

第12回 核融合研究開発基本問題検討会

発電実証プラントの建設への移行条件について

(ITER及びその他の開発研究で達成すべき課題評価)

平成15年10月7日

日本原子力研究所 菊池 満

# 1. 段階的開発の進め方

実用化に至る技術目標の分割	
これまでの考え方	本検討会での考え
<p><b>実験炉段階：</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・自己点火</li> <li>・長時間燃焼</li> <li>・原型炉に必要な炉工学の基礎 (機器大型化、対中性子・熱総合試験、実験炉でのブランケット試験)</li> </ul> <p><b>原型炉段階：</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・定常炉心プラズマ(Q=30程度)の実現 (対向機器への入熱低減、受熱性能の向上、循環電力低減のためのプラズマ高性能化)</li> <li>・耐中性子材料の開発と 発電用ブランケットの実証</li> <li>・発電実証</li> </ul> <p><b>実証炉段階：</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・稼働率・設備利用率の向上</li> <li>・エネルギー効率の向上</li> <li>・経済性実証</li> </ul>	<p><b>実験炉段階：</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・実験炉による研究開発 <ul style="list-style-type: none"> <li>・自己点火、長時間燃焼、完全非誘導運転</li> <li>・実験炉建設・運転による統合化技術の取得</li> </ul> </li> <li>・発電実証プラントの基盤形成 <ul style="list-style-type: none"> <li>・炉心プラズマ分野： <ul style="list-style-type: none"> <li>高ベータ定常運転法 (配位・制御改良) <math>3.5 \leq \beta_N \leq 5.5</math></li> <li>対向機器試験 (ブランケット、ダイバータ)</li> </ul> </li> <li>・炉工学分野： <ul style="list-style-type: none"> <li>材料照射試験施設の建設・材料データ取得80dpa以上</li> <li>発電ブランケット開発と実験炉での試験</li> <li>超伝導磁石、加熱機器技術の高度化</li> <li>安全性研究</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul> <p>システム：実用化を見通す発電プラント概念の形成</p> <p><b>発電実証プラント段階：</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・発電実証プラント機器開発と発電実証プラントでの低循環電力定常発電と系統投入試験</li> <li>・実用化研究 <ul style="list-style-type: none"> <li>炉心&amp;炉工統合分野： <ul style="list-style-type: none"> <li>高出力密度実証試験</li> <li>高設備利用率・運転信頼性実証試験</li> </ul> </li> <li>炉工学分野： <ul style="list-style-type: none"> <li>高熱効率ブランケット開発試験</li> <li>耐高中性子照射材料の開発試験</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>

## 2. 実験炉段階の技術目標

### ○実験炉による研究開発

- ・自己点火領域（ $Q=20$ 程度以上）、長時間燃焼（1000秒程度以上）、完全非誘導運転（同上）を実現し、数十万kWの核融合エネルギー生成制御技術を確立
- ・実験炉建設・運転による統合化技術の取得

### ○発電実証プラントの基盤形成

- ・炉心プラズマ分野：
  - 高ベータ定常運転法（配位・制御改良）
  - 高規格化ベータ値（ $3.5 \leq \beta_N \leq 5.5$ ）の非誘導長時間維持
  - 対向材料試験（ブランケット構造材、ダイバータ材）
- ・炉工学分野：
  - 材料照射試験施設の建設・材料データ取得（80dpa以上）
  - 発電ブランケット開発と実験炉での試験
  - 超伝導磁石、加熱機器技術の高度化
  - 安全性研究
- ・システム：
  - 実用化を見通す発電プラント概念の形成

### 3. 実験炉による開発研究

○実験炉を用いて、

- (1) 自己点火領域 ( $Q=20$ 程度以上)
- (2) 長時間燃焼 (1000秒程度以上)
- (3) 完全非誘導運転 (同上)

を実現し、数十万kWの核融合エネルギー生成制御技術を確立する。

注：(1)及び(2)は、これまでの第三段階計画の技術目標と一致。

(3)は、定常運転を発電実証プラントの運転モードの基本とすることから追加。  
ITERでは $Q \geq 5$ を狙うとしているが達成は確実でないとしている。

○実験炉建設・運転による統合化技術の取得

超伝導、炉構造機器、プラズマ対向機器、加熱・電流駆動装置、トリチウム等燃料循環系、遠隔保守装置等で構成される実験炉の建設・運転により核融合炉に不可欠な統合化技術を確立する。

