

資料 第2-4号
平成9年4月 9日
ITER計画懇談会
第2回会合

核融合の魅力と ITER の技術的見通し

日本原子力研究所
鹿園 直基

目 次

- ・ 核融合エネルギーの魅力
- ・ ITERの目的
- ・ ITER本体の概要
- ・ ITERに必要な技術開発

超伝導コイルの技術

遮へいブランケットの技術

ダイバータの技術

真空容器の技術

遠隔操作の技術

- ・ まとめ

核融合エネルギーの魅力(その1)

人類の将来のエネルギー問題解決のためのオプション

1. 豊富な燃料資源

- ・重水素及びリチウム（トリチウムの原料）は事実上枯渇することなく、地域的に偏在することもない。

海水中の重水素 : 約 4.5×10^{13} トン
電気出力 100 万kWの核融合炉の重水素消費量
: 約 0.1 トン/年

鉱物リチウムの確認埋蔵量 : 約 240 万トン
海水中のリチウム : 約 2,300 億トン
電気出力 100 万kWの核融合炉のリチウム消費量
: 約 4 トン/年

2. 大容量かつ安定性のあるエネルギー源の可能性

- ・火力発電、原子力発電と同様な基幹エネルギー源となり、今後の増大するエネルギー需要に地域的、時間的制約なしに対応できる可能性

核融合エネルギーの魅力(その2)

3. 高い安全性・環境保全性

- ・ プラズマの閉じ込め特性上、原理的に異常過大出力となる可能性がない。
- ・ 放射化した構造材の発熱（崩壊熱）の密度が低いため炉を停止した後に大きな発熱が起きる可能性がない。
 - ・ 1立方センチメートル当たりの発熱は核分裂炉の10分の1程度
- ・ 高レベルの放射性廃棄物（核分裂生成物）がない。
 - ・ 生成する廃棄物は中性子による放射化物とヘリウム
- ・ 核融合反応によって二酸化炭素を出すことはない。

I T E Rの目的

1. 目的

核融合がエネルギー源となり得ることを実証する。

2. 技術目標

- (1) D-Tプラズマの自己点火と長時間燃焼を実証する。
- (2) 現状の技術に基づいて核融合炉が成立することを実証する。
- (3) 核融合炉の実用化に必要な技術基盤を確立する。

ITER 本体の概要

ポロイダル
磁場コイル
(超伝導磁石)

トロイダル
磁場コイル
(超伝導磁石)

中心
ソレノイド
コイル
(超伝導磁石)

