

原型炉設計合同特別チームにおける 活動状況とCR1での課題に対する取組

原型炉設計合同特別チーム

- CR1までに、ITERの技術基盤と産業界の既存の発電プラント技術をベースとした日本独自の原型炉の基本概念を明確化
- CR1では、「一部に課題は残るものの、おおむね順調に推移」との評価
- 一方、CR2に向けては加速が必要との指摘



CR1までの達成目標

⑤原型炉に関わる炉工学技術開発

- ▶ ダイバータ開発指針の作成
- ▶ 超伝導コイル要素技術等、原型炉に向けて早期着手を必要とする炉工学開発計画の作成

⑥原型炉設計

- ▶ 原型炉の全体目標の策定
- ▶ 原型炉概念設計の基本設計
- ▶ 炉心、炉工学への開発陽性の提示

CR2までの達成目標

⑤原型炉に関わる炉工学技術開発

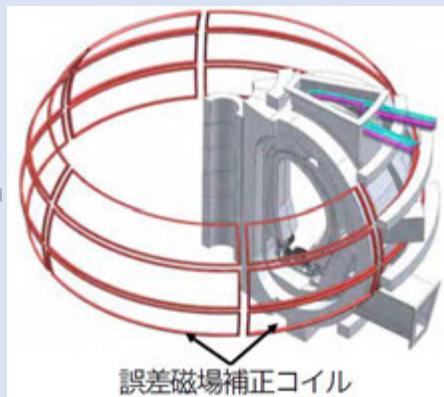
- ▶ 超伝導コイル、ダイバータ、遠隔保守、加熱・電流駆動、燃料システム、計測・制御等の中規模またはプラント規模の炉工学開発計画の作成、並びに、これらの開発試験施設の概念設計の完了

⑥原型炉設計

- ▶ 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を見通しにも配慮した原型炉概念設計の完了
- ▶ 工学設計の技術基盤確立に向けた炉心、炉工学開発課題の確定と開発計画の作成

設計概要

- ITERでの実績を重視し基本的にITER方式を採用
- 製作簡略化（コスト低減）に向けた検討
 - ✓ 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



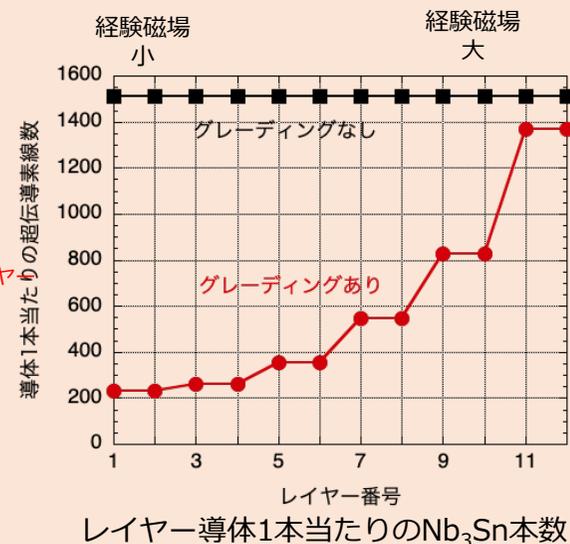
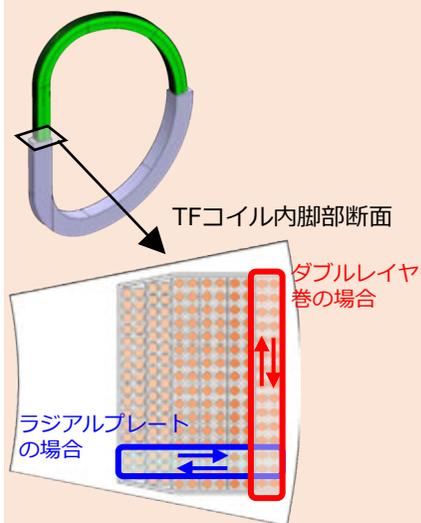
CR1での主な指摘

概念設計フェーズにて

- コスト低減概念のブラッシュアップとコスト評価
- 試作・試験による検証
- 導体試験に必要なR&D計画の立案

CR2に向けた取組状況

- ラジアルプレートを用いないコイル代替案（レイヤー巻）の検討により、超伝導素線量の大幅な低減の見通し(約65%↓)



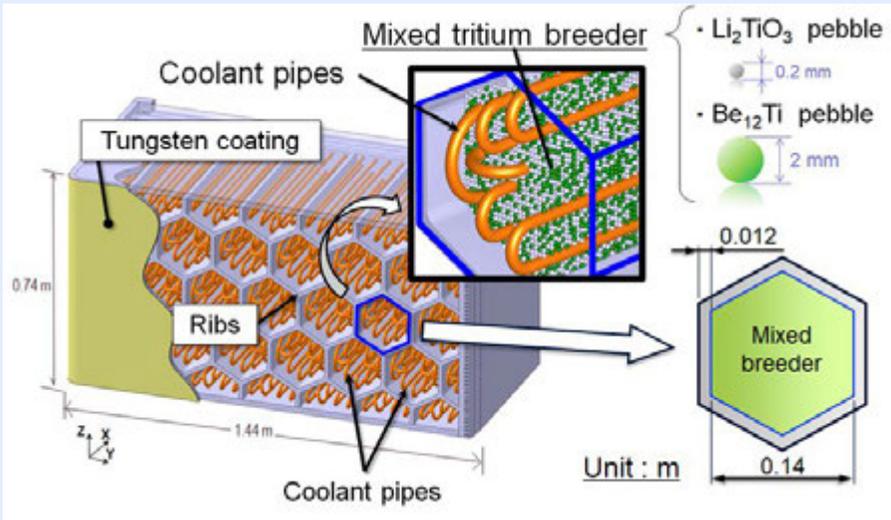
コイル概念の確定には巻線試作による検証が必須

- 導体の小規模試作による設計検討及び特別チーム内専門家による導体試験装置・R&D計画に関する検討を開始

導体試作・試験への早急な着手が必須

設計概要

- 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
 - ✓ 構造材：低放射化フェライト鋼(F82H)
 - ✓ 加圧冷却水 (290~325°C、15.5 MPa)



