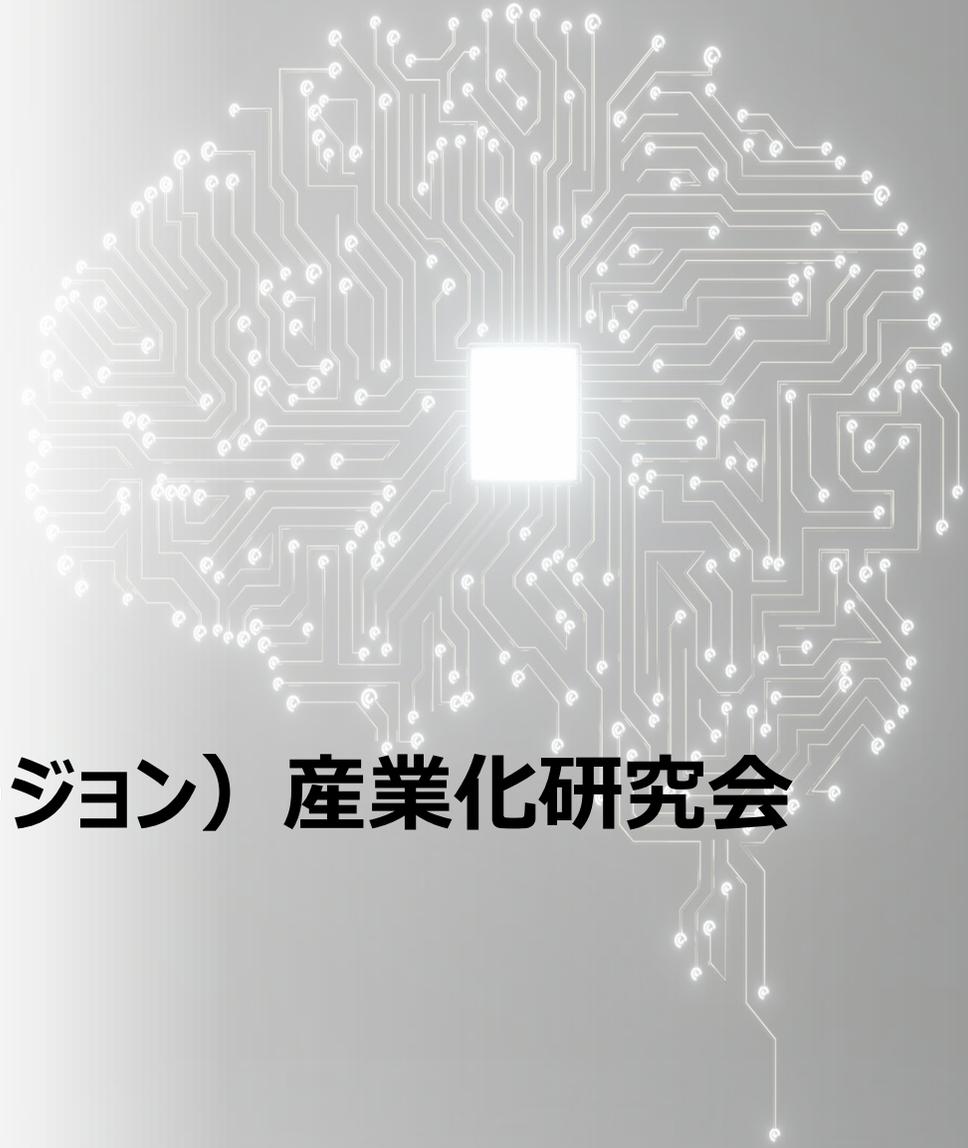


フュージョンXRL

早稲田大学核融合（フュージョン）産業化研究会



前提となる考え方

《参考①》XRLという考え方：戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)

内閣府のSIP「社会実装に向けた戦略及び研究開発計画」では、5つの視点(技術・事業・制度・社会的受容性・人材)をベースとした取組の検討を促し、この5つ視点夫々の成熟度レベル(XRL: X Readiness Level)で評価している。この考え方は、フュージョンにかかる各プロジェクトの評価に対しても有効であると考えられる

社会実装に向けた5つの視点

SIPは、“社会実装のために技術だけでなく社会システムも扱う”という考え方に立脚し、この社会実装に不可欠な5つの視点として、「技術・事業・制度・社内的受容性・人材」を定義。

5つの成熟度レベル：XRL(X Readiness Level)

