福島第一原子力発電所廃炉検討委員会セッション
廃炉作業10年　福島第一の廃炉の今　課題はなにか

廃炉技術の研究開発の進捗：成果と課題

野田　耕一
日本原子力研究開発機構

内容

1. 研究開発の体制とこれまでの取組み

2. 研究開発成果

3. 研究開発体制の強化と今後の課題への取組み

研究開発体制の整備に係る経緯

◆ 2011年12月：「中長期ロードマップ」と「研究開発計画」策定（「原子力災害対策本部会議」決定）

→現在は2019年12月第5回改訂版（「廃炉・汚染水対策関係閣僚等会議」決定）に基づき廃炉推進

◆ 2013年3月：モックアップ施設、放射性物質の分析・研究施設の整備（「東京電力福島第一原子力発電所廃炉対策推進会議」決定）

→楢葉遠隔技術開発センター（モックアップ試験施設；2016年4月運用開始）、現在建設中の大熊分析・研究センター（放射性物質分析・研究施設；2018年3月施設管理棟運用開始）を整備

◆ 2013年度～：経済産業省が「廃炉・汚染水対策事業」を開始

◆ 2013年8月：技術研究組合国際廃炉研究開発機構（IRID）が設立

◆ 2014年6月：文部科学省が「廃止措置等研究開発の加速プラン」を策定し、2015年度から「英知事業」を開始

→2018年度から実施主体をJAEAに移行

◆ 2014年8月：原子力損害賠償・廃炉等支援機構（NDF）が改組・設立

→毎年度「技術戦略プラン」を策定

◆ 2015年4月：廃炉国際共同研究センター（CLADS)を組織（2020年4月に福島環境安全センターと統合して、廃炉環境国際共同研究センターに改組）

→2017年4月に、国際共同研究棟（富岡町）の運用を開始

研究開発体制の整備

経済産業省

文部科学省

支援

支援

廃炉・汚染水対策事業

応用研究、実用化研究及び
現場実証のうち難度の高いもの

ＮＤＦ

技術戦略プラン
「廃炉研究開発連携会議」

英知事業

基礎・基盤研究に係るもの

ＩＲＩＤ等

成果

成果

ＪＡＥＡ

廃炉研究開発拠点を整備し、
研究開発に活用

応用～実用化研究

基礎・基盤～応用研究

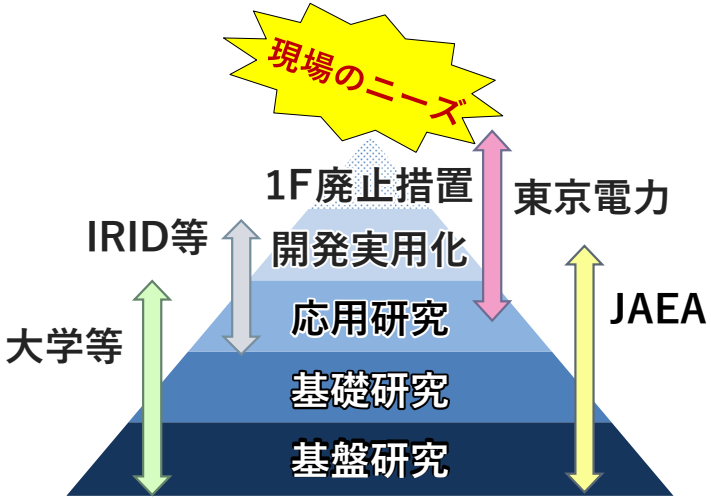
成果

公募

大学等

基礎・基盤研究

東京電力



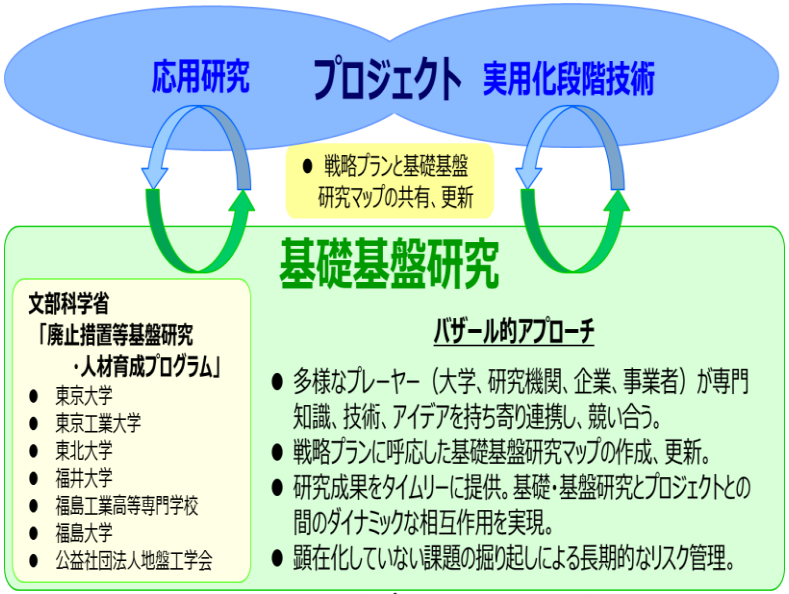
JAEAにおける研究開発の取組み

基礎・基盤研究

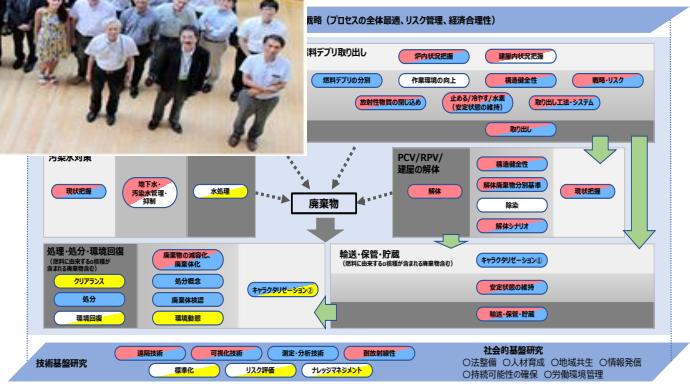
- ◆「加速プラン」に基づき、CLADS（国際共同研究棟）を中心として、大学や国内外の機関と連携し、世界の英知を結集して、1Fの廃炉に向けた研究開発と人材育成に関する取り組みを推進
- ◆廃炉に向けた基礎・基盤研究の推進協議体として、「廃炉基盤研究プラットフォーム」を整備
- ◆定期的に「福島リサーチカンファレンス（FRC）」を開催
- ◆廃炉全体を俯瞰し、研究開発のニーズとシーズを整理した「基礎・基盤研究の全体マップ」を公表し、更新

