

東京電力（株）福島第一原子力発電所における
中長期措置に関する検討結果
(案)

平成23年 月

原子力委員会
東京電力(株)福島第一発電所
中長期的措置検討専門部会

目 次

	頁
1. はじめに	3
2. 福島第一原子力発電所における中長期の取組のあり方	
2-1. 中長期の取組への基本的考え方	5
2-2. 米国 TMI-2 における「クリーンアップ活動」	6
2-3. 中長期措置における時間的目標と取組の設定	9
2-4. 使用済燃料プール内燃料体並びに燃料デブリ取出し作業の分析	13
3. 福島第一原子力発電所における中長期の取組に効果的な研究関連課題	
3-1. 研究開発課題の抽出・整理	18
3-2. 研究開発に関する中長期ロードマップ	18
3-3. 研究開発の実施に際しての基本姿勢	19
4. 研究開発の推進体制	
4-1. 基本的考え方	21
4-2. 研究開発推進体制	21
5. 国際協力のあり方	24
6. 中長期措置全体への提言	25
7. おわりに	27
(付録 1) 東京電力(株)福島第一原子力発電所における中長期措置検討 専門部会の設置について	
(付録 2) 東京電力(株)福島第一原子力発電所における中長期措置検討 専門部会開催実績	

1. はじめに

東京電力（株）福島第一原子力発電所の1, 2, 3, 4号機は、本年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う大規模な津波に襲われ、大規模な炉心損傷や原子炉建屋の破損を生じる事態に至った。炉心内の放射性物質が大量に環境中に放散された結果、福島県を中心として広範囲にわたる地域が放射性物質により汚染されることになった。このため、災害対策本部の指示によって放射線影響を避けるために避難した多くの周辺住民が未だに帰宅できず、不便かつ不安な生活を強いられている。また、放射性物質による汚染の影響は更に広い地域においても発生しており、多くの国民が社会的、経済的、精神的な影響を受けている。さらに、軽水炉にこのような未曾有の事故が発生したことから、国際社会における原子力利用の動向にも大きな影響を与えている。

この現状を踏まえ、本部会は、被害及び影響を受けられた方々に対して心からお見舞いを申し上げるとともに、この事故がもたらした結果に対する「修復措置」を、迅速に進めなければならないと強く認識している。

政府及び東京電力（株）からなる政府・東京電力統合対策室は、本年4月に「東京電力福島第一原子力発電所・事故の収束に向けた道筋 当面の取組のロードマップ」（以下、「事故収束ロードマップ」という。）をとりまとめ、以降、これに基づいて、安定した炉心冷却システムを構築し安全な停止状態を継続することなどを目指す、事故を早期に収束させるための取組を計画的に進めてきた。これまでに、この事故収束ロードマップにおけるステップ1の目標である「放射線量が着実に減少傾向にある」状況は本年7月に達成され、ステップ2の目標である「放射性物質の放出が管理され、放射線量が大幅に抑えられている」状況についても、本年中に達成するべく、様々な取組が行われてきている。ステップ2の目標が達成されれば、原子炉施設（プラント）は一定の安定状態となり、当該プラントが敷地外に与える放射線影響は十分小さく抑えられることになる。

したがって、ステップ2完了以降は、これまでのプラント安定化に向けた取組から、確実に安定状態を維持する取組に移行していくこととなる。また、これに並行して、破損した建屋の状況を改善させる措置、建屋に保管されている使用済燃料の安全な場所への移送、炉心内の損傷した燃料の取出しとその処置をはじめとする、中期から長期に亘る措置を着実に進める必要がある。さらに、長期的には、これらのユニットを廃止する取組を行う事を想定する必要がある。この中期から長期に亘る取組を適切に計画し、これらの取組を着実に進めていく事が、地域住民の不安を解消する事に繋がり、更には、日本の原子力利用に対する信頼の回復にも繋がると考える。

この取組については、東京電力が責任を持って進めて行くべき事業であるものの、過去の

スリーマイルアイランド原子力発電所 2 号機（以下「TMI-2」という。）の事故後の修復措置の実績を参考にとすると、この取組は相当の長期間を要すると予想され、また、世界的に初めてとも言えるような高度な技術を適用する必要性も予想される。

本部会は、このような困難ではあるが極めて重要な事故収束の取組が東京電力によって着実に進められることの重要性に鑑み、取組の着実な進展を促し、これらの中長期の措置が可及的速やかに実施される事を支援するために、国が東京電力とこの中長期的取組のロードマップを共有した上で、その推進に向けて効果的と考えられる技術開発課題を早急に取りまとめるべきと判断した原子力委員会によって本年 7 月 21 日に設置された。そこで、本部会は、8 月 3 日から、この中長期的取組のロードマップを取りまとめ、その推進に必要な研究開発課題を同定し、その解決に向けての取組の分担のあり方及び推進に必要な制度の整備等の取組のあり方を検討する作業を開始した。11 月 11 日にはこの検討結果を取りまとめた報告書の草案を取りまとめ、パブリックコメントに付した。

本報告書はこうして取りまとめたものであり、第 2 章では、TMI-2 における修復措置の実績を参考として、複数のユニットが大きく破損し、高濃度の放射性物質に汚染されているなど、TMI-2 より厳しい状況にある福島第一原子力発電所における中長期措置について、現時点で考え得る計画の概要を明らかにしている。第 3 章では、これらの作業を行うために解決すべき技術課題を特定し、それぞれの課題の解決に向けて効果的と考えられる研究開発課題を抽出して取りまとめている。第 4 章ではこうして抽出された中長期措置に関する研究開発の実施体制について述べている。第 5 章では中長期措置に関わる研究開発の国際協力のあり方について述べている。第 6 章では中長期措置全体への提言をまとめている。第 7 章は結論である。

本部会は、本報告書が、福島第一原子力発電所におけるこのような困難で長期にわたる作業を的確に推進することを確かにするために、政府、産業界、研究機関等が内外の知見と技術を結集して、世界の原子力の安全基盤の強化にもつながるこれらの研究開発をタイムリーに行うことやこのために効果的な諸外国との連携・共同研究を推進することに向けて、速やかに準備を進めることに役立つことを期待する。加えて本研究開発は福島第一原子力発電所の中長期的な修復措置の遂行に必須のものであることから、確実に成果を出すとの不退転の決意をもって臨むことを関係者に期待する。

