



文部科学省

MINISTRY OF EDUCATION,
CULTURE, SPORTS,
SCIENCE AND TECHNOLOGY-JAPAN

参考資料3

科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会
原子力科学技術委員会
原子力研究開発・基盤・人材作業部会(第5回)
R2. 12. 16

令和2年度原子力システム研究開発事業 採択課題の概要

研究開発局 原子力課

【課題名】

金属被覆ジルコニウム合金型事故耐性燃料の開発

【基盤チーム型】

実施期間: 令和2年度～令和5年度

【研究代表者・所属機関】 阿部弘亨・東京大学

【共同研究機関】 東北大学、日本原子力研究開発機構、ニュークリアデベロップメント株式会社

【目的】

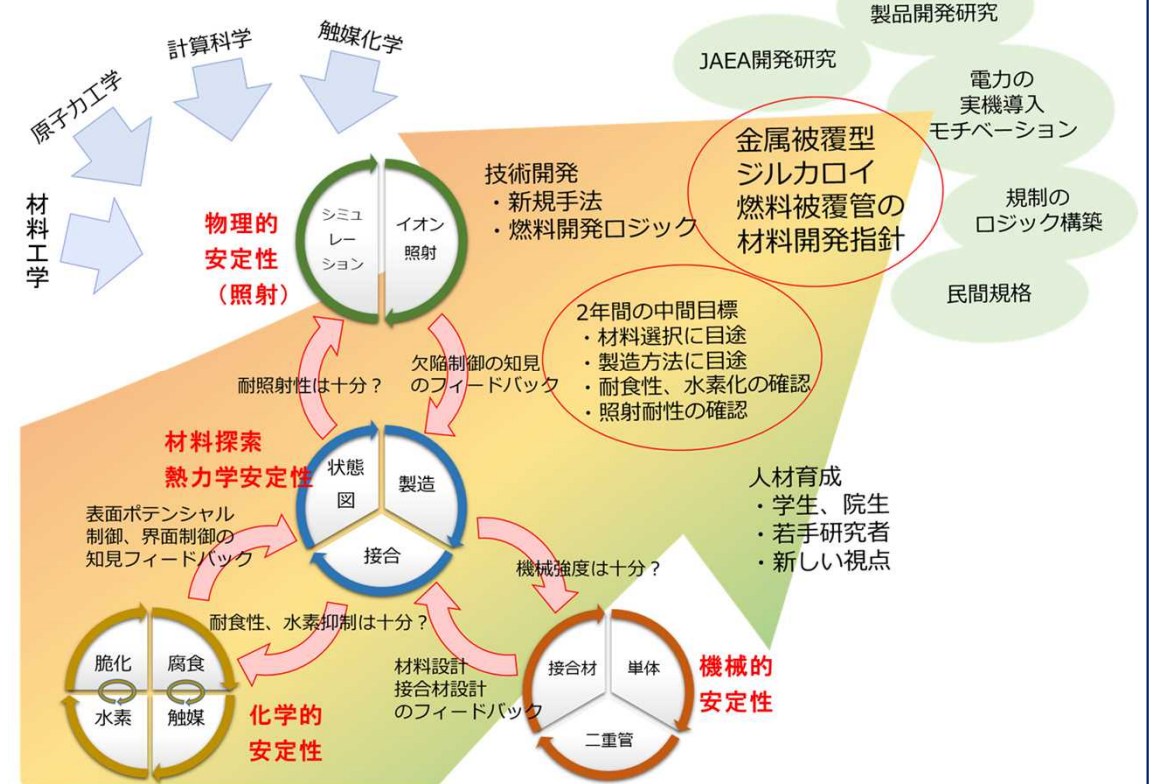
事故耐性燃料において、短期的に最も実現性が高いとされる金属被覆ジルコイ合金に着目し、その開発指針の構築と最適な材料の開発を目的とする。当該材料システムは、金属被覆に関する知見は皆無に近く、特に金属被覆と被覆／基材界面における現象を対象として、科学的合理性および説明性の高い材料開発指針を構築するに十分な研究体制を構築し、実用化に向けた知見を整える。そして、当該材料に関し物質選択、製造法、機械強度、腐食特性、照射特性といった燃料被覆管開発に必要な十分な知見を習得する。

【課題概要】

福島第一原子力発電所事故では、ジルコニウム合金で構成される燃料被覆管の酸化反応熱により温度が上昇し、更なる酸化を引き起こすというサーマルフィードバックがかかり炉心溶融に至った。これを抑制する事故耐性燃料が近年注目されており、複数の燃料概念が提案されている。本事業では、短期的に最も実現性が高いとされる金属被覆ジルコイ合金に着目し、その開発指針の構築と最適な材料の開発を目的とする。

当該材料システムについては、基材は実用材であることから十分な知見を有するが、金属被覆に関する知見は皆無に近い。そこで、特に金属被覆と被覆／基材界面における現象を対象として、科学的合理性および説明性の高い材料開発指針を構築するに十分な研究体制を構築し、実用化に向けた知見を整える。そして、当該材料に関し物質選択、製造法、機械強度、腐食特性、照射特性といった燃料被覆管開発に必要な十分な知見を習得し、金属被覆付きジルコイ合金を完成させる。

【期待される成果・発展性】



【課題名】

原子炉構造レジリエンスを向上させる破損の拡大抑制技術の開発

【基盤チーム型】

実施期間: 令和2年度～令和5年度

【研究代表者・所属機関】 笠原直人・東京大学

【共同研究機関】 日本原子力研究開発機構、防災科学技術研究所

【目的】

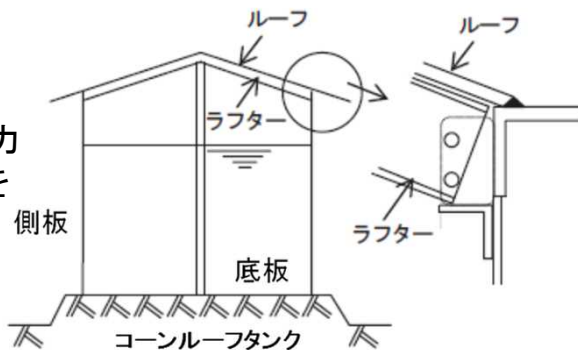
設計基準外事象(過酷事故時の超高温や過大地震)によって破損が生じた場合に、その拡大を抑制する技術を開発し、原子炉構造のレジリエンス(安全性能低下に対する抵抗性と回復性)を向上させる。

【課題概要】

破損発生防止を目的とした従来の構造強度技術の対象は、単一機器の破損発生までであった。ここではプラントシステムにおける破損発生後の挙動を対象として、安全性への影響の小さい破損モードを先行させることによって周囲の機器の荷重やエネルギーを低減させ、安全性へ影響の大きい破損モードへの拡大を抑制する、革新的な構造強度技術を開発する。

