

ムーンショット目標 10 PM 公募における PD の方針

PD: 吉田 善章（東京大学 大学院数理科学研究科 特任教授）

1. ムーンショット目標達成に向けた研究開発プログラムの概要

フュージョンエネルギーの実用化は、70 年余りにわたり、世界中の研究者や技術者が挑戦してきた大きな夢です。本研究開発プログラムは、2050 年にフュージョンエネルギーが多様かつ高度に応用が実現された理想像からバックキャストし、その実現に必要なイノベーションを生み出すことを目指しています。

ムーンショット目標 10（以下、「MS10」という）では、ITER から原型炉そして商業炉へと研究開発を進めるフォーキャスト的なアプローチとは対照的に、フュージョンエネルギーの多面的な利用を想定した未来社会からのバックキャスト的なアプローチをとることで広く展望を開き、これまでにない挑戦の中からゲームチェンジャーとなるイノベーションを目指す戦略をとります。

世界に先駆けた独創性の高い発電実証の達成や、小型動力源等の多様な社会実装に向けて、既存の枠組みにとらわれない発想や革新的な要素技術の統合を促進するため、幅広い専門分野の研究者や技術者が協力した学際的な研究チームを組織し、未踏技術の実現に挑戦するプロジェクトを実施します。

2. ムーンショット目標 10 のプログラム強化の方策

フュージョンエネルギーの多面的な活用を目指す MS10 を達成するためには、様々な分野に広がる多くの技術課題を克服し、多岐にわたる極限技術を統合して整合性のあるシステムを構築する必要があります。特に、ムーンショット型研究開発事業は、これまでにない挑戦からゲームチェンジャーとなるイノベーションを生み出すことを目指しており、その成果を社会実装に繋げるための具体的なシナリオが求められます。フュージョンエネルギーの社会実装というアウトカムは、次の 4 つのカテゴリーに整理できます：

- (1) 主路線（実験炉 ITER から原型炉、そしてベースロード電源として社会実装される実用炉と進む計画）の加速
- (2) 主路線以外の可能性追求
- (3) 発電以外の多様な応用
- (4) 他の革新技術への波及

MS10 では、フュージョンエネルギー分野の世界的な動向を分析することで、現行の 3 プロジェクトだけではカバーしきれない領域を特定し、勝ち筋がつかめる分野の研究開発を拡充するために、破壊的イノベーションを狙う新たな挑戦的プロジェクトおよびプロジェクトマネージャー（PM）の公募を行います。

今回の公募では、ポートフォリオを充実させるために、重要な課題のキーワードを抽出し、それらを解決する核心的かつ挑戦的なプロジェクトを幅広く採択することを目指します。そのため、一定の資金と期限を設定し、マイルストーンの達成状況に応じて絞り込みを行う「マイルストーン型」のプログラム運営を行います。短期決戦型のプロジェクト運用となるため、既設の研究施設を有効活用することが特に重要となります。また、新たなプロジェクトには、現行の3プロジェクトとの連携・協力も期待しています。現行の3プロジェクトについては、以下のホームページをご参照ください。

(MS10 ホームページ) <https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal10/index.html>

3. プロジェクト提案のガイドラインおよび要件

(1) 公募の対象となるキーワードの例

MS10 のポートフォリオを充実させるために今回公募するプロジェクトのキーワード、および各キーワードに関連する具体的な研究テーマの例を示します。これらは、あくまで限られた例であり、他の独創的なアイデアも歓迎します。

表1. 公募の対象となるキーワードと具体的な研究テーマの例

キーワード	具体的な研究テーマの例（以下に限定しません）
革新的核融合方式	主路線以外の多様な方式（様々な磁場閉じ込め方式、レーザー爆縮方式、ビーム駆動方式、ミューオン触媒方式、D-T 以外の核融合反応など）、革新的な安定化・高性能化の方法
革新的材料	低放射化、高融点、低熱膨張、高熱伝導、非磁性、高強度、長寿命などの高性能材料開発、生産・製造・試験技術など
革新的システム	ダイバータ、ブランケット、加熱・電流駆動、同位体分離、高度製作技術・保守技術、先進制御・予測、高効率発電方式、計測・診断など

これらのキーワードの説明と、それぞれのキーワードに関連するプロジェクトの提案に含めるべき内容の例を示します。

① 革新的核融合方式：

日本が進めているフュージョンエネルギー研究開発の主路線は、重水素（D）と三重水素（T）を燃料とするトカマク型核融合炉によるベースロード電源の開発です。この主路線以外の様々な核融合反応や装置方式を、ここでは包括的に「革新的核融合方式」と呼びます。たとえば、D-D、D-³He、p-¹¹B などの核融合反応、多様な磁場閉じ込め方式、レーザー爆縮方式、ビーム駆動方式、あるいはミューオン触媒によるプラズマを用いない方式などが考えられます。革新的核融合方式の多様な応用（例えば、オフグリ