この中長期措置は地元自治体や住民の理解を得つつ進められることが極めて重要であるから、関係者間で常に対話がなされていくことを期待する。

2. 福島第一原子力発電所における中長期の取組のあり方

2-1. 中長期の取組への基本的考え方

事故収束ロードマップのステップ2の完了後の福島第一原子力発電所は、熱水力学的な振る舞いは一定の制御下にあるものの、本来の原子炉施設の設備や建物の多くが大きな損傷を受けており、原子力施設プラントとしては、極めて特殊な状態にある。特に、1、2、3号機では、炉心溶融が発生したので、核燃料が炉内構造物の一部と溶融した上で再度固化した状態（以下「燃料デブリ」という。）となって、原子炉圧力容器（以下「RPV」という。）下部に存在し、その一部はRPVから落下して原子炉格納容器（以下「PCV」という。）内にも存在している可能性がある。また、1、2、3、4号機の使用済燃料プール内には多数の使用済燃料体¹や新燃料体が残されている。そこで、放射性物質を多量に含むこれらの燃料体や燃料デブリを可及的速やかに原子炉本体から取出して安全な場所に移して、施設をより安全な状態にすることが、中長期の取組の目指すところである。

この取組を進めるにあたっては、水素爆発により原子炉建屋が大きく損傷していること、建屋内外に高線量のガレキが散乱していること、建屋内が放射性物質の飛散により高線量下にあること、地下には高線量の汚染水が滞留していること等により、人が容易には近づけない状況にあることから、公衆安全や作業安全に係るリスクを増大させないように、除染を徹底すること、難易度の高い遠隔操作の要求に応える技術を用意すること、モックアップを用いた準備作業を徹底することなどの工夫が求められる。

TMI-2においても、事故後は原子炉建屋内に放射性物質が飛散し、建屋内は高線量下となり、さらには地下には高線量の汚染水が滞留し、人が容易に近づけない状況であった。そこで、当初はこれらの除染に努力を注いだ。炉心については、福島第一原子力発電所と同様に大規模な損傷に至ったが、炉心燃料は大部分が燃料デブリとなってRPV内に留まっていたので、これを約11年かけて取出している。

福島第一原子力発電所はBWRであって、PWRであるTMI-2とは特に格納容器の構造が異なること、その事故による建屋や設備の損傷の度合いはTMI-2の場合より大きい。しかしながら、原子炉容器の中で炉心が溶融に至っていることはTMI-2と同様であるから、福島第一原子力発電所の中長期の取組を安全かつ確実に迅速に成功させるための方策を検討する上で、TMI-2での取組事例を参考とすることは極めて効果的と考える。そこで、以下2.2節においては、TMI-2の取組についてのレビューを行い、2.3節において、このレビュー結果をもとに福島第一原子力発電所で中長期に実施すべき取組をまとめ、

¹ウランペレットが充てんされた燃料棒を束ねたものを指す

2.4節では、この取組の主要な作業である使用済燃料プールからの燃料体の取出し作業と燃料デブリの取出し作業について分析を行い、とりまとめた。

2-2. 米国TMI-2における「クリーンアップ活動」

(1) TMI-2における「クリーンアップ活動」の概要

1979年3月に発生したTMI-2事故は、一次冷却水の喪失によって炉心燃料が溶融し、炉心全体にわたり燃料溶融や損傷が発生したものであった。但し、RPVやPCVの重大な損傷や施設設備の損傷もなかったため、建屋外への放射性物質による土地汚染も発生していない。

TMI-2における一連のクリーンアップ活動はEPRI報告書²等にまとめられているので、これらの文献をもとにこの活動内容を調査した。

TMI-2における「クリーンアップ活動 (Clean-up Program)」は、「安定化 (Stabilization) : 炉心のコントロール、PCVへのアクセス、水処理など」、「燃料取出し (Fuel Removal) : 従事者の被ばく線量低減、炉心解体、廃棄物管理など」、「除染 (Decontamination) : 除染・廃棄物処理など」の3つのフェーズからなっている。

事故後TMI-2の原子炉建屋の機器・床・壁表面は、事故時に漏えいした一次冷却材により高汚染状態となっており、特に地下階は汚染水の存在により線量が高かった。このため、まず遠隔装置を使用した建屋内の除染を実施し、その上でRPVやPCVは健全であり、燃料デブリの大半はRPV内に留まっていたので、RPVに水を張り、上蓋を開放して燃料デブリを取出す作業が行われた。

燃料デブリ取出しに至る作業要素は、①建屋内除染、②ファイバースコープ等を用いた炉内の調査、③RPV上蓋開放、④燃料デブリのサンプリング、⑤RPV底部の調査、⑦炉心構造物取出し、⑧燃料デブリ取出し、である。作業は1979年に開始され、約3.5年後に炉内の調査、約5.5年後にRPV上蓋の開放、約6.5年後に燃料デブリの取出しを開始し、約11年後の1990年に燃料デブリの取出しを終了している。取出された燃料デブリは、専用の収納容器の中に収納され、この容器は2重の封じ込め機能を有する輸送キャスクに装荷された。そして、アイダホ国立原子力研究所まで鉄道で輸送され、現在もそこで安全に保管されている。「クリーンアップ活動」終了後のTMI-2は、現在運転中のTMI-1が運転終了後廃止措置に移行する時期が到来するまで監視保管されることになり、現在もその状況が続いている。

「クリーンアップ活動」は、1980年3月にGPUN (TMI-2を所有する電力会社)、DOE

²EPRI “The Cleanup of Three Mile Island Unit 2 – A Technical History: 1979 to1990”

(米エネルギー省)、NRC (米原子力規制委員会)、EPRI (米電力中央研究所)、の4つの組織がGEND (合同実施体制) による協力合意を締結して開始された。各組織は、次の通りである。

