

# 炉工学技術に関連する加速案の要件について

ー 発電ブランケット、材料とIFMIF計画について ー

核融合専門部会 ワーキンググループ会合

平成14年9月6日

原研 那珂研 核融合工学部

関 昌弘

1. 加速計画とは何か。ー前提の確認ー
2. 加速計画に対する炉工学研究開発の戦略
  - (1) 基本的考え方
  - (2) 要素技術開発課題の抽出と開発所要期間の評価ーブランケット開発を例にしてー
3. IFMIFの増力と体積中性子源  
IFMIFの増力は可能か  
体積中性子源ー必要性と検討の概要
4. まとめ

## 1. 加速計画とは何か. 一前提の確認一

### (1) なぜ「加速計画」?

- エネルギー予測（環境対策重視）：  
2050年以降非化石エネルギーへの要求増加→核融合エネルギーは有力な候補（ITER計画懇談会報告書参考資料3）。
- 50年後の実用化は遅い。投資を集中すればもっと実用化が早まらないか？
- ITER以降実用化に向けて、integration-machineは何台必要か？  
→「第3段階」（原型炉→実証炉→実用化）  
→ 戦略分科会（原型炉→実用化判断）
- EUでのFast-Trackの議論（背景は異なっている）。

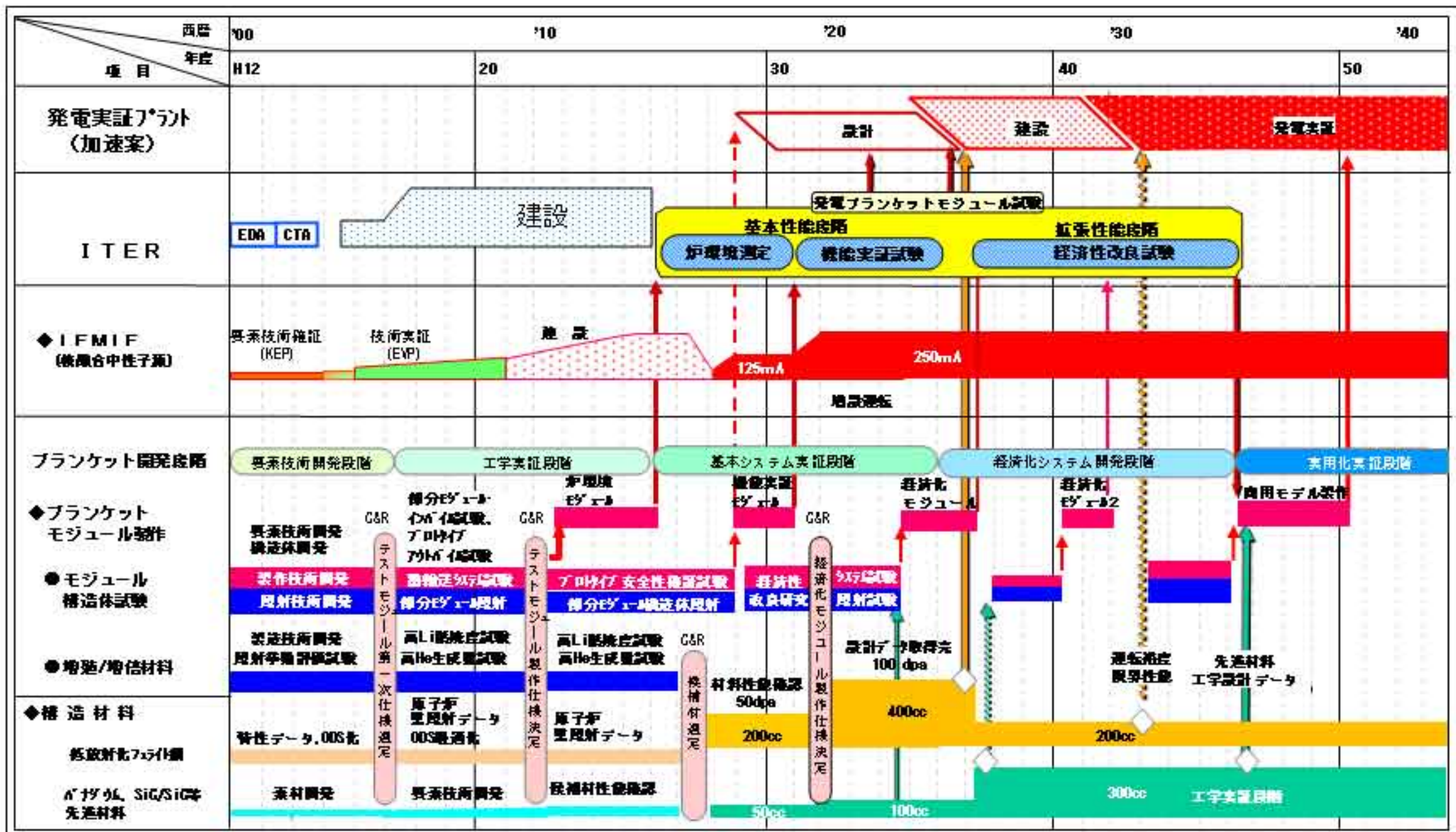
## 1. 加速計画とは何か. ー前提の確認ー

### (2) 何が「加速計画」

- ・ ITER以降のintegration-machineは1台（発電実証プラント）.
  - ・ 発電実証プラントでは、電力供給を早く実現する必要がある.
  - ・ 2030年代には核融合発電を実証し、系統への供給を開始.
  - ・ 産業界が実用化に乗り出すに足りる魅力（経済性、安全性等）が実現可能であることを示す必要がある.
- 
- ・ EUでは、「PA>コスト」であり、経済性が第一優先ではない。  
例えば、発電効率が悪くても、世の中に受け入れられる発電システムを目指すべき.

# 核融合ブランケット・材料開発の全体計画(加速案)

H14.7.1.



## 2. 加速計画に対する炉工学研究開発の戦略

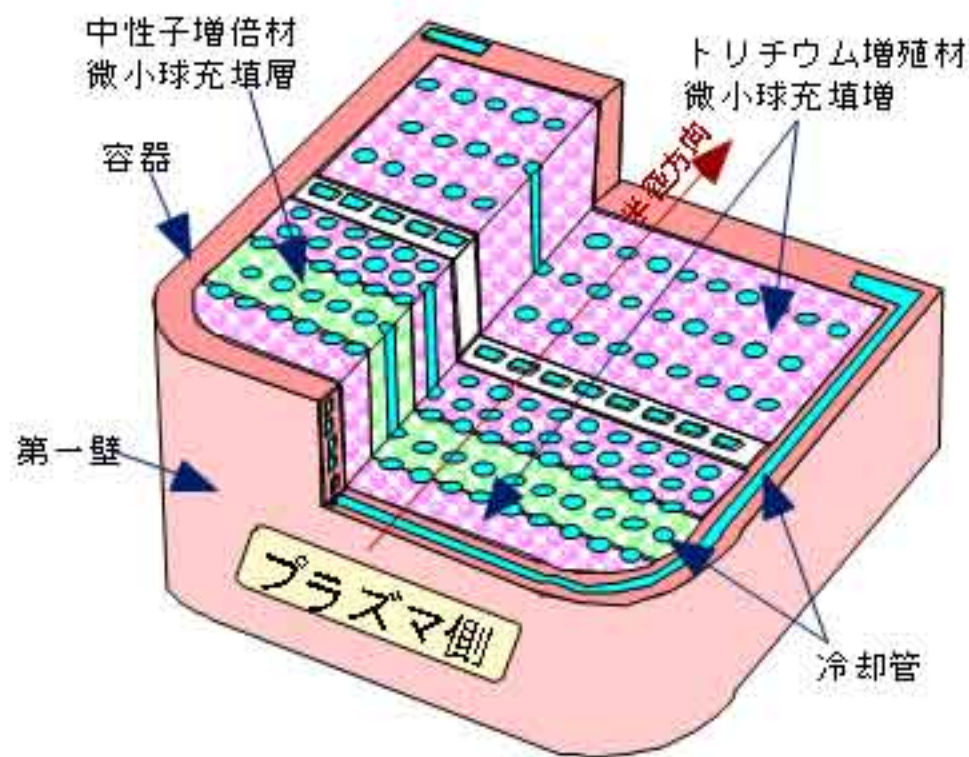
### (1) 基本的考え方

- ・ 発電実証プラントの目標とする性能を限定しない。  
→最低限の発電実証から経済性実証まで、幅広く.
- ・ 発電実証プラントの性能に応じて要素機器の開発目標を設定し、開発課題を抽出.

