



# 核融合科学研究所の研究計画

## 核融合科学研究所の目標

LHD計画、理論・シミュレーション研究を両輪として、定常ヘリカル型核融合炉に必要な理学・工学にかかる学理を探究し、学術研究の体系化を図る

大学共同利用機関として、また、核融合研究の中核機関として、大学等との共同研究を軸に学術研究、科学技術、人材育成・教育を牽引

## 第2期中期計画(平成22～27年度)

- ・将来の核融合による大規模電力供給の実用化を目指し、大型ヘリカル装置計画、数値実験研究、核融合工学研究を3つの柱として、核融合炉に必要な理学・工学を探究し、学術研究として体系化を図り、25～30年後に核融合炉の実現を目指す
- ・大学共同利用機関として、また、核融合研究の中核機関として、大学等との共同研究を中心に、人材育成・教育を牽引する

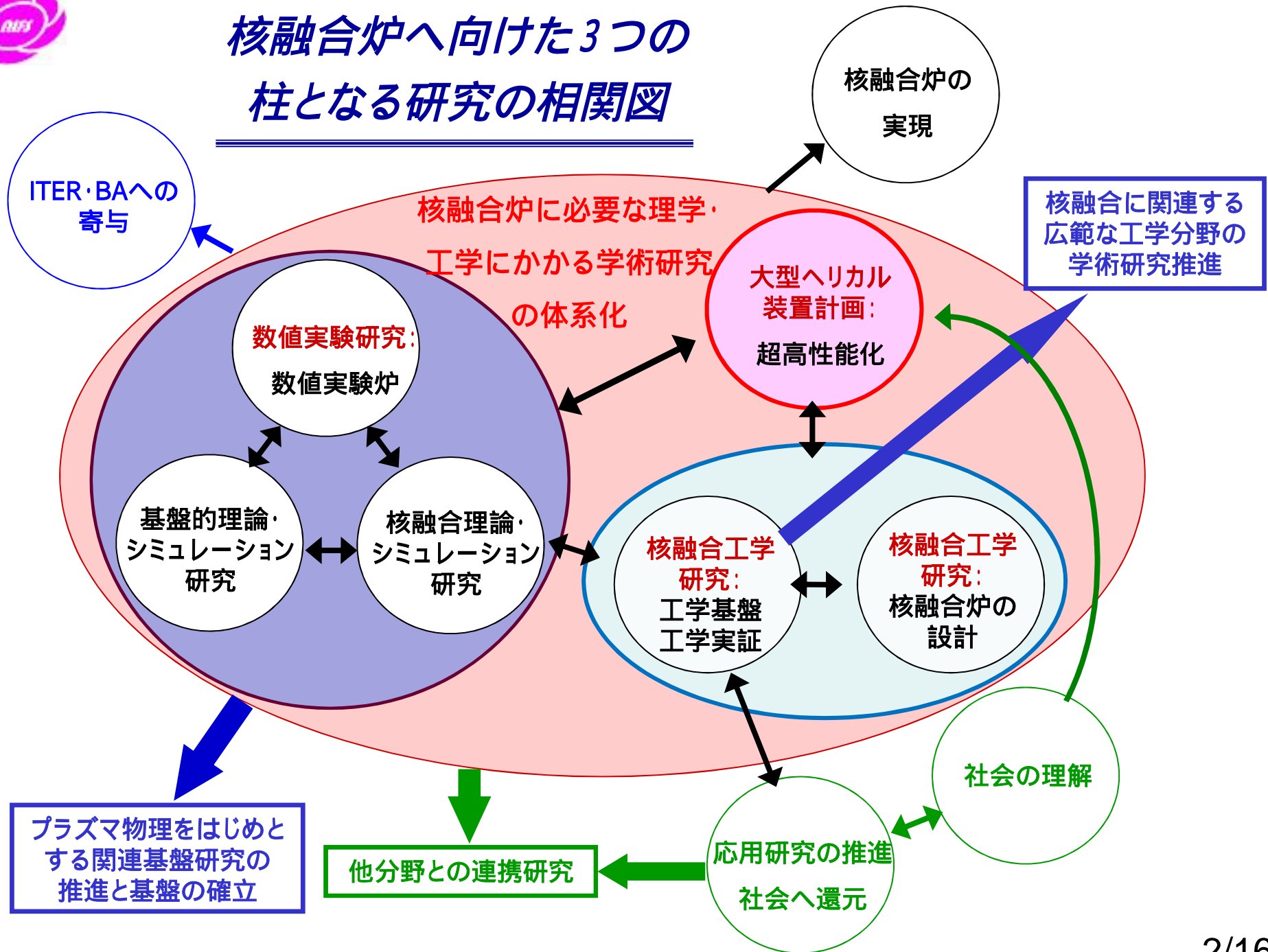


## 3つの柱を研究プロジェクト化

研究目標・時限を明確に



# 核融合炉へ向けた3つの柱となる研究の相関図





# 超高性能プラズマの定常運転の実証

## (大型ヘリカル装置(LHD)による核融合科学研究の推進)

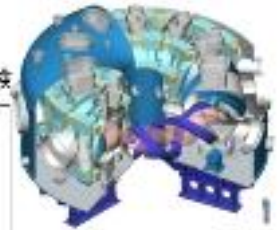
自然科学研究機構  
核融合科学研究所

### 背景・課題

- 大学共同利用機関である核融合科学研究所では、我が国独自のアイデアに基づくヘリカル方式の超伝導コイルを有する大型ヘリカル装置を用いて、将来の核融合炉に不可欠な、超高性能プラズマの定常運転の実証研究を大学等と共同して推進
- ITERが採用しているトカマク方式では、定常運転と安定な制御が未解決の課題
- 将来の核融合炉の早期実現に必要な学理の追究とその体系化を図るため、大型ヘリカル装置による研究を進めて、環状プラズマの総合的理解や体系化を図ることが必須

大型ヘリカル装置(LHD)  
世界最大の定常型実験装置  
平成2~9年度 建設8年計画  
平成10年4月 本格実験開始  
14年間で11万回のプラズマ実験

装置本体の外径	13.5 m
プラズマの直径	約8 m
プラズマの太さ	約1.2 m
プラズマの体積	3.0 m <sup>3</sup>
磁場強度	約3万ガウス