遮へい
ブランケット

中性子の遮へい、
中性子による熱の
除去

ダイバータ

核融合でできた
ヘリウムの排気
と排熱

放射線遮蔽壁

クライオスタット

超伝導磁石を
極低温状態に
保つための
断熱真空容器

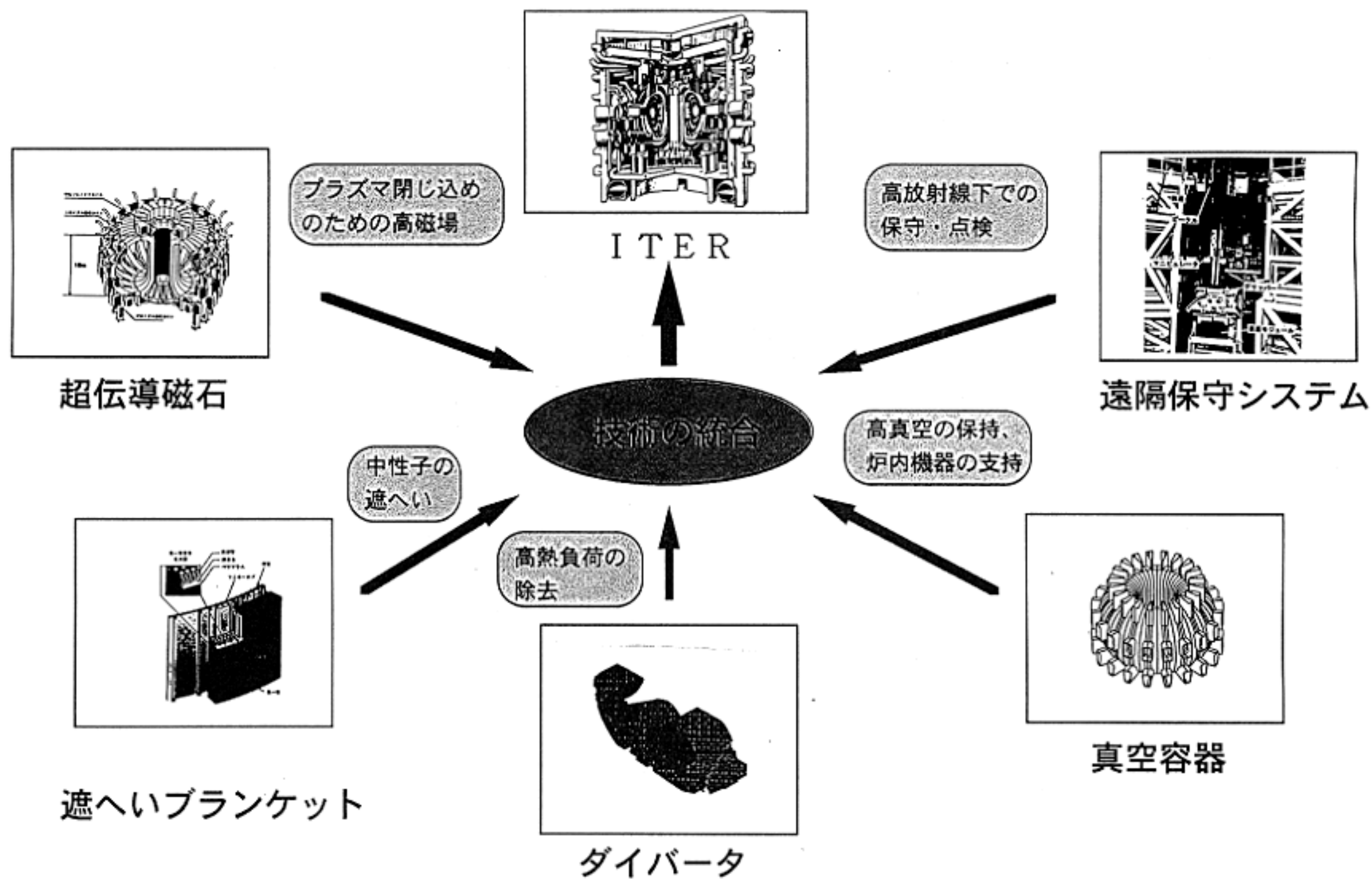
真空容器

主要諸元

核融合出力	150万kW
燃焼時間	1000秒
磁場強度	5.7テスラ

単位：m 0 10 20 30

ITERの主要な技術課題



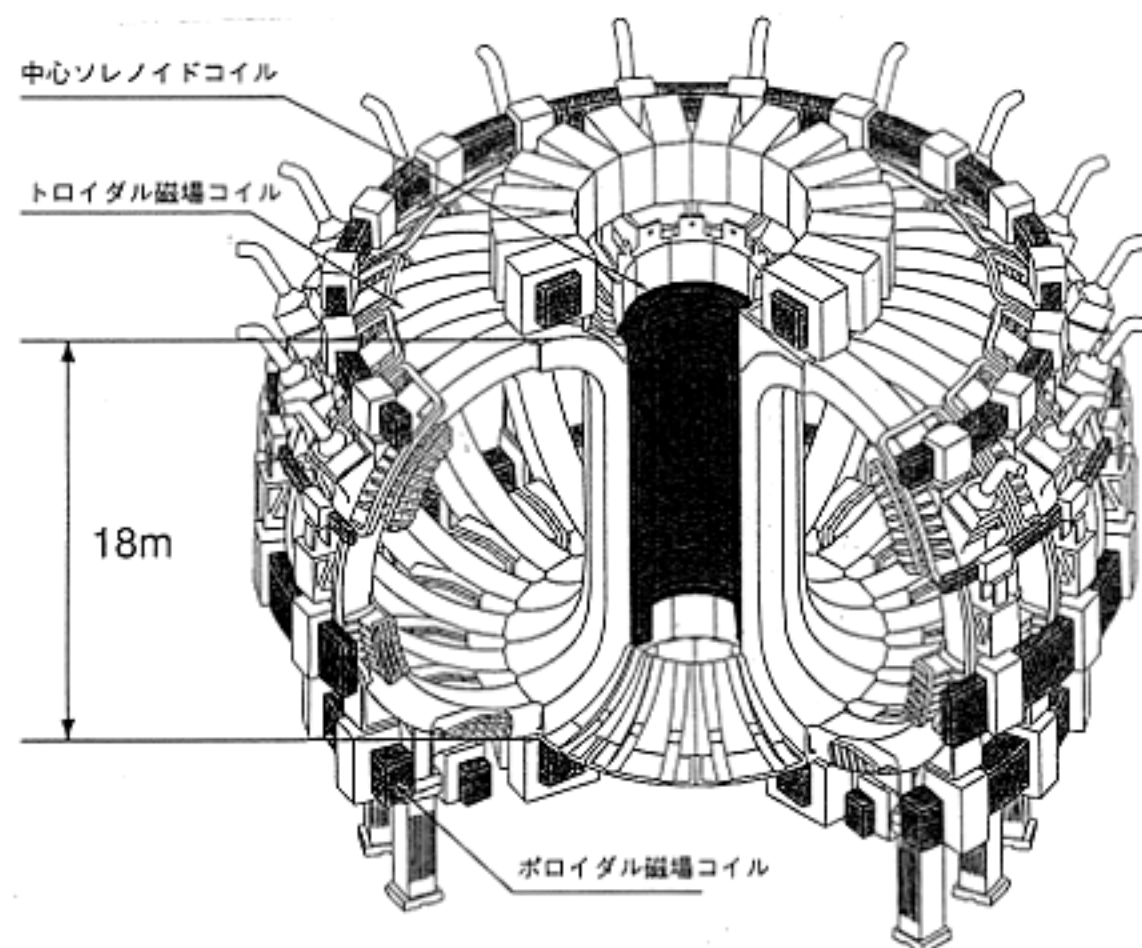
I T E R の超伝導コイル

要求される機能

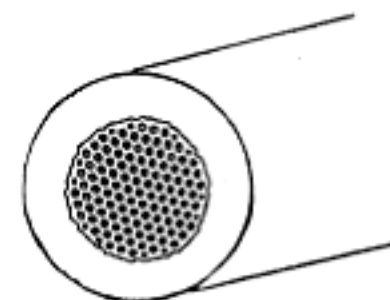
- ・ プラズマの閉じ込め及び制御のための磁場の生成

機能を達成するための課題

- ・ 4万アンペアの電流を流す超伝導導体(5cm×5cm)の開発
- ・ 4ミクロンの超伝導線を500万本束ねる導体製作技術



超伝導コイルの構成



超伝導素線
超伝導線 (4ミクロン)
を数10本束ねた線をさら
に百数十本束ねた線
(直径0.8mm)

撚線

素線 x 約1,000本

金属管引込み
圧縮整形

高ニッケル鋼
(インコイ)



