

ドラフト版にて取扱い注意

原子力材料分野のロードマップ

(ドラフト版)

日本原子力学会材料部会

2021 年 3 月

# ドラフト版にて取扱い注意

## 材料部会 原子力材料分野のロードマップ 目次

1. 原子力材料分野のロードマップの目的と構成
2. 原子力材料分野のロードマップワーキンググループ活動
3. 原子力材料分野のロードマップ詳細
  - 1 軽水炉（次世代軽水炉含む）
  - 2 先進原子力システム
    - 2-1 高速炉
    - 2-2 核融合炉
    - 2-3 その他原子力システム  
高温ガス炉（水素製造含む）、熔融塩炉、ADS など
  - 3 1F 廃炉対応および廃止措置活用
    - 3-1 1F の事故進展の詳細把握と廃炉作業効率化
    - 3-2 1F 事故知見活用及び廃止措置プラント活用
- 別添 1 WG 委員、WG 議事録など
- 別添 2 （別表 1） 国内外研究炉情報 （約 70）
- 別添 3 RM のための関連情報
  1. 原子力材料分野の現状の把握
    - 1) 発電コストの比較とエネルギーミックス 2030
    - 2) 原子力発電所の稼働状況
    - 3) 原子力発電所の運転年数の状況と通常の経年劣化対策
    - 4) 原子力発電所の運転期間 40 年制限に関する規制上の課題
    - 5) 運転期間延長認可制度
    - 6) 機器損傷の事例と対策の例
    - 7) 高燃焼化、高経年化の対策
    - 8) 原子力白書（内閣府）
    - 9) 原子力研究基盤の現状
  - 10) 各原子力システムの使用環境、使用される燃料、被覆材、構造材料
  - 11) 国内外における原子力分野の動向

# ドラフト版にて取扱い注意

## 2. RM 作成のためのその他の参考情報

- 1) 日本機械学会の技術 RM (日本機械学会誌 2016. 5 Vol. 119 No. 1170 pp.283-323 など)
- 2) 第 5 期科学技術基本計画 (科学技術政策 - 内閣府、 2016～2020 年度) 及び第 6 期に向けた重要課題 中間まとめ
- 3) エネルギー基本計画 (2018 年 7 月、経済産業省)
- 4) エネルギー関係技術開発ロードマップ (2014 年 12 月、経済産業省)
- 5) 軽水炉安全技術・人材ロードマップ (2015 年 6 月 (2017 年 3 月改訂))
- 6) 東京電力ホールディングス(株) 福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ (廃炉・汚染水対策関係閣僚等会議編) 2019 年 12 月)
- 7) 材料部会の軽水炉の材料技術課題整理表 (今後 10-50 年の原子力(軽水炉)における材料関連の技術課題) (更新と軽水炉以外への拡張含む)
- 8) 原子力材料分野におけるイノベーションの創出と革新技術の創出

## 3. 参照文献情報

- 日本原子力学会全般
- 材料に関連する他学会
- 原子力学会の (燃料) 材料関連部会
- 高速炉や高温ガス炉関係
- 核融合関係
- 規格基準関係
- エネルギー関係

# ドラフト版にて取扱い注意

## 1. 原子力材料分野のロードマップの目的と構成

本ロードマップ（RM）の主な目的は、原子力材料分野の英知を結集して 21 世紀中期から後期までに必要な原子力システムと材料科学技術について、材料 R&D サイクル効率化や材料科学技術の向上を進めていくためのものである（図 1 参照）。これらによって 2050 年までに我々が獲得しているべき以下の事項、すなわち、イノベーション材料科学技術、高性能・高効率な原子力システム（関連技術・分析／試験施設含む）、放射線のさらなる応用、カーボンニュートラル、産業・医療・学術等の貢献などへの道標を与える。このような RM には、循環型の持続可能な社会、環境に調和する社会を実現させることや、社会に対して情報や将来展望に対する RM を論理的に可視化させて発信し、社会と議論していく活動として行うことが必要である。

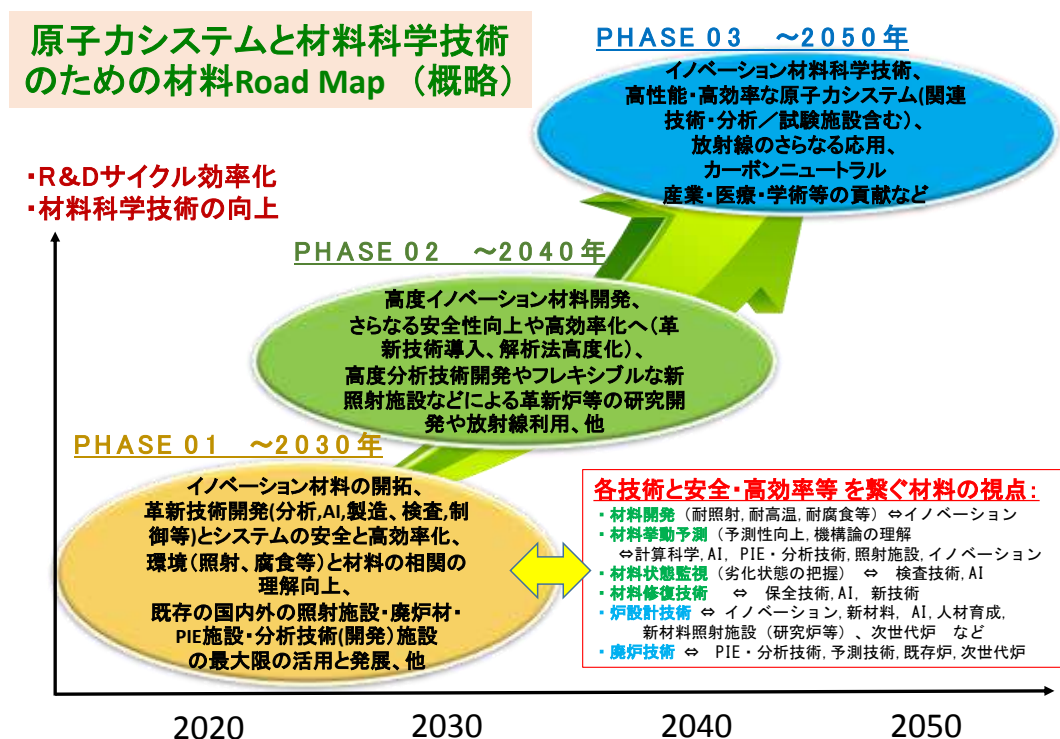


図 1. 原子力システムと材料科学技術のための材料 Road Map（概略）

図 2 に原子力システムと材料科学技術のための材料 Road Map についての全体像を与える。PHASE 01（～2030 年）～PHASE 03（～2050 年）までの各フェーズで取り組む重要課題項目とそれによって得られる期待される成果を示している。また、この取り組むや成果を得るための材料科学技術や材料 R&D サイクル効率などのために必要な材料科学技術の技術基盤とな

# ドラフト版にて取扱い注意

るツールやサポートなどを併せて示している。特に、2030 年頃時点までに、どのような革新的な材料、技術、分析、試験やそれらの施設、および新材料照射施設を持てれば、どのような良い展開できるか？ という取り組むべき重要課題を提言し、課題と成果は対になる関係になっている。



図 2. 原子力システムと材料科学技術のための材料 Road Map（全体像）

図 2 で示したそれぞれの取り組むべき重要課題と方法については、材料 RM における 8 つのツール（サポート含）の視点から評価することにした。それぞれのツールが協働することによって原子力システムと材料科学技術のための材料 Road Map が成り立つことを示すものである（図 3 参照）。

材料 RM における 8 つのツール（サポート含）：

1. 材料工学（イノベーション化）
2. システムのパフォーマンス、管理技術・設計
3. 照射施設（研究炉、加速器）
4. PIE 施設・分析技術・検査技術（施設）
5. 新技術（3D プリンティング技術、製造技術等）
6. 計算科学・AI・Database
7. 国内外の研究協力

# ドラフト版にて取扱い注意

## 8. 人材育成、アウトリーチ

### 材料RMにおける 8つのツール(サポート含)

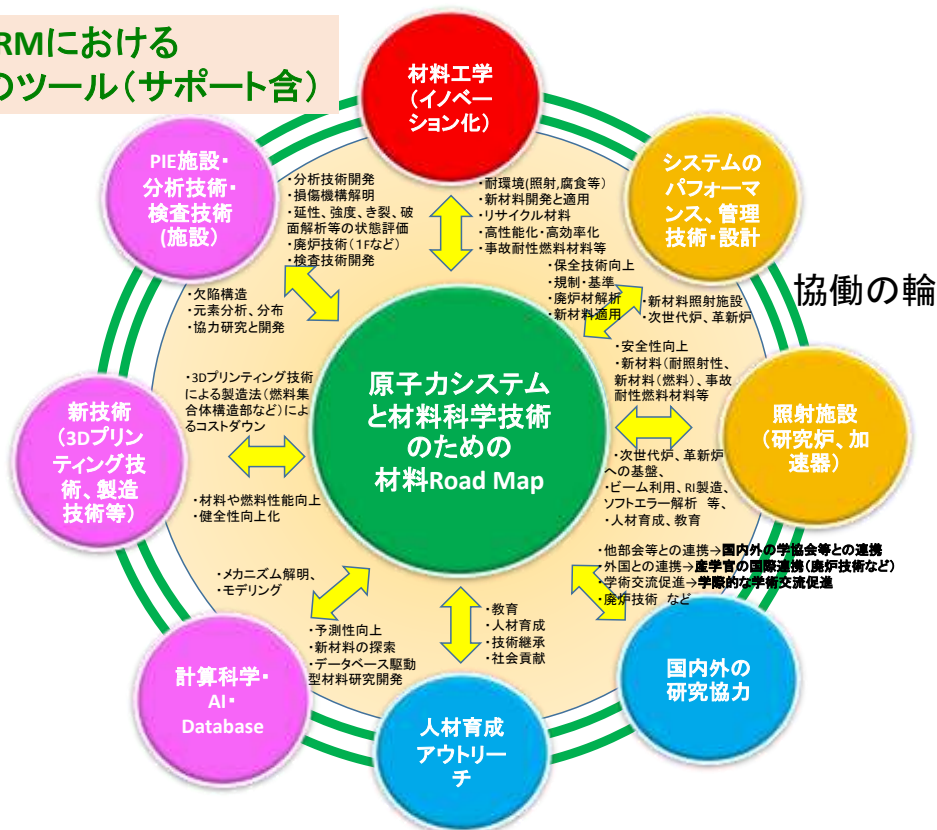


図 3. 材料 RM における 8つのツール (サポート含)

# ドラフト版にて取扱い注意

## 2. 原子力材料分野のロードマップワーキンググループ活動

日本原子力学会会期中に開催された材料部会全体会議(2019 年 9 月 13 日)において、「材料のロードマップ作り」が賛同された。また、このロードマップ作成には、材料分野が多岐に渡ることから、重要課題の抽出と設定から始め、その詳細を定めるステップを踏み進めていくこととし、2019 年 12 月に材料部会内に設立した。

材料部会は、福島第一発電所の廃炉やその研究開発、軽水炉、高速炉、高温ガス炉、研究炉、加速器等の様々な原子力システムの研究開発を幅広く取り扱うため、原子力材料分野のロードマップ (RM) の WG メンバーは多くの機関の研究者と技術者の連携協力が不可欠である。本 WG メンバーは委員長、副委員長、事務局、幹事及び委員から構成する。また、必要に応じて材料部会内で WG 委員の委嘱手続きを行い、委員などの交代を可とする。WG メンバーは別添 1 の通りである。以下に WG 活動関係の実績などを示す。

### <WG 会合>

- 第 1 回 : 2020 年 1 月 31 日 (金) 10:00~12:30 25 名出席+2 名オブザーバー
- 第 2 回 : 2020 年 3 月 23 日 (木) 10:00~12:30 24 名出席+3 名オブザーバー
- 第 3 回 : 2020 年 7 月 27 日 (月) 13:30~15:50 20 名 (+オブザーバー 1 名)  
2020 年 8 月 6 日 (木) 9:30~12:00 25 名出席
- 第 4 回 : 2021 年 3 月 26 日 10:00~12:00 (予定)

### <WG 事務局会合(+部会全体会議での進捗報告含む)>

- ・ 第 1 回 2019 年 12 月 20 日 17:45-19:15
- ・ 部会全体会議(メールにて)で進捗報告 1 2020 年 3 月
- ・ 第 2 回 2020 年 7 月 21 日 10:00~12:00
- ・ 第 3 回 2020 年 8 月 19 日 16:00~18:00
- ・ 部会全体会議で進捗報告 2 2020 年 9 月 13 日
- ・ 第 4 回 2020 年 12 月 25 日 13:30-15:00
- ・ 第 5 回 2021 年 1 月 25 日 18:10~20:00
- ・ 第 6 回 2021 年 3 月 15 日 18:00~19:30
- ・ 部会全体会議で進捗報告 3 2021 年 3 月 17 日

# ドラフト版にて取扱い注意

## 3. 原子力材料分野のロードマップ詳細

- 1 軽水炉（次世代軽水炉含む）
- 2 先進原子力システム
  - 2－1 高速炉
  - 2－2 核融合炉
  - 2－3 その他原子力システム  
高温ガス炉（水素製造含む）、熔融塩炉、ADS など
- 3 1F 廃炉対応および廃止措置活用
  - 3－1 1F の事故進展の詳細把握と廃炉作業効率化
  - 3－2 1F 事故知見活用及び廃止措置プラント活用

次頁以降に、それぞれの詳細を示す。



# ドラフト版にて取扱い注意

## テーマ 1：軽水炉

### 全体的な現状分析

気候変動問題に取り組みながらエネルギーを安定供給するためには、既設の軽水炉プラントの有効活用が必要である。将来的には、軽水炉プラントのリプレースや、軽水炉ベースの小型モジュール炉等の導入も想定される。一方で、現在までに軽水炉技術に対する国民の不信感が払しょくされたとは言い難い。原子力材料分野に対する国民の不安感は「経年変化や想定外の荷重、過酷事故等に対する材料挙動の不確実さ」と言い換えることができる。研究コミュニティとしては、既存の原子力施設の材料劣化へプロアクティブに対応したり、交換可能な構築物や機器を改良された材料に交換するための提案を続けることが重要である。また、従来の想定範囲を大きく超える荷重や環境に晒されたときの材料挙動を把握するために、従来型の知識基盤とリアルの評価技術にデジタル技術を組み合わせた研究を進める必要がある。

核燃料は原子炉の根幹となるハードウェアであり、燃料集合体や制御材の改良は国内外で継続的に進められている。安全余裕を高めながら効率的な運転を実現したり、環境負荷を低減するための研究開発には、燃料ペレットや燃料被覆管といった材料そのものに加えて、燃料集合体としての寸法や形状の改良も含まれる。海外と比較すると、日本では開発成果をタイムリーに導入するための基盤整備に改善の余地が大きい。大局的な視点で、照射施設及び照射後試験設備群の連携、集約、高度化を進める必要がある。

国内プラントの多くでは、炉内構築物の交換や応力腐食割れ等の補修工事に合わせて、改良された耐食材料の導入や予防保全工法の適用が進んでいる。また亀裂を有する材料の健全性評価法の改良が継続的に行われている。運転経験によって獲得された知見を材料の改善に継続的に反映すると共に、高い信頼性を確保しながら設計・製造・使用（施設管理）・廃止措置までのトータルコストを低減するための研究開発が求められる。AM(additive manufacturing)技術などの革新的な製造法を積極的に導入すると共に、その影響を長期的に評価するための基盤作りが必要である。

交換が困難な機器等については、未知の事象も含めた劣化の予兆を検知し、一定の期間にわたって設計で要求される機能を満足できることを確認するための研究が行われている。60 年運転を想定した場合、原子炉圧力容器、コンクリート構築物、ケーブル等の経年劣化評価技術はほぼ確立している。しかし軽水炉システムを新設又はリプレースするならば、そこに使用される材料は 22 世紀の中頃まで供用される可能性がある。供用期間中の交換を前提としない材料に対しては、設計時に使用可能な最高レベルの技術を適用するにとどまらず、将来革新的な経年劣化管理技術が導入されることも見据えた戦略が必要である。

# ドラフト版にて取扱い注意

## 提言

原子力材料の研究コミュニティは、自らが原子力システムの研究開発を先導する役割を担ってこれなかったことを反省し、自らの研究活動のスピードを高め、既存の軽水炉プラントの施設管理や次世代軽水炉の研究開発に係る意思決定に直接的な貢献をしなければならない。軽水炉分野の研究が、長期的な資金援助を前提とした集団的な共同利用の枠組みからプロジェクトベースへ移行していることを踏まえ、自らの長所を開示することを前提とした共同研究のマッチングの仕組みが整備されることは好ましい。また、材料試験炉等の研究基盤を長期的に維持するため、放射線診断や半導体製造等の既に市場化された領域にぶら下がり続けるのではなく、核変換・放射線・材料科学の三領域を融合させた超学際的な研究課題を探索しなければならない。

原子力関係者は、原子力発電システムの基幹部分である核燃料システムの安全性向上が、他国の政策に大きく左右され得る現状を強く認識すべきである。当面の間、海外の照射施設を積極的に利用できる仕組みが必要であるし、長期的には国内で研究を完結できるよう材料試験炉を整備することがより良いのは言うまでもない。また、大型試料を取り扱えるホットラボにおけるトラブル（自然災害を含む）は、国内の材料照射研究全体のボトルネックとなる可能性がある。官民の役割分担や地域性を考慮し、幾つかの拠点に設備を集約すると共に、相互利用の取り決めを設ける必要がある。

国（特に原子力推進行政）には、軽水炉材料がロックイン効果の大きなものであることを認識して、法律上の運転可能な期間の設定や、リプレース・新設の考え方等に関するビジョンを早期に示すことを希望する。

これまでに示した現状と課題を踏まえ、研究コミュニティが共有すべきマイルストーンは次のようになる。

## マイルストーン

- Phase 1（～2030年）**デジタル技術**を中心に据えて、研究活動の効率化を促進する。
  - デジタル・トリプレットに基づく機器設計や、革新的な製造技術の導入に貢献できる知見を素早く提供することで、研究コミュニティの価値向上をはかる。
  - 研究コミュニティ全体として米国並みの実験データの品質管理プログラム導入を推奨し、取得したデータを国内外の推進行政と規制行政が利用可能にする。

# ドラフト版にて取扱い注意

- 全ての分析施設は装置のリモート制御化を進め、組織内外の研究者がオンラインで観察画面を共有しながら研究できる環境を構築することで、施設の付加価値を向上させる。また国の関与のもと、大型ホットラボの集約と役割分担を進める。
  - 原子力業界全体で協力して、照射試料の輸送や管理に関する法令とその施行状況を見直し、実効的に研究効率を向上させる。
  - 材料試験炉を利用した魅力的な研究課題を探索する。原子炉設計の研究者と共同し、短期間・低コストで建設可能で、かつ将来の研究トレンドの変動に対してもロバストな材料試験炉のコンセプトを完成させる。
- Phase 2（～2040 年）**材料試験炉新設**の有無と、原子力関係機関のリストラクションの成否は、この時点での研究コミュニティの規模に大きな影響を与える。
- Phase 1 で整備された研究基盤をベースに、廃止措置の効率化と、次世代炉への知見の継承を目的として、廃止措置段階のプラントから採取された試料の分析ニーズが一定程度見込まれる。
  - 燃料と材料の研究において、海外需要を意識して戦略立案は当たり前となる。ただし、研究コミュニティの規模は材料試験炉の有無に大きく左右される。特に、国産燃料メーカーの存在意義は材料試験炉の利用可能性と密接に関係する。
  - 海外において軽水炉型 SMR の初期不良に関係した研究課題が顕在化する可能性がある。過去の軽水炉の歴史から類推すると、新しいタイプの応力腐食割れ等に関する知見を素早く提供することが課題となるかもしれない。
  - 国内における次世代炉新設に係る動向が明確化する。新設が見通せる場合は特に、次の半世紀の間利用することを踏まえ、材料科学の最先端の知見に基づいた検査や監視の在り方を提案することがチャレンジとなる。
- Phase 3（～2050 年）産業界における**問題解決への直接的なコミットメント**の有無が、研究コミュニティ自体の存否に影響を与えるようになる。
- Phase 2 で国内に材料試験炉を新設できた場合、その主たるユーザは Phase 1 で開拓した新たな研究課題の研究者である。
  - デファクトスタンダード化した新型軽水炉における材料課題を Phase 2 で取り除くことができれば、研究コミュニティには未知の事象が顕在化したときのセーフティネットとしての役割が期待されるようになる。
  - SMR の採用により、材料のライフサイクルが短くなる可能性はある。材料研究者には定期的に新材料を市場に投入することが期待されるかもしれない。

