

6つの重要研究開発課題の今後の基本的方向性について（案）

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(平成29年9月26日)では、廃炉に必要となる研究開発(ニーズ)と大学・研究機関の基礎・基盤的な研究開発(シーズ)をマッチングさせるための活動や人材育成等の取組の強化を進めることとされており、こうした活動の中心的な組織として、日本原子力研究開発機構廃炉国際共同研究センター(JAEA/GLADS)の機能を強化し、国内外の大学・研究機関等との共同研究等を推進することにより、関係機関が一体となり、叡智を結集した国際的な廃炉研究拠点の形成を目指すこととされている。

これを受けて現在、平成30年度文部科学省概算要求では、廃炉研究開発委託事業である「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」を発展的に改組し、平成30年度以降の新規採択課題については、JAEA/GLADS を中核とした体制により実施していく方針とされているところである。

この実施に当たっては、文部科学省としては、ニーズを十分に踏まえた基礎・基盤研究を推進するとの観点から、研究連携タスクフォースで選定された重要研究開発課題を踏まえ、公募テーマの選定も含めた今後の研究開発の進め方について議論をしたいとの意向を有している。

このため、研究連携タスクフォース中間報告(平成28年11月30日)において選定された6つの重要研究開発課題に関して、課題別分科会における議論も参考にしつつ、課題の背景、ニーズ側の問題意識、想定される研究のイメージなどを含め、研究開発を進めていく上での基本的方向性について作成した。

課題名	① 燃料デブリの経年変化プロセス等の解明
中間報告における「問題意識」の記載	<p>燃料デブリの取出し時期は、平成 33 年以降と想定されており、燃料デブリ生成後 10 年経過後となる。さらに、その後の燃料デブリ取り出しはある程度の長期間を要すると予想され、燃料デブリは炉内環境中で十年以上留まることとなる。さらに、取出した燃料デブリを安全に保管しなければならない。燃料デブリ取り出し方法の検討及び移送・保管方法を検討する上では、燃料デブリの経年変化予測が必須である。</p>
基本的方向性	<p>チェルノブイリ原子力発電所事故においては、燃料デブリ周辺から燃料成分を含むミクロンオーダーの微粒子の検出が報告されており、ウクライナ政府のナショナル・レポートにおいても、自己崩壊による放射性ダスト発生リスクが時間とともに増加することが懸念されている。この原因としては、高い放射能を有する燃料デブリが湿潤な大気環境に曝されたため、放射能分解を媒介した酸化反応によって六価ウラン化合物が生成し、地質環境中のウラン鉱物では極めて緩慢にしか進行しないような経年変化事象が短期間に発生したなどが考えられる。一方、1F の原子炉格納容器(PCV)内は現状で微正圧の窒素雰囲気下にあるため、このような事象は顕在化していない。今後、燃料デブリ取り出しのため負圧管理がなされると、酸素を含む空気が PCV 内部に流入するため、同様の事象が発生するおそれがある。1F では同様な環境下に置かれたスリーマイル 2 号機(TMI-2)事故(操業間もなく発生)の燃料デブリに比べて、放射線レベルがほぼ一桁高いため、過去に経験のない条件となる。また、TMI-2 よりも事故発生後、デブリ取出し終了までの期間が長期にわたることにも留意する必要がある。</p> <p>こうした燃料デブリの経年変化には、上記の酸化のみならず様々な要因があると考えられる。大きく分けると、化学的メカニズム(酸化還元、含有成分の溶出、放射線による化学形・相状態の変化など)、物理的メカニズム(熱サイクル等による構造・特性変化、アルファ線による照射損傷など)と、これらの連成作用が想定される。</p> <p>経年変化による燃料デブリの崩壊や溶出は、燃料デブリ中に閉じ込められている FP 粒子・ガス放出や、アルファ核種を含む微粒子の流出等の事態をもたらすため、取り出し機構、冷却循環系、閉じ込め機能、臨界監視システム、PCV ガス管理システム、被ばく評価、収納・移送・保管、処理・処分などのシステム設計・手順に大きな影響を与えるものである。特に、中長期ロードマップでは燃料デブリの処理・処分方法については燃料デブリ取り出し開始後の第 3 期(2022 年以降)に決定するとしており、燃</p>

