



核融合発電とは？ その現状と可能性

2025年2月27日

AYSA ATK

参考文献

核融合エネルギーのきほん

「核融合エネルギーのきほん」出版委員会 編

誠文堂新光社 2021年1月21日

超電導の謎を解く

村上雅人（芝浦工大）

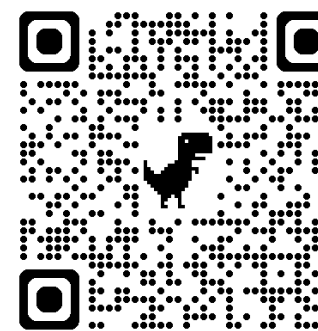
7 C&R研究所 2007年7月2日

核融合発電を取り巻く足下の動向

～核融合発電実用化に向けた道筋～

みずほ銀行 調査報告 2024年3月19日

wikipedia「核融合」の項を参照





目次

- 本講演を思い立った理由
- 核融合発電とは
- トカマクの歴史と国際協力
- 幻の常温核融合
- 超電導と核融合の歴史
- ITERの現状
- 各国の開発状況
- スタートアップ企業の現状
- 新しい核融合反応

1 今回の講演理由

- ▶ 世界的に大きな話題になっている核融合発電だが
- ▶ 日本ではほとんど報道されていない「核融合発電」の現状を調べた
- ▶ 日本の報道機関は物理学や物理技術の科学的な理解に無知
- ▶ 世界では超巨大スタートアップ企業が勃興
- ▶ 日本は大学発の弱小ベンチャーのみ
- ▶ 近未来的な成功の可能性は低いがこの分野にこそ投資すべきでは

- ▶ 日本人も技術の発展の重要性とスケールの大きさを理解することが必要
- ▶ 環境保護主義的観点とは別の視点が求められるエネルギー論政策
- ▶ 日本人が「核」という言葉を否定的にとると将来大き禍根に？

- ▶ 以上思いから今回の講演のタイトルを思い立った

2 核融合発電とは

- ▶ 太陽や恒星の光の根源
- ▶ 太陽の表面温度は数千万度
- ▶ 太陽では水素の核融合が起きている
- ▶ 水素の核融合は中心部で起きている
- ▶ 水素4原子からヘリウム1原子と0.03gの質量がエネルギーになる

$4\text{H} \rightarrow \text{He} - 0.03\text{g}$ (水素4gから)

$E=mc^2$ 石油63分に相当

このエネルギー（主に超高速中性子の運動エネルギー）から発電する

重水素とトリチウムの核融合が最も温度が低い

(それでもプラズマ生成には一億度が必要)

つまり地上に極小の太陽を作ることに等しい

核融合発電とは

- ▶ 地上に極小な太陽を再現するようなもの
- ▶ 太陽は高温高圧でプラズマ状態
- ▶ 地上で核融合するにはプラズマを発生させる必要がある
- ▶ 通常一億度以上の温度が必要
- ▶ プラズマを入れる容器はないので**磁気で真空中に保持**する
- ▶ 封じ込め方法

封じ込めには何種類かある

(**トカマク、ヘリカル、磁気反転配位** (Field-reversed configuration、FRC))

ほかに**レーザーで爆縮**させ続けるという方法も有力

核融合炉の種類 = プラズマの閉じ込め方法

- ▶ トカマク (捻じれたドーナツ型のプラズマを大きな磁石で保持する)
ITER
JP60SR(量子科学研究開発機構)
- ▶ ヘリカル (プラズマを捻じれた磁石で保持する)
Wendelstein 7-X (独 マックスプランク)
LHD (核融合科学研究所)
- ▶ レーザー
激光 (大阪大学)
- ▶ 磁場反転配位(TRC)
TAE テクノロジーズ (米、加州大学発のスタートアップ企業)



Wendelstein 7X



TAE テクノロジーズ

幻の常温核融合というのもあった

核融合は通常、数億度の超高温帯で起こると理解されている「熱核融合」と呼ぶ。

- ▶ 常温核融合 (Cold Fusion) とは、
- ▶ 1989年3月にサウサンプトン大学のフライシュマンとユタ大学のポンスが、この常温核融合を発見したとマスコミに発表
- ▶ 重水(D2O)を満たした試験管に、パラジウムとプラチナの電極を入れ暫らく放置、電流を流したところ、電解熱以上の発熱（電極の金属が一部溶解した？）が得られ、核融合の際に生じたと思われるトリチウム、中性子、ガンマ線を検出したと発表
- ▶ 同時期に高温超伝導現象が発見されたことや、フライシュマンが電気化学の大家であったことから、新現象発見と欧米のマスメディアが喧嘩
- ▶ 簡易かつ安価な実用エネルギー源への期待が高まった。
- ▶ **現在では完全に否定されており、「20世紀最大の科学スキャンダル」と言われている**

常温核融合の話題はその本質よりも

Palladium の国際価格の高騰
発明者競争といった
世俗的な面から欧米では話題になった

騒動の理由の一つが同じ頃
常温超電導物質が発見されたこともある

同時期に新規な超電導物質が発見され
無理と思われた技術がまだあるのではという
期待が世界中にあふれた

物理学者は全否定なのだが、まだ研究している人もいる

- 多くの核物理学者は常温核融合を否定
 - 検出される中性子量は一般の核融合の予想量より7桁以上少ない。
 - γ線がほとんど検出されない。
 - 金属の結晶系で結果が異なる
 - 過剰熱の発生量は電極 1cm^2 0.1–1 W 程度が多く
 - まれに 10 W や 1000 W/cc といった報告もある。
 - 現象は電極表面付近で起こり、試料表面のナノ構造が関与している？
 - これらの結果は現代の物理学では説明がつかない
 - 物理学者は核融合であることを完全に否定している
- (宇宙線の影響がない深地下では中性子が全く検出されない)

超電導物質の発見の歴史

Hydride

$\text{LaH}_{10\pm x}$
□
(under pressure)

H_3S
□
(under pressure)

130 K

Cuprate

$\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$

$\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$

Fe-based

MgB_2

$\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$

BCS-type

1911年
オンネス

Hg

Pb

NbC

NbN

Nb_3Sn

Nb_3Ge

1900

1920

1940

1960

1980

2000

year

T_c (K)

300

250

200

150

100

77 K (液体窒素)

1986年1月
ベドノル&ミュラー

トカマクの進歩と世界的な科学連携

- 1950年代 ソ連のサハロフ、タムが発案 アルチモビッチが実証
- 1960年代 1000万度
- 1980年代 TFTR (米国TFTR)、JET (EU)、JT60 (日本)
- **1985 レーガン/ゴルバチョフ会談** 核融合開発の国際連携組織設立決定
アメリカ・ロシア・EU・日本での共同研究が開始

ITERと呼ばれる実証炉を建設

「International Thermonuclear Experimental Reactor」が「ITER」の語源

「ITER」(イーターと読む)が正式名称 (ITERはラテン語で「*The Way*」という意味)

- 2025年の完成を目指してフランス南部に実証炉を建設 日本も立候補したが落選
- **建設費2兆円 為替と建設費高騰で現在は倍の4兆円**

ITERでは発電しない。

入力エネルギーの10倍 ($Q > 10$) の核エネルギーを得ることが目標

必要な電力確保に新発電所を作る

「ITER（イーター）」は、

人類初の核融合実験炉を実現する超大型国際プロジェクト

- ▶ 「ITER（イーター）」は、平和目的のための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に、人類初の核融合実験炉を実現しようとする超大型国際プロジェクト
ITER計画では、**日本・欧州・米国・ロシア・韓国・中国・インドの7極（33ヶ国）**が協力して、
- ▶ 世界最大のトカマクをフランスのサン・ポール・レ・デュランスに建設中
カダラッシュ（仏の原子力研究センター）
- ▶ **建設総額約2兆円 現在は約倍に高騰**
- ▶ 各国が受け持ち部分を製造しITERに持ち寄って建設

ITER建設場所

南仏 (日本 六ヶ所村 も立候補するも落選)