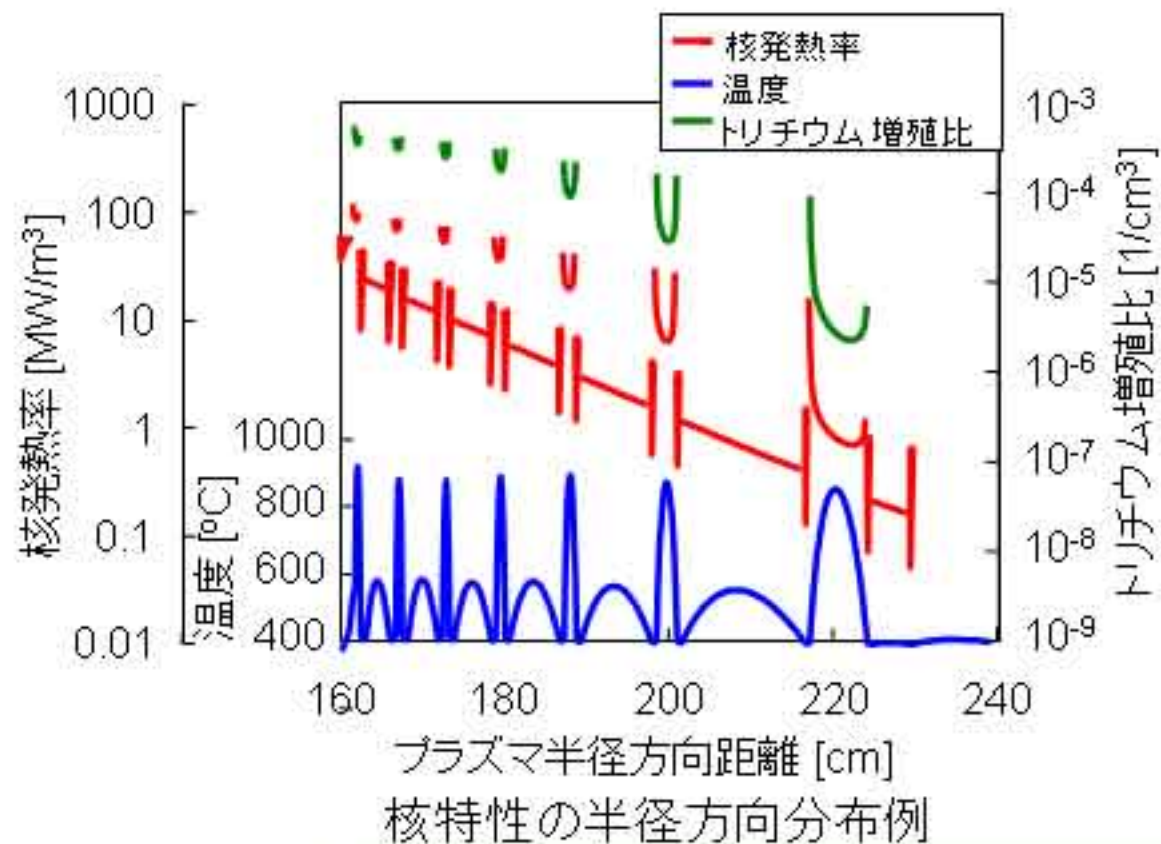
(例) 超電導磁石：13T目標，16T目標，20T目標

- ・ それぞれの目標に対し、開発は並行して行う.
- ・ 開発目標に応じたマイルストーンと判断の時期を設定.
- ・ 研究開発を、要素→組合わせ→炉外統合とスケールアップ.
- ・ プラズマを含めた最終統合試験となる発電実証プラントには、複数のブランケットシステムを装荷することが可能である.
- ・ 発電実証プラントと高性能要素機器開発を並行して進めることで、より魅力的な商用炉を開発することが可能.