ッドのエネルギー源や核融合反応で生成する粒子の応用)を検討することで、主路線以外の革新的なフュージョンエネルギー利用のアイデアが生まれます。提案するプロジェクトには、そのアイデアを実現するための鍵となる克服すべき課題を明確にし、その課題を克服することでどのような展開が可能となるのか、そしてどのようなロードマップで社会実装に繋げることができるのかを明示することが求められます。そのプロジェクトの中で、最初に達成すべき最も重要な目標をマイルストーンとして具体的に示し、そのマイルストーンを達成するための詳細な計画を立てることが必要です。新しく斬新なアイデアの場合は、最初のマイルストーンとして概念設計であることも考えられます。

② 革新的材料：

フュージョンエネルギーシステムを成立させるためには、非常に高い熱流束や核融合反応で発生する高エネルギー粒子(例えば、DT 核融合炉の場合は 14MeV の中性子)の流束・流量に耐えられることが必要です。その上で、低放射化、高融点、低熱膨張、高熱伝導、非磁性、高強度、長寿命などの物理特性も満たす必要があります。システムを高性能化、例えばコンパクト化しようとする、これらの要件はさらに厳しくなります。逆に言えば、「材料を制する者は技術を制する」と言われるように、高性能な材料の開発は高性能なシステムを実現するための鍵となります。提案するプロジェクトには、材料のイノベーション(レイヤー③)が、どのような核融合反応システム(レイヤー②)を可能にし、その社会実装はどのように未来に貢献するのか(レイヤー①)、そのシナリオを勝ち筋として明示することが求められます。そのプロジェクトの中で、最初に達成すべき最も重要な目標をマイルストーンとして具体的に示し、そのマイルストーンを達成するための詳細な計画を立てることが必要です。(レイヤーについては、公募要領別紙 2「研究開発構想(目標 10)」の図 5 をご参照ください(https://www.jst.go.jp/moonshot/koubo/202504/files/besshi2_goal10.pdf))。

③ 革新的システム：

フュージョンエネルギーシステムは、多くのサブシステムが統合されて成立する複雑なシステムです。例えば、主路線のトカマク型核融合炉の場合、超高温プラズマを閉じ込めるための磁場システム(超伝導マグネットと冷却システム)、ダイバータ、真空システム、ブランケット、トリチウム循環システム、プラズマ加熱システム、プラズマ計測・制御システム、そして様々な電源システムなどが必要です。それぞれのサブシステムが極限的な性能を求められ、さらにこれらを統合して設計、製作、据え付け、安全に運転するための技術イノベーションも必要です。革新的な核融合方式では、これらとは異なるサブシステム(例えば、直接発電や水素製造システムなど)を使用することも考えられます。提案するプロジェクトには、こうした要素技術のイノベーション(レイ

ヤー③)が、どのような核融合反応システム(レイヤー②)を可能にし、その社会実装はどのように未来に貢献するのか(レイヤー①)、そのシナリオを勝ち筋として明示することが求められます。そのプロジェクトの中で、最初に達成すべき最も重要な目標をマイルストーンとして具体的に示し、そのマイルストーンを達成するための詳細な計画を立てることが必要です。

(2) プロジェクト提案に関する重要事項

① プロジェクト提案の要件

核融合反応が多面的に活用されるフュージョンエネルギーシステムを実現するためには、様々な克服すべき課題や重要となる未解決な要素技術が存在します。プロジェクトの提案においては、前述の「3.(1) 公募の対象となるキーワードの例」を参考にし、フュージョンエネルギーを多面的に活用した「革新的な社会実装」を目指す方向として示し、その実現に向けた道筋で最大のハードルとなる「克服すべき課題」あるいは「要素技術」の具体的な挑戦目標を定めた上で、2050年までの研究開発シナリオを策定してください。特に、その挑戦目標を克服することで、革新的なフュージョンエネルギーシステムの社会実装へ至るとどのようなルートが拓かれるのか、そのロードマップとして明確に示していただくことが重要です。単に科学的、技術的課題の克服や要素技術の革新を目標とするプロジェクトの提案は、公募の趣旨に合致しません。