ITERへの日本企業の関わり

みずほ銀行産業調査部作成

主要企業名

キヤノン

金属技研

古河電気工業

ジャパンスーパーコンダクタテクノロジー
Nb3Sn ジャイロトロン用マグネット

大同特殊鋼

東芝エネルギーシステムズ トロイダル
テム

トヤマ

日鉄エンジニアリング

日立製作所

三菱重工業

三菱電機

主要な制作機器等

電子管デバイス ジャイロトロン

ダイバータカセット 金属接合技術の提供

中心ソレノイド構成部品

トロイダル磁場コイル 中心ソレノイド用高性能

特殊ステンレス鋼

磁場コイルブランケット 遠隔保守装置 中性子計測シス

ジャイロトロン用準光学整合器

トロイダル磁場コイル導体 中心ソレノイド導体

ダイバータ用外側垂直ターゲット

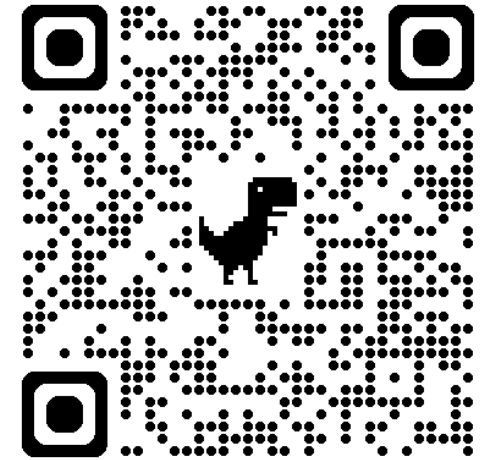
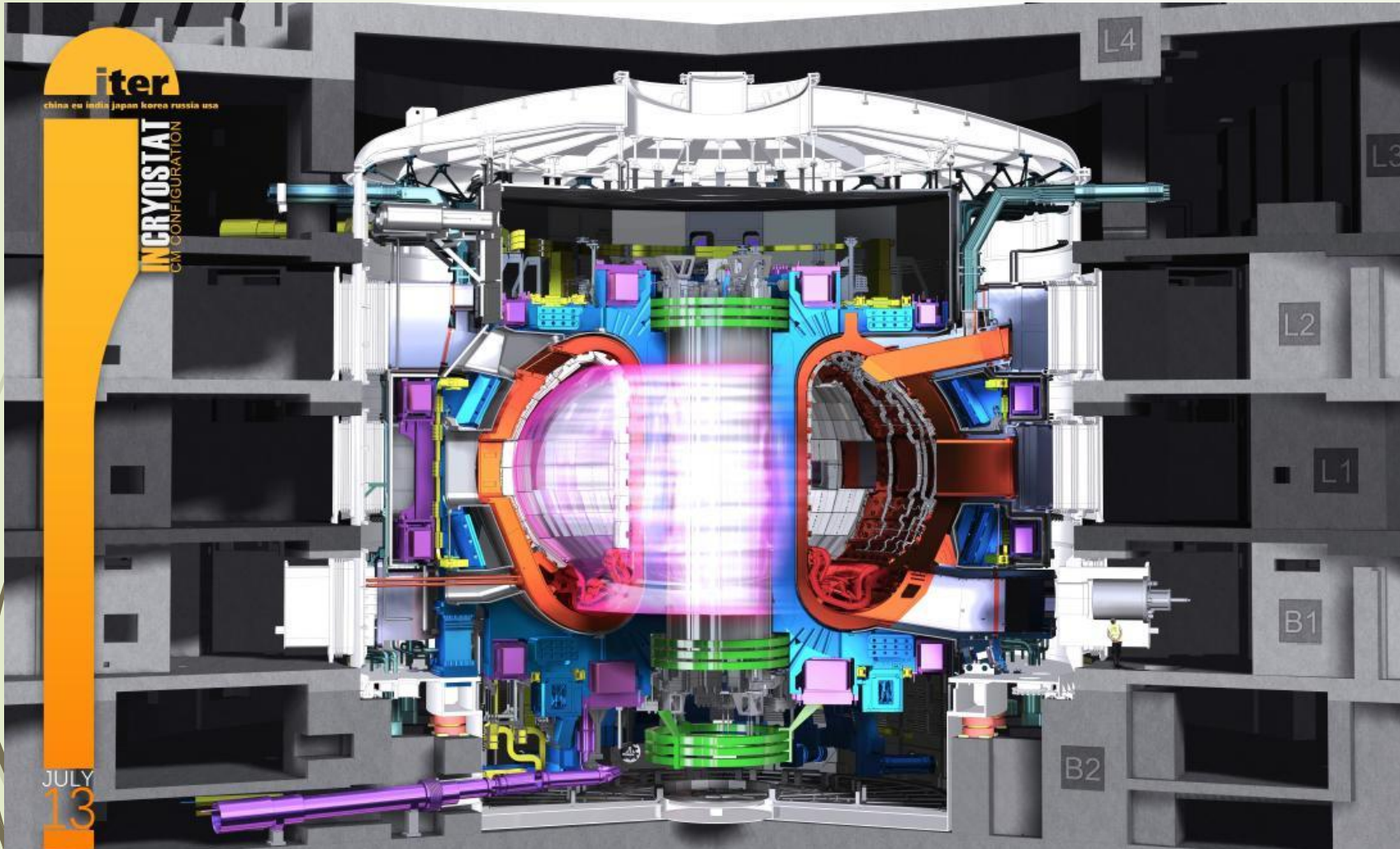
トロイダル磁場コイル ダイバータ外側垂直ターゲット

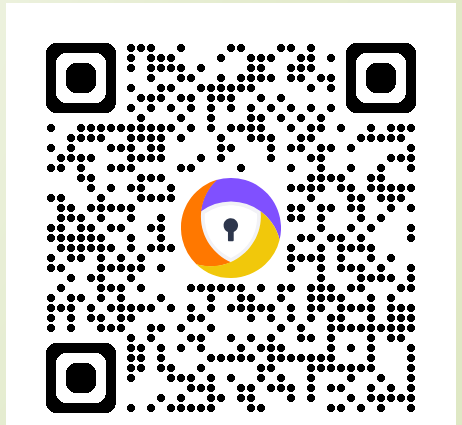
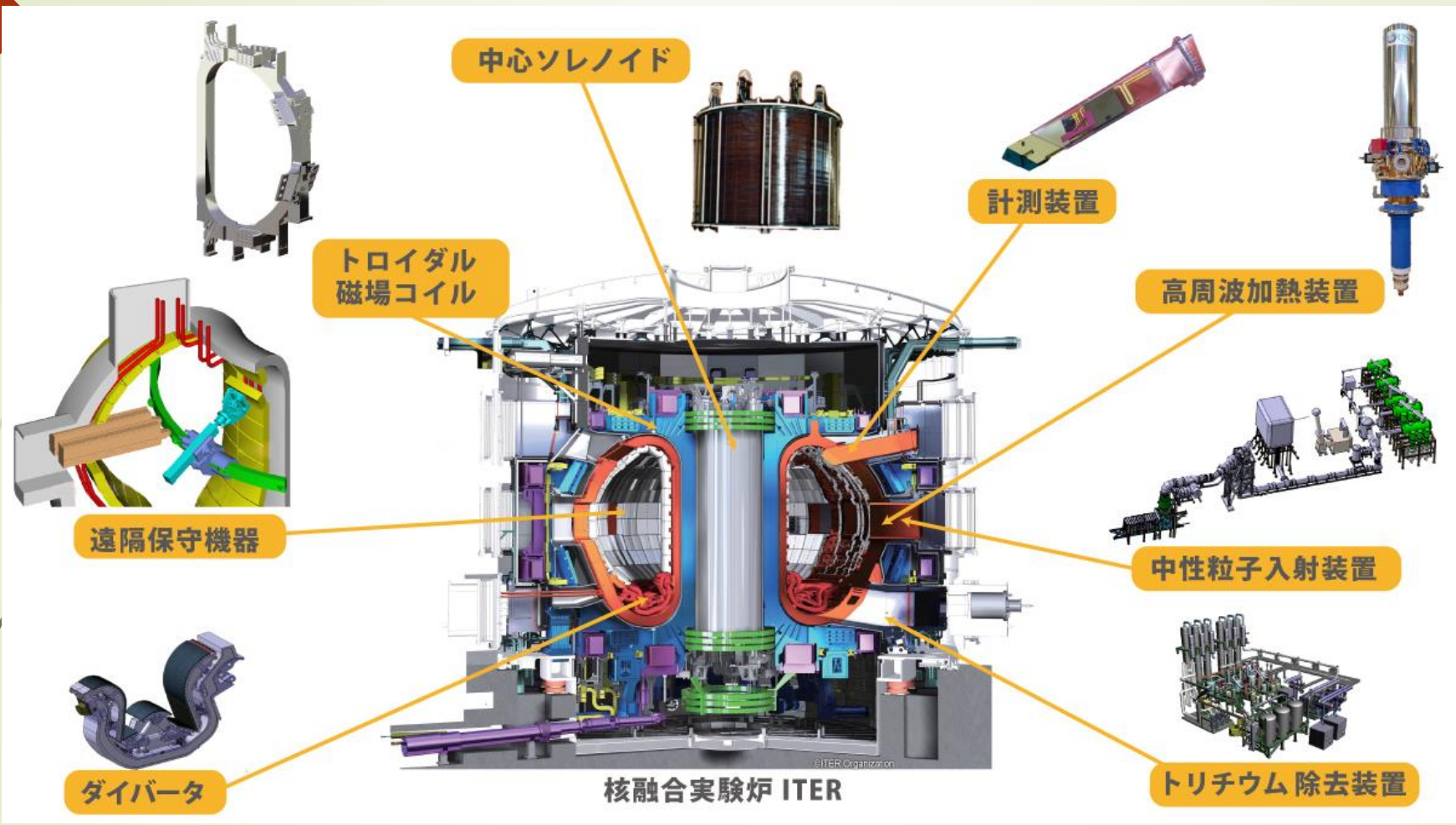
トロイダル磁場コイル巻線

各国の資金負担割合

- ▶ メンバー6カ国は総費用の6/11、
 - ▶ EUは5/11を拠出、韓国、中国、インド、ロシア、アメリカの拠出は1/11
 - ▶ 日本は2/11でEUは4/11を拠出
 - ▶ 韓国は国内稼働中の核融合実験施設 **KSTAR** の **超電導磁石** などの技術提供。
-
- ▶ 日本が総額の1/11から2/11を負担する代わりに、
 - ▶ カダラツ（仏の原子力研究センター）の研究者の2/11を占める
 - ▶ EUの人員と建設に関わる費用拠出の割合は5/11から4/11
 - ▶ EUと日本共同で関連研究プロジェクトを行い、その拠点を日本に置く