燃料デブリの経年変化に関する情報の取得は喫緊の課題である。安全規制に係る許認可対応も念頭に、燃料デブリの経年変化とそれに伴うリスク変化について十分な予測・説明が可能となるよう、廃炉作業にクリティカルな影響を与え得ると考えられるものから優先的にその実態を解明していく必要がある。

このため、既存のアクチノイド化学の知見も活用しつつ、経年変化に影響を与えうるパラメタ（温度、pH等）ごとにマトリックス的に実ウランを用いた実証実験を行い、基礎データを収集するとともに、経年変化の予測手法を確立するべく、経年変化プロセスを解明して経年変化モデルの基礎理論を構築するべきである。この際、燃料デブリ物性検討の基礎となるアクチノイド化学を推進するための基盤維持に配慮すべきである。さらに、発熱分布計算による燃料デブリの温度分布の把握等を行い、崩壊熱による局所的な温度上昇の影響についても検討する必要があるため、1Fにおける熱解析も検討のベースとして含むべきである。

課題名	② 特殊環境下の腐食現象の解明
中間報告における「問題意識」の記載	高放射線環境や非定常な経路での冷却水などの1F廃炉の特殊環境を勘案した幅広い環境条件下での腐食データを取得し、廃炉において発生する可能性のある腐食現象の解明を行う。
基本的方向性	<p>沸騰水型原子炉（BWR）はさまざまな金属素材から構成されている。高温かつ高酸化性環境となる炉内では耐食性のあるステンレス鋼が使用されているが、大気中での使用を想定し、閉じ込めバウンダリとなっている原子炉格納容器（PCV）は耐食性の低い炭素鋼が使用されている。一方、これまで商業用発電炉における構造物・配管等の腐食に関して多くの知見が取得されてきており、特に、BWRの運転においては、高放射線、高温、高純水が重畳する環境での腐食データに着目してデータが採取されてきた。</p> <p>しかしながら、事故後の1Fでは、高放射線、室温、懸濁物・堆積物が存在する特殊な環境となっており、同環境での腐食現象に関する知見は不足している。燃料デブリの冷却のためにPCV内に注水が行われており、炭素鋼が水に浸漬している状態となっている。また、水の放射線分解により過酸化水素水や各種のラジカル種などの酸化性化学種が発生することが知られている。現在は、水素爆発防止のために、PCV内に窒素封入が行われており、気相中の酸素濃度が低下したことで、水中の酸素濃度、過酸化水素水濃度も低下しているとみられることから、PCVの腐食はある程度抑制された状態と推測される。今後、燃料デブリ取り出しに当たっては、負圧管理により酸素を含む大気がPCV内に流入することになることから、放射性物質の閉じ込めバウンダリとなる構造物・配管の健全性の維持が重要であり、このような環境における腐食現象への知見に基づいた対策が必要である。</p> <p>腐食現象は本質的には電池反応であるため、周囲の水質条件が低下し、水の導電率の増加、pHの低下、電位の上昇などが生じると発生しやすくなる。上述の窒素封入により全体的には腐食がある程度抑制されているとはいえ、潜在的に腐食が進行しやすい状態にあり、局部的に環境条件が変化するとその部位での腐食速度が増加するとみられる。例えば、結露等による液膜生成や水面近くでの濡れ渴きの繰り返しなどの湿潤環境、落下物・堆積物の隙間部など多様な形状における非定常な経路での冷却水の流れ・対流・よどみの存在、異種金属接触時のアノード側の腐食進行、微生物等による酸塩基反応の進行など、潜在的なものも含め、種々の腐食促進要因に囲まれたきわめて特殊な環境にある。今後、燃料デブリ取り出しの</p>

ため負圧管理などがなされると、酸素を含む大気がPCV内に流入し、内部環境はさらに変化するものと予想される。特殊環境条件における長期にわたる廃炉作業の過程で腐食は刻々と進行していくことに鑑み、廃炉工程の進展に伴い生じる環境変化を踏まえた腐食現象の予測と対策の検討が必要である。