### 目標に向かっての現況

#### 1) 核融合炉炉心プラズマを見通せる超高性能プラズマの実現へ

プラズマイオンの温度 (1億2千万度)

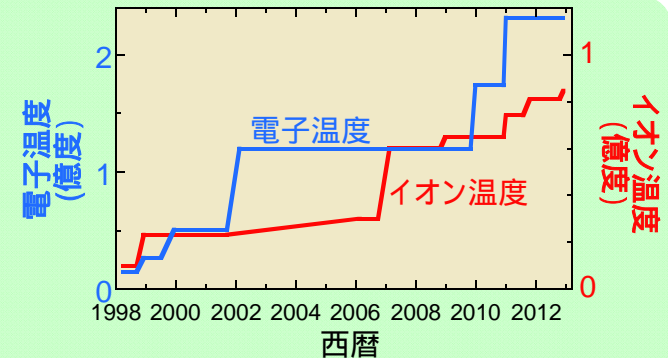
イオン温度 8,500万度を達成 (H24)

電子温度 2億3,000万度(密度2兆個/cc)

最終目標1億2000万度へ

H24, 1億5,000万度 (10兆個/cc)

より高い密度で1億度以上へ



#### 2) プラズマと磁場との高い圧力比 (ベータ値) 実現

経済的な核融合炉に必要なベータ値5%以上 (磁場 0.43テスラ) を達成

より高い磁場 (1テスラ以上) での達成へ

#### 3) 高性能プラズマの生成及び長時間のプラズマ放電保持

約1時間のプラズマ (1,200万度) の保持を達成 H24, 2,500万度を19分定常保持

より高温 (数千万度) での1時間定常保持へ

#### 4) 環状プラズマの総合的理解とプラズマ物理の体系化

ブレークスルーとなる発見: 不純物の自動排出機構、不安定性の自己安定化、良好な粒子閉じ込めと高い安定性の両立、核融合条件の10倍以上となる超高密度プラズマ、等の革新的発見と体系的理解

トカマク方式を含む環状プラズマの総合的理解 データベースの構築と高温プラズマに関する学術研究基盤の提供



## LHDの目標達成度

### 大型ヘリカル装置最終目標の7合目に至る

赤字は平成24年度達成

プラズマ性能	大型ヘリカル装置 達成値	大型ヘリカル装置 最終目標値	核融合炉 設計条件の目安
イオン温度	8,500万度 (密度10兆個/cc)	1億2,000万度 (密度20兆個/cc)	1億2,000万度以上 100兆個/cc以上
電子温度	2億3,000万度 (密度2兆個/cc) 1億5,000万度 (密度10兆個/cc)	1億2,000万度 (密度20兆個/cc)	
密度	1,200兆個/cc (温度300万度)	400兆個/cc (1,500万度)	
ベータ値 (プラズマ圧力/ 磁場圧力)	5.1% (磁場0.425 T) 3.4% (磁場1T)	5% (磁場1-2 T)	5%以上 (磁場5 T以上)
定常運転	54分28秒 (500kW) 18分55秒 (1MW)	1時間 (3 MW)	定常 (1年)



