

発電実証のさらなる前倒しの可能性 ～原型炉プランDの改定更新～

量子科学技術研究開発機構
核融合炉システム研究グループ

坂 本 宜 照

- 令和4年には、第1回中間チェック・アンド・レビュー (CR1)での指摘を受けて、アクションプランに沿ったJT-60SA及びITERから原型炉への統合戦略を基に、運転開発期の目標を設定することで原型炉による発電実証の5年程度の前倒しが検討された。
 - 第1期：ITERからの技術ギャップが小さい『低出力&パルス運転』による早期発電実証（BLK発電の早期実証）
 - 第2期：商用炉段階に向けた『定格出力&連続運転』による発電実証
- 近年、各国政府は2030年代の早期発電実証に向けた政策を打ち出しているが、我が国においてもフュージョンエネルギー・イノベーション戦略が策定されて以降、フュージョンエネルギーによる2030年代の発電実証に向けて、様々な取組みが展開されているところ。
- 今回、政府主導で『原型炉による発電実証のさらなる前倒し』を行うことは、スタートアップを含む産業界の取組をも後押し、フュージョンエネルギーの社会実装に向けて我が国の技術的優位性を確保することに繋がるものである。



設計方針：技術的に見通しうる原型炉概念

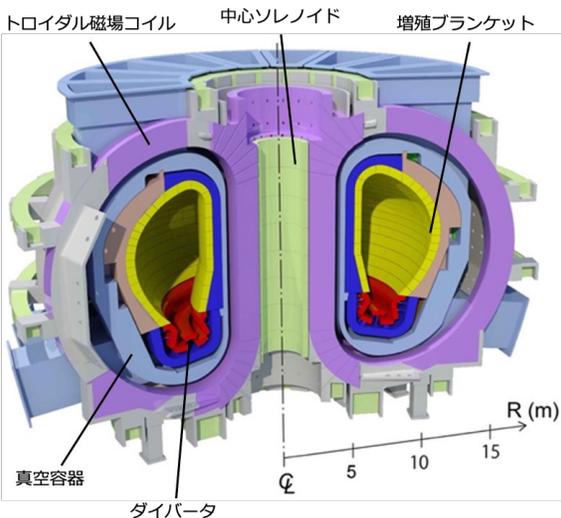
- 主要機器であるトロイダル磁場コイル、増殖ブランケット、ダイバータについては、ITER技術基盤の延長に概念を構築
- ITERにない技術については、産業界の発電プラント技術及び運転経験並びに大学等による未踏技術の解決策を取り入れた概念を構築
- 炉心プラズマについては、ITER及びJT-60SAの想定成果に基づいた概念を構築

核融合科学技術委員会の提示した原型炉の目標

- ① 数十万kWの電気出力
- ② 実用に供し得る稼働率
- ③ 燃料の自己充足性

に見通しを得る基本概念を構築

基本パラメータ



主半径：8.5m
 小半径：2.42m
 核融合出力：1.5GW
 発電端出力：0.64GW

中心トロイダル磁場：6T
 プラズマ電流：12.3MA
 加熱入力：< 100MW
 規格化ベータ値：3.4
 規格化密度： $n_e/n_{GW}=1.2$
 閉じ込め改善度：1.3

冷却水：PWR条件
 稼働率：～70%
 運転方式：定常運転
 三重水素増殖比：1.05

概念の特徴

- 誘導電流駆動によるIp立ち上げ： $R_p=8.5m$
- ダイバータ熱負荷低減： $P_{fus}=1.5GW$
- 運転柔軟性：定常運転&パルス運転
 - ✓ 高密度・非接触プラズマとの整合性の観点から、定格のIpでパルス運転
→十分なCS磁束を確保
 - ✓ プラズマ性能要求を緩和（ベータ値、閉じ込め改善度）したパルス運転
→初期の調整運転
→早期の発電実証

