

平成 26 年 8 月 1 日 (金)  
第 42 回核融合研究作業部会  
資料 2

# 核融合科学研究所に於ける 原型炉開発に向けた取り組みの現状

平成26年8月1日  
第42回核融合作業部会

# 基本的な考え方と実施体制(1)

- \* ヘリカル原型炉を目標とし、炉の概念設計と、設計の基盤となる工学R&Dを展開する
- \* 上記事業を推進する主体として、「核融合工学研究プロジェクト」を平成22年に立ち上げた
  - \* プロジェクトの期間は平成33年までの12年間(第2期および第3期中期目標・中期計画期間)を想定
  - \* 設計基盤R&Dとして、5つの課題を選択
  - \* 5つの課題は、ヘリカルの独自性を考慮しつつ、平成20年の核融合フォーラム提言にある“ITER・BAで成されない技術開発項目”の中から、大学が得意とする分野を選択
- \* 5つのR&Dの内容は、現在合同チームが検討しているシナリオにおいて、副案として位置づけられるものが多い

# 基本的な考え方と実施体制(2)

- \* ヘリカル核融合炉の数値実験炉構築を目指し、炉内で起こりうる諸現象の物理的モデル構築とその統合による体系化を図る
- \* 上記事業を推進する主体として、「数値実験炉研究プロジェクト」を平成22年に立ち上げた
  - \* プロジェクトの期間は平成33年までの12年間(第2期および第3期中期目標・中期計画期間)を想定
  - \* コアプラズマからプラズマ・壁相互作用まで幅広い領域を包括
  - \* 3次元モデルの構築に注力 → トカマク配位への応用が可能
  - \* 統合化モデルの手法はトカマクと共通

# 基本的な考え方と実施体制(3)

- \* 柔軟な共同研究システムを最大限に活用して、大学に於ける核融合の基盤研究を支援する
- \* 双方向型共同研究
  - \* プラズマと炉工学との連携を推進
  - \* プラズマ研究センターと中性子照射、トリチウム照射設備との連携によるPFI研究の推進など
- \* 一般共同研究
  - \* 幅広い基盤的研究が可能
    - \* 材料開発
    - \* プラズマ・壁相互作用研究
    - \* 計測手法開発
    - \* 大型数値シミュレーション研究
    - \* 研究会形式による知識の集約

# 核融合工学研究プロジェクト

原型炉に向けたヘリカル核融合炉 FFHR-d1 の概念設計活動と  
主要5課題のR&Dを推進

✓ 核融合工学研究プロジェクト (Fusion Engineering Research Project, FERP) の  
主目的は「ヘリカル型核融合炉の実現に向けた工学基盤の構築」

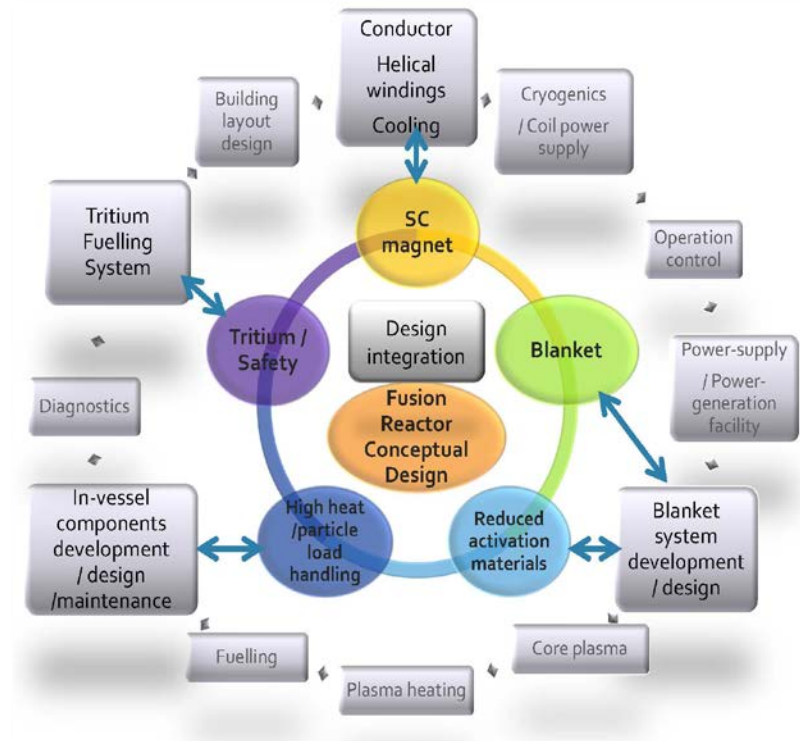
- FERPは13のタスクグループで構成
- 5つの主要R&Dを推進

✓ ヘリカル型核融合炉FFHR-d1概念設計活動

- 3-D CADによる構造設計 (最大電磁応力 < 600 MPa)
- 3-D 中性子輸送計算 (ダイバータの中性子負荷)
- 炉心プラズマ設計 (準最適化ヘリオトロン)
- **FFHR-d1概念設計中間報告書をH25年4月に発行**