# ドラフト版にて取扱い注意

## 個別課題① 新材料の開発

### ニーズ：

**核燃料用の材料：**核燃料の安全余裕を高めるためには、伝熱特性と核分裂生成物の保持力を向上させることが基本となる。また、過渡時の環境条件や荷重を想定して、炉心形状維持や冷却材流路確保のための性能向上をはかることも重要である。最近では、事故時の水素発生量の低減に関心が集中している。環境負荷の低減という観点からは、核燃料の燃焼特性の改良や、放射性廃棄物の減容化や有害度低減というニーズも挙げられる。

**構造材料：**き裂発生や靱性低下等の抑制と緩和、製造や補修技術の高度化というニーズがあるが、規制要求を含むシステムとしての健全性評価の仕組みとの関係に留意する必要がある。既設の軽水炉システムで顕在化した劣化事象に対しては、耐久性の高い材料が既に開発されている。しかし、複雑な材料劣化のメカニズムを完全に把握している訳ではないことを認識し、技術の進歩に合わせて、予期しない事象に前もって備えることが重要である。

### 現状分析：

**燃料ペレット：**シリケート等の添加（大粒径化による核分裂生成物保持力の向上）、毒物の添加（高燃焼度化）、マイナーアクチニドの添加（放射性廃棄物の減容）などの開発が進められている。

**被覆管材料：**ジルコニウム合金の改良、ジルコニウム合金被覆管への被膜技術の開発、新材料（Fe-Cr-Al 合金や SiC/SiC<sub>f</sub> 複合材料等）の開発などが行われている。被覆管の基本性能の向上を重視した開発と、水素発生量の低減等による事故拡大の抑制を狙った開発がある。

**ステンレス鋼製の構造材料：**炉内構造物や原子炉圧力容器のクラッドに使用されている。応力腐食割れへの感受性を低減した 316L 系の材料へ入れ替えが進んでいる。

**ニッケル基合金製の構造材料：**一次系圧力バウンダリの溶接部などに使用されている。応力腐食割れへの感受性を低減した 690/52 合金へ入れ替えが進んでいる。

**低合金鋼：**一次系圧力バウンダリの大型容器に使用されている。製品の大型化、初期靱性の向上、不純物含有量の低下、脆化予測式などの改良が進められているものの、照射脆化への懸念から原子炉圧力容器への規制は強化される方向に進んでいる。

**その他：**配管減肉等の抑制のため、劣化の厳しい部位に使用されるフェライト鋼は高クロム材料へに入れ替えが行われている。また、マルテンサイト鋼は、より靱性の高い材料へに入れ替えが行われている。

**製造技術：**表面処理や環境緩和による応力腐食割れ抑制技術は一般化している。製品の大型化、長尺化、一体成型のための技術開発が進められている。暗黙知に基づく加工技術から、デジタルデータを用いた加工技術への転換が進められている。

**その他の原子力用構造材料：**原子力材料分野では、SiC/SiC<sub>f</sub> 複合材料、低放射化フェライ

# ドラフト版にて取扱い注意

ト・マルテンサイト鋼、酸化物分散強化型材料、ハイエントロピー合金等、革新炉や核融合炉での使用を目指しているが、軽水炉環境でも使用可能性を有するものがある。一方、耐震性の観点から構造材料の軽量化を目指す研究や、コスト低減の観点から非原子力分野における既存材の適用範囲の拡大を目指す研究など、原子力材料分野で必ずしも十分取り組まれている方向性も存在する。廃止措置段階で発生する材料の再利用からも研究課題が見いだされるかもしれない。

## 個別課題② システムのパフォーマンス向上

ニーズ：

**安全余裕の増加：**全ての機器や構築物は一定の安全余裕をもって設計されている。経年化は概ね安全余裕を減らす方向に作用するが、プラントの設計は同じであっても機器や構築物の保全や取替によって一部の安全余裕を運転開始時より高めることも可能である。燃料集合体の改良は、プラントの安全余裕を大きく向上させる手段である。

**安全な長期運転：**60年運転を想定した場合、原子炉圧力容器、コンクリート構築物、ケーブル等の経年劣化評価技術はほぼ確立している。先行する米国の取組を確認する限り、80年運転を想定した場合も著しい障害となるような経年劣化事象は見当たらない。しかし、将来的に想定すべき事象が変化すること（例えば、より厳しい地震力や人為的外力が加わったときの構造性能を評価することが求められること等）に対して、予め備えておくことが好ましい。

**稼働率の向上：**海外では、13か月を超える連続運転を行ったり、原子炉の運転中に一部の保全活動を実施するなどの方法によって、プラントの稼働率を向上させている。プラントの稼働率を高めるには、機器等の信頼性を高めると共に、その信頼性に見合った検査方法を採用する必要がある。これまでに蓄積された科学的知見に基づいて、プラントの運転期間を合理的に設定するための検討が早急に必要である。

**軽水炉プラントの新設：**将来的に、軽水炉ベースの小型モジュール炉や次世代大型軽水炉が新設される可能性がある。これらのプラントは成熟した技術をベースに設計されているので、初号機への新材料の導入は想定されない。しかし、製造に当たっては一体成型やAM技術等の新しい方法が取られる可能性は高い。新設プラントは22世紀の中頃まで使用されることが見込まれるので、供用期間中に検査やサーベイランスの方法をアップデートする仕組みを前もって考えておくことが重要である。

**核燃料サイクルに関連する施設：**六ヶ所村の再処理施設の稼働、使用済み核燃料の乾式貯蔵の増加、最終処分場の候補地の選定プロセスの進捗など、軽水炉プラント以外の状況変化

# ドラフト版にて取扱い注意

からも材料研究課題が見出される可能性がある。

## 現状分析：

**燃料集合体：**核燃料の高燃焼度化に関する研究は、実用段階に達している。海外では BWR における  $10 \times 10$  燃料の利用が進んでいるが、国内では実績がない。事故耐性燃料の実証試験も米国や欧州がリードしている。

**炉内構造物と原子炉压力容器：**既設炉における炉内構造物の取替技術やき裂進展予測技術自体は確立しており、保守的に評価されている。また、原子炉压力容器の監視試験片の再生技術や、小型試験片の適用も含め、監視試験結果を利用して脆化予測法を更新するための方法論は確立している。しかし、極めて高い信頼性を要求される機器であることを踏まえ、代表的な研究課題として革新的なアプローチを試行することが重要である。これらの機器の長期運転に際しては、地震動と経年劣化との重畳、加圧熱衝撃等の過渡事象と経年劣化との組み合わせも評価されている。しかし、これらの評価は材料パラメータを保守的に定義した解析に基づいており、材料の実力評価ではない。

**冷却材バウンダリ：**疲労、減肉、腐食などの管理技術や補修技術は確立している。原子炉压力容器を含め、プラント全体のリスクへの寄与度を考慮して検査頻度や検査箇所を決める仕組みを構築することが必要である。また、製造時の加工履歴等に基づく突発的な応力腐食割れ等の可能性は今後も否定できないので、発見された損傷の影響を評価して短期間で対応するための備えが重要である。

**熱交換器：**静的安全性を重視する新型軽水炉では、熱交換器の重要性がより高くなる。ヘリカルコイル等の従来と異なる設計が採用される可能性を見通して、劣化の検査、評価の技術を準備する必要がある。

## 個別課題③ 計算科学

### ニーズ：

**所望の照射条件下での材料特性の予測：**材料の熱的・機械的性質が長期間の高エネルギー粒子の照射によってどのように変化するかを予測することが、他の材料分野にはない原子力材料分野独自のニーズである。実験によって得られた材料の微細構造や機械的性質の変化に関する情報は、加速照射の効果、試験片サイズの効果、入射エネルギースペクトルの効果、熱時効と照射との重畳効果、腐食や応力との重畳効果などの影響により、必ずしも評価対象プラントそのものの材料挙動を表しているわけではない。計算科学的・理論的手法による評には、実験から得られるデータをもとに現象を定量的にモデル化し、所望の照射条件下における材料特性を予測することが期待されている。

# ドラフト版にて取扱い注意

**設計の想定を超える構造性能の評価：**設計の想定を超える荷重や環境に晒されたときの構造物の安全余裕やクリフエッジを評価するためにも、原子力材料分野における計算科学の活用が期待されている。設計基準に従った評価手法はすでに確立しているが、多様な過渡事象における燃料集合体や原子炉圧力バウンダリの構造性能評価に加え、想定を上回る地震動などの外的事象に起因する荷重も評価対象となる。

**過酷事故挙動の材料学的な評価：**起こり得る過酷事故のシナリオは無数に存在するので、事故影響の評価は簡略化されたモデルに基づいている。インベントリに含まれる元素の温度や雰囲気毎の化学的安定性は、事故時に放出される放射性物質の種類や量を見積もるための重要な情報である。原子力材料研究に利用されてきた計算技術の多くは、この分野でも利用可能である。特に、放射性物質の移行量に対して影響の大きなパラメータの抽出に対して、材料学的な知見を提供することが求められている。

**材料開発の高効率化：**機能性材料の開発等においては、組成や製造パラメータの決定において、機械学習などの AI 技術の活用が一般化しつつあるが、原子力材料開発の効率化のための AI 技術の活用は限定的である。

## 現状分析

**マルチスケール・モデリングによる照射変化予測：**所望の照射条件下での材料特性の予測を高度化するためには、モデルからなるべく経験的なパラメータを排除し、電子構造の量子力学的計算、いわゆる第一原理計算からマルチスケールの組みあげたモデリング手法が適している、とされてきた。この方法論は現在も生きているが、計算機のハードウェアの向上によって、ミクロレベルの解析可能な範囲は徐々に拡大してきている。短期的には、High Performance Computing (HPC) の性能向上、HPC を用いた原子力材料研究への参入障壁（コスト）低下、第一原理計算並みの精度を有する経験ポテンシャルの開発等により、実験的に評価される照射による材料微細構造変化を、計算機シミュレーション技法でより正確に予測することが可能になる。長期的には GPU 技術や機械学習ポテンシャルが標準的な技術として利用されるようになり、多くのケースについて様々な系統的なデータが得られるようになることは想像に難くない。この段階では、実験データの得られない領域を対象とした外挿性に優れた予測法の開発が課題となるだろう。

**デジタル・トリプレットによる安全余裕評価：**設計の想定を超える外力と経年劣化の重畳など、原子力に対する不安を取り除くために必要な難しい問題に 대응するためには、実物や実験体系などの現実空間とモデリング技術に基づく仮想空間に、形式知化しにくい材料科学的な知見を組み合わせたデジタル・トリプレットの考え方を使った評価技術の確立が求められる。配管等の構築物に対しては、減肉と地震力の重畳等をターゲットとしたデジタル・ツインの研究が着手されており、この方向性がより一般化することが期待される。確率論的破壊力学等の評価手法も、デジタル・トリプレットの中にうまく位置付けることが重要である。

# ドラフト版にて取扱い注意

**AI 技術による原子力材料開発：**原子力材料は、材料設計後ただちに性能確認できるものではないので、AI 技術による材料開発との相性は良くない。しかし、計算科学に基づく材料特性の長期予測が高精度化や製造技術と情報技術の融合が進展すれば、AI 技術による材料開発高効率化への道が拓かれると期待される。

## 個別課題④ 照射等の劣化試験施設

### ニーズ

**核燃料の開発：**核燃料の研究開発結果を実機に導入するにあたっては、材料レベル、燃料棒レベル、燃料集合体レベルでの性能試験が必要である。中性子ビーム照射設備（研究炉や加速器駆動型中性子源）は、材料単体の照射変化を調べるのに有用である。燃料棒や燃料集合体としての性能評価では、材料劣化に加えて、燃焼特性や可燃性毒物の消費、供用期間中の伝熱特性の変化が重要な要素となることから、実用環境（あるいは実用環境を模擬した中性子場）での試験が不可欠である。また、燃料の使用に伴う変化を織り込んだうえで、出力上昇試験などのプラント過渡時の性能評価を行うことも必要である。言い換えれば、ビーム炉等・材料試験炉・実用炉等・安全試験設備の役割分担と効果的な連携が、核燃料の研究開発成果の実用化に不可欠である。

**構造材料の開発と評価：**破壊靱性値や亀裂進展速度といった構造性能の指標に対して照射影響データを拡充するためには、大型の試験体が必要である。亀裂進展に対しては放射線水分解を含む腐食環境の影響も大きいので、軽水炉を模擬した高温水ループを有する照射場が求められる。構造材料に対しては、あらゆる照射場が加速劣化試験となることから、多段の中性子束での実験環境を確保すると共に、実機廃材を活用した研究を併用することが望ましい。原子炉冷却材バウンダリの材料の多くは、放射線照射の影響は受けないものの腐食環境には晒される。軽水炉環境における水化学を踏まえた腐食試験設備の整備や維持も重要な課題である。

### 現状分析

**国内照射施設：**日本では、過渡時の燃料性能評価に利用される原子炉安全性研究炉（NSRR）が 2020 年 3 月に再稼働している。また、ビーム利用が多い JRR-3 炉は 2021 年 2 月に再稼働し、材料試験炉としても利用可能な高速実験炉常陽の再稼働が 2024 年度に予定されている。しかし、常陽はナトリウム冷却高速増殖炉であり、軽水炉温度域での照射が容易ではなく、熱中性子の割合が小さい等の制約があることに留意する必要がある。高速増殖原型炉も



# ドラフト版にて取扱い注意

んじゅの敷地を利用した新しい小型試験研究炉の整備計画が動き始めているとはいえ、国内で軽水炉核燃料の安全性向上のための研究開発を完結させるには、材料試験炉の導入が不可欠である。JAEA には、これまで多様な施設のライフサイクルマネジメントに従事してきた経験を活かし、今後も燃料・材料照射研究のハブとして国内外の研究者をつなぐハブとしての役割を果たすことが期待される。

**海外照射施設：**燃料照射可能な材料試験炉の導入は、国際協力と国際競争の両方の視点で進める必要がある。日本の研究者は日本の JMTR に加え、ノルウェーのハルデン沸騰水型炉 (HBWR) を拠点として (相応の資金及び人的資源の負担も行って) 燃料研究を行ってきた。JMTR と HBWR の廃止措置への移行により、現在 BWR ループが利用可能な原子炉は、米国の MITR とロシアの MIR のみとなっている。PWR 燃料開発を先導してきたフランスでは、OSIRIS 材料試験炉を 2015 年に廃止し、2023-24 年頃を目途にジュール・ホロビッツ研究炉 (JHR) の建設を進めている。中国は 2018 年から先進研究炉 CARR を利用した燃料試験を実施しており、商用発電炉を用いた試験照射と組み合わせることで、いわゆる中国製新燃料の実用化研究を進めている。一方、米国はアイダホ国立研究所の ATR を利用して PWR 用の燃料研究を精力的に行っているが、この試験炉の国際利用は限定的である。

なお、国内外の研究炉の仕様や活用は別表 1 に整理している。

**照射技術：**照射技術には、照射施設の維持だけでなく、照射カプセルの設計、照射温度や中性子束の分布の把握、照射温度や雰囲気制御、運転中の多段階試料取り出し技術など、多くの実験技術が関係する。現状では、海外での照射実験の計画段階から国内研究者が参加することにより、これらの技術の継承が辛うじて図られている。

**腐食試験設備：**軽水炉材料の腐食試験研究は、長く民間主導で実施されてきた。2011 年以降、民間研究は過酷事故や廃炉に大きくシフトしており、腐食研究基盤の維持にも留意が必要な状況が生じている。SSRT (Slow Strain Rate Tensile test) 試験等の技術継承は重要な課題である。

## 個別課題⑤ 分析・評価技術

ニーズ：

**大きな放射能を有する試料の取り扱い：**照射済み核燃料の評価や、照射カプセルの開封を行うには、大きな放射エネルギーを受け入れ可能なホットラボが必要である。実寸法に近い構造材料の性能評価も、試料が照射材の場合は大型のホットラボでのみ実施可能である。大型のホットラボは、(国内外の) 材料試験炉や既設軽水炉プラントから供試材を受け入れ、ミクロ分析用の試料を作製するためにも必要である。

**RI 試料の微細組織分析：**炉内構造物や原子炉圧力容器では、信頼性向上の観点から、ミク

# ドラフト版にて取扱い注意

ロな劣化挙動解明や、亀裂進展評価の精緻化が進められている。照射材料の顕微分析装置として、三次元アトムプローブが一般化している。また透過走査電子顕微鏡の利用が拡大している。中性子照射材に対してこれらの分析技術を利用するためには、施設を非密封放射性同位体の取り扱い施設とする必要がある。

**微小機械試験や試験片再生：**貴重な劣化試験済み試料を有効活用したり、試験機会を増価させたりするために、試験体寸法効果の解明、試験片の再加工（小型化）や再生技術の開発、微小試験片技術の活用が期待されている。

**動的な挙動の観察：**微小試料を用いた機械試験は、マルチスケールに材料損傷を評価するために必要な情報（例えば、粒界部分における材料変形挙動など）をピンポイントで評価するためにも利用できる。イオン照射等の照射技術によって取得されたデータは、軽水炉の安全評価に直接利用することはできないが、制御性の高さという利点を生かして、モデリングの精緻化に活用することが期待される。

**供用中の検査と監視：**軽水炉プラントにおける供用中の構造特性の変化を把握するためには、検査や監視が重要である。取替困難な機器等に適用する検査技術には、いわゆる「ロックイン効果」があるので、プラントのライフサイクルを見通した技術戦略が求められる。

## 現状：

**大型ホットラボ：**大型の照射済み試料の取扱いは、燃料メーカのホットラボと、JAEAの一部の施設（JMTRの附帯設備等）でのみ可能である。JMTRのホットラボは燃料プールを介してJMTR本体と接続する設計となっており、JMTRの廃止措置計画に従って使用上の自由度が低下すると予想される。隣接する東北大学のホットラボは直接の影響は受けないが、強風による設備の損傷に伴って一時的に利用が停止されていた。JMTRと敷地境界を接する形で日本核燃料開発のホットラボも立地している。ここは、JMTR廃止後も、原子力発電所から輸送された試料等の分析を継続しており、重要な拠点に位置付けられる。照射済み試料を扱える拠点が国内の狭い範囲に立地しているので、自然災害等の共通原因による照射材研究の停滞リスクが高い状態にある。

**RI 利用可能な微細分析施設：**微小化試験片を用いた機械試験及び顕微分析はホットラボを有する国内の大学・研究機関で実施できる。多くのホットラボでは積極的に新しい分析設備の導入を進めているが、放射線管理やセキュリティに関する規制要求を満足するために、受け入れられる放射能の核種や数量を低減する方向で施設管理することが多い。実験設備の更新により、多くの機器がコンピュータ制御となっているものの、セキュリティ等の制約もあって遠隔操作による設備利用の拡大には至っていない。

**荷電粒子を用いた照射設備：**日本の原子力材料研究の特徴は、大学・研究機関において、電子顕微鏡やイオン加速器を用いた特徴のある照射装置の開発が活発なことである。はじき出し損傷と核変換による水素やヘリウムの蓄積を同時に模擬するために複数のイオン加速器を結合した装置や、材料変化のその場観察のための装置（大型の透過電子顕微鏡、透過

# ドラフト版にて取扱い注意

電子顕微鏡とイオン加速器やレーザー光の連結装置)の開発と利用が行われている。装置の多くは 1980-90 年代に導入されたものであり、各機関において部分的な更新や改良が進められているものの、全体的に老朽化や地震による損傷への対応が課題となっている。制御された照射場を利用した特徴ある材料分析は、データ駆動型の材料開発や施設管理において重要度を増す可能性がある。

**検査・監視技術の開発：**亀裂の発生や配管減肉に対しては超音波技術をベースにした供用中検査のプログラムが、照射脆化に対してはシャルピー衝撃試験をベースにした監視試験プログラムが、それぞれ確立されて標準化されている。いずれの場合も、試験頻度の適正化や試験技術の高度化のための研究は継続している。小型の破壊靱性試験によって破壊靱性を直接評価する手法も提案されているが、導入には至っていない。構築物の材料劣化の原因である微細組織の変化を非破壊検査で確認するための研究も行われている。

## 個別課題⑥ 製造・加工技術

ニーズ：

**原材料の生産技術：**安全上重要な機器等に使用される材料の多くは原子力グレードで規格化されており、基本組成の指定範囲、不純物管理、許容される熱処理等の範囲、製品として使用できる部位の指定等において、一般的な規格品よりも高い水準が要求されている。

**溶接・接合技術：**溶接による金属組織の変質や残留応力は応力腐食割れ等の誘因となることから、大型構築物における溶接・接合技術の高度化が進められてきた。熱影響部の小さな接合方法の開発は、破壊試験に供された試料から試験片を再生するためにも必要である。

**表面処理：**コストや強度等を犠牲にすることなく耐食性を向上させるために、化学特性に優れた内張を構造材料に設けることが幅広く行われている。製品の種類や要求される機能に合わせて、クラッド材の利用、溶接によるクラディング、化学的なコーティング、溶射などの選択肢がある。応力腐食割れ感受性をもつ材料に対しては、残留応力を制御するためにピーニング等の表面処理が行われることもある。