応用研究等

- ◆IRID 組合員としての技術開発
- ◆楢葉遠隔技術開発センター（モックアップ施設）、大熊分析・研究センター（放射性物質分析・研究施設）の整備

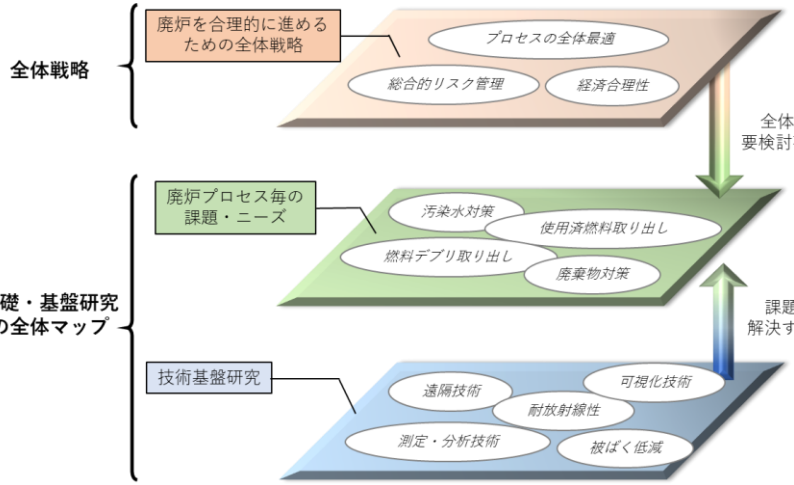


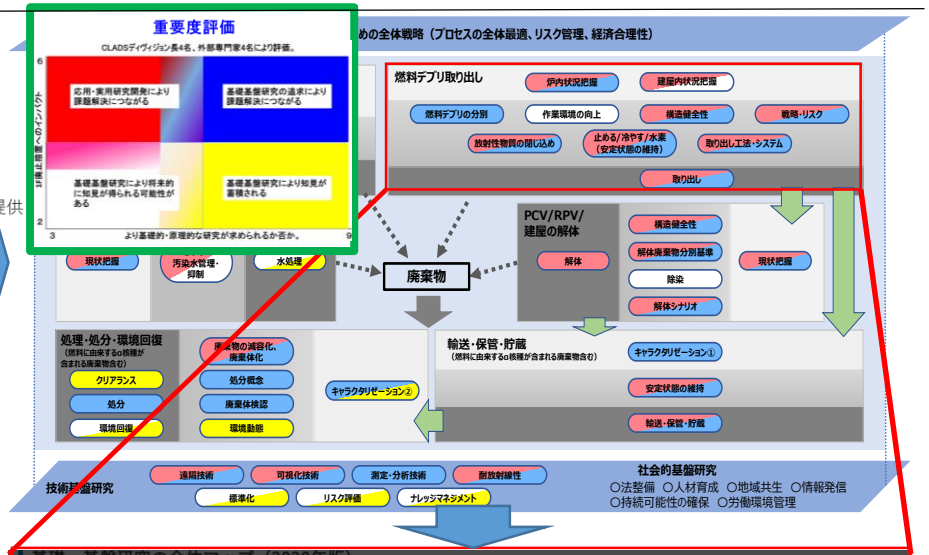
廃炉基盤研究プラットフォームの形成

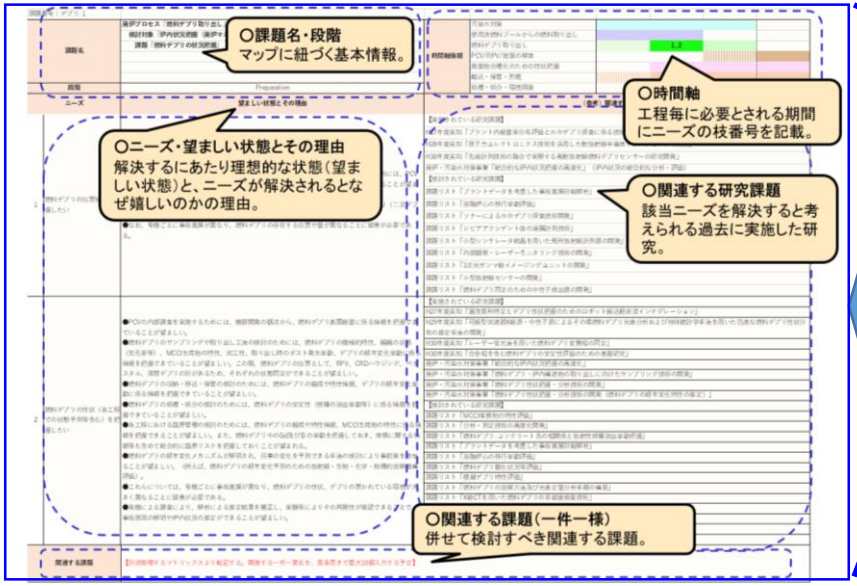


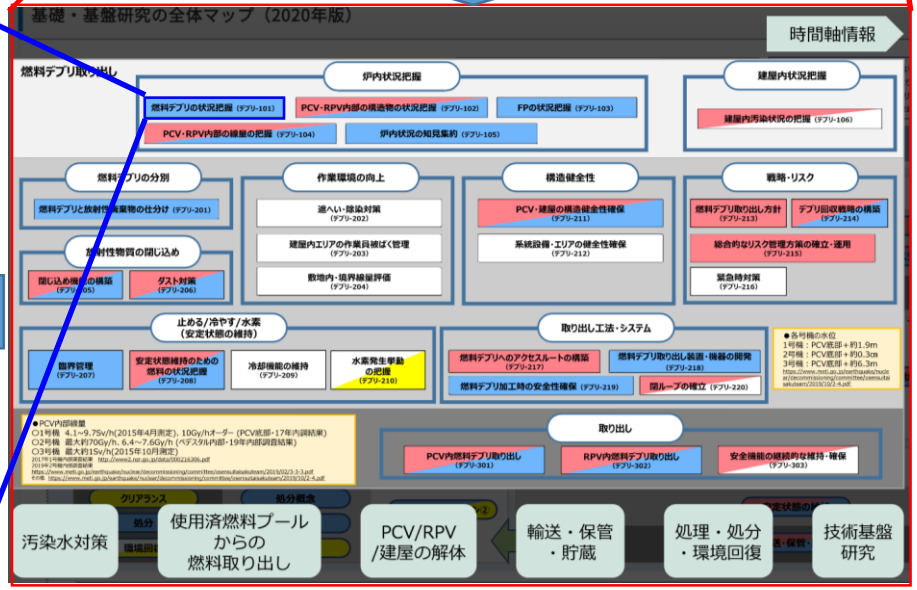
基礎・基盤研究の全体マップ

『基礎・基盤研究の全体マップ』の階層構造









内容

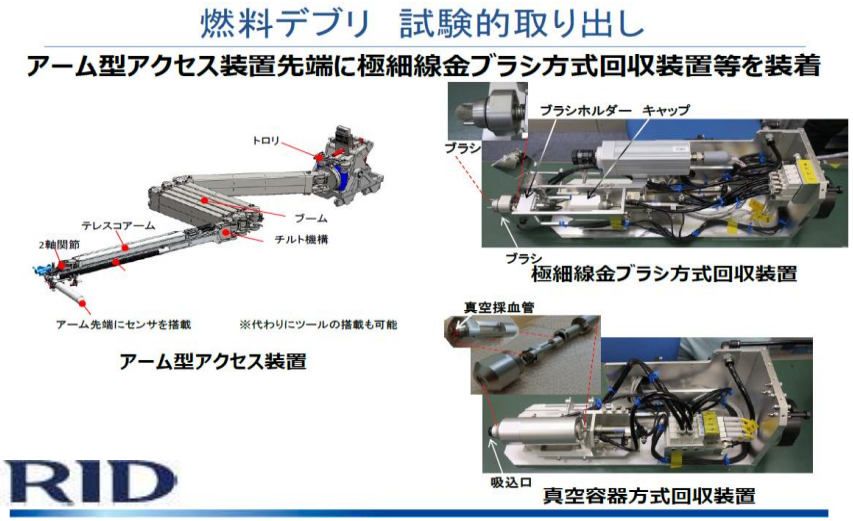
1. 研究開発の体制とこれまでの取組み

2. 研究開発成果

3. 研究開発体制の強化と今後の課題への取組み

1F廃炉のための実用化研究（遠隔技術開発の例）

- １F廃炉の現場で使われる技術の実用化研究は、「廃炉・汚染水対策事業」として、その多くがIRIDの取り組み。
- 格納容器内の状況は各号機毎に異なることから、各号機に即した内部調査用ロボットを開発。調査用ロボットの例：1号機は、形状変化型ロボット「PMORPH」；2号機は、「クローラ型遠隔調査ロボット」や「釣りざお型調査装置」；3号機は、水中遊泳型ロボット「ミニ‐マンボウ」。
- 燃料デブリ取出しは、「アーム型アクセス装置」を用いて、2号機の内部調査、最初の試験的取り出しを行い、その後段階的に取出し量を増やしていく予定。
- 現在開発中の各ロボットや装置は、開発後にモックアップ試験等を実施し、性能を検証するとともに、操作員の訓練等も実施する予定。



IRID

経済産業省/廃炉・汚染水対策事業費補助金の活用により得られた成果

JAEAにおける基礎・基盤研究開発