導体

超伝導コイルの導体

超伝導コイルの技術

1. ITERに必要な技術

	中心ソレノイドコイル
・コイルの大きさ	12m(高さ)×5.4m(外径)
・最大磁場	13テスラ
・最大電流	4万アンペア

2. ITER計画開始時点での技術レベル

・コイルの大きさ	0.2m(高さ)×1m(外径)
・最大磁場	7テスラ
・最大電流	3万アンペア

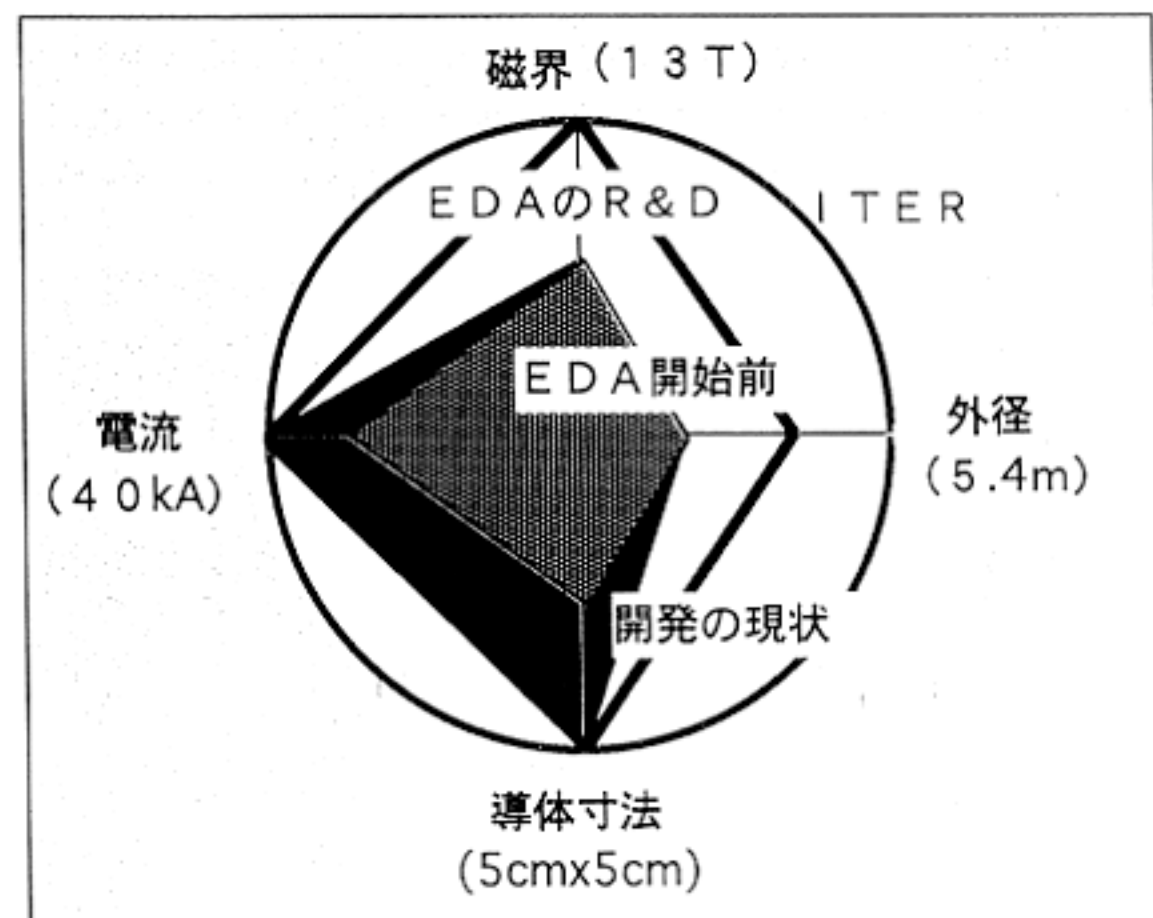
3. ITERに向けた技術開発状況

モデルコイルによるR&Dを実施中

・コイルの大きさ	1.8m(高さ)×2.7m(外径)
・最大磁場	13テスラ
・最大電流	4万アンペア
・モデルコイル導体	製作済
・コイル化	実施中
・試験	試験施設完成

4. その他

超伝導状態が瞬時に破れた(クウェンチ)際に超伝導コイルに蓄積されたエネルギーの放出実験を計画



技術的達成度 (必ずしも同時達成値ではない)

