エネルギー省による官民パートナーシップ原型炉計画、2040年パイロットプラント、スタートアップの勃興と膨大な民間資金の流入
- 英: 独自原型炉(STEP)計画で複数企業とのエンジニアリング契約、2040年代の原型炉稼働へ向けた英国内建設候補地選定開始、スタートアップによるパイロットプラント誘致
- 中: 中国版ITERの推進、AIや宇宙に並ぶ国策の核融合、年間1,000名を超える研究者輩出
- 過去数年間にて世界中において核融合スタートアップの数が倍増(現在30社以上)
- グローバルIT企業大手(GAFA等)も核融合技術に注目、ITER機構とも戦略提携締結
- 日本においても今後JT60-SAの初期稼働、ITER向け核融合機器開発の加速

核融合はもはや研究開発にあらず社会実装の段階であり、エネルギー及び経済安全保障、安全規制、産業振興政策なども含めた国家戦略としての「核融合国家ビジョン」の必要

# ご清聴ありがとうございました

