



研究最前線

ヘリカル核融合炉設計と R&D 活動とのリンクの可視化

Visualization of the Link between Helical Fusion Reactor Design and R&D Activities

後藤拓也, 宮澤順一, 柳 長門, 室賀健夫

GOTO Takuya, MIYAZAWA Junichi, YANAGI Nagato and MUROGA Takeo

自然科学研究機構核融合科学研究所

(原稿受付: 2020年9月6日)

核融合科学研究所の核融合工学研究プロジェクトでは、ヘリカル核融合炉の概念設計とそのために必要な工学 R&D を両輪とした活動を展開してきている。設計の数値目標の意味付けと工学 R&D 課題の位置づけをより明確化し、さらに戦略性を持った取り組みを行うため、最新の概念設計を通じて明らかになった設計課題と核融合工学研究プロジェクトの下で行われている全ての R&D 課題との関係性を可視化する作業を行った。設計課題と R&D 課題を設計課題パネルと R&D ステータスバーと名付けたツールにより可視化することで、それぞれの項目の間の関係性が明確となると同時に、設計活動と R&D 活動の全体像もわかりやすく把握することが可能となった。本手法は設計活動と R&D の間での頻繁なフィードバックが求められる核融合分野特有の状況に適合し、また学術研究としてのプロジェクトと幅広い R&D との関係性を俯瞰するのに適した手法であり、研究者どうしのコミュニケーションや分野外への情報発信にも有用なツールとなると期待される。

Keywords:

Helical reactor design, Fusion engineering research, Link visualization, R&D Status bar, Design issue flip board

1. はじめに

平成23年度(2011年度)のプロジェクト体制発足以降、核融合科学研究所(核融合研)の核融合工学研究プロジェクトでは、ヘリカル核融合炉 FFHR シリーズの概念設計活動と、そのために必要な工学 R&D をプロジェクト活動の両輪として推進してきた。具体的にはプロジェクト参画メンバーを核融合炉の構成機器に対応した13のタスクグループに振り分け、同一の研究者が各タスクに関係した設計パラメータの決定に関する議論と、そのために必要な工学 R&D 双方に携わることで、設計活動と工学 R&D を緊密に連携する体制を取ってきている[1]。これにより、ヘリカル核融合炉 FFHR-d1 の概念設計と、そのために必要な工学 R&D が核融合研の大型工学試験設備群も活用しながら進められてきている。しかしながら、核融合工学研究プロジェクトで進められている R&D は非常に多岐にわたっており、それぞれの R&D がどのようなメンバーでどのような計画の下どこまで進展しているのか、またそれぞれの R&D がどの設計課題のこういった解決に寄与するのか、ということについての情報共有や情報発信が必ずしも十分とはいえない部分があった。

そこで、最新の概念設計活動で明らかになった設計課題と、核融合工学研究プロジェクトの下で現在実施されている R&D 課題を全て明示し、それぞれの全体像と個別課題どうしの関係性を可視化する作業に取り組んだ。本稿ではこの可視化作業の概要を報告する。まず第2章では今回の

可視化作業の方針と、過去に行われた設計と R&D の関係性の可視化作業との違いについて述べる。第3章ではヘリカル核融合炉設計における22の課題について、第4章では核融合工学研究プロジェクトで行われている R&D とその分類について説明する。第5章では可視化のツールとして作成した設計課題パネルと R&D ステータスバーについて説明し、リンクの可視化について具体的な例を紹介する。最後に、第6章においてまとめと今後の展開について述べる。

2. 可視化作業の方針と過去の可視化作業との違い

核融合炉設計を基に必要な工学 R&D を可視化する作業としては、過去に技術成熟度(Technology Readiness Level; TRL)を用いた取り組みがなされている。TRL は米国国家航空宇宙局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)において導入された定量評価尺度であり、多種多様なプロジェクトにおける特定の技術の成熟度の評価や、異なるタイプの技術の成熟度の比較を行うための系統的、客観的な指標として様々なプロジェクトにおいて活用されている。核融合分野では、米国 ARIES (Advanced Reactor Innovation and Evaluation Study) チームがこの TRL 評価を初めて導入し、核融合実験炉 ITER とそれ以降の原型炉開発の間にあるギャップを明らかにした[2]。我が国においても、核融合炉実用化若手検討会によりレーザー、ヘリカル、トカマクの各炉型式および共通技