✓ 主要5課題のR&D推進

- 超伝導マグネット (超伝導コイル試験)
- ブランケット (溶融塩ループ試験)
- 材料研究 (材料特性、被覆技術)
- ダイバータ (Wモノブロック試験)
- トリチウム・安全



FERPにおける13のタスクグループと5つの主要R&D

# 核融合科学研究所における炉工学研究の推進計画

年度 2012

2014

2017

2022

炉設計の段階的高度化

→ 概念設計 → 基本設計 →



大型ヘリカル装置

超高性能化

先端基礎学術研究

連携

工学基盤の構築

実規模・実環境  
工学実証研究

核融合研究作業部会の指摘に基づく工学基盤構築の実施

別事業体による  
核融合炉の工学設計

大学等との共同研究と人材育成

(1)低放射化材料研究



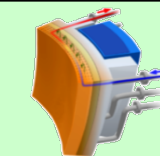
超高熱負荷対向壁  
の製作と核融合模  
擬条件での実証研  
究

(2)大型高磁場超伝導  
マグネット研究



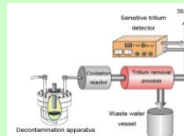
100 kA級導体開発  
とヘリカル巻線の  
試作

(3)高熱流プラズマ  
対向壁研究



ブランケットの試作  
と核融合模擬条件  
での実証研究

(4)長寿命液体  
ブランケット研究



微量トリチウムの  
分離・回収装置の  
実証研究

(5)微量トリチウム  
管理技術研究

寄与



核融合炉

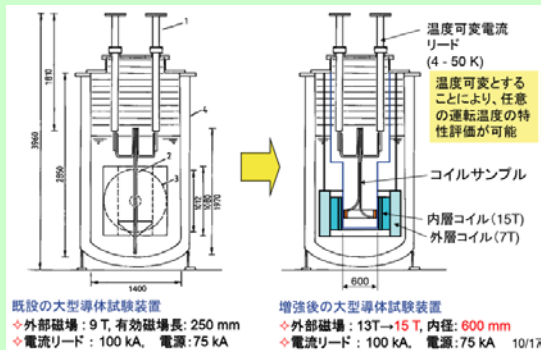
ITER / BA活動：原型炉R&D、概念設計、JT-60SA、IFMIF/EVEDA