- **TRL**(Technology Readiness Level) **技術成熟度** 9段階
- **BRL**(Business Readiness Level) **事業成熟度** 9段階
- **GRL**(Governance Readiness Level) **ガバナンス成熟度** 8段階
- **S(C)RL**(Social(Communal)Readiness Level) **社会(コミュニティ)成熟度** 8段階
- **HRL**(Human Resources Readiness Level) **人材成熟度レベル** 8段階

社会実装に向けた5つの視点での戦略策定について

社会実装のために必要な視点として、文献調査や有識者と議論を重ね、

技術 (Technology)
事業 (Business)
制度 (Governance)
社会的受容性 (Social)
人材 (Human)

Pathways to transformation for sustainability

出典) GLOBAL SUSTAINABLE DEVELOPMENT REPORT 2019. United Nations

という5つの視点が、現状では社会実装に不可欠だと考えています。

社会実装に向けた5つの成熟度レベル (指標)

成熟度レベル (XRL:X Readiness Level) は社会実装に不可欠な5つの視点で定義しています。

社会実装に向けた5つの成熟度レベル (指標)

| | |
|--|--|
| TRL (Technology Readiness Level) 技術成熟度レベル - 必要な技術はどれくらい発展しているか - | 「ある技術」が、社会の技術要求水準に達するまでの段階を示す指標 |
| BRL (Business Readiness Level) ビジネス成熟度レベル - ビジネスとしての継続可能性はどうか - | 「創出財+」を利用した事業が、安定した事業として成り立つ水準までの段階を示す指標。 |
| GRL (Governance Readiness Level) ガバナンス成熟度レベル - 制度や規制は整っているか - | 「創出財」が社会に普及するために必要な制度、規制が完備 (改善) するまでの段階を示す指標。 |
| S(C)RL (Social (Communal) Readiness Level) 社会 (コミュニティ) 成熟度レベル - 受容しよと思えるか - | 「ある技術」そのもの、或いは「ある技術」によって生み出された「創出財」の社会 (コミュニティ) 受容性を高め、社会実装し、一定の普及水準に達する段階を示す指標。 |
| HRL (Human Resources Readiness Level) 人材成熟度レベル - 実装に必要な人材は揃っているか - | 「ある技術」を利用した事業が社会に普及するために必要な人的資源の涵養と活用の手順を示す指標。 |

↑ 創出財: SIPを起点として将来創出される新しい技術や財・サービスの総称

※ 事業化のためにはガバナンス、社会受容性、人材が重要な要素になるため、BRLにはGRLやSRL、またはHRLを含めて考慮することが多いが、SIPではSociety5.0へ向けた社会実装を目指すため、より細かく指標化した。

TRL (Technology Readiness Level) モデル

BRL (Business Readiness Level) モデル

GRL (Governance Readiness Level) モデル

SRL (Social (Communal) Readiness Level) モデル

HRL (Human Resource Readiness Level) モデル

前提となる考え方

《参考②》 事業促進投資へのXRL活用：マテリアルスタートアップインキュベーション促進事業

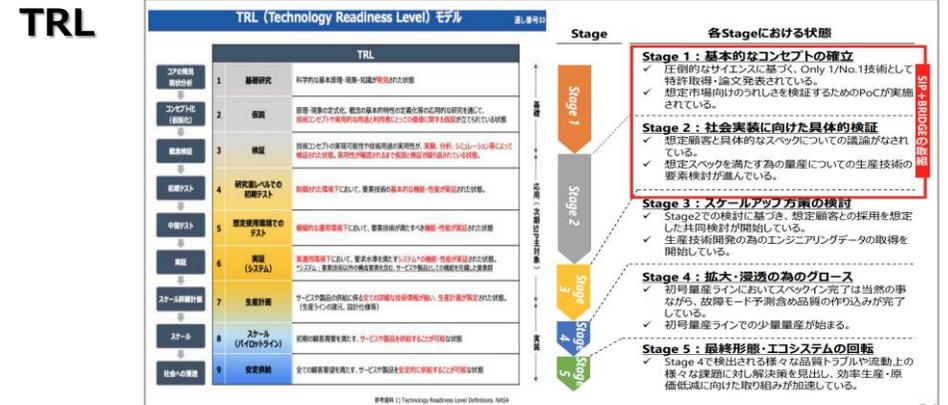
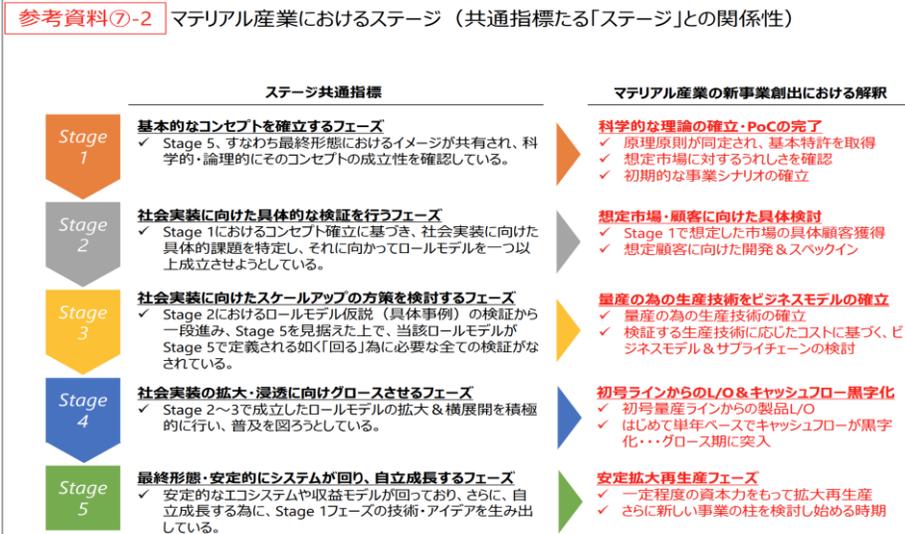
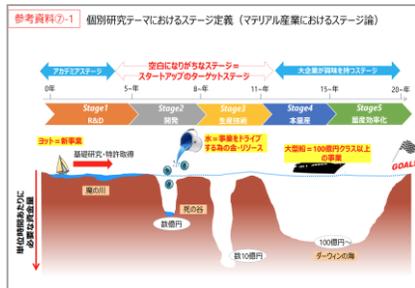
内閣府/文部科学省のマテリアル事業に関するスタートアップ支援では、**技術・事業・人材の3つのTRLを統合**して評価し、その**共通指標「ステージ」**で管理している