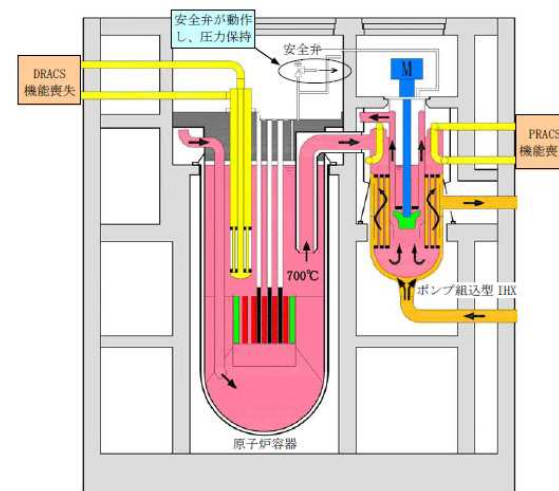
以下の例で考え方を示す。コーンルーフタンクのルーフと側板の接続部の強度は側板や底板より低く制御されている。

何らかの原因で内圧が想定を超えた場合に、ルーフと側板の接続部が先行して壊れ圧力が抜け、側板や底板の圧力による破壊と液の流出を抑制する。



【期待される成果・発展性】

破損が生じても、安全性へ影響する破損モードへの拡大を構造固有の特性により抑制することが出来れば、原子炉構造のレジリエンスが向上する。以下に次世代原子炉構造のレジリエンス向上策の案を示す。過酷事故による超高温時に、容器の弾塑性クリープ変形を集中が生じないように制御しつつ先行させ、容器を上釣り支持から床支持とすることで荷重を低減することで破断への拡大を抑制し、長時間液位を保持する。



床接触により容器壁荷重が低減し安全性への影響の大きい破断を抑制

支持構造座屈形が容器破断に拡大しないように制御

事故時の原子炉容器の変形

容器(RV&GV)下部が座屈変形により破断しないように制御

【課題名】 脱炭素化・レジリエンス強化に資する分散型小型モジュラー炉を活用したエネルギーシステムの統合シミュレーション手法開発

【基盤チーム型】
実施期間: 令和2年度～令和5年度

【研究代表者・所属機関】 小宮山 涼一・東京大学

【共同研究機関】 日本エネルギー経済研究所、日本原子力研究開発機構、日揮株式会社、三菱重工業株式会社

【目的】 脱炭素化やレジリエンス強化の実現を目的として、既設原子力発電所や将来的に建設が予想される小型モジュラー炉(SMR)を考慮した我が国のエネルギーシステムの将来像を定量的に示すことが可能な原子力システム導入戦略分析ツールを開発し、エネルギーシステム高度化に資する導入可能なSMRの概念設計と課題抽出を行う。電力レジリエンス分析ツールの開発では、SMRを組み込んだ詳細な地理的・時間的解像度を有する電力需給モデルを開発し、エネルギー需給分析ツールの開発では、再エネ導入量やCO₂排出削減量等を制約条件に、最適なエネルギー需給構成を決定するツールを開発する。

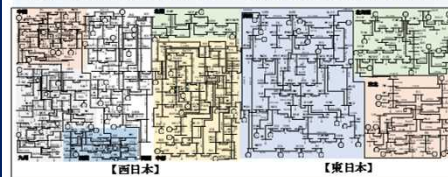
【課題概要】 カーボンニュートラル達成に貢献しうる持続可能なエネルギーシステム実現のため、大型原子炉の見通しも踏まえた上で、小型モジュラー炉(SMR)の最適導入シナリオを導出可能な統合シミュレーション手法の確立を目指す。

- (1)電力レジリエンス分析ツールの開発
SMRを考慮した電力需給モデルの開発
電力需給モデルによる数値シミュレーション分析
- (2)エネルギー需給分析モデルの開発
エネルギーシステム評価枠組の検討
エネルギー需給分析モデル構築・特性データベース整備
- (3)原子力システム導入戦略分析用原子力システム技術の評価
原子力システムの燃料サイクル諸量の評価
原子力システムの新規導入地点に係るサイト影響の評価
原子力システムの負荷追従性能の評価
原子力システム技術評価結果のレビュー
- (4)多目的利用システムモデルの開発
水素サプライチェーンシステム・CO₂再資源化システム特性データベースの構築
- (5)対象とする原子力システム技術の評価
原子力システム導入戦略分析ツールのインプット条件の評価

【期待される成果・発展性】

SMR最適導入戦略分析ツール

高時間解像度・多地点電力需給モデル



エネルギー需給分析モデル



- ・原子力システム導入戦略分析用原子力システム技術の評価
- ・多目的利用システムモデルの開発
- ・対象とする原子力システム技術の評価

分散型SMRを活用したエネルギーシステム



原子力エネルギー戦略(SMR、大型炉)

エネルギー・環境政策、NEXIP、SMR等開発メーカー

【課題名】

多様な革新的ナトリウム冷却高速炉における統合安全性評価シミュレーション基盤システムの開発

【基盤チーム型】

実施期間: 令和2年度～令和5年度

【研究代表者・所属機関】 高田 孝・国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

【共同研究機関】 日立GEニュークリア・エナジー株式会社、東京都市大学、大阪大学

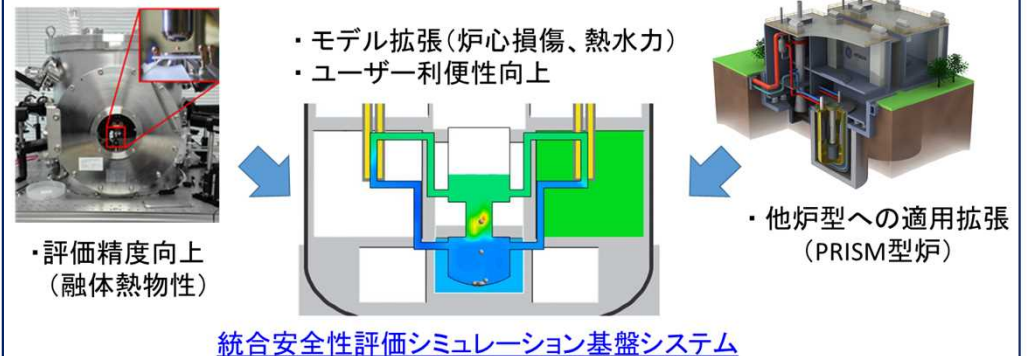
【目的】

革新的原子力システムであるナトリウム冷却高速炉を対象とし、SA(Severe Accident)を含めた安全性評価を、炉内／炉外を含め一貫した1つの数値解析により評価する基盤技術を構築する。本基盤技術は産業界への提供を前提とし、ユーザー利便性にも重点を置く。

【課題概要】

- (1) 統合安全性評価シミュレーション適用性拡張
 - システムの基盤熱水カプラットフォームであるSPECTRAコードの適用性拡張(炉内、炉外の各種モデル開発)
 - 炉内事象における起因過程から遷移過程までの炉心損傷事故を解析するモジュールの開発
 - 小型モジュール高速炉であるPRISM(Power Reactor Innovative Small Module)型原子炉への適用検討
- (2) ユーザー利便性向上
 - AI(Artificial Intelligence)等を用いた最適値探索支援ツールの導入
 - コード入力のGUI(Graphical User Interface)化、QA(Quality Assurance)作業の一部自動化
- (3) 融体熱物性データベース構築
 - 溶融燃料もしくは溶融燃料とコンクリートの相互作用で生じる混合酸化物の融体物性評価試験、データベースの構築