- 1) GPUNはクリーンアッププログラムの策定、現場復旧作業、データ収集、システム・機器開発及び関連エンジニアリングを担当した。
- 2) NRCはGPUNから提出された**Technical Evaluation Report** (技術評価報告書) や**Safety Evaluation Report** (安全評価報告書) のレビュー、**Final safety analysis Report** (安全解析報告書) を審査するとともに、サイトに事務所を構えスタッフが常駐しての監査活動や、地元市民や政治家などの不安を解消する目的で**Advisory Panel** (諮問委員会) を開催し、市民や技術者、政治家などの参加を得て意見交換を行っている。
- 3) EPRIは、除染技術、遠隔技術、事故原因の究明のための解析評価などの研究開発プロジェクトをサポートし、その成果を産業界へ反映させるための働きかけを行っている。
- 4) DOEは高レベル放射性廃棄物の処理処分、炉内へのアクセス、燃料デブリ取出し、事故進展の解明等に係る研究開発を実施している。分担する研究開発を承認する重要な観点は、電力会社への支援ではなく、国益のためであるとしている。また、炉心から取出された燃料デブリや民間放射性廃棄物最終処分場の受入基準を満たさない特定の放射性廃棄物も研究開発のために引き取っており、これがTMI原子力発電所を長期的な廃棄物貯蔵施設としなかったことに加え、クリーンアッププロジェクトの円滑な遂行に役立ったとされている。
- 5) GPUNの実施体制は事故発生当初から燃料デブリ取出しまで状況に応じて変化している。なお、第三者で構成された、技術的なレビュー・サポートする会議体 (**Technical Assistance and Advisory Group**) や健康や安全に関するレビューを行う会議体 (**Safety Advisory Board**) も設置されている。

(2) TMI-2クリーンアッププロジェクトの財源確保について

事故収束後GPUNは1981年12月までに約3億\$の損害保険金から1.8億\$を費やして除染活動を行ったが、原子炉格納容器の除染には取り掛かっていなかった。他方で、1980年からDOEは、GPUN及びNRC、EPRIと事故に関する情報収集を共同して行っていた。また、1982年予算に、1) 原子炉容器から燃料デブリを検査する装置と工法を開発すること、2) 燃料デブリを取り出し、検査すること、3) 放射性廃液を浄化し

て回収される放射性廃棄物を固化する実験を行うことを主な内容とする研究開発計画を提案した。この計画では燃料デブリを取り出してクリーンアップを完了するためには、今後少なくとも6億\$を要すると推定されたが、GPUNがこれに向ける資金を確保できず放置すると破産すると予想されたことから、この資金確保が重大問題になった。そして、発電事業が公益事業であることから、GPUNの破産は同社を含めて当該地域の電力会社の再編することを意味することになるが、それは結局様々な取組を遅らせ、電気料金の支払い者の負担が増大する結果をもたらすと意見が有力だった。それ以外の方法でこの資金を確保する道が以下の案を含めて議論された³。

- 1) 連邦政府がウラン濃縮手数料を値上げして得た収入の増分をこの資金に充当する方法
- 2) 原子力損害保険料の再評価を行って増額した保険料支払いをもとに保険金支払い額を増大させる方法
- 3) 供給地域、つまりペンシルバニア州およびニュージャージー州の電気料金をあげ、さらに、同社の株主への配当を減額する方法
- 4) 連邦政府が原子力発電を民間に奨励したこと、及び、国として適切な研究開発を行うことで、この事故から原子炉運転や高レベル放射性廃棄物の処分に関する知見が得られ、クリーンアップ活動を加速し、さらには将来の原子力発電の安全性、信頼性の向上をもたらして原子力発電コストの低減に寄与できることから、国が研究開発を通じて支援する方法
- 5) 事故の影響を最も受けた電力会社群が今後とも原子力発電を継続していくことに確信を持っていることを明らかにする観点から、協力してこの取組に出資し、さらに人員面でも協力する方法

1981年7月になって、当時のペンシルベニア州のソーンバーク知事が、この議論の行き詰まりを打開するために、残りの費用を連邦政府、二つの州政府、電気事業者、GPUN及び電気料金支払い者で分担する提案を行った。そしてこの提案を受けて、上記諸方策をミックスした形の支援スキームが固まった。その分担は、GPUNが3.67億ドル、産業界が1.71億ドル、州政府が0.42億ドル、保険が3.06億ドル、DOEが0.76億ドルとなり、「クリーンアップ活動」に要した費用は総額で9.73億ドルとなっている。

日本は、この「クリーンアップ活動」に対して、電力会社、原子力発電プラントメー

³ USGAO: EMD-81-106: Greater Commitment Needed To Solve Continuing Problems AT Three Mile Island, August 26, 1981.

カー4が中心となって日米 WR 研究委員会を発足し、DOE と契約を締結した上で、要員派遣や参加費用負担（0.18 億ドル）を行っている。

なお、TMI-2 の廃止措置費用の評価額は、本年 5 月、NRC より約 8.37 億ドルと報告されている（約 6.6 億円/万 kWe）。⁵

(3) 福島第一原子力発電所における中長期措置への反映

福島第一原子力発電所は、1号機から3号機までの3基で炉心やPCVが損傷しており、また、1号機、3号機、4号機では原子炉建屋が水素爆発で損傷していることから、損傷の度合いはTMI-2事故に比べて厳しい。しかしながら、原子炉建屋内が高線量下であり、地下階に汚染水があることや炉心が大きく損傷して燃料デブリがRPV下部に堆積していることなどは、TMI-2とも福島第一原子力発電所も同様であることから、TMI-2で採用された技術が参考となると考えられる。また体制や費用、地元との関係等の取組み全体についても、参考にすべきことが多いと考えられる。そこで、中長期措置への反映すべき項目について整理し、以下にとりまとめた。

- ・ 事業者だけでなく、国（DOE）による積極的な主導の下で関係組織が連携してクリーンアップに取り組んでいること。
- ・ 遠隔での除染技術、燃料デブリの取出し技術等の特殊技術を使用していること。
- ・ 燃料デブリ取出しに係る費用については事業者だけでなく、産業界や国、自治体も含め原子力業界全体が負担していること。
- ・ 研究開発課題のうち、その解決が国益に資するものについては、国が費用を負担していること。また海外からも費用の負担を含めた国際協力を受けていること。
- ・ 第三者によるサポートやレビューを実施する会議体を設置していること。
- ・ 国が地元との意見交換の場を設け、市民等の不安を解消するよう努めていること。
- ・ 事故の教訓を世界各国の原子力事業者と共有することや後世に伝えるために、事故の原因、燃料デブリ取出しの方法、廃棄物の取扱い、費用分担に関する検討経緯など全般について詳細に報告書にまとめて広く公開していること。