このため、上記に例示した要因をはじめ、発生可能性・機能への影響（部位と深刻度）・規模・時間などから廃炉作業にクリティカルな影響を与え得ると考えられるニーズの高い要因から優先的に、安全規制に係る許認可も念頭におきつつ、構造物の腐食とそれに伴うリスク変化について十分な予測・説明が可能となるよう、腐食現象の進行に係る基礎データを収集して、その現象を体系的に解明・把握することが求められている。この際、既存の防錆剤の利用のみならず電気防食などさまざまなアプローチを検討するため、特殊環境下における材料の電子状態をはじめ、腐食進行メカニズムを原理的に分析・解明することを通じて、特殊環境下における腐食現象に係る知見を蓄積・維持していくことが必要である。

課題名	③ 画期的なアプローチによる放射線計測技術
中間報告における「問題意識」の記載	<p>福島第一の炉内及び建屋内は事故の影響で非常に高い放射線環境となっている。炉内状況や建屋内状況を調査する上で、現行の放射線測定装置では性能・機能上限界がある。そのため、福島第一でのニーズを踏まえた上で、新たな発想、原理を用いた画期的な放射線計測装置の開発を行う必要がある。</p>
基本的方向性	<p>放射線計測装置には、電離箱、計数管、半導体検出器、シンチレーション検出器をはじめ、さまざまな原理や素材を用いたものが既に製品化されており、現在では計測に関する詳細な知識がなくても一定の操作手順に従えば放射線計測を行うことができる状況にある。しかしながら、1F地下水観測孔採取水の分析において、分解時間における数え落としを考慮していなかったため、全ベータの値とストロンチウム90の値に齟齬（データの逆転）が生じた事例があるように、計測データの解釈・トラブル対応においても、装置に関する原理的な理解を要する場合が想定されるため、計測人材を育成する観点はきわめて重要である。</p> <p>また、1F廃炉現場において炉内状況や建屋内状況を調査する上では、一般に製品化された放射線計測装置では性能・機能上の限界がある。1Fにおいて廃炉作業を実施する放射線環境はこれまでの原子力施設での作業環境に比べはるかに高い放射線環境であり、かつそのため遠隔で取り扱う必要がある。高線量に対する耐放射線性を持ちかつ遠隔で取り扱うため小型化した測定センサー、電子回路及びシステムの開発が求められている。なお、高線量場での耐放射線性の高いセンサー、回路等の開発においては材料の放射線損傷に係る基礎メカニズム的な研究も求められると考えられる。センサー等の開発の具体例としては、高ガンマ線のバックグラウンド下において、臨界防止等の観点からは中性子の計測、燃料デブリ特定の観点からはアルファ線のリアルタイム計測、核種推定の観点からはエネルギー分解能の高いガンマ線計測などを、耐放射線性、ノイズ耐性、サイズ（小型）、計数率・応答性、高線量率対応、エネルギー弁別性、空間分解能（線源位置特定）、操作性、メンテナンス性など種々のニーズを満たしつつ実現する測定装置が求められている。また、測定対象の組成についても、別途の施設・設備やサンプルの移送を必要とせず、現場で迅速に分析でき、ある程度のデータが得られ対象物がデブリか否かを速やかに判別する機能、デブリの場合は炉内構造物や中性子吸収物質等の共存を判別する機能のニーズがあり、いわゆる「その場分析」の技術開発が求められる。</p>

さらに、放射線の測定結果を用いて、線源の強さや線源の方向等の情報を基に線量場や汚染状況等を可視化したり、燃料デブリのプロファイルを明らかにするなどの技術開発も廃炉作業を進める上で有効な支援ツールとなる。

