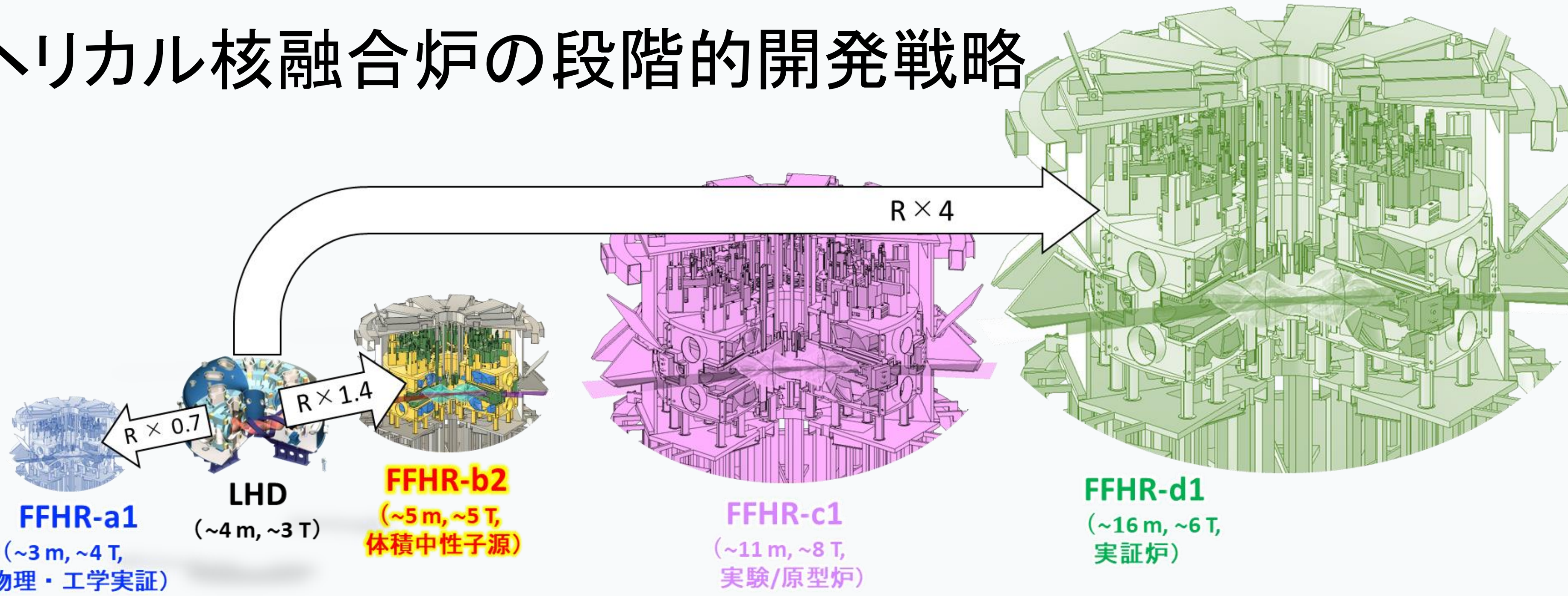


核融合工学研究プロジェクトにおける核融合炉設計活動とR&Dのリンク (1)