# 核融合工学プロジェクトの設備整備状況

5つの大規模実験研究による核融合工学領域の構築

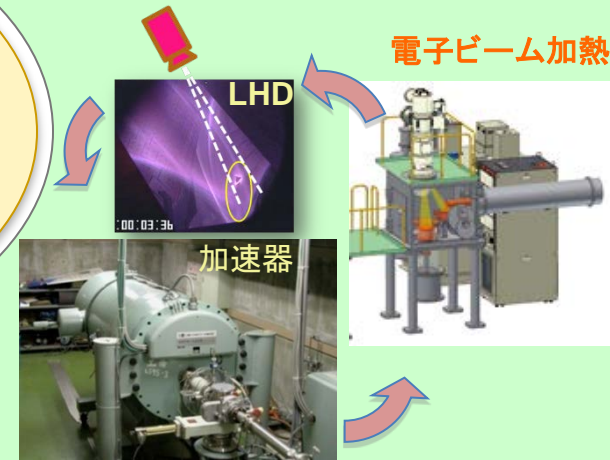
## (1) 大型高磁場超伝導マグネット研究

- ◇ 導体試験マグネット設備
- ◇ 温度可変電流リード



## (5) 高熱流プラズマ対向壁研究

- ◇ 超高熱負荷試験装置
- ◇ 水素蓄積分析装置
- ◇ LHD照射試験装置



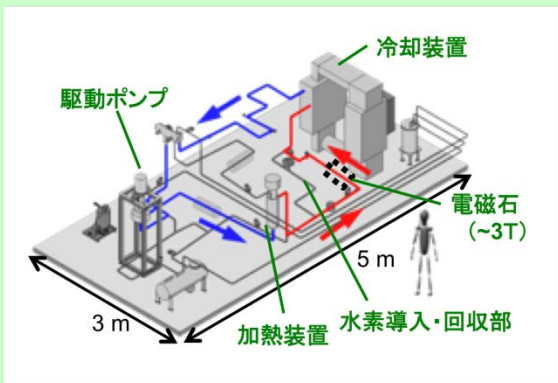
**核融合炉に向けた  
設計基盤構築**

**平成24年度補正予算**

**大型設備が整備され基盤構築  
が共同研究により加速**

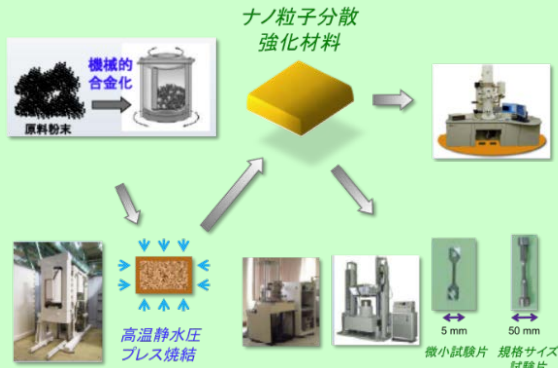
## (2) 長寿命液体ブランケット研究

- ◇ 熱・物質流動ループ装置



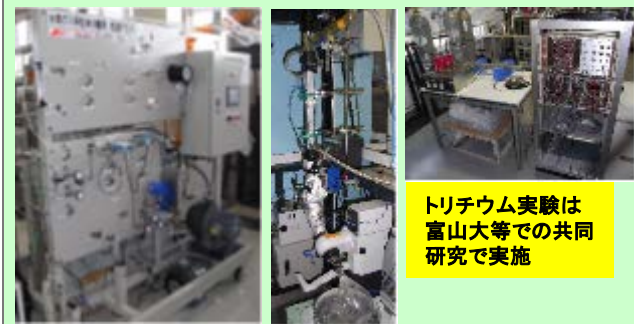
## (3) 低放射化材料研究

- ◇ 材料微細構造組成分析装置
- ◇ 超高真空クリープ試験装置
- ◇ 接合材試作試験装置
- ◇ 電子ビーム加工機



## (4) 微量トリチウム管理技術研究

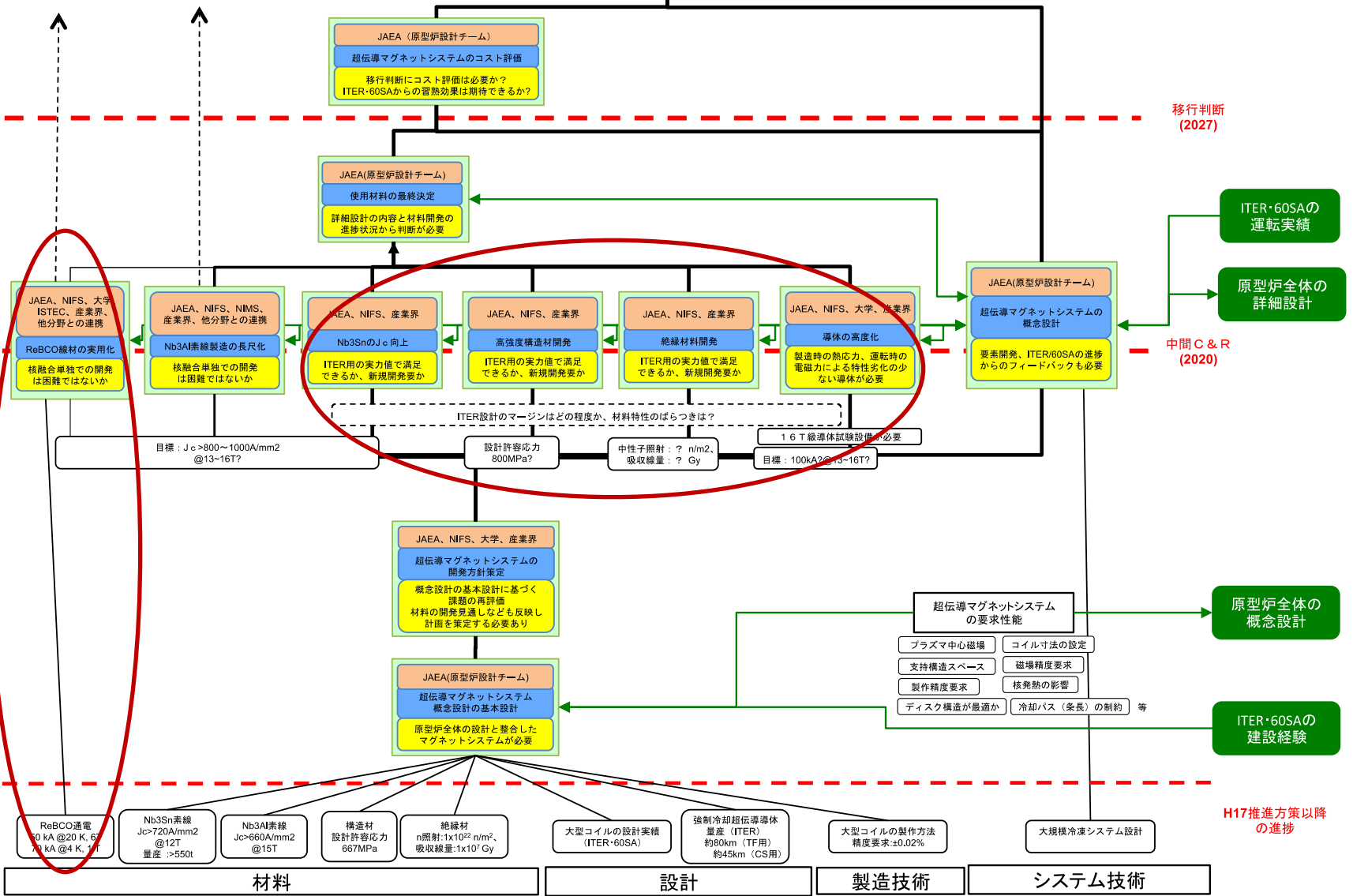
- ◇ 水素試験・計測装置



トリチウム実験は  
