

I T E R 最終設計報告書案の概要

平成 1 3 年 3 月 6 日

I T E R 国際共同設計チーム

下村安夫首席副所長

平成12年1月のITER会合に、「ITER-FEAT の概要設計報告書案」(ITER-FEAT Outline Design Report)を提出し、各極の審議を経て平成12年7月にITER-FEAT の概要設計報告書として承認された。

この結果及びITER技術諮問委員会からの勧告等を踏まえて、ITER共同設計チームは各国内チームの協力を得て、平成13年1月に「ITER最終設計報告書案」をITER技術諮問委員に配布した。本報告書案は、以下の書類から構成される。

1) プラント設計仕様 (Plant Design Specification) :

最上流の図書であり、技術目標等の外部から課せられた主に設計に依存しない最高レベルの要求事項が記述される。また安全の方針と基準も含まれる。

2) プラント記述図書 (Plant Description Document) :

トカマク本体を含む全体的なプラントの記述書。設計の要約、複数のシステムにまたがる主なプラントのプロセス、プラントレベルでの評価の要約、および全体計画が記述される。

3) 設計要求と指針1 (Design Requirements and Guidelines 1) :

システム全体の運転シナリオや各システムが満たすべき運転条件など、システムレベルより上位の要求事項と基本仕様を取り扱う。そのシステム全体にわたる要求事項のみならず、関連するシステムとの取り合いやその仕様についても記述される。

4) 設計要求と指針2 (Design Requirements and Guidelines 2) :

システム毎の境界条件とシステムレベルでの詳細な機能、要求事項、基本仕様が記述される。

報告書案は、平成13年2月19日-22日に開催されたITER技術諮問委員会で審議が行われた。

その後、平成13年2月27、28日に行われたITER理事会に上記文書の概要をまとめた「ITER-FEAT 最終設計報告書(2001年7月)概要、ドラフト」(Draft, Summary ITER Final Design Report (July 2001))を提出した。

添付資料として、ITER最終設計報告書案の主要な内容を示す。

ITER改訂技術目標

1. 核融合エネルギー増倍率 (Q) 10以上のプラズマを実証する。
 $Q \sim \infty$ の可能性も排除しない。
2. 非電磁誘導の電流駆動により定常運転を実証する。 $Q \geq 5$ を目指す。
3. ITERの建設・運転により核融合炉工学技術の総合的な実証を行う。
4. 原型炉用のブランケットモジュール、高熱負荷機器等の試験を行う。
中性子壁負荷： 0.5 MW/m^2 以上、フルエンス： 0.3 MWa/m^2 以上。

ITERの有効利用

1. 装置のフレキシビリティー
性能に対する裕度、目的にあった運転、将来の改良
燃焼プラズマの研究、炉心の開発
2. 遠隔実験／常駐・非常駐グループによる研究
効率の高い運転、世界の研究者の参加、研究上の競争関係

1

ITER設計／R&Dの方針

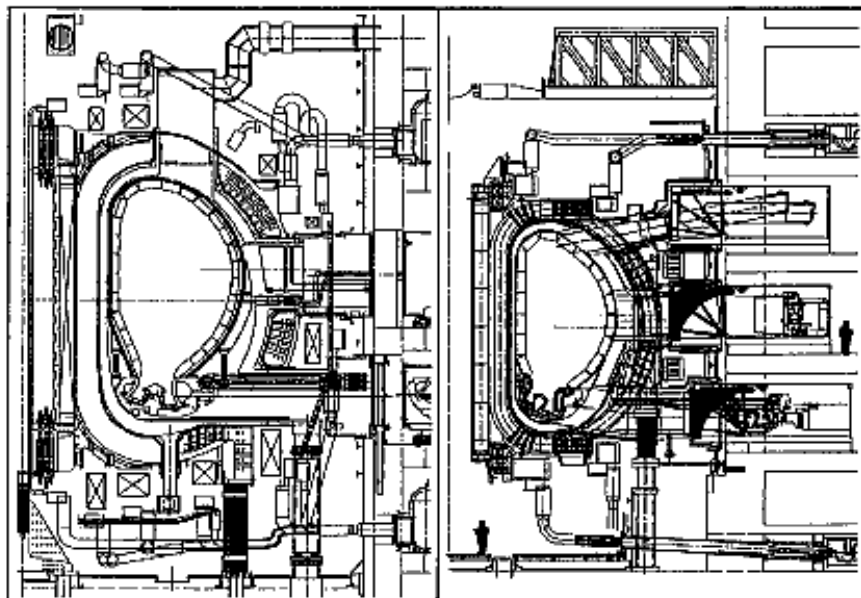
1. トカマク本体－信頼性
詳細な設計及び実機大規模のR&Dによる製作性の確認
2. プラズマ対向機器－改良性
交換性の確保－モジュール化、遠隔保守技術
モジュール及び遠隔保守機器の実機大R&D
3. 周辺機器－改良性
(加熱・電流駆動、計測、粒子給排気)
交換性、増力の可能性の確保
共通・大口径ポートの確保
キー・テクノロジーの開発
4. ブランケット、高熱負荷機器等試験体－交換性
共通大口径ポート、共通設備
参加極による各種ブランケットの開発
5. プラズマ運転－幅広い自由度