2-3. 中長期措置における時間的目標と取組の設定

福島第一原子力発電所では、1号機と3号機、4号機は水素爆発により原子炉建屋や建

⁴ 原子力発電所の建設実績のあるメーカーを指す。

⁵ <http://www.nrc.gov/info-finder/decommissioning/power-reactor/three-mile-island-unit-2.html>（為替 76 円/\$にて換算）

屋内の設備が破損している。また、1号機から3号機はタービン建屋に高濃度の汚染水が確認されており、燃料を冷却した循環冷却水は、RPVから漏えいし、PCVを経由して原子炉建屋底部、更にはタービン建屋に漏えいしていると推測されている。

このため、TMI-2と同様の方法で燃料デブリの取出しを進めるには、建物が有すべき放射性物質の格納機能を回復し、水中で作業を行うことができるように、このようなプラントの損傷状況に対処する補修の取組が行われる事が必須の前提となる。これらの一連の作業は、極めて高放射性のものを、特殊かつ過酷な状況下で取り扱う事になるため、不慮の事態の発生等の公衆安全に対するリスクを極小化することが必要であるとともに、作業者の安全を確保する万全の措置が必要となる。

また、高放射線レベルの環境における数多くの作業が想定され、作業員の被ばくを低減するためにも、遠隔操作可能な機器やロボット技術の開発を各作業に応じて、あるいは共通基盤技術として実施する必要がある。

そこで、TMI-2「クリーンアップ活動」を参考にするとともに、上記の観点を踏まえた上で、ステップ2の終わりの状態から原子炉の廃止措置（解体）の着手までの間に行うべき取組を検討した結果、現時点では、以下の(1)、(2)、(3)、(4)、(5)の5つの作業を順次、あるいは並行して行う必要があると判断された。なお、これらは今後の現場の状況や技術開発の進捗状況により見直され得ることに留意が必要である。

(1) 使用済燃料プールからの燃料体取出し

- 原子炉建屋の最上階に使用済燃料プールが設けられている。1号機から4号機の使用済燃料プールには、現在3,108体の燃料体(うち2,724体が使用済燃料)が保管されている。
- これまでの調査結果によると、水素爆発により使用済燃料プールの周りの天井や壁が大きく損傷し、燃料取扱設備は利用できず、それらがガレキとなっているが(1,3,4号機)、プール水の分析の結果から大部分の燃料体は健全であり、またプールの構造強度も保たれていると評価されている。しかし、使用済燃料プールへの海水注入に伴う燃料体の長期健全性の問題(2,3,4号機)や原子炉建屋の損傷(1,3,4号機)を考慮すると、燃料体を可能な限り早期に取出す事が重要である。
- 取出した燃料体は、輸送容器に収納し、福島第一原子力発電所構内にある使用済燃料共用プール(以下「共用プール」という)に移送・保管する。また、共用プール内の空きスペースを設けるために、現在共用プール内に保管されている健全な燃料体を乾式貯蔵キャスクに収納し、発電所構内に仮置きしておく必

要がある。

- ・ 共用プール内に移送した燃料体は、海水に曝された影響評価など長期的な課題に対する取組も必要となる。
- ・ 使用済燃料プールからの燃料体取出し作業は、①原子炉建屋上部にあるガレキの撤去、②放射性物質の飛散抑制や燃料取出しのためのインフラであるクレーン、カバー（又はコンテナ）等の整備、③燃料体取出し用の輸送容器、収納缶の製造・調達、④取出した燃料体を受入・保管するために既存燃料体の搬出・構内仮置き及び必要な共用プール内の改造工事、⑤使用済燃料プール内の燃料体取出し及び保管、の5つの作業要素から構成される。
- ・ 東京電力は、使用済燃料プールからの燃料体の取出し開始をステップ2終了から3年以内で実現することを目指している。

(2) 燃料デブリの取出し準備作業

- ・ 震災時に定検中で全ての炉心燃料を使用済燃料プールに移していた4号機を除く1号機から3号機が対象となる。これら3基に合計1,496体の燃料体が装荷されていたが、いずれの炉も炉心損傷に至っており、炉心の一部は、燃料体と炉内構造物が一体となって溶融し再度固化した状態（燃料デブリ）となって存在していると考えられる。また、溶融物の一部はRPVの下部からさらにPCV内に流れ出て燃料デブリとして存在しているものと推定されている。また溶融しないまでも、大きく破損している燃料体も多く存在すると考えられる。炉内構造物や制御棒等についても、溶融し大きく破損しているものと推測される。
- ・ 燃料デブリ取出しを開始するまでに必要となる作業は、高線量下にある原子炉建屋内で行われること等から技術的に課題が多く、現時点で具体的な方法を確定的に決めることは困難であるが、TMI-2「クリーンアップ活動」で採用された方法と同様に、放射線遮へいに優れた水中で燃料デブリを取り出しに向けて前処理することがもっとも確実な方法であると考えられる。
- ・ 燃料デブリ取出し準備作業は、①原子炉建屋内除染、②PCV漏えい箇所の調査・PCV外部からの内部状況調査、③原子炉建屋止水・PCV下部補修、④PCV部分水張り、⑤PCV内部調査・サンプリング、⑥PCV上部補修、PCV/RPV水張り、⑧RPV内調査・サンプリング、の8つの作業要素から構成される。
- ・ TMI-2「クリーンアップ活動」の場合、RPVを水で満たすこと（水張り）が支障なく実施できたのに対し、1号機から3号機においては、タービン建屋に

高濃度の汚染水が確認されていることから燃料を冷却した水は PCV から原子炉建屋底部、更にはタービン建屋に漏れいしていると推測されており、水張りには非常な困難が予想される。この漏洩している汚染水の止水や PCV への水張りなどに向けて今後研究開発を進めることとしているが、万一水張りができない場合には、燃料デブリからの非常に強い放射線をどのように制限するかなどの研究開発が必要になる。そこで、現在有力な方法であるとして推進している方法の実施が困難とわかった場合には計画を変更しなければならないことにも十分配慮し、研究開発段階から代替方策についても並行して検討・準備することが重要である。

