



第14回核融合エネルギー連合講演会
2022年7月7-8日@Web形式

シンポジウム2：原型炉研究開発の課題と取り組み

S2-2: 原型炉概念設計の現状と課題

原型炉設計合同特別チーム
坂本 宜照
(QST)

原型炉研究開発ロードマップ@核融合科学技術委員会



- 第1回中間C&Rの達成目標：
原型炉概念設計の基本設計

- 第2回中間C&Rの達成目標：
炉心、炉工学技術の開発と整合をとり、高い安全性を確保し経済性の見通しにも配慮した原型炉概念設計の完了

第1回中間C&R報告書@令和4年1月24日

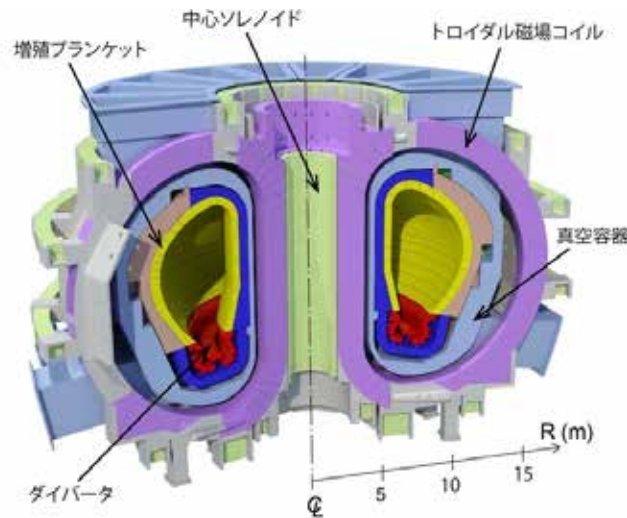
実効的なフォローアップを行うために策定されたAPに基づき、TFで研究開発の進捗状況を確認したところCR1段階までの研究開発は「おおむね順調に推移している」と評価された。これに基づき、委員会として確認した結果、CR1までの目標は達成されていると判断した。

- 原型炉段階への移行判断：
社会受容性と実用化段階における経済性
の見通しを得て、炉心・炉工学技術の開発と整合をとった原型炉工学設計の完了

検討の方針と基本仕様

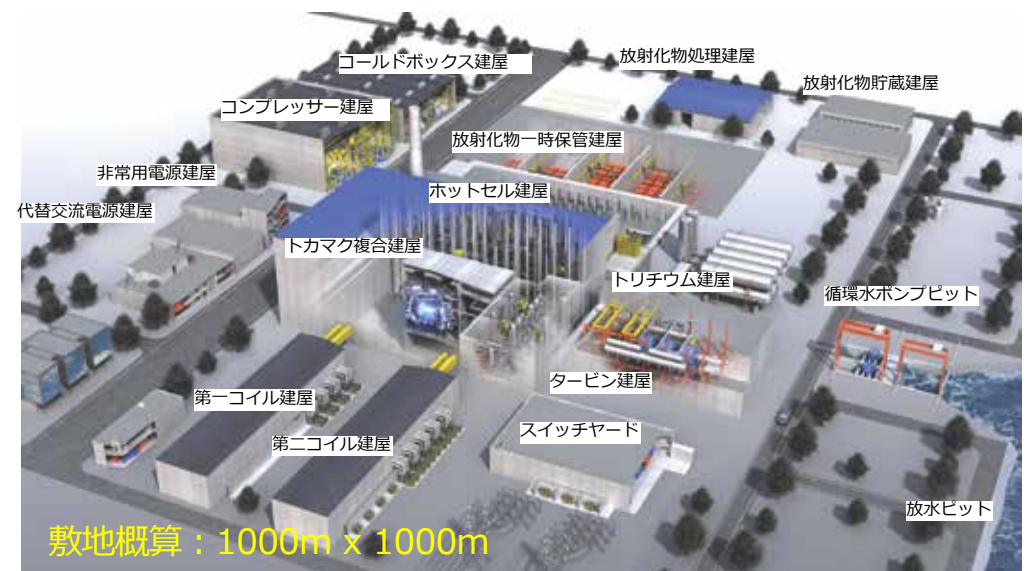
- 主要機器であるトロイダル磁場コイル、増殖ブランケット、ダイバータについては、ITER技術基盤の延長に概念を構築
- ITERにない技術については、産業界の発電プラント技術及び運転経験並びに大学等による共同研究の成果を取り入れた概念を構築
- 炉心プラズマについては、ITER及びJT-60SAの想定成果に基づいた概念を構築