CR1での主な指摘

- 円筒型ブランケットの課題の整理と設計の詳細化
→ITER-TBMチームや国内メーカーとの連携継続
- 原型炉TBMの熱流動解析に基づく冷却方式の方針決定が必要

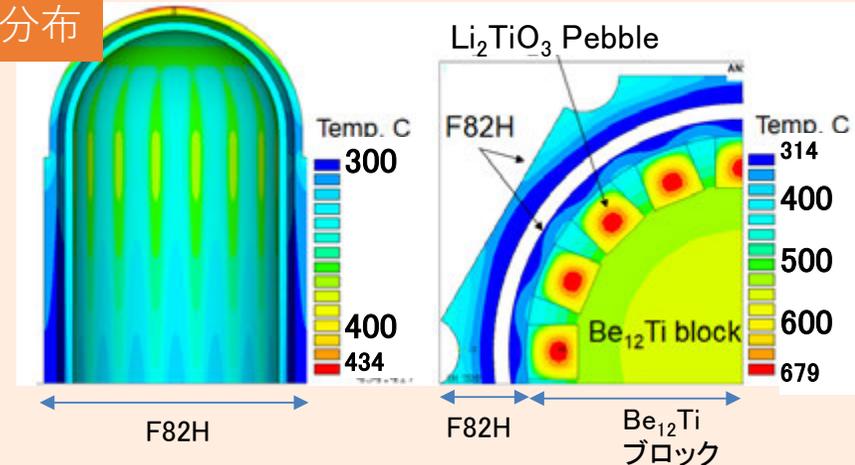
CR2に向けた取組状況

● 円筒型ブランケット概念の簡素化

Beペブルではなくブロックで使用することで熱伝導率を向上させ、筐体内部の冷却配管を取り除いた設計検討により以下の見通しを得た

- 各材料の温度：許容温度範囲内
- 定常運転時の応力：許容応力範囲内
- トリチウム増殖比：目標値 (1.19)

温度分布

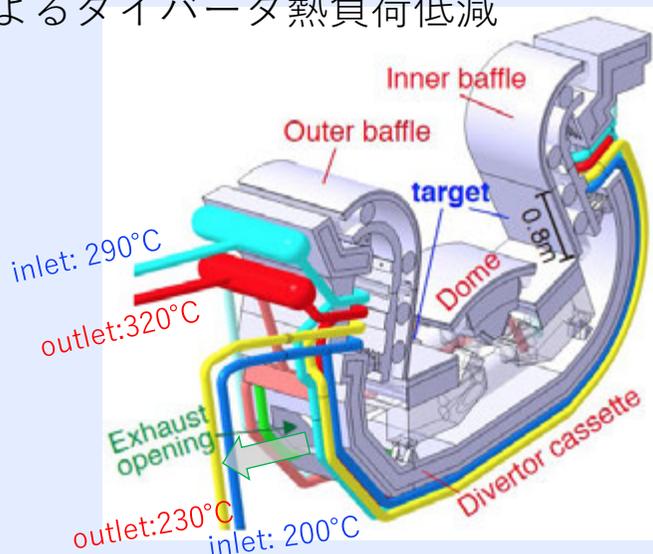


- 原型炉TBMの構造解析の連成等、数値計算の高度化を共同研究にて継続して実施中

製作・運用コスト低減に向けた検討の継続が必要

設計概要

- 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



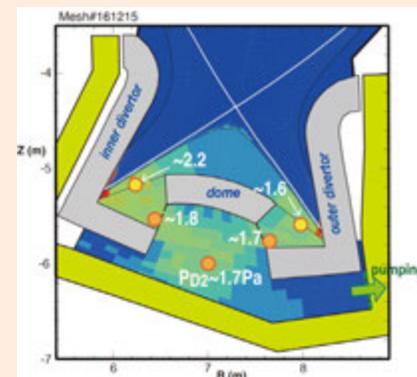
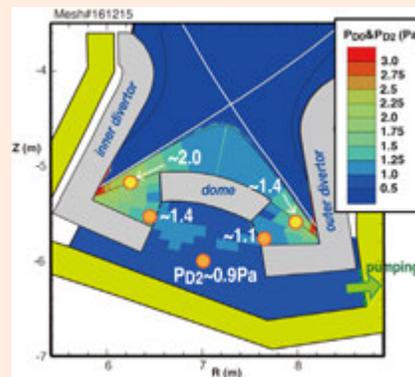
CR1での主な指摘

- ダイバータシミュレーションコードの開発とともに精度の高い予測のためには類似シミュレーション間での比較と実験による検証が必要
- 定期的な保守のみならず、様々なイベント時を想定した補修技術の検討が必要