2

ITERの小型化/低コスト化

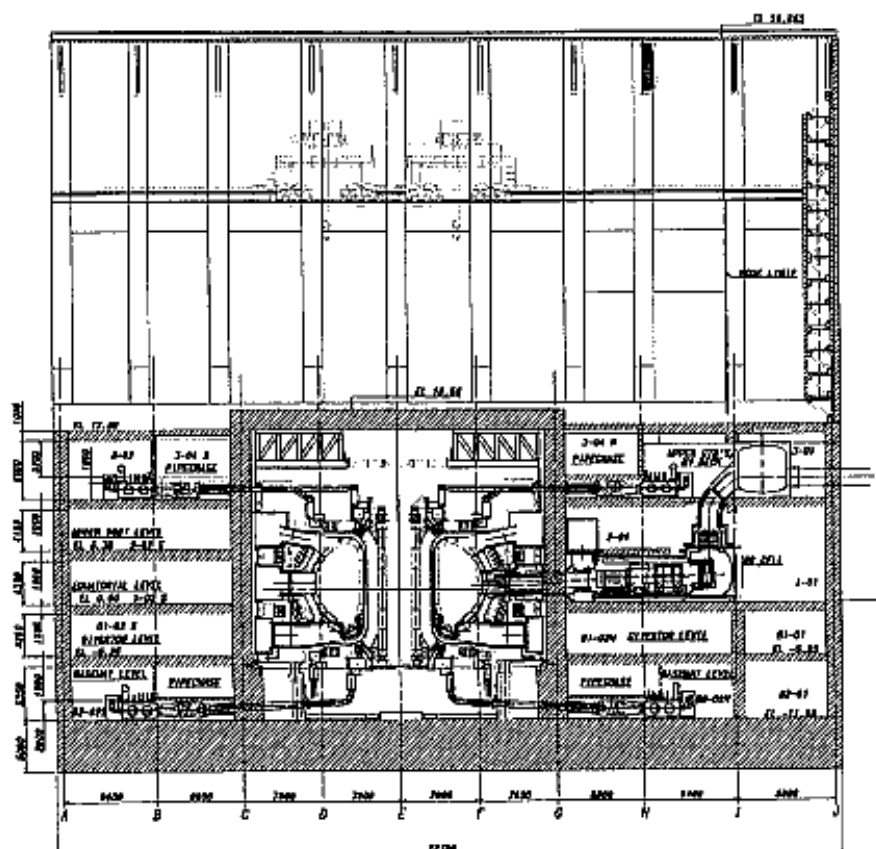
相違点

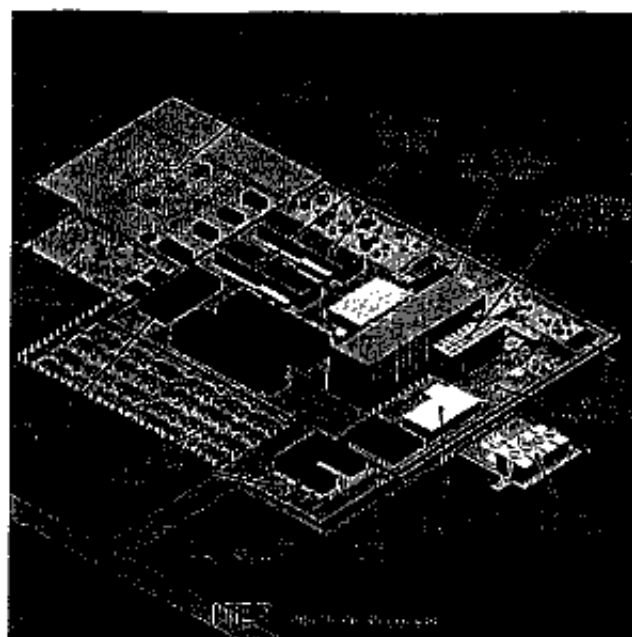
- ◆ 技術目標の変更
- ◆ 高非円形化、高アスペクト比化：自立・分割型中心・ソレノイド/ウェッジ支持トロイダル・コイル
- ◆ 工学R&D等に基づくマージンの最適化：超伝導線材の20%節約、シールド厚/ギャップの22cm削減



ITER	9 8年 ITER
核融合出力 500 (700) MW	1500 MW
主半径 6.2 m	8.2 m
小半径 2 m	2.8 m
プラズマ電流 15(17) MA	21(24) MA
インダクティブ パルス ≥ 400 s	≥ 1000 s
グリーンワルド密度 $1.2 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$	$0.85 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$

3





敷地:	40 ヘクタール (+ 30 建設時)
最大電力:	500MW
水:	200m ³ /day
熱放出:	450MW
トロイダル・コイル:	280ton (14m x 9m x 4m) x 18
ポロイダル・コイル:	200-450ton (9.5m - 26m) x 6
真空容器 1/9セクター:	575ton (12m x 8m x 8m) x 9

5

ITERの許容パラメーター

	評準パラメータ	フレキシビリティ
プラズマ電流 I_p (MA)	15	17 (100-200 s)
核融合出力 P_{fus} (MW)	500 (~3000s)	700 (100-200s)
楕円度/三角度 κ_x/δ_x	1.85/0.45-0.55	2.0/0.55(a=1.85m)
ダイバータ・ポンプ	200 Pam ³ /s	短パルスでは> 200 Pam ³ /s

	初期	増力	
NB (MW)	33	50	33
RF (MW)	40	80	100
NTM 安定化用 EC (MW)	(20)	(40)	
RWM 安定化用 サドル・コイル	20kA/10G/2Hz	~50kA	

ダイバータ/ブランケット	交換可能な構造
大口径ポート (14 個)	ブランケット試験、遠隔保守、RF 加熱、計測用等の標準ポート

実験運転計画

- 1-3年 水素プラズマ運転
プラズマ電流、プラズマ加熱、電流駆動の定格運転
テスト・ブランケット予備試験を含む
- 4年 重水素プラズマ実験運転
少量のトリチウムを含む短時間燃焼、遮蔽の確認
- 5-10年 重水素／トリチウム・プラズマ実験運転
Q値、パルス巾の上昇
混成運転による長パルス化
完全非誘導電流駆動による定常化
ブランケット等の試験を含む
- 11-20年 重水素／トリチウム・プラズマ実験運転
ブランケット等の試験を中心とする

トリチウム消費量の予測

5-10年 5kg ($\sim 0.1 \text{ MWa/m}^2$)

11-20年 10-20kg ($0.2\text{-}0.4 \text{ MWa/m}^2$)

燃焼プラズマの運転領域

1. 誘導電流駆動運転

標準的にはELMy H-modeを想定

データベースが充実している。再現性のある準定常的運転が得られている。

Q $\sim$ 5 / 10 / 20 / 50...の研究

定常ダイバータ熱負荷低減及び小さなELMを有するプラズマの研究

不純物入射、ELMの小さな種々モード、ペレット入射等の研究

高密度化、高ベータ化、高出力化、高アルファ粒子圧等の研究

2. 長パルス運転

工学試験用一部非誘導電流駆動による長パルス運転 ($>1000\text{s}$ 、Q $\sim$ 5)

3. 非誘導電流駆動による定常運転

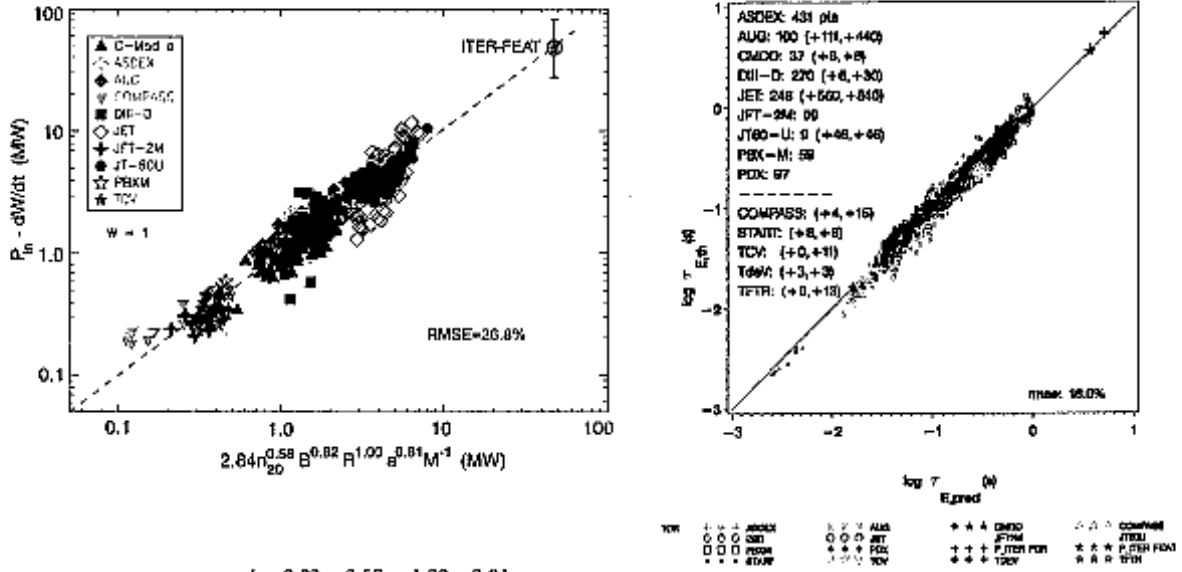
ELMy H-mode (+ペレット入射による中心ピークの密度分布)