# ITERにおける非誘導運転の検討例

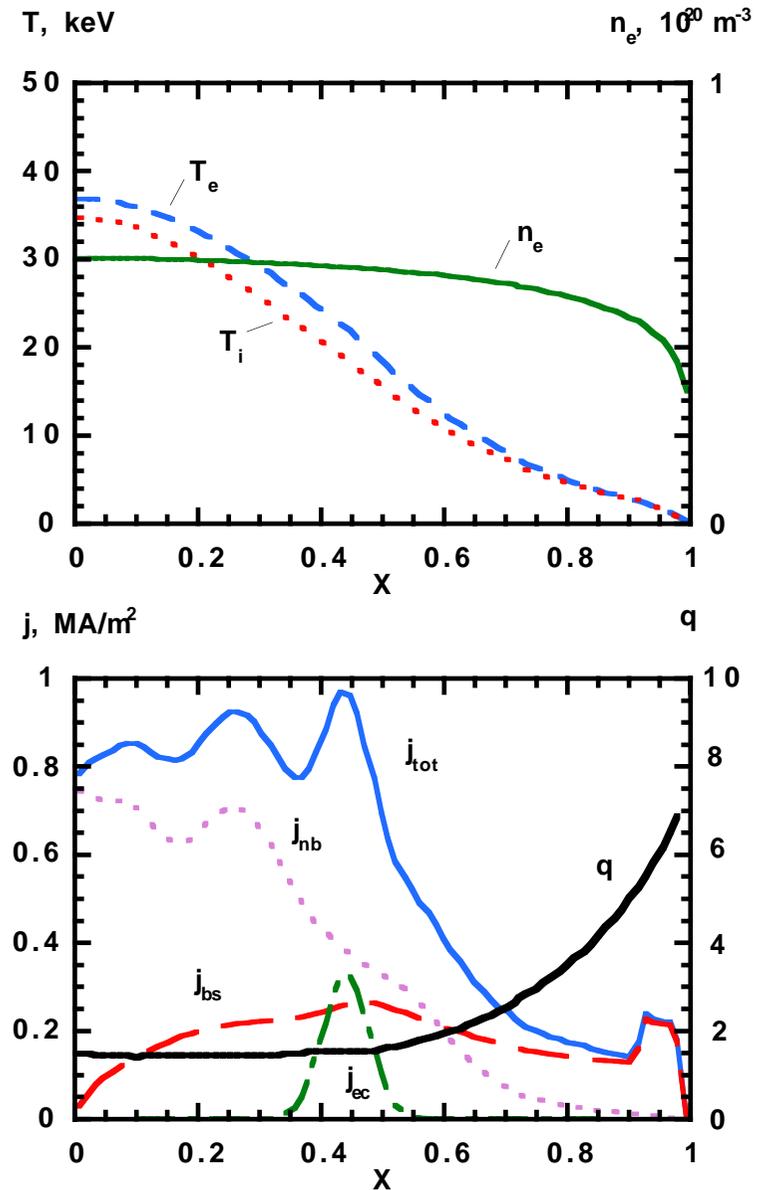
Alexei Polevoi (ロシア) 氏による評価 (Private Communication)

別添 2 参照

資料検第8-1-1号 23ページに記載した定常運転シナリオは、現在政府間交渉で調達配分を議論しているパッケージに入っていないLHRFの追加を仮定したシナリオである。

国際チームの物理部門 (部門長: 嶋田道也氏) のA. Polevoi氏の検討によると、閉じ込め改善度HH=1.5が得られ、高効率ヘリウム排気ができる場合には、現在の調達パッケージを用い以下のパラメータでQ=5定常運転が得られる可能性がある。

プラズマ電流	$I_p$	9MA
トロイダル磁場	$B_t$	5.175T
主半径	$R$	6.35m
小半径	$a$	1.87m
楕円度	$\kappa a$	1.9
三角度	$\delta a$	0.5
密度 ( $10^{19}m^{-3}$ )	$\langle n_e \rangle$	5.3
Greenwald因子	$\bar{n}/n_G$	0.67
自発電流割合	$I_{bs}/I_p$	0.44
規格化ベータ値	$\beta_N$	2.73
ヘリウム割合	$\langle n_{He} \rangle / \langle n_e \rangle$	1.3%
$q(0)/q_{min}$		1.5/1.4
閉じ込め改善度	HHy2	1.52
加熱パワー	PNBI	33MW
	PEC	20MW