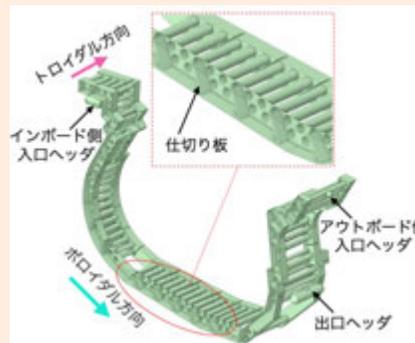
CR2に向けた取組状況

● 中性粒子(原子・分子)間衝突モデルの導入

非接触ダイバータ生成や粒子排気の正確な評価のため、中性粒子間衝突(NNC)モデルを検討し導入



● ダイバータ機器設計検討



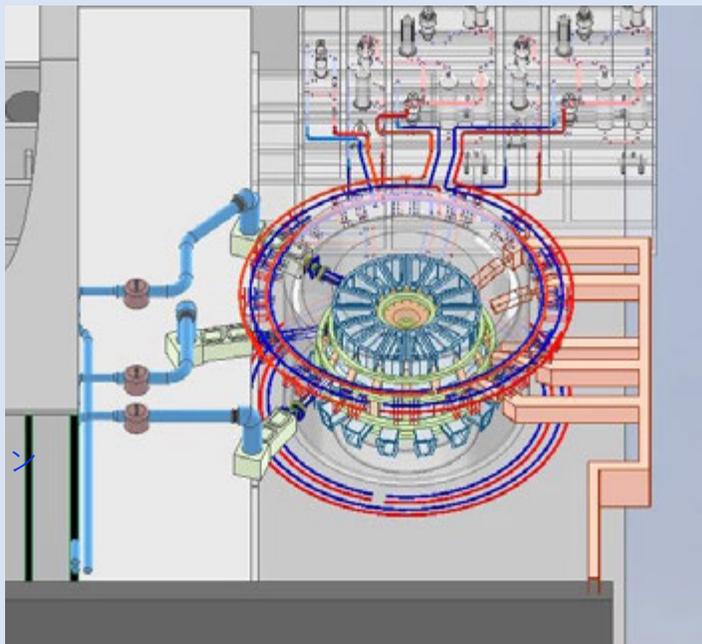
遠隔保守とも整合した構造設計検討を実施中。

補修技術に関しては、想定されるイベント(負荷条件)の整理を開始。

WとF82Hの接合技術の確立や高密度ダイバータプラズマ試験施設の概念設計が必要

設計概要

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



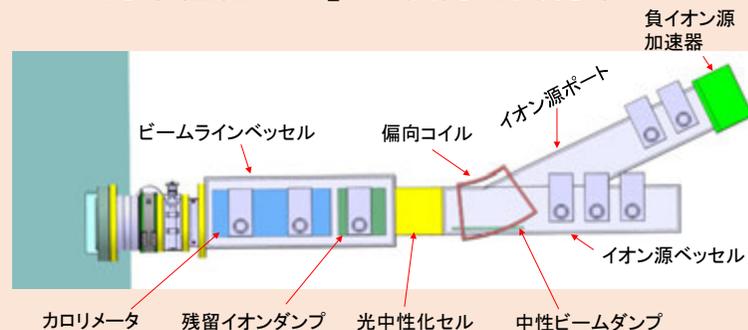
NBI電源ライン

CR1での主な指摘

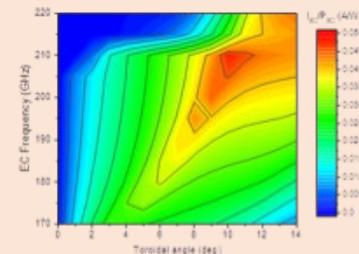
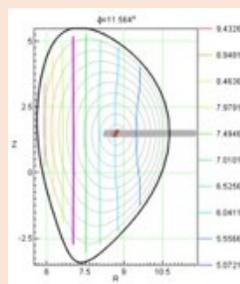
- メンテナンスレスセシウムフリー負イオン源開発の継続的推進
- 高速周波数切替・高効率運転・完全連続運転・アンテナ保守・伝送系に関する設計や開発

CR2に向けた取組状況

- NBI基本仕様の検討
 - ✓ 年オーダーの定常運転での信頼性向上のため、NIFSと共同で「セシウムレスRF負イオン源」の検討を実施中
 - ✓ 高システム効率（正味電力増大）のため、共同研究にて「レーザー光中性化セル」の検討を実施中



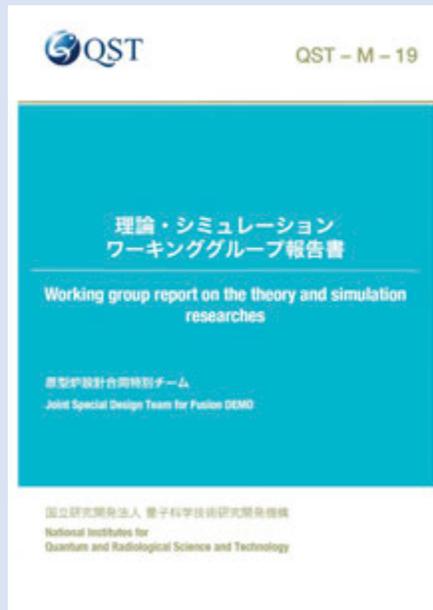
- ECシステムの検討
 - ✓ 共同研究にて電流駆動効率の向上に向けた検討及び伝送系を含む高周波源システムの検討を実施中