【期待される成果・発展性】



研究基盤の社会実装

- 革新炉における統合安全性評価シミュレーション開発は世界的にも先駆的(米国で建設予定のVTR(Versatile Test Reactor)炉へも利用可能、国際標準化も視野)
- 高速炉ロードマップ、NEXIP(Nuclear Energy × Innovation Promotion)における研究基盤への提供(他型炉へも適用可能)
- 融体熱物性データベースは軽水炉にも適用可能(軽水炉SA解析技術の精緻化、実験技術の国際的優位性)

【課題名】

過酷事故対応電子機器の実用化に向けた耐放射線・高温動作半導体デバイスの高性能化

【ボトルネック課題解決型】

実施期間: 令和2年度～令和4年度

【研究代表者・所属機関】 梅沢 仁・産業技術総合研究所

【共同研究機関】 北海道大学、福島工業高等専門学校

【目的】

原子炉格納容器内で過酷事故に対応可能な耐放射線・高温動作電子デバイスおよびエレクトロニクス回路の製造技術は現状存在しない。本研究では、原子炉の安全性を高めるため、課題解決の要となるダイヤモンド電界効果トランジスタの高性能化と炭化ケイ素集積回路技術の開発を進め、事業終了後ただちに実機開発に着手可能とすることを旨とする。

【課題概要】

過酷事故に対応可能な耐環境・耐高温エレクトロニクスを実現するため、以下の開発を行う。

・耐環境型ダイヤモンドトランジスタの高利得化

これまでに開発が行われてきたダイヤモンド耐環境型トランジスタのゲート長を微細化し、前置増幅器の高利得化、帯域改善や低ノイズ化をはかる。また準量産技術の開発に着手する。

・表面チャネル型ダイヤモンドトランジスタの耐環境性の改善

利得性能に優れる表面チャネル型ダイヤモンドトランジスタの改良によって耐放射線性能を改善し、前置増幅器への搭載を試みる。

・炭化ケイ素を用いた集積回路の開発

モノリシック半導体回路形成技術の開発により、より汎用性の高い耐環境型集積回路を実現する。

・検出器回路の設計

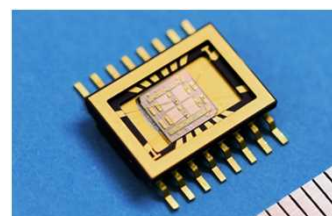
革新半導体材料を用いた新型素子の性能に適した素子モデルを構築し、設計技術を開発する。また、これを利用した検出器回路の設計を行う。

・耐環境パッシブ素子の開発

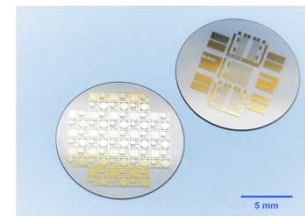
コンデンサや抵抗など、前置増幅器回路に必要な耐環境パッシブ素子の開発を行う。

【期待される成果・発展性】

・高性能ダイヤモンド耐環境型トランジスタ



ディスクリートダイヤモンド素子



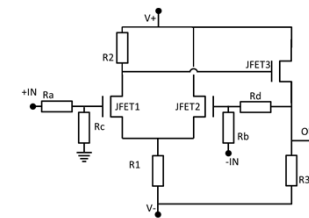
準量産技術の開発



・革新材料に適した回路設計および耐環境型集積回路



炭化ケイ素ウェハへの素子形成



革新材料による集積回路



・耐放射線、耐高温型コンデンサ

【課題名】可搬型950keV/3.95MeVX線・中性子源による福島燃料デブリウラン濃度評価・仕分けとレギュラトリエンス

【ボトルネック課題解決型】
実施期間:令和2年度～令和4年度

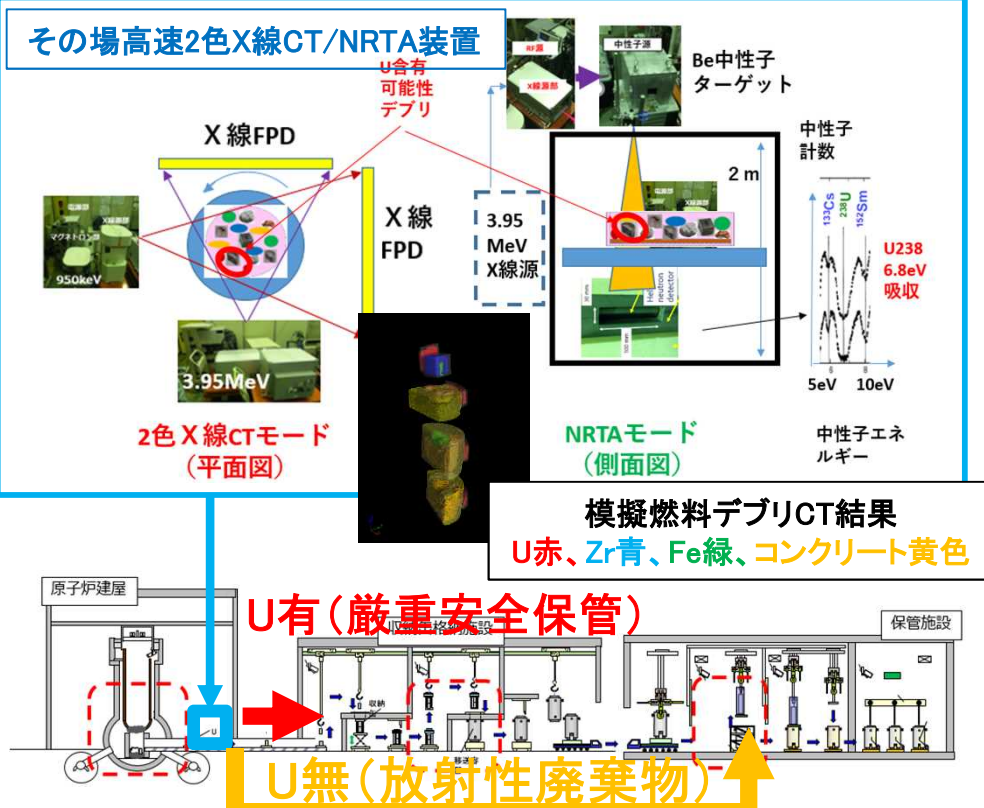
【研究代表者・所属機関】 高橋 浩之・東京大学

【目的】東電の廃炉中長期プラン2020では、2021年頃より燃料デブリの試験的取り出しが開始され、その後、段階的に取り出し規模を拡大していくことが計画されている。取出した燃料デブリは、ユニット缶(直径約200mm、SUSメッシュ)に収納のうえ、ステンレス製の収納缶に収納保管される計画である。燃料デブリの保管にあたっては、大規模な敷地が必要視されていることから、燃料デブリと放射性廃棄物の仕分けのための技術開発が廃炉作業の重要成功因子であると考えられる。1,2,3号炉に合計数百から千トンある燃料デブリを、1Fサイトの燃料デブリ取扱い施設にて、迅速にUの量が判定できて、Uを含む核廃棄物と、含まない放射性廃棄物とに仕分けでき、それぞれ収納缶格納施設と、保管施設に別々に保管できれば、保管費用の節約になると考えられる。それを実現する手法を実証することを目的とする。