これらをはじめ、現場の計測ニーズをくみ取りつつ、それを解決する新たな発想・原理を用いた画期的なアプローチによる放射線計測の基盤技術を開発する必要がある。

課題名	④ 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）
中間報告における「問題意識」の記載	燃料デブリを機械的又はレーザー等により高温で切削する場合、多量の α ダストが発生すると予測され、安全上の対策、閉じ込め管理が必要となる。そのために、 α ダストの物理的・化学的性質等の性状把握、切削方法毎のダストの発生量予測とそれらを踏まえた閉じ込め対策の検討を行い、デブリ取り出し時の安全確保を図る。
基本的方向性	<p>1Fにおいて燃料デブリ取り出し作業が開始されると、燃料デブリの切削により多量のα核種を含む放射性飛散微粒子（αダスト）が発生し、バウンダリ内に飛散することとなる。燃料デブリ取出しにおいては、閉じ込めバウンダリとなる建屋構造物が破損した状態での作業となるため、その閉じ込め性能の確保の検討、排気の浄化系の設計、事故時を含めての周辺環境及び作業員の被ばく評価等を行う上では、αダストに係る性状の把握が重要である。</p> <p>これまでαダストが発生した場合の飛散率等に関するデータは、日本原子力研究開発機構におけるJPDRの廃炉、核燃料サイクル工学研究所のグローブボックス解体などに際して取得されたデータが存在する。しかしながら、これらは核燃料そのものではなく、核燃料により汚染された物が対象であり、また、取得されているデータも放射性物質質量や濃度などであり、主に被ばく管理の観点から必要なデータを取得していることが多く体系的になされていない。</p> <p>一方、1F廃炉工程で発生する放射性飛散微粒子は、燃料デブリの取出し時に燃料デブリそのものから発生するもの及び汚染された物から発生するものがある。また、放射性物質の種類としてはα核種及びβ γ核種がある。内部被ばくの観点ではプルトニウムを代表とするα核種が重要であるが、総合的な被ばく評価の観点からは、セシウムなどのβ γ核種についても考慮する必要がある。</p> <p>放射性飛散微粒子の回収、効率的なろ過・浄化及び臨界防止等を検討する上では、放射性飛散微粒子の生成について、切削対象物、切削方法の違いによる微粒子の発生量、粒径分布、放射能粒子径及び粒子の物理的・化学的性質の把握が必要である。また、発生した微粒子の輸送・移行について、気相中の挙動、気液界面における挙動及び液相中における挙動の把握が重要である。例えば、気相中での凝集等による粒子成長、気液界面からのミスト生成評価、液相中の水中への成分の溶出挙動、微</p>

粒子の水中での沈降、フィルタリング等の移行挙動の把握などが考えられる。

また、放射性飛散微粒子による被ばく評価については、燃料デブリ由来の放射性物質、特に α 核種による被ばく影響評価が重要であり、この際、プルトニウムに代表される放射性飛散微粒子の化学形態や粒子径がこれまでのプルトニウムの内部被ばく評価の基準となっている化学形態や粒子径と合致しており従来の被ばく評価方法が適用できるかどうか重要である。

課題名	⑤放射性物質による汚染機構の原理的解明
中間報告における「問題意識」の記載	建屋内の線量率を低減するためには、汚染源に対して汚染機構を踏まえた効果的な除染を行うとともに、同時にできるだけ無駄な廃棄物を出さないことが重要である。これに向けて効果的な除染のための汚染機構の原理的解明を目指す。
基本的方向性	<p>建屋内の線量低減に向けた除染の対象物としては、配管・ダクト、機器等の金属、ケーブル等の樹脂類、塗装類及び壁・床等のコンクリートが挙げられる。汚染源としては、事故時の高温燃料溶融、水素爆発等により漏出した Cs 等の放射性物質を含んだ蒸気、粉塵及び放射性物質を含んだ汚染水などである。現在、1F 建屋内の線量低減については、床・壁等の除染を行っても、配管内部に存在する汚染源、高所にあつてアクセス困難な配管背面等の汚染、隙間部に浸透した汚染等の汚染源の寄与が残るため限界があるのも事実であるが、今後の長期にわたる廃炉工程の各ステップを考えた場合、除染の必要な場面が数多く発生すると考えられ、効果的・効率的な除染の必要性は高いと考えられる。また、除染においては線量低減と同時に廃棄物の低減についても考慮しておく必要がある。</p> <p>除染については、物理的な方法としてのドライアイスブラスト、化学的な方法として酸・アルカリ等の薬品を用いた化学除染、剥離剤を用いた除染方法等のエンジニアリング的アプローチが必要である一方、こうした除染を効果的に行うためには対象物の汚染機構までさかのぼった理解が不可欠である。</p> <p>汚染機構の解明の観点での研究は、放射性物質を内包して閉じ込めるために使われる配管、貯槽類の金属材料に対しては既往の研究が十分あるものの、構造体、放射線遮へい体として放射性物質と直接接触する使用方法を基本的に行わないコンクリートではほとんど行われていない。</p> <p>1F 建屋内は事故により放出された放射性物質により広範囲に汚染している。建屋の大部分はコンクリートにより構成されており、廃炉工程の各ステップで必要となるコンクリートの除染及び廃炉工程で発生するコンクリート廃棄物の廃棄物管理を合理的効果的に行うためには、コンクリートと放射性物質の汚染機構の原理的解明が重要である。そこで、事故時及びその後の環境に晒されたコンクリートと 1F 廃炉において、考慮すべき代表核種 (Cs, Sr, U, Pu 等) の収着・浸透・溶出に関する基礎データを取得し汚染機構を原理的に明らかにするべきである。更には、中長期を見通し、時間経過とともにコンクリート中の汚染状況や浸透挙動がどのように</p>