マテリアルスタートアップインキュベーション促進事業の位置づけ
(共通指標たるステージの定義とXRLの関連付け)

- SIP第3期課題「マテリアル事業化イノベーション・育成エコシステムの構築」では、**20～30年後のマクロトレンドと社会課題解決に繋がる、マテリアル分野における新事業**を次々に生む、Society5.0を実現するプラットフォームを核とするエコシステムの形成が掲げられている。
- BRIDGEの3年間の実施期間で**マテリアルスタートアップとしてスタートダッシュを切れるフェーズ(事業ステージ2:TRL6、BRL7、HRL5)まで引き上げることを本施策の目標**とされている
- 3年間の目標は、技術開発に関してTRL3→6への引き上げ、イノベーションに関してBRL3→7、HRL2→5への引き上げとしている。

4つの事業ステージとTRLの紐づけ

ステージ2の要件を満たすテーマ(TRL3、BRL3、HRL2を目安)を採択し、SIPマテリアルにおける要件としている、「SIP支援期間中の投資額の総額と同等以上の資金調達(スタートアップにおけるSeries Aファイナンスを想定)」を実現できるレベルにまで引き上げ、VC等からの資金調達につなげる。



BRL



HRL



全体成熟度評価フレームワーク：3つの成熟度レベルの総合評価「ステージ」

後述の成熟度レベル評価シートを活用して、技術・事業・人材成熟度の該当レベルに○を付与してください
すべての成熟度を満たす最上位ステージが、全体評価となります。（以下の例の場合にはStage1）

| ステージ | 技術成熟度レベル (TRL : Technology Readiness Level) | 事業成熟度レベル (BRL : Business Readiness Level) | 人材成熟度レベル (HRL : Human Resource Readiness Level) |
|--|--|--|--|
| Stage1 : R&D 科学的な理論の確立と POC完了 | 1 基本原理・概念検証 | 1 社会・産業課題の特定 | 1 必須専門人材要件の洗い出し |
| | 2 技術コンセプト仮説の具体化 | 2 市場・ビジネスモデルの仮説構築 | 2 人材像・育成モデルの仮説構築 |
| | 3 技術コンセプト仮説の実験・検証 | 3 ビジネスモデル仮説の関係者評価 | |
| Stage2 : 開発 具体的検証を通じた、 開発スペックと市場確定 | 4 ラボベースでの基本的な機能・性能の実証 | 4 プロトタイプを用いた、 ビジネスモデルの価値検証 | 3 人材像・育成モデルの シミュレーション検証 |
| | 5 模擬的運用下(実験炉)での プロトタイプ実証 | 5 想定顧客の評価 ・ビジネスモデル設計調整 | 4 初期育成プログラムの試行実施 |
| | 6 パイロットスケール(実験炉)での 運用環境実証 | 6 実証導入・顧客検証 | 5 実証プロジェクトを通じた 有効性検証 |
| Stage3 : 事業化 量産に向けた生産技術と ビジネスモデルの確立 | 7 実機プラント(原型炉)での 主要技術の統合・実証 | 7 商用展開への具体的な 事業計画策定 | 6 人材関連施策の確定と 実行計画策定 |
| | 8 フルスケールプラント(実証炉)での 定常運転 | 8 商用展開の開始 | 7 人材育成環境の整備と 活躍人材の輩出 |
| Stage4 : 商業化 初号量産ライン化と黒字化 | 9 商業運用(商業炉)の安定化 による産業実装段階 | 9 産業基盤化 | 8 安定的な人材輩出・高度化 |