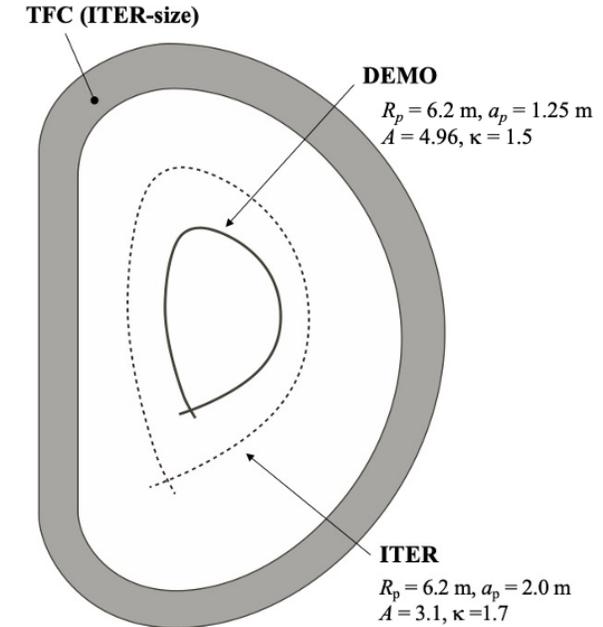
	パラメータ	定常	パルス
Size & Configuration	R_p (m) / a_p (m)	8.5 / 2.42	
	A	3.5	
	k_{95}	1.65	
	q_{95}	4.1	
	I_p (MA)	12.3	
	B_T (T)	5.94	
	Absolute Performance	P_{fus} (GW)	～1.5
P_{gross} (GWe)		～0.5	～0.3
Q		17.5	13
P_{ADD} (MW)		～83.7	
n_e ($10^{19}m^{-3}$)		6.6	
Normalized Performance	HH_{98y2}	1.31	1.13
	β_N	3.4	2.6
	f_{BS}	0.61	0.46
	f_{CD}	0.39	0.32
	n_e/n_{GW}	1.2	

- 前倒しを行うためには、建設の早期着手と建設期間の短縮が必要である。
- 実験炉ITERの建設経験を踏まえると、ITERよりも大型化しているJA DEMOの建設工期を短縮するのは容易ではない。特に、トロイダル磁場コイルは既存の大型装置で加工できないだけでなく輸送が困難なために、原型炉建設サイト内で製作する必要がある。
- そこで、令和4年にタスクフォースが示した原型炉計画をさらに前倒しするには、トロイダル磁場コイルの製作実績があること及び燃焼プラズマ（高エネルギー増倍率）を見通せることからITERサイズを最大（同一）とする原型炉において、運転開発フェーズの目標を設定し、まず早期に発電を実証し、その後段階的に機器を改良することで、商用化を見据えた技術開発を行うアプローチが考えられる。
- また、早期発電実証に必要なR&Dを先行して実施し建設に着手し、定期交換する炉内機器（ブランケットやダイバータ）の高性能化や加熱装置（NBI, EC）の定常化・高効率化に関するR&Dを建設と並行して行うことが前倒しに有効である。なお、これらは社会実装に向けて原型炉計画と並行して開発すべき技術であり、民間活用も導入することで核融合機器産業や核融合発電産業への展開を見込むべき。
- 第36回TF会合において、ITERサイズのトロイダル磁場コイルや真空容器に増殖ブランケットを導入した場合の発電規模（プランB）や、多段階で改造する計画案（プランD）を報告した。
- 本日は、これらの改定更新について報告する。

- ITERサイズの原型炉により発電を2030年代に実証
 - ✓ ITERと同じ炉心機器 → 設計、R&D、試作等を大幅に簡略化
 - ✓ 機器製作（ITER調達）、統合化技術（JT-60SA建設） → 日本の優れた技術力
 - ✓ 核融合科学技術委員会の提示した原型炉の目標を達成するために必要な技術を原型炉建設と並行して開発 → 戦略的R&D
- 「発電実証」の目安は、発電のために消費する電力を賄う／上回る発電端出力（正味電力 $> \sim 0$ ）
 - ✓ 設備の高効率化に必要な技術開発も並行して実施 → 商用炉段階に正味電力を増大
- 多段階の運転開発期の目標を設定し、機器を段階的に改良することでプラント規模の発電を目指す
 - ✓ 同じ装置で複数の役割を担う → リソースを合理化
- 商用炉に必要な新技術をも原型炉建設に並行して開発、後期に導入することで性能を段階的に向上
 - ✓ 商用化への技術ギャップを最小化 → 早期の社会実装

建設に最短
で着手

- さらなる前倒しのため製作実績のあるITERと同一のトロイダル磁場コイル(TFC) を想定
- 原型炉と同等の増殖ブランケット(0.5m)&遮蔽領域(0.6m)を確保した場合、プラズマ断面はITERよりも大幅に小さく、JA DEMOで想定するプラズマ性能を仮定しても、発電端出力 $P_{gross} < 100$ MWは得られるものの正味電力 $P_{net} < 0$ となる。