開発試験施設の概念設計は未着手

概要

- 炉心プラズマ運転シナリオ策定
- ダイバータ運転領域評価
- 炉心プラズマパラメータ評価
- 運転制御モデリング
- 炉心プラズマ物理の解明



特別チームとして
「理論・シミュレーションワーキンググループ報告書」をとりまとめ

CR1での主な指摘

- すべて順調(主担当項目はなし)
- DIVや炉心プラズマ統合シミュレーションモデルコード(SMC)のJT-60SA・ITER 実験への適用、検証及び継続開発

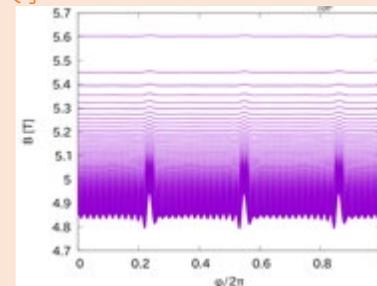
CR2に向けた取組状況

- 原型炉共同研究などを通してコード開発やシミュレーション研究を支援

原型炉 3次元平衡解析

京都大学

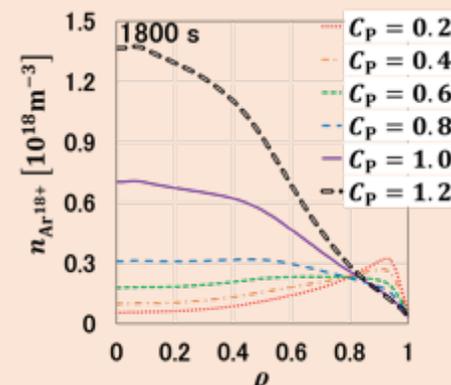
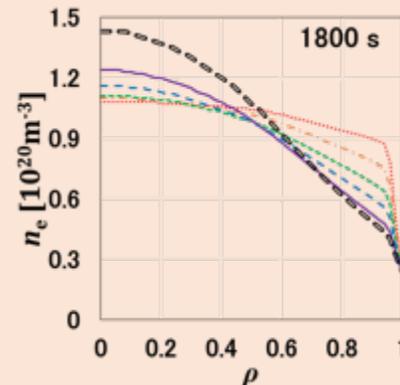
- ✓ 3次元MHD平衡を評価しアルファ粒子閉じ込め特性を評価。
- ✓ SOL領域の磁力線構造を評価し、熱負荷が集中する場所の同定。



不純物入射シナリオ

名古屋大学

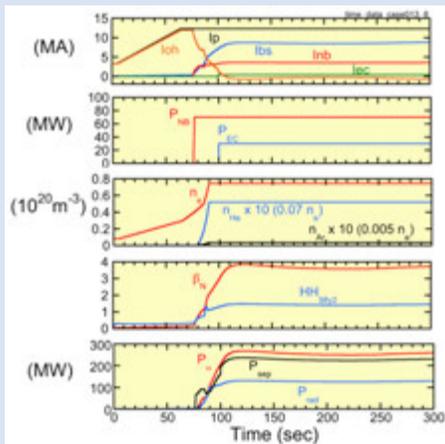
- ✓ 電子密度分布に対するAr不純物蓄積量の依存性を解析
- ✓ 帰還制御をTOTALコードに実装し、電流分布制御のシミュレーションを実施。



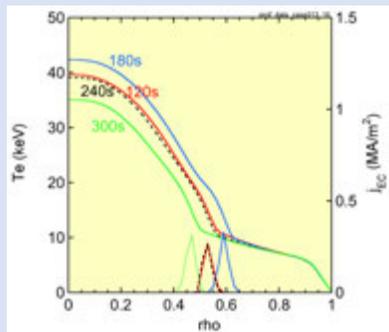
人的資源の増強と計算機資源の継続的確保が必須

設計概要

- 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



周辺ECCDによる内部輸送障壁の制御



CR1での主な指摘

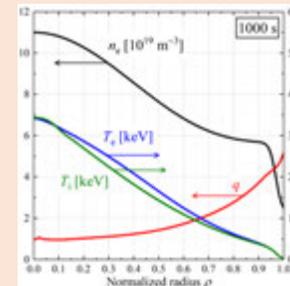
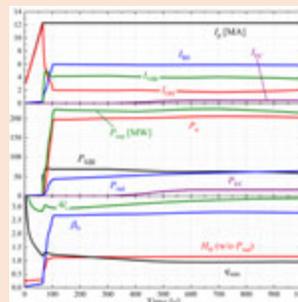
すべて順調

- 運転シナリオやELM抑制が可能な運転領域の原型炉への適用可能性の検討など、数値解析・シミュレーション、JT-60SA実験を通して検討を継続

CR2に向けた取組状況

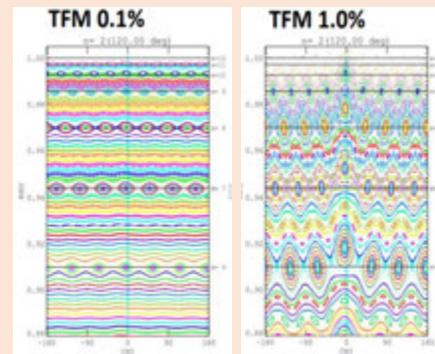
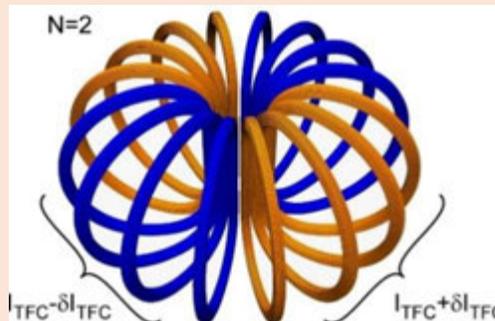
● 原型炉パルス運転シナリオの検討

