

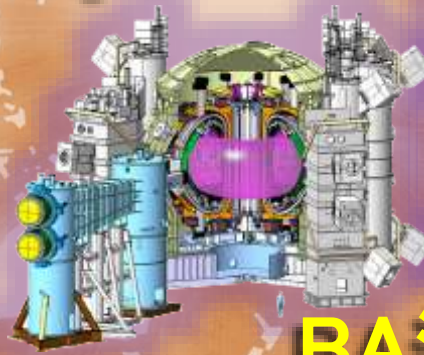
核融合科学技術委員会  
平成29年4月12日（水）



# 量子科学技術研究開発機構における 核融合研究開発の概況



**ITER計画**



## BA活動

幅広いアプローチ活動



量子科学技術研究開発機構  
核融合エネルギー研究開発部門

## BA活動を活用して進める 先進プラズマ研究開発

### JT-60SA計画

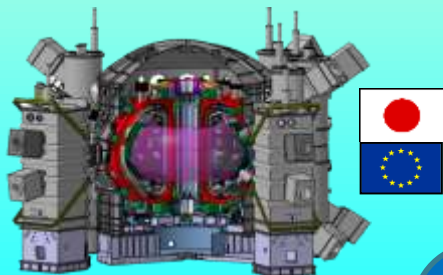
JT-60SAの機器製作及び組立、JT-60SA  
運転のための保守・整備及び調整、JT-  
60SAの運転

### 炉心プラズマ研究開発

統合コードの予測精度向上・拡充、ITER  
の燃焼プラズマ制御やJT-60SAの定常高  
ベータ化研究

(高出力密度定常運転の実証)

国際的に研究開発を主導する人材育成



## 核融合原型炉



## ITER計画の推進

ITER建設活動、ITER計画の運営への貢献、  
オールジャパン体制の構築

(エネルギー増倍率 $\geq 10$ 、長時間維持、核融合出力50万kW)



相互連携・人材流動

## BA活動等による 核融合理工学研究開発

国際核融合エネルギー研究センター(ITER)  
IFERC)事業並びに国際核融合材料照射施設(IFMIF)に関する工学実証及び工  
学設計活動(EVEDA)事業

BA活動で整備した施設を活用・拡充し  
た研究開発

原型炉設計合同特別チームを中心と  
した炉設計・研究開発活動

テストブランケット計画

理論・シミュレーション研究及び情報  
集約拠点活動

核融合中性子源開発



# QST ITER(国際熱核融合実験炉)計画等の概要

○エネルギー問題と環境問題を根本的に解決するものと期待される核融合エネルギーの実現に向け、国際約束に基づき、核融合実験炉の建設・運転を通じて科学的・技術的実現可能性を実証するITER計画及び発電実証に向けた先進的研究開発を国内で行う幅広いアプローチ(BA)活動を計画的かつ着実に実施。

## ITER計画

○協定:2007年10月24日発効(協定発効から10年間は脱退することはできない)

○参加極:日、欧、米、露、中、韓、印

○建設地:フランス

サンポール・レ・デュランス

○核融合熱出力:50万kW(発電はしない)

○各極の費用分担(建設期):

欧州、日本、米国、ロシア、中国、韓国、インド  
45.5% 9.1% 9.1% 9.1% 9.1% 9.1% 9.1%

※各極が分担する機器を調達・製造して持ち寄り、ITER機構が全体を組み立てる仕組み

○計画:35年間

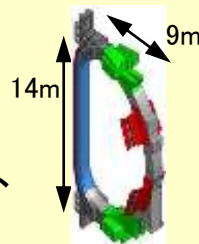
運転開始 :2025年末(予定)

核融合反応:2035年末(予定)

○ITER機構長:ベルナール・ビゴ氏(2015年3月5日任命)



実験炉ITER  
(建設中)



世界最大、  
超高性能の超伝導コイル

## BA活動

○協定:2007年6月1日発効

○実施極:日、欧

○実施地:青森県六ヶ所村  
茨城県那珂市



○総経費:920億円で半額は欧州が支出

○計画:10年間(以降自動延長)

○実施プロジェクト

①国際核融合エネルギー研究センター

・原型炉設計・研究開発調整センター

・ITER遠隔実験センター

・核融合計算機シミュレーションセンター

②国際核融合材料照射施設の工学実証・工学設計活動

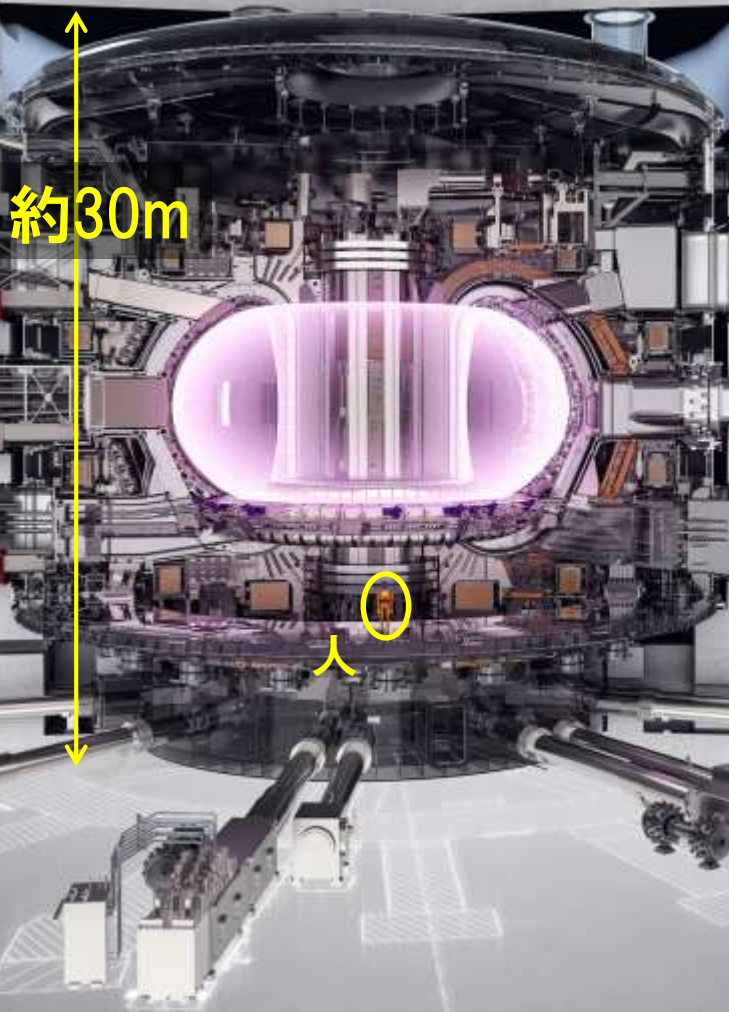
③サテライト・トカマク計画

(予備実験等の実施によるITER支援)

# 世界の7極が取り組むITER計画

実燃料で持続的な核融合燃焼の実証

熱出力 50万kW, エネルギー増倍率10(外部加熱5万kW)



日、欧、米、ロ、印、中、韓が  
共同で建設中

サイト: フランス  
サン・ポール・レ・デュランス市

ITER機構(国際機関)を2007  
年に設立

各国国内機関(実施機関)が  
構成機器を分担して製作  
QSTは日本の国内機関

建設開始 2007年  
初プラズマ運転 2025年  
核融合運転 2035年

ビゴ機構長



多田 Lee  
副機構長 副機構長



TOKAMAK  
& PLANT SYSTEMS

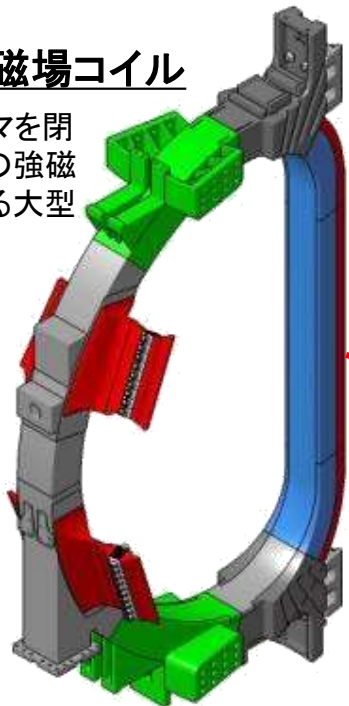
# QST ITERサイトにおける建屋建設状況(2017年3月)