術課題に関するTRL評価が実施され、原型炉実現にクリティカルな課題の洗い出しがなされている[3]。また、近年では核融合原型炉開発のための技術基盤構築の中核的役割を担うチーム（合同コアチーム）によってまとめられた原型炉技術基盤構築チャート[4]や、これを基に原型炉開発総合戦略タスクフォースによって取りまとめられた原型炉開発に向けたアクションプラン[5]において、原型炉開発に必要なR&Dが項目ごとに整理され、課題間の関係性やスケジュールなどの可視化が行われている。

しかしながら、これら過去の可視化作業と同様の手法では、核融合工学研究プロジェクトで行われている核融合炉概念設計活動とR&Dとの関係性を明示することは難しい。というのも、上述の可視化はいずれも明確な定義を持った装置（原型炉）に対し、その開発に必要なR&Dを位置付けたもので、言うなれば設計が主、R&Dが従の関係にある。一方、核融合工学研究プロジェクトの工学R&Dは先進概念実現のための基礎研究・先導的研究を主な役割としており、その対象は非常に幅広く、また学術研究としての色合いが濃い。このため、設計の数値目標とR&D課題の達成目標には性格の違いがある。具体的に言えば、設計の数値目標は特定の核融合炉を前提に設定され、材料選択や形状などの観点で特定の仕様基準に準拠したものとすることに加え、その数値は現在の実績からすると挑戦的なものとなることがある。また核融合炉の建設はまだ先のことであるものの、実際に建設計画が立てられた際には、その完成には明確な期限が設けられる。そして設計数値目標はシステムとして総合的に達成が求められる値である。一方でR&Dの達成目標は既存の知見の延長線上で、自由な発想に基づき設定され、想定される条件も様々となる。また研究活動に期限はないが、1-2年での成果の積み上げが求められる一方、特に材料開発などにおいてはデータ蓄積などのために10年オーダーのリードタイムが必要となる。またここで達成目標値として定められるのは物性値など、学術的価値を持つ固有指標である。このため、特定の装置設計を基にした設計の数値目標との直接のリンクのみを考慮すると、現行のR&D全てとは必ずしも結び付かないことになる。

では直接リンクしないR&Dは設計に関係しないかという点、決してそうではない。たとえ達成可能なパラメータ領域が離れていても、R&Dにより現象の理解が進展することで設計の確実性が向上することは考えられる。また、核融合炉開発にはまだ解決の見通しが十分に得られていない課題も多く存在する。現状の設計の第一オプションとは異なる方式に関するR&Dであっても、第一オプションが克服困難な課題に直面したときの代替案となることや、当初想定していなかったアイデアが設計に組み込まれるなどにより設計の柔軟性向上に資することが考えられる。核融合工学研究プロジェクトの炉設計活動では、設計課題の解決や設計の魅力向上のため、先進概念も積極的に採用し、また複数のオプションを並行して検討するなどの柔軟な方針を採っているが、その方針如何に関わらず、核融合炉開発においては、設計要求に応えるR&Dだけでなく、R&Dの結果を受けた設計の見直しを常に繰り返す必要があり、

そのためにも幅広いR&Dが設計のどの部分に寄与するかを俯瞰的に把握しておくことは重要である。また、核融合工学に関連して行われているR&Dは幅広さに加え技術的にも非常に高度なものが多く、この中には他分野に波及し得るもの、新たな技術シーズとなり得るものも多く含まれる。よってこれらのR&Dが核融合炉のどのような課題解決と関連しているかを示すことは、核融合工学研究の魅力の向上や、それをアピールするアウトリーチ活動にとっても重要となる。そこで、今回の取り組みでは、核融合工学研究プロジェクトの下で行われている全てのR&Dを可視化の対象とすることとした。

3. ヘリカル核融合炉実現に向けた課題と数値目標

本章では核融合研でのヘリカル核融合炉設計活動、特に近年の状況について概観し、ヘリカル核融合炉実現のために必要と判断された22の設計課題と、その数値目標設定の前提となった概念設計について紹介する。