(3) 燃料デブリの取出し技術の開発と取出し作業

- TMI-2「クリーンアップ活動」で採用された方法と同様に、RPV 上部に遮へい機能を有するプラットフォームを設置して燃料デブリを取出す技術を開発する。RPV/PCV の水張り完了後、開発された技術を用いて燃料デブリの取出しを行う。取出した燃料デブリは専用の容器に収納し、キャスクに装荷して共用プールへ搬出し、保管する。
- TMI-2 においては事故発生から約 6.5 年後に燃料デブリの取出しを開始し、取出しの終了が約 11 年後であったことを踏まえれば、福島第一原子力発電所事故が TMI-2 事故よりも厳しい状況であることから、燃料デブリの取出しを終えるまでには、更に長期間を要することが予測される。
- 取出した燃料デブリをどのように処理・処分するべきかについては、今後の我が国の核燃料サイクルの取組のあり方の議論も踏まえて多様な観点から検討するべきである。また、安全規制面での国の関与も重要である。

(4) 公衆及び作業安全の確実な確保

- 炉心の安定的な冷却（冷温停止の維持）、汚染水の安定的な処理・滞留水全体量の減少、海洋への汚染拡大防止、大気中への放射性物質の飛散抑制などステップ 2 の取組は、中長期的観点から継続的に実施していく必要がある。
- ガレキの撤去により放射性物質が飛散するリスクや、燃料デブリ廻りの冷却水量の変化が再臨界を招くリスクなど、個々の作業においては、公衆に与えるリスクを把握しながらこれを低減するための取組を適切に実施することが必要である。安全規制当局は事業者によるこれらの取組の妥当性を適宜確認していくことが必要である。

- RPV、PCV 等の健全性の維持、汚染水処理で発生した二次廃棄物の安定保管、処理・処分方法の検討、作業に伴い発生する放射性廃棄物の処理・処分、発電所構内に貯蔵されている放射性廃棄物の処理・処分などの課題に対する取組も必要となる。このうち、放射性廃棄物政策、規制のあり方などについては、国の関与が重要である。
- 現状、原子炉建屋内外ともに高線量箇所が多く存在しており、除染や遮へいによる放射線量の低減、ロボットによる遠隔技術の活用等の対策がとられてきている。今後中長期措置を実施していくにあたっても引き続き高線量の厳しい環境下での作業が予想されるので、これらの技術の性能向上が望まれる。
- 原子炉建屋内除染を実施し、作業環境の改善も重要である。高線量下、高汚染下での作業は、原則遠隔操作によることを基本とするが、技術的に困難な作業であることから人による作業が必要となる可能性があるため、その場合に作業員を保護するための取組が必要となる。作業員の被ばく低減のため、作業の簡素化や作業時間の短縮を図っていくことが必要である。

(5) 事故原因の究明、炉心損傷時の挙動評価等

- 1号機、2号機、3号機において発生したシビアアクシデントの進展過程を解明することは、原子炉内での燃料デブリの存在状況やその物性を推測する上で、重要な参考となる。このため、燃料取出し等の作業手順をよりの確なものにすることに資すると考えられる。
- なお、この取組は、福島第一原子力発電所事故原因の究明にも資すると共に、今後の国内外における原子力発電の安全性・信頼性向上にも貢献する。

2.4 使用済燃料プール内燃料体並びに燃料デブリ取出し作業の分析

主要作業となる使用済燃料プール内燃料体並びに燃料デブリ取出し作業について、現時点において想定し得るところを上で説明したが、この概念（イメージ）と、作業の流れ、各作業に予想される課題、それを克服するための技術やデータ、安全確保に向けた主な留意点を検討し、その結果を表1及び表2に取りまとめた。

(1) 使用済燃料プールからの燃料体取出し作業

① 原子炉建屋上部ガレキ撤去

1号機、3号機、4号機は水素爆発により原子炉建屋の上部が破損し、燃料取替床

⁶上にガレキが散乱し、ガレキの一部は使用済燃料プール内に落下していることが確認されている。このため、燃料体取出しに先立ち、ガレキを撤去する。ガレキは主に建屋の屋根や壁を構成していた鉄骨・コンクリート構造物であるため、撤去には重機や大型のクレーンを建屋の外側に設置して建屋上部から吊り上げて撤去する。

ガレキ撤去の際にはガレキに付着していた放射性物質が空気中へ飛散する可能性があるため、飛散防止対策を行うとともに、放射性物質が飛散していないことを監視するためのモニタリングを行う必要がある。ガレキは高線量であることから、作業員の被ばく低減のため、撤去作業の遠隔化や重機の運転席へ遮へい対策等を行う必要がある。

② カバー（又はコンテナ）／クレーン等の設置

燃料を取出す作業時の作業環境維持や作業安全のため、風雨等の影響を受けないよう原子炉建屋を覆うカバー（又はコンテナ）の設置が必要となる。また、燃料体を取り扱う燃料取扱機、燃料体を収納する輸送容器を取り扱うクレーンをカバー内に設置する必要がある。燃料取扱機やクレーンは、安全確保のため、燃料体や輸送容器の落下防止機能を有する設計とすることが必要である。

③ 取出し用輸送容器・収納缶の製造・調達

使用済燃料プールから共用プールへ燃料体を移送するため、既存のキャスク技術を用い、輸送容器・収納缶等を設計・製造することとなる。

④ 共用プール内空きスペース確保／改造

取出した燃料体を共用プール内に受入・保管するために、共用プール内に保管されていた健全な燃料体を乾式キャスクに収納し、発電所構内に仮置きすることで、共用プール内の空きスペースを確保する。使用済燃料プールから取出した燃料体は塩分の付着や物理的変形や破損の可能性があることから、これらを共用プール内に保管するにあたっては、健全な燃料体や共用プールの設備に悪影響がないような措置や、必要に応じて設備の改造を行うこととなる。

⑤ 使用済燃料プールからの燃料体取出し

⁶ 燃料取替床;原子炉建屋最上階の作業エリアのことを言う。この階には使用済燃料プール等が存在する。

燃料取扱機及びクレーンを設置することにより、使用済燃料プールからの燃料体を取り出す作業は、通常の原子力発電所（BWR）と同様の作業手順⁷で行うこととなる。なお、燃料体の輸送容器への収納前には外観検査、荷重試験等により燃料体の健全性を確認する必要がある、破損とみなされた燃料は収納缶に収納した上で輸送容器に装荷し、搬出することとなる。