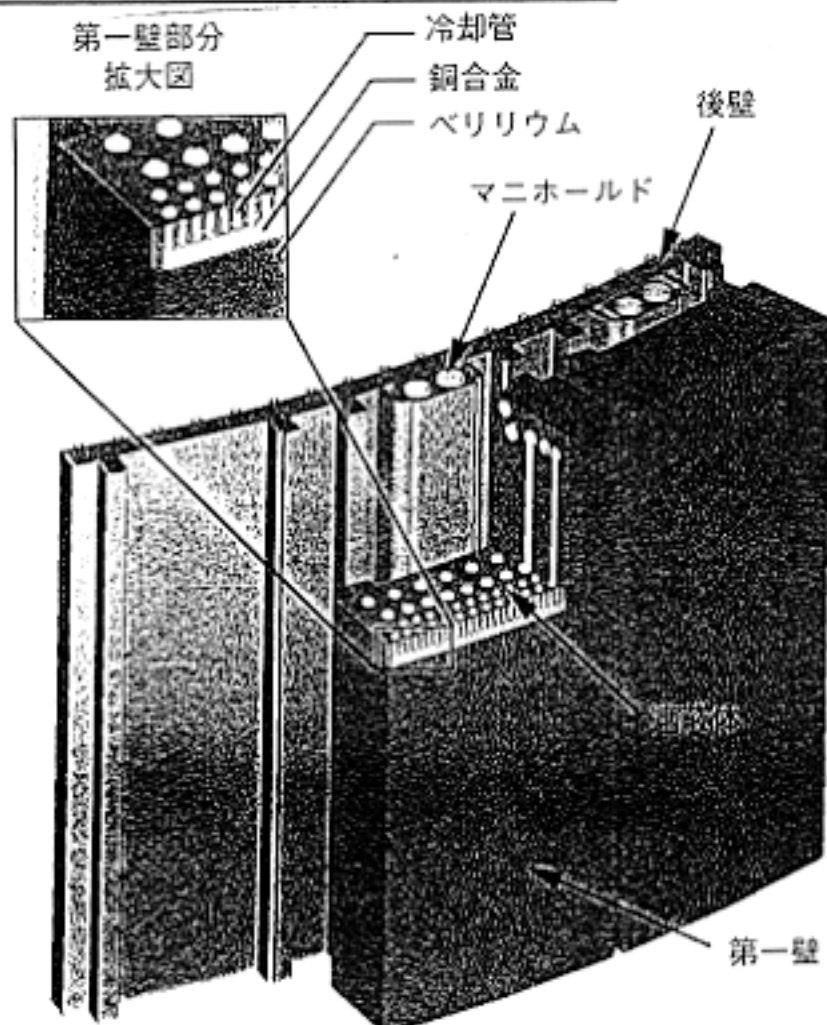
ITERの遮へいブランケット

要求される機能

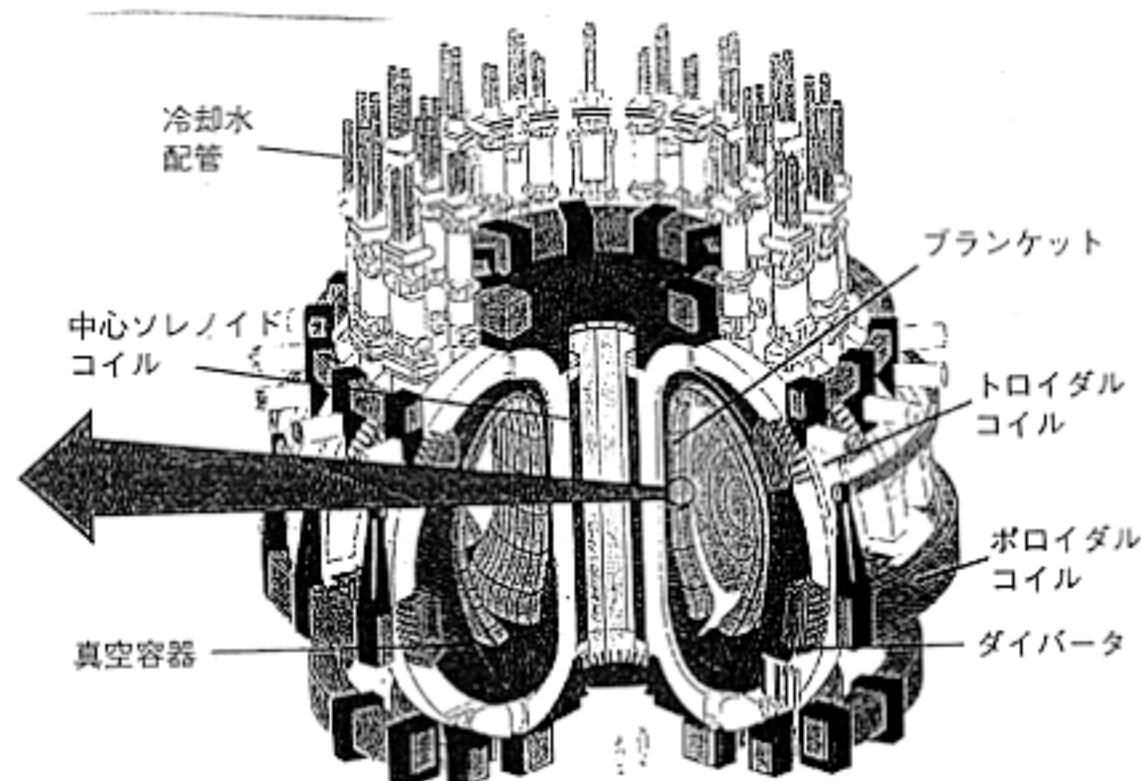
- ・中性子の遮へい
- ・中性子による発熱の除去
- ・プラズマとの共存性

機能を実現するための課題

- ・中性子遮へい能力に優れ、同時に高熱負荷(0.5MW/m^2)に耐える異種金属(銅、ベリリウム-ステンレス)の接合技術($700\sim 1,050^\circ\text{C}$)の開発
- ・強大な電磁力等に耐える構造設計上の配慮



遮蔽ブランケット・モジュール構造
(高さ $\sim 2\text{m}$ 、重量 $\sim 4\text{トン}$)



ITER鳥瞰図

遮へいブランケットの技術

1. ITERに必要な技術

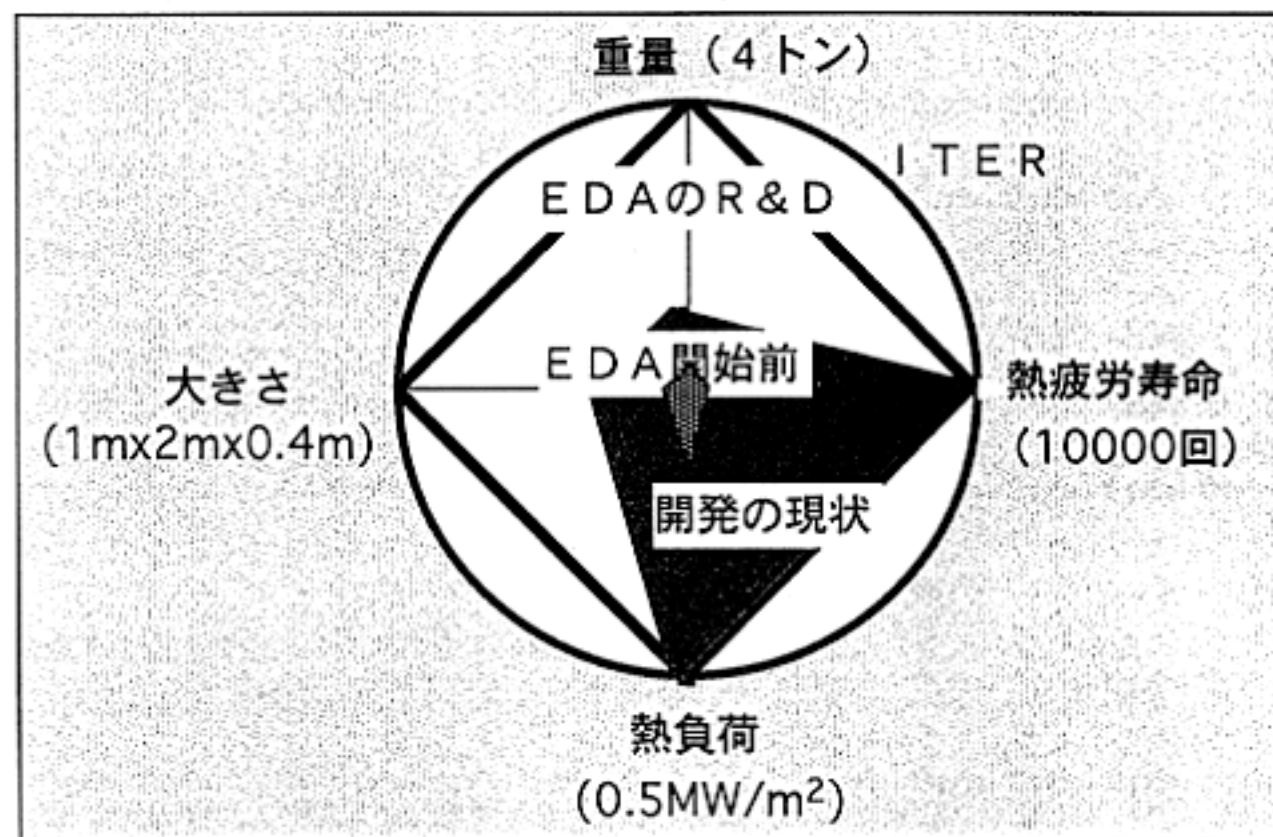
- ・高速中性子に対する遮へい能力
(中性子束を約1/1000に低減)
- ・高い熱負荷($0.5\text{MW}/\text{m}^2$)及び電磁力(1.5MPa)に耐える冷却構造