第1章でも述べた通り、核融合研では大型ヘリカル装置(LHD)の実績に基づき、LHD型ヘリカル核融合炉FFHRシリーズの概念設計研究を20年以上にわたって継続してきた[6]。平成23年度のプロジェクト体制発足後は、それまでの概念設計の知見を活かしつつ、LHD実験で得られた炉心プラズマパラメータを直接炉条件に外挿することでプラズマ分布形状の仮定などに起因する不確実性を低減し、確実性・安全性を向上させた設計であるFFHR-d1の検討を進めてきた[7]。FFHR-d1は装置サイズ15.6 m (LHDの4倍)、磁場強度約5 Tの装置であり、ITERの工学技術の延長線上で30年のプラント寿命を有する設計が可能であることを示した一方、ヘリカル核融合炉の最大の特長である自己点火プラズマによる定常運転を達成するには、LHD実験で実現されているプラズマ性能からの改善が必要なことも明らかとなった[8]。そこで、FFHR設計グループではより早期に1年オーダーの連続定常発電運転を実証するため、LHD実験で達成されたプラズマ性能の範疇で正味電気出力が正となる最小の装置として、FFHR-c1を提案した[9]。FFHR-c1の装置サイズは約11 m、磁場強度は約8 Tである。またこのFFHR-c1に先立ち、核融合環境での工学統合実証を行いつつ核融合高速中性子の早期利用をねらった体積中性子源FFHR-b2の検討も行っている。FFHR-b2は装置サイズ約5.5 m、磁場強度約5 Tが想定されている。これらFFHRシリーズの装置の主要諸元を表1にまとめる。

FFHR設計グループではこれらの装置を実現するために

表1 FFHRシリーズの装置主要諸元。

	LHD	FFHR-b2	FFHR-c1	FFHR-d1
装置主半径 (m)	3.9	5.46	10.92	15.6
ヘリカルコイル巻線中心磁場強度 (T)	4 (設計値)	5.33	7.3	5.6
核融合出力 (MW)	—	~5	~400	~3000
外部加熱入力 (MW)	~20	~5	~25	0
蓄積磁気エネルギー (GJ)	1.6	9.7	~160	~250

必要な設計課題の検討も行った。炉心プラズマに関わるものから、ブランケット・ダイバータなどの炉内機器に関するもの、また超伝導マグネット、加熱装置など基盤機器に関するもの、さらにはプラントシステムや社会受容性に関するもの全てを洗い出し、表2に示す22の設計課題としてまとめている[10]。この22課題全てについて、FFHR-c1およびFFHR-b2の設計を基に、課題に直結する設計パラメータとその数値目標の洗い出しも行った。

4. 核融合工学研究プロジェクトでの R&D

本章では今回の可視化作業の対象とした R&D 課題について紹介する。

核融合工学研究プロジェクトでは、先に述べたように13のタスクグループ体制を取っており、各タスクのリーダーの取りまとめの下、プロジェクト参加メンバーが個別に研究課題を提案し、実験や数値計算による研究を実施している。今回は2019年度に提案された研究課題のうち、装置整備・保守などを主目的とするものを除く43の研究課題を可

視化の対象とした。なお、課題提案自体は個人ベースであるが、実際の研究は必ずしも個人で行われているわけではなく、タスクグループ、あるいはそれを越えた枠で実施されているものもある。また、ひとつの研究課題が複数の R&D 目標を持っている例や、逆に複数の研究課題によって共通の R&D 目標達成をめざしている例もある。また研究課題の中には共同研究や科学研究費補助金などの別プロジェクトでの課題と連携して実施されているものもある。そこで、可視化においては単純に核融合工学研究プロジェクトでの提案研究課題をベースとするのではなく、核融合工学研究プロジェクトに参加する核融合研所属メンバーが主導する R&D を分野ごとに整理してリストアップすることとした。この結果、表3に示すように、13分野、58テ