(2) 燃料デブリ取出し準備作業／燃料デブリ取出し作業

① 原子炉建屋内除染

これまでの原子炉建屋内の調査結果から、原子炉建屋内は数100～1000mSv/hの高線量箇所が存在すること及びガレキが散乱していることが確認されている。燃料デブリ取出しに至るまでの各作業において原子炉建屋内に適宜人が入っての作業が想定され、作業に必要な箇所の除染を行う。除染方法は、高圧水やコーティング、表面はつり等部位や汚染の程度に応じて適切な除染方法を選定する。また、比較的放射線量が低い箇所は人が近づいて除染作業を行うが、高線量箇所は遠隔での除染作業が必要となり、散乱したガレキの状況を踏まえた上で、遠隔で除染する技術が必要となる。なお、除染の際には遮へい等を設置して作業員の被ばく低減に努めるとともに、空気中へ放射性物質が飛散する可能性があるため、飛散防止措置を講じた上で実施する必要がある。

② PCV漏えい箇所調査/PCV外部からの内部状況調査

燃料デブリの取出しは、遮へいの観点からTMI-2同様に水中で行うことが最も合理的である。RPVの漏えい箇所の特定・止水はRPVに近づけない状態では困難であること、燃料デブリの一部はPCVに存在していると推定されていることから、PCVを補修し、RPVごとPCV内を水で満たし、燃料デブリを取出す方法が最も有力な方法と考える。推測されている漏えい箇所は高線量下で水没し、かつ狭隘部であると考えられるため、遠隔で当該部にアクセスするための技術や、漏えいを検知するための技術が必要となる。

③ 原子炉建屋止水/PCV下部補修

⁷ 通常の BWR の燃料体の取出し作業手順；

クレーンにより輸送容器を燃料取替床まで吊り上げた後、プール内に吊り下ろし、プール内で燃料取扱機により、燃料体を輸送容器に収納する。その後クレーンにより輸送容器をプールから吊り上げ、地上まで吊り降ろし、原子炉建屋から搬出する。

前作業要素でPCVから原子炉建屋への漏えい箇所及び原子炉建屋からタービン建屋等へ漏えいしている箇所が明らかになった場合、これを止水するためには水中で、かつ流水状態で止水する技術が必要となる。原子炉建屋からの漏えいを止水する前には循環注水冷却の取水源をタービン建屋地下から原子炉建屋地下に切り替える必要がある。また、PCVの漏えい箇所の補修は技術的に困難なことが予想され、場合によっては漏えい箇所近傍を含め原子炉建屋地下の一部を止水材で充てんする等の対応が必要となる。

なお、原子炉建屋やPCVからの漏えいを止水できない場合に備え、代替方策を検討しておくことも必要である。

④ PCV部分水張り

前作業要素でPCV下部を止水した後、循環注水冷却の取水源を原子炉建屋下部からPCVに切り替え、PCV内の水位をコントロールしながら徐々にPCVの水張りを行う。また、PCVの水張りを行う場合には、PCV内に一部流れ出ていると想定されている燃料デブリに対する水減速材の相対量が増加し、燃料デブリが臨界となるリスクが高まる可能性があることから、臨界を防止、監視するための技術が必要となる。

⑤ PCV内部調査・サンプリング

前作業要素でPCVの部分水張りを実施した後、PCV内の調査を行う。PCV内部は高線量で、かつ中の汚染水が濁水であることが想定される。このような状況下においてPCV内部の燃料デブリの分布等の把握に向けた遠隔による調査技術が必要である。また、PCVに外側から貫通穴をあける必要があることから、内部の汚染水がPCV外に飛散しないよう飛散防止対策を講じるための技術が必要となる。

上記調査によって燃料デブリの位置が確認できた場合、燃料デブリの性状調査のためにサンプリングを行うが、調査と同様に遠隔で実施する技術が必要となる。

⑥ PCV上部補修

燃料デブリ取出しのためにはRPVごとPCVを水で満たすことを想定しており、その準備として、PCV上部の補修を実施する。PCVの補修箇所は狭隘部であり、高線量下の部位については遠隔で実施する必要があることから、遠隔補修技術が必要となる。また、比較的線量の低い部位については人が近づいての作業も想定され、遮へい措置等により被ばく低減に努める必要がある。

⑦ PCV/RPV水張り

前作業要素でPCV上部を補修した後、RPV及びPCVの水張りを行う。この際、RPV内にある燃料デブリに対する水減速材の相対量が増加し、燃料デブリが臨界となるリスクが高まる可能性があることから、臨界を防止、監視するための技術が必要となる。また、水張りは燃料デブリによる放射線を十分遮へいできる水位まで実施し、その後PCV及びRPVの上蓋を開放、気水分離器、湿水分離器の取り外しを行う。上蓋開放の一連の作業の際は放射性物質が空気中へ飛散しないよう原子炉建屋を覆うカバー（又はコンテナ）が必要となる。

⑧ 炉内調査・サンプリング

前作業要素で、RPVの水張り、RPV上蓋の開放、炉内構造物の取り外しが完了した後、燃料取替床に作業台車を設置してRPV内部の調査を行う。RPV内は高線量で、かつ内部に存在する汚染水が濁水であることが想定される。このような状況下において、RPV内部の燃料デブリの分布等の把握に向けた遠隔での調査技術が必要である。また、炉内調査によって燃料デブリの状態を把握した上で燃料デブリの性状を確認するためのサンプリングを行うが、調査と同様、遠隔で実施する技術が必要となる。作業台車における作業は、人による作業が想定されることから、燃料デブリ等からの放射線の影響を低減するよう十分な遮へい措置を実施し、被ばく低減に努める必要がある。

⑨ 燃料デブリ取出し技術の整備と取出し作業

燃料デブリの取出しは、燃料取替床に設置した作業台車から実施し、取出した燃料デブリは専用の収納缶に収納した後、所定の場所に移送することとなる。燃料デブリはTMI-2の実績から性状が固くなっていることが想定され、収納缶に収めるためにドリル等で細断した上で、把持又は吸引する等、様々な作業が想定され、これらを遠隔で実施する技術が必要となる。また、燃料デブリの一部はRPVからPCV内に流れ出ている可能性があり、これを回収するための技術が必要となる。なお、燃料デブリの取出しに伴い燃料デブリに対する水減速材の相対量が増加し、燃料デブリが臨界となるリスクが高まる可能性があることから、臨界を防止、監視するための技術が必要となる。