ITER核融合炉の透視図 直径は30m以上

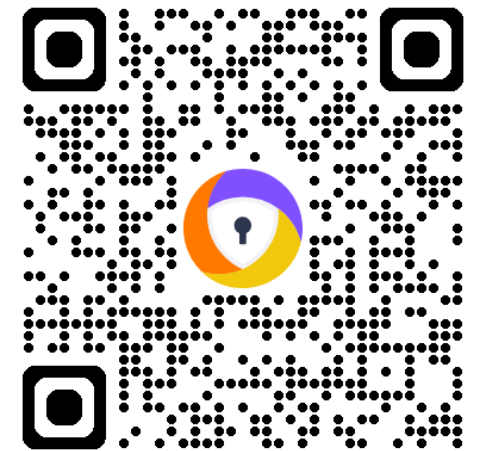




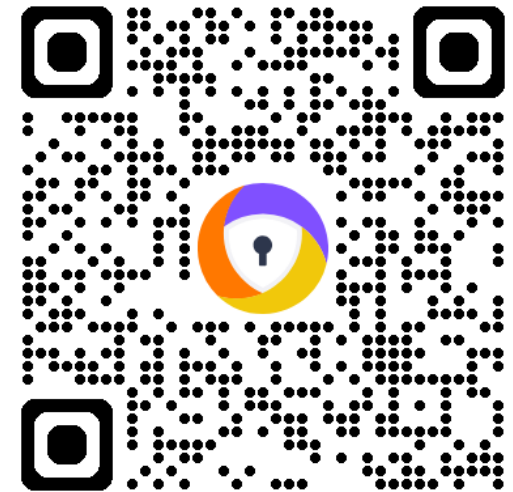
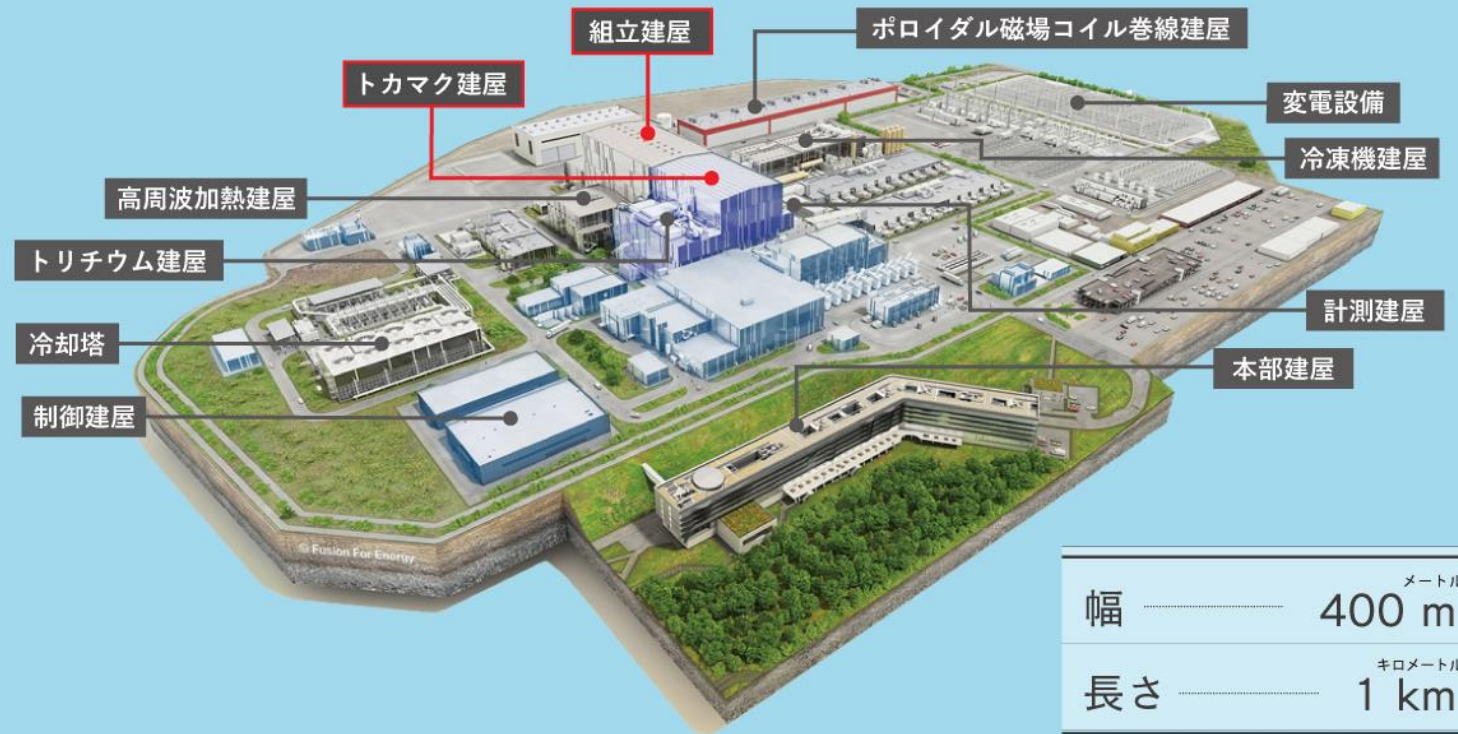
ITER全体鳥瞰写真

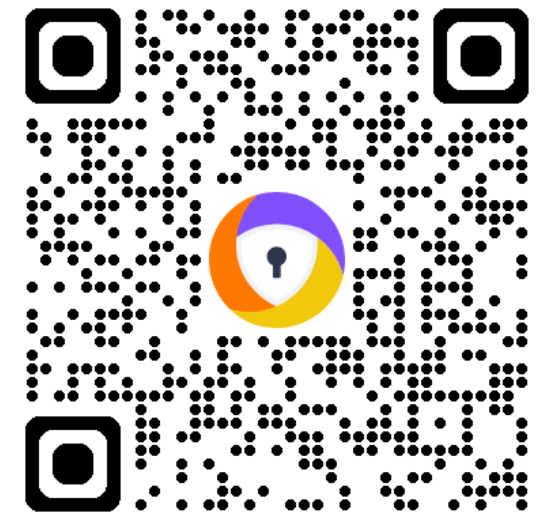


強化コンクリート構造の7階立 地下 13 m、地上60 m



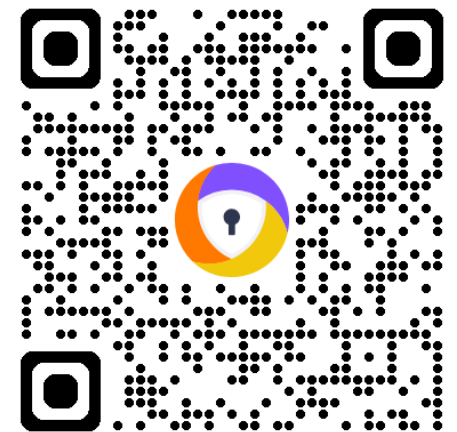
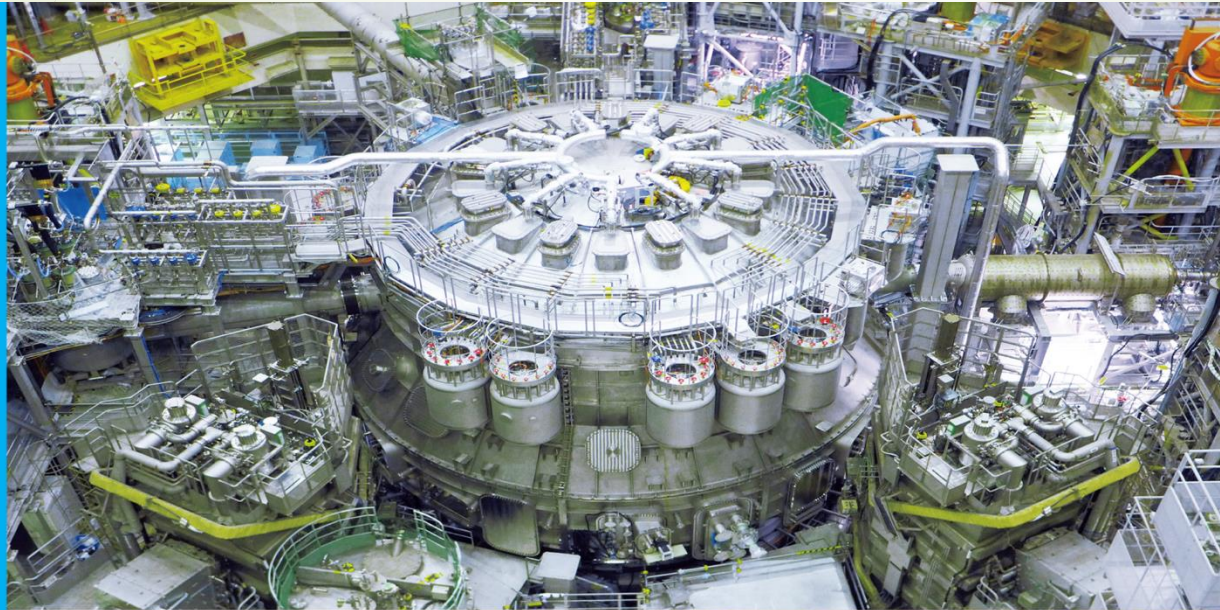
ITERプラットフォーム

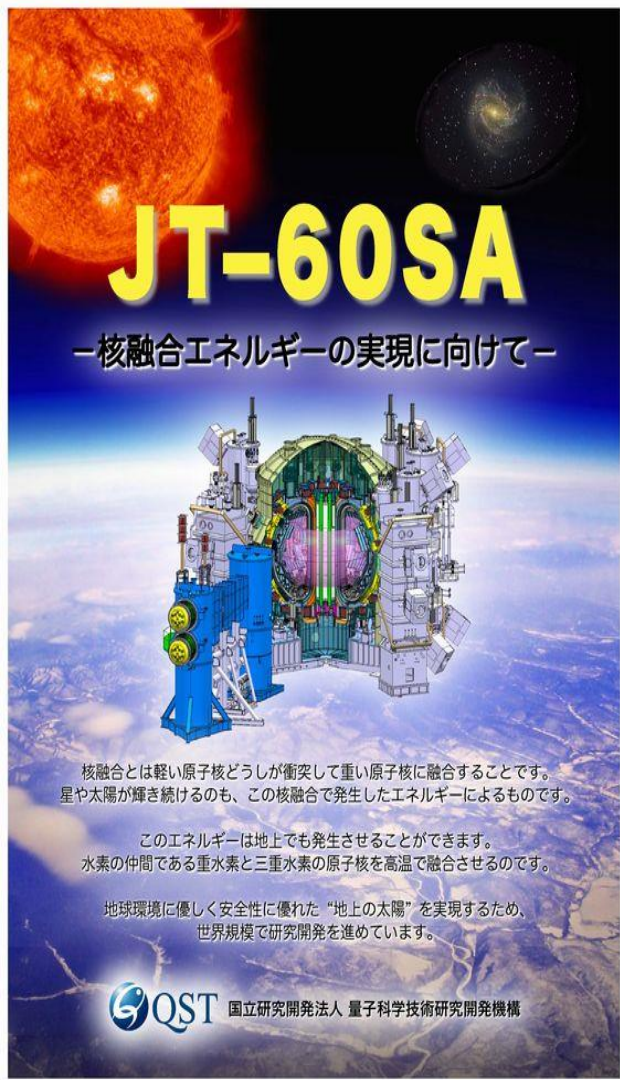




日本のJT-60（青森県六ヶ所村）

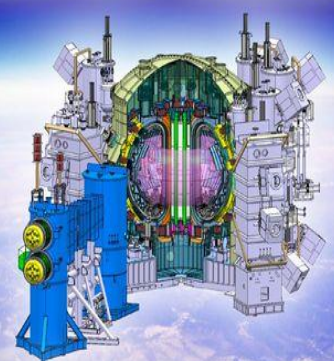
ITERの1/10の大きさ 高温超電導コイル使用





JT-60SA


—核融合エネルギーの実現に向けて—



核融合とは軽い原子核どうしが衝突して重い原子核に融合することです。星や太陽が輝き続けるのも、この核融合で発生したエネルギーによるものです。

このエネルギーは地上でも発生させることができます。水素の仲間である重水素と三重水素の原子核を高温で融合させるのです。

地球環境に優しく安全性に優れた“地上の太陽”を実現するため、世界規模で研究開発を進めています。

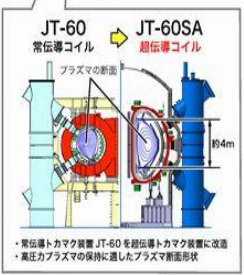
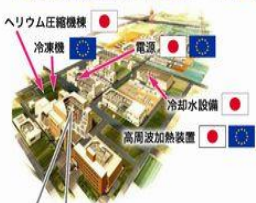
 **QST** 国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構