外部電流駆動にNBIとECの両方を使用する場合のパルス運転シナリオを検討し、2時間のパルス運転が可能である見通し



● RMP等摂動磁場によるELM抑制法検討

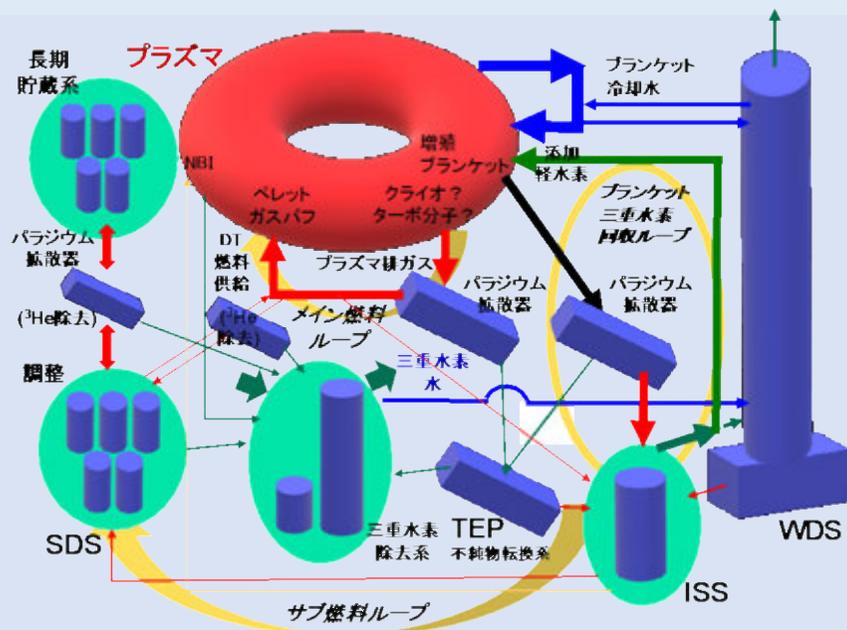
炉外コイルなどによる摂動磁場でELM抑制が可能かを検討中



実現性を見通し向上、炉心パラメータ最適化等が継続して必要

設計概要

- 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

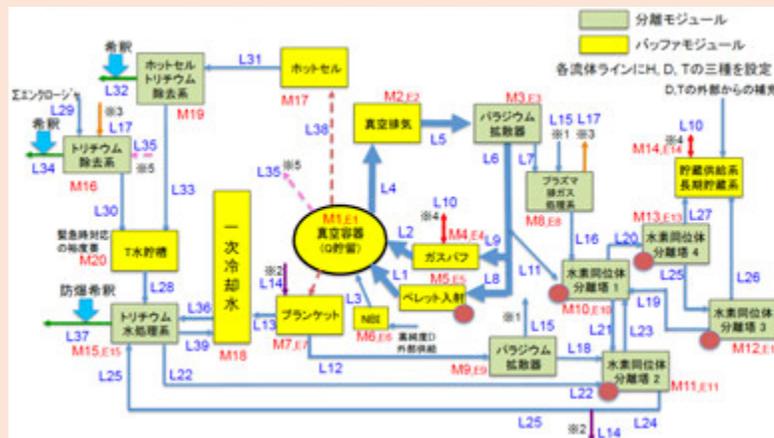


CR1での主な指摘

- 「燃料循環システム要素技術 (不純物除去、同位体分離など) の開発」における「D/T混合固体ペレット入射供給技術の開発」は加速が必要

CR2に向けた取組状況

- 燃料サイクルシミュレータに向けた燃料システムボックスモデリングの検討



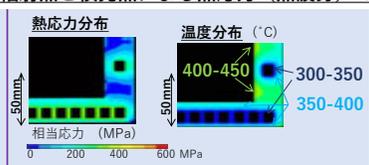
- 炉内インベントリ評価 (初期装荷トリチウム)
- 排気系設計
- **トリチウム大量取扱施設建設(未着手)**
 - ✓ トリチウム水処理システムの実証
 - ✓ ペレット加速技術に則したD/T混合ペレット連続製造技術の検証
 - ✓ 原型炉を見据えたトリチウム購入ルートの再開拓
 - ✓ 大量トリチウム輸送経験の蓄積
 - ✓ ブランケット冷却系へのトリチウム透過量の緩和技術の実証
 - ✓ 水素同位体分離システム
 - ✓ 原型炉用トリチウム除去システム

トリチウムを用いないと最終的な技術検証ができない項目が多く、大量トリチウム取扱施設が必要

設計概要

- ブランケット構造材料にかかる負荷と材料課題
 - ✓ 輻射熱と核発熱による熱応力（熱疲労）の発生
 - ✓ 高エネルギー中性子による損傷導入
 - ✓ 冷却水による腐食（流動加速腐食、中性子照射）
 - ✓ 水漏れ事象による内圧の発生
 - ✓ 電磁力（定常時のマクスウェル力と非定常時のローレンツ力）
- 核融合環境下での材料の健全性実証と構造設計基準案の策定

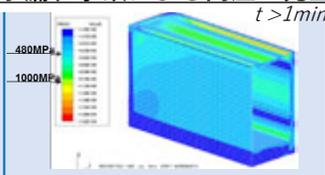
輻射熱と核発熱による熱応力（熱疲労）の発生



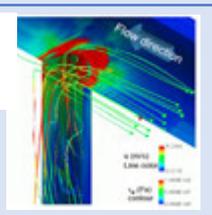
高エネルギー中性子照射による損傷導入



水漏れ事故による内圧の発生



冷却水による腐食
(流動加速腐食)
(中性子照射効果)