**製品の長尺化や一体成型：**製造工数を減らしたり、供用中検査の対象箇所を削減したりするためには、製品の各部を長尺化したり、部品を一体成型することが有効である。製品形状の制御をデジタル化することは、人材やサプライチェーンの縮小を補完するためにも重要である。

現状分析：

**供給能力の維持：**容器や配管に使用される鋼材の多くは電炉で作られており、脱炭素化の動きに対して比較的ロバストであるが、原子力需要の変動が経営環境に大きな影響を与え

# ドラフト版にて取扱い注意

ている。例えば、長年にわたり原子炉圧力容器材の供給の主役を担ってきた日本製鋼所室蘭製作所が既に分社化されていることは、原子力材料研究者が認識すべき現状である。2020年に示されたグリーン成長戦略では2030年までに日本企業がSMRの主要サプライヤの地位を担うとの目標が示されているが、米国NuScale社への製品供給においては韓国斗山重工が先行しており、日本企業の役割は必ずしも見通せていない。

**材料規格の見直し：**既存の規格の範囲を少し逸脱することで、コストを低下させたり、劣化を緩和させる可能性については、十分な検討が行われていない。使用実績に基づいて特定の経年劣化の発現を否定できることが分かれば一般規格品と同等の不純物管理で製造した材料に移行できるという道筋を検討することは、原子力事業のコスト競争力向上の観点から重要である。

**新しい製造技術の採用：**製品の長尺化や一体成型による溶接線の削減技術は段階的に採用されており、今後も適用範囲が拡大すると予想される。またデジタル技術を用いた加工技術の採用も進むと予想される。一品物が多い原子力機器の製造工程はAM技術との相性が良いことが期待されるものの、AMで製造された材料を原子力システムで使用する際の劣化評価や検査の方法などに関する論点整理は国内で全く行われていない状況にある。

## 個別課題⑦ 研究協力体制

### 学際領域の研究課題：

**過酷事故：**過酷事故時の溶融燃料や放射性物質の挙動をモデル化する研究は、従来の原子力材料と他分野との学際領域の課題であり、原子力材料のコミュニティからの貢献が期待されている。セシウムと構造材料の高温化学反応に関する研究は活発化しており、原子力材料に加えて、核燃料、水化学、原子力安全の分野で研究発表が行われている。ヨウ素の挙動については、材料研究者の貢献は小さい。核燃料デブリや溶融炉心とコンクリートの相互作用に関する研究は、主に核燃料や再処理・リサイクルの分野の研究コミュニティの関与が大きいが、原子力材料とも関係がある。

**炉心から離れた位置の軽水炉材料：**軽水炉におけるコンクリートやケーブル等の経年劣化や事故時の材料劣化に関する研究は、従来の原子力材料コミュニティの研究対象の外であったが、特に放射線との相互作用に関する領域などで関与が増えつつある。

**外的事象等への対策：**軽水炉において想定される誘因事象が増えるにつれて、研究対象とされる材料挙動は拡大している。例えば、竜巻対策等の有効性を検証するためには、板材（防護板）や線材（防護ネット）と飛来物との衝突による高速で大規模な変形挙動をモデル化することが求められる。原子力材料分野で培われたマルチスケール・シミュレーションや微小

# ドラフト版にて取扱い注意

試験片試験技術が、こうした領域でどのように活用できるかは十分検討されていない。

## 照射設備の共同利用：

**国内の照射設備利用：**JRR-3 が 2021 年 2 月末に再稼働され、常陽の再稼働も期待されているが、軽水炉材料照射試験への利用は、核燃料や大型構築物の試験において必要なループ設備がないことから、まだ様子見の段階である。

**海外の照射設備利用：**東北大学を取り纏め機関として、ベルギーBR-2 炉の共同利用が行われているが、軽水炉材料研究のための利用は限定的である。OECD/NEA では、ポストハルデン炉の燃料研究として、日本・米国・ベルギー・ロシア・チェコの既存施設を使用した共同研究を実施している。その他の軽水炉材料研究に関しては、研究プロジェクト毎に共同研究先を探し、米国や東欧（例えばチェコの LVR-15）の施設を利用することが一般的である。

## 個別課題⑧ 教育

**教育段階：**軽水炉材料分野への若年層の確保には、原子力を学ぶ学生の中から材料分野を研究する学生を確保することと、材料を学ぶ学生の中から原子力分野を研究する学生を確保することという二つの側面がある。いずれのパターンにおいても、原子力材料の研究は、かなりの程度、実験施設に依存する。学生にとっては、貴重な研究施設を使いこなせるという良い側面と、従来のキャンパスと異なる施設を中心とした生活を余儀なくされるという悪い側面があることに配慮し、制度的な対応を検討する必要がある。

**実務家段階：**民間で軽水炉材料分野の研究開発に携わる研究者や技術者は、必ずしも学生時代から原子力材料のコミュニティで活動していないことに留意が必要である。この段階の研究者が知見を深めるための良質な教科書が存在しないことは問題である。また、研究コミュニティの運営に当たっては、人材の流動性を強く意識し、新規参入者へ配慮することが必要である。

**海外人材：**大学等で軽水炉材料の研究室へ進学する学生のかかなりの部分を留学生が占めるようになっている。留学生の研究コミュニティへの参画や、学生同士のネットワークキングは、欧米と比較しても十分ではない。海外人材の国内企業への受け入れについては、一定の進歩が認められる。

**研究成果の発信：**社会への研究成果の発信は研究者の責務の一つである。軽水炉材料分野では、過去に原子炉圧力容器の照射脆化の問題が社会問題化したことがある。技術基準規則の求める性能を保証できる範囲を明示することと、それを超える領域のどこに不確実さがあるのかを丁寧に説明することが必要である。

# ドラフト版にて取扱い注意

## テーマ 2：先進原子力システム

冒頭の原子力材料分野のロードマップの目的と構成の図 1～図 3 に示したように、革新的原子力システム(関連技術)・分析／試験施設含む)のための材料科学技術確立していくための道標をここで主に示す。また、この材料科学技術の確立により、イノベーション材料科学技術へ、カーボンニュートラルへ、さらに産業・医療・学術等の貢献へ進み、そのための材料科学技術に関する R&D サイクル効率化や材料科学技術の向上を進めていくための 8 つのツール (①材料工学(イノベーション含む)、②システムパフォーマンス、管理技術・設計、③照射施設(研究炉、加速器)、④PIE 施設・分析技術・検査技術(施設)、⑤新技術(3D プリンティング技術、製造技術等)、⑥計算科学・AI・Database(駆動型、材料研究開発含む)、⑦国内外の研究協力、⑧人材育成・アウトリーチ)による評価に基づいた道標を併せて示す。

先進原子力システムは、軽水炉と比較してより過酷な環境(高温、高圧、高照射等)の下で使用されることが想定される。構造材の照射影響あるいは環境との共存性を明らかにし、耐照射特性や耐食性などに優れた材料を開発すること、および合理的な構造設計を実現することが先進原子力システムの実用化には必要不可欠である。また、エネルギーだけでなく、産業、医療、学術等に貢献できるように先進システム開発を進めていく過程では様々なステークホルダーを常に持ち、より世の中の役に立つ先進原子力システムを構築していくことが重要である。さらに、信頼性の高い量産技術開発、耐照射特性や耐腐食性などに優れた材料開発や照射影響を正確に予測するためのシミュレーション技術・加速試験技術等の開発や放射線利用の施設やそれに付随する分析技術開発及びその施設などを如何に構築していくかが本ロードマップの役割でもある。

そのためには、国研、大学、産業界の連携による体制の構築と投資先の集中・集約、照射試験炉の減少や運転期間などに影響を受けないための代替技術の開発(加速器技術)、相補的な研究炉と加速器施設の協働的な運用によって、定常的に産業、医療、学術などへ貢献をしていくことが求められていることをしっかりと理解する必要がある。また、機器の特性や性能及び寿命などに影響を及ぼす環境効果(照射など)の影響に関する機構論的解明とシミュレーション技術、分析技術の開発等が望まれている。将来展望としては、加速器利用技術、照射炉の再稼働・新設、コンピューターサイエンスの高度化、一般産業(ガスタービン等)における高温材料開発やナノサイエンスに基づく材料開発等が挙げられる。

# ドラフト版にて取扱い注意

本題に入る前に、ここで取り扱う内容の整理内容を以下に示す。

## (技術) 課題・テーマを選定した趣旨

- 先進原子力システムとイノベーション材料科学技術の研究開発を行う意義、現行の原子力発電との比較からの優位性（環境、経済性、安全性）、原子力の付加価値向上、将来への負荷低減（カーボンニュートラルなど）。先進原子力システム等と材料科学技術による産業・医療・学術などの貢献

## (技術) 課題に対する社会的・技術的ニーズやシーズ（作り含む）

- 炉開発：炉型毎のニーズ・シーズが異なる
- 核変換処理：（社）廃棄物低減、長期管理負担の軽減、（技）再処理技術+照射技術、ADS 開発
- 水素製造：（社）本格的な水素利用・エネルギー貯蔵、（技）実験室系小型プラント→大型プラントへのイノベーション（高燃焼度化・高密度出力化の向上）
- カーボンニュートラルやイノベーション材料科学技術の実現化

## キーパラメータの高度化を実現化するメカニズムの可能性、連携による強化

- （炉、核変換処理）国研、大学、産業界の連携による体制の構築と投資先の集中・集約
- 水素製造・高温熱流体・加速器に対する他分野の興味を取り込み、非原子力系産業と共有化
- 材料照射施設（研究炉、加速器）の最大活用や新規整備
- システムのパフォーマンス、管理技術・設計の技術向上
- PIE 施設・分析技術・検査技術（施設）の高度化
- 新技術（3D プリンティング技術、製造技術など）の導入
- 計算科学・AI・Database（駆動型材料開発含む）による評価
- 上述のすべての協働

## 将来の社会や他分野に対する展望

- 高速炉・核融合の基礎技術の強みを伸ばす→イオン照射を活用、中長期的には研究炉を用いた照射実験（海外炉・再稼働・新設）
- 水素製造をさらに意識した炉開発をベースに材料研究展開（水素をキーワード：高温炉、水素透過、水素脆化、遅れ破壊）
- 高温熱流体など他エネルギー源の熱効率向上に繋がる材料研究（熔融塩熱化学・力学、高温流体力学）

## 社会と技術的ニーズ

- イノベーション材料とその科学技術
- カーボンニュートラル

# ドラフト版にて取扱い注意

- 核融合炉ニーズ
- 高温ガス炉ニーズ（水素製造、高温熱流体）
- 高速炉ニーズ（核変換処理 - MA/FP 放射能・毒性低減によるバックエンドに係る負荷の低減）
- 放射線や高性能・高効率な原子力システムの産業・医療・学術などへの貢献

## 技術的なブレークスルー

- イノベーション材料科学技術に関する R&D サイクルの効率化と技術向上
- 核融合炉：構造材料タスク（高温重照射下健全性、低放射化、等）
- 核融合炉：トリチウム工学タスク（P S I 健全性、トリチウムインベントリーの確立、等）
- 高温ガス炉：FP 拡散バリア、黒鉛の耐照射損傷特性の向上
- 高速炉：核変換用炉の課題→耐照射・腐食に優れた長寿命炉心材料開発と LLFP 処理に向けた技術開発
- 熔融塩炉：燃料塩周辺技術（燃料精製、分析技術、MA/FP 点火/燃焼によるポテンシャル調整手法など）

## 社会、市場の変化、他分野への波及効果

- 核融合炉：ITER/BA 活動や日米核融合科学技術などの進展による核融合エネルギーシステムの早期実現化への期待
- 高温ガス炉：水素製造及び高温熱利用などニーズ・波及効果は多岐にわたり期待大
- 高速炉：核変換処理による MA/FP 放射能・毒性低減から社会的受容性を確保する必要、バックエンドにかかる負担を低減化するためのニーズを強調
- イノベーション材料科学技術の確立
- 高性能・高効率な原子力システム(関連技術・分析／試験施設含む)の実用化
- 放射線のさらなる応用
- カーボンニュートラルの社会の実現
- 革新原子力システムによる定常的な産業・医療・学術等への貢献



# ドラフト版にて取扱い注意

## 2-1 高速炉

「高速炉開発に関する技術戦略」に関しては、日本原子力学会新型炉部会において 2019 年 7 月に高速炉戦略ロードマップ検討会が作成されている。2.1 項では、この戦略で示されている内容を参照しつつ、高速炉の炉心材料、構造材料の諸課題と戦略について、ニーズとそれに対する課題及び展開を示すことにした。ここで、燃料関連ではあるが、特に研究課題が多く残っており、且つ高速炉システムの環境負荷低減に係る性能へのインパクトが大きなマイナーアクチノイド(MA)の分離変換技術に係る燃料技術についても併せて記載している。以下、炉心材料および燃料を合わせて燃料・材料と呼称する。

高速炉開発を加速するための燃料・材料及び構造材料開発に関わる革新技術の確立が必要不可欠であり、これによりプラント長寿寿命化への設計改良を取り入れられるように、研究炉（「常陽」や JRR-3M 炉等）での燃料材料の照射試験と PIE 試験を積み重ねて評価を進めていくことにより、高速炉に関する革新技術を発展させることができる。ここにその革新技術の主要な項目を示す：

- ・事故時耐性に優れた新型燃料被覆管および高燃焼度化に対応した新型燃料被覆管：燃料被覆管用酸化物分散強化型(ODS)フェライト鋼の量産製造技術・強度基準整備、その他革新的な耐照射性材料開発・製造技術開発等
- ・長寿命プラント設計を可能とする構造材料：構造材料の長期健全性評価に必要なクリープや疲労データの拡充、寿命予測の信頼性向上に関する高速炉用の構造材料開発、長期健全性評価技術
- ・高速炉を用いた MA 含有 MOX 燃料リサイクル技術：MA 含有 MOX 燃料遠隔製造技術、機構論的物性モデル、照射挙動計算解析コード
- ・共通技術：高速炉実機環境(ナトリウム、鉛ビスマス、超臨界圧水、熔融塩)での腐食挙動予測技術(内外面)、防食技術開発、照射試験・照射後試験技術開発、シビアアクシデントなどの安全性向上の対策の 1 つとしてナトリウムの化学的活性度自体を低減する研究開発（例えば、「ナノ粒子分散ナトリウム」(J. Saito, N. Yoshioka, M. Nagai and K. Ara, “Study on Chemical Reactivity Suppression and Coolant Applicability of Sodium with Suspended Nanoparticles”, IAEA, FR13 : <https://www.jsm.or.jp/ejam/Vol.9No.1/NT/NT84/84.html>)) 等。

# ドラフト版にて取扱い注意

## 2-1 高速炉

### ① 高性能材料の研究開発（イノベーション材料など、研究基盤向上、優れた強度特性、高耐食性、など）

ニーズ：

安全性、経済性、環境負荷低減性（放射性廃棄物の減容・有害度低減）に優れる高速炉を実現するため、高温、照射、腐食環境等が重畳する実機環境での耐久性に優れた高性能の炉心材料（被覆管、ラップ管）、構造材料（冷却材配管や炉容器など）の開発、及びこれらを実機に適用するために不可欠となる強度基準や長期健全性評価技術の開発が求められている。炉心材料および構造材料の使用環境は炉設計に依存するが、いずれの炉型においても、炉心材料は高い照射量の高速中性子照射に晒されること、材料の強度と組織への照射影響が複雑であり正確な予測が難しいこと、中性子照射データを取得するための照射場が限定的であり照射試験にも長期を要すること等から、特に耐照射特性の観点での研究開発がボトルネックとなっている。

【ナトリウム冷却高速炉用の燃料被覆管及びラップ管材料】－「常陽」や「もんじゅ」用に耐スエリング特性を改善するため 20%冷間加工を加えるとともに、微細な照射下析出組織を制御するため、材料照射試験に基づき微量添加元素濃度と最終熱処理温度の最適化を図った改良 SUS316 鋼（PNC316 鋼）が開発されて採用されている。ナトリウム冷却高速炉の燃料被覆管およびラップ管は、炉内で高速中性子による高線量の照射を被ることで、スエリングや照射クリープによる変形が過度に生じると、燃料ピンバンドルとラップ管の機械的相互作用（BDI：Bundle-Duct Interaction）により、燃料ピン間の冷却材流路断面積が減少することで、被覆管温度上昇による破損に繋がる。これを抑止して燃料の長寿命化を図るため、燃料被覆管およびラップ管用に炉内での寸法安定性に優れた材料の開発が必要である。これまでに、燃料被覆管用に耐スエリング性と高温強度に優れた ODS フェライト鋼と高 Ni オーステナイト鋼等の開発が進められている。ODS フェライト鋼は、耐スエリング性に優れたフェライト母相にナノスケールの酸化物粒子を分散することで高温強度を高めた材料であり、フェライト鋼の使用上限温度である 600℃近傍を超える温度域でも優れたクリープ強度を有する。ラップ管の使用温度は、燃料被覆管に比べて低いため、ODS 鋼よりも高温強度が低いと既に製造技術が確立されており、工業的技術基盤の充実した高強度フェライト/マルテンサイト鋼（PNC-FMS）の開発がラップ管用材料用に進められている。

ナトリウム冷却高速炉燃料被覆管用の ODS フェライト鋼については、日本では、Cr 濃度 9～12%を中心に開発が進められており、近年の研究により、事故条件に相当するような 1000℃近傍でも従来型の炉心材料（改良 SUS316 鋼や PNC-FMS）に比べて優れた強度を有することが判明している。米国、仏国では、9Cr-ODS 鋼に加えて、燃料-被覆管相互作用等の観点から耐食性を重視した 14Cr-ODS 鋼の研究も進められている。Cr 濃度等の材料仕様、製造

# ドラフト版にて取扱い注意

条件とその結果としての材料組織は、材料の照射特性、耐食性等を決める重要な因子であり、高速の炉心材料の要求性能（高温強度、耐照射性、耐食性等）がバランスする最適解について照射研究等を通じて段階的に絞り込んでいく必要があり、このための研究開発を実機適用後も含めて長期的に進める必要がある。

【超臨界圧水（SCW）冷却高速炉および鉛ビスマス（LBE）冷却高速炉の燃料被覆材料】 9Cr-や 11Cr の ODS 鋼は、高温強度と耐照射性能の要件を満たしているが、LBE や SCW に対する耐食性が十分ではなく、このような環境の使用にはスーパーODS 鋼（Cr:11~22%, Al:4%添加）などの開発が進められている。これらの材料開発は大型の製造性試験、炉外での強度データの拡充に加えて実炉環境下（類似環境下）での照射試験・照射後試験を積み重ねていく必要がある。上記以外に新たな耐照射性材料（ハイエントロピー合金等）の研究が進められており、これらの材料については、強度特性や照射特性の基本評価を行い、素材開発および高速炉への適用見通しを行っていく必要がある。上記材料の適用見通し確認後も、材料仕様の最適解を追求し、上記の SFR 用炉心材料と同様に長期的な研究開発を進める必要がある。

【ナトリウム高速炉の構造材料】-ナトリウム冷却高速炉である「もんじゅ」では、SUS304 等の高温クリープや疲労等の強度データ、環境効果（ナトリウム環境効果、中性子照射による影響）を反映した材料強度基準や構造設計方針が整備された。それ以降のナトリウム冷却高速炉に適用すべき構造材では、炉容器用には高温強度と疲労強度に優れた改良 SUS316(316FR)、実証炉用の冷却配管および蒸気発生器用伝熱管に熱膨張率が低く、熱伝導度および耐 SCC 特性に優れた改良 9Cr-1Mo 鋼の研究開発および基準化に向けた検討が進められている。発電炉開発の観点で経済性は重要な性能指標であり、安全を維持しつつプラントの長期運転を実現するための材料課題への取り組みは重要である。具体的には、構造材料の長期健全性評価に必要なクリープや疲労データの拡充、溶接部を含めた寿命予測の信頼性向上は、高速炉用の構造材料開発において、重要な研究開発課題である。加えて、液体金属との共存性評価データや照射による影響評価データも必要になるため、汎用性が高い国内原子炉（JRR-3M や常陽）などでの照射試験や流動ナトリウムループでの腐食試験を継続的に行うことも必要である。

【熔融塩冷却高速炉の構造材料】 優れた耐食性を有するハステロイ系の Ni 基合金の採用が検討されており、耐食性評価、照射影響評価（核変換He 効果を含む）が不可欠である。

【鉛ビスマスや超臨界圧水を冷却材とする炉設計における材料規格・基準化】 炉設計の検討が進められており、これに対応した高耐食性の構造材料開発や強度基準整備（環境効果を含む）に係る研究開発も必要である。

【構造材料開発や燃料・材料開発の全般的なニーズ】 革新的材料開発に不可欠な基礎・基盤的な材料科学知見の蓄積、長期を要する強度データや照射試験データの拡充等の課題があり、これらへの対応を途切れることなく長期的に進めることは重要である。