# QST ITER計画において我が国が分担する機器

## トロイダル磁場コイル

超高温プラズマを閉じ込めるための強磁場を発生させる大型超伝導コイル



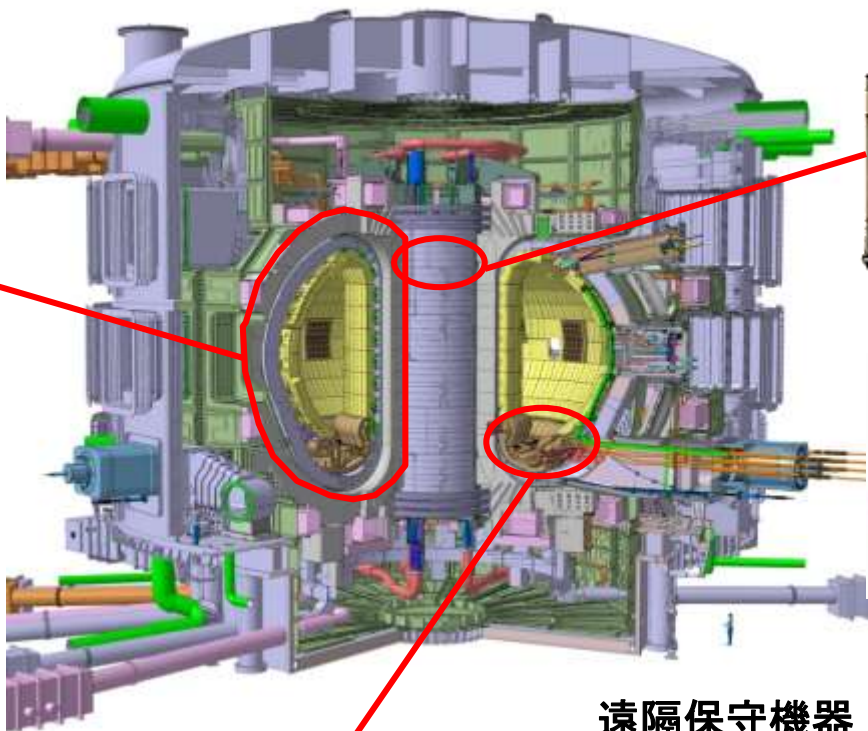
## 高周波加熱装置



## 中性粒子入射加熱装置



プラズマを超高温度に加熱するための装置(高周波と粒子ビームの2種類)

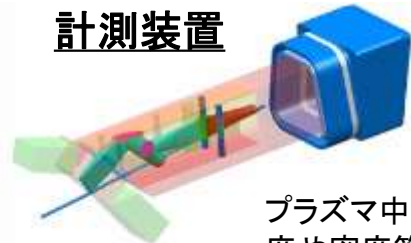


## 中心ソレノイドコイル導体



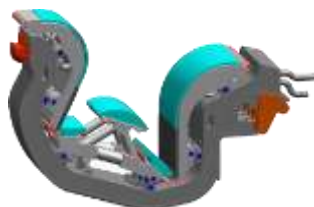
プラズマ中に電流を流すため超伝導コイル(装置中心に置くソレノイドコイル)のための超伝導導体

## 計測装置



プラズマ中の温度や密度等を計測する装置

## ダイバータ



プラズマからの熱や粒子を受け止め、外部へ掃出するための機器

## 遠隔保守機器



炉内機器を遠隔操作により脱着するためのロボット

## トリチウムプラント設備



燃料であるトリチウムを回収・精製する設備

- ・我が国は、超伝導コイル、遠隔保守機器、プラズマ加熱装置等の**重要機器を分担**。**90%の機器に相当する調達取決めを締結**。
- ・ITER機構及び他極の国内機関と協力しつつ、国際合意されたスケジュールに従って調達活動を展開中。
- ・大型超伝導コイルの**実機製作の製作**、**中性粒子入射装置の製作**など、他極を先導する貢献を果たしている。



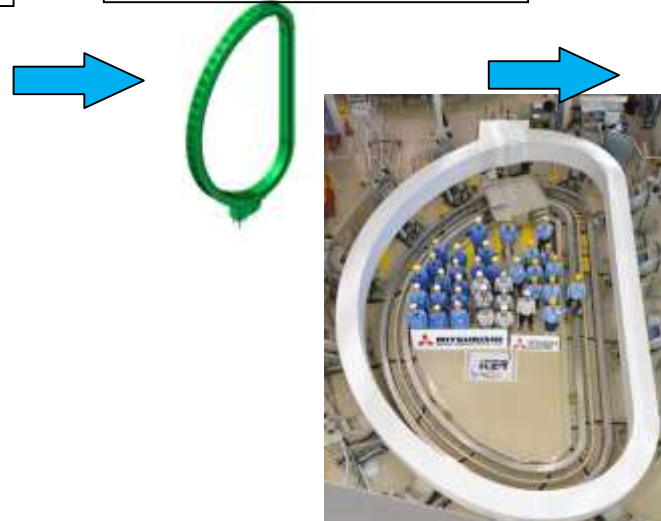
# QST 超伝導トロイダル磁場(TF)コイル進捗

導体(33本)



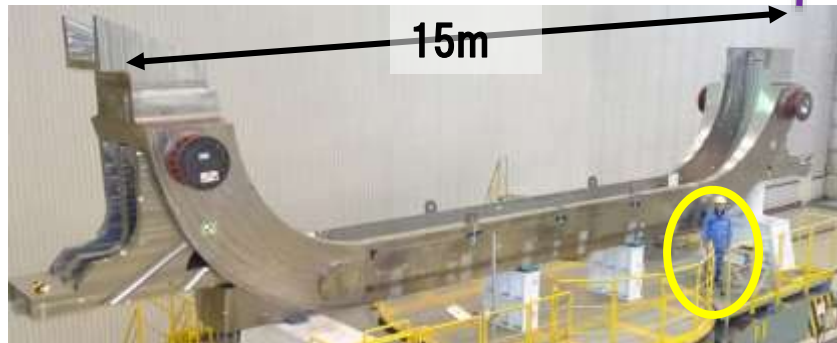
完成した導体  
日本分担分全導体の  
製作を完了  
(2014年12月)

巻線(コイル9体分)



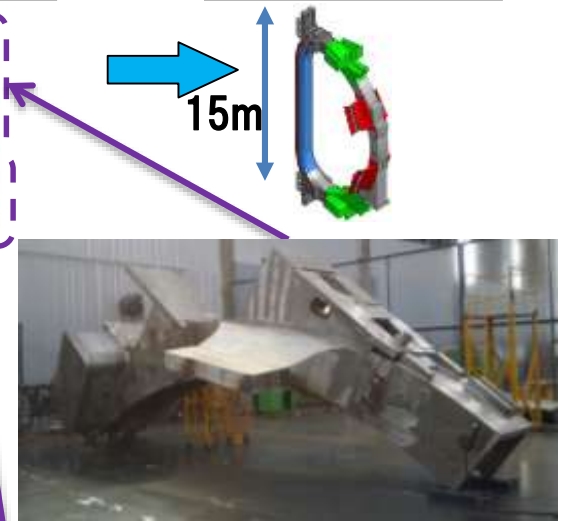
コイル1体目の巻線7層の積層を完了  
(2017年2月末)

構造物(19体)



インボード側主構造体組立:4体完成

一体化(9体)



アウトボード側主構造体組立  
:初号機製作中  
2017年夏に構造物初号機の製  
作を完了予定

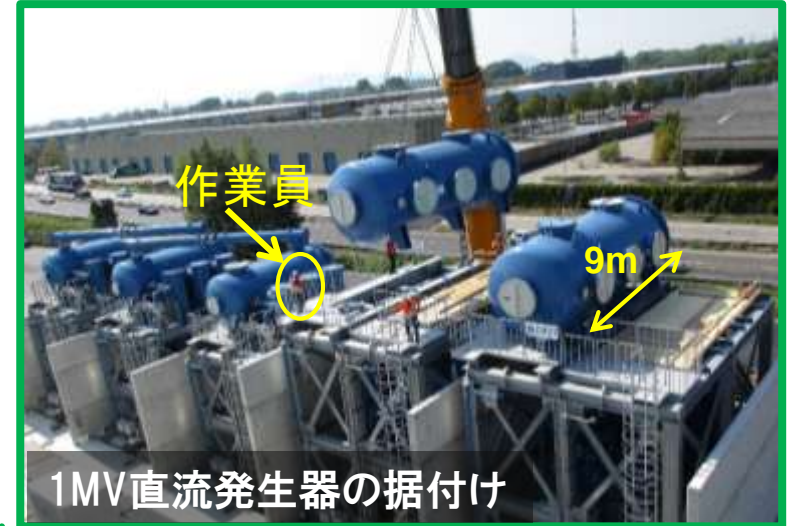
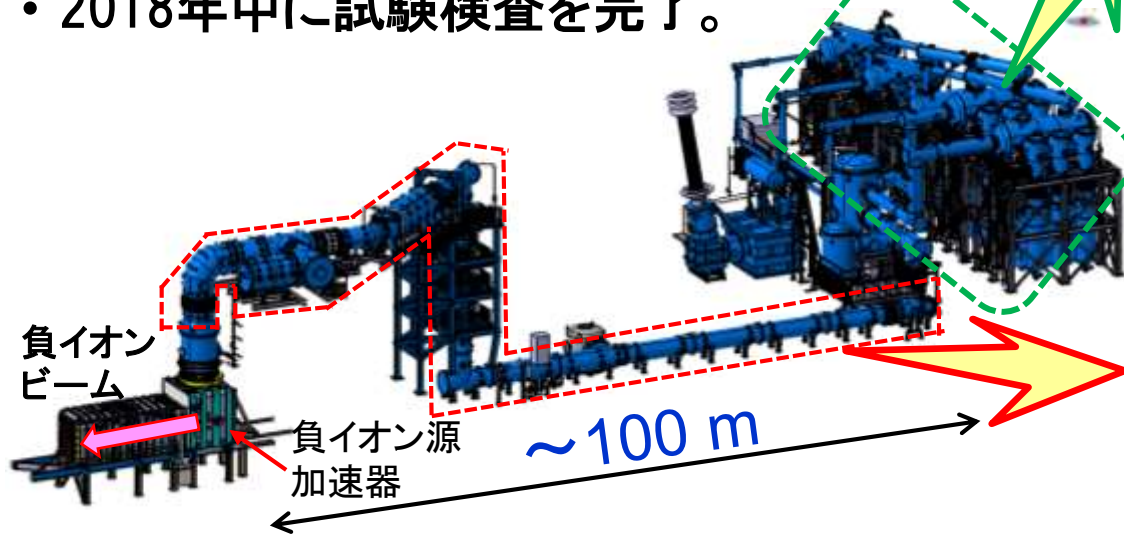