【課題概要】

- ・原子炉建屋内のその場で、約5 m x 5 mのスペースで、迅速にU濃度基準値以上か未満を判定する仕分け技術確立する。
- ・950keV/3.95MeV同時2色3次元X線CT計測を、直径200mmユニット缶模擬体中の模擬燃料デブリ1つに関して5分以内実施し、熔融混合物を含めた成分判定を10分以内に行う。
- ・3.95MeV中性子源によるNRTAシステムをU検出のみ最適化し、TOF距離1m程度にし、測定時間を数cmの燃料デブリに対して1時間以内にする。
- ・3.95MeVX線/中性子源の使用場所変更につき、放射線障害防止法の規制緩和を実現し、1Fサイトにて使用可能とする。
- ・上記2色X線CT/NRTAを同時にユニット缶模擬体1つ当たり1時間以内で行い、Uの有無のその場判定して仕分けできるシステムの基本設計を行う。
- ・1,2,3号炉からの試験取り出し燃料デブリのU/Zr/Fe/Gr/MCCI比をもとにUの量と濃度を推定する。
- ・U量検出の精度は、今後、ユニット缶、収納缶、キャスク等のサイズ・容量が決まり次第決定できる。それに対応すべく、U量の判定目標は空間分解能0.5mm、重量10mg、濃度5%と設定している。

【期待される成果・発展性】



【課題名】

国内の原子カインフラを活用した医用 RI の自給技術確立に向けた研究開発

【ボトルネック課題解決型】
実施期間: 令和2年度～令和4年度

【研究代表者・所属機関】 高木 直行・東京都市大学

【共同研究機関】 日本医用アイソトープ株式会社、金沢大学、三菱重工業株式会社、日本原子力研究開発機構

【目的】

国内の既設の原子炉を用い、診断用のRIとして最も需要の高いMo/Tcと、 α 内用療法向け短寿命 α 核種として近年その有用性が注目されているAc-225の二核種の生成と供給を行う、国内自給技術検討により既存炉・次世代高速炉の運用に係る研究開発を行う。

【課題概要】

我が国で利用されている医用RIはほぼ全量を輸入に依存している。そのため、製造所や輸送中のトラブル、自然災害、紛争、パンデミック感染症等により、RIの医学利用や関連する研究・開発に支障をきたすことがあり、医用RIセキュリティ(安定確保・供給)の強化が望まれている。また新たな悪性腫瘍の治療法として近年注目されている「 α 内用療法」向け短寿命 α 線源へのニーズも急速に高まっている。

本研究では、放射性医薬品の基礎研究や臨床応用を行う医学分野、実験用研究炉を有する原子力研究機関、PWR設計・製造を行うメーカーおよび核変換技術研究で実績のある大学の専門家が連携し、国内で既に設置されている商用炉や研究炉(具体的には商用PWRおよび高速実験炉常陽)を用いて、診断用のRIとして需要の高いMo/Tcと、 α 内用療法に用いられる短寿命 α 核種(Ac-225)の生成と供給を行う国内自給技術の確立に向けた技術開発を行うことを目的とする。

発電が主目的の軽水炉を医学分野へ活用すること、高速スペクトル炉の特徴を活かしたRI製造技術を開発することにより、診断・治療用RIの国内自給技術の社会実装を図るとともに、新型炉を含めた軽水炉・高速炉利用におけるイノベーションと原子炉に対する社会受容の改善を目指す。

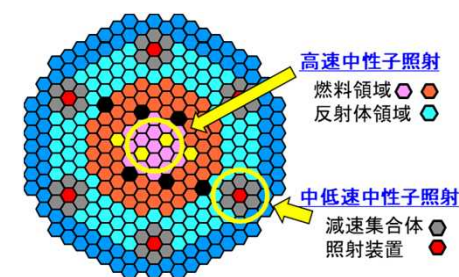
【期待される成果・発展性】

PWRでのMo(n,y)法によるTc-99m生成技術

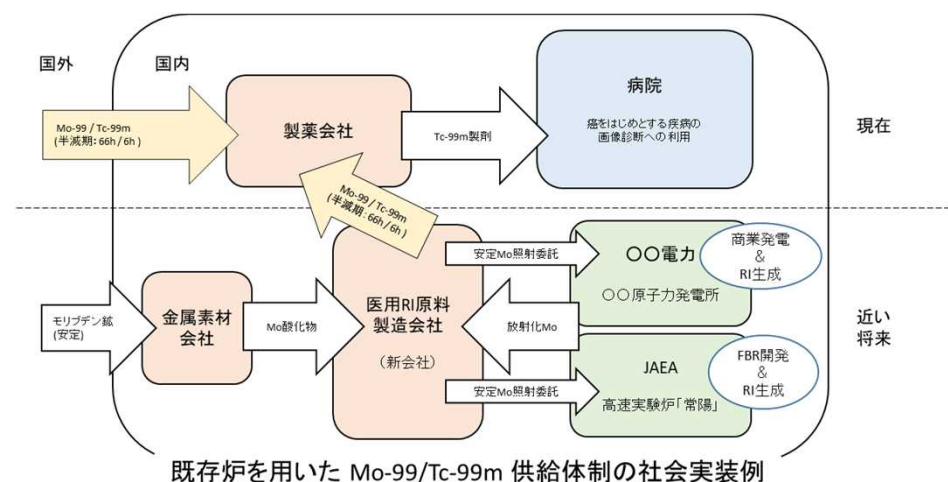
- PWR 1基で国内需要量(約40TBq/週)の約半分を生成

「常陽」での Ra(n,2n)法によるAc-225生成技術

- 常陽での1サイクル(60日)照射で現世界供給量(約60GBq/y)の約半分を生成



高速実験炉「常陽」でのターゲット装荷位置



既存炉を用いた Mo-99/Tc-99m 供給体制の社会実装例

【課題名】

地震荷重を受ける配管系の非弾性を考慮した高精度シミュレーションモデルの構築

【ボトルネック課題解決型】

実施期間: 令和2年度～令和4年度

【研究代表者・所属機関】 中村いずみ・防災科学技術研究所

【共同研究機関】 横浜国立大学

【目的】

原子力施設の配管系を対象とし、終局強度の評価も含めた非弾性挙動を再現できる高精度シミュレーションモデルを構築する。また、世界最大の震動台であるEーディフェンスを用いた検証実験を実施し、シミュレーションモデルのV&Vに必要なデータを取得し、デジタルツインに基づく耐震信頼性評価法に必要な基盤データの構築を進める。