【燃料】酸化物燃料の基礎特性評価を通して、様々な基礎データを統合した機構論的物性モ

# ドラフト版にて取扱い注意

デルを構築し、照射挙動モデル及び燃料製造プロセスに関する燃料技術の開発が必要である。また、燃料製造技術開発では、マイナーアクチノイド (MA) 含有 MOX 燃料の遠隔量産製造を可能にする製造プロセスの開発、製造設備機器の開発、及び燃料製造施設の設計研究が重要である。

## 現状と課題と期待される成果：

次世代炉のためのイノベーティブな材料の開拓と製造技術の開発が進められている。特に、燃料の高燃焼度化や事故耐性向上に有効な ODS フェライト鋼被覆管、フェライト鋼ラップ管などの長寿命炉心材料の開発が国内外で進められている。また、新たな耐放射性材料として期待されるハイエントロピー合金の研究開発も進められている。これらの開発の進捗のためには「常陽」等の国内照射施設での利用と試験・解析及びこれらに関わる一貫したサポート体制や連携協力により研究開発の躍進が期待される。

燃料・材料は、定期的な交換、もしくは異常事象による劣化による交換を前提とする消耗品と位置付けることができる。一方、構造材料は、原子炉の寿命期間中、交換なしで利用する永久構造物としての開発が必要であり、そのため、信頼性の高い長期健全性評価技術や基準の整備（溶接部を含む）が必要である。

## ➤ PHASE01（～2030）：

[核燃料サイクルを含めた FBR 標準システムへの材料技術課題の取り組み]

- ・ ODS フェライト鋼被覆管などの長寿命炉心材料の開発（量産技術開発、材料強度基準に向けたデータ拡充（照射データ、耐食性データを含む））
- ・ 照射データ等取得に係る試験技術開発
- ・ 炉心材料へのイオン照射等を活用した照射影響に関する基礎知見の拡充
- ・ 燃料の照射挙動評価では、MA が燃料性能に及ぼす影響を評価するため、「常陽」などで照射した MA 含有 MOX 燃料の照射後試験
- ・ 60 年設計を可能とする構造材料や長期健全性評価技術の開発
- ・ 炉心材料製造に係る国内サプライチェーンの回復
- ・ ODS フェライト鋼、フェライト鋼以外の新たな耐放射性材料の開拓
- ・ 材料性能の高度化に向けた新技術（3 元積層造形技術等）/計算科学的評価の成立性評価

## ➤ PHASE02（～2040）：

[次世代炉設計への成果を反映]

- ・ ODS フェライト鋼被覆管などの長寿命炉心材料開発（量産技術の高度化（材料性能/品質安定性の向上、コスト低減等）、材料強度基準の高信頼性化）
- ・ 新技術/計算科学的評価による高性能イノベーション材料の製造の炉心材料開発への適用。

# ドラフト版にて取扱い注意

- ・燃料の照射挙動評価の継続的発展的な評価と解析による MA の再分布挙動等の照射データの取得・評価、挙動解析モデルへの反映等。

## ➤ PHASE03（～2050）：

[安全性の高い高性能革新炉の実用化開発に貢献]

- ・ ODS フェライト鋼被覆管などの長寿命炉心材料開発（国際標準化）
- ・ 新技術/計算科学的評価による高性能イノベーション材料の製造、イノベーティブ構造・機能材料の採用等

## 2-1 高速炉

### ② 高性能、高効率、安全なシステム設計等（環境への負荷低減、規格・基準、核特性、伝熱特性等を含む）

**ニーズ：** 安全性、経済性に優れる高速炉を実現し、核分裂資源の有効利用により安価で安定した電力を供給する。また、高速炉の特徴である高速中性子により、原子炉内で生成する放射性毒性の高いマイナーアクチノイド(MA)を核変換する技術開発（放射性廃棄物の減容化・有害度低減のための技術開発）を行うことで、使用済核燃料処分に係る負担（環境負荷）を大幅に低減する。

将来の原子力システムである第四世代炉として、ガス冷却高速炉(GFR)、鉛冷却高速炉(LFR)、熔融塩炉(MSR)、ナトリウム冷却高速炉(SFR)、超臨界水冷却炉(SCWR)、超高温炉(VHTR)の研究が進められている（VHTR は熱中性子炉）。これらのシステムの実用化のためには、資源有効利用性、持続性、環境負荷低減性だけでなく、安全性や経済性が重要な性能指標となる。近年、冷却材喪失事故リスクの観点等から安全性が高く、経済性を有する小型炉(SMR)の開発が期待されている。小型炉にすることで、高い安全性を確保しつつ、徹底した設計簡素化によるガス火力並みの価格競争力を確保することが期待される。

様々な炉概念の設計研究が国内外で活発に進められている。ここで、プラントの冷却材の伝熱性能および核特性は、高速炉の性能(安全性、経済性、資源有効利用性、環境適合性)に多大な影響を及ぼすため、炉設計における冷却材の選択は、高性能、高効率、安全な炉を設計するための重要なポイントとなる。ここで、炉心材料および構造材料は、高温で長時間にわたり使用されるだけでなく流動する冷却材による腐食環境に晒されるため、燃料・材料および構造材料の性能(強度、耐食性、耐照射性)は、炉設計の成立性を左右する重要なポイントとなる。よって、各種炉設計に対応可能な高性能炉心材料、構造材料の開発、炉設計に用いる信頼性の高い強度基準式の整備、およびこれに係る研究開発が必要である。

高速炉利用の利点である使用済燃料処分に係る負担軽減（環境負荷低減）のための MA の核変換技術開発として、MA 含有 MOX 燃料リサイクル技術の開発は重要である。このため、MA 含有 MOX 燃料の遠隔量産製造を可能にする製造プロセス・製造設備機器の開発及び燃料製造施設の設計研究を進めるとともに、MA 含有 MOX 燃料の照射試験（燃料照射挙動評価の

# ドラフト版にて取扱い注意

ための照射後試験を含む) やその後の MA 分離試験を行い、MA 含有 MOX 燃料リサイクル技術の成立性を実証する必要がある。また、限られた照射後試験データに基づき MA 含有 MOX 燃料の照射挙動を把握するため、基礎物性データの拡充と、様々な基礎データを統合した機構論的物性モデルを構築し、照射挙動モデルとして整備することも併せて進める必要がある。

MA 含有 MOX 燃料を用いて効率的に MA を高速炉内で核変換する観点でも、長期燃焼を可能とする長寿命炉心材料の開発が期待されている。MOX 燃料が MA を含有することで、燃料ピン内の酸素ポテンシャルが上昇するため、燃料-被覆管化学的相互作用は厳しくなると予想されている。そのため、被覆管の耐食性改善や腐食式の高精度化等の検討に加え、低 O/M 比の MOX 燃料の開発が重要である。

高性能、高効率、安全なシステム設計に関して、材料関連 (MA 含有 MOX 関連を含む) の技術開発課題として、例えば以下が挙げられる。

- ・炉設計に対応可能な高性能燃料・材料、構造材料の開発 (防食技術開発を含む)
- ・長期健全性評価技術の開発 (長時間強度特性評価技術、経年劣化非破壊診断技術、炉内ループ腐食試験技術開発、腐食挙動の評価技術・予測技術を含む)
- ・MA 含有 MOX 燃料リサイクル技術の開発

## 現状と課題と期待される成果：

21世紀半ば頃の現実的なスケールの高速炉の運転開始を目指して、民間によるイノベーションの活用による多様な技術間競争を促進することで革新的な高速炉技術開発に向けた検討が進められている。ここでは、これまで日本で主概念として開発を進めてきたナトリウム冷却型高速炉/MOX燃料/湿式再処理に限らず、高性能、高効率、安全なシステムを達成するため、様々な炉型、技術の開発検討が進められている。

### ➤ PHASE01 (～2030)：

[核燃料サイクルを含めた FBR 標準システムへの材料技術課題の取り組み]

- ・ODS フェライト鋼被覆管などの長寿命炉心材料の開発 (量産技術開発、材料強度基準に向けたデータ拡充 (照射データ、耐食性データを含む))
- ・照射データ等取得に係る試験技術開発
- ・炉心材料へのイオン照射等を活用した照射影響に関する基礎知見の拡充
- ・60 年設計を可能とする構造材料や長期健全性評価技術の開発
- ・システム設計に必要な燃料・材料、構造材料に関わる信頼性の高い設計式の提示
- ・MA 含有燃料の照射挙動の継続的・発展的な評価と解析 (MA の再分布挙動等の照射データの取得・評価、挙動解析モデルへの反映等)。
- ・炉心材料製造に係る国内サプライチェーンの回復
- ・ODS フェライト鋼、フェライト鋼以外の新たな耐照射性材料の開拓
- ・材料性能の高度化に向けた新技術 (3 元積層造形技術等) / 計算科学的評価の成立性評価

# ドラフト版にて取扱い注意

## ➤ PHASE02（～2040）：

[次世代炉設計への成果を反映]

- ・ ODS フェライト鋼被覆管などの長寿命炉心材料開発（量産技術の高度化（材料性能/品質安定性の向上、コスト低減等）、材料強度基準の高信頼性化）
- ・ 新技術/計算科学的評価による高性能イノベーション材料の製造の炉心材料開発への適用。
- ・ システム設計に必要な燃料・材料、構造材料に関わる設計式の高信頼性化
- ・ MA 含有 MOX 燃料リサイクル技術の実証データの取得

## ➤ PHASE03（～2050）：

[安全性の高い高性能革新炉の実用化開発に貢献]

- ・ 燃料・材料、構造材料に関わる設計式の規格基準化（国際標準化への取り組みを含む）
- ・ ODS フェライト鋼被覆管、長寿命構造材料、長期健全性評価技術等の高信頼性化・高性能化に向けた研究開発（国際標準化への取り組みを含む）。
- ・ 新技術/計算科学的評価による高性能イノベーション材料の製造、イノベティブ構造・機能材料の採用等

## 2-1 高速炉

### ③ 評価・解析手法（計算科学、データベース、試験片サイズ効果など含む）

#### ニーズ：

安全性・経済性に優れる高速炉の実現と高速炉を利用した放射性廃棄物の減容化・有害度低減のための技術開発のための各種データベースの整備、計算科学アプローチからの効果的な活用、補完的な評価と発展などが重要である。計算科学では、機械的性質が長期間の高エネルギー粒子の照射によってどのように変化するかを予測することが、他の材料分野にはない原子力材料分野独自のニーズである。計算科学的・理論的手法による評価の目的は、そのような実験から得られるデータをもとに現象を定量的にモデル化し、所望の照射条件下における材料特性を予測することである。

#### 現状と課題と期待される成果：

計算機のハードウェアの向上によって、ミクロレベルの解析可能な範囲は徐々に拡大してきている。また、機械学習等の AI 技術の進展により、材料モデリング研究が様々なフェーズシフトを起こす可能性がある。一方で、国内原子炉の再稼働などによって様々なデータ（ミクロ組織変化、強度変化、腐食など）からデータベースの拡充が可能になり、計算機のハードウェア向上に付随して炉の寿命や耐久性などを支配するモデリング解析が飛躍的に進展していく可能性がある。

# ドラフト版にて取扱い注意

- PHASE01（～2030）： 計算科学による高性能イノベーション材料製造法の最適化と実験との相関評価。計算科学による既存材料やイノベーション材料に対する照射・応力・腐食のデータベース、及び寿命予測法のモデル評価と実験の補完評価法の構築
- PHASE02（～2040）： 計算科学による高性能イノベーション材料製造法の最適化による安全性・経済性に優れる高速炉の実現と高速炉を利用した放射性廃棄物の減容化・有害度低減の基盤構築 計算科学による高性能イノベーション材料製造法の最適化、計算科学による既存材料やイノベーション材料に対する照射・応力・腐食のデータベース拡張と寿命予測モデルの高度化評価並びに実験の補完評価法の最適化
- PHASE03（～2050）： 計算科学による高性能イノベーション材料製造の高度化による安全性・経済性に優れる高速炉を実現と高速炉を利用した放射性廃棄物の減容化・有害度低減による早期実現。このためのイノベーション材料に関する照射・応力・腐食による寿命予測法の確立

## 2-1 高速炉

### ④ 国内外の照射施設（中性子、イオン、ガンマ線など）群、照射技術、廃炉材

#### ニーズ：

「常陽」は世界的にも有数の高フラックスの高速中性子照射が行える貴重な高速炉であるだけでなく、高速炉燃料・材料の性能実証に必要な照射試験機能が開発・整備されており、日本だけでなく海外の高速炉の燃料材料に関わる性能実証試験や基礎データ取得の場としての役割が期待されている。構造材料等、部材によっては、供用中に高速中性子照射量は低く、熱中性子による照射が支配的となるため、JRR-3Mを用いた照射データ取得のニーズがある。炉の構造材料の寿命評価には、材料ごとに、特にクリープ寿命や引張特性の全伸びに関する限界の熱中性子量と速中性子量の評価が設計上、重要だからである。

具体的には、燃料被覆管材料・ラップ管材料（ODS 鋼、PNC-FMS、高 Ni オーステナイト鋼等）、構造材料（SUS304 鋼、316FR 鋼、改良 9Cr-1Mo 等）のクリープ特性を含む強度評価や組織安定性及びそれらのデータベース拡充のため、利便性が高い「常陽」や JRR-3M 炉の活用が期待されている。

燃料の高燃焼度化や事故耐性向上に有効な ODS 鋼被覆管等の長寿命炉心材料の開発のためには、「常陽」において、材料照射試験、燃料ピン照射試験及び集合体照射試験を順次実施し、炉内健全性に係る実証データを取得する必要がある。一方、高速炉を用いた放射性廃棄物減容・有害度低減に係る枢要技術である MA 含有 MOX 燃料リサイクル技術の実証のためには、MA 分離変換サイクルの小規模試験を行う必要がある。これに関連した重要な



# ドラフト版にて取扱い注意

照射試験として、「常陽」の照射済燃料から MA を分離・回収するとともに、その MA を用いて、MA 含有 MOX 燃料を製造して「常陽」で MA 燃焼させる一連のサイクル試験 (SmART サイクル) が計画されている。この分離変換技術の実証のため、「常陽」の活用が不可欠である。

「常陽」、JRR-3M を含めて、照射施設は、燃料および材料の研究開発に不可欠なプラットフォームとして、萌芽的な研究も含めて様々な研究開発ニーズに対応する体制を整える必要がある。照射実験の計画的な、実行的なサポート体制の構築や産官学の連携が重要である。

## 現状と課題と期待される成果：

より安全な原子力システムの実現を進めていくための次世代炉設計やその設計の基になる高性能イノベーション材料の製造法を確立していくためには、高性能な燃料材料開発における照射試験は不可欠である。特に、「常陽」においては、高い照射量が稼ぐことができ、JMTR は廃炉であるため、JRR-3M の照射ではできない照射試験や相互の複合照射などが期待されている。この為、早期に再稼働を追求することが重要である。

### ➤ PHASE01 (～2030)：

[核燃料サイクルを含めた FBR 標準システムへの材料技術課題の取り組み]

- ・ 既存材料及び革新炉設計向け材料照射データ拡充と技術評価
- ・ 次世代炉のためのイノベーティブな材料の開拓と製造技術開発に必要な照射場の提供 (特に長寿命炉心材料の開発における製造技術として、高速炉燃料の高燃焼度化、MA の核変換性能向上に有効な長寿命燃料被覆管候補材である酸化物分散強化型 (ODS) フェライト鋼被覆管などの長寿命炉心材料の開発。この開発の進捗には常陽等の国内照射施設での利用と試験・解析が極めて重要)
- ・ 燃料の照射挙動評価に必要な照射場の提供

MA が燃料性能に及ぼす影響を評価するため、MA 含有 MOX 燃料の照射試験と照射後試験による貢献)

- ・ 革新的な燃料・材料、構造材料の開発、萌芽的研究に必要な照射場の提供

### ➤ PHASE02 (～2040)：

[次世代炉設計への成果を反映]

- ・ システム設計に必要な燃料・材料、構造材料に関わる設計式の高信頼性化に必要な照射場の提供
- ・ MA 含有 MOX 燃料リサイクル技術の実証データの取得に必要な照射場の提供
- ・ 革新的な燃料・材料、構造材料の開発、萌芽的研究に必要な照射場の提供

### ➤ PHASE03 (～2050)：

[安全性の高い高性能革新炉の実用化開発に貢献]

- ・ イノベーティブ構造・機能材料・燃料の採用等のための照射試験データの拡充。

# ドラフト版にて取扱い注意

- ・革新的な燃料・材料、構造材料の開発、萌芽的研究に必要な照射場の提供

## 2-1 高速炉

### ⑤ PIE 施設群・分析装置群

#### ニーズ：

高速炉用燃料材料の研究開発には研究試験炉である「常陽」や JRR-3M 炉等の照射施設から PIE 試験まで一貫した施設環境下とそれに付随するサポート体制や研究協力の下で、国内外の研究者や開発者が利用しやすい形態が必要である。また、照射後に必要な照射キャプセルの分解や試料の仕分け、輸送、最新の様々な分析や試験などを含めた効率的で高性能な PIE 施設群と分析装置群を整えることが重要である。

特に「常陽」は世界的にも有数の高フラックスの中性子照射が行える貴重な高速炉であり、「常陽」に隣接する照射後試験施設の機能の充実は重要である。既に基本的な燃料材料の照射後試験機能に加えて、非破壊で照射後の燃料要素の状態を詳細に可視化可能な X 線 CT 技術等の他施設にない技術整備とその高度化研究が進められているが、例えば核融合分野で先行するミニチュア強度試験技術等の最先端の試験技術を広く導入検討するなど、貴重な中性子照射材から最大限の技術情報を得るための取り組みを継続することで照射後試験機能を高め続けることが期待される。

#### 現状と課題と期待される成果：

##### PHASE01（～2030）：

- ・長寿命炉心材料の照射性能評価
- ・MA が燃料性能に及ぼす影響を評価するため燃料の照射挙動評価
- ・革新的な燃料・材料、構造材料の開発、萌芽的研究に必要な照射後試験フィールドの提供、原子力イノベーション等に係るニーズに応じた試験機能の高度化

##### PHASE02（～2040）：

- ・次世代炉設計への成果を反映
- ・高性能イノベーション材料の製造へ貢献
- ・革新的な燃料・材料、構造材料の開発、萌芽的研究に必要な照射後試験フィールドの提供、原子力イノベーション等に係るニーズに応じた試験機能の高度化

##### PHASE03（～2050）：

- ・安全性の高い高性能革新炉の実用化開発に貢献。
- ・イノベティブ構造・機能材料・燃料の採用等のための照射試験データの拡充。
- ・革新的な燃料・材料、構造材料の開発、萌芽的研究に必要な照射後試験フィールドの提供、原子力イノベーション等に係るニーズに応じた試験機能の高度化

# ドラフト版にて取扱い注意

## 2-1 高速炉

### ⑥ 新技術・AI 活用（材料や機器の製造、溶接、検査、製造規格など）

#### ニーズ：

安全性・経済性に優れる高速炉を実現するための高性能燃料・材料の開発、高速炉を利用した放射性廃棄物の減容化・有害度低減のための技術開発に寄与する燃料・材料の開発、過酷条件においても損傷しにくい新型燃料部材の開発。

我が国に蓄積されてきた高速炉技術は、SFR(MOX 燃料)に関するものが殆どである。

これまで、実験炉「常陽」及び原型炉「もんじゅ」の設計・建設・運転、そして FaCT 以降に実施した設計研究と要素技術開発、日仏 ASTRID 協力により、次の実証炉を設計できるレベルの技術が官民に蓄積されてきた。事業者やメーカーが保有する技術の維持は、設計研究や要素技術開発を進めていくだけでは困難であり、実際の高速炉プラントを設計・建設・運転して初めて実用化に向けた技術の蓄積と発展が期待でき、人材の確保に繋がるのである。「もんじゅ」の建設完了から四半世紀経過した現在では、「もんじゅ」の機器製造や建設、試運転に携わった技術者の多くが退職年齢に到達しつつある。我が国に蓄積された技術資産を散逸させず、若手・中堅の技術者へ伝承し、今後の実用化に繋げていく方を策を明確にすることが急務である。机上の設計研究と要素技術開発だけでは、高速炉の実用化に必要な機器の開発、プラント建設、運転保守等の能力は涵養されないことを認識すべきであるので、この点を注意して開発を進めていくことが必要である。

#### 現状と課題と期待される成果：

##### ➤ PHASE01（～2030）：

・次世代炉のためのイノベーティブな材料の開拓と製造技術（3 元積層造形技術等）

##### ➤ PHASE02（～2040）：

・イノベーティブな材料製造技術や評価・解析手法の高度化。次世代炉設計への成果を反映へ

##### ➤ PHASE03（～2050）：

・イノベーティブ構造・機能材料の採用等に対応できる技術の提供。安全性の高い高性能革新炉の実用化開発に貢献へ

## 2-1 高速炉

### ⑦ 他分野連携協力、国際協力など）

# ドラフト版にて取扱い注意

## ニーズ：

安全設計基準の国際標準化に向けた取組み（2 カ国/3 カ国間、多国間の国際協力の枠組みを活用し、我が国が中核国の 1 つとして、次世代高速炉の開発を進める諸国と連携し、高速炉サイクル技術開発と設計クライテリアの国際標準化に取り組み）において、材料の国際標準化等に対する国際協力による研究開発の推進や情報交換などの枠組みの中で、技術革新をしながら高い信頼性のあるシステムを構築していくために重要な役割をなす。また、「開発段階にある SFR に適合する保全計画」と国際的に合意された安全設計（SDC/SDG）の考え方に基づいた「SFR に対する規格基準類」については、開発側だけでなく規制側、関連学会、内外の有識者等と幅広く意見交換を行い、革新的な技術開発と並行して整備していくことが重要である。