# 核融合ブランケットの設計条件と期待される性能



発電ブランケット工学試験モジュール



核特性の半径方向分布例

## 代表的な境界条件 (仕様)

- (a) 表面熱負荷:  $1 \text{ MW/m}^2$
- (b) 中性子壁負荷:  $5 \text{ MW/m}^2$
- (c) 電磁力: 代表例  $8 \text{ MNm}$  (ジュール全体)
- (d) 運転モード: 準定常
- (e) 炉寿命:  $112.5 \text{ MWa/m}^2$  (30年)
- (f) BLK交換頻度: 2年毎以下 ( $7.5 \text{ MWa/m}^2$ 以上)
- (g) 保守性: 遠隔補修・交換が可能

+

## 代表的な設計条件 (制限条件)

- (a) 冷却材温度:  $280^\circ\text{C} < T_c < 510^\circ\text{C}$
- (b) 構造材温度:  $100^\circ\text{C} < T_s < 550^\circ\text{C}$
- (c) 増殖材温度:  $200^\circ\text{C} < T_b < 900^\circ\text{C}$
- (d) 増倍材温度:  $T_m < 550^\circ\text{C}$

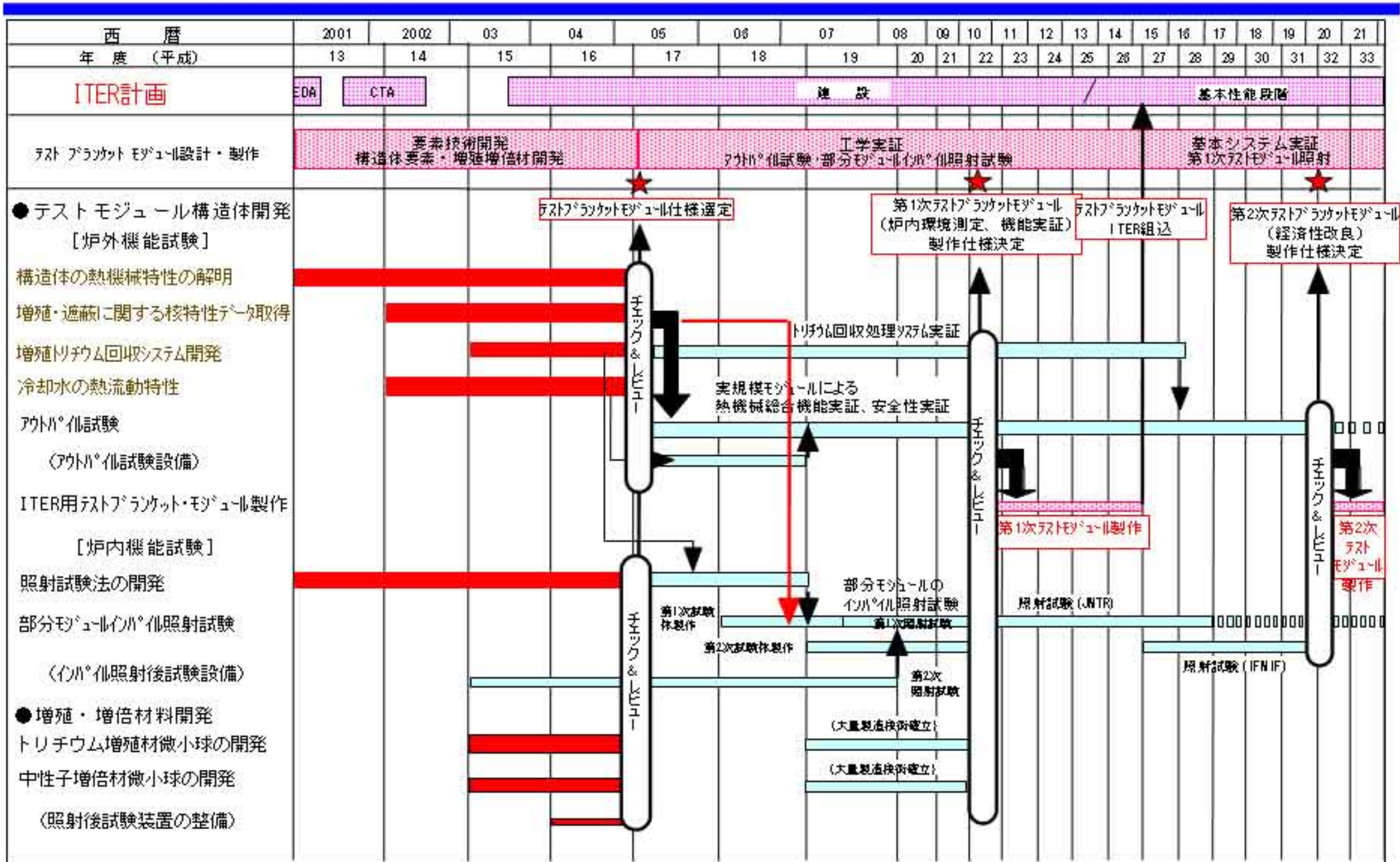
→

## 期待される性能 (目標)

- (a) トリチウム増殖 (回収) 性能:  $0.75 \text{ g(トリチウム)/day/ジュール}$
- (b) 除熱性能: 表面熱負荷  $1 \text{ MW/ジュール}$ 、体積発熱  $6.5 \text{ MW/ジュール}$  に耐えること。
- (c) 発電性能: エレクトロ変換効率  $> 34.5\%$
- (d) 遮蔽性能: 超伝導コイル核発熱量  $< 1 \text{ mW/cm}^3$ 、絶縁材線量  $< 10^7 \text{ Gy}$