あさい／負の磁気シェアーと内部障壁 (+ペレット入射による中心ピークの密度分布)

燃焼／電流／密度／温度分布の関係の研究

高ベータ化／高ブートストラップ電流／高閉じ込めの研究

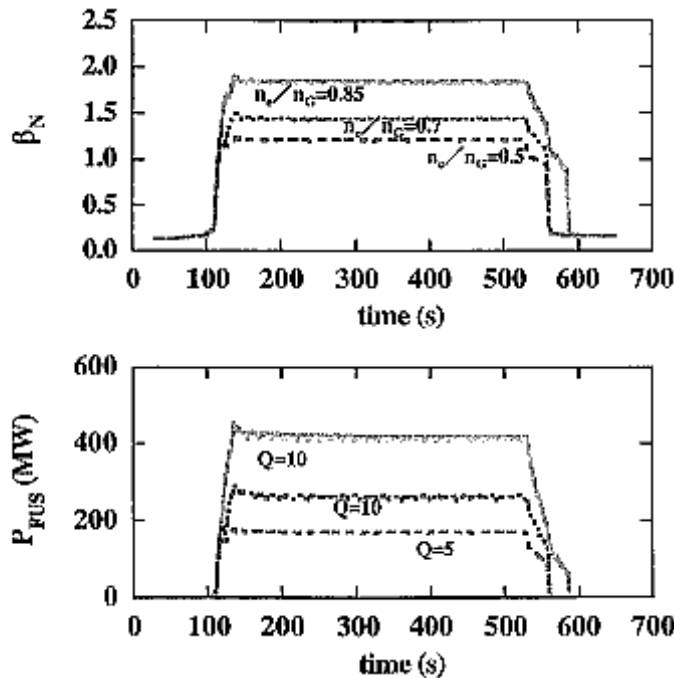
誘導電流放電での標準的なプラズマはELMy-Hモードを想定する。



$$P_{LH} = 2.84 M^{-1} B_T^{0.82} n_e^{-0.58} R^{1.00} a^{0.81}$$

$$\tau_{E,th}^{IPB98(y,2)} = 0.144 I_p^{0.93} B_T^{0.15} P^{-0.69} n_e^{0.41} M^{0.19} R^{1.97} \epsilon^{0.58} \kappa_a^{0.78}, \quad \tau_E = H_H \tau_{E,th}^{IPB98(y,2)}$$

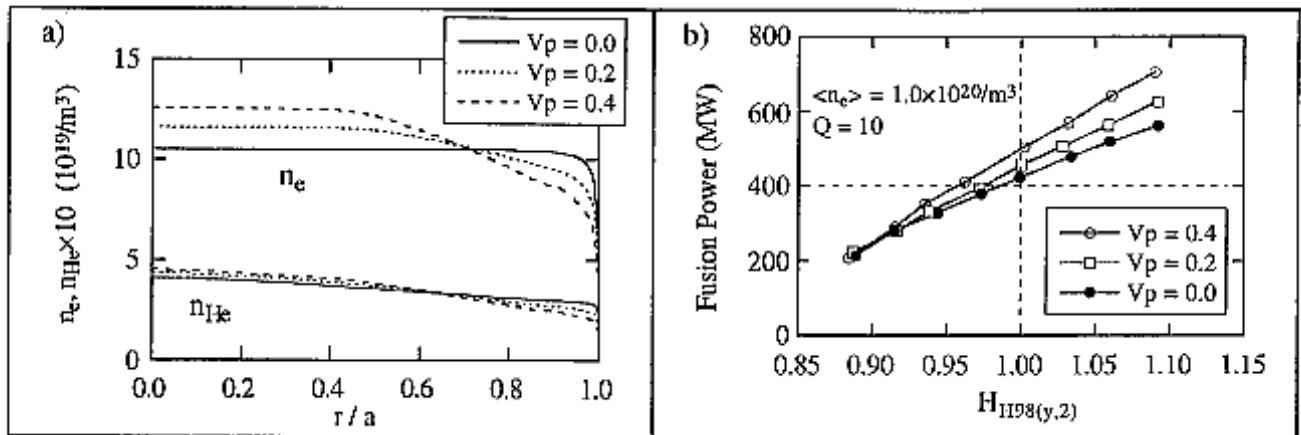
(s, MA, T, MW, 10^{20}m^{-3} , AMU, m and $\kappa_a = S_x / \pi a^2$)



$$I_p = 15 \text{ MA}, \quad H_H = 1.0, \quad \tau_{He}/\tau_E = 5, \quad \text{ダイバータ板熱負荷} < 10 \text{ MW/m}^2$$

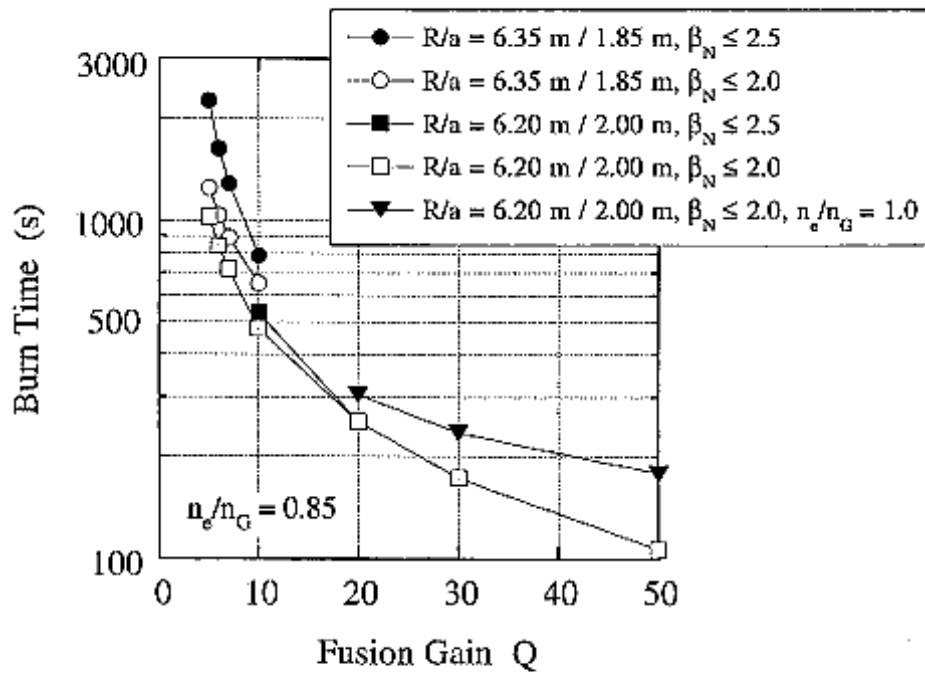
$$n_0 = I_p / \pi a^2 \text{ and } \beta_N = \beta(\%) / [I_p / a B_T]$$

