

原型炉実現に向けた基盤整備（研究開発） 令和6年度成果概要 令和7年度計画(案) について

量子科学技術研究開発機構

- 令和6年度より、原型炉実現に向けた基盤整備（研究開発）として、アクションプラン項目別に公募を実施するなど、大学や企業等の更なる参画を促すための仕組みを導入
- 本日は、「令和6年度に優先的に実施すべき研究開発項目」（下表）の成果概要及び「令和7年度に優先的に実施すべき研究開発項目（案）」を報告

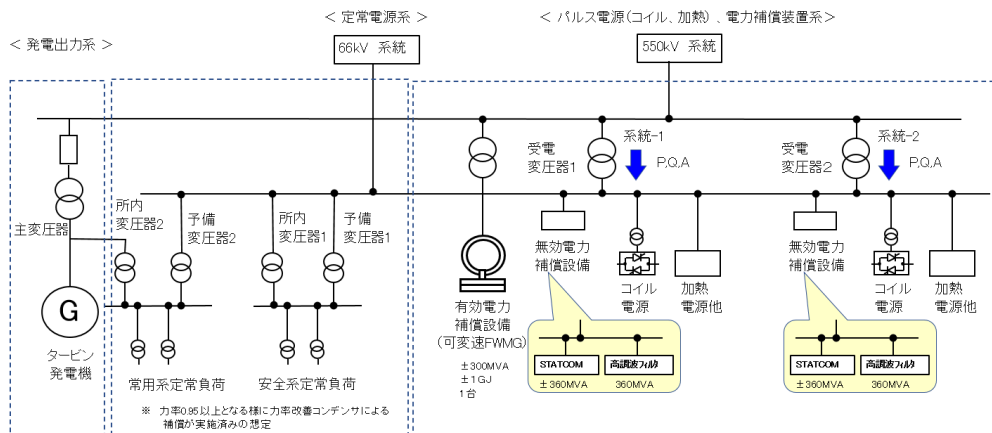
アクションプラン項目	研究開発項目	QST	大学・産業界等への公募
0. 炉設計	概念設計及び機器・設備の製作性検討と開発項目の抽出 小規模技術開発	◎	◎
1. 超伝導コイル	矩形導体機械試験 高強度構造材料の試作・試験、超伝導導体の試作・試験	◎	◎
2. ブランケット	ブランケット・リミターシステムの概念設計		◎
3. ダイバータ	定常高密度プラズマ実験装置に関する検討		◎
4. 加熱・電流駆動システム	原型炉用高周波負イオン源の開発		◎
5. 理論・シミュレーション			
6. 炉心プラズマ			
7. 燃料システム	燃料システム安全試験施設に関する技術・設計検討	◎	
8. 核融合炉材料と規格・基準	A-FNSの加速器・照射モジュール・試験施設等に関する工学設計、 核融合炉構造材料の標準化活動、構造規格に関する予備検討	◎	
9. 安全性	安全性評価コードの開発		◎
10. 稼働率と保守	保守・保全計画の検討	◎	
11. 計測・制御	原型炉に向けた計測器の検討・開発		◎
12. サイト整備			
13. 社会連携			

成果概要

- ITERサイズの原型炉概念と多段階開発戦略を提示
- 原型炉電源システム構成・配置：系統接続を念頭に必要な電力補償設備を検討。ITERよりも大電流のTFコイル用の直流遮断スイッチの開発が必要
- ダイバータやリミターのプラズマ対向ユニットに低放射化フェライト鋼(F82H)冷却配管を採用するため、F82Hとタングステンモノブロックとの接合技術開発を実施

原型炉の電源システム構成・配置検討

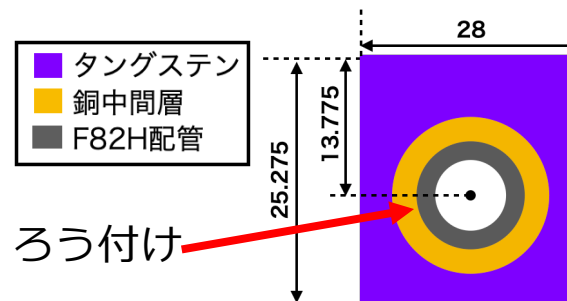
コイル電源、加熱電源立ち上げ時の急峻で大きな変動、プラズマ制御時の急峻で小さな変動においても、**変電所母線の電圧が $\pm 2\%$ 、周波数変動が $\pm 0.05\text{Hz}$ 、近接発電機出力端の電力変動 $\pm 4\%$ 以内に収まるよう**に原型炉サイト内に補償装置を設置