2. ITER計画開始時点での技術レベル

- ・ステンレス鋼に炭素を接合した構造体を用いて、 $0.6\text{MW}/\text{m}^2$ の熱負荷に耐えることを実証済

3. ITERに向けた技術開発状況

- ・実規模模型を用いて遮へい性能試験を実施、解析結果との一致を確認済
- ・実規模遮へいブランケットの製作技術を開発中



技術的達成度 (必ずしも同時達成値ではない)

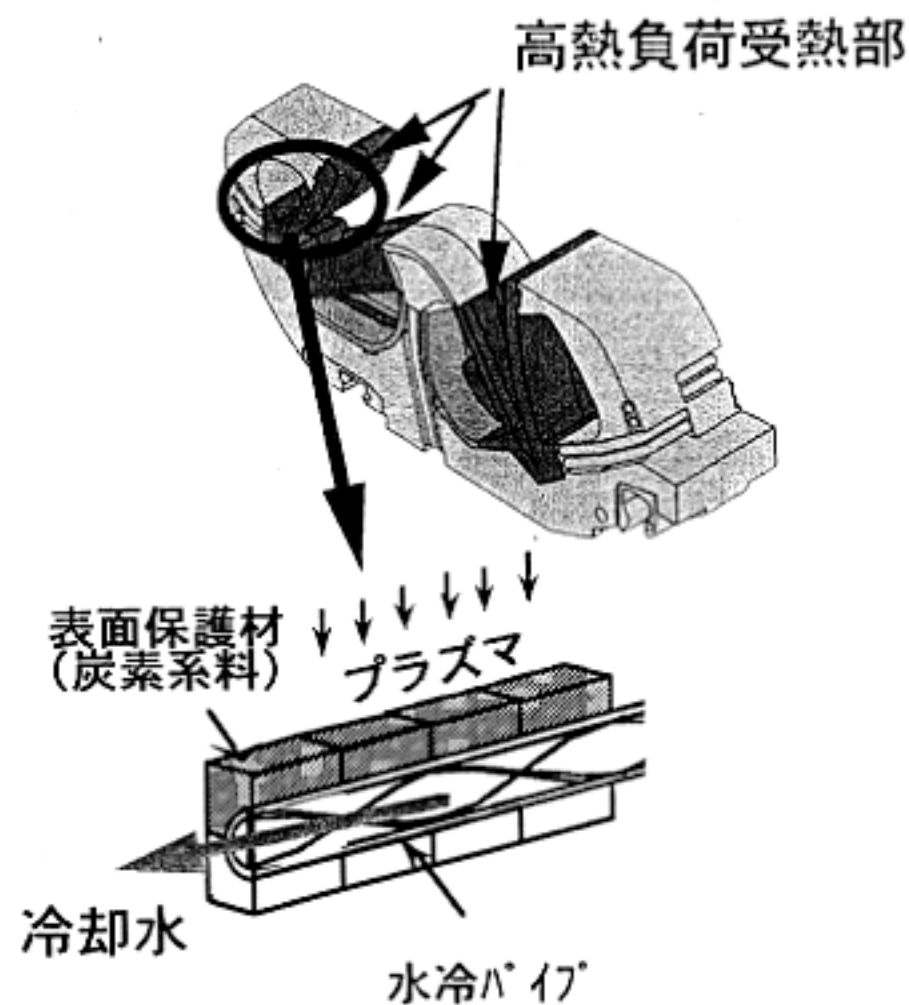
ITERのダイバータ

要求される機能

- ・ プラズマからの粒子による発熱の除去
- ・ プラズマ中の不純物混入抑制
- ・ ヘリウム燃焼灰の排気

機能を達成するための課題

- ・ 高い冷却能力（構造、材料）を有する冷却管の開発
- ・ 炭素材料と金属等異種材料の接合技術の開発
- ・ 損耗の少ない表面保護材料の開発



ダイバータの技術

1. ITERに必要な技術

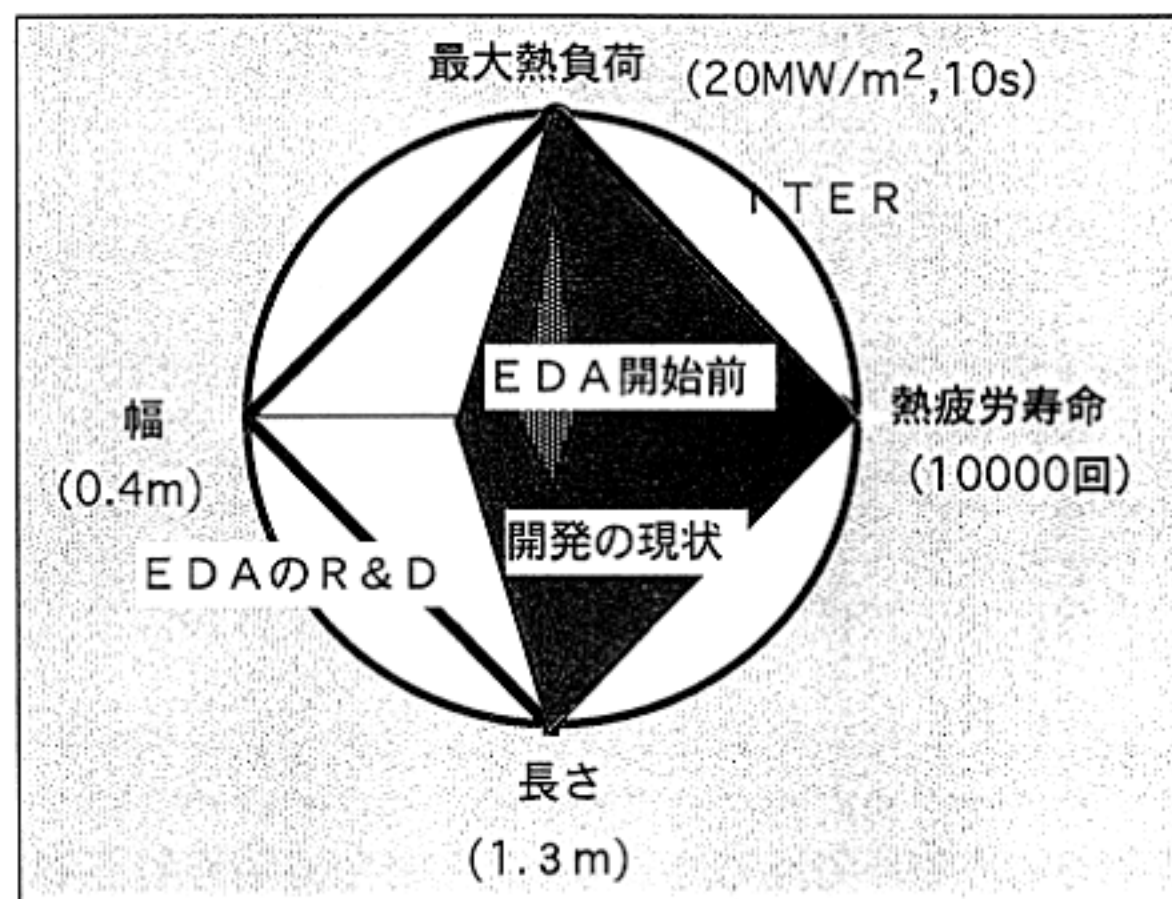
- ・熱負荷 5MW/m^2
(最大 20MW/m^2 、10秒)
- ・大きさ 長さ：1.3m、幅：40cm
- ・表面材料 炭素系材料及びタングステン