高圧力プラズマを安定に保持する制御機能を装備した先進的な大型超伝導トカマク

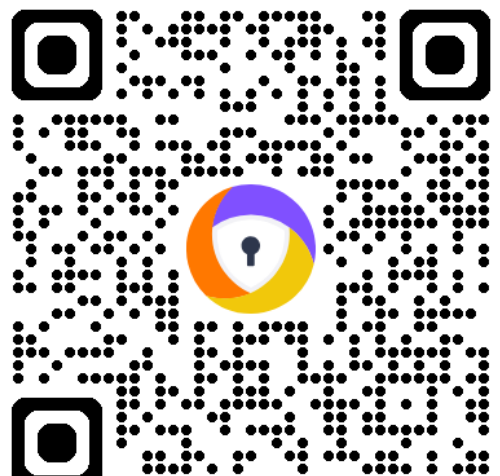
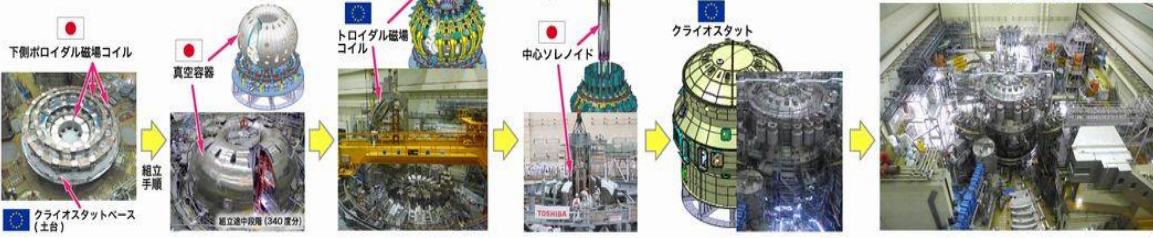
那珂核融合研究所に建設
既存設備を最大限に活用
日欧で機器製作を分担

JT-60SA 主要諸元

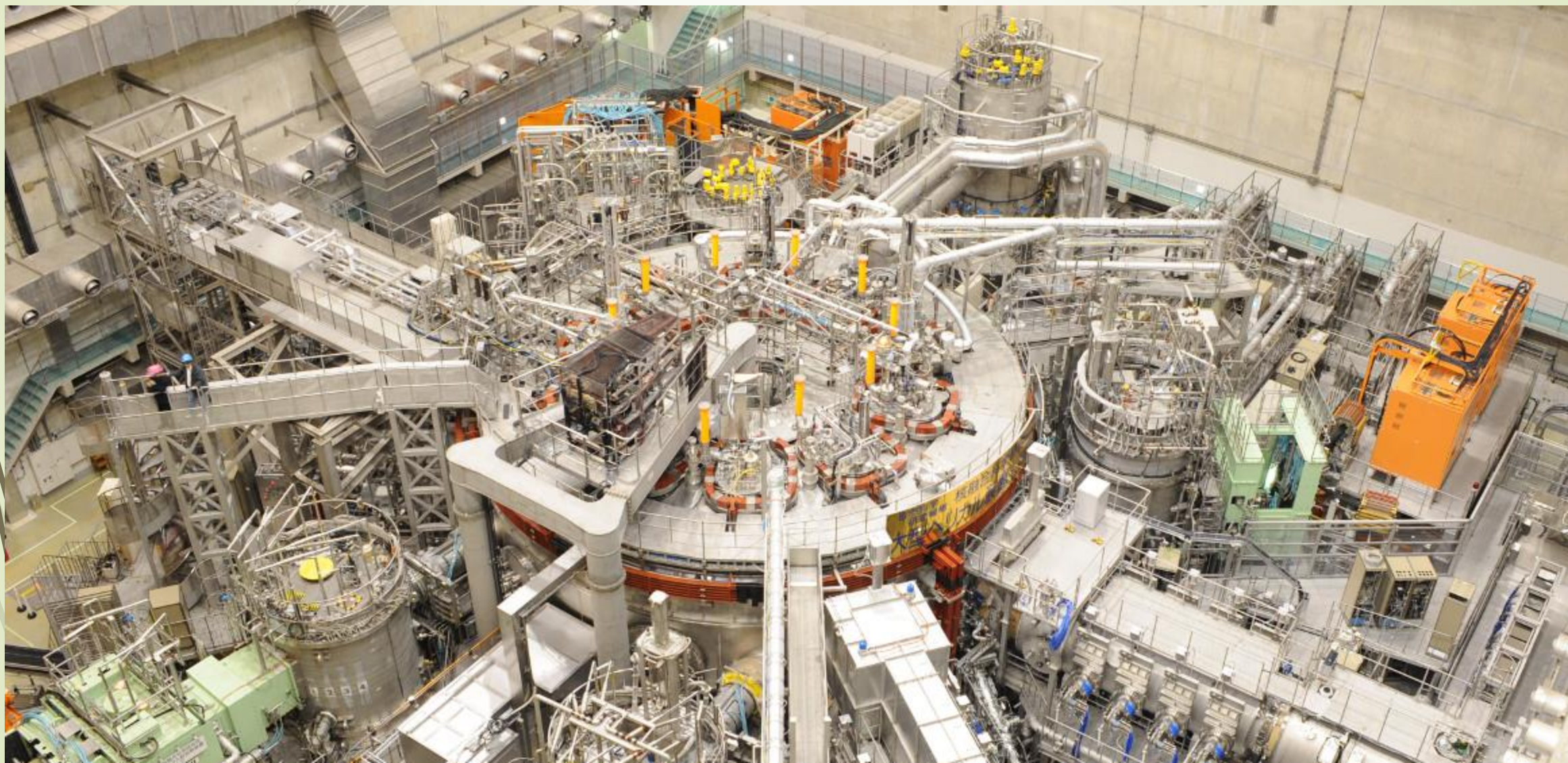
プラズマ電流	550 万アンペア
トロイダル磁場	2.25 テスラ
プラズマ主半径	3メートル
加熱パワー	4万キロワット×100秒
本体総重量	2600トン