1. FFHR設計加速チームが提案するヘリカル核融合炉の段階的開発戦略

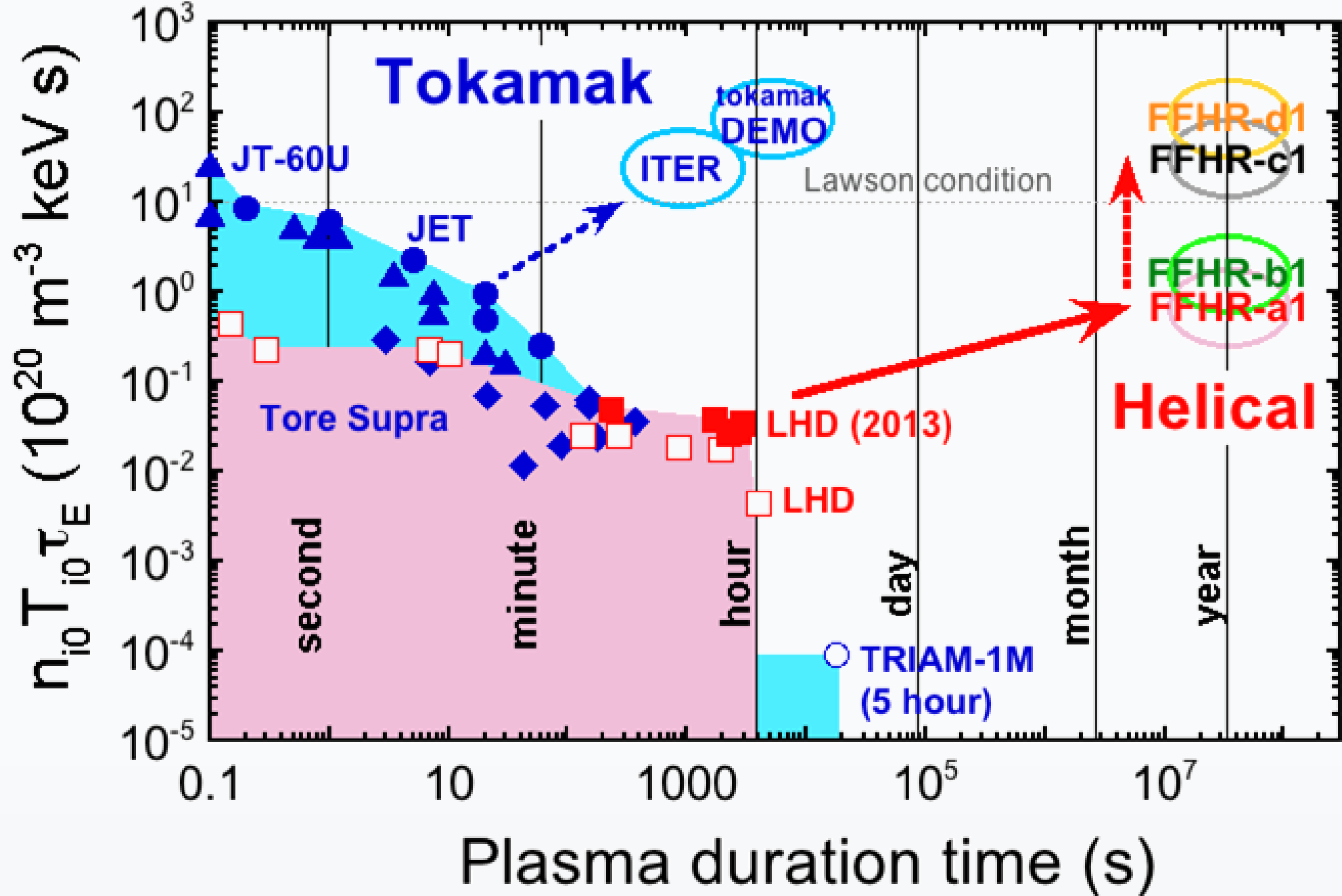
FFHR設計加速チームはヘリカル核融合商用炉の実現に向けた段階的開発戦略を提案している。

この段階的開発戦略では、LHD次期装置としてFFHR-a1 (プラズマ大半径 $R \sim 3$ m) を、次いでヘリカル体積中性子源HEVNSとしてFFHR-b2 ($R \sim 5$ m) を建設し、これらにおいて高温超伝導マグネットコイルやブランケット、ダイバータなどの総合実証を行った後、電気出力10万kW級のFFHR-c1 ($R \sim 10$ m) を経て、電気出力100万kW級のFFHR-d1 ($R \sim 15$ m)の実現に至るというシナリオを採る。



FFHRシリーズの諸元

	LHD	FFHR-a1 Pilot-HEVNS	FFHR-b2 HEVNS	FFHR-c1 EXP-PROTO	FFHR-d1B DEMO-COM
R_c (m)	3.9	2.73	5.46	10.92	15.6
B_c (T)	2.53	4.0	5.33	7.3	5.6
g_c	1.25	1.20	1.20	1.20	1.20
j_{HC} (A/mm ²)	35	120	80	54	30
B_{max} (T)	5.8	10.0	13.2	18.0	14.0
W_{mag} (GJ)	0.67	0.67	9.70	141	248
P_{fusion} (MW)	—	—	22	350	3,000
P_{aux} (MW)	30	20	20	25	0
q_{FW} (MW/m ²)	—	—	0.002	0.065	0.071
$\langle G_{nw} \rangle$ (MW/m ²)	—	—	0.10	0.40	1.7
P_{div} (MW)	18	12	14	57	360
$Q_{div,ave}$ (MW/m ²)	9	12	4	4	11
$f_{n,HC}$ (n/cm ² /s)	—	—	1.4×10^{12}	1.7×10^{11}	8.5×10^{10}
q_{HC} (mW/cc)	—	—	23	2.8	1.4