## 4. 発電実証プラントの基盤形成

炉心プラズマ分野：

高ベータ定常運転法（配位・制御改良）の確立

数値目標：非誘導法により高規格化ベータ値 ( $3.5 \leq \beta N \leq 5.5$ )  
のプラズマを長時間維持する

対向材料試験（ブランケット構造材、ダイバータ材）

発電実証プラントでは、放射化の低減も考慮して実験炉と異なる第1壁構造材（例：低放射化フェライト鋼）やダイバータ材料を用いる。  
この対向材料環境下で高性能プラズマが保持できることを実証。

炉工学分野：（詳細は別添1）

材料照射試験施設の建設・材料データ取得（80dpa以上）

発電ブランケット開発と実験炉での試験

超伝導磁石、加熱機器技術の高度化

安全性研究

システム：実用化を見通す発電プラント概念の形成

## 5. 発電実証プラント段階への移行の判断基準

1. 実験炉による開発研究で掲げた技術目標は達成されたか？  
(自己点火、長時間燃焼、完全非誘導電流駆動、統合化技術)
2. 発電実証プラントの基礎形成で掲げた技術目標は達成されたか？  
(非誘導  $3.5 \leq \beta_N \leq 5.5$  の維持、IFMIF80dpaデータ取得、他)
3. 実用化を見通す発電プラント概念の物理、工学的基盤は十分か？  
(産業界を含めた評価)

## 別添1 炉工学分野での移行時判断基準検討例（案）

装置・システム	試験及び判断項目	判断基準（達成内容）	達成時期
ITER	システム統合	大型超伝導コイル等の炉構造機器、遠隔保守技術、加熱・電流駆動装置、トリチウム燃料循環・取扱技術などの装置・機器の統合・集約化技術基盤の確立。	~2020
ブランケット	要素技術開発	ブランケット容器製作技術開発、充填層の熱・機械特性把握、微小球製作技術開発	2005
	炉内・炉外工学試験	表面熱負荷0.25MW/m <sup>2</sup> 、体積発熱率12.5MW/m <sup>3</sup> 下でのモジュールの熱構造健全性と除熱性能の実証	~2010
		増殖材（20%- <sup>6</sup> Li燃焼度）、増倍材（5000appmHe生成）の照射データ取得。原子炉を用いた炉内機能試験による微小球充填体の熱特性やトリチウム生成・回収特性（約0.1ミリモル/日）の実証。	~2010
	性能確証試験	ITERテストモジュールのプロトタイプを用いた総合性能実証（総除熱量約1MWレベル。安全性試験を含む。）	~2015
		増殖・増倍材の重照射試験で材料を決定	~2015
	発電・増殖総合機能実証	ITER（フルエンス0.03Mwa/m <sup>2</sup> ）の核融合環境下におけるテストモジュールの機能実証（熱・機械健全性の実証、トリチウム生成・回収特性（約65モル/日）の実証、局所トリチウム増殖率1.1以上の実証（発電実証プラントのブランケット配置で局所トリチウム増殖率1.5、プラント全体のトリチウム増殖比1.05以上に相当）、最大1MWレベルの発電実証	~2020
経済性改良試験	超臨界圧水（25MPa, 280-510℃）による除熱と熱構造健全性実証、熱効率43%以上の熱の取り出し技術を実証	~2025	
	先進トリチウム増殖材料及び先進中性子増倍材の微小球開発	~2025	
材料	低放射化フェライト鋼 原子炉照射&製造	化学組成及び熱処理の選定（<50dpa&500appmHe）	2005
		同上（>80dpa&800appmHe）、及び耐食性向上等（<50dpa）。 照射効果に関する知識・データベース構築、モデル構造物照射（<25dpa）。 発電実証プラント用低放射化製鋼プラント開発。	~2010 ~2015
	SiC/SiC複合材料 原子炉照射&製造	構造設計手法、知識・データベースを構築、モデル構造物照射（<50dpa）	~2020
		製造法選定。破壊靱性等のデータ取得（>50dpa）。接合法等開発。 基本コンポーネント製造法開発。破壊靱性等のデータ取得（>80dpa）。 低放射化製造プラント開発。モデル構造物照射（<50dpa）等。	~2010 ~2015 ~2020
	IFMIF 照射試験	IFMIF建設。運転開始（~2017） 核融合近似中性子による原子炉照射データ確認（>80dpa）等	~2015 ~2020
超伝導	線材選択 Nb3Al	16-17 T、電流密度1,000A/mm <sup>2</sup> （4.5K）、線材の大量生産技術の確立	~2015
		高温超伝導材	20 T、電流密度1,000A/mm <sup>2</sup> （4.5K）、100kA級導体の製作と性能実証
	大型コイル化	線材、導体の量産。実規模大のコイルを製作し定格性能の実証	~2020
加熱・電流駆動	NBI 加速方式の選定	静電方式~2MV技術/高周波四重極（RFQ）方式~0.3A	~2015
		要素統合性能の確認	1.5-2MeV, ~1A ビーム
	RF 300GHzジャイラトロン	500 kW, 1 s	~2015
		300 GHz帯, 1 MW, >10 s, 効率60%（エネルギー回収）	~2020
300GHz先進アンテナ	300 GHz帯, 1 MW	~2020	