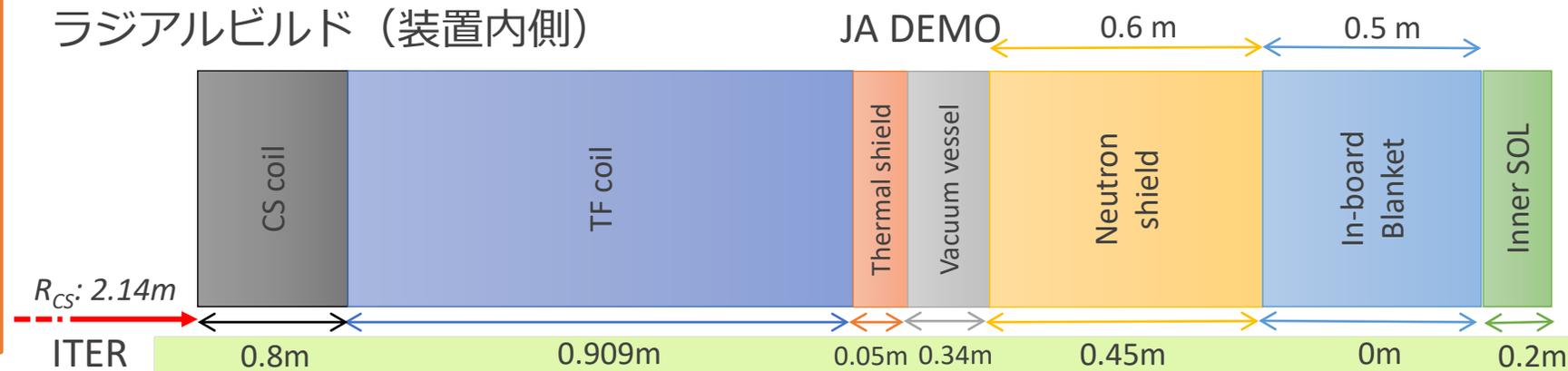
正味電力を得るためには以下の方策がある。

- 増殖領域を~0.2m薄くすると、 $P_{gross} \sim 100$ MW, $P_{net} > 0$ に見通し
 - ✓ TBRの12%減少とのトレードオフ
- さらに遮蔽領域を~0.2m薄くすると、 $P_{gross} \sim 200$ MW, $P_{net} > 50$ MWに見通し
 - ✓ TFC絶縁材の寿命とのトレードオフ
- あるいはITER遮蔽ブランケットと同サイズの発電ブランケットを設置

正味電力ゼロを当初目指しつつ、その後ITERやJT-60SAに加え各種R&Dの成果を踏まえ、フュージョンエネルギーによる100MWクラスの発電実証を目標として定めることには十分な意義があるのではないかと。

(正味電力はプラズマ性能向上やシステム効率の改善で増大可能)

ラジアルビルド (装置内側)



	第1期 システム統合運転期 (発電実証)	第2期 BLK機能試験期 (+燃料増殖実証)	第3期 拡張運転期 (+定常運転実証)	第4期 (オプション) 社会実装に向けた開発期
目標の概要	<ul style="list-style-type: none"> 短パルス運転 (数分) 発電端出力 > 200MW 正味電力 ~ 0 	<ul style="list-style-type: none"> 長パルス運転 (数時間) 正味電力 > ~0 三重水素自己充足性の確認 保守シナリオの確認 	<ul style="list-style-type: none"> 定常運転 正味電力 > 0 (~100MW) 三重水素自己充足性の実証 保守シナリオの確認 	<ul style="list-style-type: none"> フュージョンエネルギーの多面的な活用による社会実装に向けた開発
装置仕様	<p><u>発電実証:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ITERベースラインシナリオ <ul style="list-style-type: none"> ✓ 核融合出力: 500MW ✓ Q値: 10 ✓ パルス幅: ~400秒 発電ブランケット <ul style="list-style-type: none"> ✓ ITER遮蔽ブランケットと同サイズ 加熱・電流駆動装置 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 電子サイクロトロン加熱のみ 	<p><u>発電実証:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> JA DEMOシナリオ 核融合出力: ~500MW Q値: ~10 加熱・電流駆動装置 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 電子サイクロトロン加熱 / 中性粒子ビーム加熱 蓄熱システム (オプション) <p><u>燃料増殖実証:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> JA DEMO増殖ブランケット ブランケット占有領域増大 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 計測器合理化 ✓ ダイバータ小型化 <p><u>保守シナリオの確認:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> 多段階運転期の移行時に遠隔操舵でのブランケット交換手順・時間の確認 	<p><u>発電実証:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> JT-60SAシナリオ 核融合出力: >500MW 加熱・電流駆動装置の高効率化 <p><u>燃料増殖実証:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> 改良型増殖ブランケット <p><u>保守シナリオの確認:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> 多段階運転期の移行時に遠隔操舵でのブランケット交換手順・時間の確認 	<ul style="list-style-type: none"> 先進ブランケット (例: 高温) 先進ダイバータ (例: 液体金属) 水素製造 無尽蔵核融合エネルギーステーション (海水Li回収を併設)