# 大型ヘリカル装置は目標に向かって新たなステージへ

## 大型ヘリカル装置の基本性能の検証

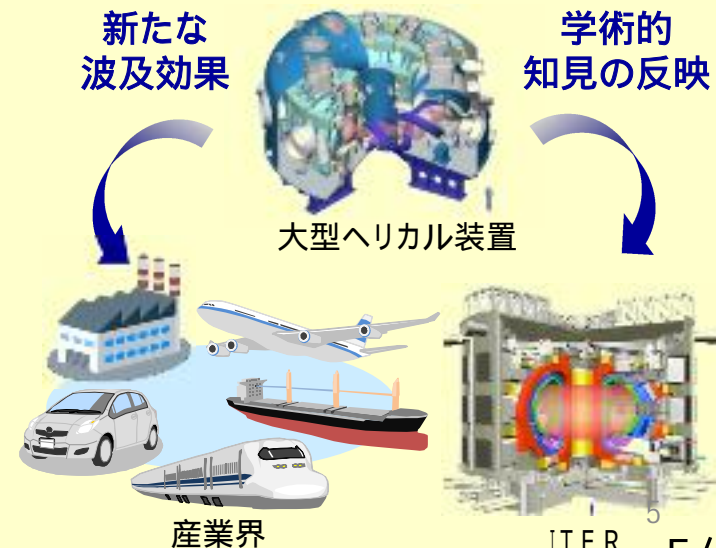
新たなステージへ

### 新たなステージ

- 1) 超高性能化により核融合を見通せる定常プラズマを生成、研究  
← 格段の性能向上が期待できる重水素実験に係る地元自治体との協定書等締結を受け、準備に着手
- 2) 双方向型共同研究を中心とした大学の総力を挙げた核融合工学・炉設計研究の推進
- 3) 核燃焼段階を補完する数値実験研究(所内連携)

## 電気出力100万kW級定常核融合炉の早期実現へ

- ・超高性能プラズマの定常保持により得られた成果・学術的知見は、ITER計画に寄与
- ・核融合科学に関わる基礎学術研究の進展により、新しい学術分野や技術を創出し、産業界への新たな波及効果
- ・世界最先端の研究環境を大学院生・若手研究者の教育に生かし、人材育成に貢献
- ・世界最大のヘリカル装置であるとともに、日本で唯一稼働している大型装置であり、核融合科学に関するCOEとして世界に大きく貢献





## 平成25, 26年度のLHD研究計画

【H24】

- ・水素で実験
- ・イオン温度8,500万度達成
- ・重水素実験にかかわる協定 等を地元自治体と締結、準備に着手



【H25】

### 研究計画

- ・水素で実験、核融合条件の温度により近いプラズマで学術研究を実施
- ・24年度補正で改造を進めている中性粒子ビーム入射加熱装置により超高性能プラズマの定常運転の実証に向けたプラズマの超高性能化を目指す
  - イオン温度9,000万度(密度16兆個/cc)
  - 磁場1Tにおいてベータ値(プラズマ圧力/磁場圧力)4%
- ・加熱電力増強下での閉構造ダイバータによるプラズマの熱・粒子制御実験  
超高性能プラズマに近いプラズマの実現



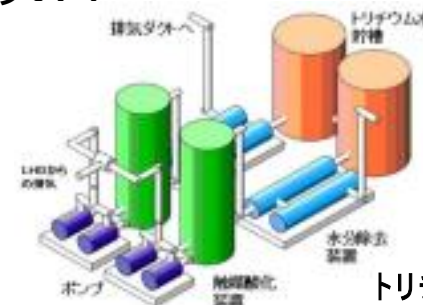
中性粒子ビーム入射加熱装置



閉構造ダイバータ

【H26】

- ・トリチウム除去装置など、重水素実験に向けた必要な設備の整備、および運転の高信頼性確保のため老朽化した設備の改修を進める



トリチウム除去装置



## LHD重水素実験(H28~H36)の目的と意義

閉じ込め改善による高性能化を実現

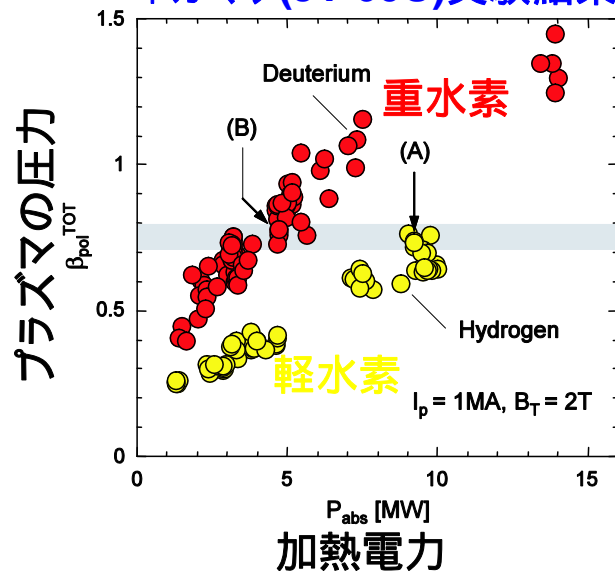
- 核融合条件により近いプラズマの研究を可能とする
- 新たな研究領域の開拓や実験の多様性を拡大すること