→ 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



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
トリチウム増殖率：1.05

発電プラント全体像



超伝導コイルの基本概念

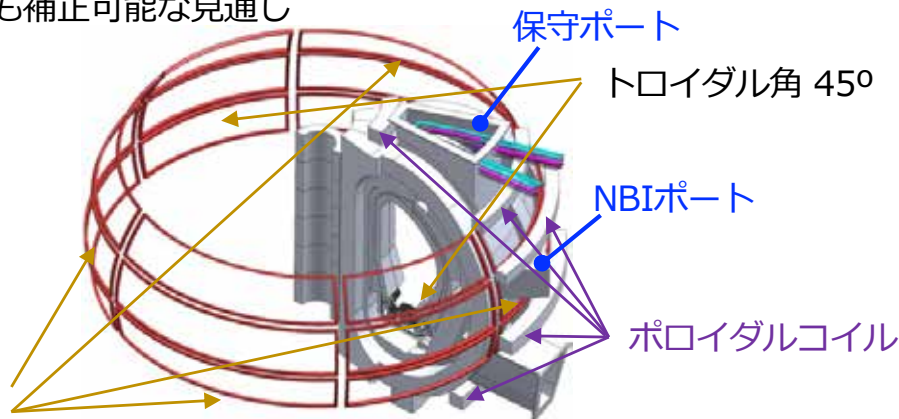
- 国内の専門家の意見を集約しベースラインを策定
- ITERでの実績を重視し基本的にITER方式を採用
- 補正磁場コイルによるTFコイル製作精度の緩和
- 製作簡略化（コスト低減）に向けた検討

ITER技術基盤に基づく設計

- ✓ 超伝導線材：Nb₃Sn
- ✓ 導体構造：ケーブルインコンジット
- ✓ 巻線方式：ラジアルプレート、ダブルパンケーキ

補正磁場コイルによる製作精度の緩和

- ✓ 補正磁場コイルの採用により、JT-60SA並(ITERの2-4倍)に緩和可能な見通し
- ✓ 保守ポート、NBIポートを避けた補正磁場コイル配置の場合でも補正可能な見通し



トロイダル角67.5°

超伝導コイル設計のベースライン

	TF coil	CS coil	PF coil
超伝導線材	Nb ₃ Sn (option: Nb ₃ Al)	Nb ₃ Sn	NbTi (経験磁場により Nb ₃ Sn)
コイル本数	16	6 units	6~7
最大生成磁場強度	~ 13 T	~ 13 T	~ 13 T
導体電流値 (導体構造)	< 100 kA (CICC)	> 40 kA (CICC)	> 40 kA (CICC)
最大設計応力 (想定材料)	800 MPa (新高強度低温鋼)	500 MPa (FM316LNH)	500 MPa (FM316LNH)

R&D課題

- **コスト低減に向けたTFCオプションの詳細検討**
 - ✓ RP方式での製作簡略化のための試作検討
 - ✓ 矩形導体方式での巻線試作
 - ✓ 導体試作・試験等の反映
- **高電磁力下における大電流導体の見通しを得る**
 - ✓ 導体試作：80kA級導体での短ピッチ撚り線構造
 - ✓ 導体試験：短尺導体試験(SULTAN)およびCSインサート試験による外挿性検証
 - ✓ 高強度線材(耐歪み特性に優れた線材)の開発
- **高強度低温鋼の開発の見通しを得る**
 - ✓ 候補材の組成決定
 - ✓ 同材の産業規模(数トンクラス)で試作・試験
 - ✓ 共金ワイヤの試作と溶接性試験

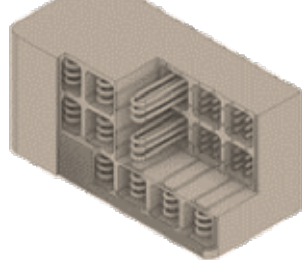
増殖ブランケットの基本概念

- ITER-TBMと同じ固体増殖・水冷却方式を採用
- 補強リブ構造による筐体の耐圧構造化
- パージガスによる三重水素の回収
- 第一壁への熱負荷低減のための保護リミター

ブランケット筐体の耐圧構造化

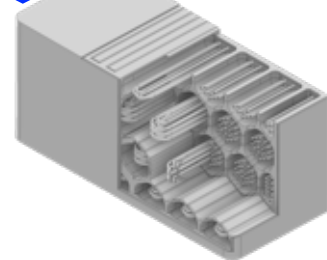
In-box LOCAによる事象進展抑制のため、筐体の耐圧構造化

□ 四角形リブ構造



増殖領域割合: 68 %

○ ハニカムリブ構造



増殖領域割合: 77 %

先進ブランケット概念

原型炉テストブランケットモジュールとして先進ブランケット概念を導入

先進ブランケット用液体トリチウム増殖材候補 (トリチウム増殖材が液体 → 液体ブランケット) の検討

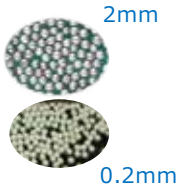
特徴が異なる液体トリチウム増殖材の特性*	Li	Li ₁₇ Pb ₈₃	FLiBe (Ref. ADM90)
融点(°C)	低	中	高 (~400 (FLiBe-90))
重量密度 (g/cm ³)	小	中	高
粘度 (Pa·s)	低	中	高
熱伝導率 (W/m·K)	低	中	高
電気伝導率 (10 ⁴ S/m)	高	中	低
中性子増倍率 (k _{eff})	高	中	低
天然と人工の比率	高	低	中