プラズマ対向ユニット接合技術開発

耐中性子プラズマ対向ユニットに必要なタングステンモノブロックとF82Hとの接合技術開発に着手

- ✓ 平板要素試験体による銅中間層を用いたろう付け接合を実施
- ✓ モノブロック試験体を試作し、高熱負荷照射による強度評価試験を実施予定

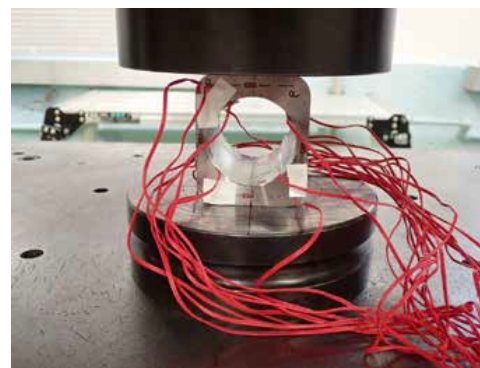


成果概要

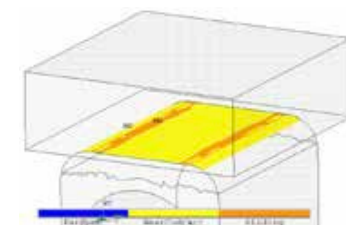
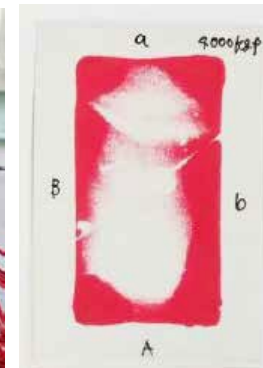
- トロイダル磁場コイル (TFコイル) のコスト低減オプションとして検討中の矩形導体を用いたレイヤー巻き方式における「2段曲率導体」による絶縁部の応力低減効果を検証するため、矩形導体の機械試験を実施し導体角部の形状効果を評価
- 原型炉TFコイル用の高強度低温鋼の開発として、候補組成の小溶解材を試作し、極低温での機械試験を実施

矩形導体機械試験

- 矩形導体単体およびTFコイル導体巻線部を模擬した2段曲率矩形導体のスタックサンプルに対し圧縮試験により絶縁部の歪を計測
- FEMによる数値解析結果と比較して妥当性を検証し、導体角部の形状の効果を評価



実機予備試験 (ジャケットのみ)



FEM解析による
再現・検証

高強度構造材料の試作・試験

- 原型炉TFコイル用の高強度構造材料の開発に向け、これまでの研究開発成果から、候補となりうる組成に基づき、5種類の小溶解材(高Mn材および高Cr材)を試作、極低温(4K)での機械試験を実施し、それぞれの特性を評価

委託研究：原型炉超伝導コイル用超伝導導体の試作・試験（物質・材料研究機構）

目的

高電磁力下で高い導体電流を確保するための高強度・高性能超伝導線材の試作および極低温での特性試験を実施するとともに、高電磁力に耐えうる短ピッチ撚線成形試験を実施し、原型炉用超伝導コイル導体の開発に資する。

実施内容

- ✓ 革新的高強度Nb₃Sn線材の試作
- ✓ 高強度Nb₃Sn線材の耐力基礎データ取得
- ✓ 短ピッチ(高撚り込み率)撚線成形試験及び評価

主要成果：

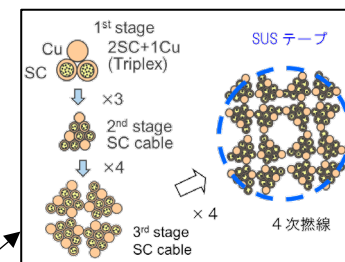


母材強化技術(NIMS特許)もしくはCu-Nb補強技術(古河電工)を用いた革新的高強度Nb₃Sn線材を試作

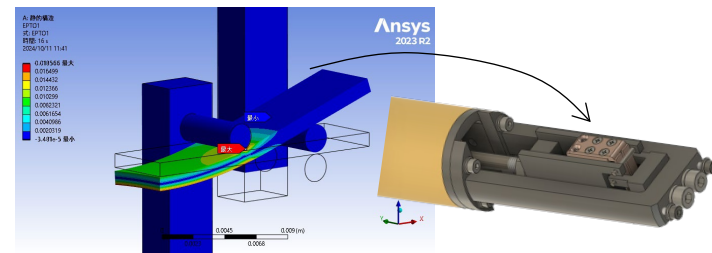


素線高強度化による原型炉導体の製造実現性を実規模レベルで検証

原型炉を想定し高撚り込み率(角度)を模擬した4次撚り集合導体を試作



冷媒中で線材に曲げ応力を加えながらI_c測定を行うIn-situ曲げ印加I_c測定プローブを開発 (Nb₃Sn素線試験用としては世界初)