閉じ込め物理の同位体効果を明らかに

- DTプラズマによる核燃焼実験を十分な確度で予測できるモデルを構築
- 高温高密度プラズマの定常運転下での熱粒子制御及びプラズマ-壁相互材料作用の研究

ヘリカル系の高エネルギーイオンの閉じこめ性能が核燃焼プラズマを展望できることを示すこと

### トカマク(JT-60U)実験結果



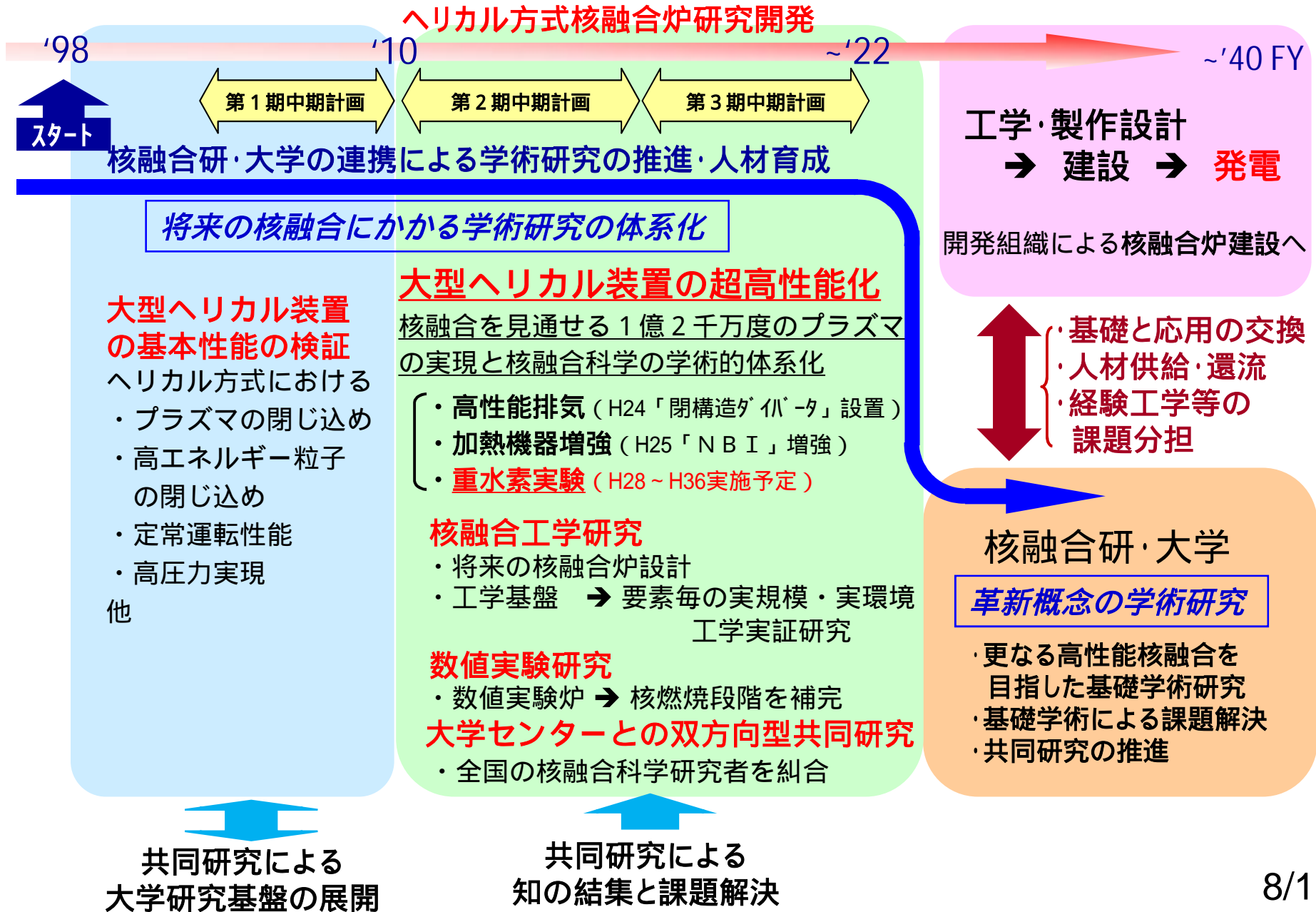
世界的なインパクトを持つ、先駆的研究を展開

重水素を用いると、閉じ込め性能が向上することが広く実験で認められている

- なぜか、物理機構は未解明
- LHDを用いて、学術的に解明
- プラズマ物理学としても、核融合炉設計にも極めて重要な価値



# 将来の核融合炉実現への戦略(大型ヘリカル装置の貢献)





# 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

# ヘリカル型核融合炉FFHR-d1概念設計活動

## ● 第1ラウンド (H22-23年度)

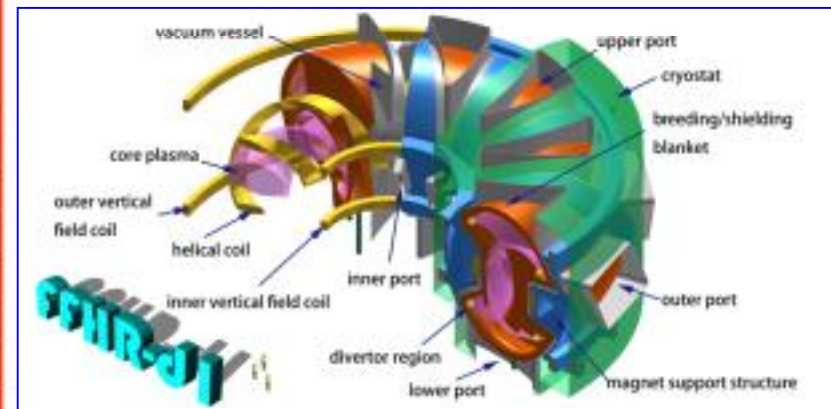
- FFHR-d1基本スペックの確定

## ● 第2ラウンド (H23-24年度)

- FFHR-d1炉内機器の3D検討
- LHD・数値プロジェクトとの連携
- 設計の広がりも確保(オプション)

### FFHR-d1 設計パラメータ A. Sagara et al., Fusion Eng. Des. 87(2012)594.

			LHD	FFHR2	FFHR2m1	FFHR2m2		FFHR-d1
						Standard	SDC	
Coil pitch parameter	$\gamma_c$		1.25	1.15	1.15	1.2		1.25
Coil major radius	$R_c$	m	3.9	10	14.0	17.3		15.6
Plasma major radius	$R_p$	m	3.75	10	14.0	16.0		14.4