■ 全ての特性が好ましい候補材は無い。

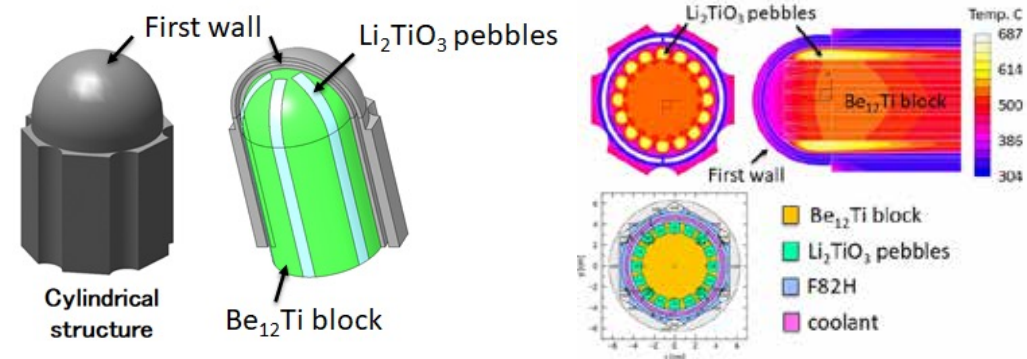
■ 500°C以上の高い温度で、高効率発電を目指す。
 ■ 増殖材自身を循環させる自己冷却が可能。
 ■ 簡単なブランケット構造が可能。
 ■ トリチウム燃料連続回収、及び成分調整が可能。
 ■ 増殖材に関しては、中性子吸収がない。
 ■ 概念によってはBeフリー、気漏れ無し。

増殖ブランケットの基本仕様

- 構造材：低放射化フェライト鋼(F82H)
- 充填領域：混合充填方式 (充填率：80%)
 - ✓ 中性子増倍材 : Be₁₂V or Be₁₂Ti
 - ✓ 三重水素増殖材 : Li₂TiO₃ (⁶Li:90%)
- 加圧冷却水 (290~325°C、15.5 MPa)
- プラズマ対向面：Wコーティング (500μm)



円筒型ブランケット設計



R&D課題

- ITER-TBM計画の推進
- 複数のモジュールを一体化したセグメントの製作技術を新規に開発する。強磁場環境下での性能試験 (構造物負荷試験) を実施
- 保護リミター設計

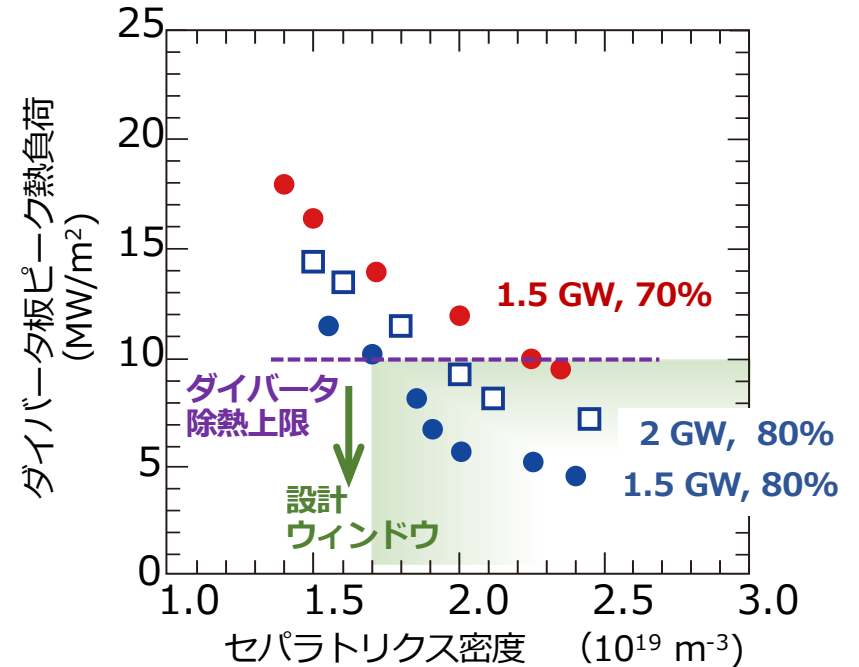
ダイバータの基本概念

- ITER技術基盤に基づく設計
 - ✓ W型ダイバータ・カセット構造
 - ✓ タングステン・モノブロック構造
 - ✓ 水冷却方式
- 放射冷却によるダイバータ熱負荷低減