【課題概要】

地震国である日本では、新技術を社会実装する際には高度な耐震信頼性が求められる。

既存軽水炉の耐震設計では弾性解析に基づく保守的評価が行われているが、近年は設計の想定を超えた条件に対する安全性確保への配慮が求められるようになってきていることなどを踏まえると、次世代原子力システムの耐震設計・耐震性評価では、終局挙動も含めた非弾性挙動の適切な評価が重要である。

本研究では、原子力施設の重要構造物のひとつである配管系を対象とし、以下の研究を実施する。

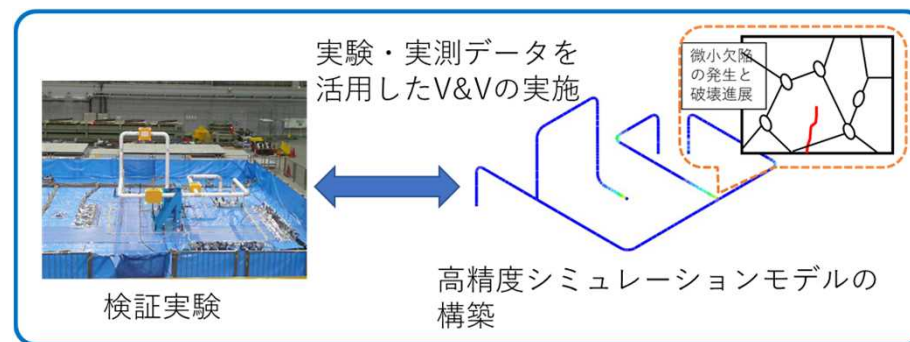
- 非弾性挙動のうち、1) 非比例荷重を受ける材料の破壊挙動、2) 支持部等の接触挙動、を取り込んだ高精度シミュレーションモデルの構築を行う。
- Eーディフェンスを使用した検証実験を行い、高精度シミュレーションモデルのV&Vに活用する実測データを取得する。
- 上記2項目の成果をまとめ、高精度シミュレーションモデルの作成手順を示す。

【期待される成果・発展性】

本研究の成果は、検証実験データに基づくV&Vプロセスを経て解析の品質が保証された、配管系の非弾性地震応答挙動に関する高精度シミュレーションモデルである(下図)。

本成果の活用により、以下の発展性が期待できる。

- ① 構築したシミュレーションモデルの活用により、多様な地震波に対する配管系の非弾性応答挙動等の調査、それらの結果に基づく、次世代原子力システムの耐震設計手法の整備。
- ② Eーディフェンスで実施した加振試験データ公開により、他の研究でV&Vを行う場合のベンチマークデータとしての活用。
- ③ 既存軽水炉の耐震性評価手法高度化への貢献。



【課題名】

金属積層造形による新規低放射化ハイレントロピー合金の作製

【新発想型】

実施期間: 令和2年度～令和3年度

【研究代表者・所属機関】

橋本 直幸・北海道大学大学院工学研究院

【共同研究機関】

日本原子力研究開発機構

【目的】 金属積層造形法(3Dプリンティング)を用いて、次世代エネルギー炉に応用可能な、高温で耐照射性に優れかつ放射化しにくいハイレントロピー材料の創製を目指します。具体的には、粉末床積層造形法(電子ビーム積層造形及び粉末レーザー積層造形)により成型した試料の機械的特性、耐照射性、高温水腐食特性について、既存の方法で作製した材料と比較することで、金属積層造形による新規材料作製の成立性を検証する。

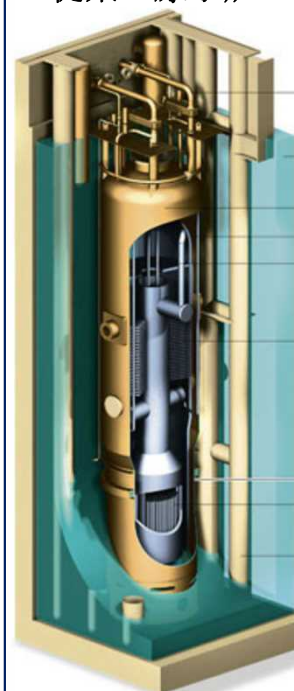
【課題概要】

低放射化材料の作製に適切な金属元素を選定した上で、既存の方法(溶解法)及び積層造形法により高純度のFCC単相ハイレントロピー合金を作製する。続いて、各合金の硬度、引張強度、積層欠陥エネルギー、高温水蒸気腐食特性、水溶液腐食特性を評価し、さらに、超高圧電子顕微鏡を用いた電子線照射その場観察実験、大型加速器を用いたイオン照射実験を行い、照射による微細組織経時変化と損傷形態について調査する。これらの評価項目は、既存の原子炉構造材料(316オーステナイトステンレス鋼)の特性と比較する。これらの実験と並行し、高濃度合金の積層欠陥エネルギーに対する元素の影響について、第一原理計算により評価する。

本研究で用いる粉末床(パウダーベッド)積層造形技術は、原料である金属粉末を薄い一定厚に敷き詰め、予め生成した3次元設計データに合わせてレーザー、電子線などの収束熱源を照射する方法である。これにより、照射部位の粉末は瞬間的に溶融し、再び凝固することで造形物の一部となり、これを繰り返すことで最終的な造形物を得る。この方法は、通常の鋳造プロセスと比較して温度勾配が大きく、加熱と急速冷却の相乗効果がハイレントロピー合金の組織制御に有利に働くことを期待している。

【期待される成果・発展性】

従来の原子炉



金属積層造形(3Dプリンティング)による精緻な小型部品の製造と高照射耐性を有する新規ハイレントロピー合金の開発

✓ 未来の小型原子炉・モジュール炉へ機能的かつ精緻な構造材料部品の供給

✓ 大型機器の性能を維持しかつ安全性の高い小型部品の作製

未来型小型原子炉



【課題名】

原子炉中性子リアルタイムモニタリングのための太陽電池型線量計の開発

【新発想型】

実施期間: 令和2年度～令和3年度

【研究代表者・所属機関】 小林知洋・理化学研究所

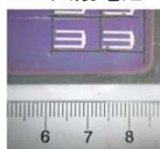
【共同研究機関】 東北大学、木更津工業高等専門学校、宇宙航空研究開発機構、量子科学技術研究開発機構

【目的】

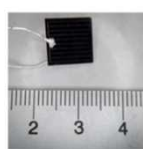
今後の原子炉開発は小型モジュール炉(Small Modular Reactors, SMR)に代表されるように安全性、コンパクト性と同時に低コストを追求する方向へ向かうと考えられる。計装系においては、高温・高 γ 線環境において長期間安定的に中性子量を測定する線量計が必要とされる。本課題においては、太陽電池素子を利用することにより、 200°C 以上で稼働する低コスト中性子線量計を開発することを目的とする。