Plasma minor radius	$a_p$	m	0.61	1.24	1.73	2.35		2.54
Plasma volume	$V_p$	m <sup>3</sup>	30	303	827	1744		1878
Blanket space	$\Delta$	m	0.12	0.7	1.1	1.05		0.765
Magnetic field	$B_0$	T	4	10	6.18	4.84		4.7
Magnetic energy	$W_{mag}$	GJ	1.64	147	133	160		160
Fusion power	$P_{fus}$	GW		1	1.9	3		3
Neutron wall load	$\Gamma_n$	MW/m <sup>2</sup>		1.5	1.5	1.5		1.5
H factor of ISS95	$H^{ISS95}$			2.40	1.92	1.92	1.64	2
Plasma beta (evaluated with $B_{pol}$ )	$\langle \beta \rangle$	%		1.6	3.0	4.4	3.35	5
Divertor heat load ( $\Delta$ 0.1m) (on average)	$\Gamma_{div}$	MW/m <sup>2</sup>			5	7.2	1.9	8.1
Total capital cost		G\$(2003)		4.6	5.6	7.0		
COE		mill/kWh		155	106	93		



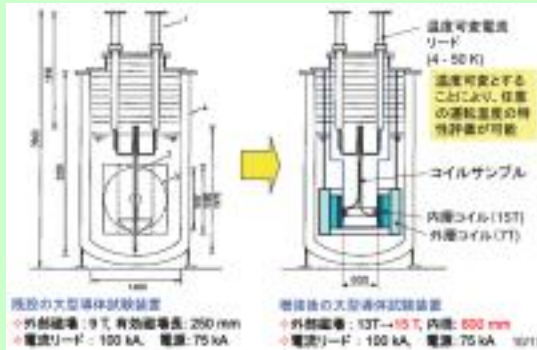
- ✓ 数式による炉内機器形状の定義  
3D-CADや中性子輸送計算コード等への適用を容易に
- ✓ 支持構造部の形状最適化  
電磁力による最大応力は600 MPa以下の見込み
- ✓ 上下および外周部に大型ポートを確保  
メンテナンス開口部及びダイバータ排気経路を確保