中性粒子の素となるエネルギー1MeV、電流値40Aの水素負イオンビームを発生させる直流超高電圧電源機器の開発・製作

【高電圧電源の必要性能】

電圧1MV，電流60A，パルス長3600秒。

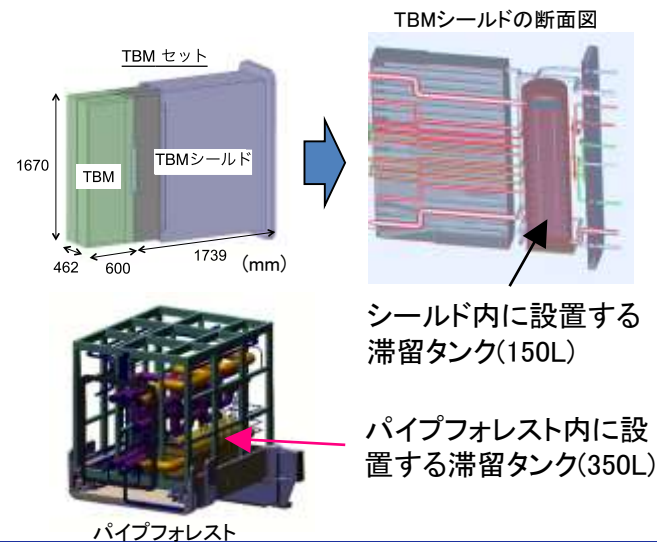
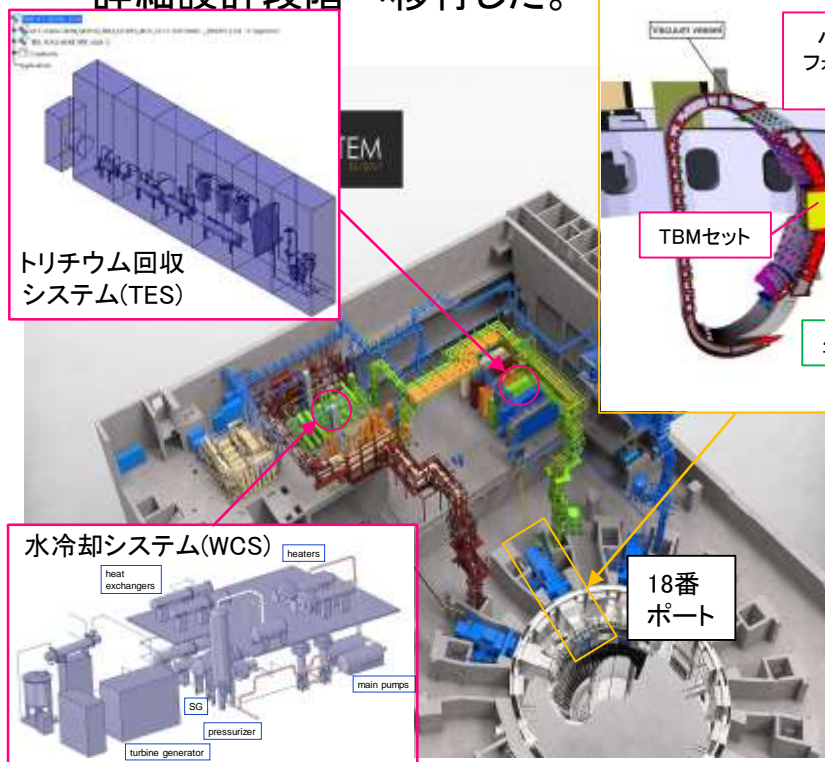
- 全機器(14基)の国内での製作完了。イタリア・パドバへ輸送し、実機試験施設(NBTF)における据付け工事が進行中。
- 2018年中に試験検査を完了。



# テストブランケットモジュールの開発

## 概念設計段階から詳細設計段階へ

- テストブランケットモジュール(TBM)の試験計画はITERの利用計画。原型炉の実現に向けた最も重要な工学試験
- 水冷却/固体増殖(WCCB)方式のTBMを我が国の主案として設計/製作し、試験を実施する
- 2014年11月にITER機構とTBM取決めを締結し正式な活動を開始。
- 2015年2月にITER機構による概念設計レビューを受け、解決すべき課題が抽出された。
- 抽出された課題の解決策を提案。その妥当性、実現性が認められ2016年11月に概念設計が承認。詳細設計段階へ移行した。



### 課題の解決

- 冷却水の放射化に伴う放射線による計測機器への影響を低減するため、生体遮蔽内側の空間を有効利用し、滞留タンク2基(計500L)の設置を提案
- ☞ TBM直近の計測機器を置くAEUの線量を1/2200に低減
- 遮蔽材を現実的な量に減量できること、重量/重心の変化が許容範囲であることを示し、実現性が認められた

トリチウム建家とトカマク建家の断面鳥瞰図  
(□で示されたものを設計製作し、ITERに持ち込む)

# 幅広いアプローチ(BA)活動の構成

- 核融合エネルギーの早期実現を支援する活動として、日欧で3つの事業を共同で実施
- 期間:2007年6月のBA協定発効時より10年間(以降自動延長)

## 青森県六ヶ所村

国際核融合エネルギー研究  
センター(IFERC)事業

原型炉設計・研究開発

発電のための技術の研究開発



ITER遠隔実験

ITER遠隔実験センターの整備

計算機シミュレーション



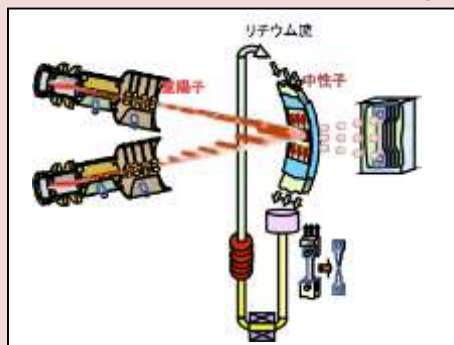
国際核融合材料照射施設  
の工学実証・工学設計  
(IFMIF/EVEDA) 事業