トカマク型及びヘリカル型核融合プラズマ実験装置でこれまでに達成された核融合三重積とプラズマ保持時間。段階的開発戦略では、まず1年間のプラズマ保持を実証してから装置を大型化・高磁場化し、プラズマを高性能化する。

2. 核融合工学研究プロジェクト関連の研究課題一覧

核融合工学研究プロジェクト課題提案		研究代表者	関連するR&Dテーマ				関連する炉設計の重要課題									
NIFS11UFFFo11	ヘリカル原型炉システム整合性評価に関する研究	後藤拓也	炉心プラズマ (1)	炉心プラズマ (2)	燃料供給 (1)	加熱 (1)		#01	#14	#16						
NIFS17UFFFo21	ブランケット設計基盤(照射実験によるブランケット材料特性研究)	田中照也	ブランケット (6)	ブランケット (7)				#12	#13	#17						
NIFS11UFFFo22-2	低放射化材料の高温化(超塑性)	能登裕之	核融合炉材料 (1)					#11								
NIFS15UFFFo22-3	タングステン(W)および銅(Cu)の高性能化研究	能登裕之	核融合炉材料 (2)	核融合炉材料 (3)				#05	#17							
NIFS15UFFFo22-4	高温静水圧処理法の高高度化	菱沼良光	核融合炉材料 (9)					#05	#06	#11	#12	#17				
NIFS11UFFFo23	核融合炉で使用後10年以内に再利用可能な低放射化バナジウム合金の開発	長坂琢也	核融合炉材料 (5)					#11	#17	#21						
NIFS11UFFFo24	液体増殖ブランケット用バナジウム合金異材接合材の試作開発	長坂琢也	核融合炉材料 (6)					#11								
NIFS16UFFFo25-1	液体ブランケット長寿命化(3次元構造設計支援実験)	田中照也	ブランケット (1)	ブランケット (6)	ブランケット (7)											
NIFS13UFFFo25-2	液体ブランケット長寿命化(材料—増殖材共存性)	長坂琢也	核融合炉材料 (7)	核融合炉材料 (8)				#11	#12							
NIFS11UFFFo26	ブランケット長寿命化(被覆・遮蔽材料の高高度化)	菱沼良光	ブランケット (6)													
NIFS16UFFFo28-2	真空条件下での水素同位体脱離実験	芦川直子	トリチウム・安全 (3)					#04	#07	#09	#14	#19	#21			
NIFS11UFFFo29	大電流イオン源を用いたセラミックスコーティング性能評価法の開発	加藤太治	ブランケット (8)													
NIFS11UFFFo31	3Dモデルによる核融合炉構造物設計研究	田村仁	超伝導マグネット (4)	ブランケット (1)				#02	#04	#12	#20					
NIFS11UFFFo32-1	高熱流プラズマ対向壁	時谷政行	ダイバータ (1)	ダイバータ (5)	ダイバータ (6)	核融合炉材料 (4)		#04	#05	#06	#07	#11	#17			
NIFS17UFFFo32-2	低放射化フェライト鋼を用いたダイバータ受熱構造開発	増崎貴	ダイバータ (5)	ブランケット (5)				#04	#05	#06	#07	#09	#11	#14	#17	
NIFS17UFFFo32-3	熱負荷による亀裂形成の研究	濱地志憲	核融合炉材料 (5)					#05								
NIFS11UFFFo33	不純物ガスバフによる放射損失効果に関する研究	村上泉	ダイバータ (7)					#05	#15							
NIFS11UFFFo34	タングステンのイオン照射と多価イオン分光計測	坂上裕之	計測 (3)					#05	#15							
NIFS17UFFFo36	金属系高磁場超伝導線材の高強度化と特性改善	菱沼良光	超伝導マグネット (8)													
NIFS11UFFFo37	表面分析装置を用いたPWI研究	時谷政行	PWI (1)	PWI (2)	PWI (3)			#05	#07	#09	#14	#17				