富山大等での共同  
研究で実施

# 超伝導コイル開発

原型炉に必要な超伝導コイルシステムが提供できる見通しを得る





# NIFS における超伝導マグネットの開発研究 (1/3)

## JT-60SA & ITER 用ケーブルインコンジット(CIC)導体の特性試験

合同チーム図に対応  
 (以下同様)

### 導体の高度化

#### JT-60SA 用導体

- ✓ 導体サンプル、接続サンプルを多数試験
- ✓ 中心ソレノイド用モデルコイルを試験
- ✓ 実機中心ソレノイドコイルの1モジュールを試験予定

#### ITER 用導体

- ✓ トロイダル磁場コイル用導体の接続サンプルを多数試験中

→ これらを通して、CIC導体のさらなる技術向上を図る



## 間接冷却方式導体の開発

### Nb<sub>3</sub>SnのJc向上

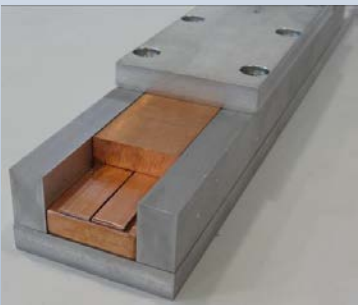
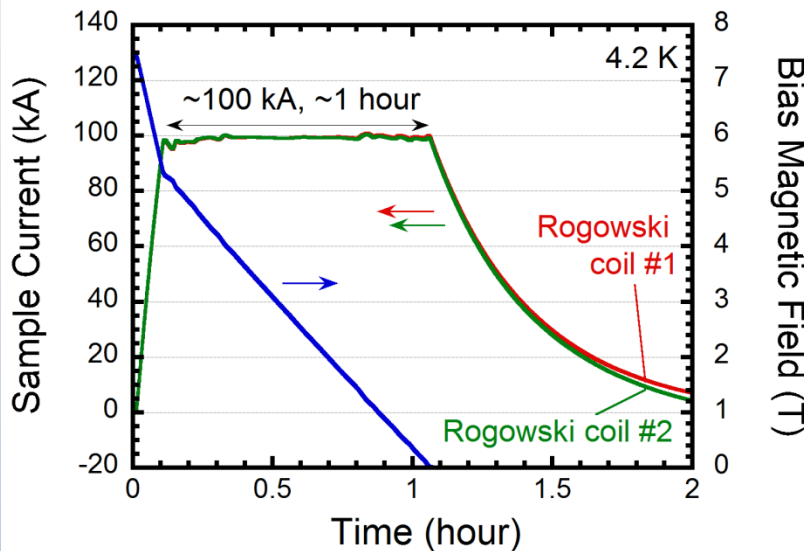
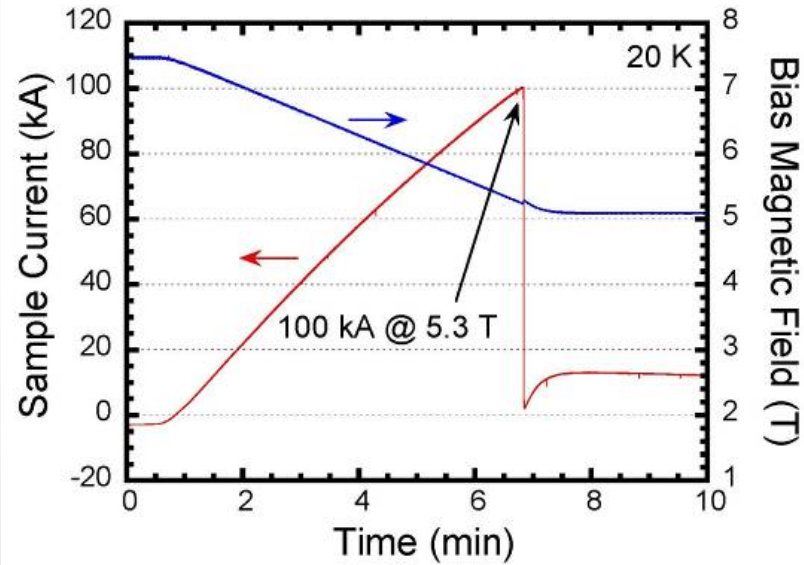
- ✓ 冷却構造を簡素化した間接冷却導体を開発  
 絶対温度 4 ケルビン、磁場 12 テスラ、100 キロアンペア仕様
- ✓ Nb<sub>3</sub>Sn 線材の性能向上についてメーカーと共同研究