要素技術の工学実証

核融合材料の中性子照射施設に必要な、原型加速器とリチウムターゲットの工学実証

IFMIFの工学設計

実証データに基づく工学設計



## 茨城県那珂市

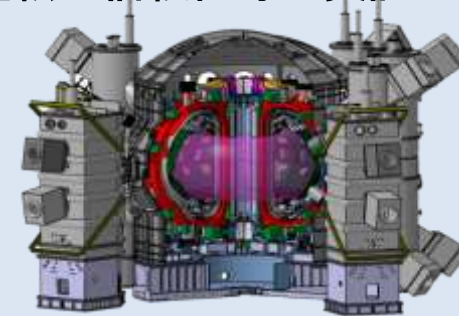
サテライト・トカマク  
(JT-60SA)計画事業

ITERの支援研究

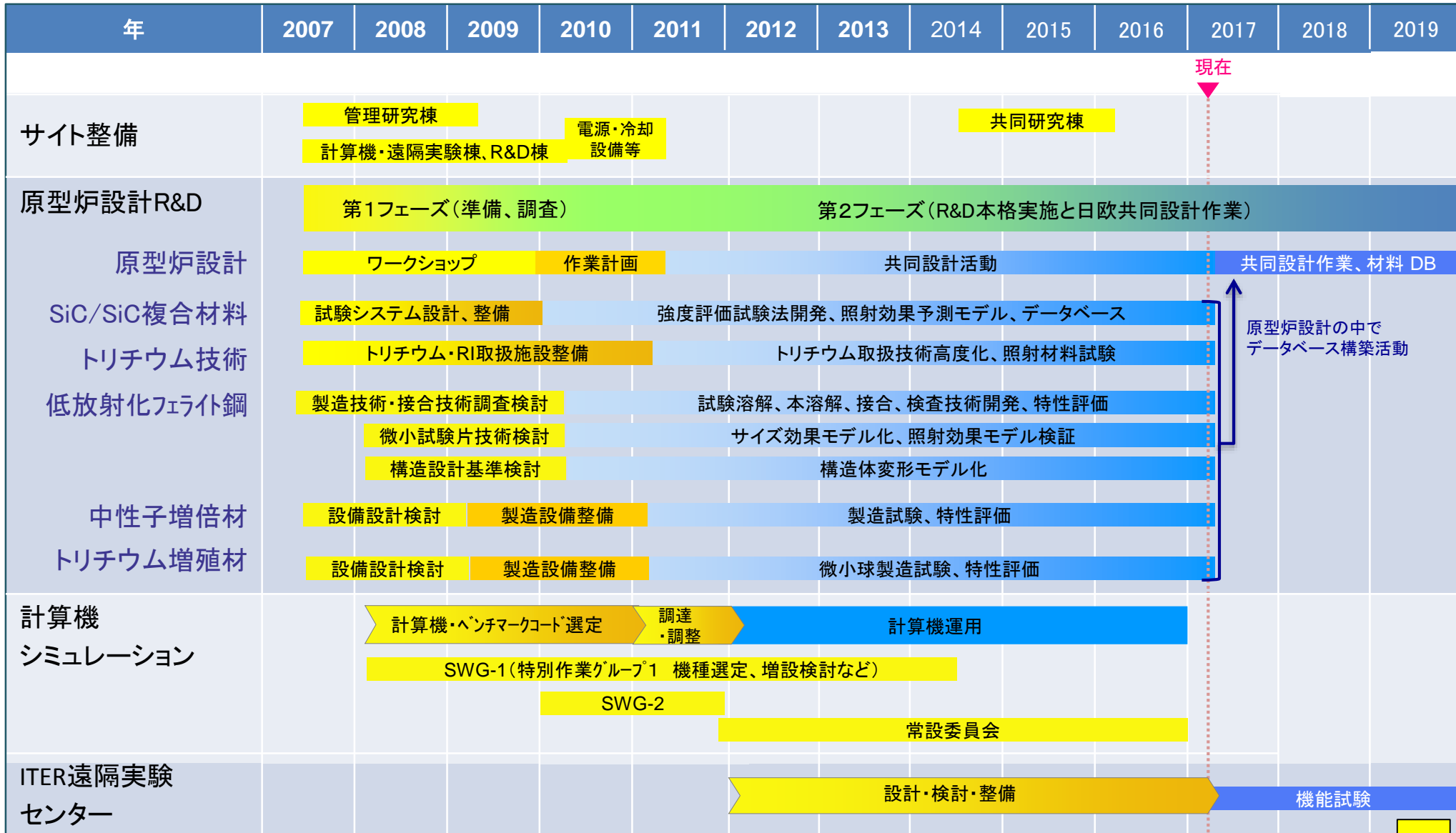
ITERでの研究に先立ち、  
プラズマ生成法を準備

原型炉のための  
挑戦的研究

ITERでできない高出力密度  
運転の信頼性等の実証



# IFERC事業スケジュール






## 設計要求(日欧共通)

- ダイバータ除熱
- トリチウム燃料自給 (TBR > 1)
- 発電実証(数百kWの電気出力)

## 作業方針

- 重要設計課題の分析  
ダイバータ、遠隔保守など
- 技術検討を踏まえて、原型炉基本概念の探索  
日本は定常炉、欧州はパルス炉

## H28年度の成果

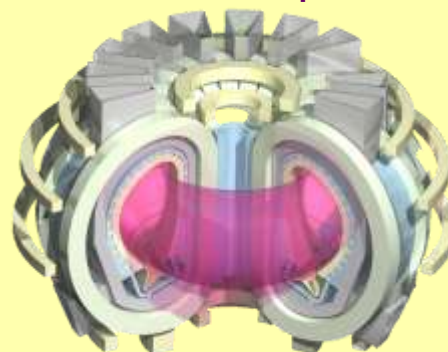
- これまでの日欧共同作業の成果を「第2中間報告書」に(約180ページ)  
- 安全性研究では、H25-28の安全性研究の成果を「最終報告書」に(約100ページ) 

## 検討中の原型炉概念



定常炉

初期にパルス運転  
Flexible Operation

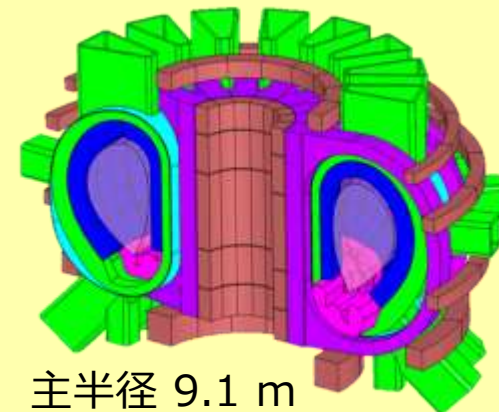


主半径 8.5 m  
核融合出力 1.4 GW



パルス炉

定常の可能性残す  
Flexi-DEMO



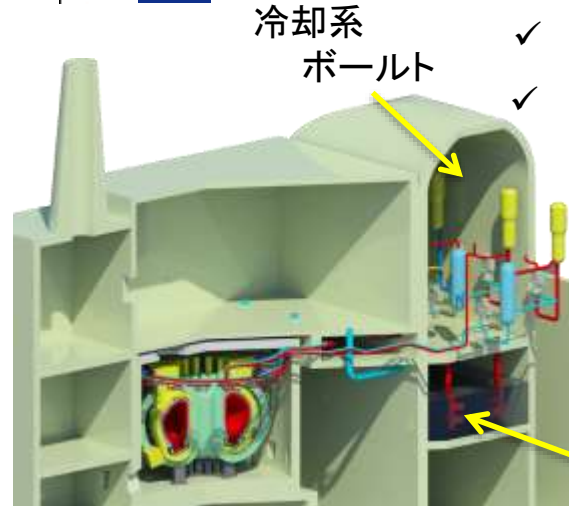
主半径 9.1 m  
核融合出力 2 GW

# 原型炉設計

## ● 原型炉設計「第2中間報告書」

### 章立て

1. 原型炉システム設計
2. 原型炉物理基盤
3. ダイバータ除熱
4. 炉内機器とブランケット
5. 遠隔保守
6. 超伝導コイル
7. プラント設計
8. 安全性
9. 設計要求と構造材料R&D



## ● 安全性研究「最終報告書」

- ✓ 水冷却方式の原型炉に対する安全性解析
  - ✓ 大規模仮想事故(冷却水喪失、冷却主配管の大破断など)に対する影響緩和系(MS)の効果を評価
- 緊急退避不要(早期被ばく < 100mSv)を満足