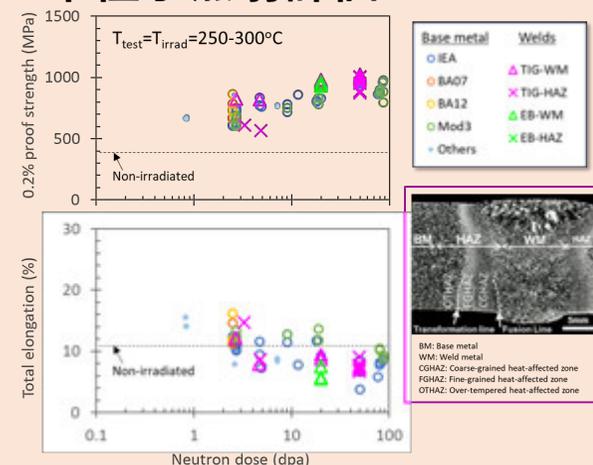
CR1での主な指摘

- 想定される接合被覆部の照射全てをカバーしているわけではなく、加速が必要
- 先進材料の利用方法の絞り込みを先進BLK概念の検討等とともに加速が必要

CR2に向けた取組状況

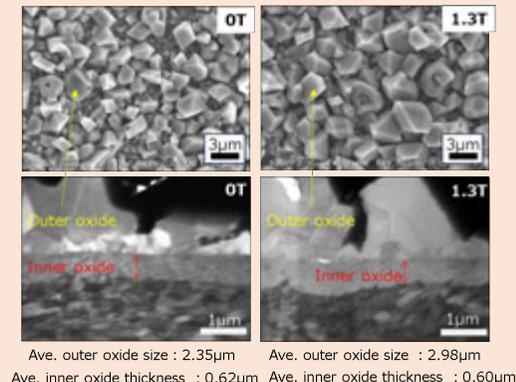
● F82Hと溶接部の中性子照射評価

溶接部の構造健全性を実証するための照射データベースを拡充し、50dpaまでの引張挙動において母材並の性能を確認



● 磁場下での腐食挙動評価

放射性腐食生成物 (ACP) を評価するため腐食データベースの拡充を実施し、磁場は高温腐食環境下での外層酸化物の形成に影響を与える可能性があることが示唆



- 先進BLK概念検討と連携し、先進材料の検討も継続中

照射場確保、照射効果予測・構造設計技術開発の継続

安全基本方針

(1)安全上の目標：

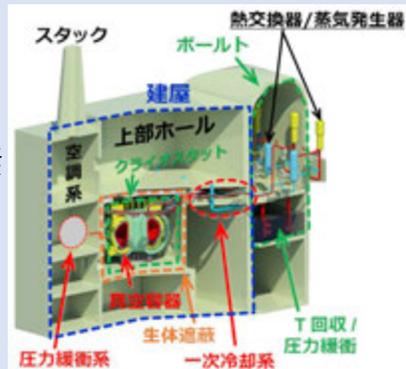
- ・ 公衆及び作業者に放射線障害を及ぼす恐れがないこと

(2)安全確保の原則：ALARA

- ・ 平常時／異常時の被ばくを達成可能な限り低く抑える。

(3)安全設計の基本方針

- ・ 平常時の放射線防護
(1mSv/年、線量目標値: 100 μ Sv/年)
- ・ 事故発生防止(適切な規格基準、耐震性、供用期間中検査)
- ・ 事故影響緩和(コンファインメント施設)
(公衆被ばく < 5mSv/事故)
- ・ 設計基準事象：
事故防止系の破損 +
緩和系の単一故障 +
外部電源無
- ・ 深層防護と多重障壁による安全設計



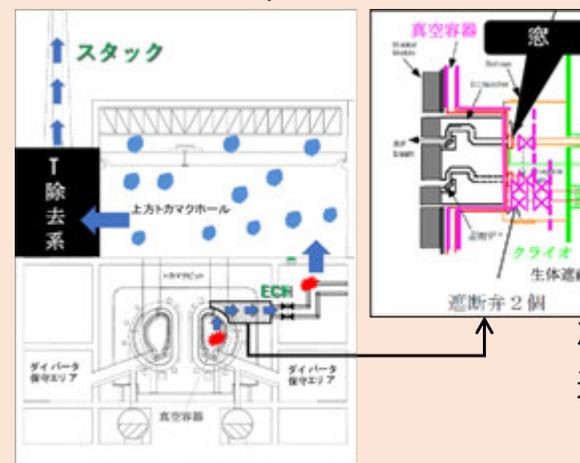
CR1での主な指摘

- 国産の安全評価コードの開発に向けた開発計画の検討が必要

CR2に向けた取組状況

● In-VV LOCAにおける環境影響評価

上部トカマクホールから環境中へ漏えいするシナリオを評価し、敷地境界(1km)での線量率は冷却水の遮断弁設置により1.8 μ Sv/eventまで低減可能



冷却水消失時間: 12分
遮断弁の動作時間: 30秒

● 定期交換機器の放射化物量と埋設処理区分

有害核種の浅地中移行解析の結果、**全ての廃棄物を浅地中処分** (L2: コンクリートピット) できる見通し

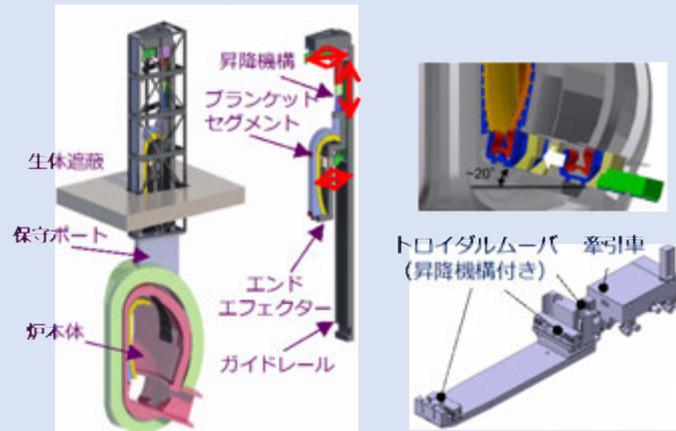
● 国産の安全評価コードの開発

日本の風土に適した環境トリチウム拡散評価コードの開発を開始

安全性ガイドラインや安全法令規制予備検討の加速が必要

設計概要

- 炉内機器は炉内から搬出してホットセルで保守
- 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として交換
- 4 並行作業で期間短縮を検討
- 稼働率～70% (運転 2 年、準備 2 月、保守 8 月)