# 「核融合原型炉に向けた電磁石・発電システムの工学研究の推進」 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

## (2) 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



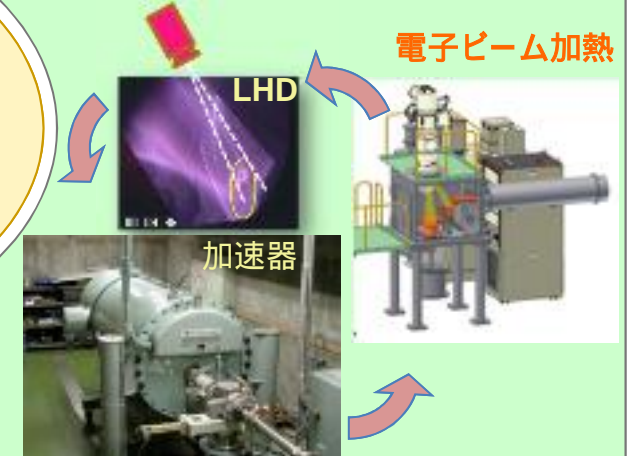
将来の核融合炉

平成24年度補正予算

設備整備により  
工学基盤構築が加速

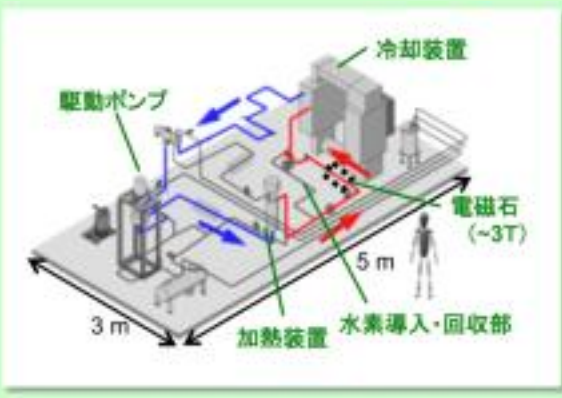
## (3) 高熱流プラズマ対向壁研究

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



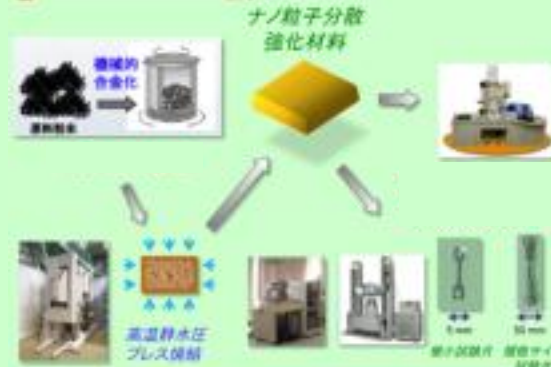
## (4) 長寿命液体 ブランケット研究

- ◇ 熱・物質流動ループ装置



## (1) 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



## (5) 微量トリチウム管理技術研究

- ◇ 水素試験・計測装置



# 核融合研究作業部会における審議を反映

科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 原子力科学技術委員会  
核融合研究作業部会

核融合研究作業部会 報告書(案) 平成25年1月  
「核融合原型炉開発のための技術基盤構築の進め方について」  
課題解決に向けて必要となる取り組みと体制  
実規模工学実証試験を伴う原型炉の本格的な概念設計活動を見通すために、  
原型炉概念の構築と設計作業及び10の構成要素に関わる研究開発課題を  
整理し、この課題を解決する