### 大規模Ex-vessel LOCAの例:

ボルト+圧力抑制プールで影響緩和

→ 早期被ばく < 10 mSv

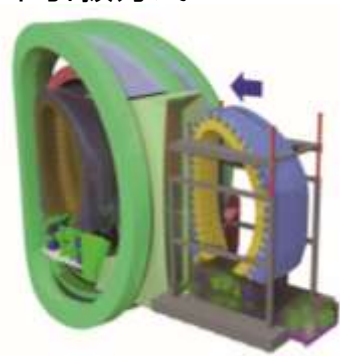
### バナナ型垂直引抜方式が優位

- (1) 平衡制御性
- (2) プラズマ位置制御電力が半分
- (3) トロイダル磁場コイルが小

バナナ型  
垂直引抜方式

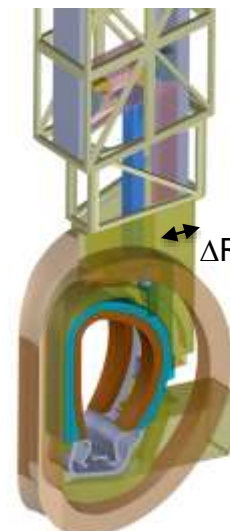


馬蹄型  
水平引抜方式

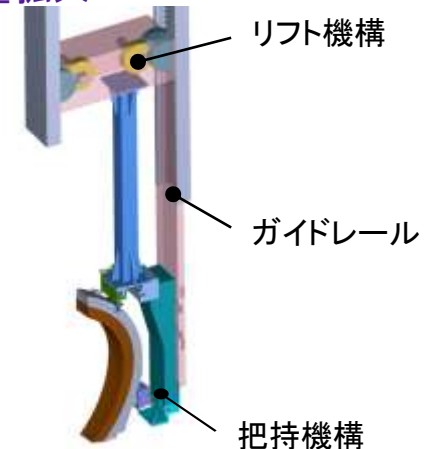


### バナナ方式について遠RH機器の設計に展開

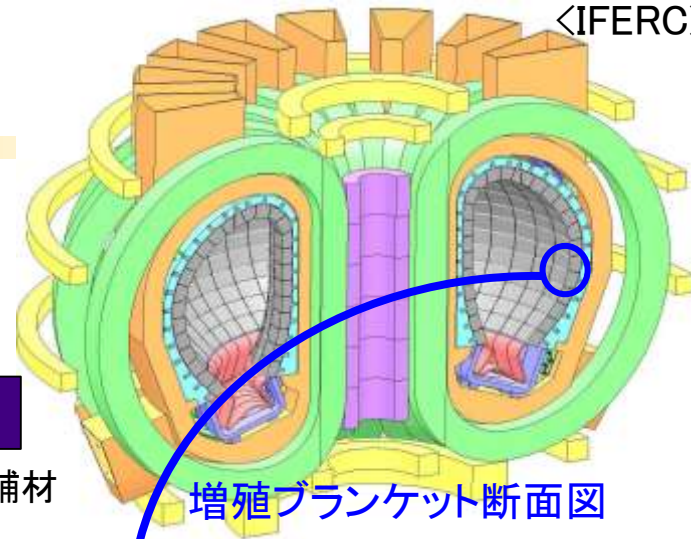
遠隔保守(RH)機器導入のため保守ポートを拡大



ΔR=+1.5m

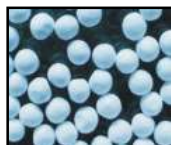


## — ブランケット材料に関連するR&Dを実施 —



増殖ブランケット断面図

### ④. 先進トリチウム増殖材



$\text{Li}_2\text{TiO}_3$  (チタン酸リチウム)

直径1mm程度



### ①. 低放射化フェライト鋼

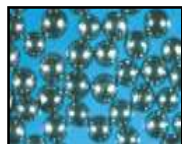
ブランケット構造材料第一候補材

### ②. SiC/SiC複合材料

耐高温先進ブランケット材料候補

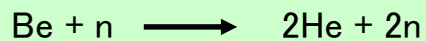
### ⑤ トリチウム取扱技術

### ③. 先進中性子増倍材

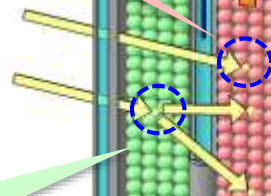


$\text{Be}_{12}\text{Ti}$  (ベリライド)

直径1mm程度



中性子



冷却水  
回収ガス

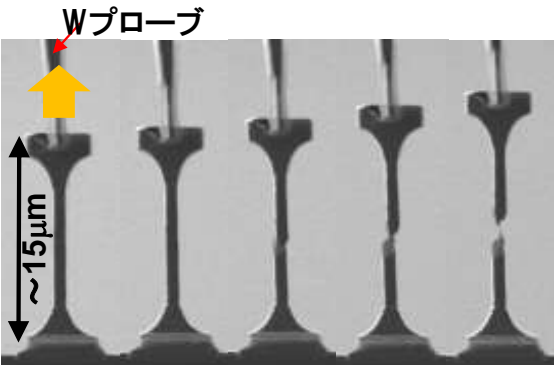
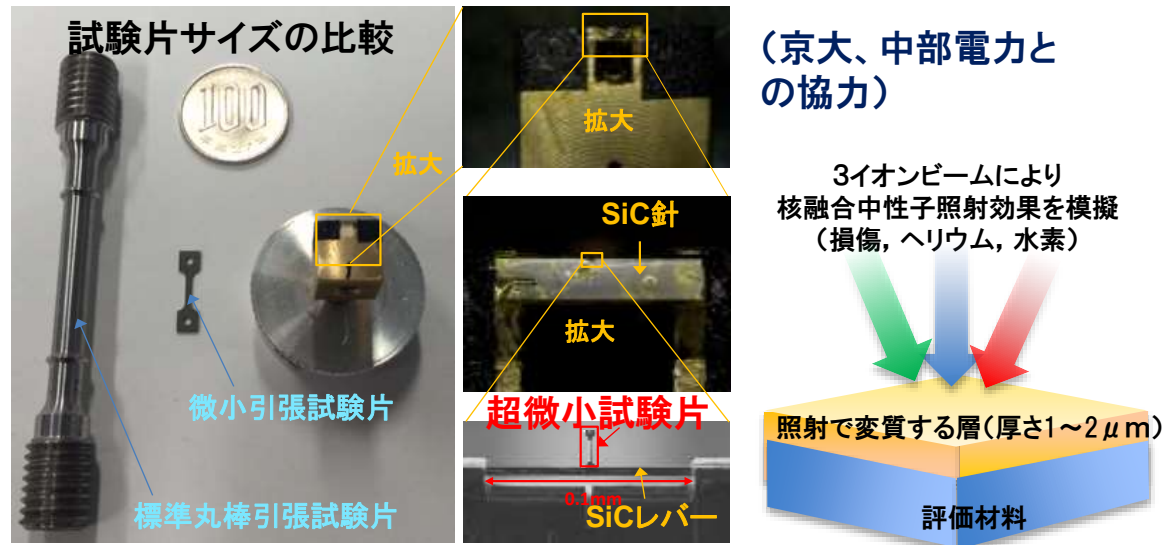
トリチウム  
燃料として回収

発電に利用  
冷却水  
出口 325°C

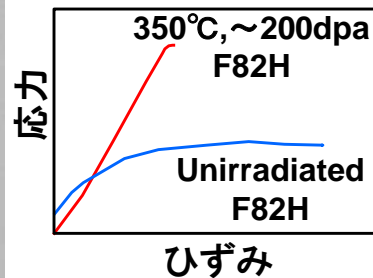
冷却水  
入口 290°C

## ① 低放射化フェライト鋼

- 超微小引張試験技術の開発：核融合炉内環境模擬領域の引張特性評価のため、集束イオンビーム加工装置を利用した「超微小引張試験技術」を開発



超微小引張試験片を用いた引張試験の様子

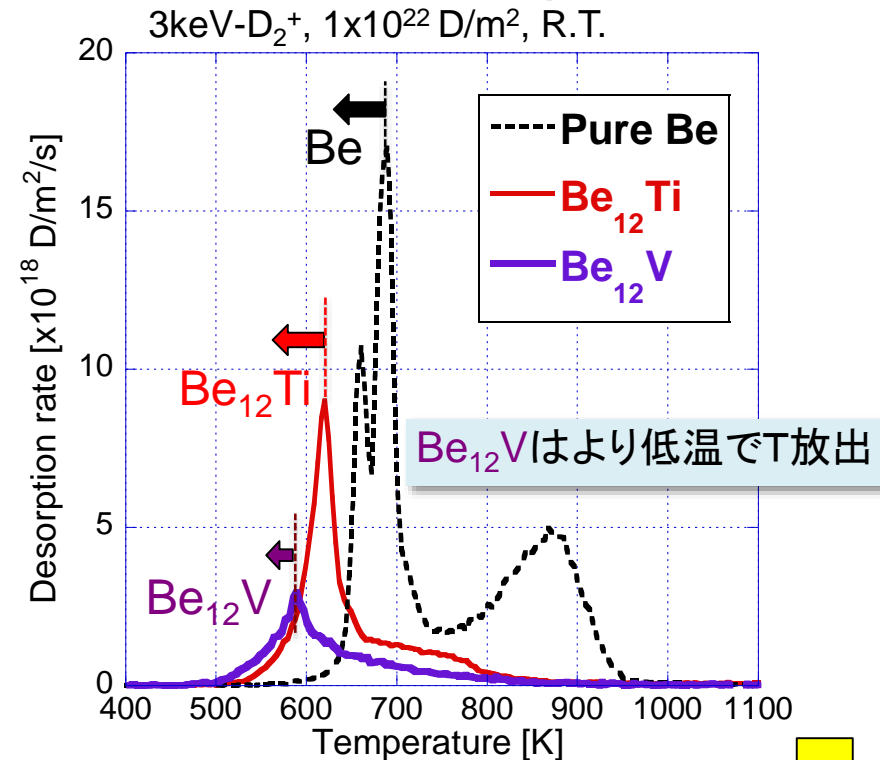


応力-ひずみ曲線の例

## ③ 先進中性子増倍材

- $\text{Be}_{12}\text{Ti}$ 微小球に比べ、組成均質化熱処理が不要で量産性に優れる $\text{Be}_{12}\text{V}$ 微小球の直接造粒に成功、より低温でのトリチウム放出特性を示唆するデータを取得