ダイバータ構造概念

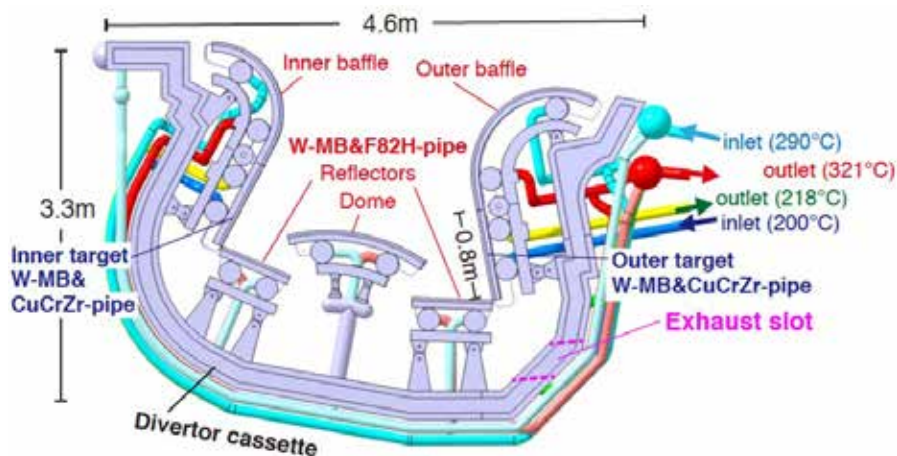
- 2系統冷却系
 - 高熱負荷部：Cu合金配管、低熱負荷部：F82H配管
- 遮蔽機能を保つカセット構造
 - 基板内部の水溜
- 高熱負荷ユニットを独立に交換
 - ← 冷却配管をトロイダル側面付近に設置

ダイバータ設計ウィンドウ



R&D課題

- 冷却水での統一のオプションの検討
- 原型炉用Wモノブロック冷却ユニット (Cu合金&F82H配管) 開発と熱負荷試験
- F82H冷却配管へのW接合手法
- 補修技術の検討・開発