国内外の英知を結集して１F廃炉に必要な技術をIRIDや東電等へ提供

1Fの安全かつ確実な廃止措置を実施するため、国内外の英知を結集、国内外の大学や研究機関と連携しつつ、研究成果を１F廃炉へ貢献

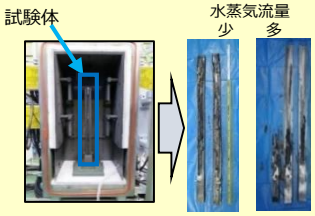
燃料デブリの性状把握

模擬デブリを用いた試験等から実燃料デブリの性状を推定し、デブリ取出し計画へ反映、実燃料デブリの分析要素技術を開発

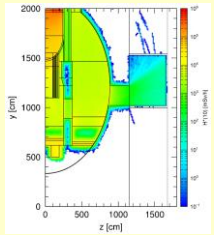
模擬デブリ等を用いて１F廃炉に必要な燃料デブリの特性の推定を行い、装置開発等に反映

炉内状況の解明

燃料デブリ取出し方法の確定に向けて、
原子炉圧力容器内の破損状況の高度化を図る。
また、炉内の線量評価手法を開発する

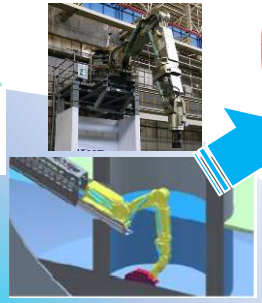


１F事故時の燃料集合体の破損挙動を解明、事故進展シナリオ及び現在の炉内状況把握に反映

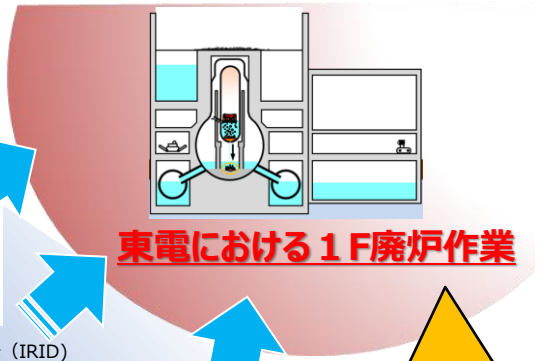


格納容器(PCV)内線量率分布を解析予測した

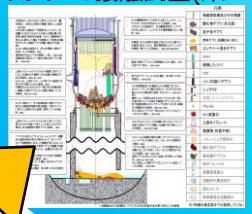
2号機のデブリへの接触調査(東電)



デブリ取出し用ロボットアームの開発（IRID）



東電における１F廃炉作業



炉内状況の推定

汚染水の処理により発生する二次廃棄物の分析

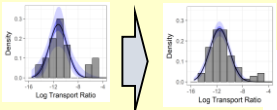
IRID等におけるエンジニアリング

1号機原子炉建屋内の高線量部位の把握に貢献

放射性廃棄物の処理処分

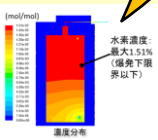
廃棄物の保管、処理、処分方法の確立に向け、廃棄物の分析を継続するとともに、安全な保管、処理、処分技術を開発