# NIFS における超伝導マグネットの開発研究 (2/3)

## ReBCO線材の実用化

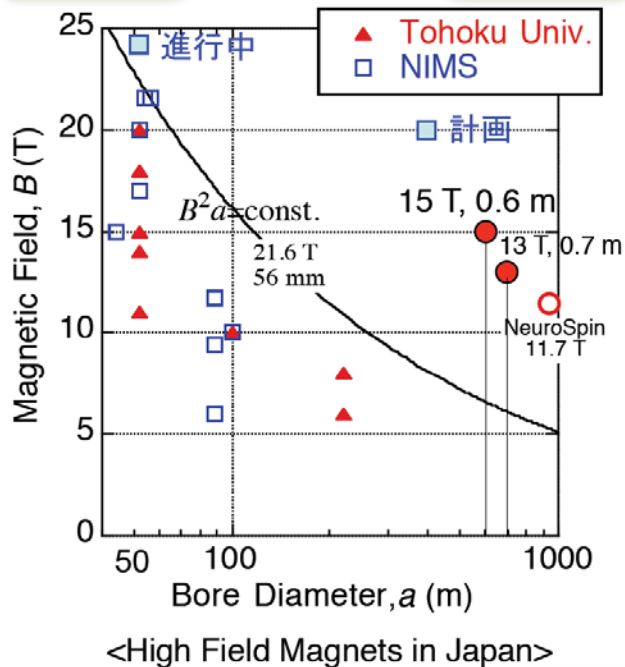
- ✓ **高温超伝導導体**
  - 高い冷却安定性、ヘリウム省資源
  - 日本が世界をリードするイットリウム系線材 (電力機器応用、医療機器応用)
- ✓ **ヘリカルコイルの接続方式巻線**
  - ヘリカル核融合炉を迅速に製作する革新的方法
- ✓ **導体 & 接続部のプロトタイプ試験**
  - 絶対温度20ケルビン, 磁場5.3テスラにおいて100キロアンペア到達
  - 4ケルビンでは100キロアンペア、1時間の連続通電
  - 2ナノオームの低抵抗接続実証



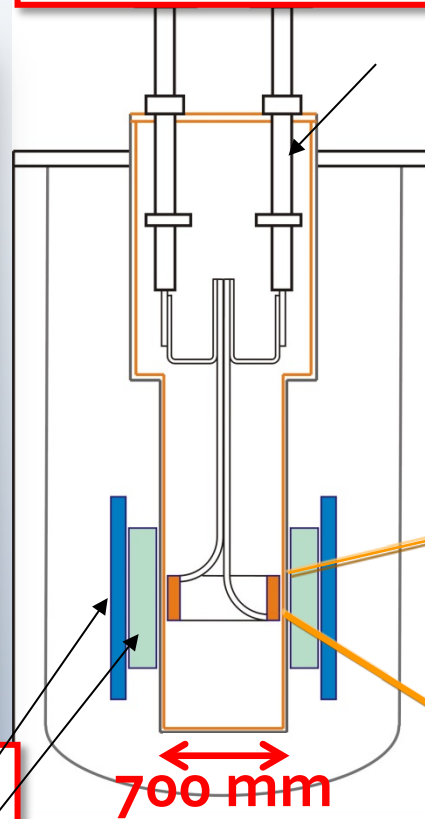
# NIFS における超伝導マグネットの開発研究 (3/3)

- 高磁場マグネット試験設備の増強
  - ✓ 既設の9テスラ超伝導マグネット設備(25年間稼働)を13テスラに更新中
  - ✓ 外層NbTiコイル、内層Nb<sub>3</sub>Snコイル、試験部口径700 mmは13テスラで世界最大
  - ✓ 将来は最内層にさらにNb<sub>3</sub>Snコイルを追加して15テスラまで増強を計画
- ヘリウム液化冷凍設備(24年間稼働)を更新(供給温度可変: 絶対温度 4-50 ケルビン)