- 2012年10月にJT-60の解体を完了
- 2013年1月にJT-60SAの組立を開始
- 2020年3月にJT-60SA本体の組立を完了



LHD 量子科学研究所（岐阜県土岐市）



ポロイダル磁場コイル ●
プラズマの位置と断面形状を自在に制御する磁場を発生する超伝導磁石

トロイダル磁場コイル ●
プラズマを閉じ込めるための磁場を発生する超伝導磁石

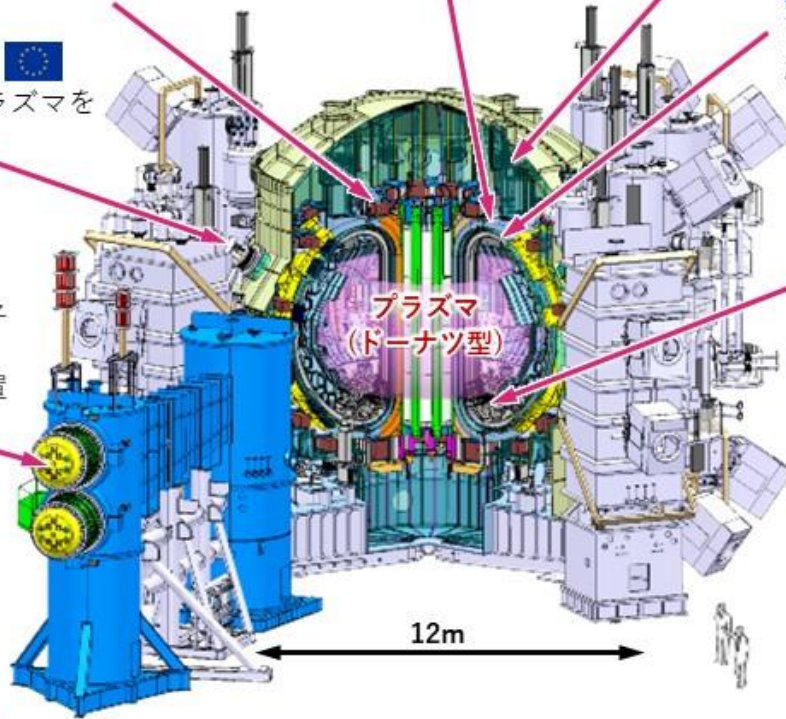
クライオスタット ●
超伝導磁石を超低温に保つ容器

高周波加熱装置 ●
ミリ波帯の電磁波でプラズマを加熱する装置

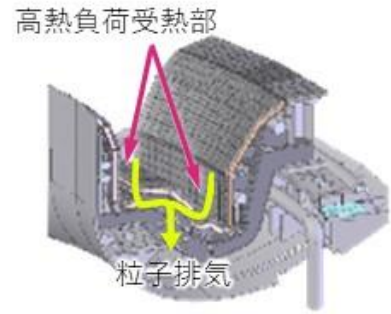
真空容器 ●
高純度のプラズマを作るための超高真空を保つドーナツ型の容器

中性粒子ビーム入射加熱装置 ●
高エネルギーの水素原子をプラズマに入射してプラズマを加熱する装置

計測設備 ●
プラズマ中の密度や温度、中性子等の分布を測定する機器



ダイバータ ●
核融合反応で生じたヘリウムや不純物を排気してプラズマの純度を保持するとともに、プラズマからの高い熱を受け止める機器

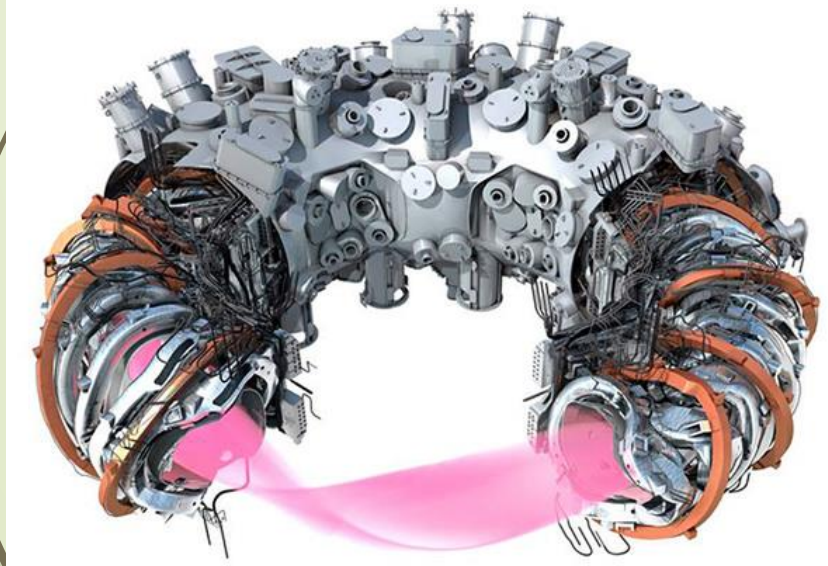
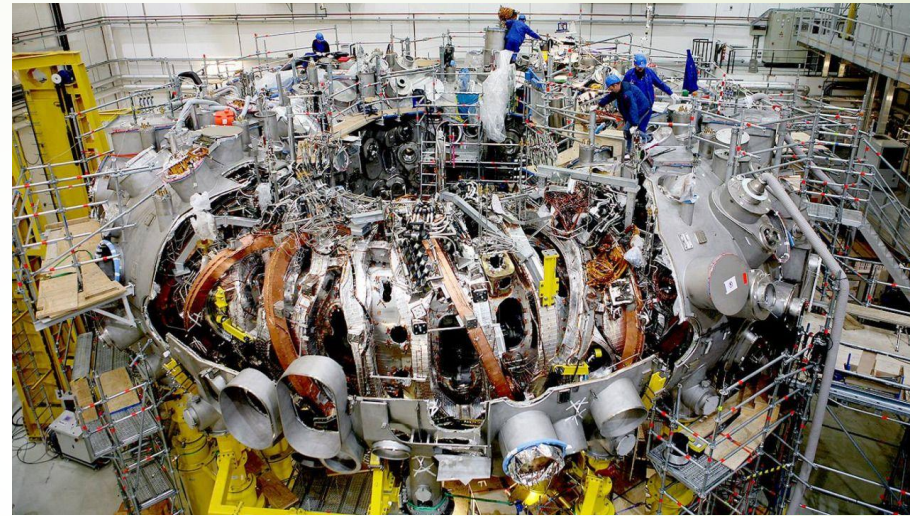


真空容器内機器 ●
・プラズマを金属壁（安定化板）で取り囲むことによりプラズマの不安定性を抑制
・不安定性を検知して能動的に安定化するための磁場を発生する各種コイルも整備

JT-60SAは多数の先端機器の集合体であるため、最新鋭の3次元CADシステムを駆使して、日欧共同で、構造設計、組立検討、熱・応力解析等を実施しています。



ドイツ マックスプランクW-7C ヘリカル

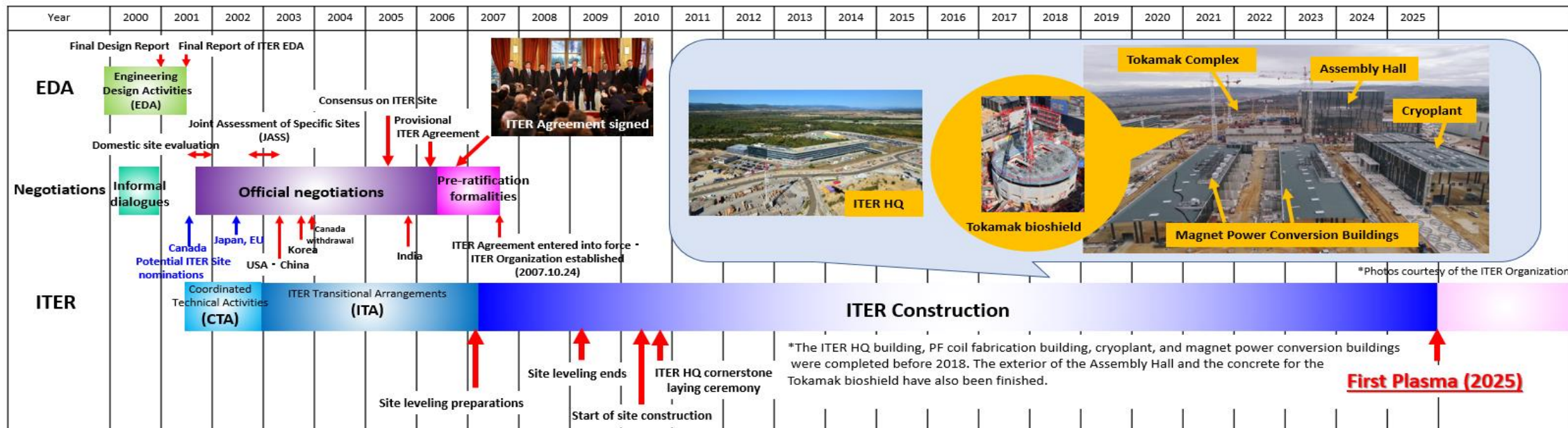


2. The 3 Goals of ITER

- ▶ 入れたエネルギーの十倍の熱を得ること ($Q=10$)
- ▶ 50 MW の電力から 500 MW 電力を得る
- ▶ 核融合を400 秒持続すること
- ▶ プラントのテストデモ
- ▶ トリチウムの産生と回収

3. ITERの開発スケジュール

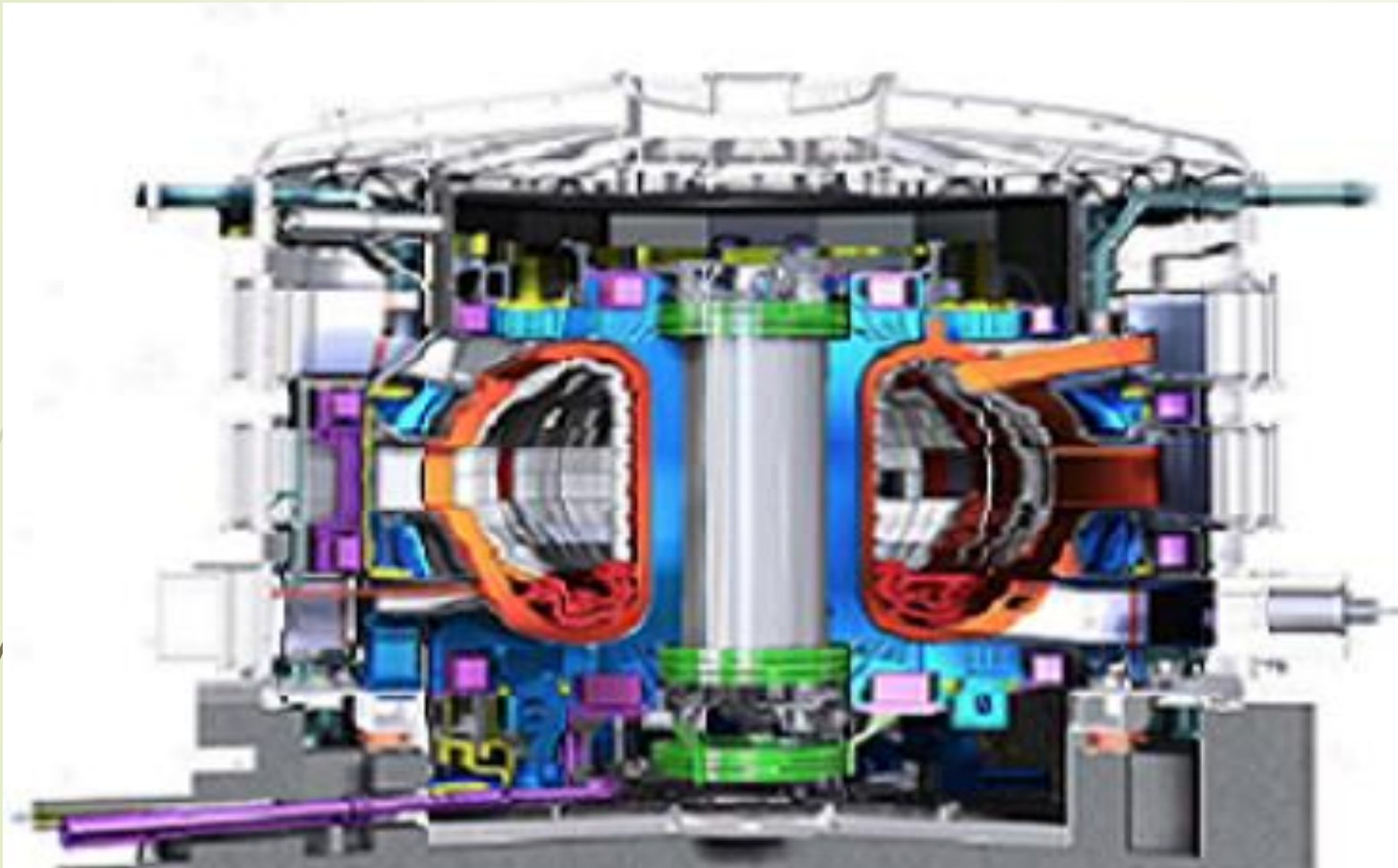
The ITER Project (From 2000 onwards)