NIFS15UFFFo38-1	革新的な真空排気装置と液体ヘリカルダイバータの開発	宮澤順一	ダイバータ (2)	ダイバータ (3)	ダイバータ (4)			#04	#05	#07	#09	#11	#14	#17		
NIFS16UFFFo38-2	液体ダイバータ開発のための液体金属小型循環ループの作製と実験	後藤拓也	ダイバータ (2)	ダイバータ (3)	ダイバータ (4)			#04	#05	#07	#09	#11	#14	#17		
NIFS15UFFFo39	昇温脱離ガス分析装置を用いた分析のための環境整備	矢嶋美幸	PWI (1)					#04	#05	#07	#09	#11	#14	#17		
NIFS17UFFFo40	FFHR-c1の縮尺模型製作と保守手法の確立	宮澤順一	ダイバータ (4)	ブランケット (1)	ブランケット (3)	ブランケット (4)		#04	#06	#12	#13	#17	#20	#21		
NIFS18UFFFo41	プラズマ対向壁表面の組成・構造変化および照射損傷実験	矢嶋美幸	PWI (2)					#04	#05	#07	#09	#11	#14	#17		
NIFS19UFFFo42	液体金属冷却第一壁に関する研究	濱地志憲	ブランケット (1)	ブランケット (2)				#04	#12							
NIFS19UFAA002	大口径高磁場導体試験装置を用いる大電流導体試験法の研究	今川信作	超伝導マグネット (1)	超伝導マグネット (2)	超伝導マグネット (3)	超伝導マグネット (12)		#02								
NIFS11UFAA003	ヘリカル型核融合炉用超伝導コイルに最適な大電流燃線導体の開発と間接冷却法の導入	高畑一也	超伝導マグネット (7)													
NIFS17UFAA004	核融合炉用液体水素磁気冷凍機の開発	三戸利行	低温 (4)	スピントフ (2)				#02	#03							
NIFS11UFAA005-1	核融合炉への適用を目指した大電流高温超伝導導体と接続部の開発	柳長門	超伝導マグネット (1)					#02								
NIFS17UFAA005-2	ヘリカル炉 FFHR の製作方法に関する技術検討	柳長門	超伝導マグネット (1)					#02								
NIFS19UFAA006	Twisted stacked-tape cable導体の電磁特性及び熱的安定性の研究	尾花哲浩	超伝導マグネット (10)					#02								
NIFS19UFAA007	超伝導導体臨界電流実時間測定法	カ石浩孝	超伝導マグネット (11)					#02	#15							
NIFS19UFAA008	バナジウム合金の腐食耐性制御に関する研究	小林真	核融合炉材料 (8)					#11	#12							
NIFS19UFAA009	高温超伝導導体中の欠陥検出手法の研究	小野寺優太	超伝導マグネット (2)	超伝導マグネット (5)				#02	#04							
NIFS19UFAA010	液体水素の物性・特性評価研究	岩本晃史	低温 (2)					#02	#03							
NIFS11UFAA012	極低温環境下での材料の熱伝導率測定と界面熱抵抗の研究	岩本晃史	低温 (1)					#02	#03							
NIFS13UFHH002	高集積度計測・制御用電子機器の照射下特性研究	西谷健夫	計測 (2)					#15	#17							
NIFS19UFPP001	HTSテープ積層導体のマグネット応用に関する研究	成嶋吉朗	超伝導マグネット (3)	超伝導マグネット (6)				#02								
NIFS19UFZG-001	STAR5導体長尺製作法の開発研究	柳長門	超伝導マグネット (1)					#02								
NIFS19UFZG-002	FAIR導体開発	三戸利行	超伝導マグネット (2)					#02								
NIFS19UFZG-003	WISE導体の基礎研究開発	宮澤順一	超伝導マグネット (3)					#02								
NIFS19UFZG-004	HTS導体試験設備整備	三戸利行	超伝導マグネット (1)	超伝導マグネット (2)	超伝導マグネット (3)			#02								