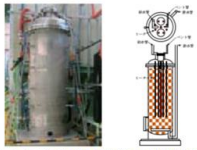
変化する廃棄物データを統計的に推定



増加する分析データを元に汚染分布を統計的に解析する手法としてベイズ統計の適用性を評価

１Fオンサイトの廃棄物サンプルを採取・分析

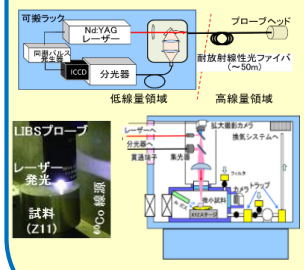




セシウム吸着塔試験体の外観（左）と加熱のためのヒータの配置（右）

遠隔計測技術開発

遠隔による3次元的な放射線分布の可視化技術の開発。廃炉現場作業を支援。



光ファイバ利用可搬型レーザー誘起発光分析（LIBS)装置の適用検討

小型ロボットに搭載

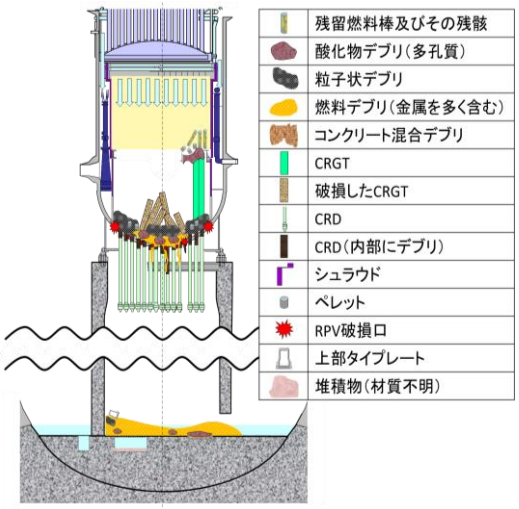
約680g

図1 開発した小型コンプトンカメラ

「炉内状況の解明」

炉内状況の解明：燃料デブリ取出し方法の確定に向け、原子炉圧力容器内の破損状況把握の高度化、及び炉内の線量評価手法を開発

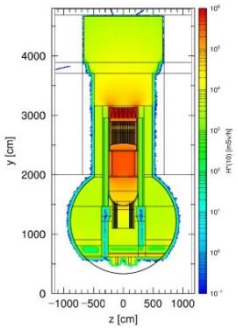
燃料デブリ分布と破損状況の推定



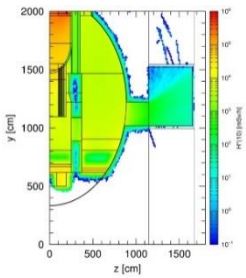
事故解析や試験データ、等を加味して総合的に評価分析することで、燃料デブリの分布と炉内破損状態を推定（炉内状況推定図）

取出し時の放射線量率分布の予測

燃料デブリへのアクセス方式を考慮して、号機毎の格納容器(PCV)内線量率分布を解析予測した



上アクセス方式

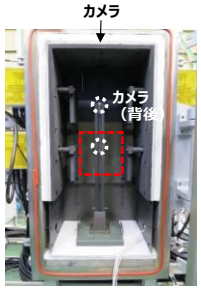


横アクセス方式

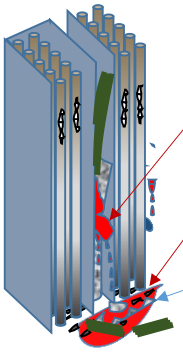
燃料デブリ取出し方式や、PCV内に挿入する機器の放射線遮蔽の最適化などに反映（NDF、東電に知見提供）

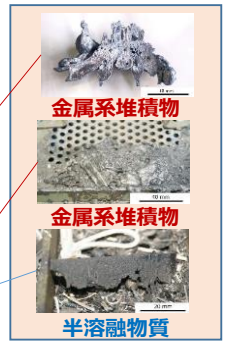
燃料デブリの形成メカニズムの解明

炉心溶融、溶融物の下部への移行、閉塞、下部での再溶融、圧力容器の破損に係る一連の現象について評価



制御棒ブレード破損試験装置





金属系デブリの特性評価の基礎知見を提示

⇒ １F事故時の燃料集合体の破損挙動を解明、事故進展シナリオ及び現在の炉内状況把握に反映

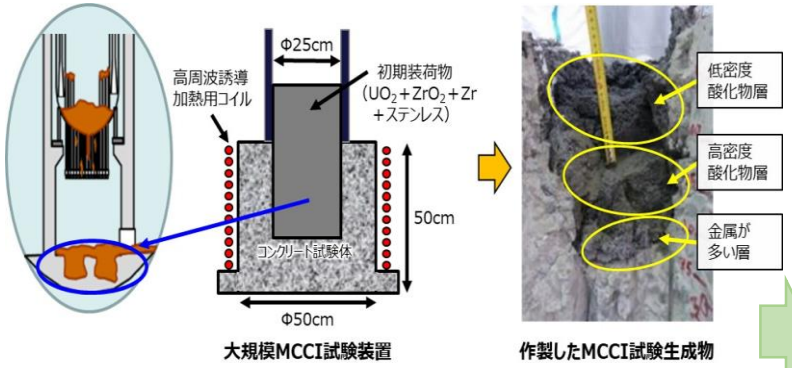
アウトカム

- 燃料デブリ取り出し開始時のPCV内3次元線量率分布を予測し、放射線遮蔽最適化の検討の基礎知見として、NDF、IRID等に研究成果を提供し、燃料デブリ取出し方式や取出し機器の設計に貢献
- 金属系炉心物質の移行挙動・化学的性状に関して知見を取得、その特性評価に基づき、1F2号機PCVペデスタルで観測された燃料デブリの特性を予測し、NDFでの燃料デブリ取出し及び分析計画の策定に貢献

「燃料デブリの性状把握」

燃料デブリの性状把握・分析技術の開発：１Fで採取した炉内付着物や実条件を模擬したデブリの性状調査・試験等によりデブリに関する未知の特性を解明し、デブリ取り出し方針の策定に向けた検討へ成果を提供

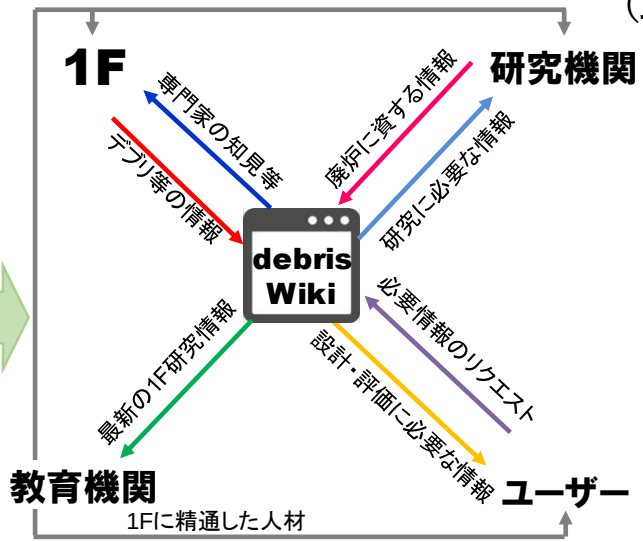
フランス（CEA）との共同研究



- コンクリートの浸食深さや生成物の性状を確認
- 燃料デブリ取り出しを想定した加熱・切断試験を行い、微粒子生成に関する知見を取得

- 1Fの実条件を模擬したMCCI試験を世界で初めて実施
- 燃料デブリの組成や特性に関する未知のデータを取得し、デブリ特性リストを作成

東電と共同で、廃炉に必要な情報のハブとなるツール（debrisWiki）を開発し、関係者に公開



- 分析データ
- 燃料デブリ特性リスト
- 事故進展に関わる最新知見
- 既往研究
- 廃炉における課題
- 未確認・未解決問題

燃料デブリ等分析について JAEAの報告書公開（JAEA-Review-2020-004）

１F廃炉対策タスクフォース

燃料デブリ等研究戦略検討作業部会

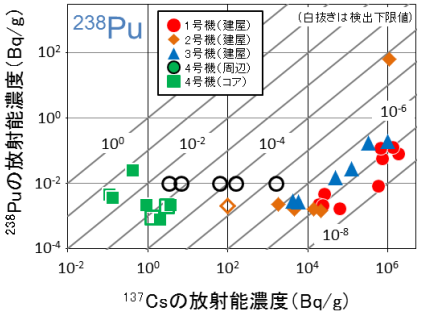
- 燃料デブリ取出し、処理・処分、事故原因の究明等における課題、その課題を解決するための燃料デブリの分析条件について検討
- 外部有識者を含むタスクチームにおいて報告書をレビュー