## 現状と課題と期待される成果：

### ➤ PHASE01（～2030）：

GIF 関係：2030 年代以降の商業導入を目指し、開発目標（持続可能性、安全性・信頼性、経済性、核拡散抵抗性・核物質防護）を満たす革新炉システムの研究開発を推進するため 2001 年に発足した多国間国際協力の枠組み。

OECD/NEA 関係：欧州を中心に日本、韓国、ロシアを含め 31 カ国が加盟しており、政府間の協力によって、原子力発電を安全で環境に調和した経済的なエネルギー源として開発利用の促進。

IAEA 関係：「革新的原子炉と核燃料サイクルに関する国際プロジェクト」（INPRO）が 2001 年に始まり、21 世紀のエネルギー需要に対する原子力の持続的な貢献を可能とするため、技術保有国と利用国が革新的な原子炉及び燃料サイクルの検討を、日本を含め 40 カ国と 1 国際機関（欧州委員会）が活動に参加。INPRO の活動の 1 つとして、これまでの原子力導入シナリオに係る活動成果を統合して、世界的に持続可能な原子力システムへの移行のためのロードマップを描くプロジェクト（ROADMAPS）が 2014 年 11 月から始まり、日本を含む 16 カ国が参加（オブザーバを含む）しており、日本からは、高速炉サイクルの実用化への取組み。低炭素社会実現のため、将来を見据えた原子力の研究開発と革新技術の実証のための確実な投資が必要です。NEA では、2050 年を念頭に将来のロードマップを策定するため原子力革新 2050（NI2050）イニシアチブを 2015 年に開始し、この活動では、第二世代炉から第四世代炉を対象に、原子炉、核燃料サイクルの技術開発までを検討

EAGLE 関係：ナトリウム冷却高速炉における万一のシビアアクシデントの発生を想定し、炉心が大きく損傷した場合の溶融燃料の挙動とその事故の影響を和らげるための対策の研究として、カザフスタン共和国の研究炉（IGR 炉；黒鉛減速パルス出力炉）を用いて、実際に原子炉の中と同様、核分裂反応で燃料を溶融させ、その溶融した燃料のナトリウム冷却材中の挙動のデータ取得。これまで、2000 年初頭より EAGLE-1, -2

# ドラフト版にて取扱い注意

として、厳しい再臨界の発生による大きなエネルギーの発生を予防する対策を研究して多くの成果を得てきましたが、今後は、さらに EAGLE-3 プロジェクトとして、熔融した燃料が制御棒案内管等の通路に沿って流下し、受け皿等に保持されて、長期的に安定に冷却できる対策の研究の推進。

CNWG 関係： 文部科学省の指導の下、継続的に米国エネルギー省(DOE)との間で高速炉サイクル研究開発に係る協力を行ってきており、日米政府間の「民生用原子力協力に関する二国間委員会」の下に発足した日米民生用原子力研究開発協力の作業部会(CNWG)において協力。近年の米国の高速炉研究開発は、動的機器に頼らずとも静的機器のみで安全性が確保される原子炉やアクチニドリサイクルの実現を重視しており、高速炉材料、金属燃料炉心挙動解析等の新型炉研究開発、MA 分離手法等の燃料サイクル研究開発・廃棄物管理といった協力分野を文部科学省と共にリードする中心的な役割。2016 年 1 月には、日米政府間において第 4 回目となる CNWG 会合が開催され、今後より一層協力を深めることが合意。

原子力機構(JAEA)、仏国原子力・代替エネルギー庁(CEA)、米国エネルギー省(DOE)の 3 機関の協力関係： 安全、材料、熱流動等 8 つの研究分野及び機器設計等 4 分野の協力を定めた「ナトリウム冷却高速炉(SFR)の協力」覚書を交わし、各分野の計画を策定・合意し 2011 年より協力がスタート。本協力には、我が国の研究開発成果を第 4 世代 SFR の安全性等に役立てようとする国際貢献

➤ **PHASE02 (～2040) :**

phase 01 を基に、高性能次世代炉に向けた材料開発やデータ整備、技術実証活動を発展、実現させていくための国際協力

➤ **PHASE03 (～2050) :**

phase 02 を基に、イノベティブ構造・機能材料の採用等を発展、実現させていくための国際協力

## 2-1 高速炉

### ⑧ 人材確保、人材育成、アウトリーチ活動

**ニーズ：**

軽水炉分野などの技術、人材との交流と協力。産官学の連携。高速炉が実用化されるまでの開発期間が長期に亘ることから、現時点で未成熟な概念の開発が進展する可能性は排除できない。この不確実さに備えるためには、国内外の多様な研究開発動向を注視し、様々な炉概念及び革新技术に関するイノベーション研究の状況を把握するとともに、それらの中から将来の高速炉サイクルに寄与する可能性の認められる技術を取り込んでいく柔軟性を持つことが重要である。特に、大学や研究機関においては、実用化開発における主概念や技術の制約に囚われず、より幅の広い多様な炉型や革新技术について研究し、原子

# ドラフト版にて取扱い注意

力研究の裾野を拡大していくことが望まれる。その際、学会のみならず産業界との意見交流の場を設け、研究活動の活性化を図るとともに、高速炉サイクルの研究開発を担う人材育成も図っていくことが重要である。

これまで、実験炉「常陽」及び原型炉「もんじゅ」の設計・建設・運転、そして FaCT 以降に実施した設計研究と要素技術開発、日仏 ASTRID 協力により、次の実証炉を設計できるレベルの技術が官民に蓄積されてきた。事業者やメーカーが保有する技術の維持は、設計研究や要素技術開発を進めていくだけでは困難であり、実際の高速炉プラントを設計・建設・運転して初めて実用化に向けた技術の蓄積と発展が期待でき、人材の確保に繋がるのである。「もんじゅ」の建設完了から四半世紀経過した現在では、「もんじゅ」の機器製造や建設、試運転に携わった技術者の多くが退職年齢に到達しつつある。我が国に蓄積された技術資産を散逸させず、若手・中堅の技術者へ伝承し、今後の実用化に繋げていく方策を明確にすることが急務である。机上の設計研究と要素技術開発だけでは、高速炉の実用化に必要な機器の開発、プラント建設、運転保守等の能力は涵養されないことを認識すべきであるので、この点を注意して開発を進めていくことが必要である。

次期炉の運転開始までには一定期間かかることが予想され、それまでの間の技術維持に、常陽の改造に加え、国際協力を通じた世界標準の炉型の設計検討や、その成立性と安全性と経済性の向上に必要な技術開発を進めていくことが必要である。そこでは、廃止措置が進む「もんじゅ」で得られる知見も最大限活用していくことが重要。

## 現状と課題と期待される成果：

- PHASE01（～2030）： ニーズに対応できるコミュニティ形成
- PHASE02（～2040）： 上記及び関係する項目に対応できるコミュニティ形成
- PHASE03（～2050）： 上記及び関係する項目に対応できるコミュニティ形成と発展

# ドラフト版にて取扱い注意

## 2.2 核融合炉

日本における核融合炉開発は、現在 ITER 計画を主軸とする第 3 段階にある。また、その後を見据えたロードマップ「原型炉研究開発ロードマップについて（一次まとめ）」は文部科学省科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 核融合科学技術委員会（2018 年 7 月 24 日）で纏められている。これに対応し、ITER ならびに原型炉の研究開発が進行中であって、核融合 RM に沿った ITER や原型炉に関する材料開発やデータ整備が進められている。

### ① 高性能材料の研究開発（イノベーション材料など、研究基盤向上、優れた強度特性、高耐食性、など）

2.2 節の冒頭に示した背景を基に、主要コンポーネントであるブランケット及びダイバータに着目し、材料開発へのニーズと課題を抽出した内容をそれぞれ示す。

#### ニーズ For Blanket materials

第 6 期報告書で指摘されている技術課題

- (a) 構造材料、トリチウム増殖材、中性子増倍材の基礎データ、及び標準データの拡充
- (b) 実際の核融合環境下におけるブランケット特性の総合実証
- (c) 原型炉全体のトリチウム増殖性能が確保されることの実証、及びトリチウム透過漏えい防止の実証
- (d) 原型炉概念全体から見て整合のとれた遠隔保守概念、安全性確保概念、及び規格基準の構築
- (e) 先進ブランケット概念については、固有の諸課題の解決が必要

#### 現状と課題 For Blanket materials

- ・ ブランケットシステムに関わる課題の整理の難しさは、その要求仕様が原型炉の性能仕様と直接関係するが、一方で、原型炉の目標性能が明確に定まっていないことにある。必要な開発要素は整理できているので、定量目標を設定し、それに向かった研究活動を具体化することで、技術要素の整合性が確認できる。
- ・ ITER-TBM 設計では、材料の規格基準の策定並びに安全及び保守シナリオの検討に必要な増殖・増倍材料及び構造材料の原型炉工学データベース（荷重影響、照射影響、腐食影響、等）の整備が必要である。  
固体増殖・水冷却（WCSB）方式の TBM の開発/製作を具体化し、ITER の安全審査の要求水準を満たす必要がある。さらに、ITER のパルス運転を利用し、強磁場環境との整合性、及び変動負荷・環境への応答健全性等を実証する必要がある。
- ・ ITER-TBM システムである WCSB では、冷却システム、トリチウム計測システム、トリチウム回収システムの開発により、原型炉全体のトリチウム増殖性能、持続的な

# ドラフト版にて取扱い注意

運転条件、環境安全、及び、トリチウム透過漏えい防止の実証が必要である。また、遠隔保守概念の構築としては、故障発生時の対処が可能なシステムの構築や総合的な保守時の安全性確保概念の検証も必要であって、安全性を確保し、事象の管理が可能なブランケットシステムを構築する必要がある。

- 一方、先進ブランケットに関しては 製作・異種材料接合技術、複雑流路での冷却材熱流動、水素と熱の輸送・回収等の各々について、小型試験体による技術・設計検証を行い、課題の洗い出しとブランケット概念設計へのフィードバック、解決のための研究開発展開を図ることが必要である。

複数の概念案が存在し、研究開発活動が展開されている状況にあって、得られた基礎データの整理、開発技術の取り込み、熱交換を含む原型炉 TBM 設計素案の提示、さらには、これらの詳細な比較検討を進め、原型炉 TBM 開発において重点化する概念を選択することが必要と言える。

これらの先進材料については、移行判断時にその利用可能性を判断できるように、原型炉設計チームとの利用方法の検討や、データベースの充実を進めることが必要である。

## ニーズ For Diverter

第 6 期報告書で指摘されている技術課題

- (a) 熱負荷と排気性能を満足する磁場配位とプラズマ運転
- (b) 材料開発（トリチウムインベントリ、熱粒子・照射負荷による材料特性劣化の観点が重要）
- (c) 定常熱除去設計
- (d) ダイバータ機器の健全性・保守性と矛盾しない周辺プラズマ条件の同定とプラズマ運転シナリオの策定

## 現状と課題 For Diverter

- ダイバータの熱負荷の問題は、要求される特性と現有技術とのギャップが非常に大きく、一つの項目の改善だけでは解決できない。プラズマからの熱流束の低減及びプラズマ対向機器の除熱特性向上、両者の最適化によって妥協点を見出すことが必要。さらに、炉条件下の中性子照射環境における材料特性の劣化も避けられない。特に材料寿命は装置メンテナンス指針に大きな影響を与える。  
また、プラズマ対向機器は、プラズマ対向材料と伝熱材料の複合体であり、個々の材料特性の優劣だけではなく、それらを組み合わせた総合的な熱除去特性や機器寿命に基づき、適切な材料選択を行うことが重要。
- 特に、ダイバータ部における熱バランス、プラズマ真空容器内の粒子バランスを成立させるためには、



# ドラフト版にて取扱い注意

- (1) プラズマからの熱流束の低減
  - (2) 中性子照射環境下におけるダイバータの熱除去特性向上
  - (3) ダイバータ部における粒子制御特性（燃料粒子と不純物の排気）の確保
- が必要である。また、課題（1）と（3）は相反関係にあるので、自己無撞着な解を見つけることが必要。
- ・ トリチウムを含むプラズマ壁相互作用について、材料・表面・周辺プラズマ・計測・モデリング・中性子効果の観点から総合的な知見を得るための研究環境整備及び体制作り、原型炉全体での経済性や安全性とダイバータへの入射熱負荷に関する検討、冷却オプションの決定が必要である。この実現のため、JT-60SA 等の実験によって原理検証が有効である。
  - ・ 熱除去特性の向上のためには、中性子環境下でも十分な特性を有する高熱伝導材料の開発が必要。材料特性はメンテナンスサイクル等の炉設計の根幹に影響を与えることから、早期に使用可能な材料を選定することが求められる。
- さらに、ダイバータへの高熱負荷を適切に処理するため、高熱伝導特性を有する銅合金を使用することが妥当と考えられているが、既存の銅合金は耐中性子特性が不足しており、ダイバータを高頻度で交換しなければならないことが懸念されている。ダイバータの交換頻度を低減し、十分な稼働率を実現するためには、銅合金の耐中性子照射特性の理解、さらには、耐照射特性の向上が重要な課題である。

## 2-2 核融合炉

### ② 高性能、高効率、安全なシステム設計等（環境への負荷低減、規格・基準、核特性、伝熱特性等を含む）

#### ニーズ for 規格

#### 第6 期報告書で指摘されている技術課題と課題解決

- a. 材料規格を定めるためには、材料特性評価と劣化機構の理解に加えて、材料への要求仕様を定義する基となる核融合炉における安全性確保の基本方針と、それに対応した構造設計基準が必要。
- b. 初期の原型炉工学設計活動に必要な核融合中性子照射データを獲得するため、国際核融合材料照射施設 A-FNS の早期実現だけに頼るのではない、代替案や複合的な取組案を検討し、取り組むことが必要。
- c. 照射データ取得の前提となっている微小試験法について、規格基準の確立が必要。
- d. 材料開発には長いタイムスパンが必要であるが、実際の使用に着実に結びつけるためには、産業界の長期にわたる積極的参画が不可欠。

# ドラフト版にて取扱い注意

## 現状と課題

- ITER で照射した TBM の受入、ならびに、TBM での照射試験や照射後試験を通し、ブランケットシステムに対する評価計画がある。また、規格基準の構築については、核融合炉固有の安全性を十分考慮したうえで合理的な規格基準を設定する必要があり、特に、核融合炉の安全性確保の基本方針と構造設計基準の策定、及び材料に対する設計要求の明確化が必要。
- 例えば、低放射化フェライト鋼では、核融合中性子特有の照射効果が発現する臨界条件までの範囲で、核分裂炉・核破砕中性子源照射データ等に基づき実施することが可能と推測され、模擬照射実験及びモデリング研究を基軸として BA 活動で進められている。
- なお、核融合中性子照射影響を考慮した材料規格について、A-FNS での微小試験片を用いて得た照射データの取り込み方を規格基準として明確化することが必要と言える。一方で、核融合中性子照射影響について、A-FNS の早期実現だけに頼るのではない。核変換ヘリウム効果を検証可能な核融合中性子源の整備・利用や既存の原子炉施設を有効活用する代替案や複合的な取組案を検討し、取り組むことも大切である。
- 筐体の耐圧性確保に関する指針は、システムの安全性確保の方針に関係すること、筐体の構造に大きく影響し得ることから、早期に明確にすることが必要。
- 照射計画において評価できない項目について、シミュレーション・モデリングで補うための方法論を明確化することが必要。
- 原型炉ダイバータで使用する材料を決めるには、材料単体の性能のみならず、ダイバータ機器としての総合的な評価を行うことが必要。また、原型炉の高効率エネルギー生産へ向けた高性能化には、先進冷却方式ダイバータの開発も重要である。

## ニーズ for 安全性, 環境への負荷低減, 保守性能

### 第 6 期報告書で指摘されている技術課題

- (a) 核融合プラントの工学的安全性の理解に基づいた、安全性、及びトリチウム影響の評価。
- (b) 通常運転時においてもトリチウムの放出があることから、環境トリチウム挙動と生態系影響の把握、安全管理、社会的受容性の確保。
- (c) 異常事象とその対策などの安全に関する研究は、国内で我が国固有の条件に合わせて実施できる体制を構築することが必要。
- (d) 保守方式の将来展望、信頼性確保のアプローチ(品質保証、冗長性、安全裕度の考え方)、検査性、計画外停止リスクを考慮した「一定の経済性」提示。
- (e) 炉内機器の寿命予測、及び、寿命伸長へ向けた取組の方向性提示。

# ドラフト版にて取扱い注意

- (f) 保守方式、炉構造、建屋・ホットセルにわたる総合的な保守概念の構築。耐放射線性機器の開発、及び、システム統合化。

## 現状と課題

- 原型炉で重要な事故シーケンスの解明、事故進展の防止・緩和のための安全設計手法の構築、原型炉の安全設計ガイドラインの確立。トリチウムのインベントリは、真空容器内、ブランケット表面と内部に存在するトリチウムを適切に管理できるだけのデータを揃えることが必要である。トリチウムを取り扱う BA 活動施設や他の核融合施設で運転実績を積むと同時に、施設の立地地域との信頼関係を築き、核融合エネルギーが受け入れられる社会的な下地を作ることが望まれる。
- 安全性検討に関わるデータ（材料物性、化学反応）が不足しているが、この活動を本格化できない理由は、使用する材料が選択されていないことにある。このため、原型炉の要求仕様と、そこから導かれる個別要素への要求の明確化が必要。そのために、安全性検討を含む概念設計検討に携わる体制の構築が必要。  
安全性検討については、ITER 誘致活動後、検討チームが解散したこと、主だった活動が停滞したことが問題であり、プロジェクトとして活動を立ち上げることが重要である。  
安全評価用のコード開発、Verification & Validation（検証と妥当性確認）用の試験装置開発がともに停滞したままである。
- 最も重大な寿命決定要因となる対向材の損耗は理解に相当の時間を要し、長期的視点に立ち、継続的に取り組む。  
特に、炉内プラズマ対向機器、特にダイバータの寿命予測が困難であり、ダイバータの交換頻度が最も高く、炉の定期保守サイクルを決定すると考えられるため、経済性見通しを得るためにはその寿命予測が必要不可欠。  
移行判断の時点では、プラズマ対向機器の寿命から定期交換頻度を予測するとともに、研究開発の成果を取り込んだ保守内容・サイクルの詳細検討、最適化を行い、稼働率の見通しを提示すること。これには、ITER や JT-60SA 等において蓄積される設備・機器の故障率データベース等に基づいた計画外停止の要因、検知、対処に関する検討を含めること。
- 経済性を見込める稼働率を実現可能な定期保守シナリオと方式に立った、原型炉での実証の在り方とそのための研究開発計画の策定し、システムとしての計画外停止リスクの要因洗い出し、検知、低減・冗長性、対処手法の研究。
- 遠隔保守技術、耐放射線機器開発、炉内機器寿命評価について、BA 活動後に原型炉を目指した開発・試験。長期にわたる高  $\gamma$  線照射設備の確保と耐放射線性試験の実施。大型構造物の取扱、ホットセル、除染、炉内機器の補修、検査、廃棄物処

# ドラフト版にて取扱い注意

理等の技術は ITER での実験を適用。保守概念の成立性、製作性の検討、確定について、産業界も主体の一つとして参加できる体制の構築。

- ・ 原型炉で新たに必要となる大型コンポーネント一括引き抜き、運搬等の遠隔保守技術の開発研究推進。  
より高い耐放射線性能を有する機能材料、機器の開発研究推進（ITER-EDA 期間中では 100MGy を視野に開発、原型炉は 200MGy 以上。

## 2-2 核融合炉

### ③ 評価・解析手法（計算科学、データベース、試験片サイズ効果など含む）

#### ニーズ

- ・ 計算科学では、核融合分野における計算機の利用は、これまで BA 活動等を通じて進められ、既存の実験装置での結果を物理的に解釈するためのシミュレーション等で成果をあげられている。今後は、燃焼プラズマ等の実験的知見、最新の計算科学の知見などを取り入れ、原型炉のより効率的な制御、運転領域の拡大などを目指し、原型炉用シミュレーターの開発を進める必要がある。そのため、核融合専用の計算機資源を計算機技術の発展にあわせて確保していくことが重要である。
- ・ 原型炉以降の設計に必要なデータベースの整備（非照射材、照射後試験、照射中試験）
- ・ 原型炉設計・建設規格用の材料規格データ整備
- ・ A-FNS などでも供用される材料種類ごとの微小試験片の試験片サイズ効果についての試験規格化の整備