15 MA, $H_H = 1$, $n/n_G = 0.85$



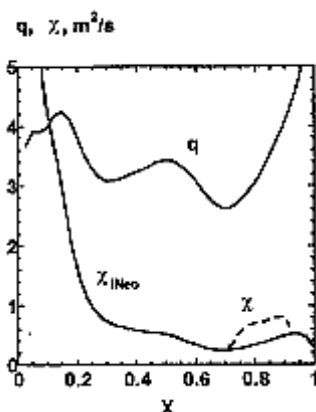
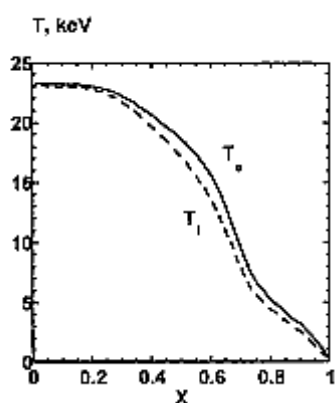
11

誘導運転から非誘導電流駆動運転へ
($H_H = 1$)

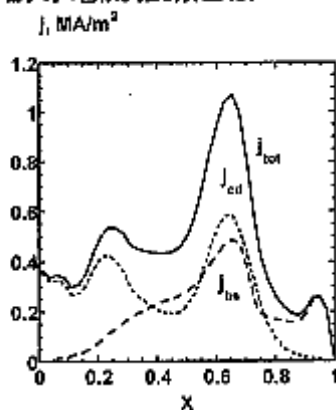
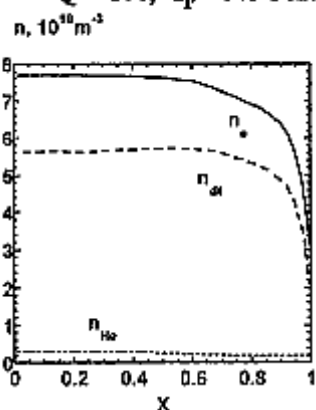


ブランケット試験用の運転例 :1000s, 500 MW (テスト領域 : 0.77 MW/m²)

12



$Q \sim 5.4$, $I_p = 9.5$ MAの完全非誘導電流駆動運転



$P_{FUS} / P_{CD} = 340 \text{ MW} / 63 \text{ MW}$,
 $Z_{eff} \sim 1.9$ (He/B/Ar=4%/2%/0.16%),
 $P_{sep} = 100 \text{ MW}$, $H_{91} = 1.45$,
 $\beta_N = 2.7$, $r = 0-0.5$ (NB:28 MW),
 $r = 0.5-0.8$ (EC and LH: 35MW)

13

ITERの設計

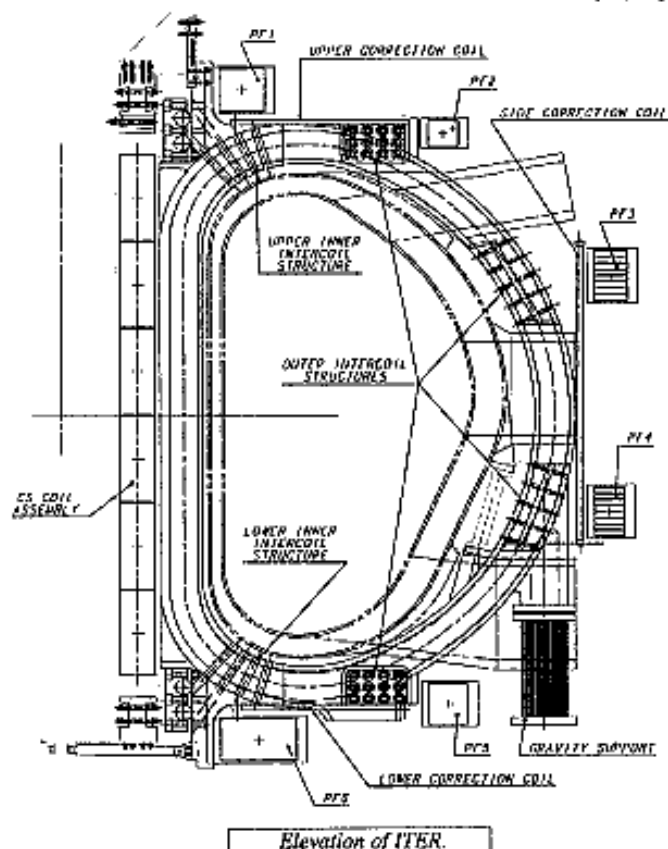
新しいITERにおいても可能な限り、ITER EDAにおいて確認した技術に基づく設計を行った。

Table A2-1. Main Engineering Features of ITER

超伝導トロイダル磁場コイル(18) コンダクター 構造	Nb ₃ Sn / SS ジャケット/ラディアル・プレート バンケーキ巻き/SS ケース
超伝導中心ソレノイドコイル(CS) コンダクター 構造	Nb ₃ Sn / インコロイジャケット又は Ti ₆ SS ジャケット バンケーキ巻き
超伝導ボロイダル磁場コイル(6) コンダクター 構造	NbTi/SS コンジェット ダブル・バンケーキ巻き
真空容器 (9 セクター) 構造 材料	二重壁/シールド材/磁性材 SS 316 LN / SS 304(2 %ボロン) / SS 430
第一壁/ブランケット(421) 構造 材料	分割型第一壁/真空容器設置型シールド・ブロック Be/Cu 合金 / SS 316 LN
ダイバータ (54) 型式 材料	シングル・ヌル/分離修理型高熱流束機器 W 合金/CfC/銅合金/SS 316 LN
クライオスタット 構造 最大径/高さ 材料	リブ付きシリンダー 28 m/24 m SS 304 L
冷却系	750 MW/3-4.2 Mpa/ ~120°C (ペーキング 240°C)
冷凍系	4.5K: 55kW / 0.13 kgs ⁻¹ 80K: 660 kW
電源系 パルス 定常	500 MW / 400 MVA _r 110 MW / 78 MVA _r

14

超伝導コイル系



トロイダル磁場コイル	
コイル数	18
全エネルギー (GJ)	41
全電流(MA•t)	164
最大磁場(T)	11.8
コイル電流(kA)	68
求心力 (MN)	403
重量(t)	5,362
中心ソレノイド・コイル	
コイル数	6
全電流(MA•t)	134
最大磁場(T)	13.5
コイル電流(kA)	41.5
重量(t)	1,041
ポロイダル磁場コイル	
コイル数	6
全電流(MA•t)	60.5
コイル電流(kA)	45
重量(t)	2,595
補正コイル	
コイル数	3 x 6

工学R&Dの例：大型高磁場Nb₃Sn超伝導コイル

* ITER仕様の超伝導線の開発と商業ベースの生産

EDA：27トン/4極、7社

(最大生産率：8トン/年、1社)