## 3.2.1. 超伝導コイル開発:

Nb<sub>3</sub>Sn, Nb<sub>3</sub>Al, ReBCOの高磁界・高強度化、導体試験法の確立、等

## 3.2.2. ブランケット開発:

液体ブランケットの強磁場影響、トリウム・熱回収、複合流動装置の運転実証、等

## 3.2.3. ダイバータ開発:

トリウム蓄積量制御法の研究、低熱伝導性材料での定常熱除去、  
機器の損耗、脆化、保守、等

## 3.2.7. 核融合燃料システム開発:

DT環境試験施設での計量管理技術の研究、廃棄物処理技術の構築、等

## 3.2.8. 核融合炉材料開発と規格・基準策定:

構造設計基準の策定、中性子照射データ取得、材料試験の規格基準の確立、等

# 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

別事業体による  
核融合炉の工学設計

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

(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

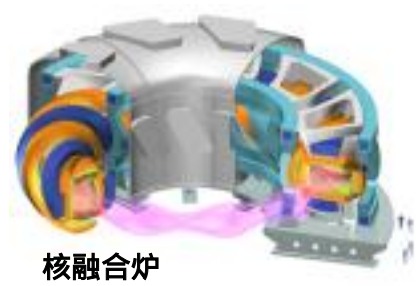
(4)長寿命液体  
ブランケット研究



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