機構分野間連携共同研究		研究代表者	関連するR&Dテーマ				関連する炉設計の重要課題									
2019 -	DNA二重鎖切断直接観察によるホウ素中性子捕捉療法の治療効果の定量評価	小林真	スピントフ (1)													

原型炉設計合同特別チーム共同研究		研究代表者	関連するR&Dテーマ				関連する炉設計の重要課題									
2018 -	原型炉におけるトリチウム蓄積量の予測及び実時間トリチウム除染法の検討	芦川直子	トリチウム・安全 (3)					#04	#07	#09	#14	#19	#21			

LHD計画共同研究		研究代表者	所属	世話人	関連するR&Dテーマ				関連する炉設計の重要課題							
NIFS19KOA001	LHDの中性子応用に向けた高エネルギー荷電粒子計測システムの開発	吉橋幸子	名古屋大学	小林真	計測 (1)				#15							

双方向型共同研究		研究代表者	所属	世話人	関連するR&Dテーマ				関連する炉設計の重要課題							
富山大学	金属壁の水素同位体置換に関する基礎実験	芦川直子	NIFS	芦川直子	トリチウム・安全 (3)				#04	#07	#09	#14	#19	#21		

一般共同研究		研究代表者	所属	世話人	関連するR&Dテーマ				関連する炉設計の重要課題							
NIFS16KLPF051	水素同位体滞留量の定量評価を目指したLHD保護壁における水素同位体の拡散・滞留・脱離に関する研究	吉田直亮	九州大学	矢嶋美幸	PWI (2)				#05	#07	#09	#14				
NIFS19KEMF158	タンク・ステンレニウム合金における水素同位体及びヘリウム吸蔵量	Lee Heun Tae	大阪大学	矢嶋美幸	PWI (3)				#05	#07	#09	#14	#17			
NIFS17KNWF003	中性子照射損傷を受けたプラズマ対向材料の水素同位体吸蔵特性	大野哲靖	名古屋大学	増崎貴	PWI (3)				#05	#07	#09	#14	#17			
NIFS18KECA098	高温超電導コイルの巻線技術と電磁力に対する 臨界電流特性評価	野村新一	明治大学	カ石浩孝	超伝導マグネット (9)				#02	#04						
NIFS17KERA011	溶融塩テストループを用いた超臨界CO ₂ ガスタービンマグマ発電模擬実験の検討	石山新太郎	弘前大学	カ石浩孝	電源・発電 (2)				#13							
NIFS19KERA015	核融合プラントと電力系統との接続条件に関する基礎検討	カ石浩孝	NIFS	カ石浩孝	電源・発電 (3)				#13							
NIFS17KEMF098	バナジウム合金組成の最適化に向けた耐スエリング特性研究	福元謙一	福井大学	長坂琢也	核融合炉材料 (5)				#11	#17	#21					

[illegible]

4. R&Dテーマ一覧 (contd.)

真空容器・安全 (3)		#04	#07	#09	#14	#19	#21	
真空容器用ドリュウム除染		プラス真空容器に閉じた状態で実施可能な、メンテナンスが開始できるレベルまでのドリュウム除染法を示す。						
5.0/10								
【NIFS: 芦川】[茨城大学: 鳥養]【OIST: 桑谷】								
除染方法	対象材料	カウプタングステン	カウプタングステン	ステンレス鋼	ステンレス	検出	温度制御	必要パラメータ
対象・条件	の部位	等温放射	プラズマ放射	実験装置	等温放射カウプタングステン	詳細手法	放射線	の選定
	の位置	の位置	の位置	の位置	の位置	の位置	の位置	の選定
(2018) ドリュウム除染の対象となる真空容器内蔵部・材料の区分、対象、条件の精査およびメンテナンスの作成を行う。								
(2019) プラスを用いた真空容器内蔵部・材料の区分、対象、条件の精査およびメンテナンスの作成を行う。								
見出した課題にたいして実用装置の整備を進める。								
(2020) ステンレス、カウプタングステンの比較から温度制御・放電電圧・電流値を決定し、必要パラメータの選定を行う。								
NIFS6UFP2082: 真空条件下の水素単位体積除染(芦川直生)								