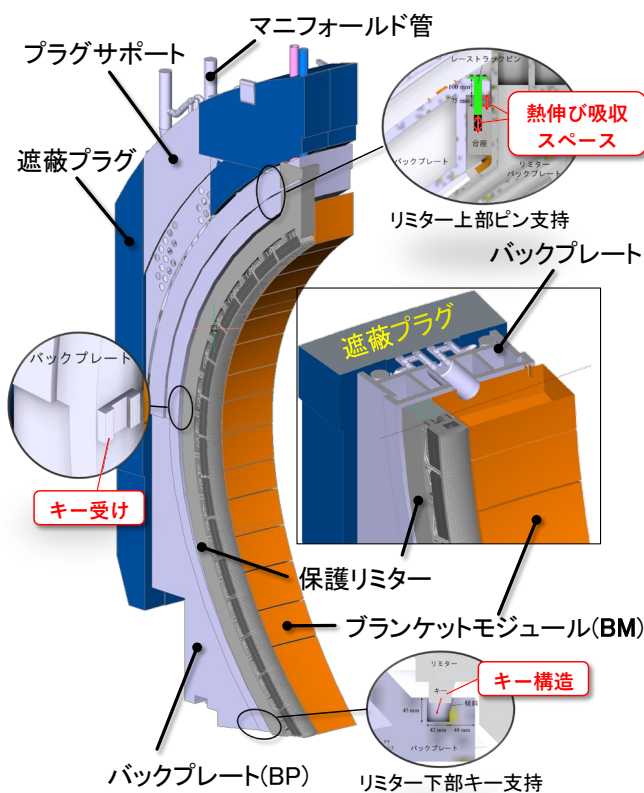
今後の予定：

- ・ 圧縮成型後の熱処理線材に対しI_c実測データを取得し、導体性能評価
- ・ 原型炉を想定した高撚り込み率(角度)の製作限界を見極め

成果概要

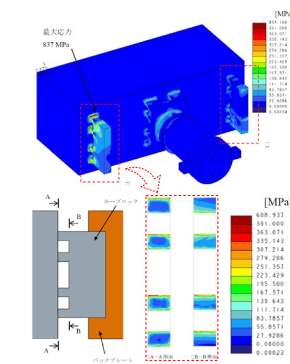
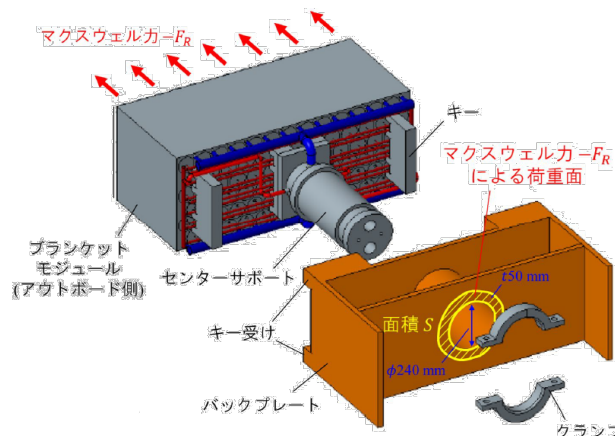
- ブランケットモジュール及び保護リミターに負荷されるマクスウェル力を評価し、遮蔽体であるバックプレートへの支持構造を検討
- 主要な負荷条件（自重、熱荷重（熱伸び）、電磁力）を考慮したブランケットセグメント全体モデルを構築し構造解析を実施

ブラケットセグメント&リミター支持の構造

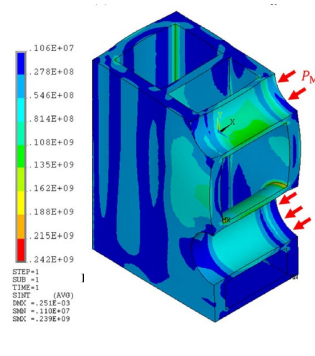


- ブランケット及び保護リミターの構造材料には、低放射化フェライト鋼（F82H）を採用するが、磁性体であるため原型炉の磁場環境下においてマクスウェル力が負荷される。
 - 真空容器内上部に設置したブランケットモジュールの位置で最大になることが分かった。
 - ディスラプション時に負荷されるローレンツ力も考慮してブランケットモジュールの支持構造検討

外側ブランケットモジュールの支持構造



ブランケットモジュール支持構造解析



バックプレート構造解析

委託研究：定常高密度プラズマ実験装置に関する検討（筑波大学）

目的

アクションプランに記載されている定常高密度プラズマ発生装置を想定し、第2回中間C&Rまでに基礎物理過程（非接触ダイバータの生成と制御に必要な物理機構等）の解明を目指す。物理モデルの高度化などを通じて、ダイバータプラズマシミュレーションコードの高度化に反映するための定常高密度プラズマ実験装置に関する検討を行う。

実施内容

- ✓ ダイバータシミュレーションコードによるパラメータ感度解析
- ✓ 非接触プラズマ物理モデルの高度化
- ✓ ダイバータ級定常高密度プラズマ実験装置の検討
- ✓ 原型炉ダイバータ模擬プラズマによる非接触化の物理機構の知見取得
- ✓ 原型炉開発における非接触プラズマ及びPWI現象に関する現状の調査

主要成果：

ダイバータシミュレーションコードによるパラメータ感度解析

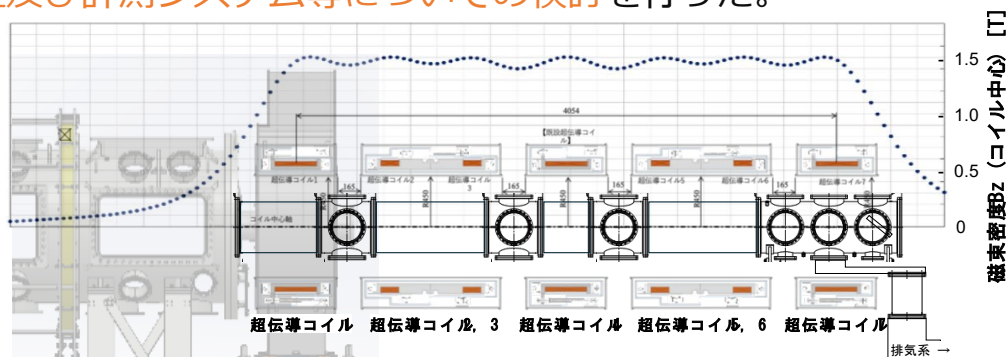
ダイバータシミュレーションコード(DISCOVER)による感度解析を行い、シミュレーション結果に影響を及ぼす重要なパラメータや物理過程を抽出するため、水素分子密度に対する体積再結合に関する感度解析を行い、水素分子密度増加に伴い H_3^+ イオンが主となり、分子活性化再結合が主な再結合過程となることが分かった。

非接触プラズマ物理モデルの高度化

水素原子密度の増加に伴い接触プラズマから電子-イオン体積再結合による非接触プラズマに遷移する。この際、荷電交換による運動量損失が本質的な役割を果たす。

ダイバータ級定常高密度プラズマ実験装置の検討

ダイバータ級定常高密度プラズマ実験装置について、1.5Tのほぼ一様な磁場中をプラズマが移送されてターゲットに入射するシステムにおける超伝導コイル配置と磁場リップル、超伝導巻き線への電磁力など装置成立性及び計測システム等についての検討を行った。