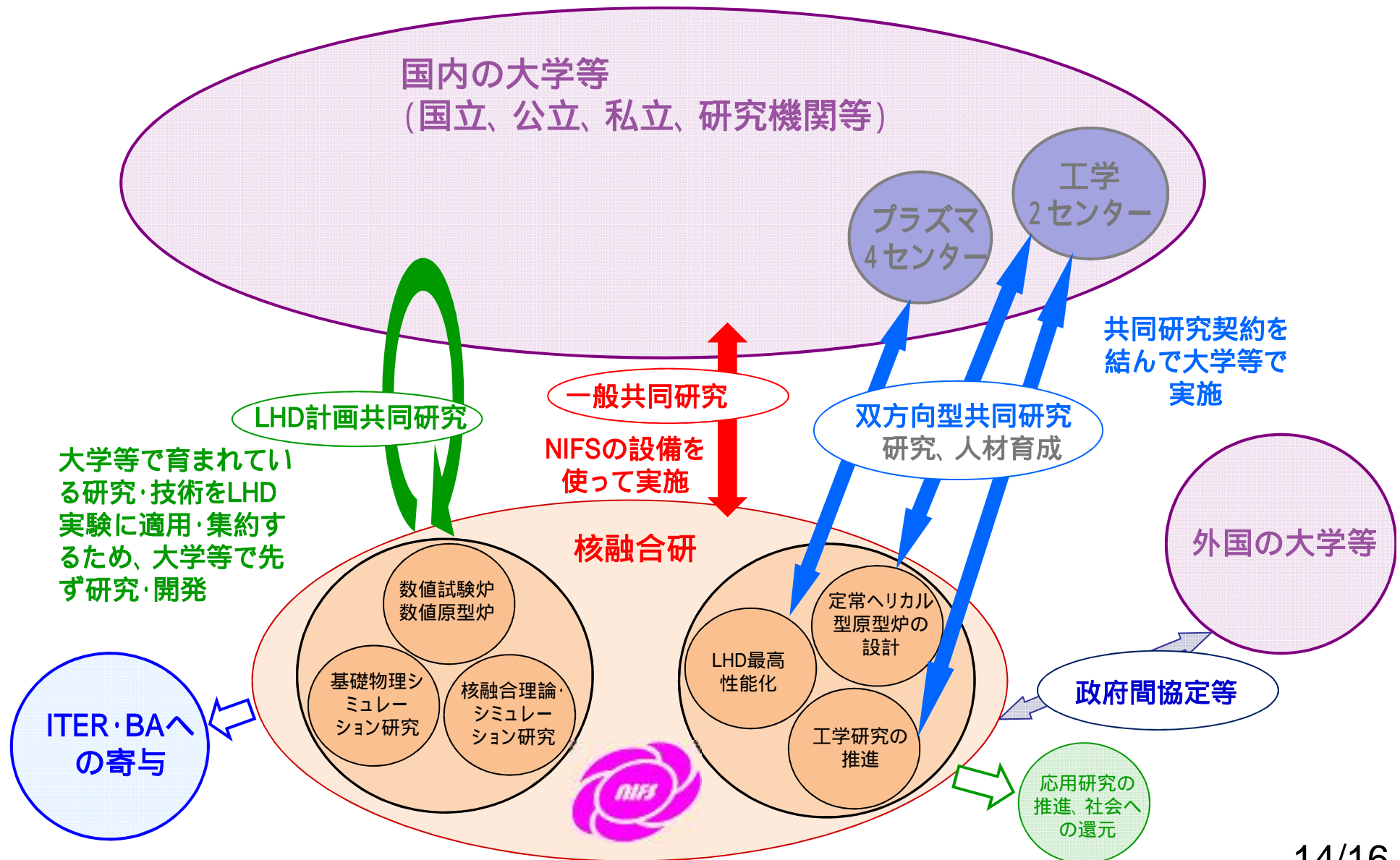


核融合炉

大学等との共同研究と人材育成

# 定常ヘリカル型原型炉へ向けた研究と共同研究

共同研究により、広範な学術研究を共に進める、あるいは補う



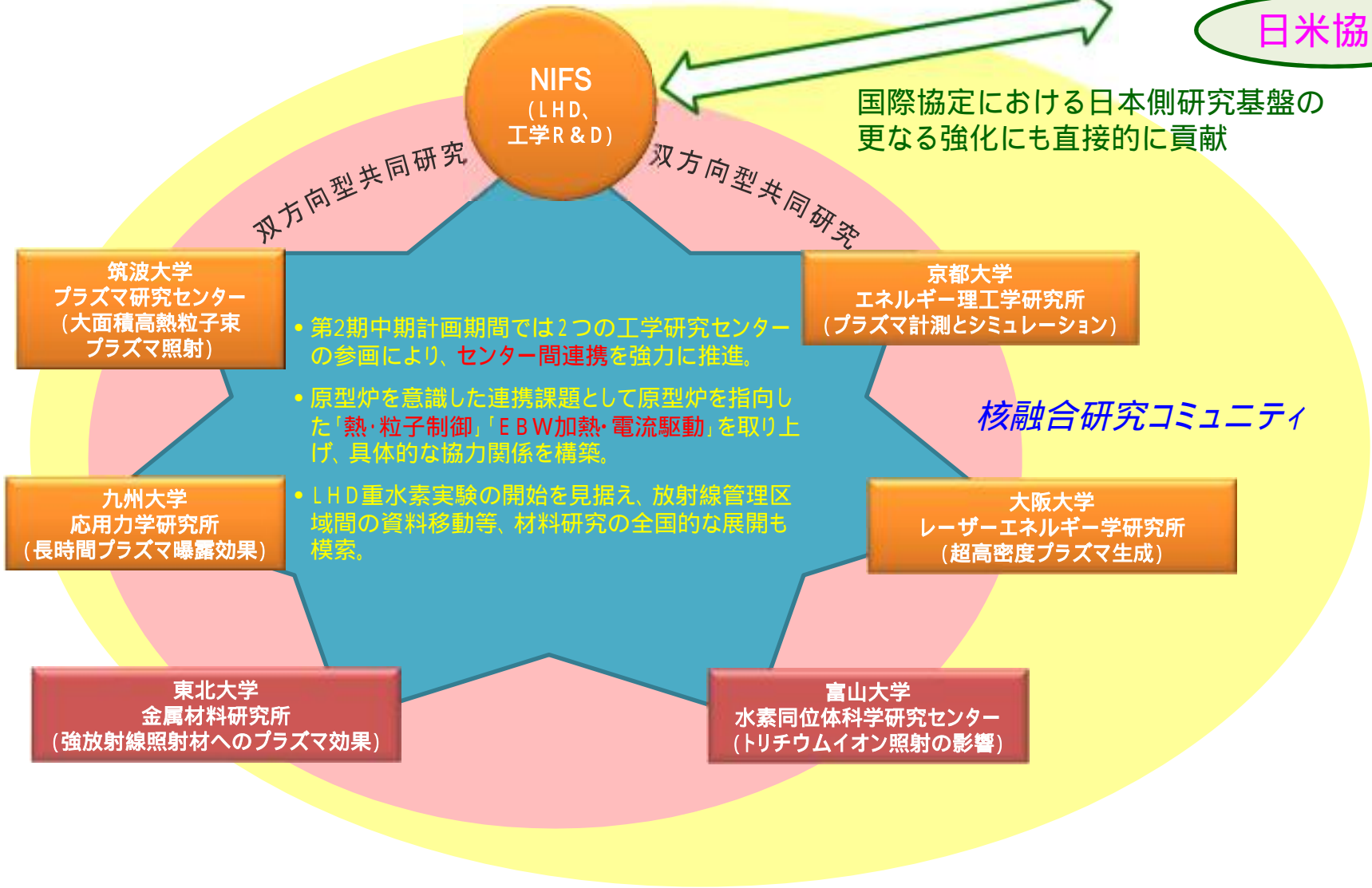
# 双方向型研究

4プラズマ研究センターをハブとした共同研究の全国展開から、2工学研究センターを加えたセンター間連携へと拡充し、共同研究の更なる展開を推進

テキサス州  
協定

日米協力

国際協定における日本側研究基盤の更なる強化にも直接的に貢献





## まとめ

第二期中期計画以後

核融合炉の実現に向けて所内研究体制をプロジェクト化



大型ヘリカル装置計画研究P (重水素実験)  
数値炉実験研究P  
核融合工学研究P (定常ヘリカル型原型炉設計を含む)

の3本柱を中心とした研究を大学共同利用機関として

新たに工学分野を取り込んだ双方向型共同研究

などの大学等との連携・共同研究を軸に推進し

定常ヘリカル型核融合炉に必要な理学・工学にかかる  
学術研究の体系化(→ 定常環状プラズマ型核融合炉)

が順調に進んでいる。

また、将来の核融合研究・開発を担う人材育成・教育が、双方向型共同研究、総研大等で進められている。