建設期の準備が完了



品質管理、480トン

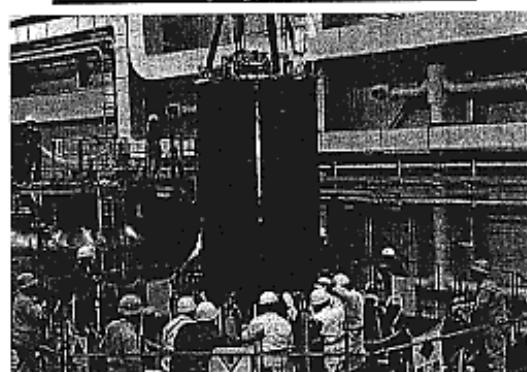
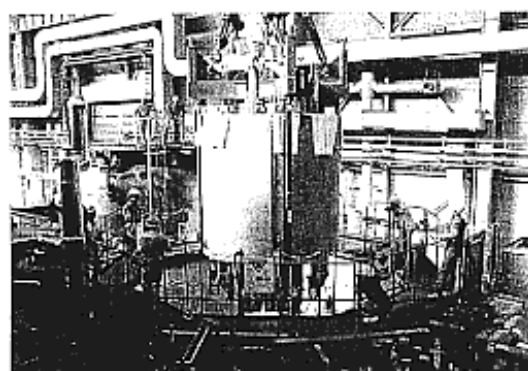
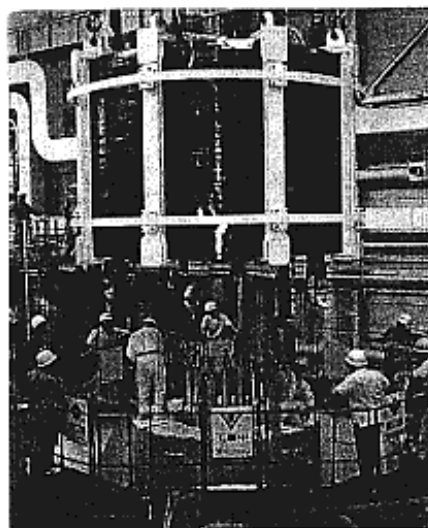
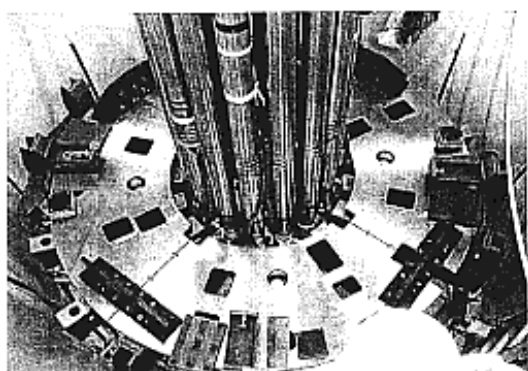
最大生産率：160トン/年、数社

* 実長・ケーブル、インサートコイル：ロシア/日本

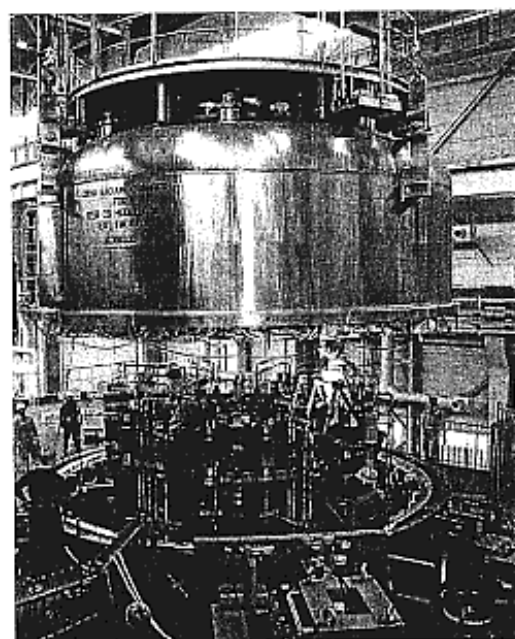
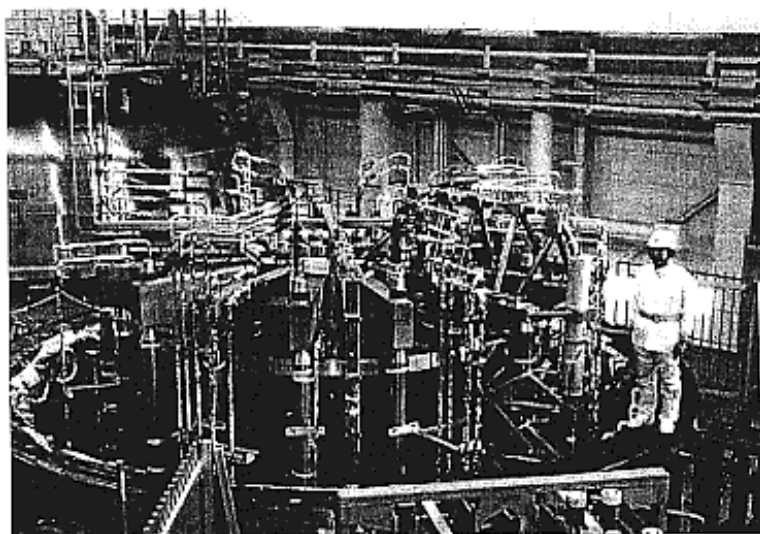
* 中心ソレノイド・モデル・コイル：日本/米国

