

「発電実証のさらなる前倒しの可能性」 について

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の実施時期の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による2030年代の発電実証に向けて、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、様々な取組みが展開されているところ。
- 政府主導で『原型炉による発電時期のさらなる前倒し』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

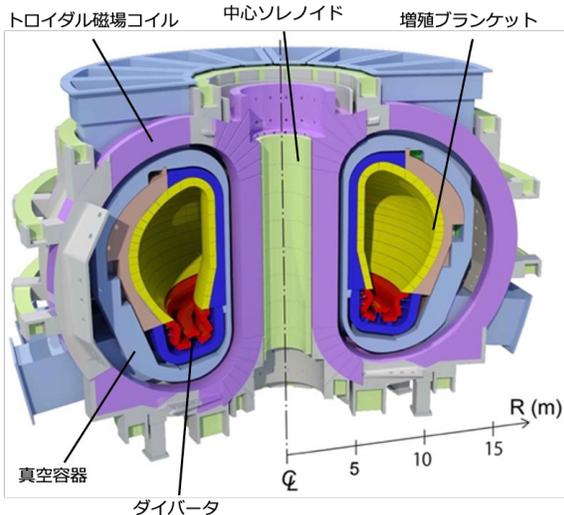
- 主要機器であるトロイダル磁場コイル、増殖ブランケット、ダイバータについては、ITER技術基盤の延長に概念を構築
- ITERにない技術については、産業界の発電プラント技術及び運転経験並びに大学等による未踏技術の解決策を取り入れた概念を構築
- 炉心プラズマについては、ITER及びJT-60SAの想定成果に基づいた概念を構築

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	

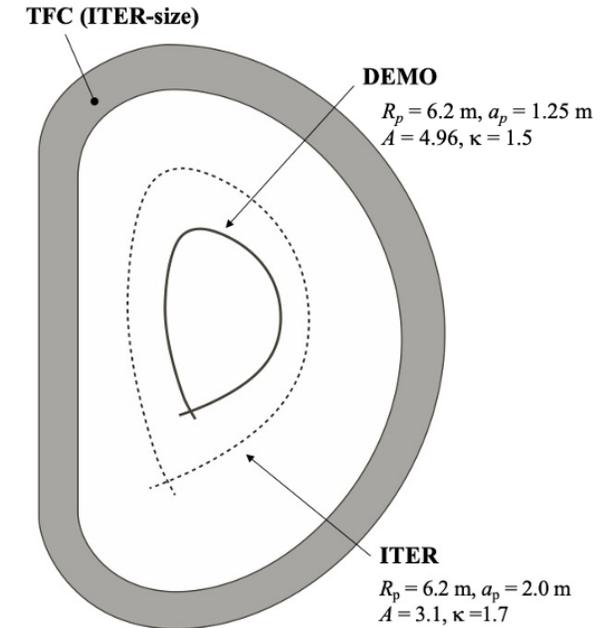
実験炉ITERの建設経験を踏まえると、ITERよりも大型化しているJA DEMOの建設工期を短縮するのは容易ではない。特に、トロイダル磁場コイルは既存の大型装置で加工できないだけでなく輸送が困難なために、原型炉建設サイト内で製作する必要がある。

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烧プラズマ（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）とする原型炉により小規模な発電を実証しつつ、運転開発フェーズの目標を設定し、それに合わせて段階的に機器を改良することでプラント規模の発電を実証するアプローチが考えられる。

また、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よりも早期発電実証に必要なR&Dに重点化することも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。

ここでは、原型炉目標の見直しの議論に資するため、ITERと同じサイズのトロイダル磁場コイルや真空容器に、JA DEMOで設計が進められている増殖ブランケットを導入した場合に、どの程度の発電規模が見込まれるか検討する。

- 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。



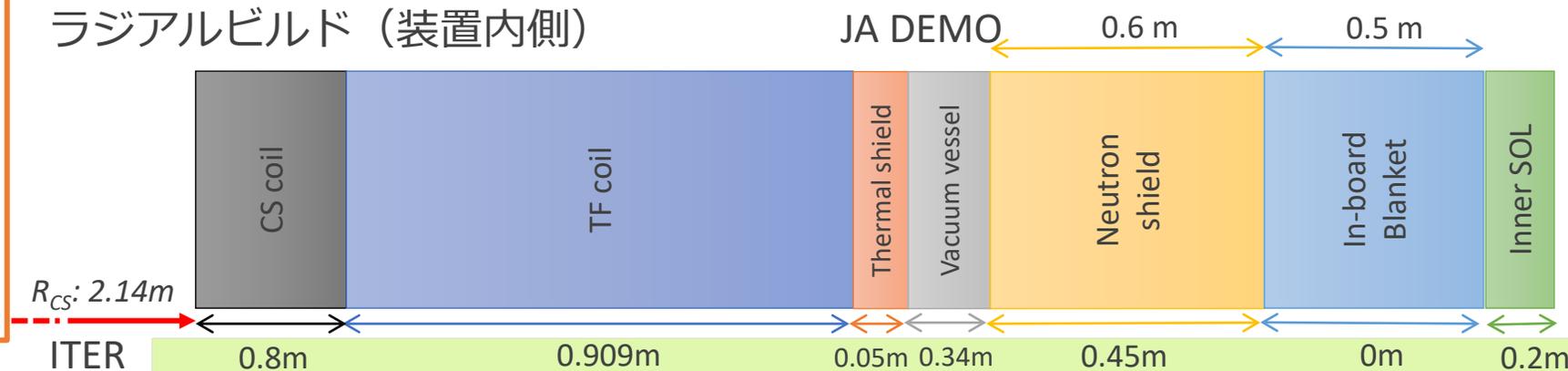
正味電力を得るためには以下の改良がある。

- 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
- また、TFCの設計応力、導体設計歪の改善を設計に見込むことで発電規模を増大できる。

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)



運転開発期の目標（仮）に合わせた主要機器の段階的なアップグレード

	第1期	第2期	第3期
目標の概要（仮）	<ul style="list-style-type: none"> 短パルス運転 正味電力 < 0 (発電端出力 > 0) 	<ul style="list-style-type: none"> 長パルス運転 正味電力 ~ 0 三重水素増殖比の確認 	<ul style="list-style-type: none"> 定常運転 正味電力 > 0 三重水素自己充足性 (TBR ≥ 1) の実証
主要機器（例）			
超伝導コイル	ITERベース	←	←
真空容器	ITERベース	←	←
増殖ブランケット	初期ブランケット	←	改良型ブランケット
NBI	短パルス	定常負イオン源 (長パルス化)	光中性化セル (高効率化による所内電力低減)
EC	短パルス	定常ジャイロトロン (長パルス化)	多段エネルギー回収型ジャイロトロン (高効率化による所内電力低減)
炉心プラズマ			炉心プラズマ高性能化 (高閉じ込め & 高自発電流割合) による所内電力低減

- 製作に長期間を要するトロイダル磁場コイルを製作実績のあるITERサイズにすることによる建設期間の短縮、及び炉内機器の高性能化や加熱装置の定常化・高効率化に関する実規模技術開発を原型炉建設と並行して実施することでITERのダイバータプラズマ達成を待たずに建設（製造設計）に着手、が可能ではないか。