アウトカム

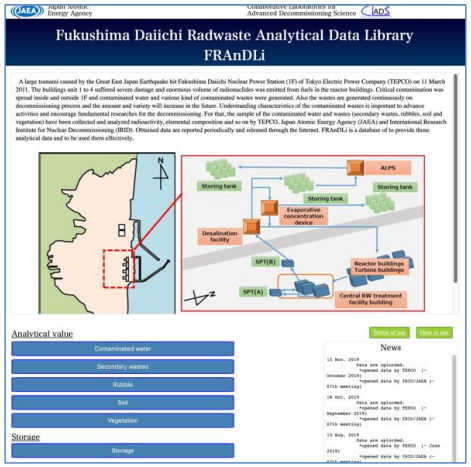
●大規模MCCI試験生成物の解体時の状況やサンプルの分析結果から、燃料デブリの取出し方法の検討に対する提言をとりまとめ、NDFに提供。戦略プランにおける取り出し工法検討に大きく貢献

「放射性廃棄物の処理・処分」

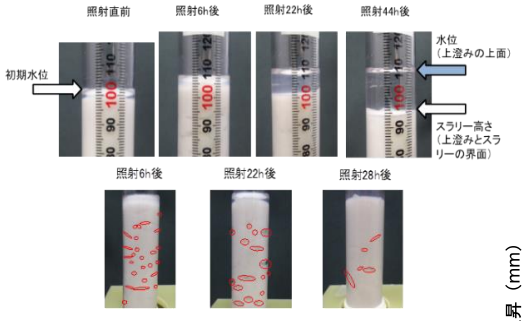
放射性廃棄物の処理処分：中長期ロードマップに沿った着実なデータや要素技術に関する知見の蓄積、東京電力が求めるデータ等の提供



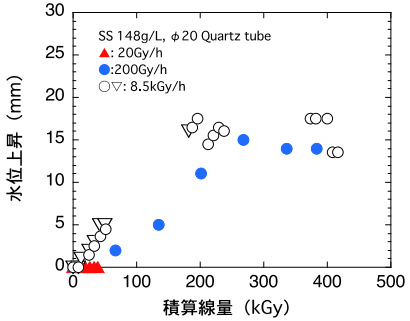
原子炉建屋内及び周辺で採取したガレキ試料から検出された核種の濃度（^{137}Csに対するプロット）



分析データを検索、閲覧できるデータベース“FRAnDLi”（英語ページ）



模擬炭酸塩スラリーの照射実験の様子（805 kGy/h）
水位上昇（上）とスラリー内の気泡の蓄積（下）



積算線量と水位上昇の関係（固形分濃度 148g/L、室温、大気）

- 分析試料を1Fから分析施設へ輸送して分析を行い、データを順次廃炉・汚染水対策事務局へ報告している。また、技術者・研究者の利用を促進するためデータベースを作成した。

- 多核種除去設備にて発生したスラリーの保管中に、容器から水があふれる事象に関して、模擬実験により事象を再現し、保管管理方法の検討に資する基礎データを得た。データは東京電力による対策に利用された。

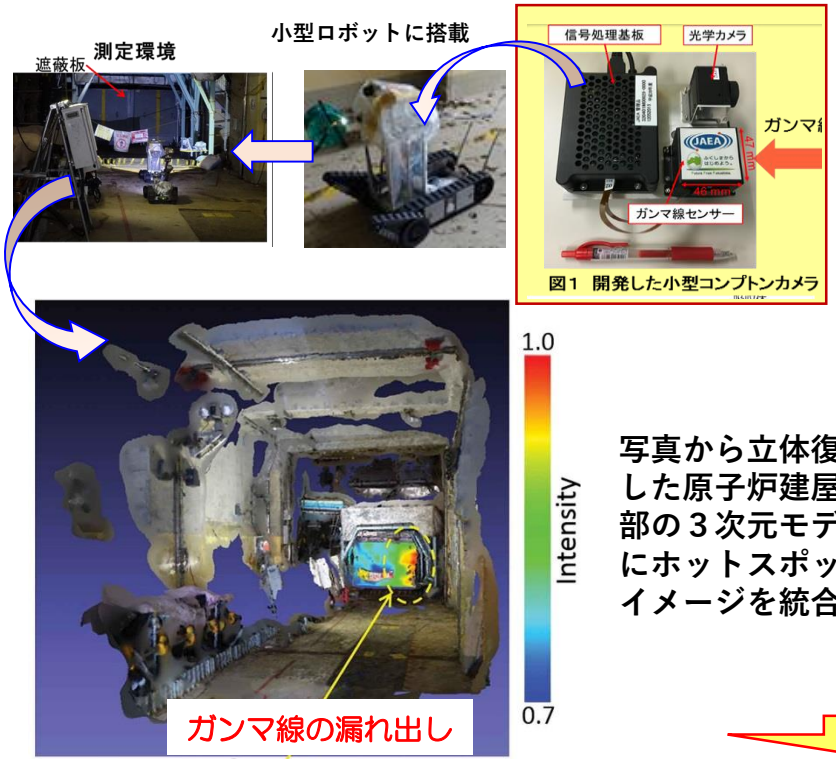
アウトカム

- **１F廃棄物分析データを蓄積、放射能量推定に必要な基盤的解析モデルを構築、処理処分の検討に貢献**
- **長期的安定保管が求められる廃棄物の性状と安全上の基礎的なデータ、知見を東京電力に提供し、現地の廃棄物の保管対策に反映**

「遠隔計測技術開発」

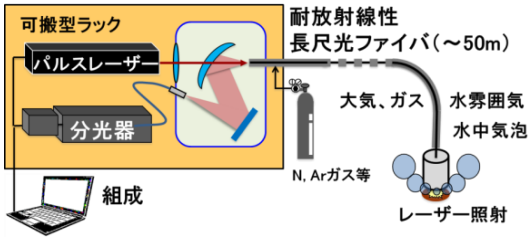
放射線可視化技術：三次元可視化計測技術の1F現場実装に大きく前進した。
レーザー遠隔分析技術(LIBS)：デブリ取出し時のスクリーニング技術の有力候補に！