表3 可視化の対象とした R&D 課題の一覧。

表2 ヘリカル核融合炉設計における22の課題。

	課題タイトル	設計からの要求事項
1	磁場配位最適化	磁気軸内寄せ・高アスペクト比配位で中心ベータ値3%達成
2	高温超伝導マグネット	高電流密度・高磁場達成
3	マグネット冷却系	20 K 冷却に最適な冷媒選択
4	建設と保守	稼働率70%達成
5	ダイバータとデタッチメント	タングステンダイバータの適用可能性とデタッチメント制御、ペブルダイバータの適用可能性
6	高温壁	高温壁での高性能プラズマ維持
7	超長時間リサイクル挙動	1年の定常状態維持
8	高加熱密度 ECH*1	高加熱密度 ECH での密度維持とエネルギー等分配によるイオン加熱
9	壁洗浄と除染	5日以内の壁洗浄と15日以内のブランケット除染
10	プラズマ位置帰還制御	磁気軸位置のリアルタイム制御
11	材料選択	フェライト鋼ブランケットと高性能プラズマの共存、非磁性材によるブランケット製作
12	強磁場下液体ブランケット運転	10 T の超強磁場下での液体ブランケット要求性能維持
13	発電実証	ブランケットとダイバータの熱による発電
14	燃料供給と排気	排気ガスの純化・直接循環によるペレット製造とヘリウム灰排気の実現
15	計測	核融合環境で1年間利用可能な計測機器の開発
16	加熱機器開発	200 GHz帯ECHの開発とNBI*2定常運転
17	材料照射試験と規格	材料寿命の評価と材料規格制定
18	トリチウム取扱い技術	大量トリチウム取扱い
19	安全管理と法整備	事故事象同定と対策、法整備
20	サイトと建屋設計	建屋設計・サイトレイアウトの最適化
21	廃炉	廃炉シナリオと放射性廃棄物処理
22	アウトリーチと人材育成	核融合に対する国民の理解

* 1 ECH: Electron Cyclotron Heating, 電子サイクロトロン加熱

* 2 NBI: Neutral Beam Injection, 中性粒子ビーム入射

炉心プラズマ	
(1)	磁場配位最適化
(2)	直接分布外挿法用 LHD 実験データ取得
燃料供給	
(1)	燃料供給シナリオ検討
加熱	
(1)	ビームバルク核融合用 NBI 検討
計測	
(1)	ダイヤモンド中性子計測器
(2)	計測制御機器の照射下特性
(3)	タングステン多価イオンスペクトル同定
ダイバータ	
(1)	タングステン・銅合金先進的ろう付接合
(2)	ペブル真空容器内製造・循環
(3)	ペブルへのプラズマ照射実験
(4)	磁力線データ可視化
(5)	タングステン・RAFM*1先進的ろう付接合ダイバータ
(6)	タングステン被覆カーボンダイバータ
(7)	不純物ガスパフによる放射損失
プラズマ壁相互作用	
(1)	プラズマ対向材料のガス吸蔵放出
(2)	プラズマ対向材料表面分析
(3)	照射損傷のガス吸蔵特性への影響
ブランケット	
(1)	カートリッジ式ブランケット縮尺模型製作
(2)	第一壁冷却
(3)	カートリッジ式ブランケット保守手法検討
(4)	カートリッジ式ブランケット中性子輸送計算
(5)	タングステン・RAFM 先進的ろう付接合第一壁
(6)	電気絶縁材料照射効果
(7)	ヘリカル炉ブランケット設計
(8)	被覆材光物性評価
核融合炉材料	
(1)	低放射化材料の超塑性研究
(2)	タングステン高靱性化
(3)	銅の高靱性化
(4)	ELM*2によるタングステン亀裂形成
(5)	低放射化バナジウム合金
(6)	異種材料接合
(7)	材料腐食基礎研究 (溶融塩)
(8)	材料腐食基礎研究 (液体リチウム)
(9)	高温静水圧処理法

トリチウム・安全	
(1)	安全解析コード開発
(2)	真空容器内トリチウム蓄積量評価
(3)	真空容器内トリチウム除染
電源・発電	
(1)	定常磁場維持用定電圧電源
(2)	超臨界二酸化炭素タービン
(3)	電力系統へのプラント接続条件
超伝導マグネット	
(1)	STARS* ³ 超伝導開発
(2)	FAIR* ⁴ 超伝導開発
(3)	WISE* ⁵ 超伝導開発
(4)	トポロジー最適化構造設計
(5)	高温超伝導体中の欠陥検出手法開発
(6)	高温超伝導テープ積層無絶縁導体の基礎特性
(7)	間接冷却 Nb ₃ Sn 超伝導開発
(8)	金属系超伝導線材開発
(9)	高温超伝導ヘリカルコイル巻線手法検討
(10)	高温超伝導体の偏流評価
(11)	臨界電流実時間測定
(12)	大電流超伝導試験法
低温	
(1)	極低温環境下熱物性計測
(2)	水素冷却基礎研究
(3)	低温冷媒可視化研究
(4)	自励振動ヒートパイプによるマグネット冷却
スピノフ	
(1)	BNCT* ⁶
(2)	磁気冷凍による水素製造