変化するかなど、汚染機構の理解に裏付けられた評価手法の確立が求められる。

配管、機器等の金属に対する放射性物質の汚染機構については再処理等において配管等の汚染源の除去については研究がなされているものの、1Fの環境条件での配管、機器等の金属に対する汚染機構についての研究事例は少ない。事故時の高温環境に晒された PCV や RPV 内部での汚染機構の解明は必要と考えられるが、PCV 外部では金属に浸透するような特別な汚染機構の考慮は必要ないと考えられる。ケーブル等の樹脂や塗装に対する汚染機構についても、交換、除去が可能なものであり特に除染のための研究は必要ないものと考えられる。

課題名	⑥廃炉工程で発生する放射性物質の環境中動態評価
中間報告における「問題意識」の記載	放射性物質の環境影響について問題のないことを確認するため、放射性物質の浅地下環境中での吸着、地下水に伴っての拡散や移動等の挙動を解明し環境影響評価につなげる必要がある。
基本的方向性	<p>福島第一原子力発電所敷地内の放射性物質による将来の環境影響リスクを適切に評価・低減していくためには、敷地内の浅地中地下水や表層水、あるいは敷地境界周辺における港湾や海洋、大気等を経由する放射性物質の環境中動態の適格な評価・推定と適切な環境対策が必要である。</p> <p>対象となる放射性物質は、①事故直後に漏えいした汚染水などにより地中や地表に存在する放射性物質（^{137}Cs、^{90}Sr、^3H等）、②同様に港湾内に過去に流れ込み海底部等に存在する放射性物質（^{137}Cs、^{90}Sr等）、及び③燃料デブリ取出しや建屋の除染・解体に伴い発生する汚染水が含有する放射性物質（アクチニド等のイオンや懸濁体を含む）等で将来の環境影響リスクのソースタームとなり得るものが想定される。</p> <p>放射性物質の周辺環境への影響評価を行うためには、まず必要な基礎的知見として放射性物質の存在形態と輸送挙動の把握が不可欠である。具体的には、放射性物質の地下水中での存在形態、土壌との分配、地下水中の移流・拡散挙動、表層における存在形態と移流・拡散、港湾における海水中や海底における放射性物質の存在形態と溶融・拡散挙動、さらには海洋や大気を介した周辺環境への移行挙動が対象となる。</p> <p>いずれも土壌や地質等の媒体の特性に依存するが、1F現場での測定には限界があるため、類似する環境下での評価方法の確立を目指す必要がある。</p> <p>さらに、環境中動態の正確な将来推定を行うためには、汚染状態を正確に把握するモニタリング技術と放射性物質の移動挙動をシミュレートする解析技術の開発が必要である。モニタリング技術では、遠隔での長期にわたる連続測定技術と、そのビックデータを活用したマッピングや挙動把握技術が期待される。一方、シミュレーション技術では、浅地中に特有の挙動（不飽和層の影響、速度論等）を解析する新たな作成モデルの作成やコードを用いた推定技術の開発が望まれる。</p>

また、環境対策として放射性物質によるリスクの低減を目指すことが重要であり、汚染物質の拡散防止のための地下水量制御、土壌改良、安定化剤、汚染物質の浄化のための吸着剤、透過反応壁など多くの技術開発が想定されるが、廃炉作業にクリティカルな影響を与え得ると考えられるニーズの高い要因から優先的に検討していくべきである。

なお、これら放射性物質の環境動態の評価を合理的に行っていくに当たっては、その環境影響リスクを考慮し進めることが肝要であり、この観点で環境影響リスクにかかわる評価手法の開発についても視野に入れるべきである。