重水素イオン照射による重水素放出特性  
(島根大との協力)





# 計算機シミュレーションセンター

## 高性能計算機の日欧共同利用の運用を完遂

- 高稼働率 (>98%) で運用、**利用率は約90%を維持**
- 多数の日欧ユーザーに対して利用支援  
第5サイクルにおける利用者数は542名

週平均利用率 (2015年11月~2016年12月)



## 計算機利用による成果

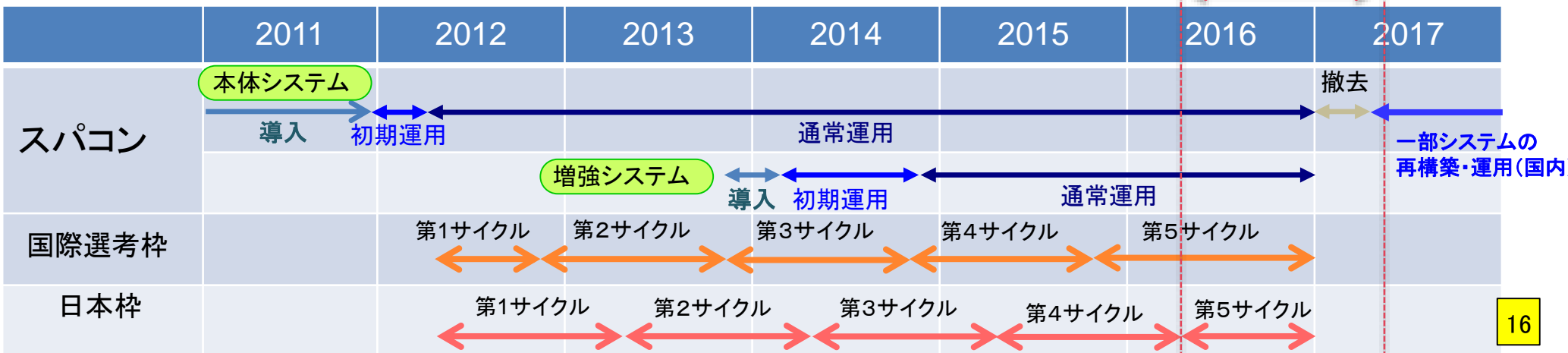
- **多数の学術的価値の高い成果の創出に貢献**  
運用開始以降、累積639編の学術論文 (H29年2月現在)

## 一部システムの再構築・運用

- 欧州実施機関から一部システムの譲渡を受け再構築し、国内用大型計算機として運用



H28年度



# ITER遠隔実験センター

六ヶ所サイトとITER等を高速インターネットで接続、六ヶ所に居ながら遠隔実験を可能にするシステムを整備。H28年度末に遠隔実験室の整備、ソフトウェア開発を完了



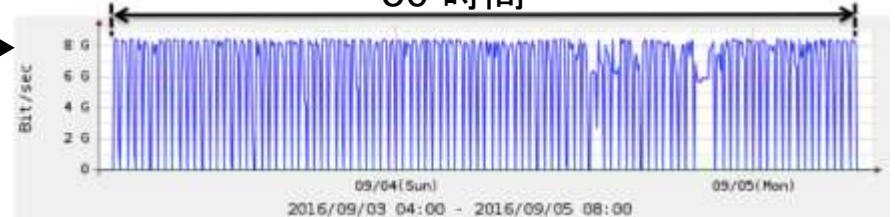
ITER遠隔実験棟(六ヶ所研)



遠隔実験室 JT-60SA制御システムへの接続に成功

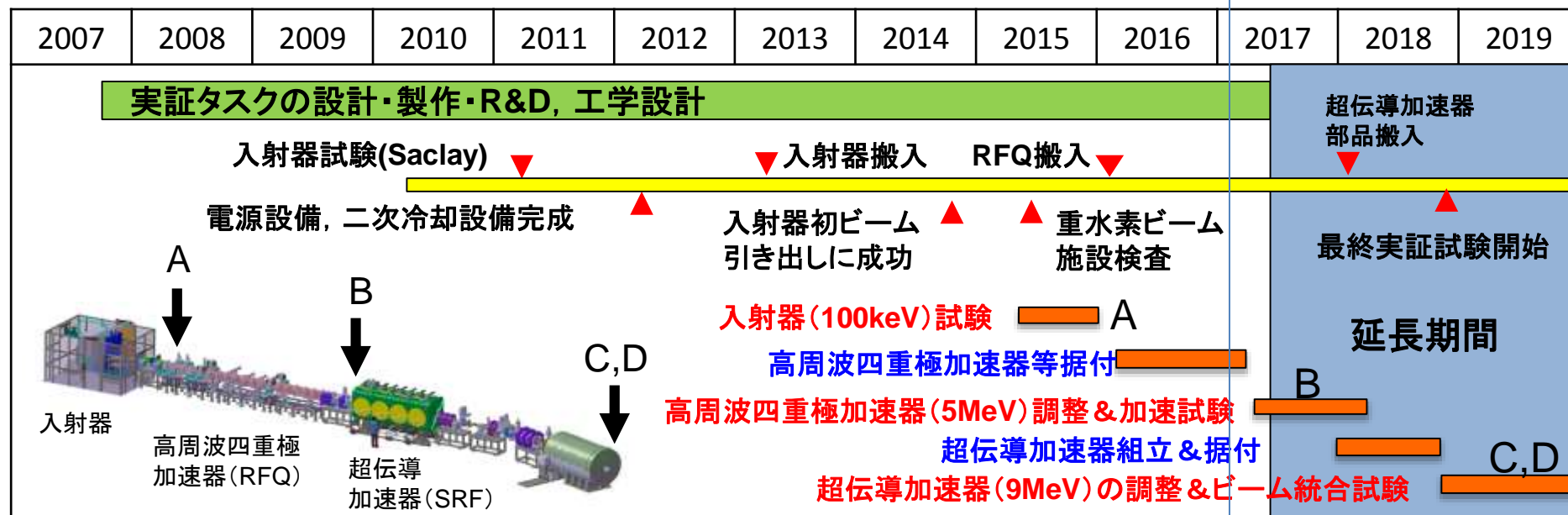
- ITERの初期実験で想定されるデータ量(1TB)を、ITER(フランス)から遠隔センター(六ヶ所)へ実験想定時間内(30分内)に転送できることを実証(情報研、核融合研との協力)。
- 1TB/30分のデータを繰り返し転送、50時間で合計105TBを転送(大陸間の大量高速データ転送として世界最大規模)。

転送速度7.2 Gbps (平均) 50 時間



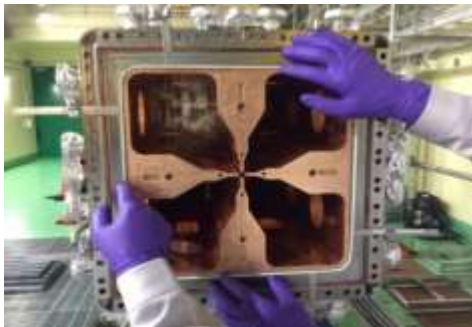
# IFMIF/EVEDA事業 - 全体の進捗状況 -

現在



- 高周波四重極加速器 (RFQ) の本体を、2016年4月に組み立てるとともに、高周波系を据付けた。
- RFQの実証試験として、設計値と一致する共振器内電界分布を得た。RFQ内不要モードの存在比を目標 (2%)以下に抑制した。
- 搬入、据付調整を並行し実施し、試験の準備を進めている。
- 高圧ガス保安法に基づく超伝導空洞の許認可が得られ (国内初)、これを受けて欧州で超伝導加速空洞の製作が開始。超伝導加速器冷凍設備の据付を完了。
- 2017年度から、RFQを用いたビーム加速試験を実施予定。