* トロイダル磁場モデル・コイル：ヨーロッパ

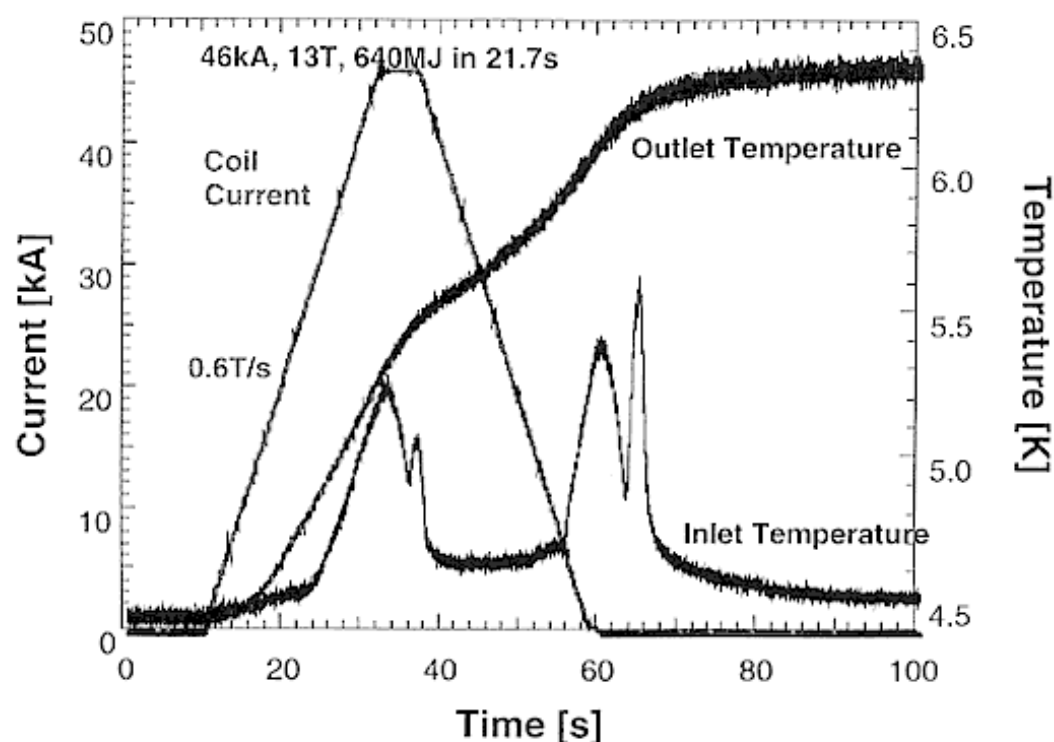
中心ソレノイド・モデル・コイルの組み込み



中心ソレノイド・モデル・コイルの組み込み



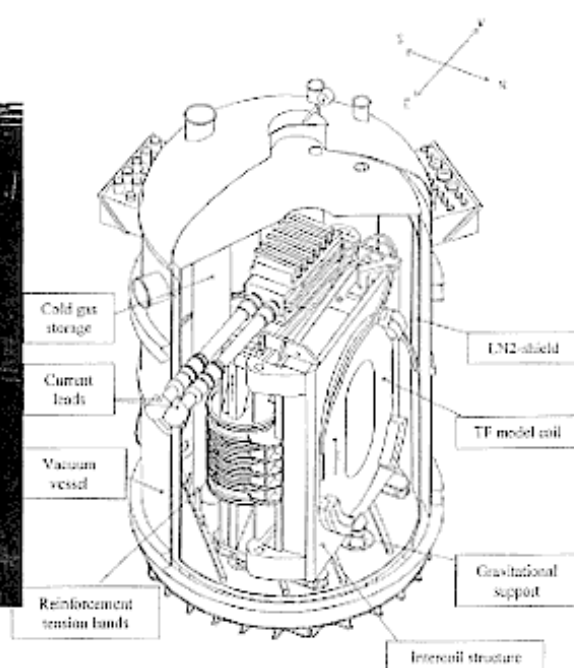
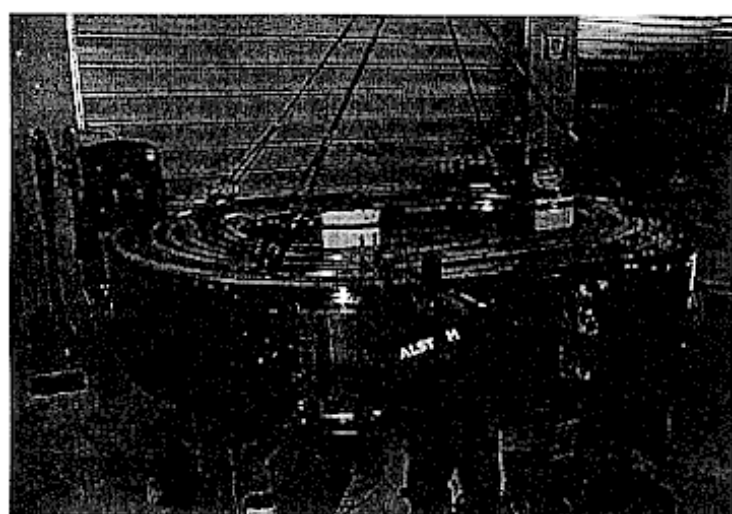
中心ソレノイド・モデル・コイルの13T～の高速（0.6T/s）立ち上げ