ダイバータ模擬部の超伝導コイル配置と磁場リップルの空間分布

委託研究：原型炉用NBIに向けたRF負イオン源の特性評価（核融合科学研究所）

目的

原型炉用NBIの実現に向けてRF負イオン源の原型炉への適用性を調べるための研究を行う。特に高効率化に向けて負イオン源の低ガス圧運転領域の動作特性を調査する。

実施内容

- ✓ RF負イオン源を対象として通常ガス圧領域から低ガス圧領域（0.3Pa以下）での動作特性を把握する。
- ✓ FA負イオン源を対象に同様の動作特性データを取得する。
- ✓ 両者を比較することで低ガス圧運転とRF負イオン源自身の課題の切り分けを行う。

主要成果：

RF負イオン源の動作特性

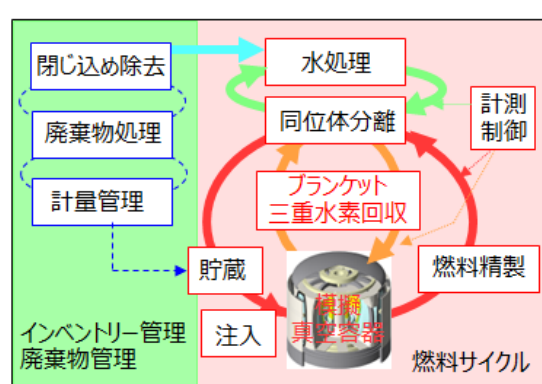
- NIFS-NBTSのFA/RF Hybrid負イオン源のRF運転において、RFパワー(20-75kW)と導入ガス圧(0.2~0.8Pa)の範囲でデータを取得
 - ✓ 軽水素では~0.3Paまで、重水素ではより低ガス圧（~0.2 Pa）まで放電可能
 - ✓ 重水素の方が負イオン密度が~1.3倍高い
- 重水素の方が良好な動作特性を持つ可能性を示唆
- 今後FA運転を行い、FAとRF運転で動作特性を比較して低ガス圧運転とRF負イオン源の課題の切り分けを行う。

今後の予定：

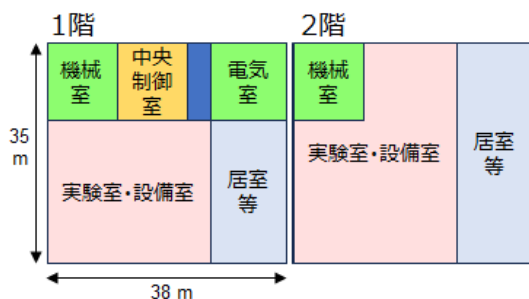
次年度以降、本年度の結果を踏まえて原型炉に向けた更なる低ガス圧化（~0.1 Pa）を目指し、RF負イオン源の磁場配位と放電容器構造の最適化を進める。

成果概要

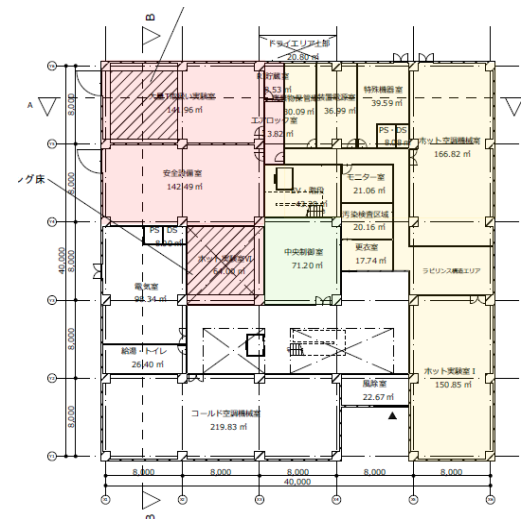
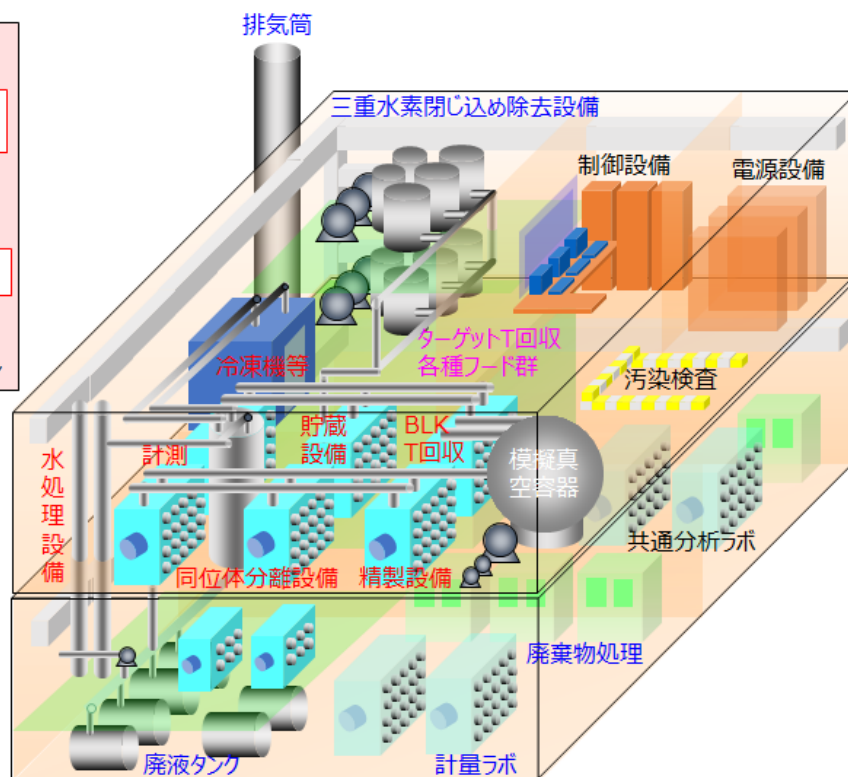
- 原型炉の運転に不可欠な高濃度の三重水素水の処理システムや燃料ペレット製造に関する技術開発を実施するR&D施設は存在していない。
- これら技術開発の推進に向けて、QST六ヶ所フュージョンエネルギー研究所に「燃料システム安全試験施設」を建設するため、建屋の概念設計を実施した。