注：上記の達成には所要の研究資源が必要である。

## 別添 2

JT-60におけるITER定常運転「弱正磁気シア～平坦磁気シア」シナリオの実証  
4ページのITER Q=5条件のHH=1.5はJT-60においてほぼ実現されている。

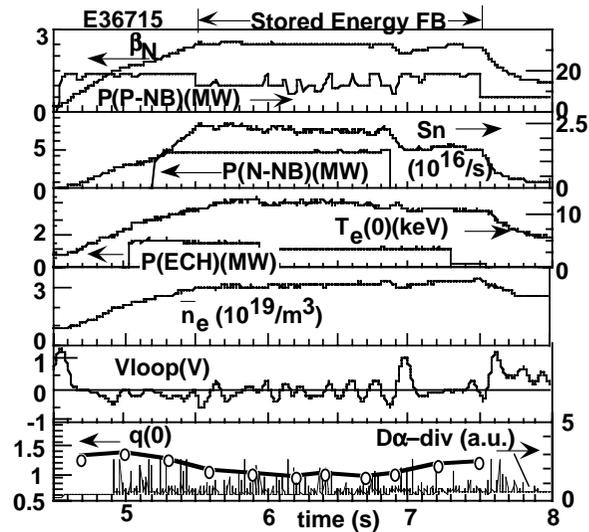


図 1 正弱磁気シアで、  
閉じ込め改善度(HHファクター) =1.4  
規格化ベータ値=2.5  
(安全係数=4.8)  
中性粒子ビーム電流駆動+自発電流  
による完全非誘導電流駆動を達成。

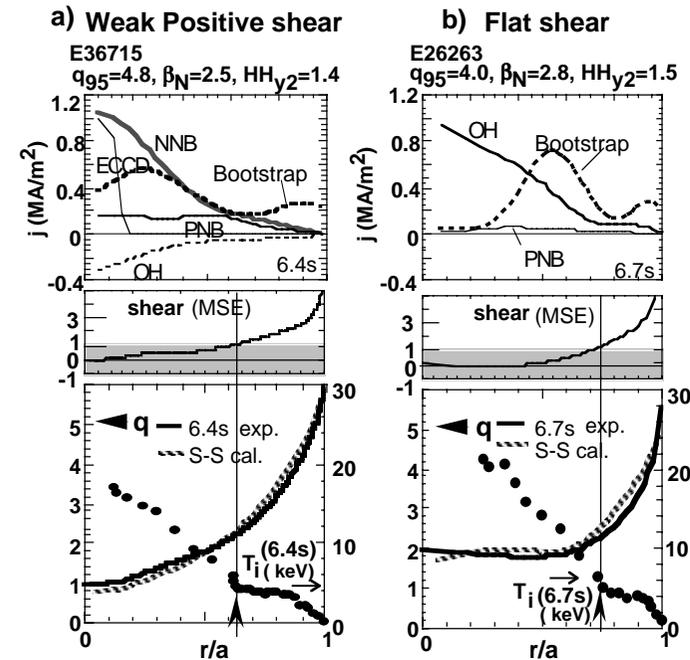


図 2 : (a)は図 1 の放電（正弱磁気  
シア）での電流、安全係数、電流  
の分布。(b)は、平坦磁気シア  
(HH=1.5)での分布。

参考文献 : Y.Kamada et al., Nuclear Fusion 41 (2001) 1311