2. ITER計画開始時点での技術レベル

- ・熱負荷 最大 20MW/m^2 、10秒
- ・大きさ 小規模試験片
(長さ：10cm、幅：2.5cm)
- ・表面材料 炭素系材料

3. ITERに向けた技術開発状況

- ・大規模試験体（長さ：1.3m、幅：3cm）によりITER熱負荷条件を達成
- ・実規模試験体を製作中、組み合わせ試験を実施予定
- ・タングステンを表面材料に用いる構造体については開発中
- ・不純物混入抑制及びヘリウム燃焼灰の排気についてはJT-60で実験実施予定



技術的達成度（必ずしも同時達成値ではない）

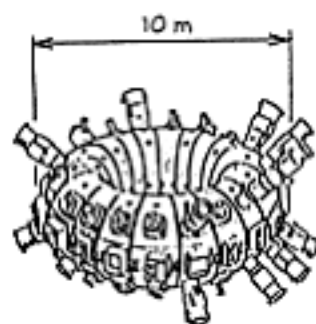
I T E Rの真空容器

要求される機能

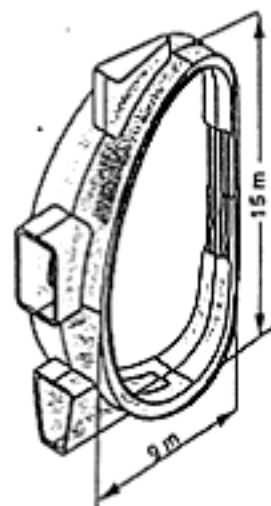
- ・ 100億分の1気圧程度の高真空の維持
- ・ プラズマ電流維持のための電気抵抗の確保
- ・ 真空容器内機器（遮へいブランケット、ダイバータ、）の支持
- ・ 放射性物質に対する障壁

機能を達成するための課題

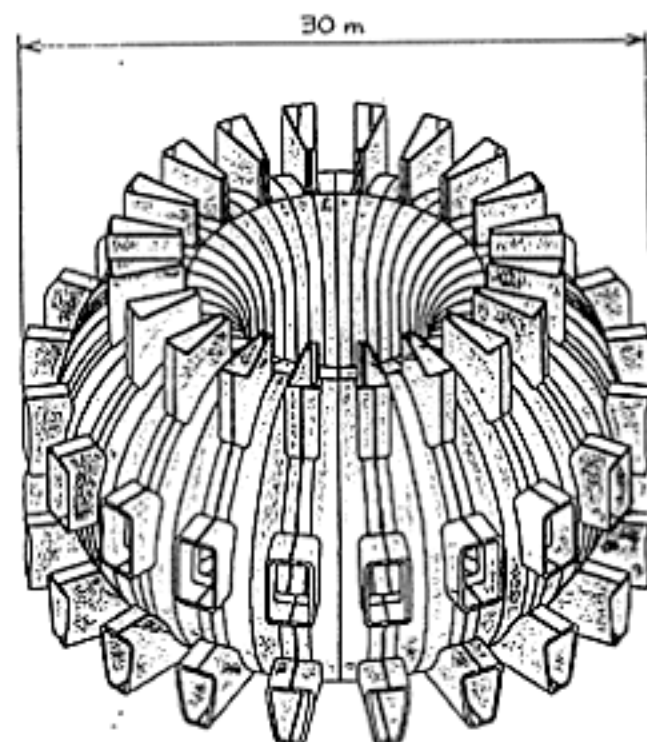
- ・ 高い製作精度を出すために溶接歪みを小さくする技術（寸法15mに対して誤差±5mm）の開発
- ・ 自重による変形を防止する構造の開発
- ・ 新しい構造（遮へい付二重壁）の製作技術