3. 福島第一原子力発電所における中長期の取組に効果的な研究開発課題

3-1. 研究開発課題の抽出・整理

上記「2.4」で実施した現時点で想定し得る使用済燃料プールからの燃料体取出し作業及び燃料デブリ取出し準備/燃料デブリ取出し作業の分析結果に基づいて、作業要素毎に課題を抽出した。課題の抽出にあたっては、作業を行う上での障害となる作業環境に関する課題に加え、作業を実施する上で必要なデータ、作業によって引き起こされるリスク、作業には直接は関連しないが長期的には解決すべき課題、核不拡散等の観点から抽出した。中長期措置を実施する間、継続して実施すべき内容については公衆安全に関するリスクマネジメントや作業安全に関するリスクマネジメントとして整理を行った。また事故原因を解明する上での課題も併せて整理した。

抽出された課題について、解決するために必要な技術やデータを整理し、既存技術や既存データの適用性について評価を行い、必要な研究開発項目を表3に取りまとめた。

また、表3をみると、作業員の被ばくを低減させるために効果的な遠隔操作可能な機器やロボット技術開発を様々な作業のために開発する必要があることがわかる。遠隔技術を利用する場合、作業の対象・内容・環境に応じて特殊なツールの開発が必要になると考えられるが、多項目にわたる多様なニーズに対して対応できる共通要素技術や基盤技術も存在すると考えられるので、これらを特定し、多様な用途に対応できる汎用的機能をモジュール性・標準化に配慮して開発するなど、効率的な開発を行う必要がある。各作業項目を縦軸とすると、その実施を遠隔から行えるようにするための共通的な技術開発は、横軸(横断的技術)と考えられる。そこで、このような観点から効率的な開発を行うために、共通する課題を整理し、表4に取りまとめた。

なお、今後の作業の進展に伴い、新たに必要となる課題の発生や代替方策への移行もあり得ることから、研究開発項目については随時見直しをしていく必要がある。

3-2. 研究開発に関する中長期ロードマップ

前項で抽出された研究開発項目には、その技術的難易度などを踏まえ、早期に着手すべきもの、長期的課題として基礎基盤研究から開始すべきもの、また、先行する研究開発成果を踏まえた上で次の研究開発計画を検討すべきものなどが存在する。また、得られる成果を現場作業に適切に反映する観点から、現場作業と研究開発とのスケジュール管理を相互関係に十分配慮しつつ行う必要がある。

以上を踏まえ、前項で抽出された各研究開発課題について、各々の開始必要時期などを評価し、炉心燃料取出し開始に至るまでの研究開発に関する中長期ロードマップを策定し、

表 5 に示すようにとりまとめた。現時点において具体的な根拠に基づいて時間的目標を設定するには多くの不確実性が存在するものの、上記観点から、このロードマップでは使用済燃料プールから燃料体取出し開始までの期間は 3 年以内、燃料デブリ取出し開始までの期間は 10 年以内を目標とした。

なお、目標通り燃料デブリ取出しが開始されたとしても、1 号機から 3 号機まで号機毎に燃料デブリを取出し、取出し完了後に廃止措置を開始するとした場合、通常の廃止措置に要する期間は標準工程で 15 年とされていることを考慮すれば、廃止措置がすべて終了するまでは 30 年以上の期間を要するものと推定される。

本ロードマップを実行するにあたっては、前述のとおり、燃料デブリ取出しに至るまでには多くの不確実性が存在するとの認識を関係者が十分に共有し、今後の現場の状況調査結果や研究開発の成果を踏まえて、段階的に進めていくとともに、代替方策を検討・準備し、状況次第では方向性の転換を柔軟に図っていく必要がある。そのため、本ロードマップには、節目毎に次工程へ適用する技術の開発成果を確認し、次工程の着手について判断するとともに、各研究開発項目の検討状況を確認し、次工程以降も含めた工程の見直しや作業フローの見直しも含めた評価も併せて行うホールドポイントを設定している。取組みの推進に当たっては、現場作業と研究開発の適切な連携を実現し得る研究管理体制を構築した上で、各ホールドポイントにおいて、現場の状況及び技術的見通し等をチェック・アンド・レビューして、研究開発を柔軟かつ的確に実施していくべきである。

3-3. 研究開発の実施に際しての基本姿勢

前項において、ロードマップを作成し、燃料デブリの取出し開始時期の目標をステップ 2 終了から 10 年以内とした。このロードマップに則って、目標の達成を目指して取組み着実に進めていくためには、開発に関わる技術者が以下の諸点を求められる基本姿勢として強く意識し、取り組む必要がある。

(1) 効率的に進めること

- ・ 時間と資源の削減を図るため、既存技術や知見を最大限利用するとともに、国内外の高い技術についても積極的に獲得し、利用すること。特に TMI-2 等の過去の類似実績の知見を有する海外の技術者の助言を積極的に得ること。
- ・ 現場作業に手戻りが無いよう事前にモックアップ試験等を実施すること。

(2) 現場に即したものにすること

- ・ 適用する要素技術については、現場調査の結果を反映しながら、常に最新の判断を行うという、分析+判断の対応を基本とすること。

- ・ 計画した方策がうまくいかない場合は臨機応変に対応できるよう、代替方策については常に準備的考察や、合理的に考えられる範囲での設備対応も考慮すること。

(3) 優先順位を意識すること

- ・ 実際の現場作業に必要な研究や開発を優先すること。技術高度化のための研究や開発は、現場作業の開始を確実にした上で、並行して進めること。

(4) 技術力及び人材育成に資するようにすること

- ・ 研究開発を通して国内の技術力及び技術者の育成につながるようにすること。

4. 研究開発の推進体制

4-1. 基本的考え方

3-3で述べた研究開発の実施に係る基本方針に則り、研究開発を推進するためには、適切な実施体制を整備することが極めて重要である。そこで、まず、この体制を整備するに当たっての基本的考え方を検討し、以下のようにとりまとめた。

- ・ 世界的にも例の極めて少ない難しい課題に挑戦することから、国内外の専門家、産業界の叡智を結集し、柔軟かつ機動的な進め方を可能とする体制とすること(国際協力プログラムの調整を含む)。
- ・ 研究開発全体を着実に進めるために、全体をまとめ、推進する責任を担う組織を設ける必要があること。また、各組織の責任・権限を明確にすること。
- ・ 全体の進捗を踏まえた計画及び体制の柔軟な見直し・一部改廃等を含めた研究開発全体のPDCAサイクルを廻すこと。
- ・ 福島第一原子力発電所の現場の状況やニーズ、開発した工法等の技術の適用結果を適切かつ速やかにフィードバックし、個別研究開発課題の計画を柔軟に見直す必要がある。この観点から個別研究開発課題の実施体制の中で東京電力の技術者が中心的な役割を担うべきであること。