口径700 mmで世界最大の磁場



### 3. 温度可変電流リード



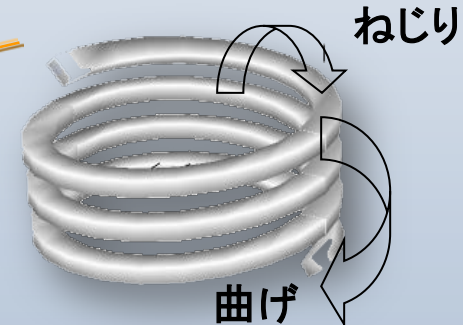
1. 外層コイル
2. 内層コイル

導体の高度化

ReBCO線材の実用化

Nb<sub>3</sub>SnのJc向上

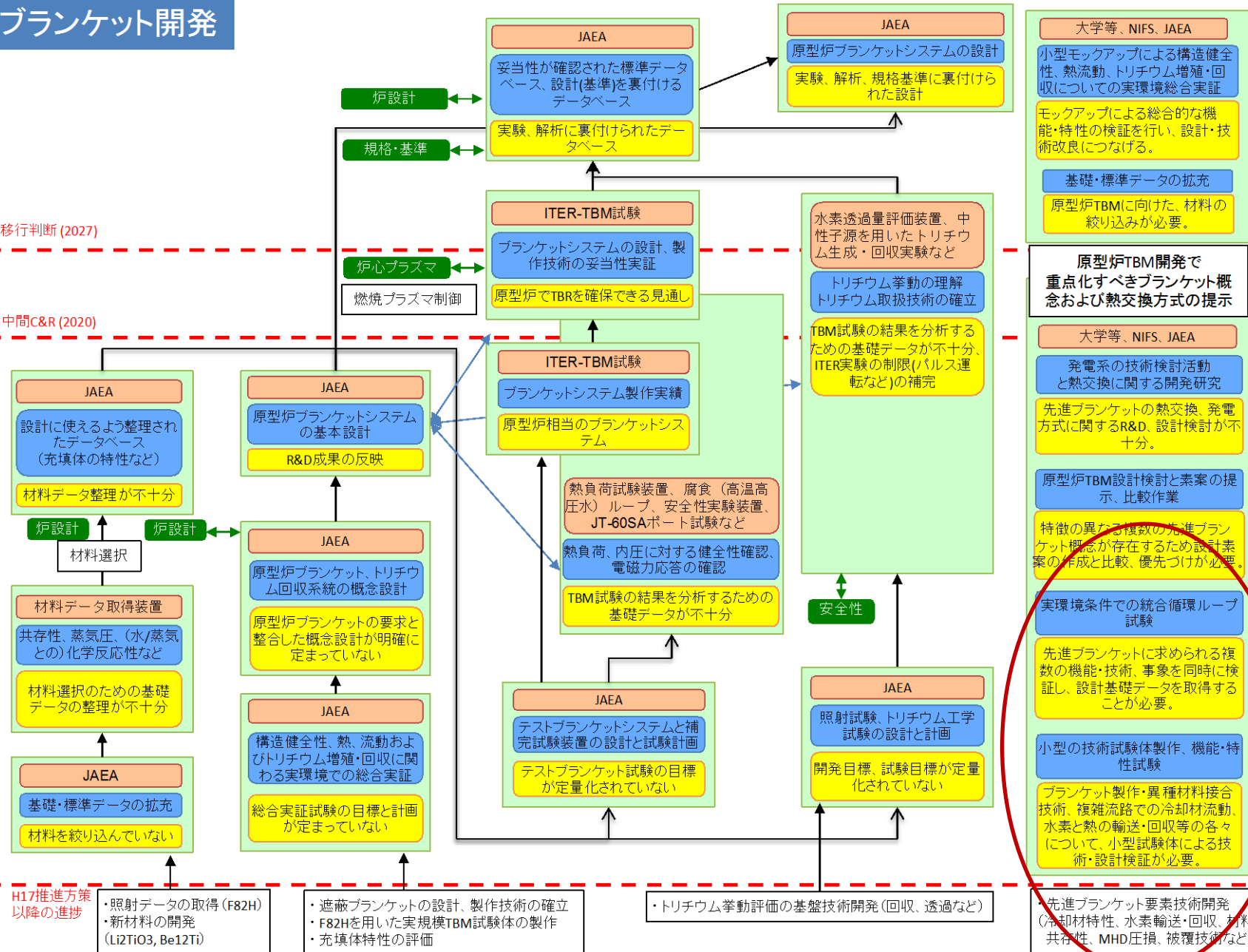
100 kA 級導体サンプル  
(コイル形状)