【課題概要】申請者らはCdTe、InGaP、CuInGaSe(CIGS)の太陽電池素子を応用した放射線(α 、 β 、 γ)線量計システムの研究開発を行ってきており、それぞれの線量測定が可能であることを示してきた。これらの成果をもとに、 $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ 反応により放出される α 線を太陽電池素子で検出することにより中性子線量を測定する新しい中性子検出器を考案した。本研究ではSMRにおける中性子計装への応用を目標とし、この太陽電池中性子線量計開発を実施する。研究開発は、(1)中性子検出素子と試作機の作製、(2)ヘリウムイオン照射試験による素子劣化特性の解明、(3)高温中性子照射試験による線量率ダイナミックレンジの解明、の3つの項目からなる。これらを実施することにより検出素子の素子感度、素子寿命、高温駆動耐性を明らかとし、実装段階へと発展させるための知見を得る。

CdTe太陽電池



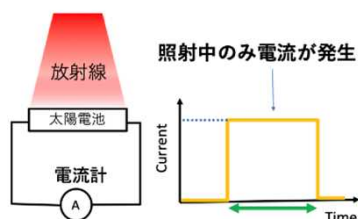
InGaP太陽電池



CIGS太陽電池

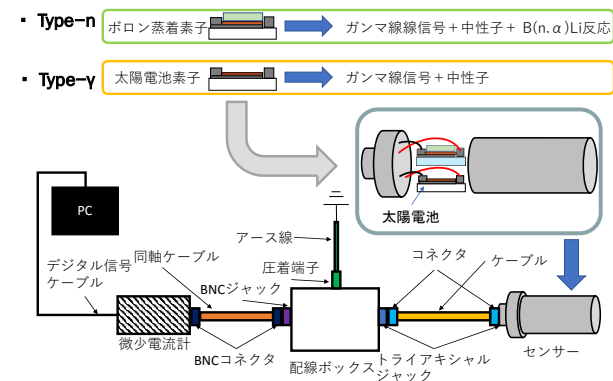


太陽電池型線量計



【期待される成果・発展性】太陽電池は α 線、 γ 線照射により起電力が発生する一方、中性子照射では起電力が発生しないことが明らかになっている。ホウ素(B)は中性子を吸収してヘリウム(He)とリチウム(Li)に分裂する。ホウ素を太陽電池の表面に蒸着して中性子照射環境に置いた場合、 α 線(He)照射を行ったのと同様な効果が得られ、起電力が発生する。このことから、下図のようにホウ素蒸着あり(Type-n)、ホウ素蒸着なし(Type- γ)の二つの素子を同時に照射し、電流の差分を測定することにより、高 γ 線環境の原子炉内において中性子のみの寄与を計測することができる。

本システムは検出部がシンプルであること、高電圧印加が不要であること等から安全・低コストである。さらに本課題では高温安定性を評価し、中性子計装としての応用を目指す。



【課題名】

次世代フルセラミックス炉心設計を見据えた多重防食技術の基礎基盤研究

【新発想型】

実施期間: 令和2年度～令和3年度

【研究代表者・所属機関】 近藤 創介・東北大学

【共同研究機関】 産業技術総合研究所、物質・材料研究機構

【目的】

金属を使わないセラミックスのみによる防食技術基盤を形成するため、シリコンカーバイド(SiC)の表面改質による耐食性能付与と、SiCへのセラミックス(アルミナ)被覆技術開発を行う。

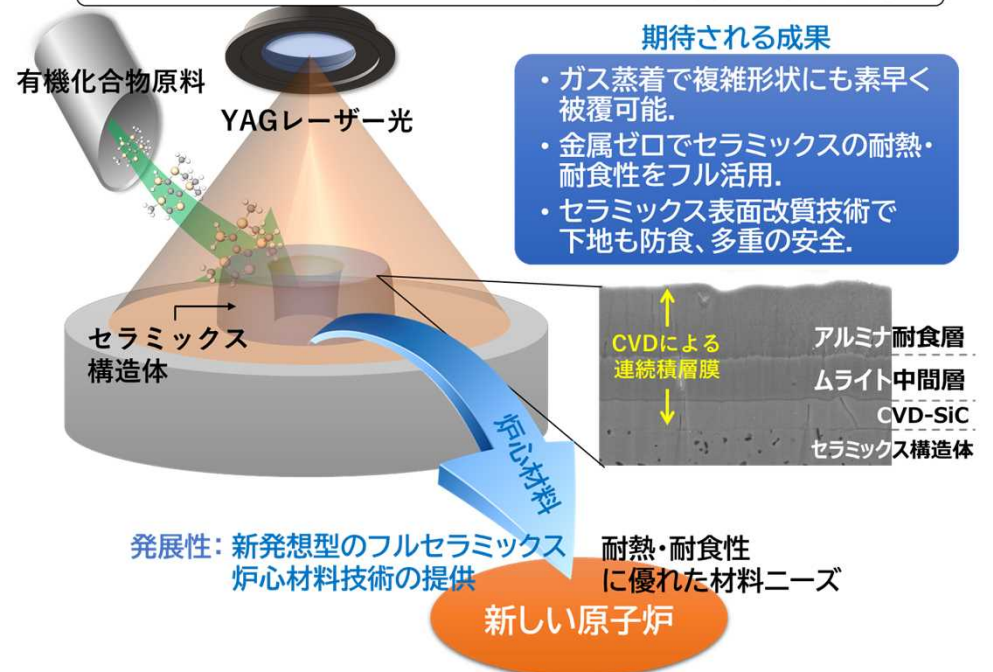
【課題概要】

次世代軽水炉や、小型モジュール炉、低減速炉などの炉心環境は高温だけでなく高い腐食性があり、安全と高効率の両立のため炉心構造材料へ要件は厳しい。本課題ではこの要求に高次元で答えるため、従来とは全く異なるフルセラミックスによる炉心を見据え、金属を用いない防食技術、つまり、セラミックス構造体の表面改質と構造体へのセラミックス被覆による多重防食技術の開発を目指している。

セラミックスの表面改質は、腐食の原因となる不対電子の活性を抑制するために開発された東北大の不対電子密度低下技術を用い、そのSiC複合材料への適用と耐照射性・耐食性の実証を行う。セラミックス・オン・セラミックス被覆は極めて困難なことが知られているが、SiC複合材へのアルミナ被覆を産総研のレーザーアシストCVD技術を用いて実施し、被覆層の緻密化技術基盤を形成する。得られた被覆層自体、そしてその界面を徹底的に調査するのが物材機構の最先端セラミックス被覆試験技術である。腐食試験後や高温での強度試験も実施し、過酷環境下での被覆性の健全性を評価するだけでなく、計算機シミュレーションによって成膜プロセスへフィードバックし研究全体の加速を図る。