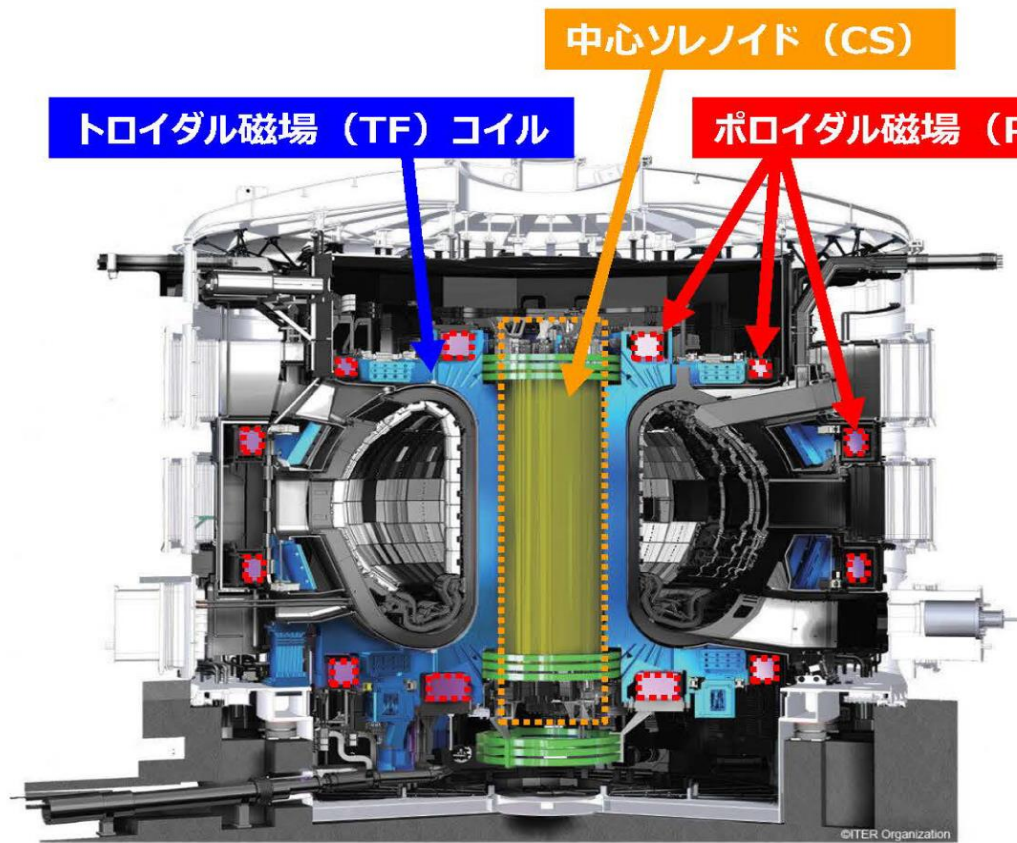
開発スケジュールでは今年中に完成するはずだが、
決定的に遅れているし費用も高騰



ITERの核融合装置透視図



ITER 超伝導マグネットシステムと日本の調達分担



- マグネットシステムの総重量は10000トン
- 磁気エネルギーは51GJ

トロイダル磁場 (TF) コイル (周方向に18機配置のD型コイル)

- TFコイル19機 (1機は予備) のうち
- TF導体 : 日本が全体の25%
 - TF構造物 : 日本が全数 (100%)
 - TFコイル : 日本が9機、欧州が10機

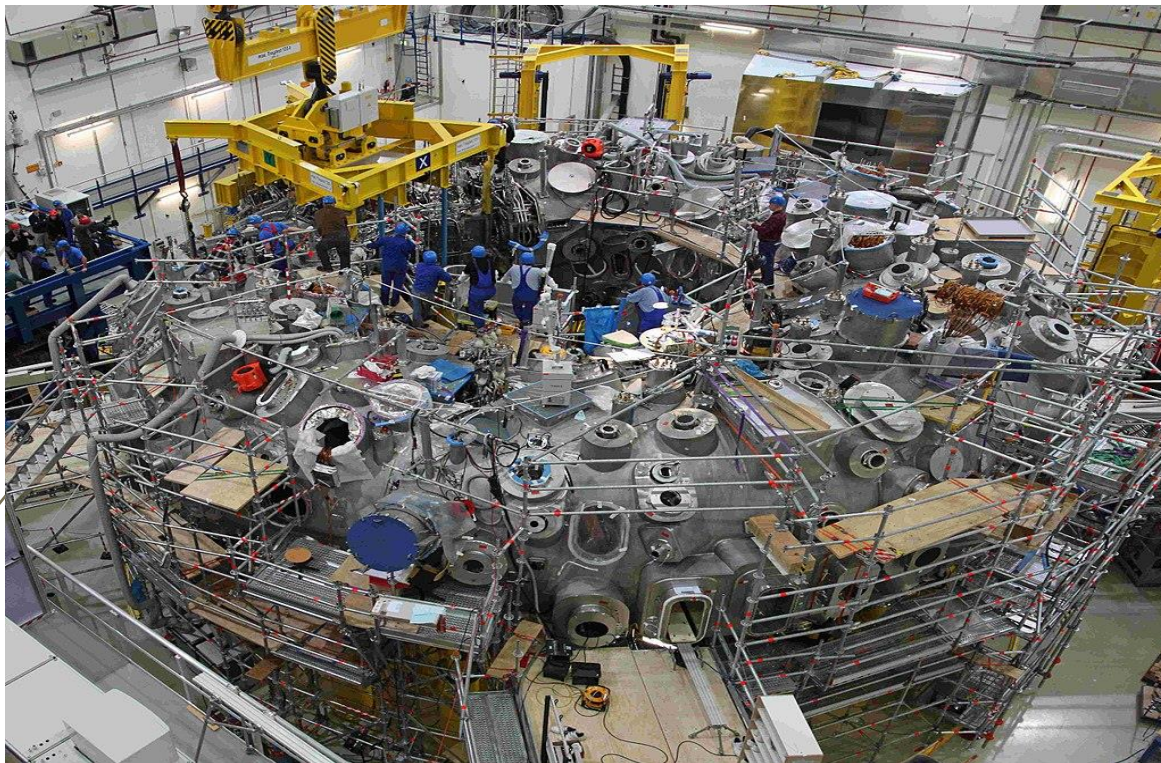
中心ソレノイド (CS) (6モジュールを積重ねた構造)

- 7モジュール (1モジュールは予備) のうち
- CS導体は日本が全数 (100%)
 - CS巻線は米国が担当

ポロイダル磁場 (PF) コイル (TFコイル外側に配置の円形コイル)

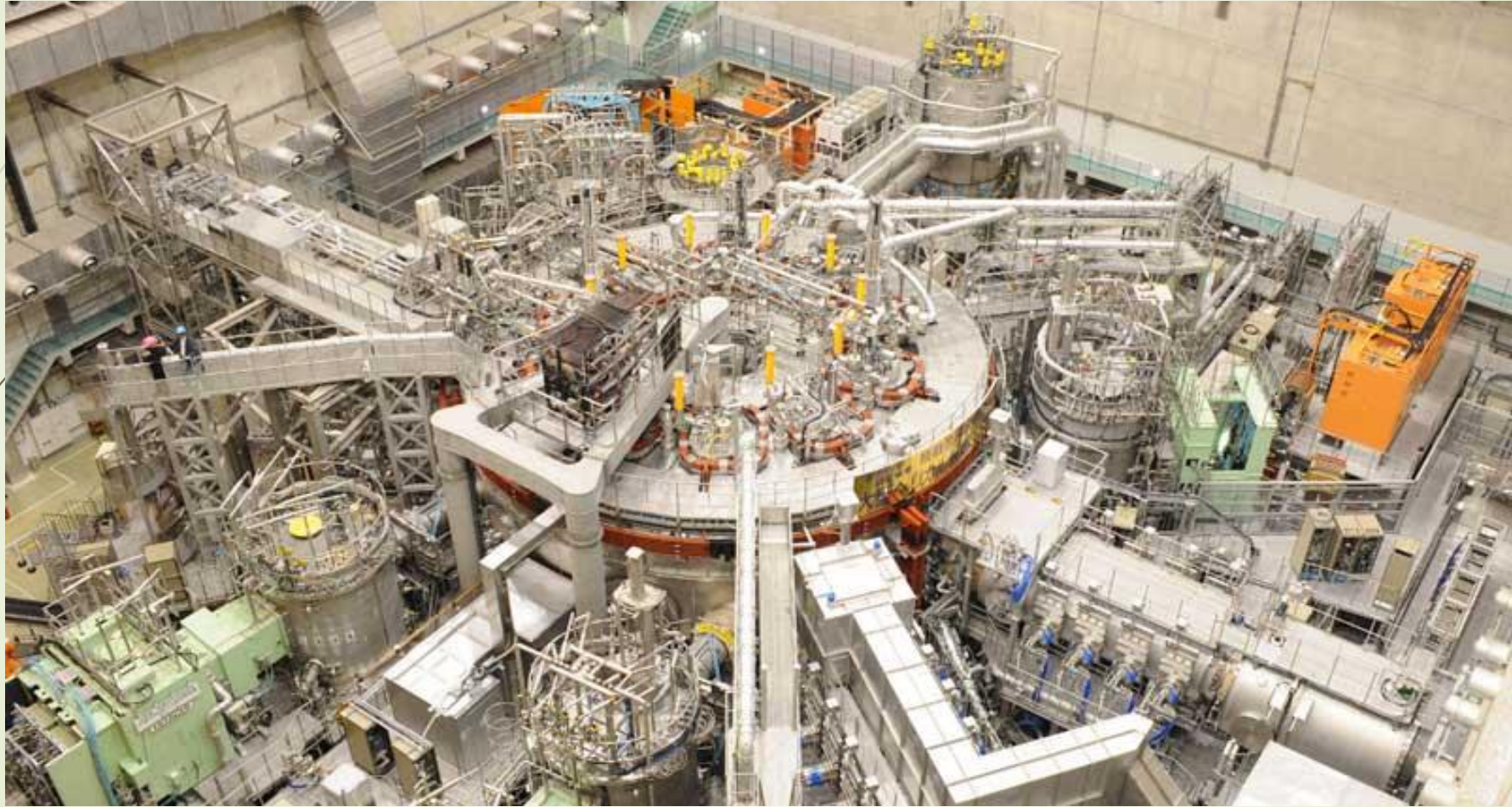
- PFコイル6機のうち
- ロシアは最も上のPF1担当
 - 中国は最も下のPF6担当
 - PF3~PF5は欧州担当
(輸送不可のためITERサイトで製作)