- (e) 使用期間中の健全性維持: 75%以上の稼働率、2年以上の交換周期
- (f) 高い安全性
- (g) コスト:  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 程度の寸法の第一壁表面積のジュール構造で、製作費  $< 5 \text{ 千万円/ジュール}$

# ITERテストブランケット・モジュール開発計画

H14. 8. 27





# 核融合ブランケットの開発課題とR&Dの展開 - 全体概要

注:(1)本図は代表例として水冷却(PWR条件、超臨界圧水)の場合の展開を示す。  
 (2)矢印は代表的な展開のみを示す。また、一方向への展開だけでなくフィードバックがあり得る。

構造体の熱機械特性の解明

冷却水の熱流動特性の解明

増殖・増倍材微小球の製造技術開発

健全性・安全性・化学的環境効果

増殖トリチウム回収システムの開発

炉内照射特性の解明

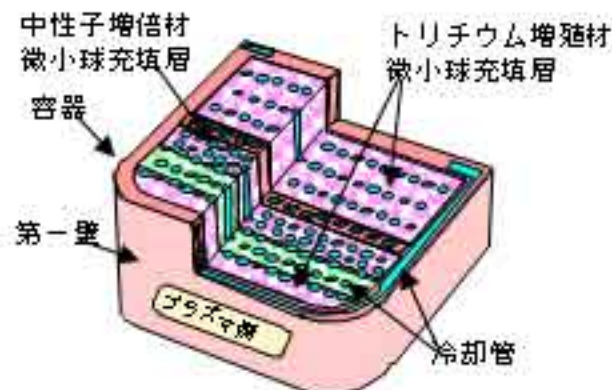
核特性データ取得

## 要素技術開発段階

要素試験  
(設計データ基本特性)

組合わせ試験

## 工学実証段階



発電ブランケット工学試験モジュール

微小球充填層の機械特性、充填特性

微小球充填層の熱特性

高熱負荷除去特性  
熱機械特性

冷却系の基本的な熱流動特性

微小球充填層の化学的環境効果

微小球製造技術開発

冷却水漏洩  
安全性基礎試験

冷却材による配管腐食特性

冷却水へのトリチウム透過特性

冷却材からのT回収基本特性

パーティガスからのT回収基本特性

照射下での微小球の基本特性、寿命評価

インパイル照射技術開発

トリチウム増殖中性子遮蔽核特性基礎試験

微小球充填層と容器の熱機械特性  
(化学的環境効果を含む)