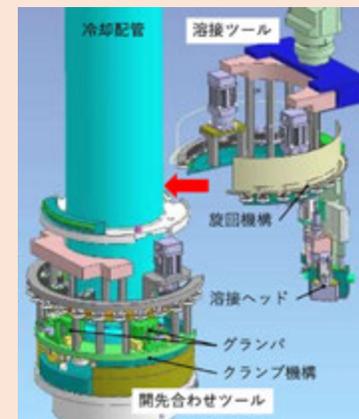
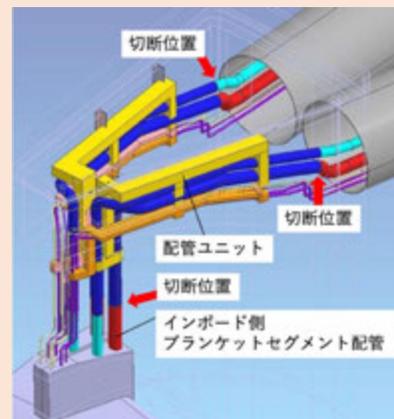


CR1での主な指摘

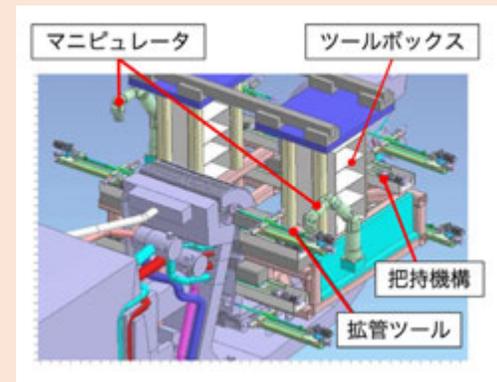
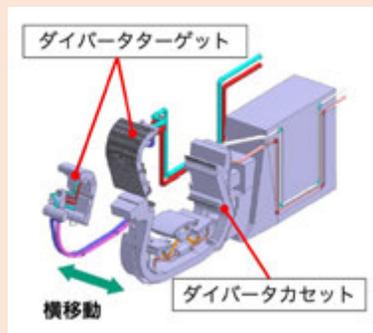
- 基本概念設計の中から抽出された技術課題 (DIV やバックプレートの再利用構造、ホットセル機器など) の詳細検討
- 炉構造と遠隔保守機器の設計統合など、加速が必要

CR2に向けた取組状況

- 配管支持構造及び溶接ツールの設計検討



- ホットセルにおけるダイバータターゲット交換の合理化に向けた炉構造及び機器の設計検討



大規模保守技術開発設備の検討は未着手

設計概要

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
ロコスキーコイル

プラズマ燃焼コントローラー

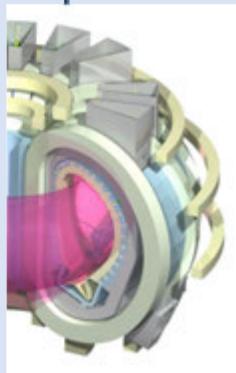
ペレット

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



CR1での主な指摘

すべて順調(主担当項目はなし)

- ✓ 原型炉で必要な計測量を整理し、強い中性子照射下で利用可能な計測装置候補をリストアップ
- ✓ 中性子照射施設の確保

CR2に向けた取組状況

● 計測制御ワーキンググループ活動

必要な計測制御の仕様と原型炉全体との整合性を確認し、それらの実現性と課題、今後の研究開発戦略を検討。計測器開発として必要な中性子照射仕様を整理。

※主査：江尻晶(東大)、幹事：坂本宜照(QST)



QST-M-43

原型炉計測制御ワーキンググループ 報告書

Working group report on
Diagnostics & Control for fusion DEMO

原型炉設計合同特別チーム
Joint Special Design Team for Fusion DEMO

国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構
National Institutes for Quantum Science and Technology

主なR&D課題

- ✓ 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

※太字は達成目標に直接関係するもの

アクションプラン項目	CR1での主な指摘	CR2に向けた主な取組(上段)と課題(下段)
1. 超伝導コイル	設計のブラッシュアップと試作試験による検証	<ul style="list-style-type: none"> ● コスト低減概念の検討 ✓ 巻線及び導体の試作・試験の早急な実施
2. ブランケット	円筒型ブランケット設計の詳細化と原型炉TBM概念検討の継続	<ul style="list-style-type: none"> ● 円筒型ブランケット概念の簡素化 ✓ 製作・運用コスト低減に向けた検討
3. ダイバータ	シミュレーションの比較と実験的検証、補修技術の検討	<ul style="list-style-type: none"> ● モデルの改良と詳細な機器設計検討 ✓ 高密度ダイバータプラズマ試験設備の概念設計
4. 加熱・電流駆動システム	セシウムフリー負イオン源検討の継続と原型炉用ECシステムの検討	<ul style="list-style-type: none"> ● 原型炉用NB及びECシステムの検討 ✓ 開発試験施設の検討
5. 理論・シミュレーション	DIVや炉心プラズマ統合SMCのJT-60SA・ITER実験への適用、検証及び継続開発	<ul style="list-style-type: none"> ● コード開発やシミュレーション研究の継続 ✓ 人的資源の増強と計算機資源の継続的確保
6. 炉心プラズマ	運転シナリオやELM抑制が可能な運転領域の適用可能性の検討	<ul style="list-style-type: none"> ● 運転シナリオやELM抑制法の検討 ✓ 実現性の見通し向上、炉心パラメータ最適化等
7. 燃料システム	「D/T混合固体ペレット入射供給技術の開発」の加速	<ul style="list-style-type: none"> ● 燃料サイクルシミュレータに向けた検討 ✓ 大量トリチウム取扱施設の概念設計
8. 核融合炉材料と規格・基準	接合被覆部の照射データの拡充と先進材料の絞り込み	<ul style="list-style-type: none"> ● 溶接部照射研究及び磁場下腐食挙動評価 ✓ 照射場確保、照射効果予測・構造設計技術開発
9. 安全性	国産の安全評価コードの開発に向けた開発計画の検討	<ul style="list-style-type: none"> ● 事故時の環境影響評価等 ✓ 安全性ガイドライン、安全法令規制予備検討
10. 稼働率と保守	遠隔保守機器の詳細検討及び炉構造と保守機器の統合設計	<ul style="list-style-type: none"> ● 配管処理機器及びホットセル機器の検討 ✓ 大規模保守技術開発設備の検討
11. 計測・制御	利用可能な計測装置候補をリストアップと中性子照射施設の確保	<ul style="list-style-type: none"> ● 計測制御の仕様とその開発戦略の検討 ✓ 運転制御シミュレーターの開発・検証等