# ブランケット開発

移行判断 (2027)

中間C&R (2020)

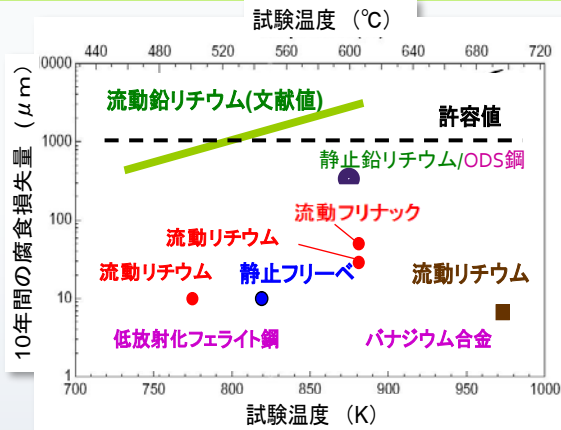


## 小型の技術試験体製作、機能・特性試験

### 静止環境/流動(自然対流・攪拌)環境における共存性研究



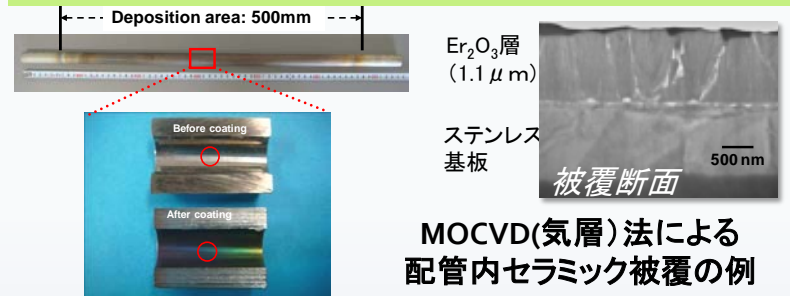
腐食試験用  
自然対流ループ



構造材の腐食量

- ✓ Li/バナジウム合金・低放射化フェライト鋼
- Flibe・Flinak/低放射化フェライト鋼
- LiPb/ODS鋼について、10年間の腐食減肉 1mm 以下を実証 (NIFS、東大、東工大、東海大)

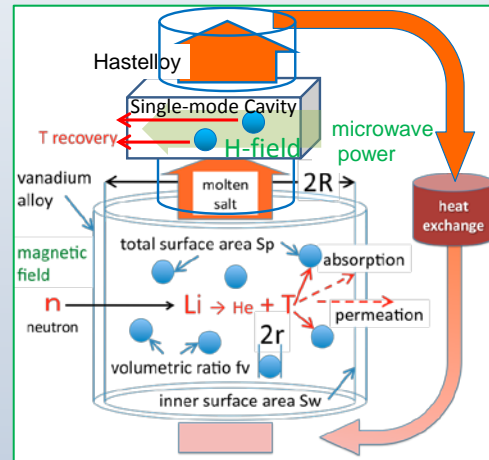
### 大面積電気絶縁被覆、水素透過抑制研究



MOCVD(気層)法による  
配管内セラミック被覆の例

- ✓ 電気伝導度を設計要求値( $10^{-2}S/m$ )以下に抑制、水素ガス透過量を $\sim 1/1000$ に抑制(NIFS、東大)
- ✓ 配管内への被覆技術開発(NIFS、民間、富山大)

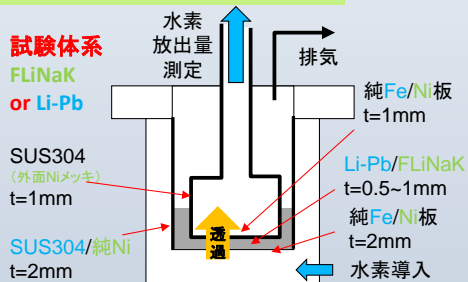
### Flibeブランケット新概念の要素研究



Flibeブランケット  
新提案概略図

- ✓ 水素吸蔵金属パウダー添加による実効水素溶解度の向上とパウダーのマイクロ波加熱による水素回収の新提案と原理実証実験(NIFS、九大)