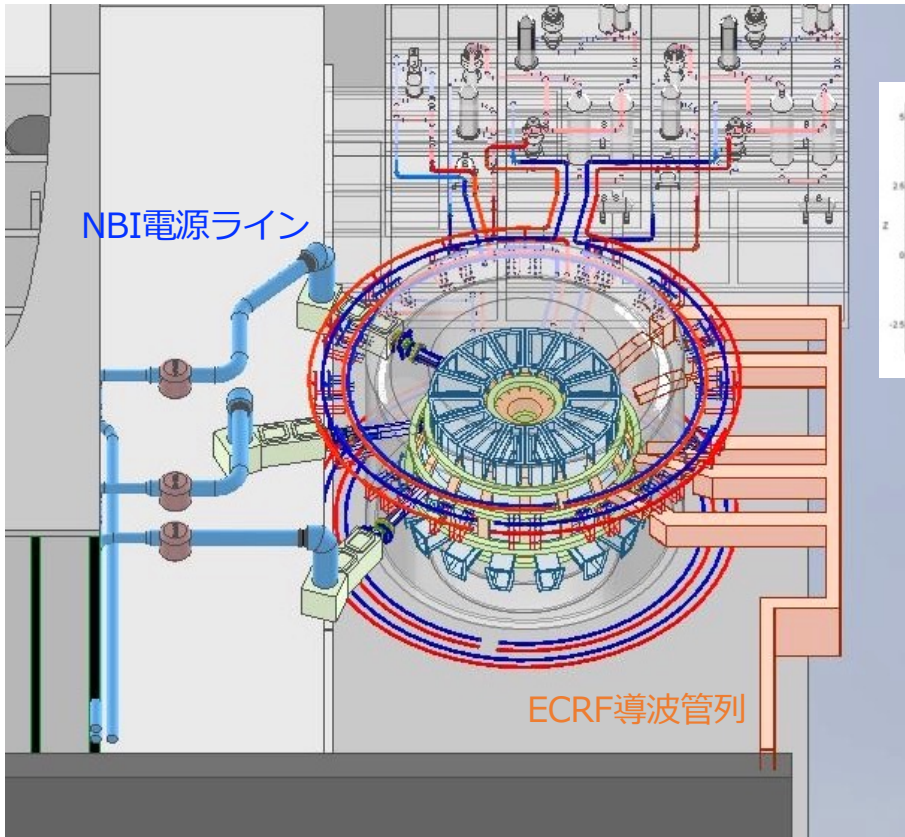


加熱・電流駆動システムの基本概念

- 中性粒子ビーム入射 (NBI)
 - 電子サイクロトロン波 (ECRF)
- を併用

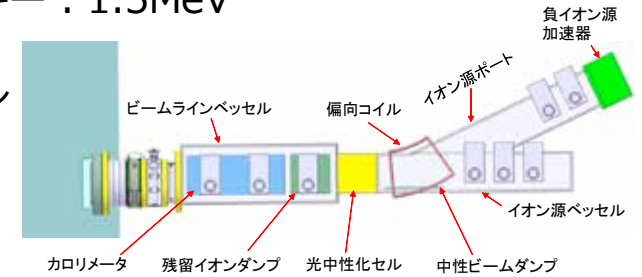
NBI及びECRFの配置案

- NBI：イオン源の保守のためホットセル側に配置
- ECRFアンテナ：NBIの対面に配置

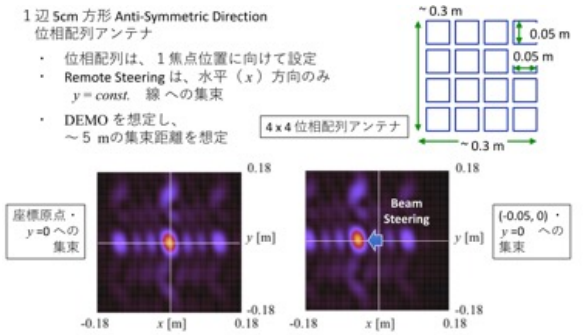
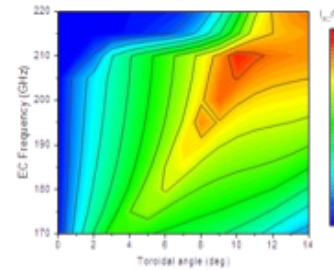
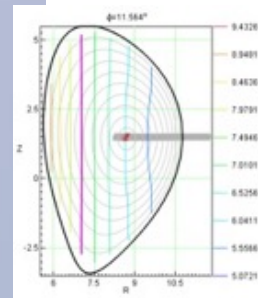


● NBI基本仕様

- ✓ 入射パワー：33MW/ポート
- ✓ ビームエネルギー：1.5MeV
- ✓ 8段静電加速
- ✓ 偏向磁場コイル
- ✓ 光中性化セル



● ECRF検討状況



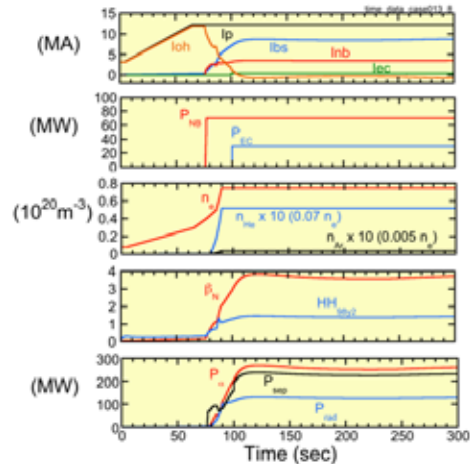
R&D課題

- 年オーダーの定常運転での信頼性
 - ✓ セシウムレスRF負イオン源
 - ✓ ~ 200 GHzジャイロトロン、伝送・入射系
- 高システム効率 (正味電力増大)
 - ✓ 光中性化セル
 - ✓ 多段階エネルギー回収ジャイロトロン

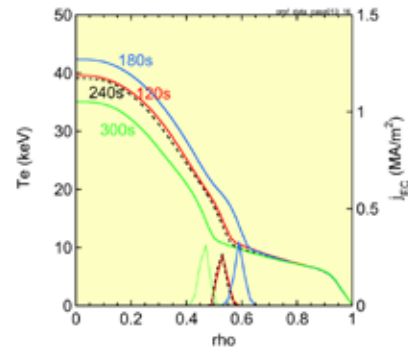
炉心プラズマの基本概念

- ITER及びJT-60SAの想定成果に基づいた概念
- 高自発電流割合プラズマに基づく定常運転
- 導体シェルによるプラズマ安定化
- 内部&周辺輸送障壁による高閉じ込め