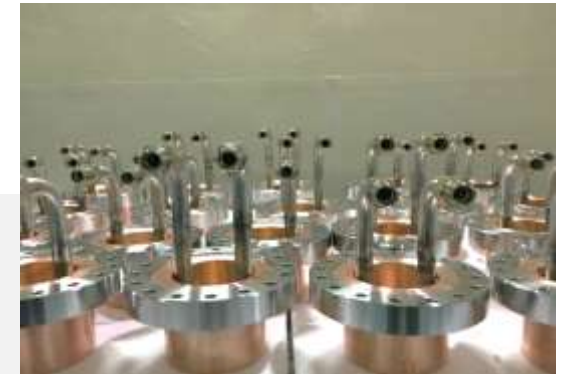
# RFQの据付と調整



## RFQ最終調整結果(低電力で調整)

- 共鳴周波数: 175.014 MHz
- $Q = 13200$
- 不要モードの存在比 < 2%

## 実機用チューナー

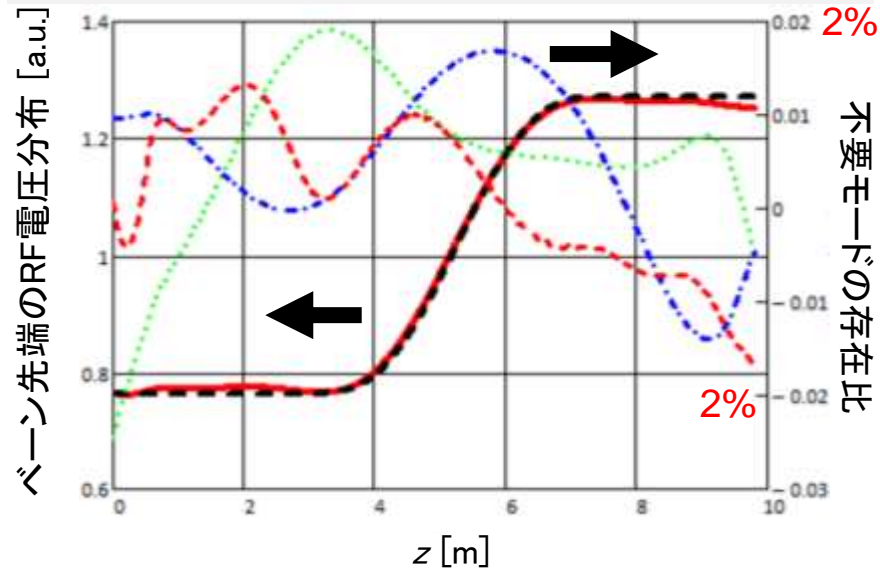


### 四重極モード

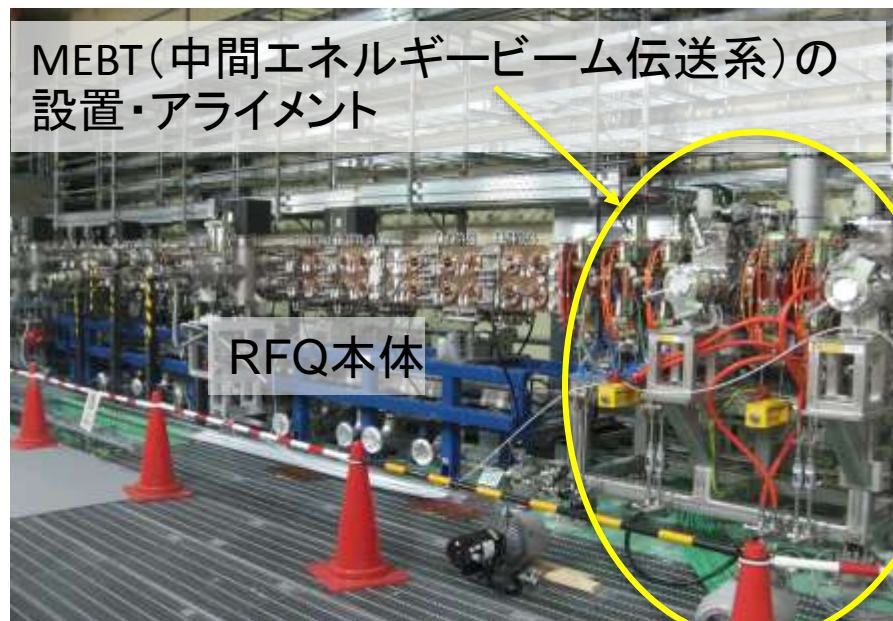
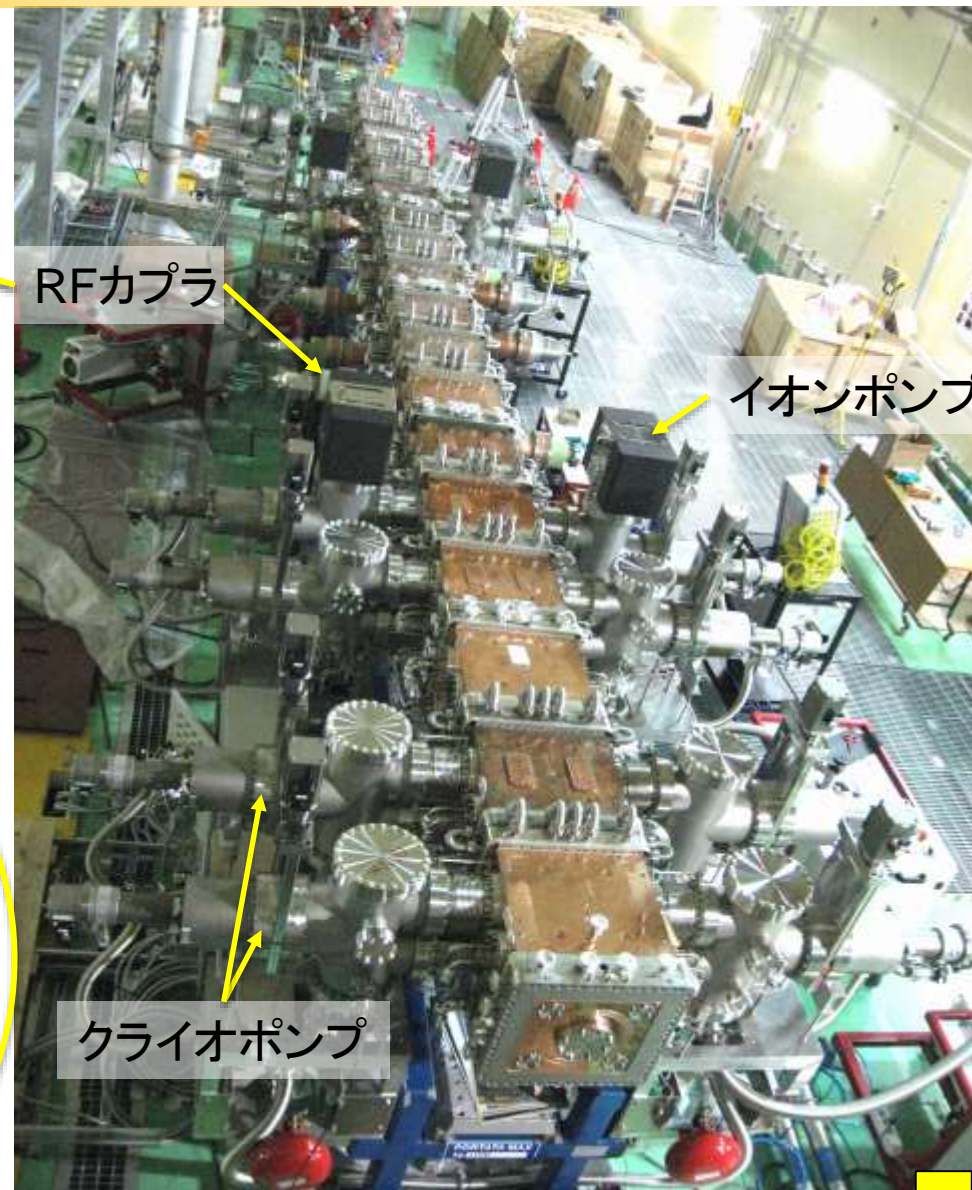
--- 計算  
— 計測

### 不要モード

.....ダイポールモード1  
- - -ダイポールモード2  
.....モノポールモード



# RFQへ付属機器を取付





H25年3月

H26年1月

H27年8月

H28年9月

クライオスタットベース

下側平衡磁場コイル

真空容器

真空容器サーマルシールド

TFコイル

上側平衡磁場コイルと中心ソレノイド

クライオスタット

TFコイル試験施設



TFコイル

高温超伝導電流リード



8月26日



JT-60SA

JT-60SA装置完成

クエンチ保護回路

電源

電動発電機

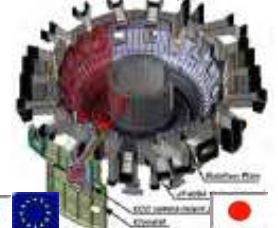
超伝導コイル用電源

冷凍機システム

NBI

ECH

計測機器等



- 2016年11月真空容器サーマルシールド (VVTS) 340度の組立完了
- 欧州が調達した超伝導トロイダル磁場コイル(TFC)の組立開始(2016年12月)  
位置精度±1mmで設置、2017年3月にTFC 3体目を設置