各国の核融合炉 マックスプランクの Wendelstein 7-X



核融合科学研究所の大型ヘリカル装置

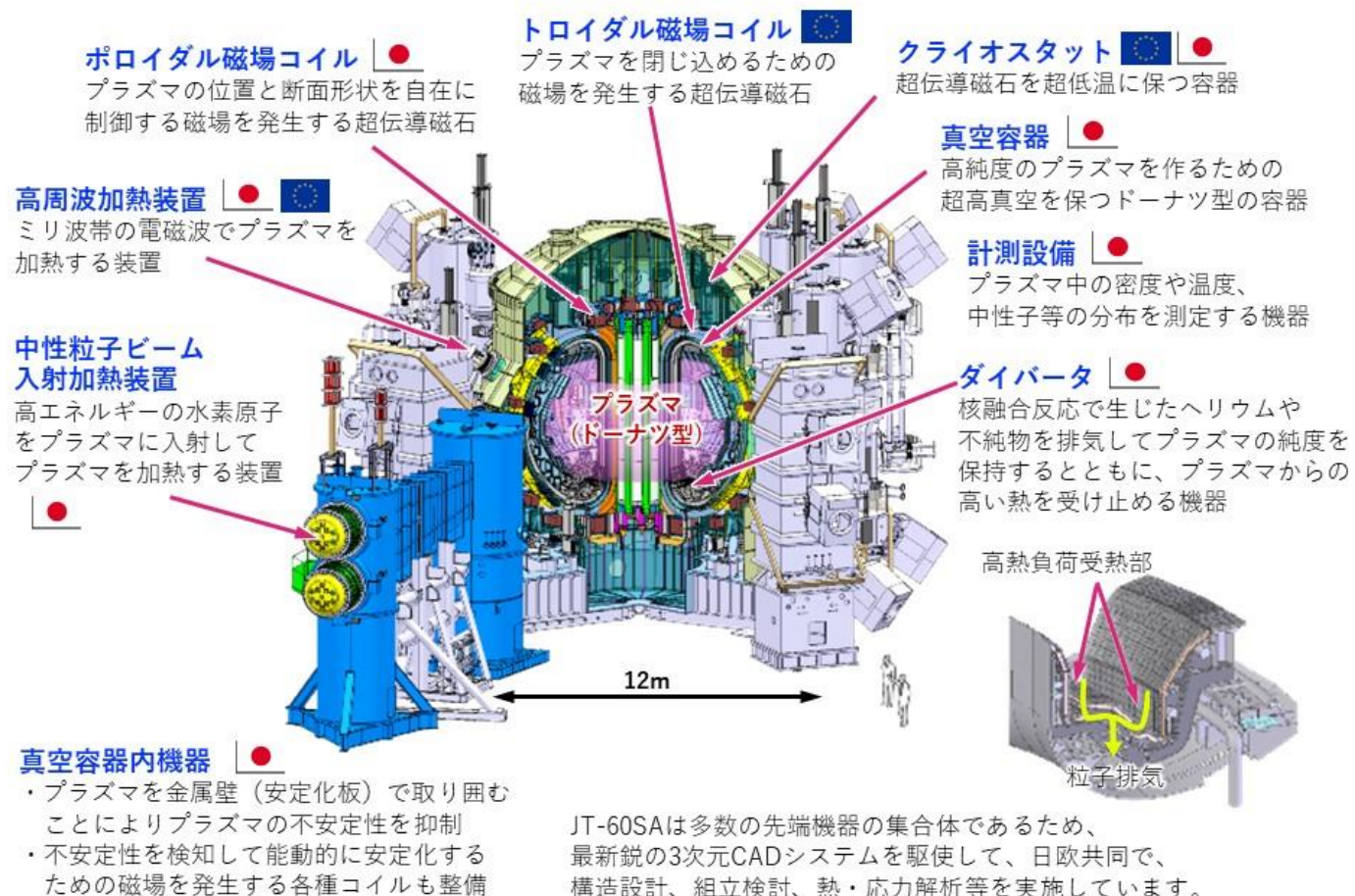
LHD=Large Helical Device



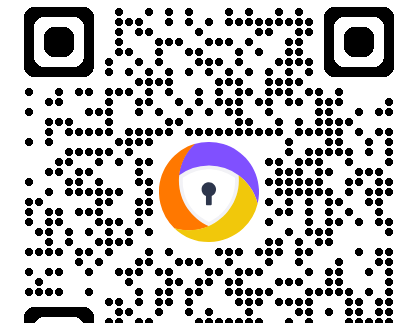
核融合科学研究所 岐阜県土岐市

JT-60SA装置

国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構



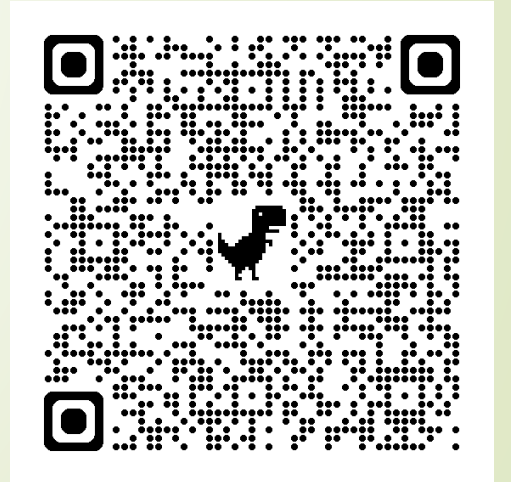
激光ⅩⅡ号 大阪大学



サンディア国立研究所 Zマシン (米国 Albuquerque, New Mexico)



慣性閉じ込め方式核融合(Inertial Confinement Fusion : ICF)
超強力なX線で爆縮する



Spring 8とXFEL



- ▶ 原子からはぎ取られた自由な電子を用いてX線レーザーを作る
- ▶ X線自由電子レーザー（**X**-ray **F**ree **E**lectron **L**aser : XFEL）という
- ▶ XFELにより原子や分子の瞬間的な動きを観察することが可能。



世界の核融合スタートアップベンチャー

会社名	国	調達額 百万US \$	主な出資者
コモンウェルス フュージョン システムズ	米	114	エニ（伊）
CTフュージョンシステムズ	米	3	米国エネルギー省
ファーストライト フュージョン	英	40	IPグループ（英）
ゼネラル フュージョン	加	300	ベゾスエクスペディションズ（米）
ヘリオン エナジー	米	45	マイクロソフト
スカンクワークス	米	非公開	ロッキードマーティン（米）
ルネサス フュージョン	スペイン	非公開	非公開
h T A E テクノロジーズ	米	700	グーグル
トカマク エナジー	米	150	リガール&ジェネラル（米）
Zap エナジー	英	14	米国エネルギー省
京都フュージョニアリング	日	3	京都大学イノベーションキャピタル

新しい核融合反応



核融合科学研究所と米国・TAE Technologies社は、LHDにおいて、磁場閉じ込めでHとB11の核融合反応を世界で初めて実証

- ▶ 軽水素とB11の核融合反応*は、H, D, Tと比べて極高温度のプラズマが必要
- ▶ 高エネルギーのビームを使うことで実現の可能性。
- ▶ 高エネルギーヘリウムを生成する反応で中性子が出ない**Nature Communications** に2023,2,21

カルフォルニア大サンタバーバラの中村修二と早稲田大学ベンチャーが軽水素（H）とホウ素のレーザー核融合を目指す**blue laser fusion** 社を設立 2022年11月（資金0.25億ドル）

ダークホースはこれかも

TAE テクノロジーズ
米 カルフォルニア大学アーバインの

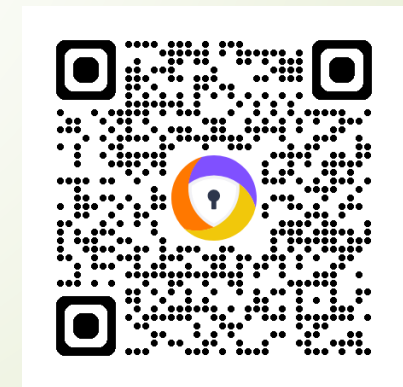
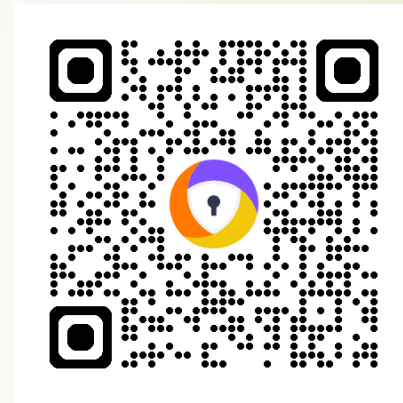
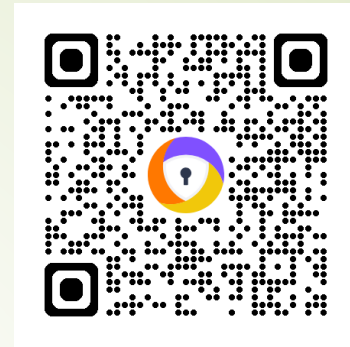
Norman Rostoker教授が発明