設備概念



建屋概略

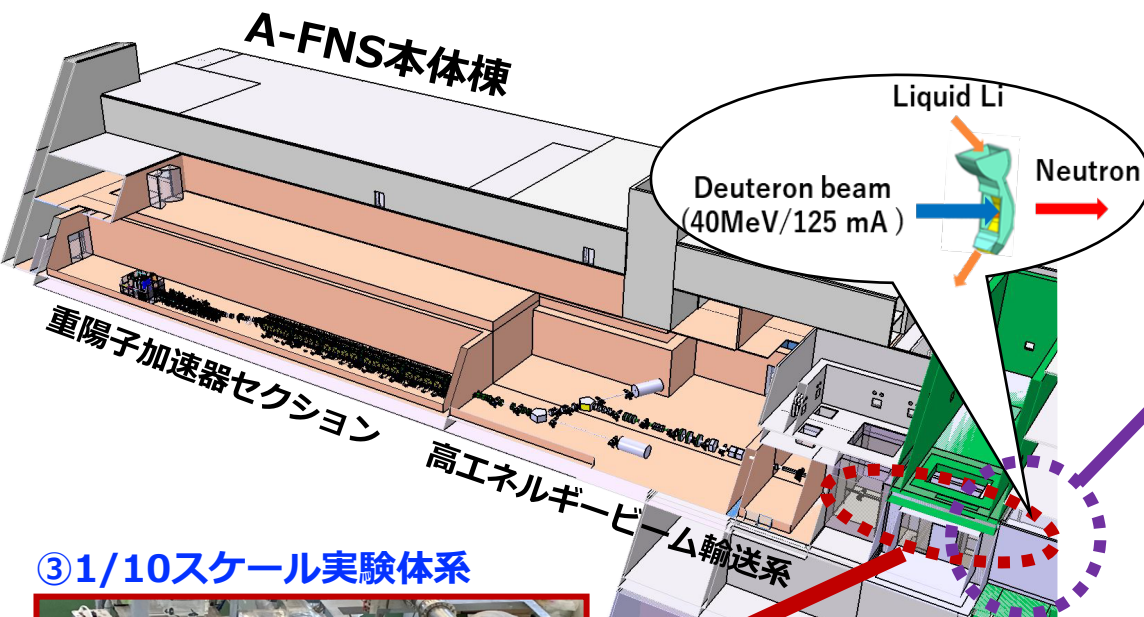


建屋の平面図 (案)

燃料システム安全試験施設の概要

成果概要:

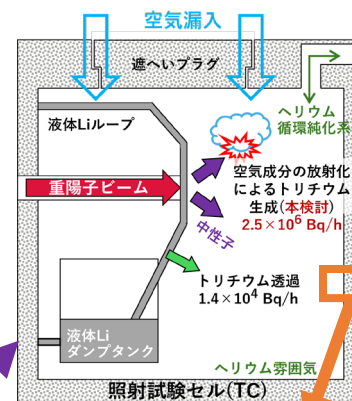
- 照射試験セル(TC)について、①遮へい性能と温度上昇抑制の両面で優位性がある新たな遮蔽構造を提案し、②TC内三重水素インベントリを評価して除去系への要求を明らかにした。
- 加速器設計については、③液体Liターゲット表面からのガス放出率や加速器側へのLi流入量を1/10スケール実験体系で明らかにし、高エネルギービーム輸送系の真空排気設計に反映した。
- A-FNS応用利用の一つとして、MeV級の連続ビームという中性子源として類を見ない特徴を活かした高速中性子イメージング施設の概念を提示した。