- * 1 RAFM: Reduced Activation Ferritic/Martensitic steel, 低放射化フェライト鋼
- * 2 ELM: Edge Localized Mode, 周辺局在モード
- * 3 STARS: Stacked Tapes Assembled in Rigid Structure
- * 4 FAIR: Friction stir welding, an Aluminum alloy jacket, Indirect cooling, and REBCO tapes
- * 5 WISE: Wound and Impregnated Stacked Elastic tapes
- * 6 BNCT: Boron Neutron Capture Therapy, ホウ素中性子捕捉療法

マの R&D 課題が明示されるに至った。

5. 設計課題パネルと R&D ステータスバー

第 3, 4 章でリストアップした設計課題と R&D 課題を可視化するため、設計課題パネルと R&D ステータスバーと名付けたツールを導入した。本章ではその詳細とそれらを用いた可視化の現状を説明する。

設計課題パネルは、図 1 に示すように、課題タイトル、設計で明確化した課題、設計で想定されている関連パラメータ、R&D のアウトプットとして期待される内容、そして後述する R&D ステータスバーとのリンクを R&D 課題番号を用いて明記したものである。課題については疑問文の形でわかりやすく記述し、そのために何が明らかに良いか、という R&D のアウトプットとして期待する項目をこれも疑問文の形で示している。関連する設計パラメータについては、第 2 章で述べた FFHR-c1 および FFHR-b2 の設計で想定されている数値を掲載している。なお、この数値は絶対的な指標ではなく、R&D の目標設定における

#12: Operation of the liquid blanket under a strong magnetic field

超高磁場環境で液体ブランケットを稼働できるか？

Is it possible to operate the liquid blanket system using molten salt or liquid metal under the strong magnetic field in the FFHR-c1?

Requests from the FFHR-c1 Design
[B_{blanket} ~ 10 T]

- What is the heat transfer property (h, k, c_p) at 10T?
- What is the pressure drop at 10T?
- What is the compatibility of the liquid breeder material with the flow channel material at 10T?

ブランケット (a)	ブランケット (2)	ブランケット (6)
ブランケット (7)	ブランケット (8)	核融合炉材料 (7)
核融合炉材料 (8)	核融合炉材料 (9)	

図 1 設計課題パネルの例。下のラベル（この例では 8 つ）が対応する R&D 課題を示す。

ひとつの参照値としての位置付けであり、今後の設計活動および R&D 双方の進捗により変動し得るものである。また、課題項目によってその精度や裕度も異なるが、ここでは設計側と R&D 側でのイメージの共有や、議論の出発点とするために具体的な値を記載している。R&D との関係性において最も重要なのは、この数字そのものではなく、それを実現するために何を明らかにする必要があるか、そのためにどのようなことをする必要があるかが明確になることである。

R&D ステータスバーは、図 2 に示すようにに研究分野、研究タイトル、研究の目標、担当メンバー、10段階過程での実施計画・進捗、関連する核融合工学研究プロジェクトでの提案研究課題名、そして上述した設計課題とのリンクを課題番号で明示したものである。研究目的については、他分野の人にも分かるような簡潔な記述を心掛けている。研究計画・進捗を示す10段階のカラーバーについては、前年度までに完了した部分を青色、当該年度に達成した、または達成する見込みである部分を赤色、次年度以降に実施する予定である部分を灰色で色分けし、赤色の段階を数値でも記述することで、現状の達成度が一目でわかるようにしている。なおこの段階については、記述した研究目標の達成を10として定義しており、第 2 章でも触れた、核融合炉の実現に向けての技術成熟度 (TRL) とは異なることに注意されたい。このような核融合炉への実装や設計課題の解決への直接的な寄与については、別途議論する。また各段階で達成する内容についても、他分野の人から見てわかりやすい成果で記述するようにしており、各段階で必要なリソースは必ずしも等価ではない（例えば 5 段階目の達成までにかかった時間と、その後の 5 段階を達成するのにかかる時間が同じとは限らない）。また、研究の進捗に応じて方針転換や目標の再設定があることも考えられるため、青色で示した達成済み以外の部分についてはあくまで現時点での想定している内容を記載することとし、柔軟に変更可能なものとしている。このように、R&D ステータスバーはあくまで研究の内容と現状、今後の展開を担当の研究者自身が把握し、また他の研究者にわかりやすく示す一種のコ