冷却系管路網の熱流動特性  
超臨界圧水冷却ループ

微小球充填層と容器の安全性特性

冷却材からのT回収システム特性

パーティガスからのT回収システム特性  
TPL

部分モジュールインパイル照射特性

ブランケット体系の総合核特性  
FNS

実規模モジュールによる熱機械総合機能実証  
(寿命・裕度評価含む)

増殖・増倍材微小球大量製造技術確立

安全性総合実証

トリチウム回収処理システム総合機能実証

実機工学試験モジュール・システム

JMTR照射後試験設備

# H17年のC&R項目と目標値

## (1) 判定対象

ITER運転前半用テストブランケットモジュール第1次仕様選定(モジュール基本仕様選定)

## (2) 具体的な項目

- ・ITER運転前半で機能試験を実施するためのモジュールの基本構造や基本仕様を選定。
- ・テストブランケットモジュール製作に必要な炉外機能試験の実施のための試験装置、試験体の設計と試験計画を決定。

## (3) 目標値

熱機械特性: 増殖増倍材充填層の熱機械相互作用データが明らかとなっていること。

増殖遮蔽性能: 核特性のC/Eが20%以内で予測可能なこと。

トリウム回収システム: 1l/minの規模で原理実証されること。

冷却水伝熱流動特性: 単一流路で5m/sの流速に対して熱伝達係数が既存の実験式と同等以上であること。

# H22年のC&R項目と目標値

## (1) 判定対象

ITER運転前半用テストブランケットモジュール製作仕様決定  
(#1炉環境モジュール#2機能実証モジュール製作仕様決定)

## (2) 具体的な項目

- ・テストブランケットモジュールの製作に着手する。(発注仕様書を作成する)
- ・テストブランケットモジュールの予測性能・挙動、試験の詳細スケジュールを明らかにする。

## (3) 目標値

熱機械総合機能実証: 表面熱負荷 $0.25\text{MW/m}^2$ 、体積発熱率 $12.5\text{MW/m}^3$

冷却水流量  $320\text{ kg/分}$  の熱構造健全性、除熱実証

安全性総合実証: モジュール内圧力上昇 $0.5\text{MPa}$ 以下を維持すること。

インパイル照射試験:  $0.2\text{ g(T}_2\text{)}/\text{日}$ 以上のトリチウム生成回収機能実証

増殖増倍材微小球大量製造: 微小球充填層  $100\text{ l/年}$  (3年で2モジュール製作)

トリチウム回収システム総合機能: パージガス流量  $92\text{ l/分}$  規模でシステム実証。

(HT  $20\text{ppm}$ 、 $\text{H}_2$   $100\text{ppm}$ )