TRL(技術成熟度レベル)評価シート

以下チェック項目のすべてを満たすレベルに「はい」を選択してください。もっとも上位のレベルではその選択根拠も討議してください。

| Lv | フュージョンエネルギー定義 | チェック項目 | |
|----|-------------------------|--|------------------|
| 1 | 基本原理・概念検証 | <ul style="list-style-type: none"> 技術のベースとなる科学的な原理・現象・知識が、実験や観察データ等で示されていて、検証可能な仮説構築または仮説の立証が論文等で明確になっているか | はい/いいえ 上記の根拠: |
| 2 | 技術コンセプト仮説の具体化 | <ul style="list-style-type: none"> 基本原理に基づき、原理・現象の定式化、概念の基本的特性の定義化等の応用的な研究がなされ、技術コンセプトや実用的な用途と利用者にとっての価値に関する仮説が立てられているか | はい/いいえ 上記の根拠: |
| 3 | 技術コンセプト仮説の実験・検証 | <ul style="list-style-type: none"> 技術コンセプトの実現可能性や技術用途の実用性が、実験、分析、シミュレーション等によって物理的に検証されているか(実用性が確認されるまで仮説と検証が繰り返されているか) | はい/いいえ 上記の根拠: |
| 4 | ラボベースでの基本的な機能・性能の実証 | <ul style="list-style-type: none"> 研究室や人為的にコントロールできる環境など小規模な環境下において、低忠実度でも要素技術の基本的な機能・性能が実証されているか | はい/いいえ 上記の根拠: |
| 5 | 模擬的運用下(実験炉)でのプロトタイプ実証 | <ul style="list-style-type: none"> 基本技術コンポーネントを統合した縮小モデルのプロトタイプを想定顧客に提供し、模擬的な運用環境下において、必要な性能・機能の修正の定義・設計および修正・改良が完了しているか | はい/いいえ 上記の根拠: |
| 6 | パイロットスケール(実験炉)での運用環境実証 | <ul style="list-style-type: none"> パイロットスケールの製品・サービスまたは機器システムを初期顧客に提供し、そのフィードバックを受け、必要なデータの収集を行い、必要な修正・改良の定義・設計が完了しているか | はい/いいえ 上記の根拠: |
| 7 | 実機プラント(原型炉)での主要技術の統合・実証 | <ul style="list-style-type: none"> 原型炉で、サービスや製品の供給に係る全ての詳細な技術情報が統合され、実運用に近い条件で性能評価されているか 商業化に向けた主要性能指標を満たすレベルで、生産計画が策定されているか | はい/いいえ 上記の根拠: |
| 8 | フルスケールプラント(実証炉)での定常運転 | <ul style="list-style-type: none"> フルスケール炉(実証炉)で、外部供給可能な発電と高温熱を持続的に出力する、商業炉に近い実証条件を満たす、サービスや製品を供給する事が、技術面で可能な状態か | はい/いいえ 上記の根拠: |
| 9 | 商業運用(商業炉)の安定化による産業実装段階 | <ul style="list-style-type: none"> 核融合炉が商業発電所として電力網へ安定的・長期間電力供給を実現。産業規模での信頼性・量産性・安全性・保守性を満たすサービスや製品を供給する事が技術面で可能な状態か | はい/いいえ 上記の根拠: |