### 水素挙動・回収研究



対流の影響を抑制した  
水素輸送測定装置



熔融塩用水素  
回収ユニット試作

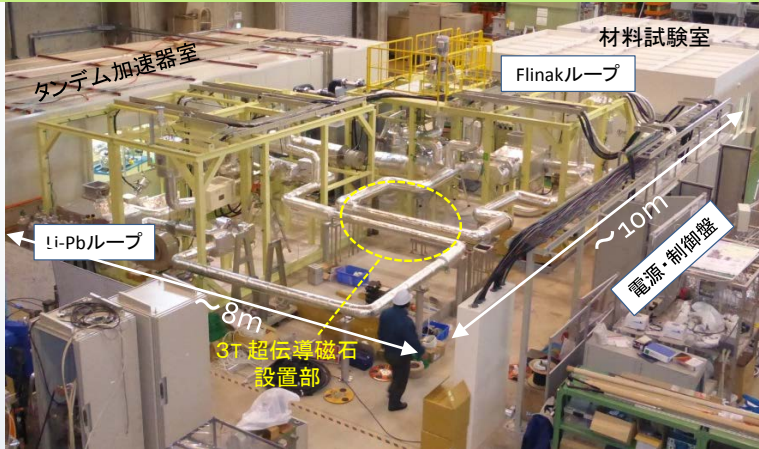
- ✓ Flibe、LiPb等の水素溶解、拡散挙動の基礎データ取得、固体電解質水素センサー開発
- ✓ 電気化学腐食を抑制する熔融塩用 電気絶縁二重管水素回収ユニットの試作 (NIFS、九大)

# NIFSにおける先進ブランケット開発研究(2/2)

## 実環境条件での統合循環ループ試験

### FLiNaK、LiPb統合ループ実験装置Orosh<sup>2</sup>i-2を導入

### 先進ブランケット設計研究



**Orosh<sup>2</sup>i-2 : Operational Recovery Of Separated Hydrogen and Heat Inquiry - 2**

#### Orosh<sup>2</sup>i-2

FLiNaK	LiPb
インベントリ: ~100 L	~100 L
駆動ポンプ: 高温溶融塩用遠心ポンプ	電磁ポンプ
配管材料: インコネル	SUS316
パイプ内径: 25.4mm	40.8mm/25.4mm
流速: 1.5m/s	1.5m/s (磁場印加なし)
基本運転温度: 500°C	350°C

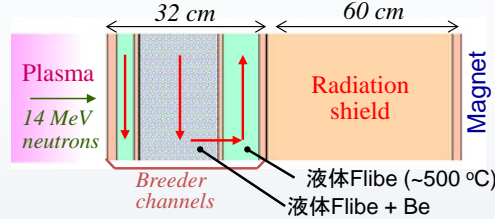
+ MHD実験用 3T 超伝導磁石

+ 腐食試験用 1T 永久磁石

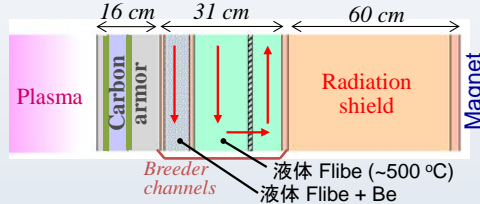
← 同目的としては世界最強

- ✓ ブランケット実環境条件(温度・流速・磁場)を模擬した統合試験が可能な共同研究プラットフォーム
- ✓ 強磁場印加用メインループに加えて、材料共存性、水素・熱の輸送と回収に関する各種実験機器を取り付け交換可能な試験流路部を計画

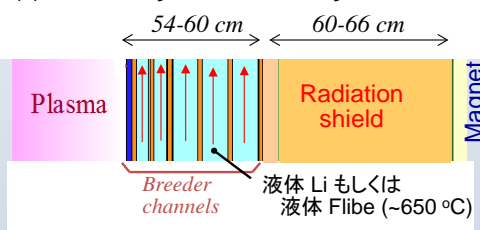
#### (a) Flibe+Be / JLF-1 (低放射化フェライト鋼)



#### (b) Flibe cooled STB

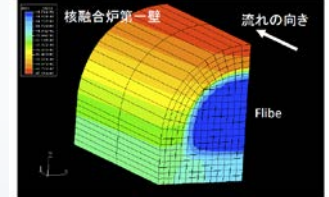


#### (c) Li / V-alloy, Flibe / V-alloy

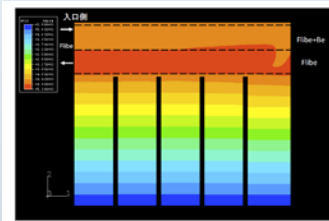
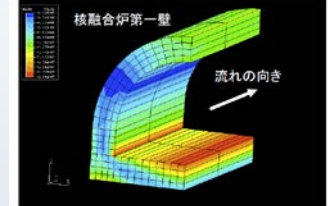


### 先進ブランケット構造例

#### <熱解析結果の一例>



#### <応力解析結果の一例>



### Flibeブランケットの熱・応力解析例

- ✓ 第一壁除熱特性および熱応力の解析・最適化、ブランケット内の温度分布解析等 (NIFS、東北大)
- ✓ 中性子工学研究(燃料増殖・遮蔽性能、必要厚み、核発熱分布、照射損傷、放射化等の評価)