③ 1/10スケール実験体系

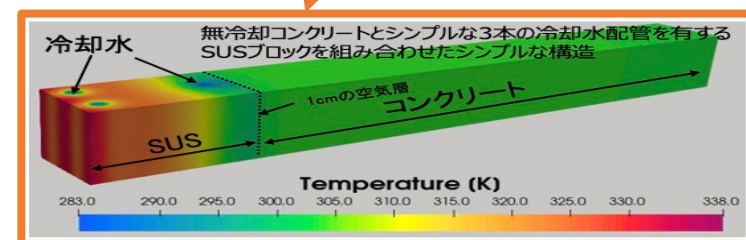


② TC内への空気漏入、トリチウム生成・移行の概念図



✓ 負圧に維持されるTC内への漏入空気の放射化による三重水素生成を評価。

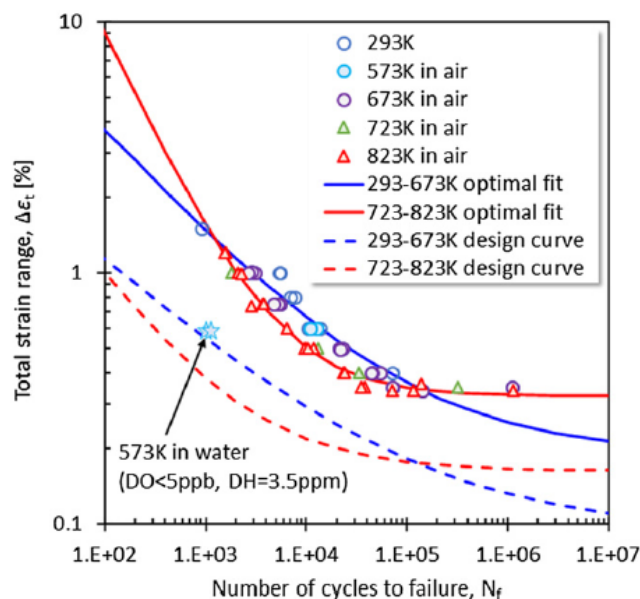
➤ 従来支配的と考えられていた液体Liループから透過・移行する三重水素量より2桁高いことが判明。



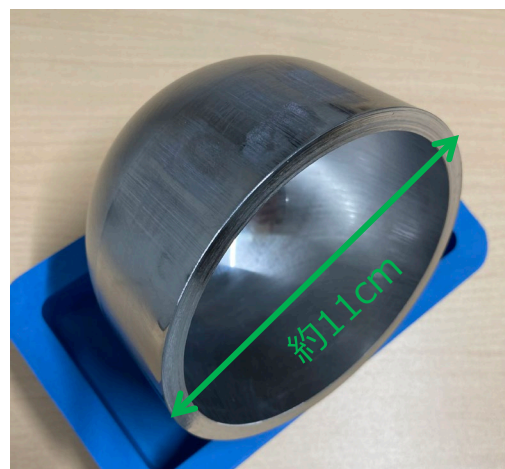
① コンクリート前面に85cm厚SUS/水構造体を配置した遮へい構造

成果概要：

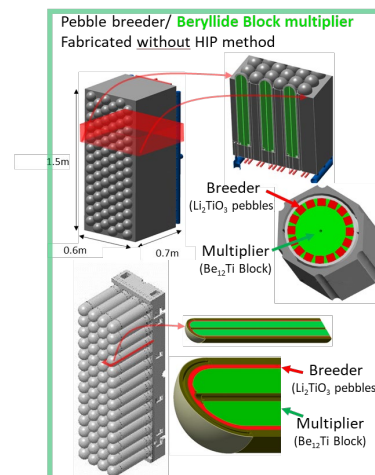
- 低放射化フェライト鋼F82Hの標準化（規格化）に向けて、国内鉄鋼メーカーとの協議のもと、材料データベース／ハンドブックの分析による課題抽出とラウンドロビン試験計画の検討を実施。関連して疲労データベースの拡充が進展。
- F82Hの部材試作を通じて適用する技術の再現性評価とデータ拡充を実施。特にプレス加工による薄肉半球殻の製作性に良い見通しを得た。



低放射化フェライト鋼F82Hの設計疲労線図の例
T. Nozawa et al., Nucl. Fusion **61** (2021) 116054



従来：ブロックからの削り出し
今回：薄板からのプレス加工
→材料特性評価を進め、材料規格に係る調達仕様の策定を目指す



原型炉ブランケットの設計例

その他の活動：

F82Hの大型溶解（7.5t規模）による試作や材料試験用鋼管の製作により、品質管理に係る繰り返し性評価を実施

R6年度：主に高温データの拡充

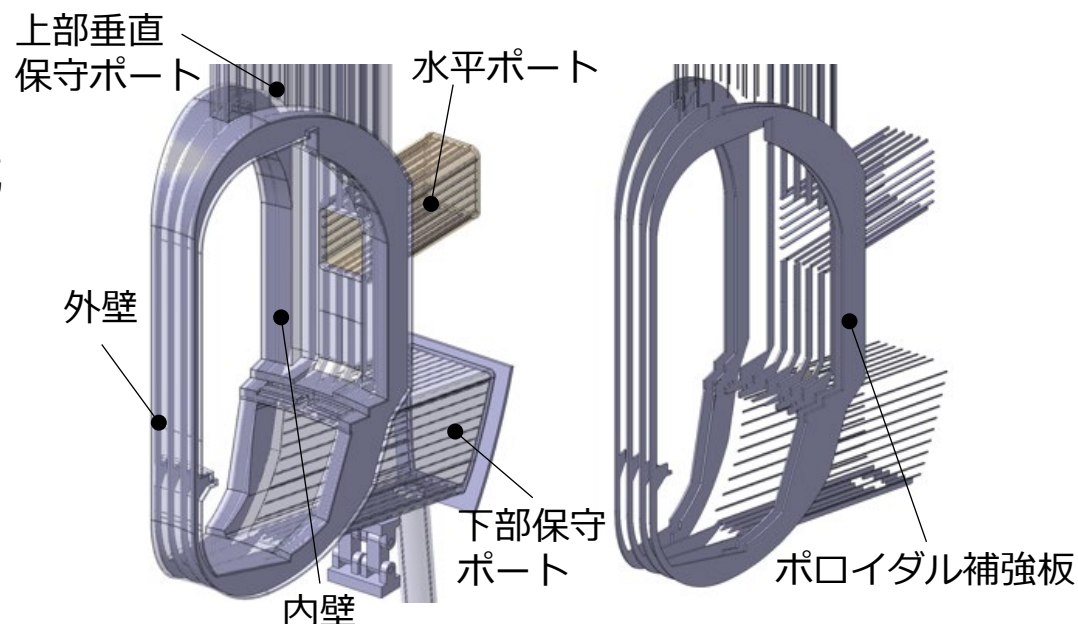
→材料規格に係る基準値の検討（特に信頼性評価）が進展
※IAEAで検討を進める微小試験片ガイドライン策定にも貢献