# H32年のC&R項目と目標値

## (1) 判定対象

経済性改良モジュール製作仕様決定。

## (2) 具体的内容

経済性改良モジュールの予測性能・挙動、試験の詳細スケジュールを明らかにする。

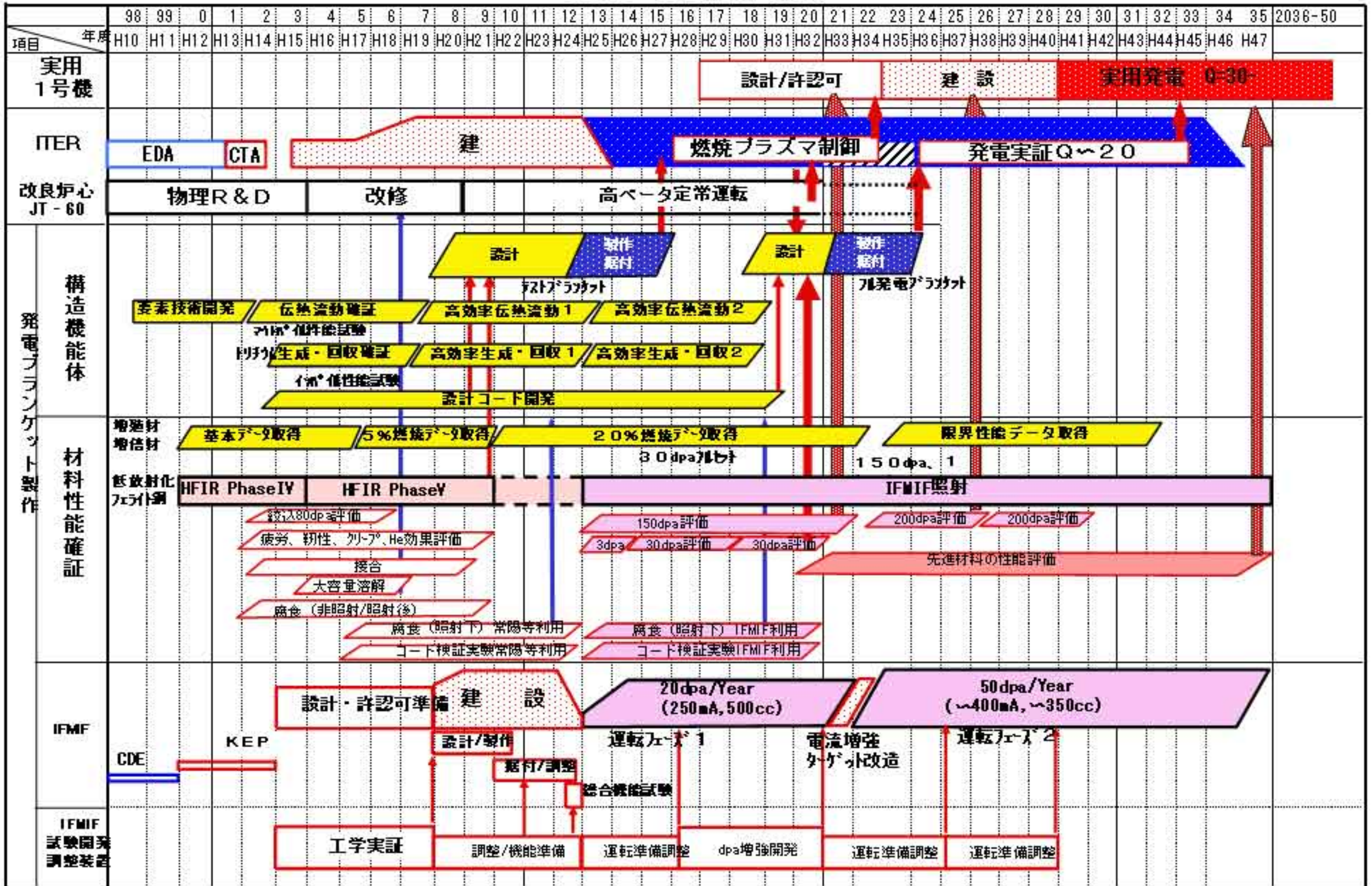
## (3) 目標値

熱機械総合機能実証: 表面熱負荷 $0.25\text{MW/m}^2$ 、体積発熱率 $12.5\text{MW/m}^3$   
超臨界圧水  $120\text{ kg/分}$ による除熱と熱構造健全性  
エネルギー変換効率 $43\%$ 以上を実証

安全性総合実証: 超臨界圧水漏洩に対して、モジュール内圧力上昇 $0.5\text{MPa}$   
以下を維持すること。

インパイル照射試験:  $0.2\text{ g(T}_2\text{)}/\text{日}$ 以上のトリチウム生成回収機能実証

# IFMIF増力計画案



实用  
1号機

ITER

改良炉心  
JT-60

発電  
ブランケット

材料性能  
確認

IFMIF

IFMIF  
試験開発  
調整装置

項目	98	99	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	2036-50
----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---------