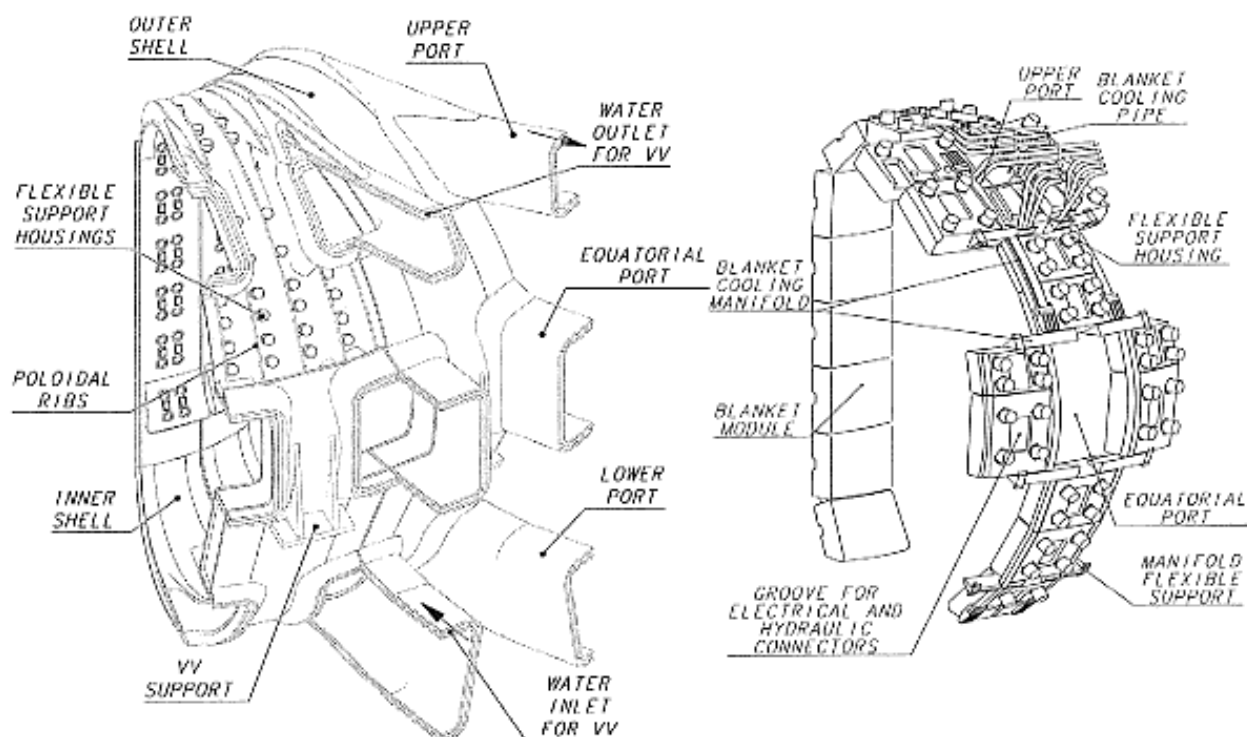


M000724a/HLT

19

トロイダル磁場モデル・コイル

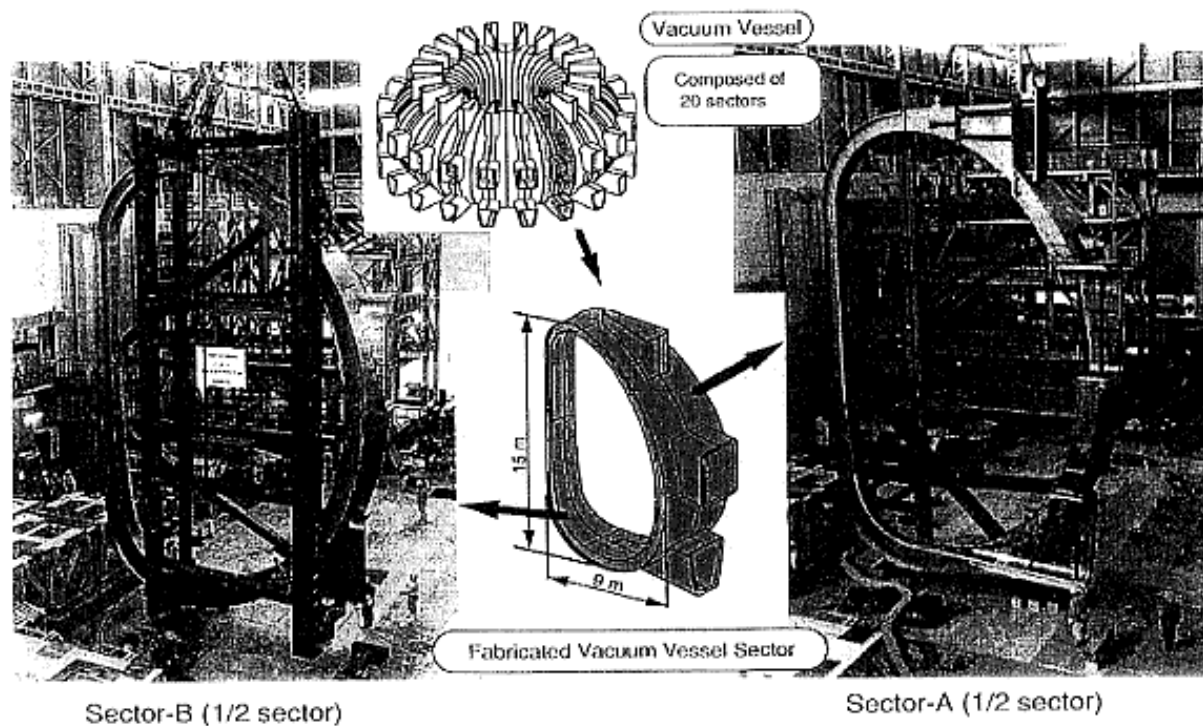




シールド・ブランケットとその冷却配管

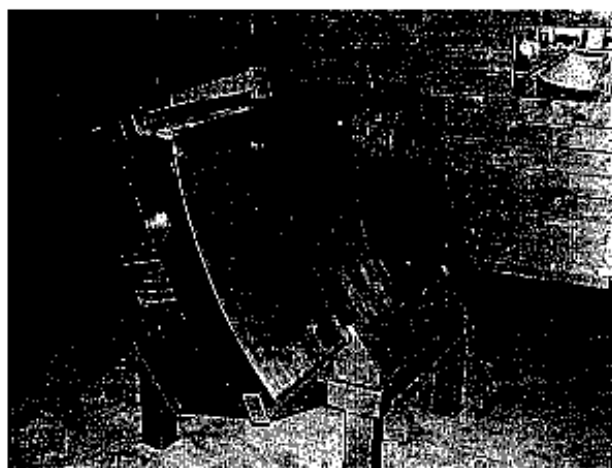
二重壁構造の真空容器

21

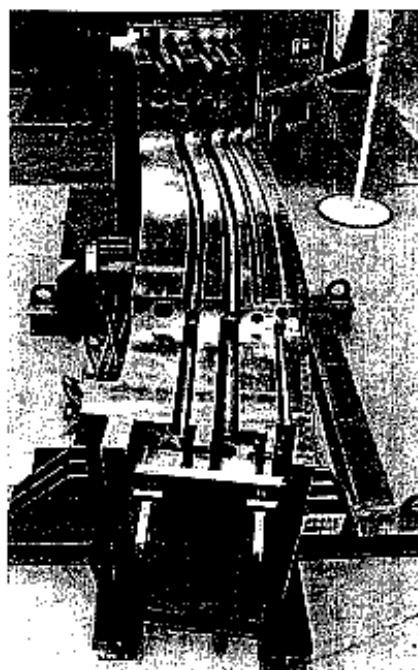


ITER真空容器セクタを $\sim 1/1000$ の精度で完成

22



Module Prototype Front View
(EU HT)

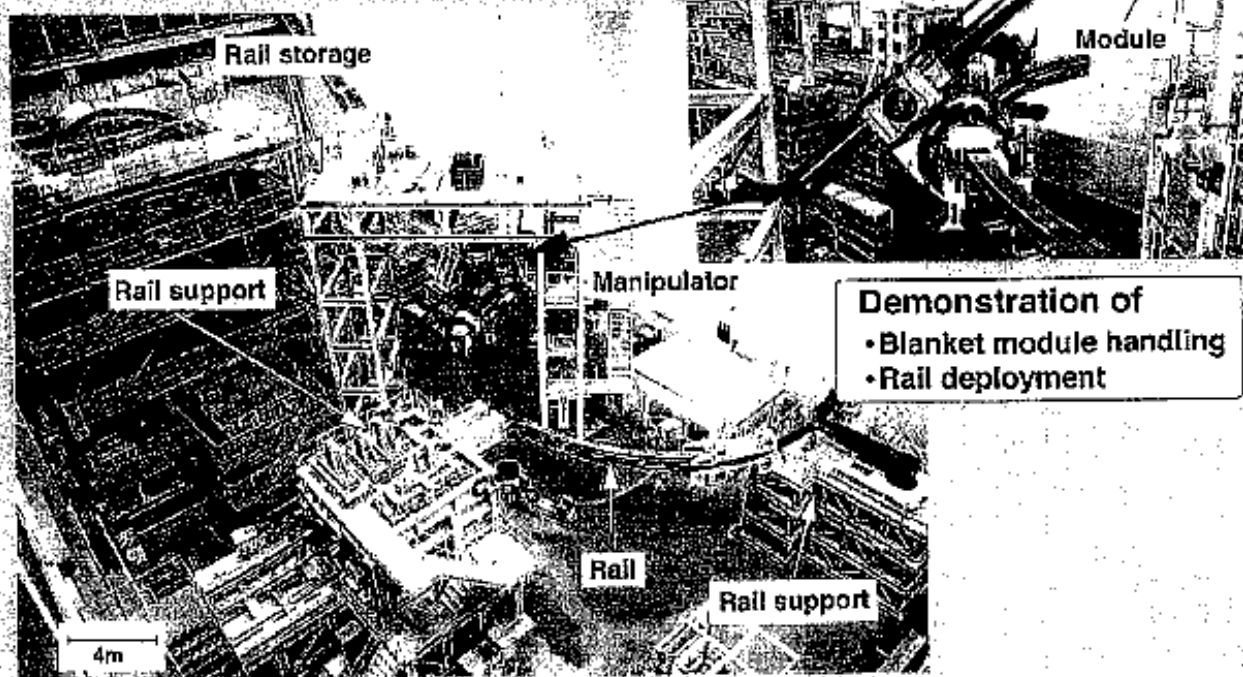


Module Prototype (JA HT)