		参照：ITER (ベースライン)	第1期 (初期運転)	第1期 (発電実証)
サイズ、配位	R_p / a_p (m)	6.2 / 2.0	6.2 / 2.0	6.2 / 2.0
	A	3.1	3.02	3.1
	k_{95}	1.7	1.7	1.7
	q_{95}	~3.0	4.48	3.0
	I_p (MA)	15	10.02	14.96
	B_T (T)	5.3	5.29	5.29
	Pulse width	-	21min	337sec
核融合性能	P_{fus} (MW)	400-500	201	492
	Q	10	5	10
	P_{net} (MWe)	-	-54.0	7.31
	P_{gross} (MW)	-	81.6	188
	P_{ADD} (MW)	40-50	40.2	49.2
プラズマ性能	f_{BS} (%)	15	29.8	21.7
	n_e ($10^{19}m^{-3}$)	10	7.7	9.95
	HH_{98y2}	1	1.22	0.95
	β_N	1.8	1.8	1.8
	n_e/n_{GW}	0.85	1.00	0.85

基本仕様

- ITERベースラインシナリオ
- ITER遮蔽ブランケットと同サイズの発電ブランケット
- 電子サイクロトロン加熱のみ

強磁場化オプション

- TFコイル設計応力増 (667MPa → 800MPa) および TF導体を高電流密度化 (68kA → 83kA) : 0.35T程度の強磁場化で P_{net} の増加は 16MW

燃料生産オプション

- 発電ブランケット (厚さ0.45m)に燃料生産のための材料を装荷することで三重水素の生産が可能
 - ✓ TBR=0.75 (増殖領域0.2m、遮蔽領域0.25m)
 - ✓ TBR=0.84 (増殖領域0.25m、遮蔽領域0.2m)

TBR：三重水素増殖比

小型化オプション

- 主半径 R_p を6.2m → 5.8m : パルス幅100秒程度で $P_{net} \sim 0$ 実証 (プラズマ性能向上 : $\beta_N \sim 2.3$, $HH \sim 1.2$)

		第2期 (+燃料増殖実証)	第3期 (+定常運転実証)
サイズ、配位	R_p / a_p (m)	6.2 / 1.65	6.2 / 1.65
	A	3.76	3.76
	K_{95}	1.7	1.7
	q_{95}	4.0	3.68
	I_p (MA)	7.36	8.0
	B_T (T)	5.29	5.29
	Pulse width	3.98 hrs	S.S.
核融合性能	P_{fus} (MW)	510	820
	Q	10	14.4
	P_{net} (MWe)	9.3	82.5
	P_{gross} (MW)	195	307
	P_{ADD} (MW)	51.0	56.8
プラズマ性能	f_{BS} (%)	58.9	68.9
	n_e ($10^{19}m^{-3}$)	8.9	9.74
	HH_{98y2}	1.41	1.50
	β_N	3.4	4.3
	n_e/n_{GW}	1.19	1.20
BLK	Breeding / shielding zone	0.5 / 0.35	0.5 / 0.35
	Net TBR	1.05	1.05

第2期の基本仕様

- JA DEMOシナリオをベース
- 増殖ブランケット (JA DEMOから遮蔽領域を縮小)
- 電子サイクロトロン加熱と中性粒子ビーム加熱を併用

第3期の基本仕様

- JT-60SAシナリオをベース
- 改良型増殖ブランケット：小型化により $P_{net} \sim 100MW$
- 加熱・電流駆動装置の高効率化

第2期グリッド送電オプション

- 数時間のパルス運転を行う第2期において蓄熱システムを導入することで、定常グリッド送電を実証
- 蓄熱システムを導入により、第4期でのフュージョンエネルギーの多面的な活用への利用も想定

正味電力ゼロによる発電実証と燃料自己充足性を目標としつつ、その後、ITERやJT-60SAに加え各種R&Dの成果を踏まえ、フュージョンエネルギーによる正味電力100MWクラスの発電実証を目指すことには十分な意義があるのではないかと期待される。

ご清聴、有難うございました。



原型炉設計合同特別チーム
第18回全体会合
令和6年8月22-23日