機構で開発した可視化技術により、3号機原子炉建屋1階、X-6ペネ付近において東京電力担当者が実施した、放射性物質の分布状況調査結果

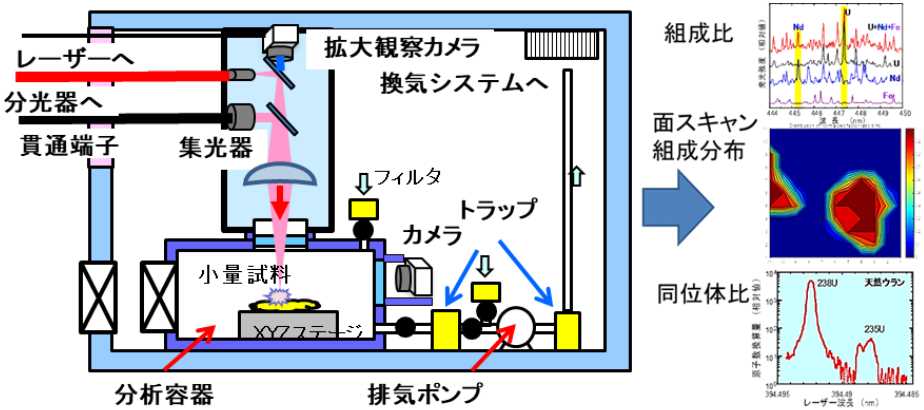


写真から立体復元した原子炉建屋内部の３次元モデルにホットスポットイメージを統合

可搬型光ファイバ型レーザー誘起発光分析装置（LIBS)の原理



LIBSを適用したデブリ取出し時のスクリーニング分析（概念）



アウトカム

- 機構が開発した放射線可視化システムを、東京電力担当者が、自ら操作・利用し、放射性物質の分布状況調査を可能とした。機構の研究成果が1F実装に向けて大きく前進した。
- 東電の要請に基づき、1F原子炉建屋内で利用可能なシステムの設計・調査を令和2年度から受託することが決定した。
- デブリ取出し時のスクリーニング分析手法としてレーザー遠隔分析手法(LIBS)が有力候補として検討されている。

「英知事業」での取り組み

英知事業

英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業

- 戦略的原子力共同研究プログラム 20課題
- 廃炉加速化研究プログラム
  - 国内研究 12課題
  - 国際共同研究 10課題（日英、日米、日仏）
- 廃止措置研究・人材育成等強化プログラム 7課題

- 廃炉研究等推進事業費補助金
  - 共通基盤型原子力研究プログラム 18課題
  - 課題解決型廃炉研究プログラム 18課題
  - 国際協力型廃炉研究（日英、日露、日米）共同研究 8課題
  - 研究人材育成型廃炉研究 4課題

文部科学省事業（2015～2020年度） → **JAEA事業（2018年度～）**

2018新規採択課題から**JAEA/CLADS対象の補助金事業**へ移行

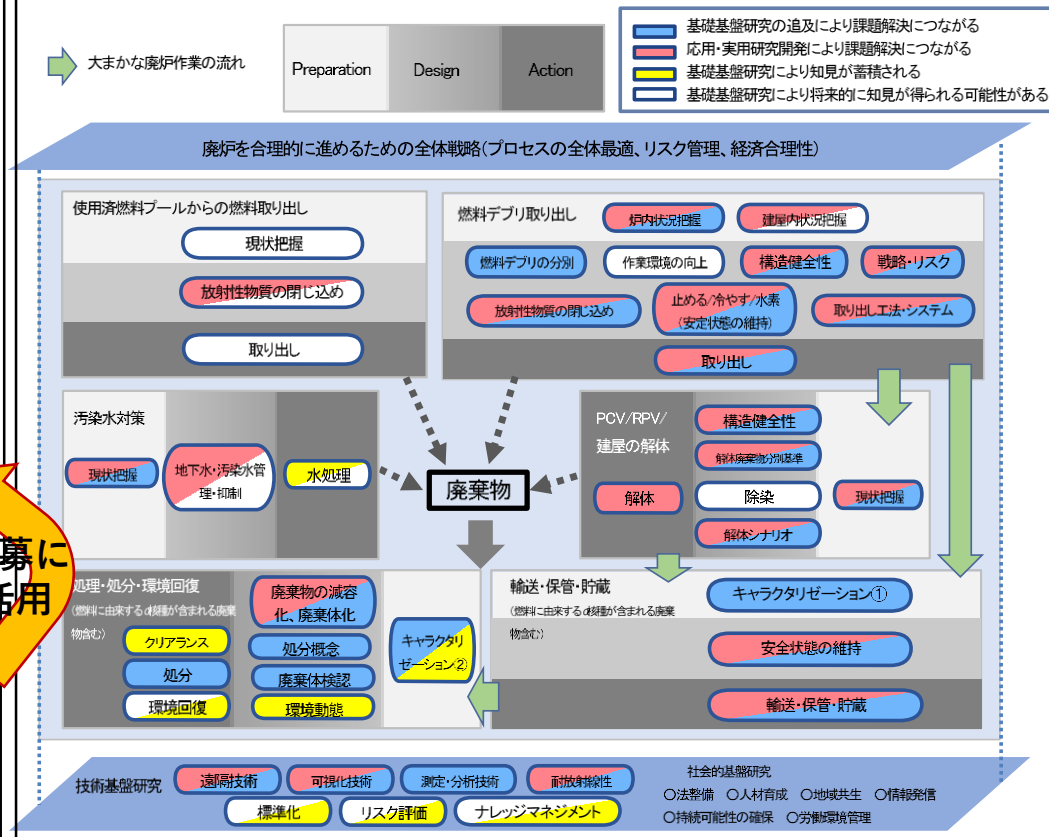
公募に活用

6つの重要研究開発課題

- 燃料デブリの経年変化プロセス等の解明
- 特殊環境下の腐食現象の解明
- 画期的なアプローチによる放射線計測技術
- 廃炉工程で発生する放射性飛散微粒子挙動の解明（αダスト対策を含む）
- 放射性物質による汚染機構の原理的解明
- 廃炉工程で発生する放射性物質の環境中動態評価