# VNS Is to Carry Out Integrated Component Testing in High Duty Factor Fusion Operation (Abdou)



Next Step

- Test fusion **materials/blanket/divertor** in a reactor-relevant environment
- Obtain **lifetime data on materials** integrated in components
- Develop **component capabilities** at low extrapolation risks
- *Demonstrate operation of a safe, reliable, and environmentally attractive fusion system (Cheng et al.)*
- Fusion energy **components** encompass
  - \* Vacuum, heat and particle removal, plasma control
  - \* Radiation protection for components, personnel and public
  - \* Fuel production in closed cycle
  - \* Conversion of plasma output to useful *energy* and other products
- **VNS Performance Required**
  - \* 1-2 weeks continuous operation with  $W_L = 1-2 \text{ MW/m}^2$
  - \* total fluence = 4-6  $\text{MW-yr/m}^2$  over 10  $\text{m}^2$  in total testing area

*Italics added by presenter.*

# VNS Far Exceeds Point Neutron Source in Component Testing Capabilities (Abdou)



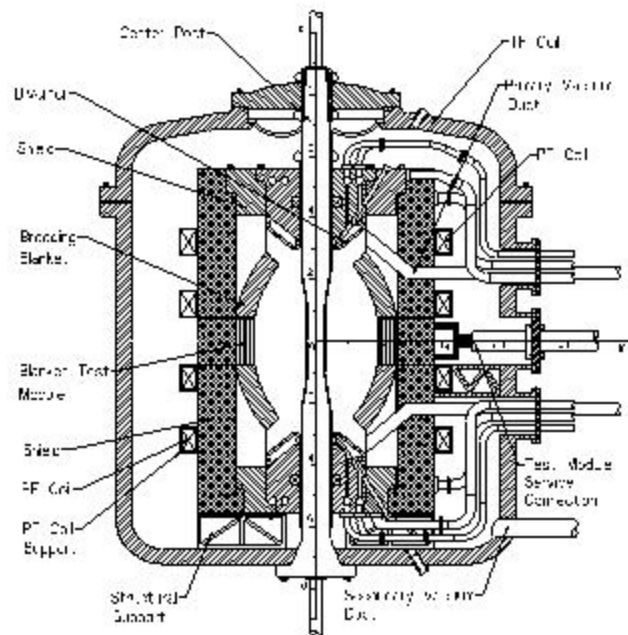
Next Step

Effects to be Tested	Volume Neutron Source	Point Neutron Source
<b>Neutron Effects</b> (radiation damage, tritium and helium production)	<b>Exact</b>	<b>Partial</b>
<b>Bulk Heating</b> (nuclear heating in significant volume)	<b>Yes</b>	<b>No</b>
<b>Non-Nuclear Effects</b> (magnetic field, surface heat and particle fluxes, mechanical forces)	<b>Yes</b>	<b>No</b>
<b>Thermal-Mechanical-Chemical-Electrical Interactions</b> (normal or otherwise)	<b>Yes</b>	<b>No</b>
<b>Integrated Synergy</b>	<b>Yes</b>	<b>No</b>
<b>Test Area/Volume</b>	<b>Adequate</b>	<b>Insufficient</b>
<b>Contribution to Broad Fusion R&amp;D</b>	<b>Yes</b>	<b>No</b>

# ST VNS Design Takes Advantage of Smaller, Simpler Fusion Core (Cheng et al., SBIR)



VNS



## Features

- ◆ Demountable, low-load **single-turn** center leg
- ◆ Modular design
- ◆ H<sub>2</sub>O cooled N/C TFC
- ◆ Combine VV with TFC return leg
- ◆ Remote maintenance for activated components
- ◆ Hands-on maintenance for the rest after shutdown
- ◆ Full access to test modules



# IFMIF計画開始時にVNSを 不採用にした経緯

- 1989—1992年に実施されたIEA/IFMIF-WG活動の結果、IFMIF計画に必要な強力中性子源として、D-Li加速器型を選択。
- 選択にあたり、VNSの各種方式について、中性子束、フルンス、照射体積、中性子束勾配、照射部への接近性、照射の連続性の面から評価し、ミラー磁場方式のビームプラズマ型が第一候補と判断しVNS以外の方式と比較。
- さらに、技術リスク等について検討を加えた結果、プラズマの閉込め等の原理的に解決すべき課題が多く、開発時間が予測できないため、10年以内での実現の可能性が低いとして不採用。