電源・発電(3)

電力系統へのプラント接続条件

0.0/10.0

【NIFS：力石】(明治大学・野村)【長岡技術大学：三浦】

既存電力 系統の 状態確認	電力系統 からの 受電事項確認	FFHRの 運転シナリオ 作成	FFHR 運転シナリオ 原案作成	電力系統 モデル化	電力系統 接続時の 運転特性評価	FFHR 運転シナリオ の見直し	電力系統 モデルの パラメータ調整	電力系統 接続特性評価	最終的 論文
■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

0.0/0.0 既存電力系統から評価される接続条件のFFHRの方を優先

(2018) FFHR運転シナリオと運転シナリオの見直しを行った

(2020) 電力系統のモデル化を行い、FFHR運転シナリオ原案とO調整性をチェックする

NIFSgKERAAoos 核融合プラントと電力系統との接続条件に関する基礎検討(力石)

#13

電力系統に核融合発電電来用プラントを接続するにあつての起動から停止に至るまでの運転シナリオを作成し、電力系統運用との整合性をモデル計算により示す。

[illegible]

超伝導マグネット (6)					#02
HTS-πN導体の基礎特性					
6.2.10 HTS- π N導体の臨界電流と含浸手法、電流入手手法、テープ積層数、曲げ、及び捻りの関係を明らかにし、FFHR- c_{10} を歪み解析に適用する。					
【NIFS：成嶋，宮澤】〔総研大・松永（D4）〕					
含浸法 確立	電流等価 確立	面状ひずみ 解析 スキャン	FV曲面ひずみ 精微数 8精度	ヘリカル曲げ 歪み解析 スキャン	捻り スキャン
				ヘリカル曲げ 8精度 スキャン	6 tmm Hc 歪み解析
					6 tmm Hc 電流試験
					FFHR- c_{10} 歪み解析
(2018) 積層数20及び25の液体窒素冷卻m直立式WISS- π N導体を通電試験を行った。					
(2019) テープレットのバリエーションに伴うFV曲面歪みに関する研究を開始した。					
(2020) WISS導体の歪み率と含浸温度、材料および積層電流、積層数、FV曲線の半径、及びヘリカル曲げ半径等との関係性を明らかにする。WISS導体定格電流への影響を調べる。					
NIFSxUFP000: HTSテープ積層導体のマグネット応用に関する研究(成嶋吉晴)					
超伝導マグネット (9)					#02 #04

[illegible]

伝導マグネット (12)

#02

大電流導体試験法
5.0 / 10

[NIFS: 今川]

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
最小値の検証	接続部の検証	電圧降下の検証	CC導体の検証	CC導体の検証	電流導入部の検証	ミニ-CC導体の検証	電流導入部の検証	導体サンプルの検証	Nb ₃ Sn-CC導体の検証	CC導体サマの検証

(2018)大電流導体サンプル形状と寸法を2つを提案し、最小曲半径、接続部の磁場強度、および電磁力を比較した。

(2019)CC導体のジャケッティング以降の内製化を検討した結果、半導体サンプルを提案した。

(2020)半導体ジャケッティング方式の試作を行い、製作性を確認する。低抵抗の電流導入部の構造と製法を具体化する。

NIFS19F04A0002_大口径高磁場導体試験装置を用いる大電流導体試験法の研究(今川佳作)

低温 (3)	#03									
低温冷媒可視化研究 1.2 / 30 [NIFS・高田, 濱口] 超流動ヘリウム、超臨界ヘリウム、液体ヘリウムなどの低温流体の冷却回路における流動を可視化することで、高効率な回路設計の指針を示す。										
低温流体可視化装置設計 製作	低温流体可視化装置設計 製作	平行平板間液体可視化 流動可視化	平行平板間液体可視化 流動可視化	平行平板間超流動ヘリウム可視化 流動可視化	超臨界ヘリウム液体ヘリウム可視化 流動可視化	超臨界ヘリウム可視化装置対応改造 流動可視化	平行平板間超臨界ヘリウム可視化 流動可視化	超臨界ヘリウム可視化 流動可視化	まとめ論文	
(2019) 低温流体可視化装置の設計を完了し、製作を開始した。 (2020) 低温流体可視化装置を完成し、実験を開始する。										