

S2-2

原型炉概念設計の現状と課題 Status of conceptual design of JA DEMO and its issues

坂本宜照、原型炉設計合同特別チーム
Sakamoto Yoshiteru and the Joint Special Design Team for Fusion DEMO

量研六ヶ所
QST Rokkasho

1. はじめに

原型炉設計合同特別チームでは、21世紀中ごろに核融合エネルギーによる発電実証を目的とする日本の原型炉概念設計を実施している。原型炉の目標は、①数十万kWの電気出力、②実用に供し得る稼働率、③燃料の自己充足性である。技術的実現性のある原型炉概念設計の基本設計を実施するため、ITER技術基盤、産業界の発電プラント技術・運転経験、ITERやJT-60SAから見通し得る炉心プラズマを想定することを方針とした。

2. 原型炉の基本仕様

核融合出力はダイバータ除熱性能と数十万kWの電気出力の両立が見込める1.5GWに設定した。主半径は、中心ソレノイドによる供給磁束でプラズマ電流を安定に立ち上げられるようにするため、ITERよりも大きい8.5mとした。これにより、定格運転に向けた調整運転の段階においても核融合出力1GWで2時間程度のパルス運転が可能な運転柔軟性を確保している。図1に原型炉本体図と基本仕様を示す。トロイダル磁場は6T程度で、定常運転に必要な外部加熱電流駆動パワーを抑制するために、プラズマ電流の約60%を自発電流で賄うため安全係数を4.1に設定した。また、プラズマ電流の定格値12.3MA、規格化ベータ値3.4、中性子壁負荷1MW/m²にそれぞれ設定した。プラント設備については、新たな技術開発課題を増やさないため加圧水型原子炉の冷却水条件を採用し、既存技術を流用できるようにした。各システムの基本概念については、以降に述べる。

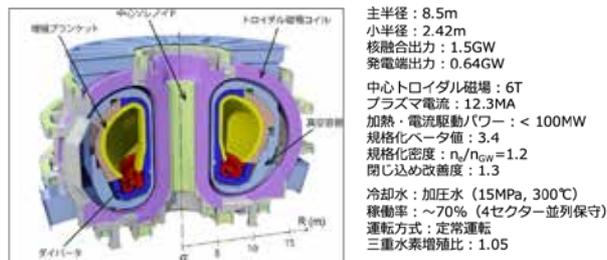


図1 原型炉本体図と基本仕様

3. 主要機器の概念

【超伝導コイル】

国内の専門家で作成された超伝導コイルWGで検討を重ね、ベースライン仕様を策定した(図2)。TFコイルは高さ20m、幅14mのD型形状の超伝導コイル16本をドーナツ状に配置しトロイダル磁場(最大経験磁場13T程度)を発生し、総磁気エネルギーは150GJである。設計応力はITERの667MPaを超える800MPaが必要であり、今後の重要な研究開発項目の1つである。

	TFコイル	CSコイル	PFコイル
超伝導線材	Nb ₃ Sn	Nb ₃ Sn	NbTi
コイル本数	16	6	6~7
最大磁場	<14T	~13T	~13T
導体電流値(導体構造)	< 100 kA (CICC)	> 40 kA (CICC)	> 40 MPa (CICC)
設計応力(想定材料)	800 MPa (新高強度低温鋼)	500MPa (FM316LNH)	500MPa (FM316LNH)
巻線方法	ダブルパンチ型・ラジアルプレート方式	パンチ型・矩形導体	パンチ型・矩形導体

図2 超伝導コイル設計のベースライン仕様

【ダイバータ】

ITER技術基盤に基づく設計としているが、ダイバータ部への熱負荷分布と中性子照射分布を考慮し、高熱負荷・低中性子照射部には銅合金の冷却配管、低熱負荷・高中性子照射部にはF82Hの冷却配管を使用する設計とした(図3)。銅合金を使用した冷却ユニットは、独立して交換できるような構造としている。



図3 ダイバータ・カセット構造

【増殖ブランケット】

ITER-TBM試験で予定されている固体増殖・水冷却方式を採用した。構造材が占有する体積を抑えつつ堅牢性を改善できるハニカム構造に着目し、冷却管から仮に漏水した場合にも増殖ブランケット管体の堅牢性を確保し、燃料生産性を向上できる設計を考案した(図4)。モジュール管体は低放射化フェライト鋼(F82H)で製作し、管体内部には中性子増倍材(Be材)と三重水素増殖材(Li材)のペブルを装填し、熱の取り出しのために冷却水配管(圧力15MPa、温度300°C程度、最大流速8m/s)を張り巡らせている。