プラズマ運転シナリオ構築

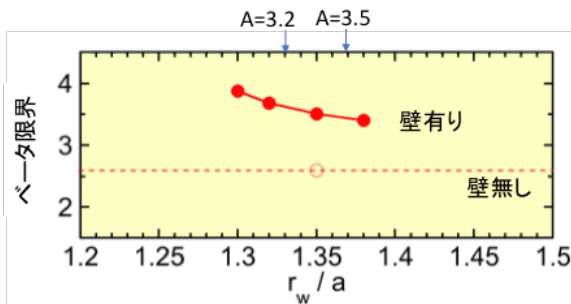


- 周辺ECCDによる内部輸送障壁の制御



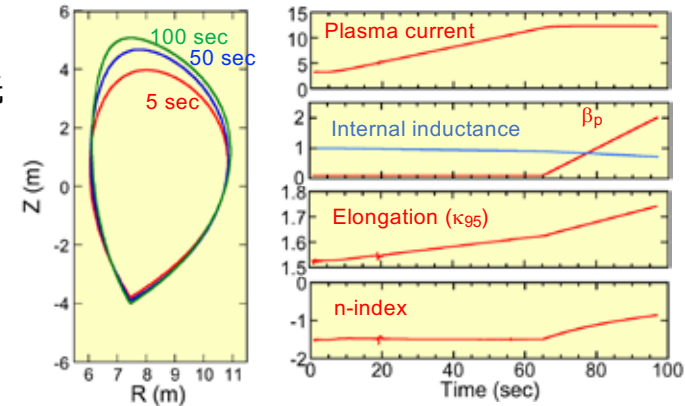
導体シェルによるMHD安定性評価

- 導体壁による高ベータ化効果を確認



設計楕円度の評価

- プラズマ平衡制御シミュレーターに3次元渦電流モデルを導入
- 立ち上げシナリオの検討を実施
- ✓ 楕円度1.75まで安定に立ち上げられる見通し



R&D課題

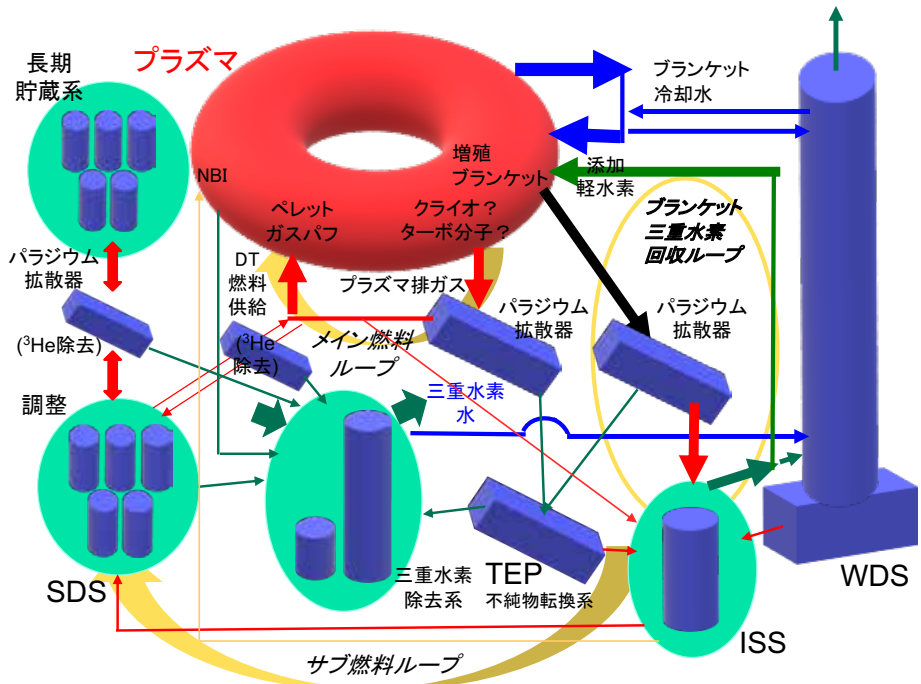
- 非接触ダイバータと両立するELM制御手法
- 炉心からダイバータまでが成立する運転シナリオ
 - ✓ 立ち上げ、立ち下げ制御
 - ✓ 高密度・高閉じ込め
 - ✓ 高ベータ定常運転
- ディスラプション回避・緩和手法

燃料システムの基本概念

- 三重水素インベントリ低減を考慮した概念
 - ✓ メイン燃料ループ (ダイレクトリサイクル)
 - ✓ サブ燃料ループ
 - ✓ ブランケット三重水素回収ループ
- トリチウム諸課題検討ワーキンググループ

燃料システムのボックスモデル

燃料システムの構成



R&D課題

- 燃料サイクルシミュレーター開発
- 炉内インベントリ評価 (初期装荷トリチウム)
- ⁶Li濃縮技術
- トリチウム除染法の開発
- DT混合ペレット連続製造技術開発
- 排気系設計

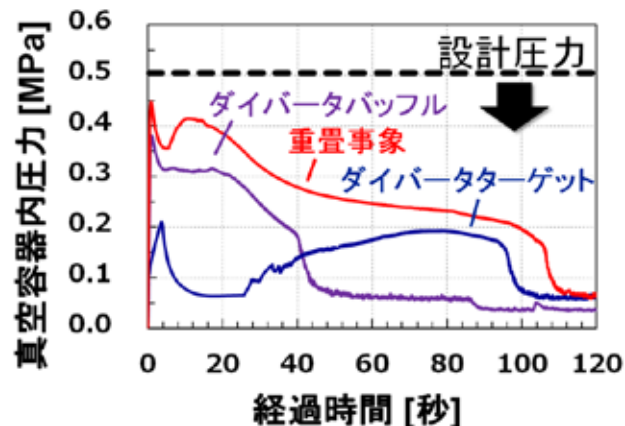
安全確保の考え方

- 公衆及び従事者に放射線障害を及ぼす恐れがないように措置を講ずる
 - ✓ 公衆の実効線量を法的限度以下とともに、合理的に達成できる限り低減 (ALARA)
 - ✓ 公衆に過度の放射線被ばくを及ぼすおそれがないよう適切な設備により影響を緩和

圧力緩衝システムによる影響緩和

- 熱クエンチによるダイバータターゲット部 (冷却水圧力5MPa) の損傷後、垂直位置移動現象によるダイバータバッフル部 (冷却水圧力15.5MPa) が損傷する事象解析 (MELCORコード)

- 圧力緩衝システムの導入により、真空容器内の圧力は設計値(<0.5MPa) 以内



放射化物の管理シナリオ

- 炉内機器であるブランケット及びダイバータは、運転数年後に保守交換
- 放射化物の特性に基づいて、運転終了までの管理処分シナリオを構築
- 生成される約1200核種から管理区分に該当する核種を分析
 - 全ての放射化物は、低レベル放射性廃棄物として、浅地中処分できる見通し