プロジェクトの中で、研究開始から2年目、4年目、9年目で達成すべき目標を「マイルストーン」として設定し、それを達成するための詳細な研究開発計画を立てることが求められます。特に、2年目のマイルストーンは、プロジェクトの最も核心的かつ挑戦的な課題を克服することを目標に設定し、その達成がどのように以降のプロジェクト推進の妥当性を証明できるのかを論理的に説明してください。また、社会実装に必要な倫理的・法的・社会的課題(ELSI)も考慮してください。

選考では主に以下の点を重視します：

- 革新的な社会実装までのプロジェクト全体のシナリオの適切さとインパクト(特に国際的な競争力の観点や、産業界の早期参画等による社会実装の実効性)
- 掲げる課題がシナリオ実現のために真に核心的かつ挑戦的であること
- 各マイルストーンとして設定した具体的な目標の適切性と客観的評価方法の妥当性
- 目標達成の成否に関わらず結論が明確に得られるような研究計画の綿密さ
- 研究手法の明瞭さと戦略的妥当性(施設の共同利用などによる合理性)

② 2年目におけるステージゲート評価と選択基準

研究開始から2年目(2027年度)にステージゲートを設け、PDがサブPDやアドバイザーの協力を得て、プロジェクトのマイルストーンに対する達成度を評価します。

その評価結果、他のプロジェクトの進捗状況、そして世界のフュージョンエネルギー分野の動向などを考慮して、どのプロジェクトを次のステージに進めるか、または中止するかを決定します。2年目のステージゲートでは、全プロジェクトのおよそ半数を継続させ、絞り込みを行う予定です。なお、PDの判断により、プロジェクトの再編などの調整を行う可能性もあります。

さらに、毎年年度評価を行い、その結果によっては各プロジェクト体制の拡充・縮小、予算の増額・減額、プロジェクトの中止をすることがあります。

③プロジェクト提案における異分野連携の重要性

MS10は、産学官の幅広い分野との協力によって、フュージョンエネルギー実用化に向けた破壊的イノベーションの創出を目指しています。これまでにない異次元な分野間協力を実現するためには、従来のように核融合分野の既存のアイデアを中心として異分野の研究者が協力する（他分野の知識や技を応用する）体制ではなく、様々なバックグラウンドをもつ挑戦者たちが、それぞれの専門分野におけるフロンティアとなるテーマに取り組む学際的なチームを編成する必要があります。PMには、幅広い分野の研究者たちのアイデアやスキルを俯瞰し、フュージョンエネルギー研究開発をこれまでにない新たな方向へ導く計画を立て、指揮をとることが求められます。そうした挑戦に、核融合分野で実績をもつ研究者も参画し、新しい着想と核融合分野で蓄積された知識や研究基盤が融合することによる優れたプロジェクトが提案されることを期待しています。

④大学・研究所との連携による効率的なプロジェクト提案の期待

日本国内の大学や研究所には、フュージョンエネルギー研究開発に関する最先端の施設や設備があります。MS10では、研究開発の内容に応じた適切な時期にこれらの施設や設備を活用し、大学や研究所の研究者と連携することで、タイムスケジュールを短縮しつつ、予算を効率的に使用して研究開発を加速させるプロジェクトの提案を期待しています。なお、採択後に、大学や研究所との連携を積極的に検討していただく可能性があります。日本国内のフュージョンエネルギーに関する施設や設備を備えた大学や研究所については、以下のホームページをご参照ください。

（文部科学省ホームページ） https://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/fusion/

（3）プロジェクトの期間と予算

①研究開発期間

- 原則として最長2年間（2027年11月30日まで）とします。
- 2年目のステージゲートを通過した場合、原則として最長4年間（2029年11月30日まで）とします。

- 4年間が終了した後にプログラムおよびプロジェクトの継続が決定した場合、原則として最長9年間（2034年11月30日まで）とします。

②研究開発費（直接経費）

- 研究開始から2年間（2027年11月30日まで）の予算規模は目安として最大2億円程度です。
- 研究開始から4年間（2029年11月30日まで）の予算規模は目安として最大20億円程度です。

また、研究開発費が上記の最大金額よりも大幅に低くても全く問題なく、適切な予算計上をお願いします。上記の最大金額に近づけるために研究開発実施体制や予算を膨らませることなく、必要最小限の体制と予算で効率的に進め、最も核心的かつ挑戦的な課題を克服し、フュージョンエネルギーの革新的な社会実装を実現する精緻なプロジェクトを提案することが必要です。

(参考) 2024 年度 PM 公募における PD による補足

PD: 吉田 善章 (自然科学研究機構 核融合科学研究所 所長)