公募に活用

基礎・基盤研究の全体マップ



「英知事業」での採択課題

共通基盤型原子力研究プログラム	研究代表
ウラニル錯体化学に基づくテーラーメイド型新規海水ウラン吸着材開発	東京工業大学
動作不能からの復帰を可能とする多連結移動ロボットの半自律遠隔操作技術の確立	電気通信大学
一次元光ファイバ放射線センサを用いた原子炉建屋内放射線源分布計測	名古屋大学
低線量・低線量率放射線被ばくによる臓器別酸化ストレス状態の検討	東北大学
単一微粒子質量分析法に基づくアルファ微粒子オンラインモニタリングに向けた基礎検討	大阪大学
幹細胞動態により放射線発がんを特徴付ける新たな評価系の構築	量子科学技術研究開発機構
耐放射線性ダイヤモンド半導体撮像素子の開発	産業技術総合研究所
被災地探査や原子力発電所建屋内情報収集のための半自律ロボットを用いたセマンティックサーベイマップ生成システムの開発	東京工芸大学
汚染土壌の減容を目的とした重液分離による放射性微粒子回収法の高度化	筑波大学
ラドンを代表としたアルファ核種の吸入による内部被ばくの横断的生体影響評価	岡山大学
炉心溶融物の粘性及び表面張力同時測定技術の開発	大阪大学
iPS細胞由来組織細胞における放射線依存的突然変異計測系の確立	東京工業大学
レーザー共鳴イオン化を用いた同位体存在度の低いストロンチウム90の迅速分析技術開発	東京大学
放射性核種の長期安定化を指向した使用済みゼオライト焼結固化技術の開発	芝浦工業大学
燃料デブリ取り出しを容易にするゲル状充填材の開発	大阪大学
レーザー蛍光法を用いた燃料デブリ変質相の同定	東京大学
過酷炉心放射線環境における線量測定装置の開発	木更津工業高等専門学校
レーザー加工により発生する微粒子の解析と核種同定手法の開発	東京大学

研究人材育成型廃炉研究プログラム	研究代表
燃料デブリ取り出し時における炉内状況把握のための遠隔技術に関する研究人材育成	東京大学
化学計測技術とインフォマティックスを融合したデブリ性状把握手法の開発とタイアップ型人材育成	福島大学
放射線・化学・生物的作用の複合効果による燃料デブリ劣化機構の解明	東京工業大学
燃料デブリ分析のための超微量分析技術の開発	東北大学

「英知事業」での採択課題

課題解決型廃炉研究プログラム	研究代表
燃料デブリにおける特性の経年変化と環境劣化割れの調査	東京大学
健全性崩壊をもたらす微生物による視認不可腐食の分子生物・電気化学的診断及び抑制技術の開発	物質・材料研究機構
遮蔽不要な臨界近接監視システム用ダイヤモンド中性子検出器の要素技術開発	高エネルギー加速器研究機構
α／β／γ線ラジオリシス影響下における格納容器系統内広域防食の実現：ナノバブルを用いた新規防食技術の開発	東北大学
β、γ、X線同時解析による迅速・高感度放射性核種分析法の開発	日本分析センター
合理的な処分のための実機環境を考慮した汚染鉄筋コンクリート長期状態変化の定量評価	東京大学
溶脱による変質を考慮した汚染コンクリート廃棄物の合理的処理・処分の検討	北海道大学
マイクロ波重畳LIBSによるデブリ組成計測の高度化と同位体の直接計測への挑戦	アイラボ株式会社
Multi-Physicsモデリングによる福島2・3号機ペデスタル燃料デブリ深さ方向の性状同定	早稲田大学
燃料デブリ取出しに伴い発生する廃棄物のフッ化技術を用いた分別方法の研究開発	日立GEニュークリア・エナジー株式会社
アパタイトセラミックスによるALPS沈殿系廃棄物の安定固化技術の開発	東京工業大学
拡張型スーパードラゴン多関節ロボットアームによる圧力容器内燃料デブリ調査への挑戦	東京工業大学
合金相を含む燃料デブリの安定性評価のための基盤研究	東北大学
ガンマ線画像スペクトル分光法による高放射線場環境の画像化による定量的放射能分布解析法	京都大学
燃料デブリ取出し時における放射性核種飛散防止技術の開発	東京大学
アルファダストの検出を目指した超高位置分解能イメージング装置の開発	東北大学
ナノ粒子を用いた透明遮へい材の開発研究	九州大学
先端計測技術の融合で実現する高耐放射線燃料デブリセンサーの研究開発	高エネルギー加速器研究機構

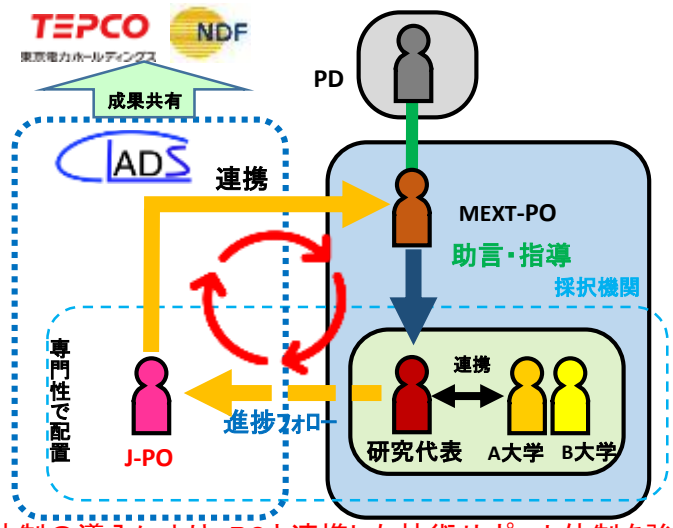
国際協力型廃炉研究プログラム	研究代表
革新的水質浄化剤の開発による環境問題低減化技術の開拓 （日英）	信州大学
無人航走体を用いた燃料デブリサンプルリターン技術の研究開発 （日英）	海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所
燃料デブリ取出し臨界安全技術の高度化 （日露）	東京工業大学
微生物生態系による原子炉内物体の腐食・変質に関する評価研究 （日露）	慶應義塾大学
高い流動性および陰イオン核種保持性を有するアルカリ刺激材料の探索と様々な放射性廃棄物の安全で効果的な固化 （日英）	北海道大学
再臨界前の中性子線増に即応可能な耐放射線FPGAシステムの開発 （日英）	静岡大学
放射性微粒子の基礎物性解明による廃炉作業リスク低減への貢献 （日英）	茨城大学
放射線耐性の高い薄型SiC中性子検出器の開発 （日英）	京都大学

「英知事業」での取り組みの例

現場適用に向けた研究支援

- 研究段階から実用化への橋渡しを支援策するため、現場ニーズにマッチする研究について、実用化に必要となる研追研究や改善を支援する。
- “死の谷”を渡るための支援を行う。