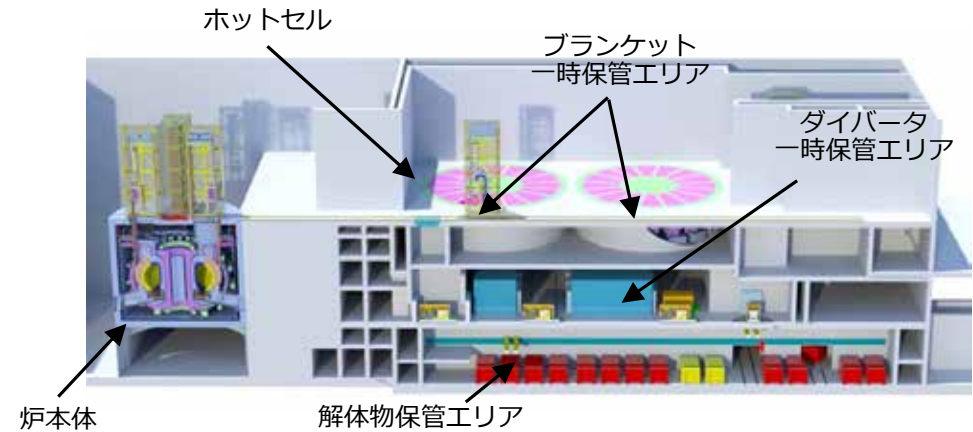
安全性の課題

- 原型炉安全確保方針と整合する安全設計と安全規制法令の検討
 - ✓ 許認可に必要な安全評価コード群の整備
 - ✓ 安全上の特徴整理
 - ✓ 事故事象解析、影響緩和機能評価
 - ✓ 安全設計要領の作成

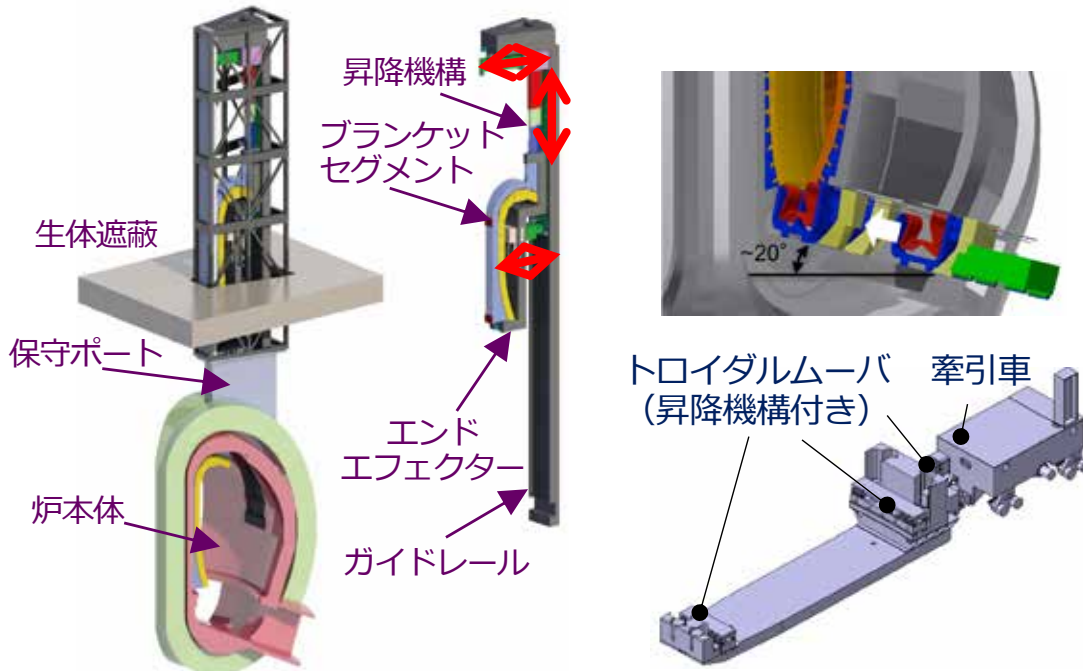
遠隔保守方式の基本概念

- 炉内機器は炉内から搬出してホットセルで保守する方式
- ブランケットとダイバータを独立に交換
- ブランケットモジュールの集合体（セグメント）として交換

保守設備関連のレイアウト



遠隔保守機器概念



R&D課題

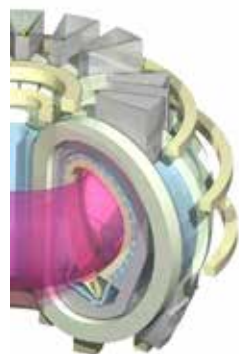
- 保守作業の合理化
 - ✓ キャスク設計、保守セル設計
 - ✓ 冷却配管（厚肉溶接~30mm）の溶接／検査
- 遠隔機器の交渉やトラブル低減
 - ✓ エンドエフェクター見直し（落下防止）
 - ✓ 耐放射線機器の設計・試作試験
- 再利用を考慮した炉内機器設計、ホットセル設計
 - ✓ ホットセル内作業の要求条件、保守シナリオ整理
 - ✓ 取り合い部の構造設計
 - ✓ ホットセル内で使用する機器設計
- 実機大 遠隔保守・保全技術開発（開発試験施設）