#### 現状と課題

- ・ 核融合 RM に沿った ITER や原型炉材料の研究開発、データ整備が進められている。量研を中心に計算科学と実験との整合性、応用性についての研究が進められており、とりわけ、核融合中性子効果予測に関する計算と実験との評価が集中的に実施されている。
- ・ ブランケット統合解析や炉材料解析を含む炉工学統合コードの開発。  
個々の炉工学要素シミュレーションを連携させ、ブランケット統合コードにまとめていくとともに、核融合炉材料に特化した炉材料シミュレーションコードの開発を含め、継続的な炉工学統合コード研究が必要。
- ・ 炉心プラズマシミュレーションと整合したプラントシミュレーションを可能とする、熱解析、電磁力解析、応力解析、中性子解析等を連携させた工学基盤コードを整備すること。

# ドラフト版にて取扱い注意

- ・ 材料規格や微小試験片試験技術に関する試験規格も、それぞれ評価が進行中であり、A-FNS の運転開始以前に整備・確立されていることが必要である。特に微小試験片試験技術 (Small Specimen Test Technology (Technique) : SSTT) に関する試験規格については、既存の SSTT 試験規格もあるが、原型炉以降の設計に有効な評価とその適用ができるように原型炉設計に適合するように十分な評価法を確立しておく必要がある。特に、照射された材料のき裂進展速度の評価については、軽水炉分野のオーステナイトステンレス鋼において試験片サイズ依存性が顕著であることも分かっているため、核融合炉材料においても、これに関する詳細な評価が必要な状況であると考えられる。

## 2-2 核融合炉

### ④ 国内外の照射施設（中性子、イオン、ガンマ線など）群、照射技術、廃炉材

ニーズ：

・ IFMIF/EVEDA (国際核融合炉材料照射施設の工学設計と工学実証活動) が日欧協力のもと、原型炉基盤技術を確立していくために幅広いアプローチ活動 (BA) の 1 つとして 2007 年より行われ、IFMIF の工学設計書が作成され、その工学実証試験とその技術開発がなされてきた。これらの成果を踏まえて、次段階となる「核融合中性子源 A-FNS」関係では国際協力を得ながら、その施設の建設を具体化され、この施設による核融合の原型炉以降用材料照射データの整備と炉システムの技術評価の進展が期待されている。さらに A-FNS の中性子源はこれまで以上の大強度中性子源であり、生成される中性子等の放射線利用は核融合炉開発だけでなく、多目的施設としても検討が進められている。

・ アクションプラン (文部科学省科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 核融合科学技術委員会 (2017 年 12 月)) では、核融合炉実現に向けて必要な核融合原型炉設計活動の中に「核融合炉材料と規格・基準」が挙げられ原子炉照射の必要性も併せて示されている。

・ 原型炉以降の設計に必要な照射後試験データと照射中に取得するデータの区分けに基づくため、適合するデータ取得計画による A-FNS と原子炉での実施。

・ 大学関係などの核融合関連施設 (加速器照射施設、A-FNS などに重要な液体金属取扱施設、トリチウム取扱施設等) での核融合の基礎、基盤工学への継続的、発展的な評価研究は、核融合炉で生じる予測モデルの確からしさの検証、さらには、その適用範囲を明確化していくために重要であり、大型施設での研究開発と相補的に効果的に、かつ連携協力を進めていくことは基盤技術の高度化や安全性評価に貢献するだけでなく、発展的な人材育成などにも極めて重要である。

### 現状と課題と期待される成果

# ドラフト版にて取扱い注意

種々の移行判断には、それまでに備わった材料に関わる知見から、予測モデルの確からしさの検証、さらには、その適用範囲を明確にすることが重要と言える。このためには、A-FNSの詳細な照射計画は、関連する技術が移行判断までに到達すべき成熟度、あるいは、その後の原型炉の製造設計活動に必要なデータ取得と整合するように、早期に決定する必要がある。すなわち、原型炉の製造設計に必須となる材料健全性に関するデータ取得やサブコンポーネントレベルの機能実証のためのテストセルの早期の設計が必要である。

なお、核融合中性子源の在り方や詳細な仕様や応用利用などについては、統合的な観点からの検討が必要である。特に、BA 活動を通じて整備された施設を有効活用、試験設備の増強は更なる材料開発において重要と言え、また、A-FNS の開発を他極との連携も視野に入れ、段階的に展開することも考慮すべき所である。また、大学関連施設の高度化は、核融合の基礎、基盤工学の評価や安全性も含めて、その連携体制などは重要な役割をなしていくものと考えられる。

## ➤ PHASE01 (～2030) :

- ・ 2020 年頃第 1 回中間 C&R (核融合中性子源 A-FNS の建設推進判断)
- ・ 2025 年頃から数年以内の第 2 回中間 C&R (A-FNS は建設移行判断。
- ・ 原型炉以降の設計用材料照射データ拡充と技術評価(ブランケット構造材料ではデータが不足している溶接部や被覆部の耐照射性特性、先進材料(酸化物分散強化鋼、バナジウム合金、セラミックス材料等)についても照射データの拡充、ダイバータと呼ばれる高熱流束機器に用いられるタングステン合金や銅合金の照射データなど。また、ブランケットにおける燃料増殖材となるリチウム材料や中性子増倍材であるベリリウム合金のような核的材料、プラズマ計測制御に必要な機能材料の照射データなど)

## ➤ PHASE02 (～2040) :

- ・ 2030 年頃からの核融合中性子照射試験を開始し、原型炉の建設判断に必要な材料等の初期照射データ取得
- ・ 原型炉以降の設計用材料照射データ拡充と技術評価

## ➤ PHASE03 (～2050) :

- ・ 核融合中性子照射試験による原型炉用維持規格などの評価
- ・ 原型炉以降の設計用材料照射データによる設計評価への展開

## 2-2 核融合炉

### ⑤ PIE 施設群・分析装置群

ニーズ

# ドラフト版にて取扱い注意

・照射後試験のデータは、照射施設に付属した PIE 施設での分析装置類での取得がより効率的で経済的であるが、A-FNS 周辺の維持や高度化、並びに既存 PIE 施設での試験の併用などによる迅速でより経済的な最適な PIE 試験の実施計画と連携協力が必要である。

## 現状と課題

現在、QST 六ヶ所研に小規模の PIE 施設（ベリリウム取扱含む）の整備がなされている。ベリリウム取扱施設に関しては、国内でほとんど取り扱い施設がなく、大変貴重な施設となっている。大学関係では東北大学金属材料研究所（大洗）に放射化した燃料材料を取り扱うことができる PIE 施設があり、軽水炉分野や核融合分野を始めとした様々な研究と開発に利用されている。その他に、民間や JAEA にも複数の PIE 施設があるものの、A-FNS のような施設で照射されたデータ解析を進めていくためには、系統的で総合的なデータ取得のため、既存の PIE 施設（分析装置群含む）の大幅な拡充と高度化、または、新たな PIE 施設に対する計画的な整備が欠かせない。

A-FNS 等の使用される微小試験片を活用した材料強度特性のデータ評価には、微小試験片試験技術（SSTT）の規格の下で実施する必要があることから、それに適合する装置や環境などの確認や整備などが必要と考えられる。

## 2-2 核融合炉

### ⑥ 新技術（材料や機器の製造、溶接、検査など）

#### ニーズ

原型炉以降の構造材料では、低放射化性能などの性能がより高精度に求められることから、原型炉用構造材料などを大量生産するためには、鉄鋼メーカーなどでは、既存の生産ラインは使用できないことも想定され、新しい生産ラインや新しい技術開発が必要になる可能性がある。また、一定の品質管理を行うための検査技術の確立が重要である。このために必要な新技術による研究開発の加速が強く望まれる。

#### 現状と課題（→現在、進行中の研究）

##### ～構造材製造および再製造（リサイクリング）に関する課題～

- ・低放射化材料のための生産ラインの検討  
→鉄鋼メーカーと共同で低放射化鋼の溶解プロセス研究・実証。
- ・使用後におけるリサイクリングを見据えたハンズオンリミットの作成。  
→低放射化元素の含有率を考慮し、誘導放射能減衰率を計算することにより再利用の可能性を模索中。

# ドラフト版にて取扱い注意

## ～構造材のコンポーネントへの加工（接合）に関する課題～

- ・溶融接合（溶接）：低放射化鋼にみられる耐照射性能のための組織制御が施された材料に関し、溶接の入熱による、局部的組織の劣化。
  - マイクロビームなどを利用した溶融および熱影響部（HAZ）の最小限化が検討されている。その他に界面反応接合における代替案も研究中。
- ・界面反応接合：ろう付けや液相拡散接合といった液相-固相反応接合や拡散接合や摩擦攪拌接合、爆発圧接といった固相拡散接合における接合部分の健全性評価
  - 超音波を応用し、可視的にミクロな空隙を探傷する研究が行われている。具体的な探傷の着眼点は、真空中における「リークタイト」、母材内部の「亀裂（鋳造欠陥や焼結不足）」、接合部の「空隙（接合中間材の濡れ性に依存）」などがあげられる

## 2-2 核融合炉

### ⑦ 他分野連携協力、国際協力など

#### ニーズ

- ・日韓交流においては、本学会の材料部会と核融合工学部会が韓国原子力学会の燃料材料部会が新セミナーに関する覚書（MOU）の下で2012年3月より実施され、核融合及び核分裂材料の両方を取り扱う日韓セミナーを通じて両国の当該分野に関する更なる交流や発展が深めるためのものである。これら3つの部会が合同でほぼ毎年、日韓の持ち回りで開催し、新しい材料や新技術に関する最新のニーズや研究開発の状況などが議論されている。
- ・日米科学技術協力事業は、世界のエネルギー問題に対して、日米両国で取り組むことが昭和53年（1978年）5月の日米首脳会談で決まり、日米協力が進められ、現在、「科学技術における研究開発のための協力に関する日本国政府とアメリカ合衆国政府との間の協定（昭和63年6月20日締結）」に基づいて実施されている7分野の研究開発事業で、その1つに核融合分野協力があり、日米の施設や設備を活かし、様々な交流や共同研究等を行い、核融合分野の研究開発の発展を協力して進めていくニーズがある。
- ・核融合分野における最大の国際協力である ITER（国際熱核融合実験炉）国際協力は、人類社会に多大な恩恵をもたらすと期待されている核融合エネルギーを国際協力により実現していくため、世界で初めて本格的に重水素・三重水素を用いた核燃焼を実現させるものである。また、核融合原型炉に向けた研究開発を幅広く進めていくための BA（幅広いアプローチ）活動（日欧協力）があり、ITER（実験炉）の次段階の原型炉で発電を技術的に実証し、経済的実現性を明らかにするための研究開発のニーズが大きい。
- ・核融合分野と軽水炉分野や革新炉分野の設計・建設・検査技術全般の技術的な交流や連携の促進は、今後の研究開発の進展のために更なる重要なニーズがある。



# ドラフト版にて取扱い注意

## 現状と課題と記載される成果

国際的な活動として、日欧協力の BA フェーズ II（2020 年 4 月～）や 7 極国際協力の ITER では 2025 年頃の ITER ファーストプラズマなどが進められており、核融合技術の新たな重要な進展と原型炉のための重要な開発と設計評価がなされていく。また、日米科学技術協力事業では、長期間、核融合炉材料の研究開発が進められ、様々な成果が得られ、さらなる評価や開発を進められている。この中の照射試験技術や照射後試験技術の多くは米国に蓄積され、照射後試験を直接行える場合でもコストや距離を考えると、現状、その機会は非常に限られている。

- PHASE01（～2030）： ITER や原型炉（以降）の開発での国際協力による核融合技術の確実な発展への貢献。他システムの研究者交流の活発化。人材育成、技術と人材の確保
- PHASE02（～2040）： ITER や原型炉（以降）の開発での国際協力による核融合技術のさらなる発展への貢献。他システムの研究者交流。人材育成、技術と人材の確保
- PHASE03（～2050）： ITER や原型炉（以降）の開発での国際協力による核融合技術の高度化によるエネルギー源としての技術確立への貢献。継続的・発展的な交流。人材育成、技術と人材の確保

## 2-2 核融合炉

### ⑧ 人材確保、人材育成、アウトリーチ活動

#### ニーズ

・産官学連携による原子力人材育成の取り組み。原子力人材育成ネットワーク戦略 RM の堅実な遂行や、Society 5.0 (AI 技術の発展) に向けた取り組み基礎科学と原子力の教育の在り方などが共通するニーズである。

・社会との連携活動として、核融合エネルギーが国民に選択され得るエネルギー源となるためには、社会との情報の共有と不断の対話が必須である。戦略的なアウトリーチ活動を進めていくことは重要である。今後は、日本全体を統括して社会連携活動を推進し、国民的理解を醸成することが必要である。

## 現状と課題と期待される成果

- ・国によりエネルギー源としての開発方針が早い段階で示されることにより、産業界の積極的参画を促すことが望まれる。

# ドラフト版にて取扱い注意

- 2035 年の建設を目標とした原型炉の建設予定箇所の検討は、現在の原子力安全技術レベルに留まらない高い安全性を示し、国民の信頼を得られなければ、核融合原型炉を立地する場所は日本にない」と認識が必要である。
- アウトリーチヘッドクォータを設置したところである。
- 核融合分野では人材確保、人材育成の点で TITAN、PHENIX 等の日米科学技術協力事業が大きな成果を挙げている。学生らが米国に滞在し、中性子照射材を用いた最先端の研究の従事により、魅力ある人材育成事業が実施されている。
- 放射線環境安全の技術基礎を支える研究者（トリチウムなどの放射性同位体に関する環境挙動分野など）が、核融合分野からほとんど支援を受けていないなど、体制的にも深刻な状況であり、長期的展望に立って人材と技術を育成する環境作りが必要である。また、ITER でのトリチウム取扱経験を我が国に持ち帰る若手技術者、研究者の育成も必要である。安全研究は原型炉の本格的な概念設計研究とは不可分であり、原型炉設計のコアとなる全日本体制を構築することが非常に重要である。
- 最近では我が国初の核融合ベンチャーが立ち上がるなど、実用化に向けて新たな局面を迎えている。民間投資による研究開発の推進とともに、人材確保、人材育成においても期待が高まりつつある。一方で、我が国の核融合分野への公的資金などのサポート体制については、現状、欧米と比べて予算、数ともに小規模であり、今後の展開が重要となる。

# ドラフト版にて取扱い注意

## 2.3 その他原子力システム

高温ガス炉(水素製造含む)、熔融塩炉、ADS

### 2-3 その他原子力システム（高温ガス炉(水素製造含む)）

優れた安全性と多目的利用に応える先進原子力システムの一つとして高温ガス炉がある。高温ガス炉では、750℃以上の熱供給が可能であり、発電だけではなく水素製造や製鉄等の産業プラント熱供給等に適用可能である。実用炉では燃料の高燃焼度化（100～160GWd/t）及びスリープレス燃料による高性能化を目指している。安全性向上と経済性を踏まえ、小型炉や長半減期核種の燃焼可能な炉等を含めた革新的な次世代炉やシステムの研究開発が求められている。

#### ① 高性能材料の研究開発（イノベーション材料など、研究基盤向上、優れた強度特性、高耐食性、など）

ニーズ：熱利用技術の実用化に向けた研究開発

PHASE01（～2030年）：熱化学法 IS プロセス機器の耐食性向上[1]

PHASE02（～2040年）：カーボンフリー水素製造設備と高温ガスの接続実証[2]

実用化スケールに必要な実証[2]

PHASE03（～2050年）：販路拡大・量産体制化でコスト低減[2]

現状と課題と期待される効果：

PHASE01（～2030年）：硫酸分解器のセラミックス設計方針の制定[1]

PHASE02（～2040年）：安全性・経済性・サプライチェーン構築・規制対応等[2]

PHASE03（～2050年）：天然ガス価格並み（約12円/Nm<sup>3</sup>）のコストを実現[2]

#### ② 高性能、高効率、安全なシステム設計など（環境への負荷低減、規格・基準、核特性、伝熱特性等を含む）

ニーズ：高温ガス炉技術の完成に向けた研究開発

PHASE01（～2030年）：

- 高温ガス炉黒鉛構造規格の民間規格化[1]
- 高温構造設計方針の民間規格化[1]
- 燃料高燃焼度化[1]
- 燃料要素の除熱性能向上[1]
- HTTRを活用した国際連携の推進[2]

PHASE02（～2040年）：カーボンフリー水素製造設備と高温ガス炉の接続実証[2]

# ドラフト版にて取扱い注意

PHASE03(～2050 年)：販路拡大・量産体制化でコスト低減[2]

現状と課題と期待される効果：

PHASE01(～2030 年)：

- 実用炉条件下での黒鉛特性評価・HTTR の供用期間中検査 の実施[1]
- ハステロイ XR のサーベイランス試験[1]
- 160GWd/t 照射試験[1]
- 高充填率化、スリーブレス一体型、160GWd/t 照射試験[1]
- 日本の規格基準普及に向けた他国関連機関との協力を推進[2]

PHASE02(～2040 年)：安全性・経済性・サプライチェーン構築・規制対応等[2]

PHASE03(～2050 年)：コスト低減、商用化

## ④ 国内外の照射施設（中性子、イオン、ガンマ線など）群、照射技術、廃炉材

高温ガス炉実用化における燃料の高燃焼度化等の対応の為、照射データの拡充・整備が求められている。また、燃料の健全性確認、照射特性の把握のため照射試験と照射後試験による各種物性（熱伝導度、照射寸法変化、FP 拡散係数）等のデータ取得が必要である。炉心寿命は JAEA の HTTR（高温工学試験研究炉）より延びることから黒鉛の照射下での健全性確認データが必要である。

## ⑦ 他分野連携協力、国際協力など

ニーズ： 技術実証に向けた活動や IAEA の場などを通じた高温ガス炉の安全設計基準の国際標準化に向けた取組み。

参考資料

[1] 高温ガス炉、水素製造について、出典：原子力科学技術委員会 高温ガス炉技術研究開発作業部会（第 5 回） 配付資料、

[https://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/072/shiryo/1351766.htm](https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/072/shiryo/1351766.htm)

[2] 2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略

<https://www.meti.go.jp/press/2020/12/20201225012/20201225012-2.pdf>

# ドラフト版にて取扱い注意

## 2-3 その他原子力システム（熔融塩炉）

熔融塩炉用材料の実機環境での材料腐食挙動予測、防食技術開発に向けて、熔融塩炉型において MSBR（フッ化物熔融塩燃料）について検討した。熔融塩炉用構造材として、耐食性に優れるハステロイの適用が有望であるが、燃料塩中に生成する FP である Te によるアタック腐食の抑制が課題となる。FP 以外にもフッ化物塩では酸素の生成やトリチウムの生成に伴う HF 生成による腐食についても留意する必要がある。これらには、UF<sub>3</sub>/UF<sub>4</sub> 比や MA/FP 変化によるポテンシャル調整が大きく寄与するため、照射下調整法の開発とその実証試験（炉内試験による共存性試験実証）が必要である。MA 燃焼や元素転換に特化した高速中性子型炉心用の塩化物熔融塩燃料においてはステンレス鋼の適用が検討されているが、フッ化物燃料と同様の課題があり、塩素からの硫黄の生成について考慮する必要がある。

### ① 高性能材料の研究開発（イノベーション材料など、研究基盤向上、優れた強度特性、高耐食性、など）

ニーズ：

- ウラン利用効率及び環境負荷低減性を高めた次世代原子力技術の高信頼性化
- 炉内腐食試験技術開発（封入型 or ループ）
- 炉外模擬試験技術開発
- 電気化学/分光光学的方法による UF<sub>3</sub>/UF<sub>4</sub> 比測定
- 照射環境における測定技術開発とその実証試験
- 燃料精整工程技術
- FP 回収、還元ポテンシャル調整

現状と課題と期待される効果：

- 国内外研究炉（Joyo, JMTR 後継炉、VTR、JHR、MBIR）の稼働
- 熔融塩分析技術、熔融塩フロントエンドバックエンドに関わる技術開発
- 試験装置の高度化・建設（Joyo、JMTR 後継炉、海外炉（VTR, JHR, MBIR）での炉内腐食試験装置等）
- 非原子力部門における高温熱流体技術の進展
- 核燃料再処理プロセス技術の進展
- 国内外研究炉の稼働（Joyo, JMTR 後継炉、VTR、JHR、MBIR）
- 熔融塩分析技術、熔融塩フロントエンドバックエンドに関わる技術