超伝導マグネット(4)										#02	#04	#20
トポロジー最適化構造設計										トポロジー最適化により、強大な電磁力に耐え、かつ重量がピリアル定理の理想値に近い電磁力支持構造物の設計を提案する。		
9.4 / 10												
【NIFS: 田村仁】												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
	概略構造設計	概略構造応力解析	詳細構造設計	詳細構造ポート形状最適化	詳細構造コイル形状スキャン	詳細構造応力解析	詳細構造決定	最適化構造設計	最適化構造応力解析	最適化構造最大相当応力 1 GPa 以下		
(2018) FFHR-c1 ($a = 0.0$ 配位)での最大応力は 1 GPa 以下となることを示した。 (2019) 最適化構造設計のためのツール整備を完了した。FFHR-c1で電磁力支持構造物重量を10,000 ton以下にできることを示した。 (2020)さらなる最適化および種々の荷重条件下での応力解析を行う。												
NIFS11UFFF031: 3Dモデルによる核融合炉構造物設計研究(田村仁)												

図2 ステータスバーの例。右肩の数字(この例では3つ)が対応する設計課題を示す。

コミュニケーションツールとしての役割であり、達成度の評価や、同一基準での比較に用いるわけではないことを強調しておく。

こうして作成された22の課題パネルと58のR&Dステータスバーは図3に示すようにポスター形式にまとめ、各設計課題にどのR&D課題が対応しているか、また各R&D課題とどの設計課題や核融合工学研究プロジェクト提案課題が対応しているかが一覧できるようにした。ポスターには核融合工学研究プロジェクト提案課題別に、どのR&D課題や設計課題と対応しているかを示した一覧表も掲載している。ポスターについては核融合研核融合工学研究プロジェクトのwebページでも公開されている[11]。これにより、報告書等の文章のみではなかなか表現が難しかった設計とR&Dの関係性に加え、設計活動の方向性と現行のR&D活動の全体像も一目で把握できるようになった。核融合工学研究プロジェクトメンバー間の情報共有はもちろん、外部の研究者等への情報発信のツールとしても今後活用できると期待される。

なお、R&Dステータスバーについては核融合工学研究プロジェクトメンバーが参加する会合で行われる研究報告で用いられる報告用テンプレートにも記載するようにしている。これにより随時情報が更新されることに加え、担当の研究者が研究の現状を客観的に把握できること、他の研究者が研究の目標や過去の経緯、今後の展開を手早く把握できることから、議論の活性化にも大きく役立っている。

6. まとめと今後の展開

核融合研の核融合工学研究プロジェクトで実施されているヘリカル核融合炉概念設計活動と工学R&D活動とのリンクを可視化する作業を行った。可視化においては設計の数値目標とR&Dの達成目標の性格の違いも考慮し、必ずしも直接的なリンクを示すことをだけを目的とせず、最新の核融合炉概念設計で明らかとなった22の課題と、13分野58テーマのR&D課題全てを統一したフォーマットで表し、それらの間のリンクを明示した。これにより、設計活動およびR&Dの全体像と、それらの相互の関係性を明確化することができた。今回行った可視化手法は、設計活動と

R&Dの間で密接なフィードバックが必要である核融合炉開発特有の状況に適合し、また学術研究としてのプロジェクトと幅広いR&Dとの関係性を俯瞰的に把握するのに適したものであり、アクションプランなどのこれまでの可視化手法を補完しつつ核融合研究開発の加速に資することが期待される。

今後は作成した課題パネルおよびR&Dステータスバーを設計活動やR&Dの進捗に応じ随時アップデートし、研究者間のコミュニケーションツールとして生かすことで、数値目標の意味付けやR&D課題の位置付けをより明確にし、設計活動の加速やR&Dの発展に役立てていく考えである。またR&Dステータスバーについてはその対象を共同研究や科学研究費補助金によって実施されているR&Dにも広げることを検討している。これにより不足しているR&Dが明確となり、既存の共同研究等の拡充や新しい研究課題の提案につながることで、また核融合工学研究の裾野の広さが目に見える形で示されることで、新たな研究分野の創成につながるなど、今後の研究がさらに発展することが期待される。