J T - 6 0
重量：70トン



I T E R工学R&D
I T E R実機(20セクター)の
1セクター、重量：300トン



I T E R真空容器
重量：6,000トン

真空容器の技術

1. ITERに必要な技術

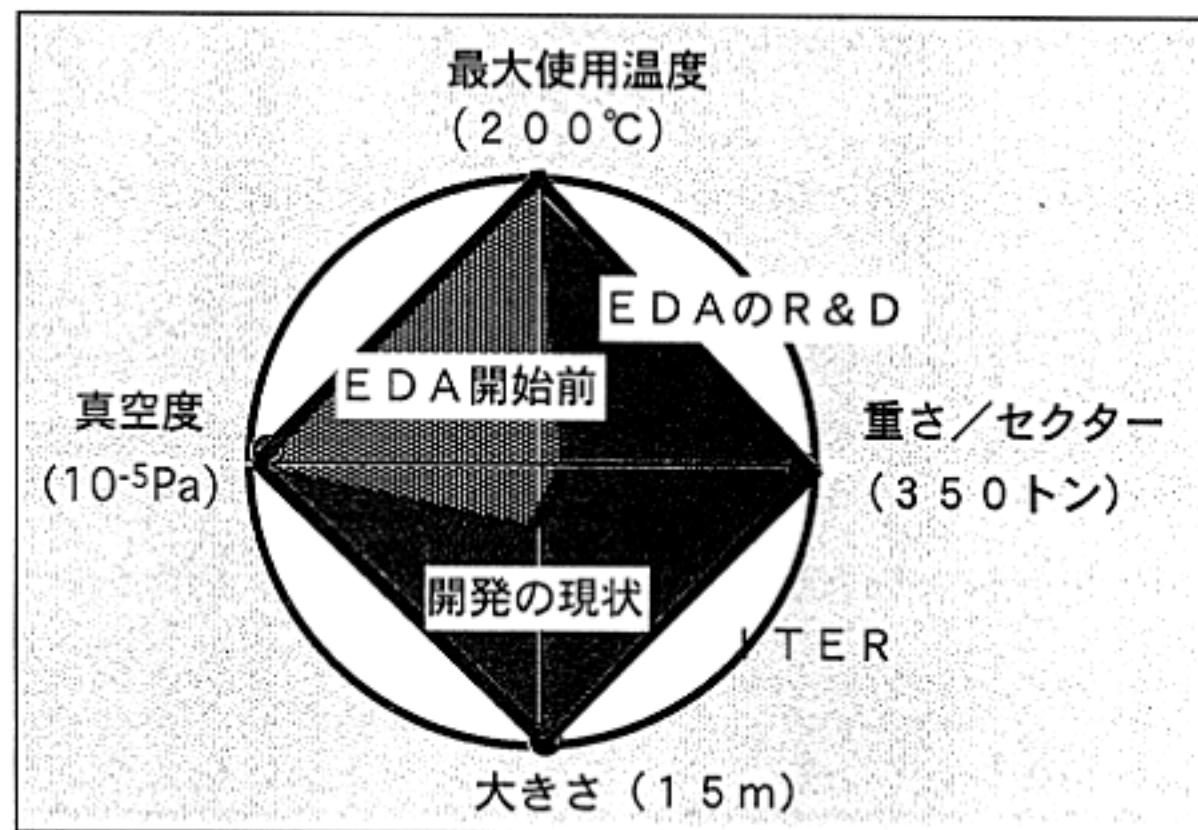
- ・ 構造 遮へい付二重壁容器
(軽量、剛性、電気抵抗大)
- ・ 大きさ(断面) 15m(高さ)×9m(幅)
- ・ 真空容器内の構造物の重量 6,000トン
- ・ 電磁力による荷重 15,000トンを支持
- ・ 真空度 100億分の1気圧以下

2. ITER計画開始時点での技術レベル (JT-60)

- ・ 構造 二重壁容器
- ・ 大きさ 3.2m(高さ)×2.4m(幅)
- ・ 電磁力 1,000トンを支持

3. ITERに向けた技術開発状況

- ・ 実規模セクタモデルにより、遮へい付二重壁容器の製作方法を確立



技術的達成度 (必ずしも同時達成値ではない)