PHASE01（～2030）：加速器・イオン照射による代替照射

PHASE02（～2040）：モデリングによる照射損傷組織発達予測

PHASE03（～2050）：中性子照射下照射挙動の統合モデル化からの寿命予測

# ドラフト版にて取扱い注意

## ④ 国内外の照射施設（中性子、イオン、ガンマ線など）群、照射技術、廃炉材照射炉を用いた炉内試験（照射クリープ、炉内腐食試験含む）

### ● 炉内コンポーネント材（黒鉛）

照射による歪み、塩の耐浸透性や Xe の耐浸透性が課題である。IG-100 の照射特性については、仕様条件は  $25\text{--}30 \times 10^{22} \text{ nvt}$  ( $E > 50 \text{ keV}$ ) @  $600\text{--}700^\circ\text{C}$  であり、ガス冷却炉のデータを使用可能である。熔融塩及び希ガスの補足性の検討（ $< 1 \text{ mm}$  の気孔で成形）が必要であるが、等圧成形法による解消を期待。

### ● 構造材（Ni 基合金ハステロイ N or Ni 基合金 : フッ化物熔融塩用）

フッ化物熔融塩に対してはハステロイ-N（改良型）が候補材であり、スエリング、照射硬化に対しては MSBR 試験では良好である。

課題：Ni 基合金の問題点 → 高温ヘリウム脆化、Te 腐食による粒界割れ

課題：Nb 添加により改善 → 炉内試験によるデータ蓄積と長時間実証試験が必要

### ● 構造材（ステンレス鋼 : 塩化物熔融塩用）

塩化物熔融塩に対してはステンレス鋼が腐食の観点から有効である。

課題：高速炉条件とほぼ同じであることから、高温照射脆化やスエリングにおいては、高速炉構造材開発を参照して開発を進める必要があり、熔融塩炉構造材照射挙動は、高速炉・ガス炉の先行研究によるところが大きい。現在のところ、照射挙動よりも腐食挙動に課題があると考えられる。

## ⑦ 他分野連携協力、国際協力など

高温ガス炉や高速炉などの GEN-IV 炉の材料開発と共通するところが多いため、照射損傷に対する知識の共有により炉材料開発の効率化を図る。

# ドラフト版にて取扱い注意

## 2-3 その他原子力システム（ADS など）

### ①高性能材料の研究開発（イノベーション材料など、研究基盤向上、優れた強度特性、高耐食性、など）

ニーズ：ADS：原子力発電所の使用済み核燃料中には、毒性が高く長半減期のマイナーアクチノイド（MA）が含まれ、長期間にわたって安全に管理する必要がある。MA を効率よく短半減期の核種に核変換するシステムとして、加速器駆動システム（ADS）が提案されている。ADS は、高エネルギー陽子加速器と MA を装荷した未臨界炉心を組合せたシステムであり、安全性の高さと燃料組成の自由度の高さが特徴である。ADS 開発においては、高エネルギー陽子照射と鉛ビスマス（LBE）腐食環境で使用される材料の開発が重要である。

#### 現状と課題と期待される成果：

現在の ADS 開発の状況は、LBE 冷却型の実験炉 MYRRHA が EU の国際協力の下でベルギーに建設が進められ、2037 年から運転開始される予定である。MYRRHA の炉心には MOX 燃料が装荷され、未臨界時の熱出力 6.5～7.5 万 kW、臨界時の熱出力 10 万 kW である。MYRRHA は世界初の ADS として技術的な実証試験を行った後に、実験照射炉として利用される予定である。一方、国内では、日本原子力研究開発機構を中心として ADS の研究と開発が進められている。ADS 原型炉開発では、特に材料の照射損傷による耐久性評価が不可欠であるため、ADS での照射環境（温度、He/dpa と LBE 環境）を模擬した高エネルギー陽子加速器による核破砕中性子源型の照射試験施設の設計などが始められている。材料の主課題として、ビーム入射窓と被覆管材料の研究開発があり、それらの特性評価が進められている。実験炉 MYRRHA の構造材料は、オーステナイト・ステンレス鋼（15-15Ti 等）が採用される。フェライトマルテンサイト（F/M）鋼は液体金属脆化（LME）現象に未解明の部分が多いため、採用が見送られた。ADS 原型炉以降の構造材料は、高温での耐照射性と耐食性が求められる機器には F/M 鋼が選定されている。F/M 鋼は、照射脆化に対する Cr 濃度依存性から、8～9wt% ぐらいが最適であることから、T91 鋼（Fe-9Cr-1Mo）などが選定されている。低温部に用いられる機器には、SS316L 等のオーステナイト鋼が選定されている。LBE に対する耐食性に関しては、LBE 中の酸素濃度を適切に管理することで鋼材表面に酸化皮膜が形成され、ある程度抑制されることが分かっている。また、Cr 濃度が高い方が耐食性が良いとされている。鋼材表面の酸化皮膜は条件によっては厚さ数 10  $\mu\text{m}$  程度に成長する。この皮膜における LBE の流れや熱サイクルに対する耐久性や耐照射性が課題である。また、流れ加速腐食（FAC）に関しても見解はほとんど無い。耐照射性は ADS 条件に相当する温度と高 He/dpa 比の照射データは限られており、未知の部分が多い。液体金属脆化（LME）の発生の条件と照射の影響に関しては、ほとんど分かっていない。

ADS 原型炉における高性能な材料のニーズとして次の項目が挙げられる。

- （1）先進ビーム入射窓材料 1 年交換、使用条件は最大 83 dpa、1,250 appm/He、9,000

# ドラフト版にて取扱い注意

appm/H、LBE 流速は 2.0m/s の衝突流である。

(2) 高性能被覆管材料 2 年交換、使用条件は最大 111 dpa、42 appm/He、690 appm/H、LBE 流速は 2.0m/s の平行流である。

この環境で使用可能な材料の開発が求められている。

耐食性に関しては、酸化物皮膜の耐照射性、熱サイクルに対する耐久性は未知であり、FAC に関するデータ知見はわずかである。耐食性に優れ、薄く緻密な酸化物皮膜を形成する合金として、ロシアなどが開発したシリコン含有合金や、アルミを含み表面にアルミナを形成する合金が有力視されている。アルミ合金等によるコーティング技術も各国で開発されている。いずれも耐照射性、高温、高 He/dpa の照射データは十分でない。シリコンやアルミを含む合金は一般に耐照射性が悪いとされている。また、LME に対する照射の影響は未知である。酸化物分散強化 (ODS) 鋼の中性子に対する耐照射性は優れているが、陽子照射データはほとんど無い。ビーム窓や燃料被覆管製作に求められる加工性、溶接性などは今後の開発が必要である。耐食性に関しては、静的腐食試験のデータから良いとされている。耐食性に優れ、熱サイクル、FAC にも強い、薄く緻密な酸化皮膜を形成する材料またはコーティングの開発が必要である。耐照射性に優れた微細組織を持つ材料として ODS 鋼が有力であり、LBE との共存性も含めてさらなる開発が求められる。

## 現状と課題と期待される成果：

LBE 中試験技術の開発は LME の評価に不可欠であり、幾つかのコールド試験装置は稼働している。照射材用の LBE 中試験技術は、現在のところ国内にはなく、海外との協力のもと進めている。

PHASE01 (～2030)：イノベーティブな材料の開拓と製造技術

PHASE02 (～2040)：イノベーティブな材料製造技術や評価・解析手法の高度化

PHASE03 (～2050)：イノベーティブな構造材料・機能材料の採用など

## ④国内外の照射施設（中性子、イオン、ガンマ線など）群、照射技術、廃炉材ニーズ：

・ADS 原型炉以降の構造材料用の陽子照射試験のデータの取得については、2000 年頃から PSI を中心に、STIP、MEGAPIE などの国際協力による加速器照射試験を利用して評価が進められている。特に 2006 年に実施した MEGAPIE 試験による特性評価の役割は大きい。基礎的な損傷過程についてはイオン照射や電子線照射などによっても解析が進められている。複数のイオン加速器などを用いて、2 重、3 重同時照射などによる弾き出し損傷による微細組織や強度特性の影響が調べられている。その結果、照射損傷組織の発達具合が He/dpa に依存することが明らかにされた。これらをさらに詳細に正確な評価を行っていく重要性が広く認識されているところである。また、LBE 中照射による LME や酸化皮膜の形成への影響も



# ドラフト版にて取扱い注意

明らかにする必要がある。このため、J-PARC では 400 MeV の高エネルギー陽子加速器と LBE ターゲットを組み合わせた 250 kW の照射施設の設計が進められてきた。ADS 条件を模擬出来る照射場として、J-PARC の高エネルギー陽子照射施設の建設が望まれる。

関連する放射線場は、産業・医療・学術等に貢献できる事が期待されている。

## 現状と課題と期待される成果：

PHASE01： 2.1 と同様。関連する放射線場の利用や活用による産業・医療・学術等への貢献

PHASE02： //

PHASE03： //

## ⑤ PIE 施設群・分析装置群

### ニーズ：

JAEA や、国内の大学などの研究施設、および照射試験に関わる海外ホットラボなどが主に活用されている。JAEA の PIE 施設群は約 10 年～20 年後には解体される予定であり、代替の PIE 施設が必要である。高性能な分析機器類や試験装置類の更新や高度化が必要な状況であるとともに、マンパワーや技術継承や向上に向けた課題が挙げられる。さらに LBE 中試験に対応した試験機、分析機器の整備が必要である。J-PARC の照射施設に附属して加速器材料の PIE を行う照射後試験施設が検討されている。

## 現状と課題と期待される成果：

このような施設群や分析装置群の構築を実現するために、加速器照射材に対応した施設的设计。また、AI を活用した PIE の高度化、効率化。

PHASE01： 2.1 と同様。新技術、分析技術、検査技術の開発、計算科学・AI・Database などにより、R&D サイクル効率化と材料科学技術の向上をもたらす。

PHASE02： //

PHASE03： //

## ⑦ 他分野連携協力、国際協力など

ニーズ： 加速器駆動システム(ADS)によるマイナーアクチニド(MA)の核変換技術に関して、米国、ベルギーなどとの協力。高レベル放射性廃棄物処分の研究開発に関しては欧州諸国やカナダ等、当該処分に関する地下研究施設を有する国等との間で研究協力 など

・実験炉 MYRRHA と ADS 原型炉について

# ドラフト版にて取扱い注意

ベルギーの原子炉の建設基準に基づき、EU の協力の下で設計と建設が進められている。Phase 1 は 2016 年から 2026 年で、イオン源と 100 MeV の加速器を建設中である。Phase 2 は 2027 年から 2030 年で、600 MeV の加速器を建設予定である。Phase 3 は 2027 年から 2036 年で、炉心部を建設予定で 2037 年から運転開始される予定である。その後、ADS として技術的な実証試験を行った後に、照射炉として利用される予定である。この施設では、遠隔保守性など、原型炉開発のための様々なテストモジュールによる試験が準備されている。

ADS 原型炉に関しては、2030 年頃までに概念設計、2035 年頃までに基本設計を構築した後に、2040 年までに詳細設計と許認可が実施される。2040 年から建設開始、2045 年から運転を開始する計画である。これらの設計や許認可には、これから取得予定の材料特性等のデータが必要になる。ADS 原型炉の早期実現化のために、J-PARC 陽子照射施設の建設と、この施設における照射試験計画立案、データ取得が重要である。これにより LBE 中照射による影響（酸化皮膜の形成、成長、LME）などを明らかにし、新材料の開発に役立てることが出来る。

# ドラフト版にて取扱い注意

## テーマ 3：1F 廃炉対応および廃止措置活用

### 3-1 1F の事故進展の詳細把握と廃炉作業効率化

- ① 高性能材料の研究開発（イノベーション材料など、研究基盤向上、優れた強度特性、高耐食性、など）

#### ニーズ：

- ・ PCV・RPV ペデスタル等の主要機器と原子炉建屋に関して、各種廃炉作業における健全性の評価
- ・ 放射線場かつ海水成分含有水中での構造材腐食挙動の理解
- PHASE01（～2030）：使用済燃料取出、燃料デブリ小規模取出時における主要機器と原子炉建屋の健全性診断技術
- PHASE02（～2040）：燃料デブリ取出時における主要機器と原子炉建屋の健全性診断技術
- PHASE03（～2050）：同技術の改良

#### 現状と課題と期待される成果：

- ・ PCV・RPV ペデスタル等の主要機器と原子炉建屋に関して。事故後、東電の検討や廃炉・汚染水対策事業において、構造健全性等の評価が進められた。その結果、主要機器と原子炉建屋等が一定の耐震裕度を有していること確認されている。
- ・ 今後は、既設の主要機器と原子炉建屋等、及び、使用済燃料と燃料デブリ取出のために今後新設される機器、設備と建屋が、要求機能を満足し、比較的長期にわたる燃料デブリ取出にいて、①作業を安全に実施できること、②地震と津波をはじめとする外部事象に対して所要の安全性を確保できることが必要である。
- PHASE01（～2030）：既設の主要機器と原子炉建屋等、及び、使用済燃料と燃料デブリ取出のために今後新設される機器、設備と建屋の健全性確保
- PHASE02（～2040）：既設の主要機器と原子炉建屋等、及び、燃料デブリ取出のために新設された機器、設備と建屋の健全性確保
- PHASE03（～2050）：同上

### 3-1 1F の事故進展の詳細把握と廃炉作業効率化

- ② 高性能、高効率、安全なシステム設計等（環境への負荷低減、規格・基準、核特性、伝熱特性等を含む）

# ドラフト版にて取扱い注意

## ニーズ：

- ・ 東京電力（株）福島第一原子力発電所の廃止措置等研究開発の加速プラン（平成26年6月 MEXT）
  - ・ 燃料デブリ取出時の臨界管理技術の1つである中性子吸収材ほか炉内導入剤による臨界防止管理技術（燃料デブリ取出：2号機、2021年から開始）、
  - ・ 使用済み燃料の取出（3号機は2020年度中完了、2号機は2024～2026年度、1号機は2027～2028年度、5、6号機は1から3の進捗状況を見て着手。2031年度までにすべて完了）
  - ・ 処理・処分に関する技術的な見通し（2021年度頃）
  - ・ 汚染水対策（○汚染水発生量を150 m<sup>3</sup>/日程度に（2020年度）、100m<sup>3</sup>/日以下に（2025年度）、○原子炉建屋内の滞留水（2020年度末）を、2022年度～2024年度に半分程度に）
- **PHASE01（～2030）**：燃料デブリ取出施設の安全システム設計（放射線安全、臨界管理）に必要な燃料デブリ加工時の粉末飛散挙動予測試験（模擬燃料デブリ使用）、前処理を必要としない燃料デブリ中のU/Pu分析技術
- **PHASE02（～2040）**：燃料デブリ取出施設の安全システム設計（放射線安全、臨界管理）に必要な燃料デブリ加工時の飛散挙動確認試験、燃料デブリ加工工具の選定に必要な燃料デブリの強度試験
- **PHASE03（～2050）**：安全システムや取出工法の改良に必要な燃料デブリを用いた各種試験

## 現状と課題と期待される成果：

- ・ MEXT テーマとしてH26年度から「戦略的原子力共同研究プログラム」、「廃炉加速化研究プログラム」および「廃止措置研究・人材育成等強化プログラム」が推進。→ プログラムの実施主体 JAEA に移行：「共通基盤型原子力研究プログラム」、「課題解決型廃炉研究プログラム」「国際協力型廃炉研究プログラム」「研究人材育成型廃炉研究プログラム（平成31年度より新設）」に再編
- ・ 臨界防止のための中性子吸収材候補の特性評価はほぼ完了。デブリ取出工法の中で、デブリや中性子吸収材の保持を目的とした炉内導入剤は検討継続中（固体：B4C 金属焼結材、B・Gd 入りガラス、Gd203 粒子、固体化：水ガラス/Gd203 造粒粉材、粘性体：調査・検討中）。汚染水については、多核種を取り除く処理（トリチウム除く）を行い、保管量が多量に。

# ドラフト版にて取扱い注意

- PHASE01（～2030）：模擬燃料デブリを用いた燃料デブリ加工時の粉末飛散データを活用した燃料デブリ取扱施設（仕分け/一時保管、分析）の安全システム設計、前処理を必要としないU/Pu分析技術による燃料デブリ仕分けの効率化
- PHASE02（～2040）：安全システムや取出工法の改良
- PHASE03（～2050）：安全システムや取出工法の改良

## 3-1 1Fの事故進展の詳細把握と廃炉作業効率化

### ③ 評価・解析手法（計算科学、データベース、試験片サイズ効果など含む）

ニーズ：

- ・ 燃料デブリの詳細分析データ（組成、結晶構造、等）を取得し、その生成過程を明らかにすることによるシビアアクシデント解析コードの精度向上
- PHASE01（～2030）：燃料デブリの各種分析試験、生成過程をモデル化するのに必要な各種反応試験（反応エネルギー等の取得）
- PHASE02（～2040）：同上
- PHASE03（～2050）：同上

現状と課題と期待される成果：

- ・ 大規模原子炉シミュレーションのリアルタイム可視化技術の開発(2020年8月)。模擬実験の環境模擬のパラメータ設定（スケール含む）の限界の考察とその影響、実験結果の妥当性の評価では、シミュレーションとの対比と予測性を高める必要性がある。実機での損傷観察や放射線計測データなどから、何をどの程度、実証できるか。
- ・ 炉外に存在する放出粒子の分析、炉内の物質のサンプリング等のデータ収集から、事故で発生した事象をどこまで正しく評価できるか？
- PHASE01（～2030）：燃料デブリ分析データ等を用いたシビアアクシデント解析コードの改良
- PHASE02（～2040）：採取位置を特定した燃料デブリ分析データによるシビアアクシデント解析コードによる予測結果の検証、シビアアクシデント解析コードによる炉内の放射性物質分布予測を用いた燃料デブリ取出計画の最適化
- PHASE03（～2050）：同上

## 3-1 1Fの事故進展の詳細把握と廃炉作業効率化

# ドラフト版にて取扱い注意

## ④国内外の照射施設（中性子、イオン、ガンマ線など）群、照射技術、廃炉材

ニーズ：

- ・ 放射線場での腐食評価・水素発生影響評価
- PHASE01（～2030）：燃料デブリの経年劣化に対する放射線影響確認試験
- PHASE02（～2040）：放射線影響が確認された場合の影響緩和試験
- PHASE03（～2050）：同上

現状と課題と期待される成果：

- ・ 1F 特殊環境下の腐食データを収集・整理するため、「全浸漬」「半浸漬」「気相（浸漬あり）」「気相」「気相（液滴落下）」の5つの環境下で、 $\gamma$ 線照射・非照射時の腐食速度の測定結果では、半浸漬や液滴落下の条件で腐食速度が加速、半浸漬や液滴落下の場合は鋼表面に薄い水膜が存在するため、 $\gamma$ 線照射時は特に腐食速度が加速。穴あきの基準設定作りが課題の1つ。
- PHASE01（～2030）：燃料デブリの経年劣化に対する放射線影響把握
- PHASE02（～2040）：放射線影響が確認された場合の影響緩和技術確立
- PHASE03（～2050）：同上

### 3-1 1Fの事故進展の詳細把握と廃炉作業効率化

## ④ PIE 施設群・分析装置群

ニーズ：

- ・ 1F 廃炉作業を安全かつ着実に進捗させるための廃棄物や燃料デブリの取扱いに要する施設や機能の構築・整備
- ・ 燃料デブリの管理（臨界、計量管理）や廃棄物の分別に必要な高線量下での組成分析技術
- PHASE01（～2030）：燃料デブリ取扱施設（仕分け/一時保管、分析）の建設・整備、燃料デブリの管理（臨界、計量管理）や廃棄物の分別に必要な高線量下での分析技術
- PHASE02（～2040）：分析技術の改良
- PHASE03（～2050）：同上

現状と課題と期待される成果：

# ドラフト版にて取扱い注意

- ・ 現在、1F 内の施設を活用して、施設運営や廃炉作業の進捗に必要な分析を実施するとともに各種廃棄物の分析では JAEA 茨城地区の分析施設や民間分析施設が活用されている。また、1F 廃炉に必須な分析・研究施設が JAEA によって整備が進められている。
  - ・ 分析データを効率的に収集・評価できる分析体制、分析施設や分析装置群を構築・整備する必要がある。
  - ・ 廃炉の進捗に沿って求められる分析の中身、室、量等が変化していくことを考慮した拡張性や運用の柔軟性を持つ分析施設群の構築（燃料デブリ取出が本格化する 2030 年度までに）
  - ・ 多様な廃棄物の処理・処分方策の検討並びに燃料デブリの取出工法、保管管理、処理処分、事故原因究明等に資する分析データの確実な取得
- PHASE01（～2030）：JAEA 大熊分析センター第 2 棟の運営開始、茨城地区の分析施設も含めた燃料デブリの分析データ取得
  - PHASE02（～2040）：燃料デブリ取出作業を安全かつ着実にサポートする燃料デブリ取扱施設の運営
  - PHASE03（～2050）：同上