グーグルが7億ドルを出資

プラズマ封じ込め方法はFRC（磁場反転転移Field-Reversed Configuration）

Helion EnergyもFRCでの核融合を開発中

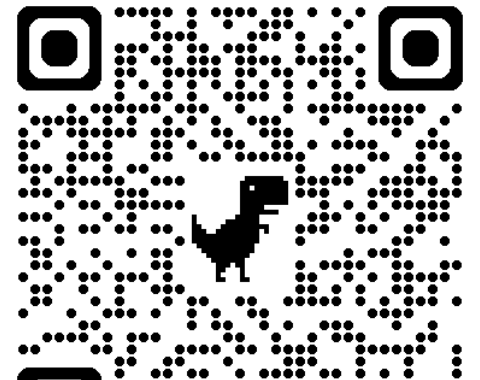
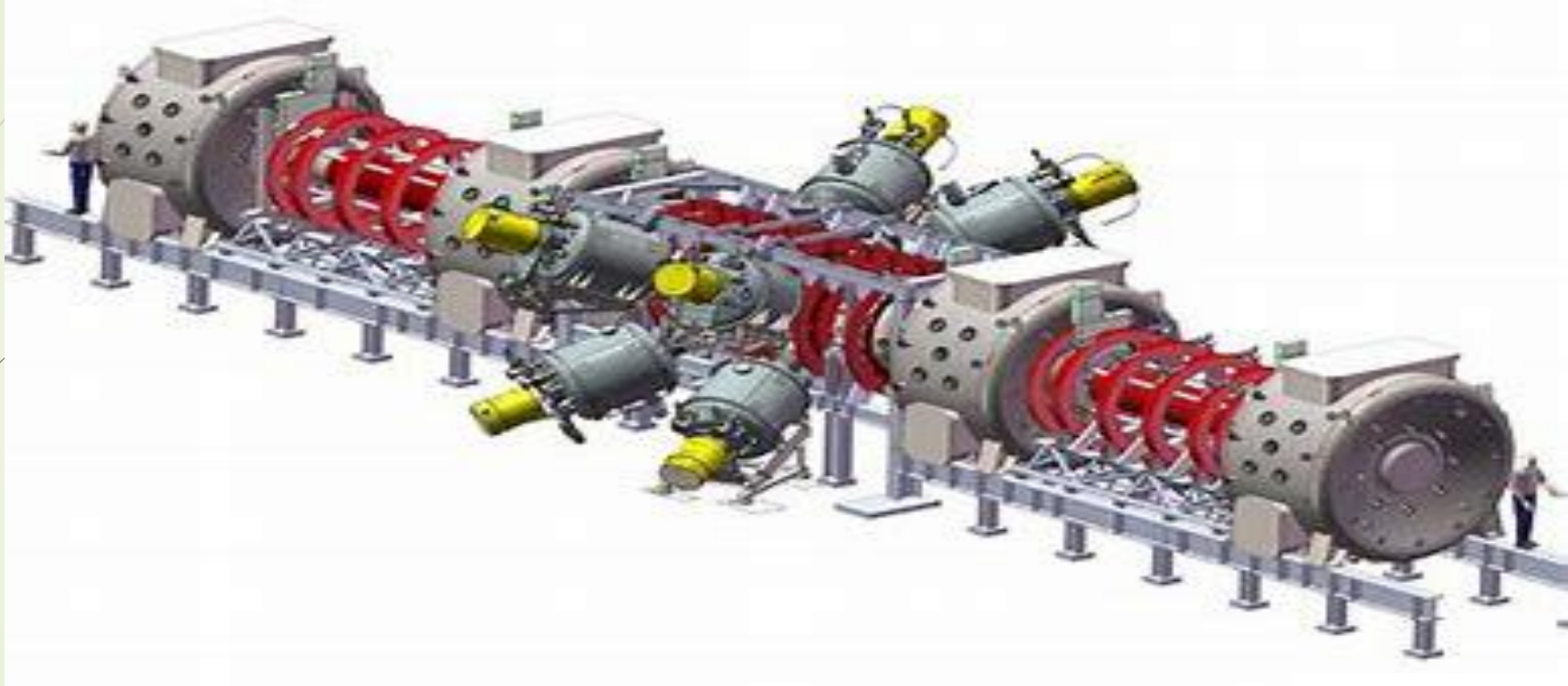
マイクロソフトが出資
2028年に電力供給を約束



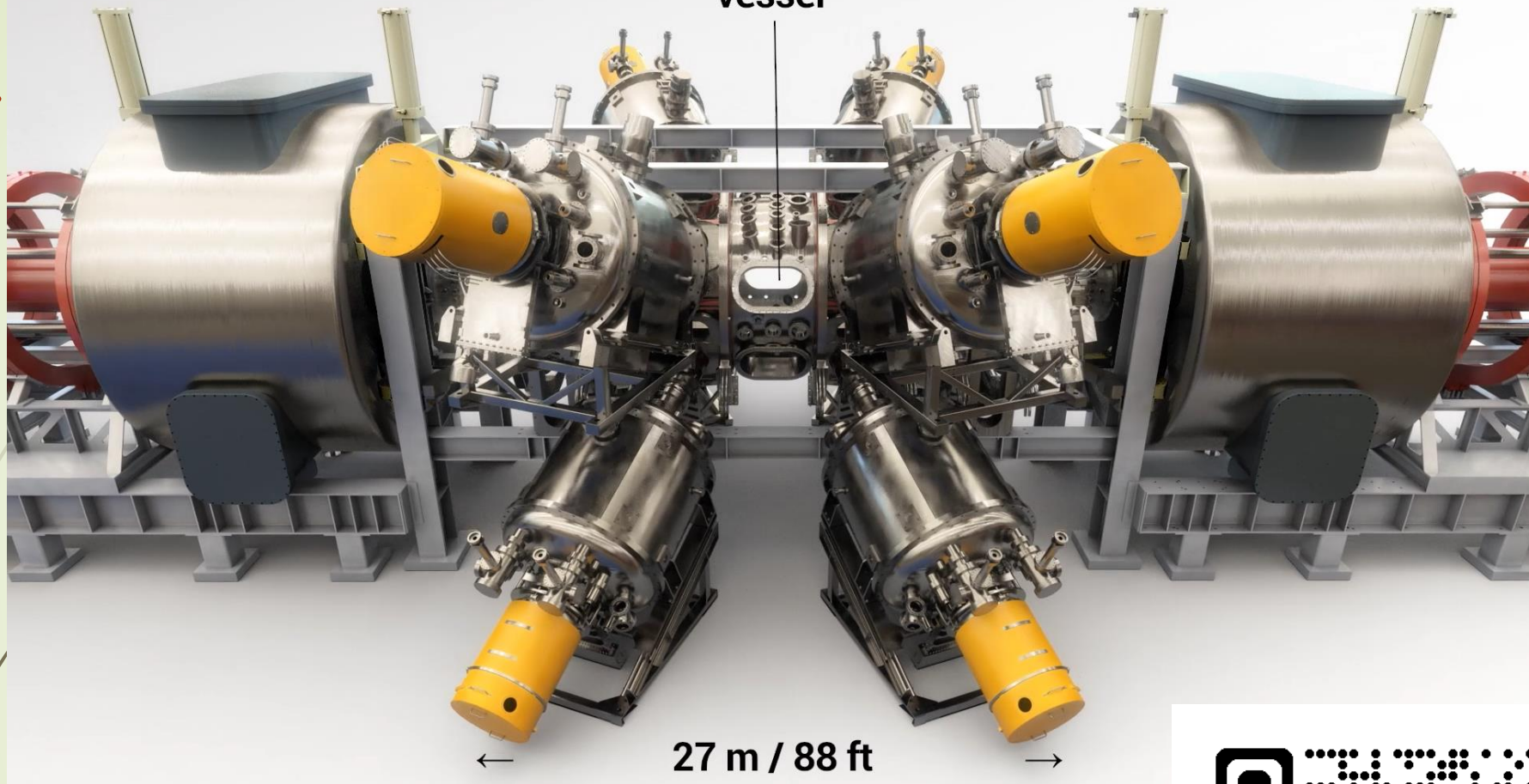
RCTのスキームはTAEのビデオを参照ください



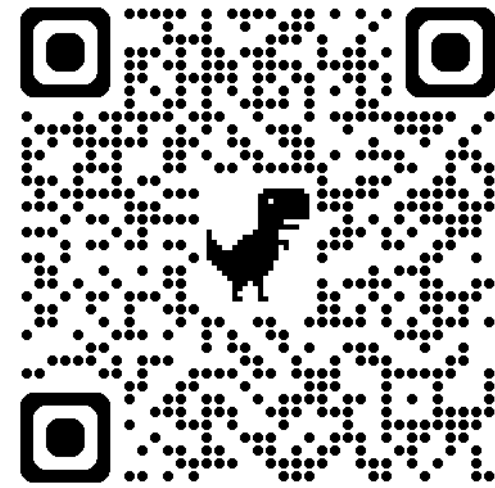
C-2W/NORMAN 7000万度達成



Containment vessel



← 27 m / 88 ft →



未来エネルギーとして画期的だが
関心は低い 反対意見も多くある

複雑な理論で非常に分かりにくい(だれもわかりやすく説明できない)
かつ「核」という言葉へのアレルギー
ITERのの開発が遅れている ITERが完成しても発電できるわけでもない

超巨額の投資が必要で、国家が推進しないと実用化が困難
政治家があまり乗り気ではない

多くの環境保護団体、再生可能エネルギー関連企業が反対の立場
理由

巨額投資を再生可能エネルギーに使うべき

現状で一番の反対理由は核融合発電に予算は脱炭素政策予算に巨額が使われると
再生可能エネルギーへの補助金が減る

反対の理由

使えるエネルギーを産み出したことがない危険なオモチャに、われわれの金をむだにするな

2080年ではなく今は豊富に存在する再生可能なエネルギーに投資を

ITERは「危険」で「金がかかる」それでいて「雇用は産まない」

ITERは科学者がまだ高エネルギーの重水素とトリチウム水素同位体を扱う方法を知らないので危険

ITERの技術的な挑戦課題

「我々は太陽を箱に入れると言っているがその箱の作り方を知らないことだ」

技術的な懸念

14MeV（1,400万電子ボルト）もの高エネルギー中性子が、製造された時点から構造物に障害を与える。

！猛烈な中性子に曝されても十分に長期間商業動力炉として使える炉壁の設計が行なえるのか

障害は主として高エネルギー中性子が結晶格子中の原子を正しい位置から叩き出すのでは

中性子の爆撃が反応炉自体の中の放射性を誘発

商業炉の保守と廃棄は困難で高価

今後50年間、核融合は気象変動を止められない、しエネルギー供給の安定化を保障しない

今は再生可能エネルギーに集中すべき

現在の地球温暖化との戦いに集中すべきなのに、ITERの結果によって無視されることになる

効果が判明するまでの30-50年間に巨額予算が1プロジェクトにつき込まれる