【期待される成果・発展性】

セラミックスによるセラミックスのための新発想防食技術



【課題名】

人工知能(AI)技術を取り入れた核燃料開発研究の加速

【新発想型】

実施期間: 令和2年度～令和3年度

【研究代表者・所属機関】 小無健司・東北大学

【共同研究機関】 福井大学、原子力研究開発機構、産業技術総合研究所

【目的】

核エネルギーの利用は、米国シカゴ大学で1942年に最初の持続核反応の成功(CP-1)から始まり、今日世界的に普及し多くの電力を供給するまでになっている。この間、科学技術は大きく進展し、原子力分野もそれを取り入れ進化を続けてきた。本課題では現在における、最先端の科学技術の一つである人工知能(AI)を取り入れ核燃料開発研究を加速することを目的とする。

【課題概要】

現代において急激に進展していた分野の一つはAIである。様々な分野でAIを利用したビッグデータの解析技術が成功を収めている。画像解析技術や音声認識技術へのAI技術の導入が大きな成功を納めたのは記憶に新しいところである。本課題では、このAI技術を用いて核燃料を原子単位のナノ構造から理解し、その特性を評価することを目指す。

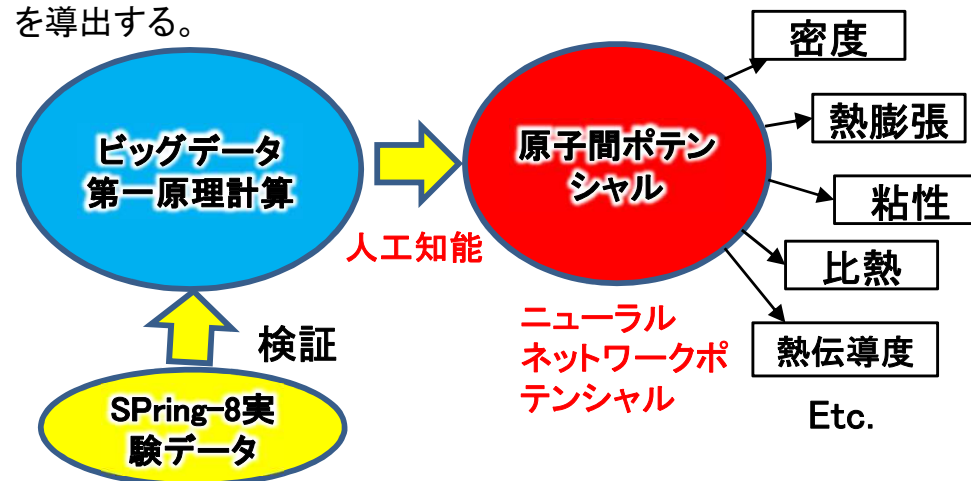
また、理論のみではなく、同じく原子単位のナノ構造から実験的に評価できる高輝度放射光試験を組み合わせることでこのAI技術を応用した核燃料開発手法の信頼性を確認する。

原子炉用核燃料は、これまで、原子炉運転時に想定される条件を考慮して多くの実験を実施し、その上で開発を進めてきた。この方法は、安全性の高い方法であり、最初に原子炉を開発する場合には、必要な方法であった。しかし既に数多くの原子炉の運転実績が蓄積され、核燃料の実験データも整備されている現状においては、長い開発期間と多額の費用の観点から、ふさわしい研究方法とは言えない。

国内、国外を問わず、これに変わる新しい開発方法の模索が始まっている。その有力な方法が計算科学にAIを利用した方法である。本課題では、この新しい方法を開発する。

【期待される成果・発展性】

これまでの計算科学は、古典分子動力学から第一原理分子動力学へと進化してきた。しかしながら、計算時間がかかりすぎること、対象となる体系が小さすぎることが問題であった。これに対してAIを用いた方法は、別の視点からこの問題の回答を与える。つまり量子力学の方程式を直接解くのではなく、量子力学の方程式で解いた答えをビッグデータとしてAI的方法である機械学習により、古典分子動力学で用いることが出来るニューラルネットワークポテンシャルを導出する。



【課題名】

スピン熱電発電素子による同位体発電システム開発に向けた基盤構築

【新発想型】

実施期間: 令和2年度～令和3年度

【研究代表者・所属機関】 家田淳一・日本原子力研究開発機構

【目的】

スピントロニクス技術に基づくスピン熱電素子と熱源としての放射性同位体の組みあわせによる、極限環境下でも利用可能な次世代発電方式の開発に向け、本研究によりスピン熱電素子の放射線耐性に関わる研究を実施する研究体制を構築する。本研究で得られた基礎データに基づき、使用済核燃料等から生じる熱を安全に有効活用する新しい同位体発電システムの開発につなげる。

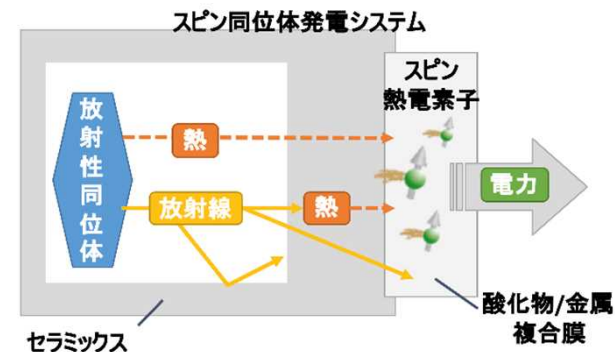
【課題概要】

原子力分野での熱電利用は、同位体電池など限られた範囲に留まっている。これは熱を電気に変換する従来の熱電素子が、ゼーベック効果を利用した半導体ベースの構造であることに起因する。出力電圧を大きくするためには多くのp型とn型の半導体からなる「熱電対」を直列に接続する必要があるが、個々の接点は放射線に弱く、十分な遮蔽を行う必要がある。この結果、熱源として利用可能な放射性元素の選択肢は、遮蔽の容易なプルトニウム(アルファ線のみを放出)にほぼ限定される。

そこで代表者らは、熱電素子における半導体接合を電子スピンによる仕組みに置き換えた「スピン熱電素子」を利用することで、放射線に対する弱点を原理的に回避する方法を考案した。スピントロニクス技術に基づくスピン熱電素子と、熱源としての放射性同位体の組みあわせは、宇宙探査機用電源等への次世代発電方式として期待できる。この一方、スピン熱電素子の放射線耐性に関わる研究は行われてこなかった。そこで、スピン熱電素子を対象とした中性子線、ガンマ線、ベータ線等による照射損傷効果を系統的に調査し、将来的に使用済核燃料等から生じる熱を安全に有効活用する技術の開発につなげる研究基盤の構築を加速する。

【期待される成果・発展性】

スピン熱電素子による同位体発電システムは(下図)、1)半導体を使わない構造のため素子自体の遮蔽防護が不要で、熱源の放射性元素に近接でき、2)放射線による素子の損傷が磁性体/金属界面の一部に発生した場合も、影響は局所的に留まることから熱電性能の低下が抑制されるなどの望ましい特性を示し、耐放射線素子開発に質的な変革をもたらされる。本研究テーマが起点となることで、20世紀に基礎量子科学として勃興した原子力が今またその輝きを強くするとともに、スピントロニクスも放射線を対象とする全く新しい研究フェーズへと前進する。将来的に、耐放射線素子を特に必要とする宇宙開発分野やIoT分野の基礎科学研究を取り込んだ、より大規模な新興・融合領域へと展開する。