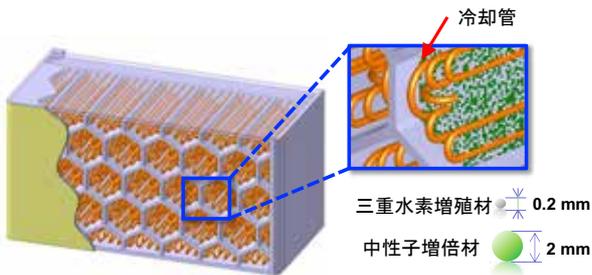


図4 増殖ブランケット・モジュール構造

【遠隔保守方式】

ブランケットセグメントの上部を掴んで炉内から搬出する場合、不安定な「片持ち」にならないように、①上下両端をしっかり掴む機構を備えたエンドエフェクタ、②腕の長さを変えて集合体を上下動させるテレスコピックマニピュレータ、③トラス方向に回転する機能を備えた台車、④水平方向の位置を調節するパンタグラフから構成される遠隔機器の概念を構築した(図5)。また、保守の作業動線に留意した関連設備の配置検討を進めた上、定期交換に要する時間を算出した結果、原型炉運転後期には4セクターの並行作業を行うことで約70%の稼働率に見通しを得ている。

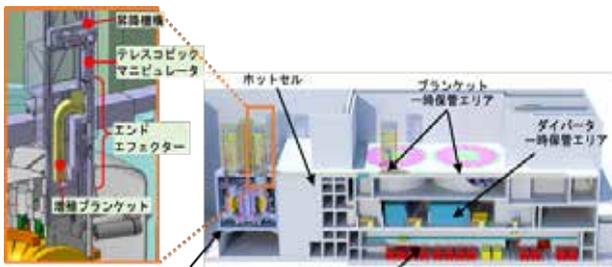


図5 炉内機器の遠隔保守方式

4. プラント設備の概念

【主熱輸送系、発電設備の基本概念】

原型炉の発電設備については、加圧水型原子炉の冷却水条件を採用し、既存技術を流用できるようにした。主熱輸送系については、ブランケット冷却配管、リングヘッダー、蒸気発生装置、タービ

ンに至るまでの機器配置検討した(図6)。また、有効熱出力1,865MW、発電端電気出力640MWが得られる。さらに、加熱電流駆動装置や冷却水ポンプ動力などの所内必要電力の一次評価を行い、送電端電気出力として約250MWが得られた。発電に利用していないダイバータ銅合金冷却配管系の熱を有効利用することで約40MWの電気出力の増大を見込んでいる。

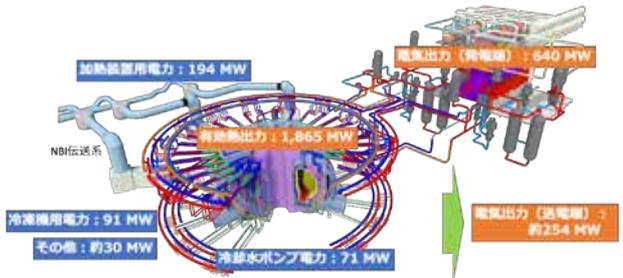


図6 主熱輸送系の構成

【燃料システムの基本概念】

燃料システムについては、三重水素インベントリ低減の観点から、真空容器より排気したガスから不純物ガスを取り除いた燃料ガスをガスパフやペレットにより真空容器へ入射するダイレクトリサイクル方式を採用する。これにより、水素同位体分離系での三重水素インベントリを低減することが可能である。

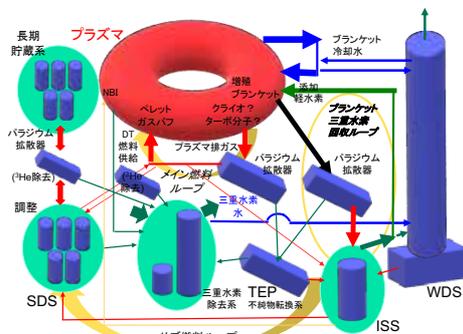


図7 燃料循環システムの概念図

【建屋と発電プラント全体像】

原型炉サイト全体イメージを構築するため、必要な建屋サイズや配置構成の検討を進めた(図8)。敷地面積はおおよそ1キロメートル四方である。

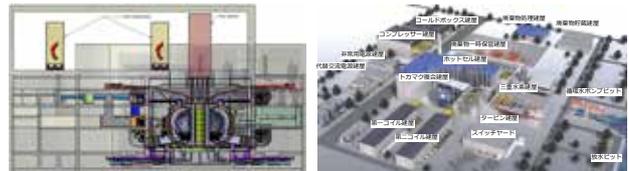


図8 トカマク複合建屋(左図)と発電プラント全体像(右図)