参考文献

- [1] 相良明男 他：プラズマ・核融合学会誌 89, 359 (2013).
- [2] M.S. Tillack *et al.*, Fusion Sci. Technol. 56, 949 (2009).
- [3] 笠田竜太 他：プラズマ・核融合学会誌 89, 193 (2013).
- [4] 「核融合原型炉開発のための技術基盤構築の中核的役割を担うチーム報告—原型炉技術基盤構築チャート—」平成27(2015)年1月19日合同コアチーム。
<http://www.jspf.or.jp/news/file/150119.pdf>
- [5] 「原型炉開発に向けたアクションプラン」平成28(2016)年2月 原型炉開発総合戦略タスクフォース。
https://www.mext.go.jp/component/b_menu/shingi/toushin/_icsFiles/afieldfile/2019/01/24/1412802_1.pdf
- [6] A. Sagara *et al.*, Fusion Eng. Des. 85, 1336 (2010).
- [7] A. Sagara *et al.*, Nucl. Fusion 57, 086046 (2017).
- [8] T. Goto *et al.*, Nucl. Fusion 57, 066011 (2017).
- [9] T. Goto *et al.*, Nucl. Fusion 59, 076030 (2019).
- [10] J. Miyazawa *et al.*, Fusion Eng. Des. 146, 2233 (2019).
- [11] 核融合科学研究所・核融合工学研究プロジェクト web ページ。 <http://www.nifs.ac.jp/fuseng/index.html>

2019年度核融合工学研究プロジェクトにおける炉設計活動と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炉を用いた実用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-d1 (プラスマ半径 $R_p = 3$ m) を、次いでヘリカル半径 $R_p = 5$ m としてFFHR-d2 ($R_p = 5$ 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、電圧出力100万kW級のFFHR-d3 ($R_p = 15$ m) を建設し、電圧出力100万kW級のFFHR-d4 ($R_p = 15$ m) の実証に至るといふシナリオを提案する。

パラメータ	LHD	FFHR-d1	FFHR-d2	FFHR-d3	FFHR-d4
R_p (m)	3.0	3.0	5.0	5.0	5.0
R_{out} (m)	4.0	4.0	5.0	5.0	5.0
R_{in} (m)	2.0	2.0	3.0	3.0	3.0
R_{coil} (m)	2.5	2.5	3.5	3.5	3.5
R_{div} (m)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
$R_{blanket}$ (m)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
$R_{divertor}$ (m)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
$R_{blanket}$ (m)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
$R_{divertor}$ (m)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
$R_{blanket}$ (m)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
$R_{divertor}$ (m)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0

2. 核融合工学研究プロジェクト関連の研究予算一覧

研究課題	研究内容	研究期間	研究費	研究機関
ヘリカル核融合炉の設計とR&D	ヘリカル核融合炉の設計とR&D	2019年度	1000万円	東京大学
ヘリカル核融合炉の設計とR&D	ヘリカル核融合炉の設計とR&D	2020年度	1000万円	東京大学
ヘリカル核融合炉の設計とR&D	ヘリカル核融合炉の設計とR&D	2021年度	1000万円	東京大学
ヘリカル核融合炉の設計とR&D	ヘリカル核融合炉の設計とR&D	2022年度	1000万円	東京大学

2019年度核融合工学研究プロジェクトにおける炉設計活動とR&Dのリンク (2)
3. FFHR-d1実現に向けて解決すべき22の重要課題

4. R&Dテーマ一覧

2019年度核融合工学研究プロジェクトにおける炉設計活動とR&Dのリンク (3)
4. R&Dテーマ一覧 (contd.)

2019年度核融合工学研究プロジェクトにおける炉設計活動とR&Dのリンク (4)
4. R&Dテーマ一覧 (contd.)

図3 設計課題パネルとR&Dステータスバーを一覧化したポスターの全体像。設計パラメータと核融合工学研究プロジェクト提案研究課題の一覧に始まり、図1で示した設計課題パネルと図2で示したR&Dステータスバーが全て掲載されて一覧できるようになっている。