成果概要： 構造規格に関する予備検討

- 三重水素の閉じ込め境界である真空容器は、運転中の構造健全性を維持するために「材料」「設計」「製作検査」「維持」に関わる各プロセスを一つのパッケージとした構造規格とするため、これらの技術内容を明確にする基本設計を進め、D型の真空容器構造を明確にした。

真空容器構造の特徴

- 遮蔽を内蔵した2重壁構造（溶接構造）
内・外壁及びポロイダル補強板より構成
- 2重壁内の遮蔽隙間が冷却水の流路
- ポート開口部（アクセスポート）
上部垂直保守ポート：16
下部保守ポート：16
水平ポート：8



今後の予定

基本設計に基づいて、真空容器内に取り付けられる大型重量炉内機器（総重量 数千トン、最大10m高さ）の支持構造などを考慮した2重壁構造を最終化し、各プロセスの規格内容を検討する。

委託研究：三重水素拡散を想定した環境・生物の評価モデルの構築および効率的な環境計測手法の開発（弘前大学）

目的

原型炉から微量に環境中へ放出される三重水素拡散について日本の地理・気象条件を考慮した物理モデル（OBTを含む）を構築する。

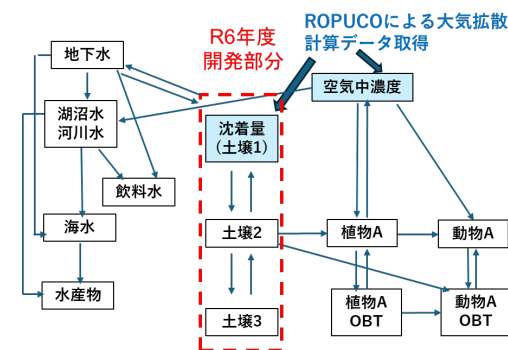
（OBT：有機結合型三重水素）

実施内容

- ✓ 大気拡散モデル(ROPUCO)コードと既存コード間でのベンチマーク試験の実施
- ✓ 長期影響評価のための陸水域移行コード（コンパートメントモデル）の開発
- ✓ 青森県内三重水素濃度調査
- ✓ ヒト正常細胞への三重水素取込み実験による生物影響評価実験を開始

主要成果：

- 大気拡散モデル(ROPUCO)コードを用いた短期影響評価を検証するため、**既存コード（UFOTRI, ACUTRI）とのベンチマークを実施。**
- ✓ ROPUCOコードで評価したHTO放出（1g, 地上、風速1m/s、6時間）による被ばく線量率は、**AUTRIとUFOTRIでの評価の中間の値**
- 青森県六ヶ所村の**環境水中三重水素濃度分布データ**を取得（2024年10月、10地点）
- ヒト正常上皮細胞を用いた**三重水素取込み量と標識化合物の関係のデータ**を取得



今後の予定：

陸水域移行コードと併せて、日本固有の条件における短期/長期的な公衆線量評価を予定

成果概要

- 建屋の概念設計の一環として、安全要件である閉じ込め機能や放射線環境下で行われる遠隔保守条件を満足する、「トカマク本体建屋」及び「ホットセル建屋」内部の基本配置について検討し、地震荷重などの条件を考慮した本格的な建屋詳細設計の前提条件となる基本仕様及び建屋図面（一次案）を整備した。

トカマク本体建屋

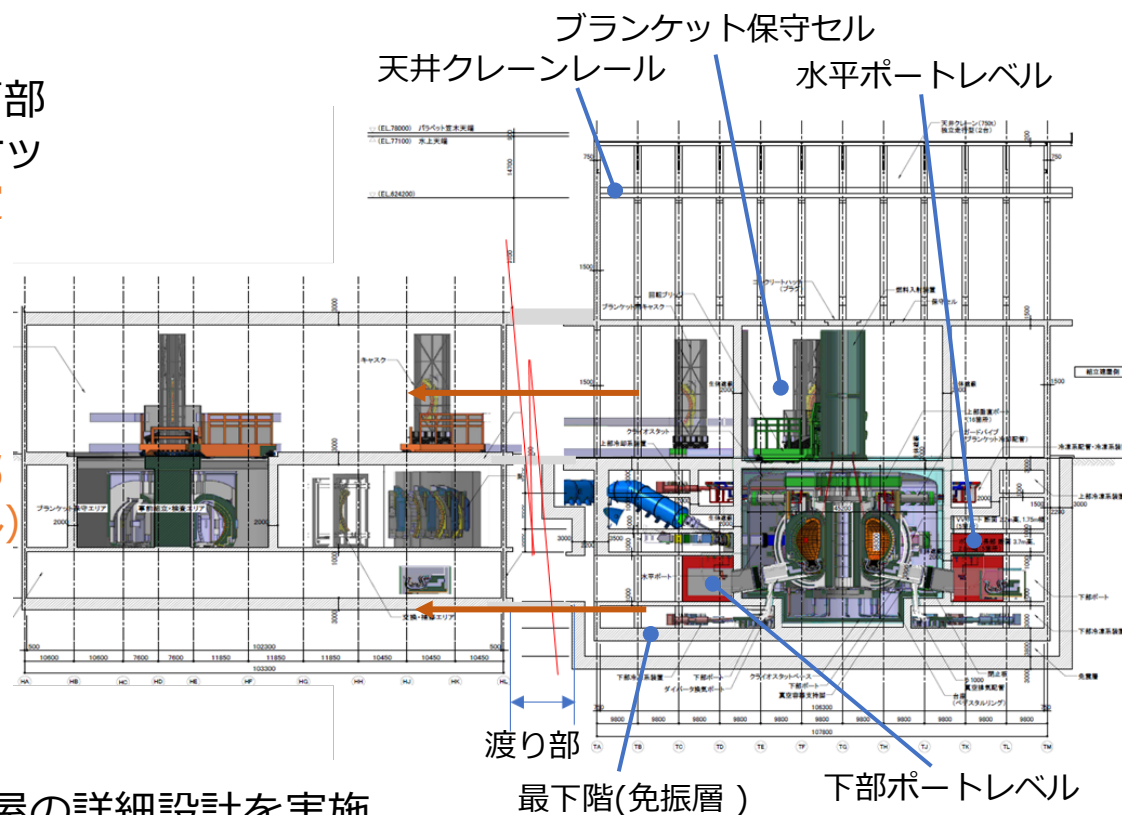
- ✓ 保守時のキャスクや設備の高さを基準に、下部ポートレベル、水平ポートレベル、ブランケット保守セル等の階高を含め、建屋寸法を設定
- ✓ 免震構造