項目	第1回中間C&Rまでの達成目標	第2回中間C&Rまでの達成目標	原型炉段階への移行判断
① ITERによる自己加熱領域での燃焼制御の実証	<ul style="list-style-type: none"> ITERの技術目標達成計画の作成。 	<ul style="list-style-type: none"> ITER支援研究のITER技術目標達成計画への反映。 	<ul style="list-style-type: none"> ITERによる$Q=10$程度以上の(数100秒程度以上)維持と燃焼制御の実証。
② 原型炉を見据えた高ベータ定常プラズマ運転技術の確立	<ul style="list-style-type: none"> ITER支援研究と定常高ベータ化準備研究の遂行とJT-60SAによる研究の開始。 	<ul style="list-style-type: none"> JT-60SAによる高ベータ非誘導電流駆動運転の達成。 ダイバータを含む統合シミュレーションのJT-60SA等による検証。 JT-60SAによる原型炉プラズマ対向壁と整合したダイバータ研究計画の作成。 	<ul style="list-style-type: none"> ITERによる非誘導電流駆動プラズマの実現、及びITER燃焼制御の知見を踏まえた統合シミュレーションにより、非誘導定常運転の見通しを得る。 JT-60SAによる原型炉プラズマ対向壁と整合した無衝突領域での安定な高ベータ($\beta_N = 3.5$以上)定常運転領域の実証。
③ ITERによる統合化技術の確立	<ul style="list-style-type: none"> ITER超伝導コイルなど主要機器の製作技術の確立とJT-60SAの建設による統合化技術基盤の確立。 	<ul style="list-style-type: none"> ITERの運転開始に必要なITERの機器製作・据付・調整に関する統合化技術の取得。 	<ul style="list-style-type: none"> ITERの運転・保守を通じた統合化技術の確立。安全技術の確認。
④ 原型炉に関わる材料開発	<ul style="list-style-type: none"> 低放射化フェライト鋼の原子炉照射データを80dpaレベルまで取得し、核融合と類似の中性子照射環境における試験に供する材料を確定。 核融合中性子源の概念設計の完了。 	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉照射による低放射化フェライト鋼の重照射データの検証を完了。 原子炉照射によるブランケット及びダイバータ機能材料の初期照射挙動の評価、及びリチウム確保技術の原理実証。 核融合中性子源の建設に向けた研究開発の実施、及び材料照射データ取得計画の作成。 	<ul style="list-style-type: none"> 構造設計基準策定 パイロットプラント規模でのリチウム確保技術の確立。 核融合中性子源の建設開始、及び核融合中性子源による低放射化フェライト鋼、並びに、ブランケット及びダイバータ機能材料の照射データ取得計画の作成。
⑤ 原型炉に関わる炉工学技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ダイバータ開発指針の作成。 超伝導コイル要素技術等、原型炉に向けて早期着手を必要とする炉工学開発計画の作成。 コールド試験施設によるブランケット設計に必要なデータの取得。 	<ul style="list-style-type: none"> JT-60SA、LHD等によるプラズマ対向材特性を含むダイバータ関連データの取得。 超伝導コイル、ダイバータ、遠隔保守、加熱・電流駆動、燃料システム、計測・制御等の中規模またはプラント規模の炉工学開発計画の作成、並びに、これらの開発試験施設の概念設計の完了。 発電ブランケットの基盤技術整備、並びにITER-TBM1号機製作と実機での安全性確認試験の完了。 	<ul style="list-style-type: none"> 開発試験施設での成果及びITER、JT-60SA等の実績を踏まえた、超伝導コイル、ダイバータ、遠隔保守、加熱・電流駆動、燃料システム、計測・制御等の原型炉工学設計を裏付ける炉工学技術の確立。 ITERによるトリチウム回収及び核融合中性子源によるトリチウム挙動評価技術の検証。
⑥ 原型炉設計	<ul style="list-style-type: none"> 原型炉の全体目標の策定。 原型炉概念設計の基本設計。 炉心、炉工学への開発要請の提示。 	<ul style="list-style-type: none"> 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を見通しにも配慮した原型炉概念設計の完了。 工学設計の技術基盤確立に向けた炉心、炉工学開発課題の確定と開発計画の作成。 	<ul style="list-style-type: none"> 社会受容性と実用化段階における経済性を見通しを得て、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。 安全規制・法令規制の方針策定。
⑦ 社会連携	<ul style="list-style-type: none"> アウトリーチヘッドクォータの設置。 アウトリーチ活動推進計画の立案 	<ul style="list-style-type: none"> アウトリーチ活動の推進と社会連携活動の実施。 	<ul style="list-style-type: none"> 原型炉建設・運転に向けた社会連携活動の実施。