J-PO体制による研究サポートの強化



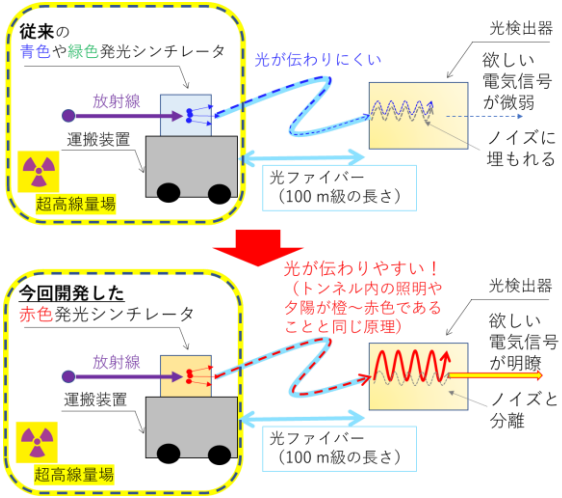
J-PO体制の導入により、POと連携した技術サポート体制を強化

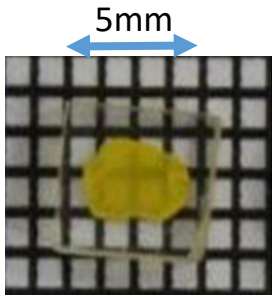
革新的発光材料の開発と1F炉内放射線計測への活用

研究代表者：黒澤 俊介（東北大）　　受託期間：平成30～令和2年度

○1Fの原子炉内の放射線量を測定するには遠隔での作業が前提となるため、高い放射線環境下で正常に動作し、かつ離れた場所まで信号（光）を伝送する技術が必要。しかし、従来のシンチレータ（青や緑色の発光）では発光量が低く遠隔まで光を届けることが困難であった。

○英知事業において、高い発光量を有する赤色発光の新規シンチレータを開発。光ファイバーや光検出器と組み合わせ、高線量下で遠隔で放射線量を測定することに成功。





開発した新しいシンチレータ素子

【成果の展開・応用】

○東京電力から、当該システムを令和４年度以降１Ｆの原子炉内部調査で活用したいとの要望が寄せられた。

○令和３年度、東京電力からも費用を得て、現場適用に向けたシステムの小型化や光ファイバーの長尺化等の機能の向上及び現場適用に向けた課題の検証等を実施予定。

内容

1. 研究開発の体制とこれまでの取組み

2. 研究開発成果

3. 研究開発体制の強化と今後の課題への取組み

研究開発体制の強化

- 「廃炉・汚染水対策事業」の事務局に参画（2020年度～）
- プロジェクトの企画立案及び進捗管理の両方の機能を強化

経済産業省

文部科学省

支援

支援

廃炉・汚染水対策事業

ＮＤＦ

技術戦略プラン
「廃炉研究開発連携会議」

英知事業

成果

成果

ＩＲＩＤ等

応用～実用化研究

ＪＡＥＡ

基礎・基盤～応用研究

成果

公募

大学等

基礎・基盤研究

- 現場適用者としての研究開発への関与を明確化
- 研究実施主体と共同での交付申請を行う 等

東京電力

「廃炉中長期実行プラン2020」

- 廃炉全体の主要な作業プロセス
- 「中長期ロードマップ」や原子力規制委員会の「リスクマップ」に掲げられた目標を達成していく

研究開発中長期計画の策定

「中長期ロードマップ」

技術戦略プラン

「廃炉中長期実行プラン2020」

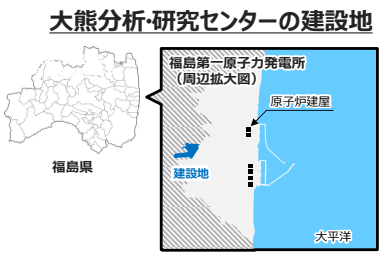
「研究開発中長期計画」
（NDF、東京電力）

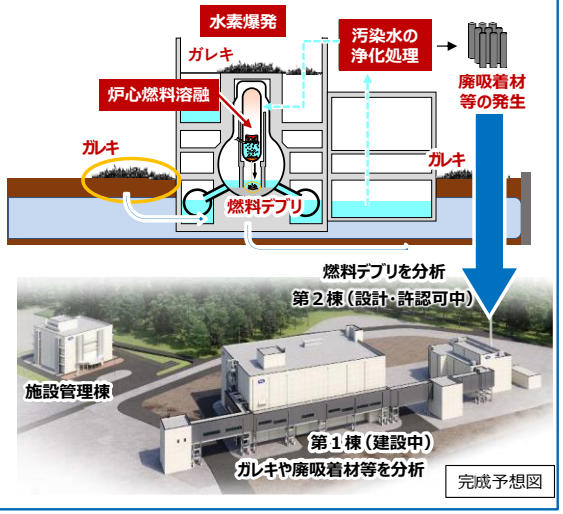
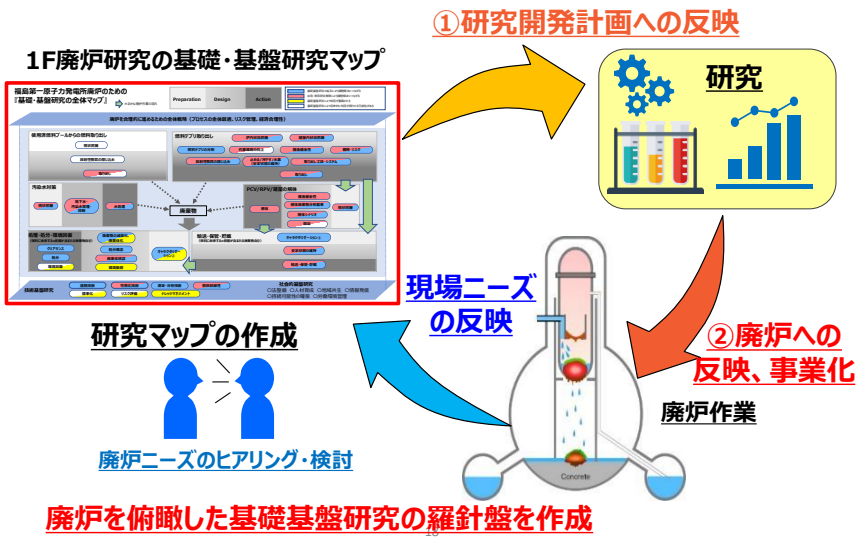
- 今後約10年間の研究開発の全体を俯瞰
- 「廃炉・汚染水対策事業」と「英知事業」との連携強化

今後の課題

- ◆より難易度の高い技術的課題への取り組み
  - ➢ デブリの取り出し、分析とその結果を活用した炉内状況把握、事故進展の解明
  - ➢ 放射性廃棄物の処理・処分（瓦礫や水処理2次廃棄物など）
- ◆研究実施主体としてより多様なプレーヤーが参加
  - ➢ 海外の研究機関との連携
  - ➢ 福島県地元企業の活用
- ◆国、NDF、東京電力、JAEAがより緊密に連携
- ◆中長期的な計画、目標をもとに、基礎・基盤研究から現場実装まで、適切に資源配分を行いながら技術をつなげていく

放射性物質分析･研究施設の整備





マップを基軸とした研究と現場の連携強化