計装制御の概念

運転制御シミュレーター

- 分離した3つの制御系を統合
- 他の分布計測データを用いてプラズマの状態を詳細に認識 (計測できない物理量は推測)
- 運転限界 (MHD限界、密度限界、デタッチ) に対する距離を監視
- 上位の制御指令 (出力抑制、ソフトランディング、緊急停止、...)

トムソン
レーザー偏光計
ECE
等、補完計測器



プラズマ平衡コントローラー

- CSコイル、PFコイル
NBCD、ECCD
- 磁気プローブ
ログスキーコイル

プラズマ燃焼コントローラー

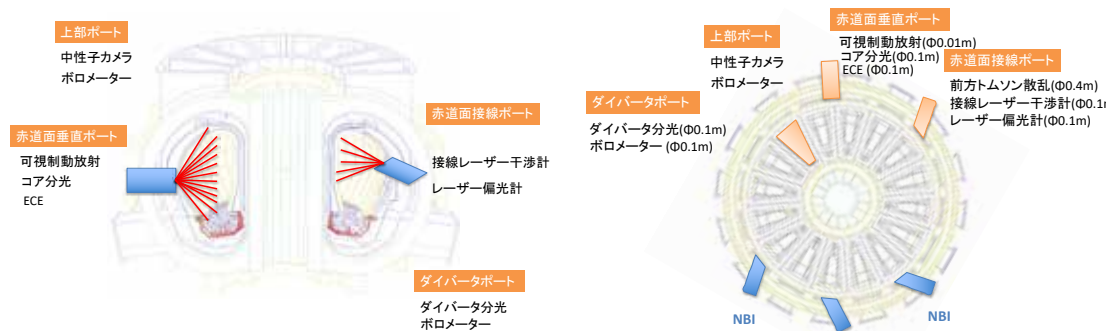
- ペレット
- 中性子発生率

ダイバータプラズマコントローラー

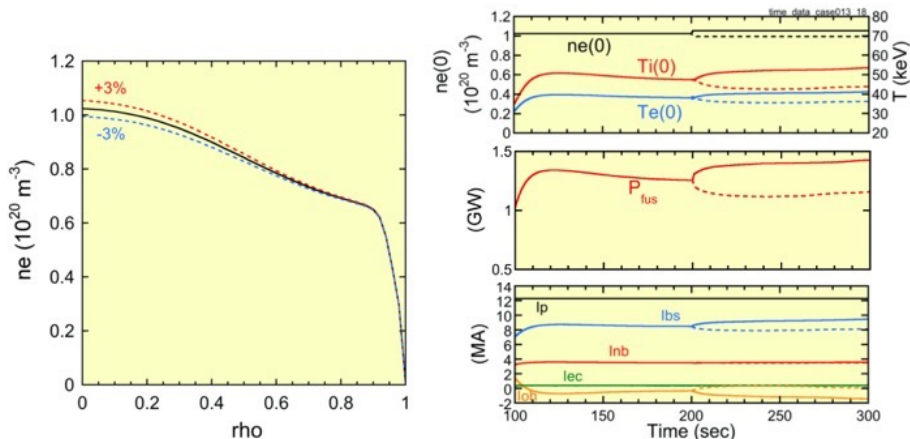
- 不純物、重水素
- ダイバータ分光

計測器配置 (例)

- 計測器の保守・交換
 - インターフェースの簡素化
- } ITERのポートプラグ&Drawer 概念



プラズマ応答特性の評価 (例)



R&D課題

- 候補計測器の決定・開発
 - 計測器の寿命評価、耐放射線機器の開発
 - 原型炉の磁気計測環境下での平衡制御精度
 - 運転基準点と運転許容範囲の同定
 - 運転制御シミュレーターの開発・検証 (オフライン、実時間)
 - 学習・推定ツールの開発
- ➔ 計測・制御ワーキンググループ

- 産学連携の設計チームである原型炉設計合同特別チーム（総勢130名）では、ITERの技術基盤と産業界の発電プラント技術に加えて、共同研究を通じた大学等での研究成果により、原型炉の基本概念を構築。
- 文部科学省 核融合科学技術委員会による第1回中間チェックアンドレビューが行われ、目標は達成されていると判断された。
- 次のステップとして、原型炉の基本概念をベースに概念設計活動を推進。
 - ✓ プラズマ物理から材料・工学分野までの幅広い研究者の共通目標を設定
 - ✓ 将来の原型炉研究開発を担う人材育成
- 概念設計の完了に向けては重要な課題が残されており、今後も産業界との強力な連携と共同研究の枠組みを生かした大学等とのより一層の連携を促進する。