1. プロジェクトマネージャー(PM)募集・選考の方針等

(1) 提案に求める基本要件

ムーンショット目標 10 (MS10)「2050 年までに、フュージョンエネルギーの多面的な活用により、地球環境と調和し、資源制約から解放された活力ある社会を実現」の達成に向け、2050 年の未来像を起点にして逆算した時、フュージョンエネルギーの実用化を加速させるために今何をすべきかを考え、2050 年までの研究開発シナリオと、計画採択時点から 3 年、5 年、10 年間で達成する目標を提案してください。フュージョンエネルギーの実現に向けて、国際熱核融合炉(ITER)から原型炉に至る開発路線をより確実にすることが期待されています。そのため、MS10 では、ITER 計画等の研究開発の全体像を俯瞰しつつ、革新的な社会実装を目指し、挑戦的であることが求められます。予定調和の平凡な計画や、これまでの研究を単に延長しようという計画は、本事業の趣旨に合致しません。MS 事業のスローガンである「失敗を恐れない挑戦」とは、未踏の領域を開拓しようとする挑戦者へのエールです。確かな研究技術に裏打ちされた綿密な研究計画であれば、その挑戦がたとえ計画通りの結果にならなくても、何も分からないで終わるのではなく、予見したこととは違う「新しい発見」をもたらします。PM の選考では、主として計画の挑戦性・独創性と研究技法の確実性の観点から提案を評価します。どのように課題を設定し、2035 年までに何を達成し社会実装につなげていくのか、現時点での分析・根拠に基づいて説得力ある説明をしてください。また社会実装に必要となる倫理的・法的・社会的課題 (ELSI) を考慮してください。

(2) ムーンショット目標 10 の狙い

フュージョンエネルギーの実用化に向けたスタンダードなシナリオはベースロード電源開発ですが、十分な実用性を見通すには現在の科学知では十分ではありません。70 年ほどの研究の歴史を経て、素朴なトライ & エラーのフェイズは終え、研究開発の主題は、核燃焼の実現という段階から、核融合システムの高度化・高性能化というテーマに移りつつあります。経済的な競争力を得るためには、核融合炉のコンパクト化・高効率化に挑戦する必要がありますが、そのためには炉心プラズマの理解の深化だけでなく、超伝導マグネットや炉材料等の高性能化やシステムとしての安定性向上など、主要技術の革新的な飛躍が必要です。MS10 では、ITER から原型炉そして商業炉へと研究開発を進めるフォークキャスト的なアプローチとは対照的に、フュージョンエネルギーの多面的な利用を想定した未来社会からのバックキャスト的なアプローチをとることで広く展望を開き、これまでにない挑戦の中からゲームチェンジャーとなるイノベーションを目指す戦略をと

ります。こうした研究開発は、ベースロード電源を目指すフォーキャスト型の研究開発に対しても、課題解決の選択肢を増やし、実現の早期化をもたらす相乗効果を生むものと期待しています。

(3) 研究開発プロジェクトの目標設定の在り方

研究開発プロジェクトの提案には二種類の方向性があると考えています。フュージョンエネルギーの実用化を加速させる「革新的な社会実装型」と「革新的な要素技術型」の二つです。

革新的な社会実装型の提案は、核融合反応の多様な活用法をレイヤー①に想定し、そこからバックキャストして、必要な反応システムの具体像をレイヤー②、さらにそれを可能とする基盤要素技術をレイヤー③として提案してください。これら三つのレイヤーが自己無撞着かつ科学技術的根拠をもって構成されている必要があります。社会実装に関するレイヤー①の例としては、核融合反応で生まれるエネルギーをオフグリッドや宇宙開発用のエネルギー源として活用する提案や、核融合反応で生まれる高エネルギー粒子を高度医療技術や高レベル廃棄物の核変換などに活用する提案などが考えられますが、これらに限らず独創的な応用の提案も歓迎します。レイヤー②としては、高温プラズマシステムに限らず、様々な核融合システムが想定可能です。レイヤー③の基盤要素技術に関しては、単なる既存技術の活用や、スタンダードな原型炉開発で構想されている技術ではなく、破壊的イノベーションにつながる挑戦的な研究開発の提案を期待します。

革新的な要素技術型を提案する場合には、その技術の活用がフュージョンエネルギー実用化に重要な進展をもたらすことはもちろんのこと、大きな汎用性をもって、既に産業化されている技術に革新的な波及効果をもたらすこと、あるいは他の未来技術と融合して破壊的イノベーションを生み出すシーズとなることなどを求めます。波及効果の考え方として、例えば、高温超伝導技術や低温技術のイノベーションによる水素社会実現の加速、高速ビッグデータ処理技術の医療・福祉分野への応用、極限環境素材が可能にする未踏領域の踏破、極小量分析・検出技術が拓く安全性の高い未来社会の実現など幅広い社会貢献が考えられますが、これらに限るものではありません。要素技術の革新というアウトプットに留まらず、アウトカムとしてどのような社会実装のインパクトが期待できるのかについて説得力のある説明をしてください。