実機大ブランケットモジュール

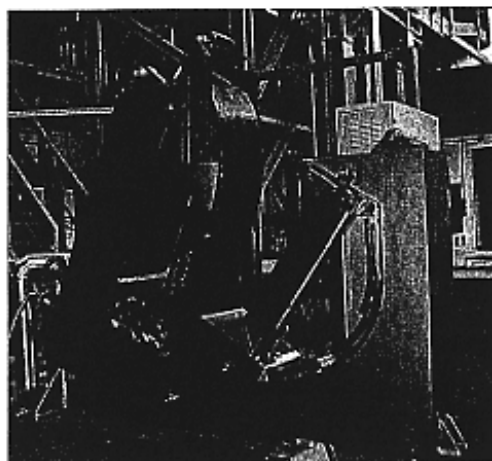
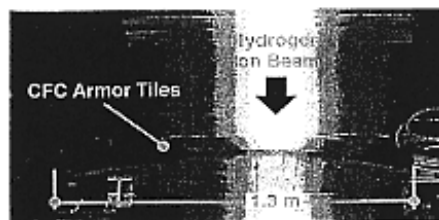
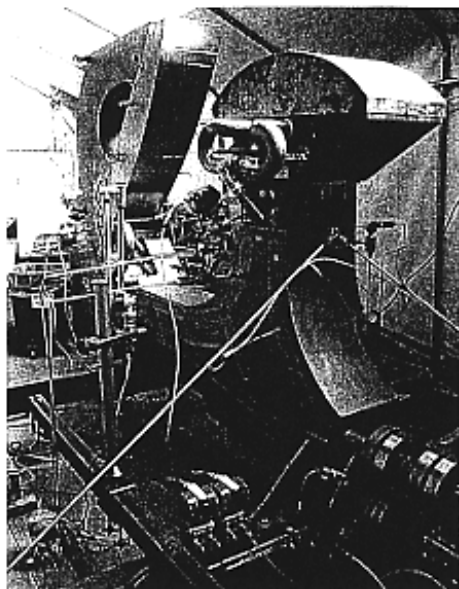
23

ブランケットの遠隔保守機器



24

ダイバータ・カセットとダイバータ板の高熱負荷試験

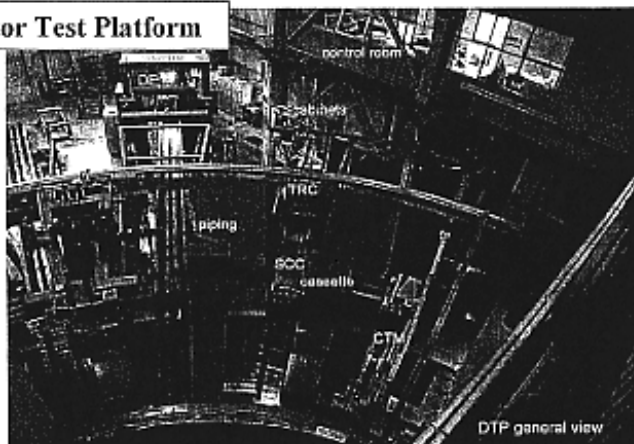


Integrated Inner Divertor Cassette (above left) at Sandia (US), Integrated Outer Divertor Cassette (below) at EFET (EU) and High Heat Flux Testing of Divertor Target by Ion Beam (above right) at JAERI, Naka (JA)

25

ダイバータの遠隔保守機器

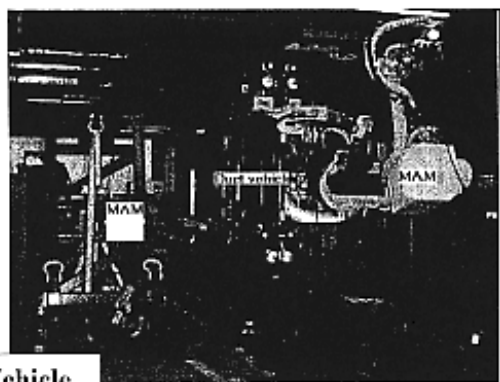
Divertor Test Platform



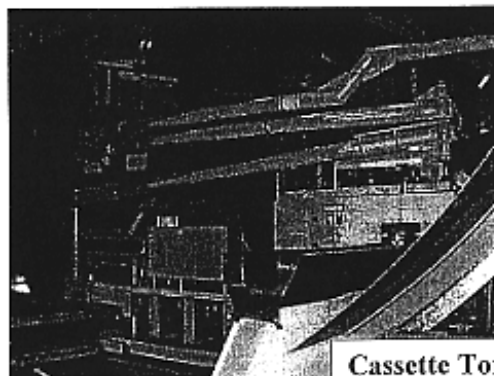
Central Mover



Duct Vehicle



Cassette Toroidal Mover



26

付帯設備及び単品の開発及びデータ収集

供給系	トロイダル内側入射ペレット
排気・トリチウム処理系	ポンプ、プラズマ排ガスの処理系
電源	スイッチ、ブレーカー
高周波加熱/電流駆動系	アンテナ系、ジャイロトロン
粒子加熱/電流駆動系	大電流負イオン源、1Mev電源、 大口徑セラミック
計測系	窓、鏡、フィーダー等の耐放射性
安全	化学反応度、崩壊熱、ダスト、腐食の データ、安全解析コードの妥当性試験

27

安全性

1. 基本方針

- ・深層防護とALARAの精神にのっとり安全確保を行う。
(ALARA：合理的に達成できる限り低く維持する。)

2. 各極の安全担当のコンタクト・パーソンとの非公式会合（平成12年10月）

- ・深層防護とALARAの精神にのっとり、また、核融合と実験装置である特徴を考慮し、公衆、作業員、環境の安全を担保することを確認。

3. 安全評価

- ・トリチウム、放射化物等の放射性物質のソース・タームについての定量的な評価
- ・通常運転時、異常時、事故時に分類し、それぞれについて解析コードによる評価

ITERコスト

	ITER-FEAT (1) kIUA	Ratio 1/2 %	ITER/1998 設計 (2) kIUA
建設費			
A) 初期建設費	2755	49.2	5603
B) 管理費	477	61.2	780
C) 製作時 R&D	60-80	~50	150
運転費（平均／年）			
A) 人件費	60	66	90
B) 電力等	~30	50	~60
C) 燃料	~8	40	~20
D) 保守・改良	~90	50	~180
計	188	54	350
廃炉費用	335	110	~300

まとめ

プラズマ

- ❖ 誘導運転 ($Q = 5 \rightarrow 10 \rightarrow 20 \rightarrow 50$, $I_p = 15 \text{ MA} \rightarrow 17 \text{ MA}$)
 $150 \rightarrow 700 \text{ MW}$, $n/n_G = 0.5 \rightarrow 1$, $\beta_N = 1.2 \rightarrow 2.1$
- ❖ 長時間運転
 $> 1000 \text{ s} / 350 \sim 500 \text{ MW} / Q=5 (0.55 \sim 0.78 \text{ MW/m}^2)$: ブランケット試験用ハイブリット運転
- ❖ 非誘導定常運転
 完全非誘導電流駆動 (目標 $Q=5$) (高 β と高い閉じ込めを必要とする)

工学設計／R&D

- ❖ 炉本体／プラント／建家等の全体の設計
- ❖ トカマク本体主要機器の実機大モデルの開発／製作／試験
- ❖ 上記に基づいたコスト評価