I T E R の遠隔保守システム

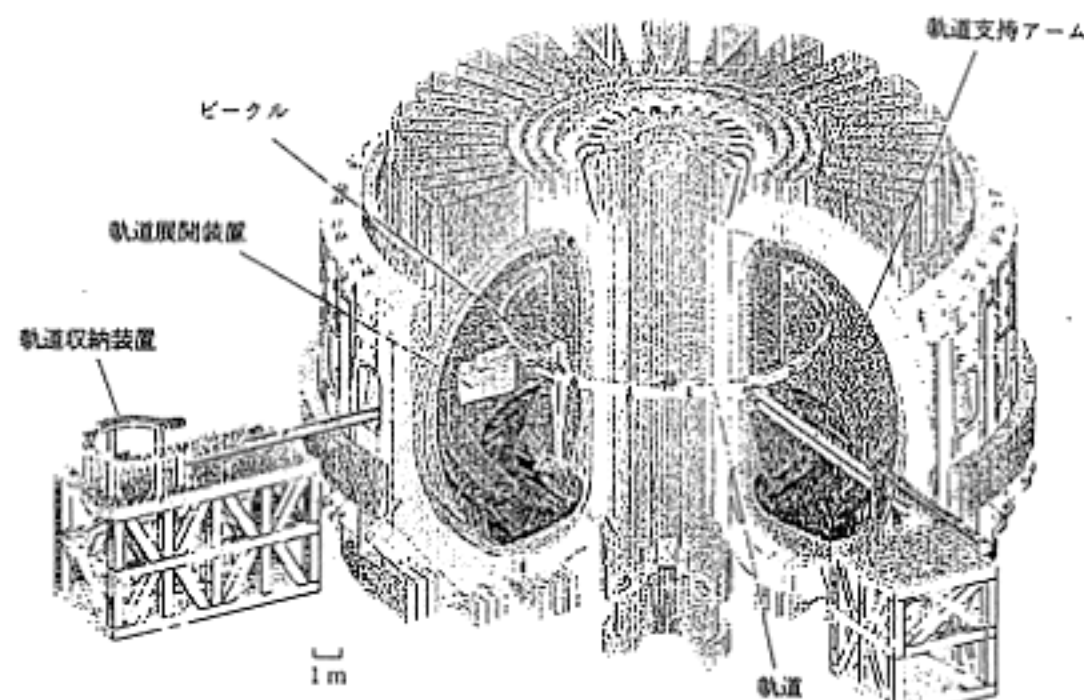
要求される機能

- ・高い信頼性を有し、高放射線下及び高温下での重量物の安全かつ正確な取り扱い

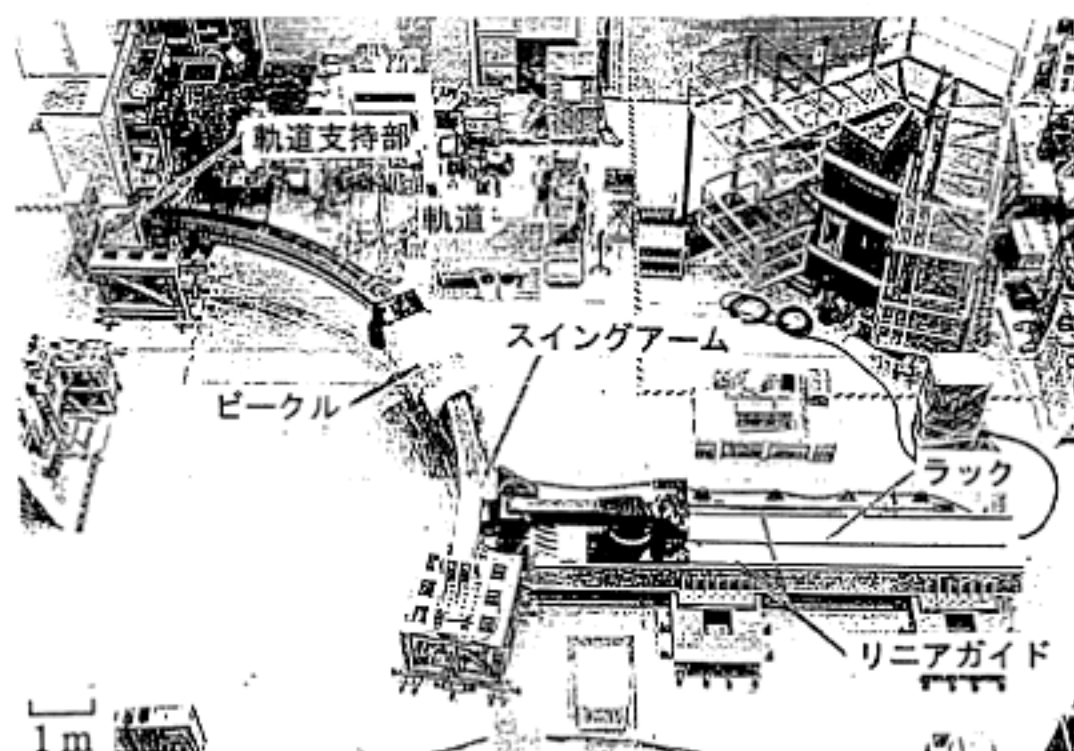


機能を達成するための課題

- ・重量物を限られた空間で扱える小型のアームや関節の開発
- ・高い位置決め精度を実現する先進制御（自己補正）技術の開発
- ・重量物を安定に支える軌道の開発
- ・高いガンマ線に耐える新材料（絶縁材、潤滑剤、レンズ等）の開発



軌道走行型の炉内遠隔保守機器



レール展開・収納試験装置

遠隔操作の技術

1. ITERに必要な技術

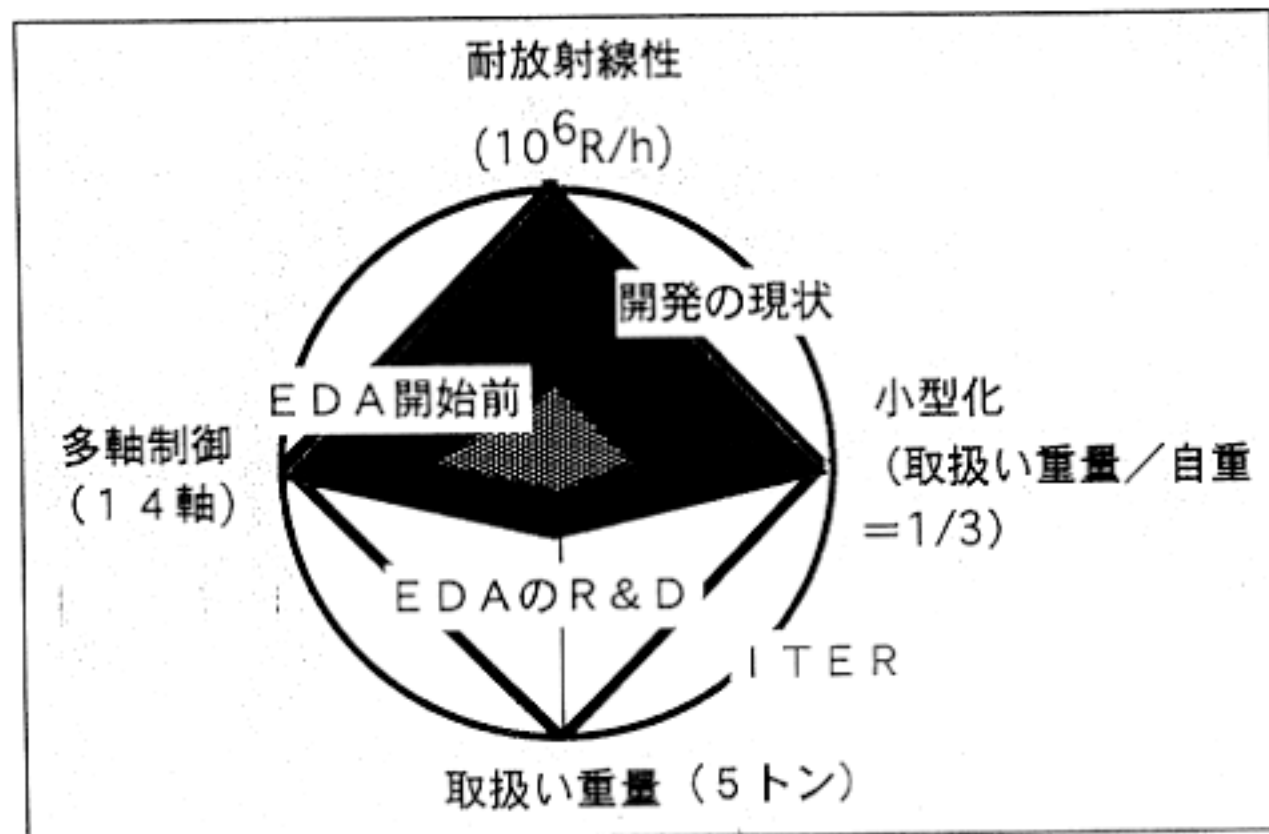
- ・ 安定な重量物（5トン）の取扱技術
- ・ 位置決め精度：2mm以下
- ・ 高放射線下(10^6 レントゲン/h)での取扱技術
- ・ 高い信頼性のある技術、小型化技術

2. ITER計画開始時点での技術レベル

- ・ 既存のマニピュレーターでは100kg程度の重量物の取扱いが可能
- ・ 10^3 レントゲン/hの放射線下で 10^8 レントゲンの集積線量まで使用が可能
- ・ 取扱重量1.2トン、位置決め精度0.5mmを実証済

3. ITERに向けた技術開発状況

- ・ ビークル型遠隔保守システムを開発中
 - － 実規模（取扱重量：5トン）実証試験を準備中
- ・ 耐放射線性試験において、 10^6 レントゲン/hの高放射線下で 10^9 レントゲンの集積線量まで使用可能であることを確認済



技術的達成度（必ずしも同時達成値ではない）

まとめ

1. 核融合エネルギーは、将来のエネルギー源として魅力的な特徴を有する。
2. ITERの実現には、個別の要素技術開発及びシステム全体の技術開発が不可欠。
3. それらの技術開発は着実に進展しており、ITERの実現に必要な技術的基盤は確立される見通し。