20度セクターVVTSのインボードとアウトボードの仮合せ



TFCの輸送・搬入、受入検査



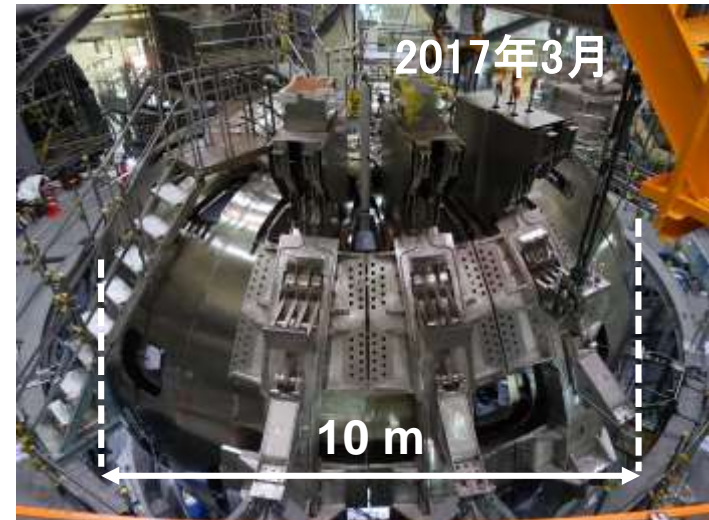
起立



2016年11月

VVTS

VVTS 340度の組立完了



2017年3月

10 m

3体目のTFC設置

**電源: SCMPS (Supercond. Magnet PS)**

**CEA (EF2-5 and TF):**

日本搬入(2016年6月)

据付調整完了(2017年1月)、**確認試験中**



**JEMA** TF電源の据付完了



**ENEA (CS1-4, EF1&6, FPPCC):**

工場に通電試験中

**日本搬入(2017年3月及び9月予定)**

→受入試験(2018年3月予定)

**POSEICO- JEMA**



**電源: RWM control coil PS (CNR-Consorzio RFX)**



**E.E.I. (Italy)**  
**製作設計中**  
**DRM**

**電源: SNU (Switching Network Unit)**

**ENEA (CS1-4)**

Energy Technology

- OCEM



日本搬入(2016年10月)

据付調整完了(2017年1月)

**確認試験、通電試験完了**

**(2017年3月)**



**高温超伝導電流リード**

6本: TF coils (26kA), 20本: EF&CS (20 kA)

**6本(TF用)、10本(PF用)が完成し那珂研に搬入**





## ITERと原型炉に向けたJT-60SAの研究計画

JT-60SAリサーチプラン Ver.3.3 (H28年3月完成)  
共著者数 378名:

- 日本160名(量研機構 85名  
国内大学等14研究機関75名)
- 欧州213名(14カ国、30研究機関)
- プロジェクトチーム5名

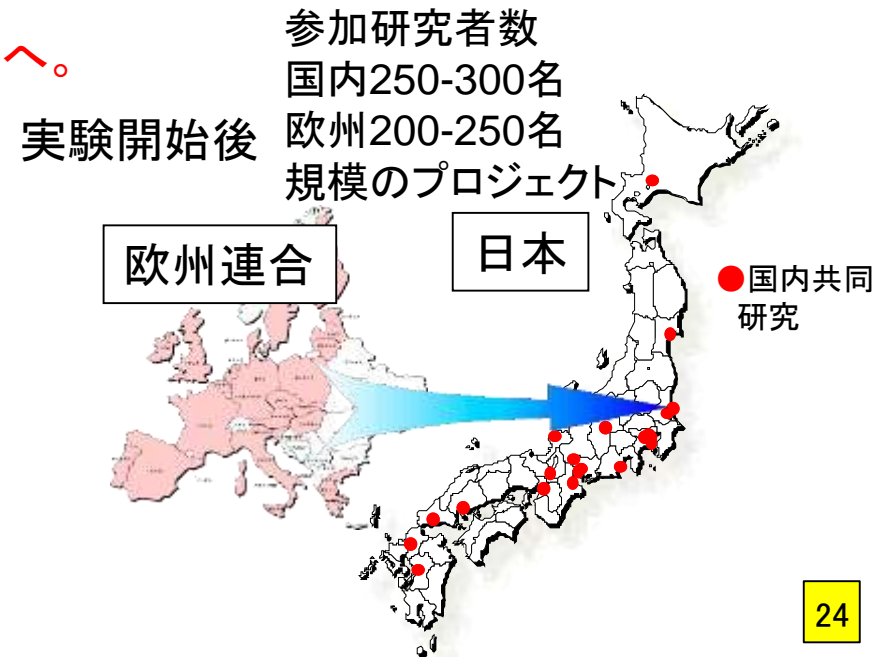


8つの研究領域毎に、JT-60SAの実験研究を担う若手研究者を中心に企画・提案。日欧の研究コミュニティで密接な議論を重ねて完成。

H28年度:JT-60SA実験のための日欧研究協力が大きく進展(日欧15件、国内14件)。 =>実験開始へ。



第5回 研究調整会議 (2016年5月)



- 原型炉設計合同特別チームの全日本体制を拡大しつつ活動を推進  
 (H27.6月設置時:52名 →現在:82名) QST 25, 核融合研 3, 大学 25, NIMS 2, 産業界 27
- 平成28年度は**技術会合を30回以上開催**し(延べ400名出席)、**産学共創の場の拡大**に注力
- 機器設計、冷却系統、電源系統、廃棄物、材料データ拡充など、幅広い視点から原型炉設計・開発を推進
- 設計基本方針・暫定目標設定、タスクフォースのアクションプランの具体化を目的として、チーム内外の専門家によるアドホックなワーキンググループを設置
  - ✓ 超伝導コイルWG - 超伝導コイルの設計方針
  - ✓ 運転計画WG - 運転計画から設計要求
  - ✓ ブランケットWG - ITER-TBM計画と原型炉の連続性
  - ✓ ダイバータ物理検討WG - 原型炉開発のアクションプラン具体化
  - ✓ 理論シミュレーションWG - 原型炉開発のアクションプラン具体化
- 世界エネルギーシナリオにおける核融合の役割の明確化を目指し、地球環境産業技術研究機構(RITE)との研究協力を開始



理論シミュレーションWG(平成28年12月)

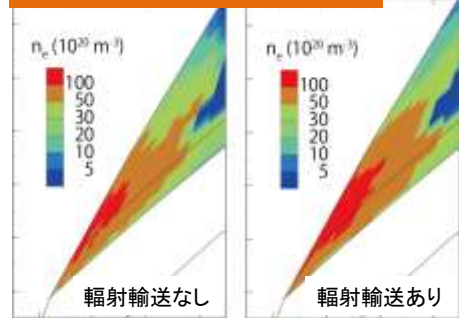


ダイバータ物理検討WG(平成28年12月)

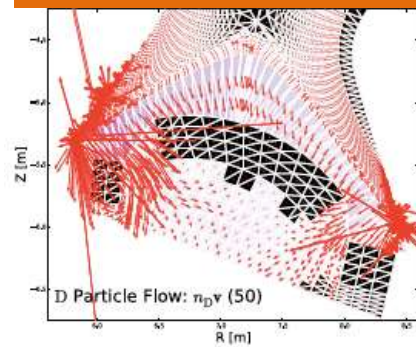
## 原型炉のための設計コード開発

- ダイバータや第一壁熱負荷のためのコード・モデルの開発・改良で進展  
(信州大、名大、核融合研、慶應大との協力)

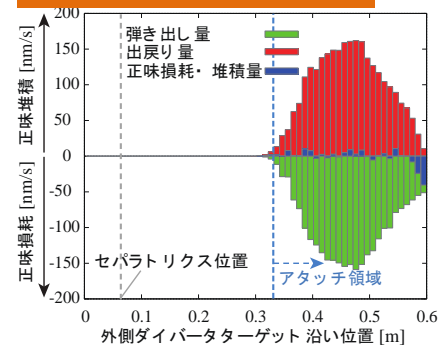
### 局所輻射輸送モデル



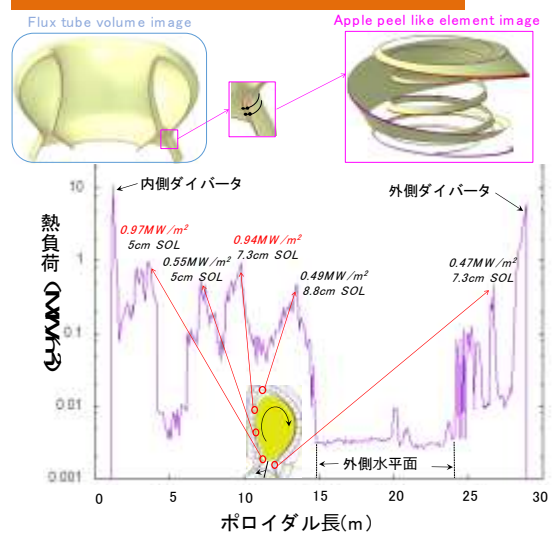
### 中性粒子間衝突モデル



### 正味損耗評価コード



### 熱負荷評価モデル(APPLE)



## 放射性廃棄物処分シナリオ

- 炉内機器の定期交換で生ずる放射性廃棄物は**すべて低レベル**、10年後に**浅地中埋設処分可能**  
(福井大、産業界との協力)

- ✓ 生成約1200核種から有害核種を分析
- ✓ 有害核種の浅地中移行解析