【課題名】

放射性廃液のガラス固化妨害元素(白金族金属、モリブデン)を対象にしたバイオ湿式分離技術の創出

【新発想型】

実施期間: 令和2年度～令和3年度

【研究代表者・所属機関】 小西康裕・大阪府立大学

【目的】

放射性廃液に含まれるガラス固化妨害元素(パラジウム(Pd)、ルテニウム(Ru)、ロジウム(Rh)、モリブデン(Mo))を取り除くための新しい分離剤として、食品分野の普及品であるパン酵母を活用し、その分離機能に及ぼす放射線照射の影響を明らかにするとともに、廃液からの妨害元素の除去が簡便な操作方式によって高速・高効率に達成できる上に、二次放射性廃棄物の発生量が少ないバイオ分離技術を創出する。

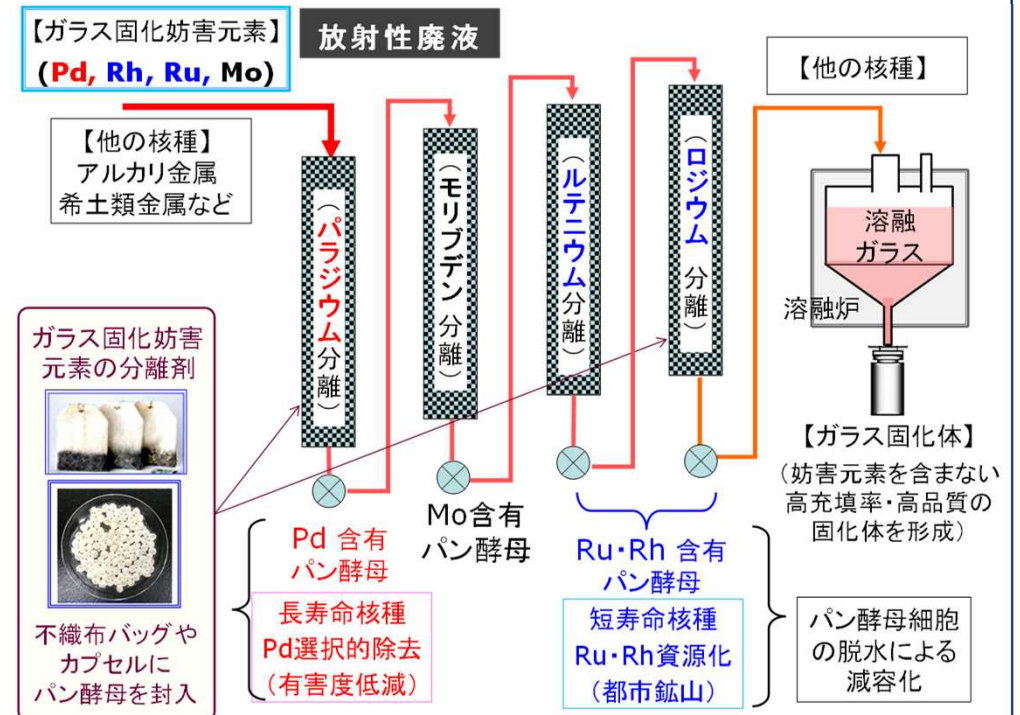
【課題概要】

放射性廃液は、ガラス固化した後に地層深く処分されることになっている。しかしながら、ガラス固化工程においては、廃液に存在する白金族金属(Pd, Ru, Rh)のガラス溶融炉への沈積とともに、廃液中モリブデン(Mo)による不溶性物質(イエローフェーズ)の形成がガラス固化を妨害することが問題点となっている。

本研究では、ガラス固化妨害元素(Pd, Ru, Rh, Mo)の新規な分離剤としてパン酵母(安全・低コストの普及品)に着目し、そのバイオ分離機能に及ぼす放射線照射の影響を把握するとともに、従来の分離技術(溶媒抽出法や吸着法)に比べて、より簡便な操作方式によって、より高速・高効率に、ガラス固化妨害元素を廃液から分離・除去できるバイオ分離技術を創出する。

具体的には、模擬放射性廃液を対象に、次のように研究を進める。
(1)パン酵母による模擬廃液からのガラス固化妨害元素の分離効率に及ぼすコバルト60ガンマ線照射の影響を評価する、(2)妨害元素を含むパン酵母の脱水・減容化方法を確認し、分離操作に伴う二次放射性廃棄物の発生量低減を図る、(3)分離剤自体の高機能化を目指して、パン酵母の細胞表層を化学修飾し、妨害元素に対する選択性を発揮する化学修飾株を開発する、(4)模擬廃液からの妨害元素のバイオ分離・除去において操作条件を最適化する。

【期待される成果・発展性】



【課題名】

マテリアルズ・インフォマティクスによる核燃料開発

【新発想型】

実施期間: 令和2年度～令和3年度

【研究代表者・所属機関】

黒崎 健・京都大学

【共同研究機関】

大阪大学

【目的】

核燃料にとって熱伝導率は最重要物性値である。熱伝導率が高ければ、燃料内部で発生した熱を効率よく外に取り出すことができるからである。そのため、高い熱伝導率を有するウラン化合物を発見することは、新しい核燃料開発に直結する。本研究では、ビッグデータの機械学習により、核燃料に適した高熱伝導率ウラン化合物を発見することを目的とする。

【課題概要】

近年、材料科学と情報科学あるいはデータ科学が融合したマテリアルズ・インフォマティクス(MI)が注目されている。MIでは、大規模な材料データを生成・収集し、機械学習をはじめとした情報科学技術を適用することで、材料探索や設計を効率化する。しかしながら、原子力分野の材料研究、すなわち、核燃料や原子炉材料の開発研究においては、国内外を問わず、MIの流れは届いていない。

本研究では、このMIを、世界に先駆けて核燃料開発に適用する。具体的には、本研究の分担実施者である熊谷が独自に作り上げた実験データに基づく各種材料の物性値ビッグデータを機械学習することで、膨大で多様なウラン化合物の中から核燃料に適したものを見出す。さらに、見出したウラン化合物を実験的に合成し、特性を評価することで、MIによる核燃料開発の妥当性を検証する。

本研究は、これまで永らく伝統的な実験研究に依存していた原子力分野の材料研究に、MIという新しい風を呼び込むものである。本研究で見出された新規ウラン化合物は、現在続々と提案されている小型モジュール炉に代表される新しいタイプの原子炉用燃料としての利用が期待される。

【期待される成果・発展性】

本研究をきっかけに、原子力分野の材料研究において、材料開発における時間短縮や新規材料発見の効率化がすすみ、研究が大きく飛躍する。さらにその先には、「材料」から一步外に出て、広く「原子力」と「情報科学」の融合がみえる。本研究は、保守的な原子力と最先端の情報科学が融合した新しい学問分野の創生とそれにとともなう新産業の創生につながる起点になるものと考えている。