提案書においては、計画の独創性、国際的な競争力、および実現可能性について、エビデンスに基づいた説明を求めます。特に、革新的な要素技術型の提案については、設定した目標が従来の研究開発の延長では到達できない理由と、それを MS10 のプロジェクトでどのように達成するかについて具体的な説明を求めます。

(4) MS10 の研究開発構想の実現に向けた戦略の在り方

2050 年の未来像を実現するために MS 事業の 10 年で実施すべきことは、様々な挑戦

の成果をインテグレートし、フュージョンエネルギー開発競争を勝ち抜くための強力な「ツール」を獲得することです。例えば、理論モデル、シミュレーション技術、情報科学、数理科学、材料科学、制御工学、様々な実験によるベンチマーク等を統合した「デジタルフュージョンエネルギーシステム」を構築することで、革新的な核融合システムを開発するための設計ツールを獲得できれば、MS10の成果が産業界の強力な後押しとなって未来像の実現につながります。他にも、様々な要素技術の根底に関わる科学知は、イノベーションの指導原理となって、世界をリードできる技術開発のツールになります。

そのような「ツール」は、ある特定のシステムだけに適用できる限られた経験則ではなく、未知の領域に挑戦する研究開発の構想に対しても正確な予測・検証ができる高い一般性をもつ必要があります。また、MS10の成果を連続的に社会実装につなげるために、プロジェクト実施期間中から産業界との積極的な協力関係を築くことを求めます。

MS事業の最初の5年間で、革新的な科学的知見や要素技術を獲得することを求めます。斬新な視点から果敢な挑戦をするために、既成の作業仮説に閉じこもることなく、他分野と連携を進め、展望を広く開く必要があります。そのためには、まず学際化が必要です。特に革新的な要素技術型を提案する場合には、他の未来技術、例えば宇宙技術、量子技術、医療技術、環境技術などと融合して破壊的イノベーションをもたらすような汎用性が高い技術シーズを生み出すことを期待します。

こうした研究開発を推進するためには、多彩なバックグラウンドをもつ優秀な研究者や技術者の核融合分野への新規参入を促し、学際的な研究チームを編成する必要があります。このために、チャレンジすべき課題を学際的なテーマとして定式化し（必ずしも「数学的に表現する」という意味ではなく、課題の本質や取り組み方を論理的に共有できるように表現すること）、他分野の研究者や技術者と問題意識を共有化することで、多彩な人材を巻き込んだ研究開発プロジェクトを提案してください。

PMには、研究開発プロジェクトを成功に導くために、プロジェクトの進捗などに応じた、研究計画の見直しや課題推進者の再編成等の積極的なマネジメントを求めます。

（５）波及効果に関する期待

本MS事業は、フュージョンエネルギー分野の総合的な活性化に資することを期待されています。PMは、アウトリーチを積極的に行い、核融合研究に対する一般社会からの関心を高め、産業界を巻き込むことによるキャリアパスの多様化、人材育成の強化、国際協力による人流・頭脳循環を通じた堅固な国際連携関係の構築といった効果を生むことが求められます。

２．研究開発の推進に当たっての留意事項

（１）ポートフォリオ管理

PDは、MS10目標内のポートフォリオを管理する立場から、複数の研究開発プロジェ

クトの関係性を考慮した上で、PM 間の協業や競争等を求めることになります。PM は、採択された後の「作り込み」期間において PD、サブ PD およびアドバイザーと協議し、研究の合理性・有効性の観点から、当初提案した計画の変更、課題推進者の再編、予算計画の見直し等を行うことが求められます。

（２）産学官連携

2050 年の目標達成に向けて研究開発が進むためには、本 MS 事業を通じて様々な産業の発展を支える成果の創出や応用の展開が必要です。そのため、各研究開発プロジェクトに民間企業の参画が得られるよう、積極的な働きかけを求めます。遅くともプロジェクト開始 5 年後には産業界との研究協力や共同開発を実施していることを強く期待します。

（３）国際連携・国際競争力

研究開発プロジェクトの実施に当たって、国際シンポジウムなど情報収集の場を設け、国内のみならず国外の研究開発動向を常に把握し、世界トップの成果を目指すことを求めます。必要な場合には、海外の機関とも積極的に連携して研究開発を行ってください。併せて、将来のサプライチェーンマネジメントを見据え、国際的なネットワークの構築に向けた積極的な国際連携に努めてください。

以上