## 3-1 1F の事故進展の詳細把握と廃炉作業効率化

### ⑤ 新技術・AI 活用（材料や機器の製造、溶接、検査、製造規格など）

ニーズ：

- ・ PCV から取り出された物質を燃料デブリとして扱うか放射性廃棄物として扱うかを適切に判断するための仕分け基準と必要な計測技術・装置の開発

現状と課題と期待される成果：

- ・ 多様な廃棄物の処理・処分方策の検討並びに燃料デブリの取出工法、保管管理、処理処分、事故原因究明等に資する分析データの確実な取得
- ・ 1. 具体的な検討はなされていない。廃炉以外の分野で技術確立、廃炉への適用技術の検討が必要。
- ・ 2. 放射線量が高い環境においてコンプトンカメラの信号処理能力が課題。遮蔽などを施して適用予定。接近距離や遮蔽重量は制限ある。新しい計測器や処理能力の向上などによる進展が期待される。

# ドラフト版にて取扱い注意

## 3-1 1F の事故進展の詳細把握と廃炉作業効率化

### ⑥ 他分野連携協力、国際協力など

#### ニーズ：

- ・ 国外の核関連施設の廃止措置情報の 1F 廃炉作業への利活用
- PHASE01（～2030）：デブリ取り出し（2 号機、2021 年から開始）から処分に至るまで、システム設計を中心として多くの分野での連携が必要
- PHASE02（～2040）：大量デブリ取り出し開始
- PHASE03（～2050）：廃止措置完了

#### 現状と課題と期待される成果：

- ・ H27 年度より「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」開始。H29 年度より「CLADS」の中核拠点である「国際共同研究棟」の運用。廃炉事業では、関連分野の連携を意図して推進が図られるようになった。材料技術を完成するのに時間を要することが多いので、効率的に技術開発が推進できるようリードタイムを考慮した連携が必要。
- ・ 国外の情報を利活用した 1F 廃炉作業の加速
- PHASE01（～2030）：国外の情報を利活用した 1F 廃炉作業の推進
- PHASE02（～2040）：同上
- PHASE03（～2050）：同上

## 3-1 1F の事故進展の詳細把握と廃炉作業効率化

### ⑦ 人材確保、人材育成、アウトリーチ活動

#### ニーズ：

- ・ 燃料デブリ取扱施設における放射性物質取扱（ホットセルでの遠隔操作も含む）技術者の育成
- ・ 分析施設群を安定的に稼働するために必要な人的資源の確保
- PHASE01（～2030）：燃料デブリ取扱施設における放射性物質取扱（ホットセルでの遠隔操作も含む）技術者の育成
- PHASE02（～2040）：人材育成の継続
- PHASE03（～2050）：同上



# ドラフト版にて取扱い注意

## 現状と課題と期待される成果：

- ・ 分析施設群を安定的に稼働するために必要な人的資源の不足
  - ・ 予め分析結果の活用方法を見越した分析範囲や項目等を立案できる分析評価者が希少
  - ・ 種々の分析業務に対して分析技術者に期待される資質をあらかじめ考慮し、求められる役割が適切に養成される人材育成計画の立案
  - ・ 「廃止措置研究・人材育成等強化プログラム」が推進中
  - ・ 従来の原子力従事者が対応。後ろ向きな事業ととらえられがちであり、将来的に優秀な人財を確保することを危惧。一過性ではなく他分野に展開可能な技術開発。
- 
- PHASE01（～2030）：JAEA 大熊分析センター第2棟や茨城地区の分析施設における燃料デブリの各種分析試験の着実な遂行
  - PHASE02（～2040）：燃料デブリ取出作業を安全かつ着実にサポートする燃料デブリ分析データの取得
  - PHASE03（～2050）：同上

# ドラフト版にて取扱い注意

## テーマ3：1F 廃炉対応および廃止措置活用

### 3-2 1F 事故知見活用及び廃止措置プラント活用

#### ① 高性能材料の研究開発（イノベーション材料など、研究基盤向上、優れた強度特性、高耐食性、など）

##### ニーズ：

- ・ 1F 事故の経験を教訓に、高温水や水蒸気による酸化が起こりにくく、炉心温度の上昇や水素発生を遅らせること、また、これにより、事故対応の実施や炉心溶融の回避が可能な、燃料や炉心構成材料の早期の実機導入による現行軽水炉の安全性向上
- **PHASE01（～2030）**：製造技術の確立（試験片、端栓接合、長尺被覆管、燃料棒、燃料集合体）、現行炉への適用性評価を行うための各種データ整備（各種材料試験、輸送、貯蔵、再処理技術の開発）、材料及び模擬燃料棒の実験炉等での照射試験、検査技術の確立、ふるまい解析コードの改良及び検証
- **PHASE02（～2040）**：製造技術の確立（長尺被覆管、燃料棒、燃料集合体）、現行炉への適用性評価を行うための各種データ整備（各種材料試験、輸送、貯蔵、再処理技術の開発）、材料及び模擬燃料棒の実験炉等での照射試験、検査技術の確立、ふるまい解析コードの改良及び検証、規格・基準の策定、集合体の設計及び確証試験、商用炉照射（LTR/LTA）
- **PHASE03（～2050）**：ふるまい解析コードの改良及び検証、規格・基準の策定、集合体の設計及び確証試験、商用炉照射（LTR/LTA）、量産技術の確立・整備、許認可取得、商用炉照射（LUA）

##### 現状と課題と期待される成果：

- ・ 従来ジルカロイと比べて高温水や水蒸気による酸化反応の発熱量や、事故初期における水素発生量が低い候補材として、SiC/SiC 複合材料、FeCrAl-ODS 合金が検討されている。また、近年では、事故初期における水蒸気酸化反応及び水素発生量を抑制可能なクロムコーティッドジルカロイも検討され始めている。
- ・ 実用化（既存軽水炉への実装）においては、現行システム（UO<sub>2</sub>-ジルコニウム合金系）に比べて、通常時の性能を維持もしくは向上できることが前提とされており、経済性を含めた発電システムとしての成立性評価が課題とされている。また、現行炉への適用性評価を行うための照射試験データの整備について、照射試験を行う場所、機会等に大きな課題がある。
- ・ 現行軽水炉への早期導入による安全性の向上が期待される。

# ドラフト版にて取扱い注意

- PHASE01（～2030）：2015年から2018年の4カ年においては、経済産業省の受託事業（タイトル：「安全性向上に資する新型燃料の既存軽水炉への導入に向けた技術基盤整備」）が実施され、製造技術の確立（試験片、端栓接合）、現行炉への適用性評価を行うための各種データ整備（各種材料試験）、材料の実験炉等での照射試験等が実施されてきている。2019年度以降においても、燃料メーカーやプラントメーカー等において、要素技術開発が継続されており、海外実験炉を用いた材料照射、あるいは模擬燃料棒照射試験の実施に向けた準備が進められている。
- PHASE02（～2040）：ニーズに記載されている項目の早期完了が期待されている。
- PHASE03（～2050）：ニーズに記載されている項目の早期完了が期待されている。

## 3-2 1F 事故知見活用及び廃止措置プラント活用

### ② 高性能、高効率、安全なシステム設計等（環境への負荷低減、規格・基準、核特性、伝熱特性等を含む）

#### ニーズ：

- ・ 現行の軽水炉システムで用いられているジルカロイと比べて、高温水や水蒸気による酸化反応の発熱量、及び事故初期における水素発生量が低い SiC/SiC 複合材料や FeCrAl-ODS 合金、あるいは事故初期における水蒸気酸化反応及び水素発生量を抑制可能な、クロムコーティッドジルカロイ等の具体的な候補材について、現行軽水炉炉心への適用性評価と、それに基づく（現行軽水炉炉心への適用性が低い候補材料に対する）高性能、高効率、高い安全性を追求した新たな軽水炉発電システムの提案
- ・ 廃止措置プラント材料、機器の廃却材の調査による実機劣化状態の把握と現行評価手法・対策技術の検証の知見を「高経年化対策（現行劣化予測手法、対策・検査技術の高度化、等）」、「評価法の高度化（長期信頼性評価手法の開発、劣化メカニズムの解明、等）」、「保全技術高度化（新たな劣化対策技術などの開発、等）」へ活用
- ・
- PHASE01（～2030）：現行炉への適用性評価を行うための各種データ整備（各種材料試験、輸送、貯蔵、再処理技術の開発）、材料及び模擬燃料棒の実験炉等での照射試験
- PHASE02（～2040）：現行炉への適用性評価を行うための各種データ整備（各種材料試験、輸送、貯蔵、再処理技術の開発）、材料及び模擬燃料棒の実験炉等での照射試験、規格・基準の策定、集合体の設計及び確証試験、商用炉照射（LTR/LTA）
- PHASE03（～2050）：規格・基準の策定、集合体の設計及び確証試験、商用炉照射（LTR/LTA）、許認可取得、商用炉照射（LUA）

#### 現状と課題と期待される成果：

# ドラフト版にて取扱い注意

- ・ 候補材料ごとに、現行軽水炉炉心への適用性評価は基本的に実施済みの状態にある（一部候補材については、次世代軽水炉炉心への適用性評価も完了）。現行軽水炉炉心への適用性が低い候補材料に対しては、高性能・高効率・高い安全性を追求した新たな軽水炉発電システムの提案に向けた各種検討が鋭意行われている。
  - ・ 2020 年秋の学会での企画セッションで廃止措置プラント材料を使用した解析結果が紹介されるなど
- **PHASE01（～2030）**：2015 年から 2018 年の 4 カ年においては、経済産業省の受託事業（タイトル：「安全性向上に資する新型燃料の既存軽水炉への導入に向けた技術基盤整備」）が実施され、現行炉への適用性評価を行うための各種データ整備（各種材料試験）、材料の実験炉等での照射試験等が実施されてきている。2019 年度以降においても、燃料メーカーやプラントメーカー等において、要素技術開発が継続されており、海外実験炉を用いた材料照射、あるいは模擬燃料棒照射試験の実施に向けた準備が進められている。
- **PHASE02（～2040）**：ニーズに記載されている項目の早期完了が期待されている。
- **PHASE03（～2050）**：ニーズに記載されている項目の早期完了が期待されている。

## 3-2 1F 事故知見活用及び廃止措置プラント活用

### ③ 評価・解析手法（計算科学、データベース、試験片サイズ効果など含む）

#### ニーズ：

- ・ 事故耐性燃料（ATF）として研究開発が進められている具体的な候補材について、早期実用化に資するための現行軽水炉用に整備されている解析・評価コード等の改良（現行軽水炉燃料では考慮されていない各種モデルの追加や物性値の変更等）、及び照射試験を含めた実験等による、改良した解析・評価コード等の妥当性の検証
- ・ シビアアクシデント（SA）解析コードを用いた各 ATF 候補材の有効性の確認（具体的に ATF 導入効果が期待できる事故シナリオの導出とアクシデントマネジメントと合わせた過酷事故回避のシナリオ条件範囲の提示）
- ・ 設計基準を超える事故（BDBA）で想定される環境下での ATF のふるまいに係る、新たな実験を含めた評価・解析手法の提案（確立）
- ・ 事故解析モデルを用いた炉内汚染状況推定による廃炉工法の策定
- ・ 照射劣化メカニズム解析の高度化に必要な試験とデータ拡充。加速照射された材料で実機評価が行われているので、実機（廃炉材）からのサンプリングによる評価データの拡充が重要。燃料材料のキャビティ形成と成長の解析評価の高度化

# ドラフト版にて取扱い注意

- PHASE01（～2030）：現行炉への適用性評価を行うための各種データ整備（各種材料試験、輸送、貯蔵、再処理技術の開発）、ふるまい解析コードの改良及び検証
- PHASE02（～2040）：現行炉への適用性評価を行うための各種データ整備（各種材料試験、輸送、貯蔵、再処理技術の開発）、材料及び模擬燃料棒の実験炉等での照射試験、ふるまい解析コードの改良及び検証
- PHASE03（～2050）：ふるまい解析コードの改良及び検証、商用炉照射（LTR/LTA）

## 現状と課題と期待される成果：

- ・ 事故耐性燃料（ATF）として研究開発が進められている具体的な候補材の一部について、日本原子力研究開発機構が開発した燃料ふるまい解析コードで共通基盤技術に位置付けられる FEMAXI の改良が行われている。今後、照射試験を通じて改良した FEMAXI の妥当性の検証が課題である。また、EPRI が開発した SA 解析コードの MAAP に関しては、既に ATF モジュールが搭載されている状況にあるが、妥当性検証までが行われたかどうかは定かではない。
  - ・ 上記の MAAP コード、あるいは MELCOR コードを用いた ATF 候補材料の有効性の概略評価は、既出の経済産業省の受託事業（2015-2018 年）等で実施済みである。
  - ・ BDBA で想定される環境下を模擬した実験を行うために、最高温度 2000℃までの範囲で急速昇温が可能な試験装置を整備して、各 ATF 候補材料のデータ取得等も行っている。
  - ・ 燃料デブリの分析データを用いた事故解析モデルの改良
  - ・ 照射試験データが蓄積されつつあり、材料設計等に反映されている。実規模の長尺材での評価など継続して評価が必要。
- 
- PHASE01（～2030）：ATF 候補材の一部に対して、燃料ふるまいの共通解析コードである FEMAXI の改良や、SA 解析コードの MAAP、MELCOR を用いた一部の ATF 候補材に対する有効性確認を完了している。また、過酷事故時に想定される環境下での被覆管のふるまいに関する知見獲得のために、試験装置を整備し、有用な基礎データを取得・提示してきている。
  - PHASE02（～2040）：ニーズに記載されている項目の早期完了が期待されている。
  - PHASE03（～2050）：ニーズに記載されている項目の早期完了が期待されている。

## 3-2 1F 事故知見活用及び廃止措置プラント活用

- ④ 国内外の照射施設（中性子、イオン、ガンマ線など）群、照射技術、廃炉材

# ドラフト版にて取扱い注意

## ニーズ：

- ・ ATF の早期実用化に資する実機模擬環境条件での照射試験データの取得・拡充のため、照射試験炉の長期的かつ安定的な利用機会の確保が必要。海外照射試験炉の利用機会が限定的な場合に備えた、代替照射試験技術としての加速器によるイオン照射試験技術の高度化が必要。（例えば、イオン照射による統合照射試験技術の確立等）
  - ・ 反応度事故（RIA）等の設計基準事故（DBA）条件での照射試験データの取得に係る、現有の知識、経験、技術等の維持・向上が必要。
  - ・ 事故耐性燃料材料の開発とその耐熱性試験、耐照射性試験及びそれらの解析評価
- 
- PHASE01（～2030）：材料及び模擬燃料棒の実験炉等での照射試験
  - PHASE02（～2040）：材料及び模擬燃料棒の実験炉等での照射試験、商用炉照射（LTR/LTA）
  - PHASE03（～2050）：商用炉照射（LTR/LTA）、商用炉照射（LUA）

## 現状と課題と期待される成果：

- ・ 既出の経済産業省の受託事業（2015-2018 年）の中で一部の ATF 候補材については、米国の HFIR（High Flux Isotope Reactor）を用いた材料照射試験が完了し、照射後試験も一部が実施されている。
  - ・ 国内の JMTR の廃炉、海外炉の中でも特にマルチな照射技術を保有していたハルデン炉の高経年化に伴う突然の廃炉決定、他の海外試験研究炉も同様に高経年化が進む中、軽水炉環境を模擬した試験が実施可能な海外試験炉の長期的かつ安定的な利用機会の確保は極めて困難な状況であり、それが課題である。
  - ・ 従来ジルカロイと比べて高温強度を意識した候補材を検討と開発が進められている。高温強度データが十分とはいえず、データ拡充、及び国内外での試験炉や照射試験施設でのデータ取得と解析評価が必要。
  - ・ 国内の事故耐性燃料開発を推進するためには、国内に照射試験炉と照射後試験施設を整備することは急務である。これらを推進することにより、日本発の事故耐性燃料を開発することができる。
- 
- PHASE01（～2030）：一部の ATF 候補材について海外炉での材料照射試験が完了し、照射後試験を実施中である。他の ATF 候補材の海外炉での材料照射試験、あるいは燃料棒照射試験が検討されている。
  - PHASE02（～2040）：ニーズに記載されている項目の早期完了が期待されている。
  - PHASE03（～2050）：ニーズに記載されている項目の早期完了が期待されている。

# ドラフト版にて取扱い注意

## 3-2 1F 事故知見活用及び廃止措置プラント活用

### ⑤ PIE 施設群・分析装置群

ニーズ：

- ・ ATF の早期実用化に資する実機模擬環境条件での照射試験データの取得・拡充、及び照射試験や照射後試験に係る知識や経験、技術等の継承のため、海外試験炉等で照射された材料の（場合によっては模擬燃料棒も）国内輸送、照射後試験実施に備えた施設群や装置群の整備が必要。
- ・ 事故耐性燃料用材料の①事故時模擬高温特性試験、②機械的特性試験方法
- PHASE01（～2030）：試験片加工装置、機械特性試験装置、組織観察装置、分析試験装置等の主要な照射後試験機器のうち、機能低下した機器の更新
- PHASE02（～2040）：同上
- PHASE03（～2050）：同上

現状と課題と期待される成果：

- ・ 国立研究機関の照射後試験施設については、施設の維持管理に多額の費用が掛かるため、照射後試験装置等の更新は行えていない状況にあり、現有の装置の殆どがかなり高経年化している。
- ・ ATF 開発に絡めた新たな試験装置の導入に向けて、必要十分な額の経費確保が課題。
- ・ 新たな試験装置の導入による、実機模擬環境条件での照射試験データの取得・拡充、及び照射試験や照射後試験に係る知識や経験、技術等の継承が期待される。
- ・ 高温での優位性を示すため、試験評価が進められている。特殊な試験装置が必要。
- ・ 規格・基準策定に、検討が進められている。SiC などセラミックス材料の試験方法の整備が必要。
- ・ 照射済み燃料の評価試験技術はほぼ確立されているが、大震災以降、国内の新型燃料開発は停滞しており、PIE 施設やそれらの技術の維持が課題
- PHASE01（～2030）：試験片加工装置、機械特性試験装置、組織観察装置、分析試験装置等の主要な照射後試験機器のうち、機能低下した機器の更新
- PHASE02（～2040）：同上
- PHASE03（～2050）：同上

## 3-2 1F 事故知見活用及び廃止措置プラント活用

### ⑥ 新技術・AI 活用（材料や機器の製造、溶接、検査、製造規格など）

# ドラフト版にて取扱い注意

ニーズ：

- ・ 事故耐性燃料の長尺化、接合および検査

現状と課題と期待される成果：

- ・ 従来ジルカロイと比べて難度が高いが、着実に検討を推進。未解決な候補材に対して、一層の検討が必要。

## 3-2 1F 事故知見活用及び廃止措置プラント活用

### ⑦ 他分野連携協力、国際協力など

ニーズ：

- ・ 新規燃料材料導入による開発促進と副次的影響の評価。本学会の多数の部会との連携強化、材料や機器製造メーカーとの協業、他協会との連携が必要
- ・ 国際機関（IAEA、OECD/NEA）における ATF 開発に係る国際協力フレームワーク等への参画や ATF 開発で先行する欧米（特に米国）との二国間協力協定の活用、等による ATF 実用化研究開発の加速

- **PHASE01（～2030）**：OECD/NEA における専門家会合（EGATFL：2014-2018）、IAEA における ATF に関する活動（CRP ACTOF：2015-2019、ATF-TS：2020-2024）、日米民生用原子力研究開発ワーキンググループ（CNWG）での ATF 研究開発（Phase I：2014-2016、Phase II：2018-2023）
- **PHASE02（～2040）**：現状は未定だが、必要に応じて積極的に参画
- **PHASE03（～2050）**：現状は未定だが、必要に応じて積極的に参画

現状と課題と期待される成果：

- ・ 新型燃料開発に向けて炉心安全および燃料システムとは比較的連携が取れている。一方で、水化学など副次的影響の評価について、今後連携強化が必要。
  - ・ 国際機関（IAEA、OECD/NEA）における ATF 開発に係る国際協力フレームワーク等への参画や ATF 開発で先行する米国との二国間協力協定（CNWG）の活用により、ATF 開発で先行する海外諸国の情報を積極的に入手。各 ATF 候補材の研究開発に反映。
- **PHASE01（～2030）**：OECD/NEA における専門家会合（EGATFL：2014-2018）、IAEA における ATF に関する活動（CRP ACTOF：2015-2019、ATF-TS：2020-2024）、日米民生用原



# ドラフト版にて取扱い注意

子力研究開発ワーキンググループ（CNWG）での ATF 研究開発（Phase I：2014-2016、Phase II：2018-2023）

- PHASE02（～2040）：現状は未定だが、必要に応じて積極的に参画
- PHASE03（～2050）：現状は未定だが、必要に応じて積極的に参画

## 3-2 1F 事故知見活用及び廃止措置プラント活用

### ⑧ 人材確保、人材育成、アウトリーチ活動

ニーズ：

- ・ 新規燃料材料適用に伴う設計原理に立ち返った材料技術者の育成

現状と課題と期待される成果：

従来ジルカロイと比べて大きく特性の異なる新規燃料材料を適用するため、設計原理に立ち返った経験ができ、技術継承のため燃料材料技術者を育成する好機。