ホットセル建屋

- ✓ 除染、保管、保守保全(交換/補修)、廃棄物処理(減容)のプロセスごとに区画
- ✓ 炉内機器の搬送する階高(ダイバータ：下部ポートレベル、ブランケット：最上階レベル)と建屋寸法を設定
- ✓ 耐震構造

今後の予定

課題となる建屋間の「渡り部構造」の設計や建屋の詳細設計を実施



委託研究：原型炉のための線積分トムソン散乱法の開発研究（東京大学）

目的

原型炉への適用が困難と考えられてきたトムソン散乱法に対し、新たに提案された線積分トムソン散乱法の実証実験により性能評価するとともに、原型炉に適用可能な光学系の概念設計を行う。

実施内容

- ✓ 光学系の設計製作と大気中での立体角測定と計算との比較
- ✓ 入射ビームの最適化
- ✓ 磁場閉じ込め装置（TST-2）への設置
- ✓ 窒素を用いたラマン散乱測定
- ✓ プラズマ測定と従来型トムソン散乱測定との比較
- ✓ 原型炉における概念設計

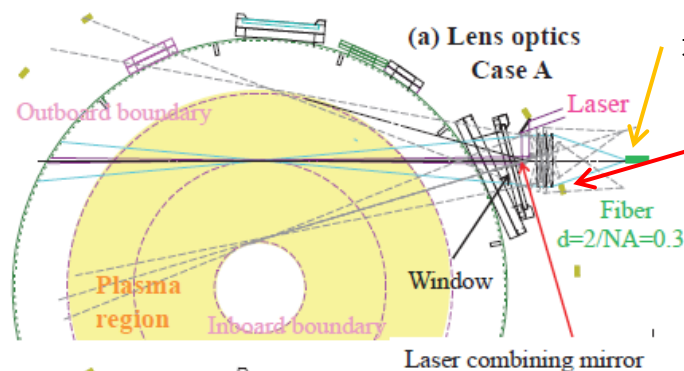
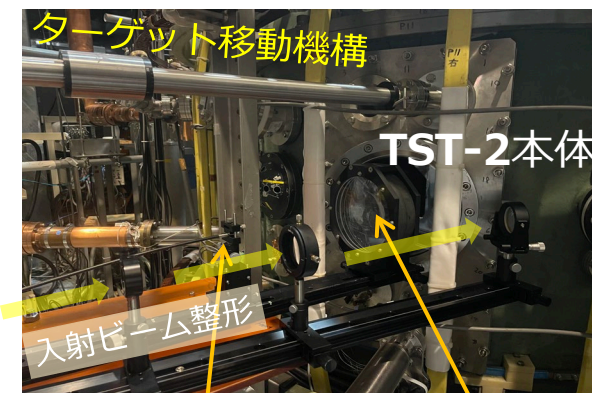
主要成果：

光学系の設計・製作、大気中での試験

- ✓ 大気中で白色拡散板を模擬ターゲットとした散乱実験により視線方向の実効的立体角分布を取得
- ✓ 光線追跡計算との比較：ミスアライメントに対する許容度は計算通り

磁場閉じ込め装置への設置と入射ビームの最適化

- ✓ TST-2球状トカマク装置に光学系を設置し、入射ビーム整形による最適化を実施



光ファイバー

集光レンズ

TST-2球状トカマク平面図

アクションプラン項目	研究開発項目	QST	大学・産業界等への公募
0. 炉設計	原型炉概念設計	◎	
1. 超伝導コイル	高強度構造材料の試作・試験、超伝導導体の試作・試験		◎
2. ブランケット	先進ブランケット概念検討・小規模R&D		◎
3. ダイバータ	定常高密度プラズマ実験装置に関する検討		◎
4. 加熱・電流駆動システム	原型炉用高周波負イオン源の開発		◎
5. 理論・シミュレーション	炉心プラズマ統合コード開発		◎
6. 炉心プラズマ			
7. 燃料システム			
8. 核融合炉材料と規格・基準	A-FNSの加速器・照射モジュール・試験施設等に関する工学設計 核融合炉構造材料の標準化活動 構造規格に関する予備検討、ACP評価コード開発	◎ ◎	◎
9. 安全性	安全性評価コードの開発		◎
10. 稼働率と保守	遠隔保守機器の検討		◎
11. 計測・制御	原型炉に向けた計測器の検討・開発		◎
12. サイト整備			
13. 社会連携			