BRL(ビジネス成熟度レベル)評価シート

以下チェック項目のすべてを満たすレベルに「はい」を選択してください。もっとも上位のレベルではその選択根拠も討議してください。

| Lv | フュージョンエネルギー定義 | チェック項目 | |
|----|-------------------------|--|------------------|
| 1 | 社会・産業課題の特定 | ・ 潜在的な社会課題(脱炭素化・エネルギー安全保障等)、顧客(電力会社・産業界・自治体等)が特定され、解決策のアイデアが立案されているか | はい/いいえ 上記の根拠: |
| 2 | 市場・ビジネスモデルの仮説構築 | ・ エネルギー供給市場・用途・競争優位性・コスト構造等に関する事業モデル仮説が立てられているか(ビジネスモデルキャンバス等) | はい/いいえ 上記の根拠: |
| 3 | ビジネスモデル仮説の関係者評価 | ・ ビジネスモデルの仮説(例:発電コスト、導入メリット等)が、関係者ヒアリング・アンケート・経済試算等で検証され、仮説と検証が繰り返されることで顧客にとって価値があることが確認されているか | はい/いいえ 上記の根拠: |
| 4 | プロトタイプを用いた、ビジネスモデルの価値検証 | ・ 一部で旧技術を使用するなど限定的な機能を有するパイロット品を用いた疑似体験・試験により、想定顧客・関係者にとって有用性のある新たなビジネスモデルが策定・実証・確認されているか | はい/いいえ 上記の根拠: |
| 5 | 想定顧客の評価 ・ビジネスモデル設計調整 | ・ 想定顧客からフィードバックを得ながら、顧客要望を満たす機能・性能・サービス・システム条件が定義・設計され、その設計条件で事業モデルの妥当性が実証されているか | はい/いいえ 上記の根拠: |
| 6 | 実証導入・顧客検証 | ・ サービスや製品が実際に初期顧客に提供され、設計した条件(原型炉・実証炉)下で実際に導入され、顧客満足度や事業モデルが実証され、修正・改良が行われているか | はい/いいえ 上記の根拠: |
| 7 | 商用展開への具体的な事業計画策定 | ・ フルスケールの製品・サービスまたは機器システムをボリュームゾーンの主要顧客に提供し、フィードバックを受け、必要なデータの収集を行い、事業計画の修正・改良が行われているか ・ フルスケールの製品・サービスまたは機器システムに必要な修正・改良が完了し、事業ロードマップ、投資計画、収益予測等を含む実現可能性の高い事業計画が策定されているか | はい/いいえ 上記の根拠: |
| 8 | 商用展開の開始 | ・ 市場が立ち上がり顧客や地域などが拡大していき、事業を通じて製品・サービスの改良や再発明が行われ、市場の拡大が見込めているか | はい/いいえ 上記の根拠: |
| 9 | 産業基盤化 | ・ 核融合発電のブランド・信頼性が確立し、新規参入など適度な競争も起きながら、事業が安定成長しているか | はい/いいえ 上記の根拠: |

HRL(人材成熟度レベル)評価シート

以下チェック項目のすべてを満たすレベルに「はい」を選択してください。もっとも上位のレベルではその選択根拠も討議してください。

| Lv | フュージョンエネルギー定義 | チェック項目 | |
|----|----------------------|---|------------------|
| 1 | 必須専門人材要件の洗い出し | ・ 核融合に必要なコア人材(プラズマ物理・材料・電気工学・制御等)のスキル要素が検討されているか | はい/いいえ 上記の根拠: |
| 2 | 人材像・育成モデルの仮説構築 | ・ 必要な人材スキル要素の仮説が立てられているか ・ 更には、事業化に向けた人材構成と育成策についても仮説が立てられているか | はい/いいえ 上記の根拠: |
| 3 | 人材像・育成モデルのシミュレーション検証 | ・ 教育・訓練のシミュレーションやOJT等を通じて、HRL1-2でたてた人材育成の仮説や人材マッチング策の有効性検証が始まっているか | はい/いいえ 上記の根拠: |
| 4 | 初期育成プログラムの試行実施 | ・ 初期育成プログラムの試行テストを通じて、HRL3の検証を経て修正された、必要な人材の調達・スキル教育育成が進められているか | はい/いいえ 上記の根拠: |
| 5 | 実証プロジェクトを通じた有効性検証 | ・ 実証プロジェクト等を通じ、上記の仮説への対応による、人材育成・配置の効果や新たな専門職の有効性が検証されているか | はい/いいえ 上記の根拠: |
| 6 | 人材関連施策の確定と実行計画策定 | ・ 社会実装とその後の事業展開に必要な人材のスキルセット、人材市場での調達方法、教育方針と手段が、具体的な実施計画として明確になっているか | はい/いいえ 上記の根拠: |
| 7 | 人材育成環境の整備と活躍人材の輩出 | ・ 全国規模で核融合分野人材の教育環境が整備され、産業界・研究機関等での活躍が拡大している状態 | はい/いいえ 上記の根拠: |
| 8 | 安定的な人材輩出・高度化 | ・ 核融合分野での人材育成・輩出体制が社会全体に定着し、人材市場において当該事業分野が高い流動性が持ち、かつ、スキルの高度化が実現できているか | はい/いいえ 上記の根拠: |