4-2. 研究開発推進体制

前項の考え方に基づき、数多い研究開発課題について、研究開発の進捗状況に応じた計画の見直しや関連する研究開発課題間の調整を柔軟に実施していくことができるためには、管理体制を階層構造とし、各層毎に分担して段階的に管理するのが合理的である。

この階層構造としては、1) 個別の研究開発課題に取り組む体制「チーム」、2) 相互に影響を及ぼす関連するチームをまとめ、チーム間の調整を行う「プロジェクト」、3) 各プロジェクトをまとめ研究開発全体の管理・推進を行う「研究開発推進本部」の3層構造が適切と考える。それぞれの役割を以下に記す。

(1) 研究開発推進本部

① 目的・役割

中長期措置に係る研究開発は、最小費用で最大の成果が生まれる取組がこの観点から国際的にみても最も適切なチームによって推進され、成果が直接的あるいは間接的に福島第一原子力発電所各号機の廃止措置への迅速かつ確実な移行に向けての取組の現場に的確に反映される必要がある。このため、効果的な研究開発が全体と

して現場の状況やスケジュールを十分踏まえて総合的かつ計画的に進められ、それぞれが独自の成果を迫及したり、研究のための研究に陥らないようにしていくことが極めて重要である。そこで、こうしたことにリーダーシップを発揮するのが、研究開発推進本部の主たる役割である。具体的には、

- ・ 上記の考え方にに基づき、個別研究開発課題の改定、改廃を含め、全体計画を策定する。
- ・ 中長期措置に係る研究開発全体の予算計画を一元的に審議・策定し、関係省庁に必要な予算措置を求める。
- ・ 実効性と迅速性を確保するため最も適切なプロジェクトを設置する（リーダーの選出等含む）。
- ・ 海外の優れた研究開発主体との協力を効果的に行なうよう国際協力のとりまとめを行う。

② 構成

政府（経済産業省、文部科学省）、東京電力、福島第一原子力発電所の設計・建設に関して深い知識を有する者、JAEA、学識経験者等から構成される。

- ・ 政府は、研究開発推進本部の最高責任者として適切な人物を研究開発推進本部長とすること。研究開発推進本部長は研究開発全体の責任を負う。
- ・ 研究開発推進本部には、上述の研究開発プロジェクトマネジメントの実務を行うために必要な専属スタッフを配置させること。

(2) プロジェクト

① 目的・役割

- ・ 各チームの相互の関連性によって、「プロジェクト」を設置し、研究開発課題を整理して、研究開発の管理を実施する。
- ・ プロジェクトの役割は定期的に関連するチームの進捗状況を確認し、横断的な調整を行なうとともに、採用技術判断、実機適用評価などホールドポイントでの判断を行なう。
- ・ 研究開発の進捗ならびに実機適用評価を踏まえ、代替方策への切り替えの要否を判断する。
- ・ 遠隔操作機器やロボットの開発など、横断的に管理するほうが合理的な場合には、サブプロジェクト等を設けて管理を行う。

② 参加機関

- ・ プロジェクトの性質に応じ適切なメンバーを選出する。
- ・ プロジェクトリーダーはプロジェクト全体の責任を負う。

(3) 個別研究課題に対する研究実施体制（チーム）

抽出・整理された研究開発課題は目的により実施主体が異なると考えられるため、目的により以下の2つにカテゴリーに分類し、チームの実施体制を検討した。

A) プラント等実際の作業と密接に関連する研究開発

燃料デブリ取出しに至るまでの各作業要素で必要となる個別の工法・装置開発が本分類に含まれる。本研究開発は現場の情報を踏まえた上で開発を進める必要があることから、発電所の設置者であり現場作業に責任を有する東京電力と発電所に精通し、高度な技術を有するメーカー（以下「開発担当メーカー」という。）が中心的役割を担う。

B) 上記に併せて実施する基礎基盤的研究

プラント等現場作業と密接に関係する研究開発に併せて行う基礎基盤的な研究開発は、各々の課題解決を図るものために必要で、さらに広く原子力分野に貢献する研究、あるいは、国として政策に反映するために必要なデータを取得するための研究開発などがある。

これらに関しては、専門的知見を持つ技術者、インフラを有する研究開発機関のリソースを活用する。また、本研究は基礎基盤的研究であるが、現場のニーズを的確に反映する観点から、東京電力と連携しながら進めていく必要がある。

以上の研究開発推進の実施体制のイメージを図1に示す。

なお、研究開発推進本部の統合的運営を長期に亘って効率的に進めるためには、研究開発推進本部を一つの専任組織として運営することが期待される。当面、既設の組織の枠を利用して研究開発推進本部の活動を開始するものの、なるべく早く、最大限の成果が得られるような組織の在り方について、従来の枠にとらわれず、柔軟に考えていくことが必要である。

5. 国際協力のあり方

前述のとおり、福島第一原子力発電所の中長期措置を効率的・効果的に進めるためには、国内外の叡智を結集して取り組むことが必要である。このため、研究開発においても、国内の広範な分野の技術的知見を得ていくことに加え、国際協力を進めることが重要であり、TMI-2 やチェルノブイリ事故への対応をはじめとする海外の知見・経験を活用していくべきである。

既に汚染水の処理施設において、海外の既存技術を民間商業ベースで導入した実績があるが、このようなケースに加えて、国ベースにおいても国内外に情報を積極的に発信し、より広範な意味での国際協力を得ていくことが重要である。このような活動においては、以下の点に留意しつつ、国が主導的に関与していくことが期待される。

- ・ 世界初の難しい課題への対応も多く、世界の叡智を活用するために、研究開発課題をはじめ中長期措置全体の計画・取組状況についてタイムリーに広く情報を公開・発信していく。
- ・ 諸外国政府機関、国際機関、民間事業者からの情報・助言や費用負担を含めた具体的な協力の可能性を的確に評価し、効果的・効率的な研究開発を行うための仕組みを構築するとともに、海外に存在する有用な機器やシステムについて柔軟かつ機動的に研究開発計画に取り入れていく。但し、海外の機器やシステムの安直な調達で済ませることなく、長期的な信頼性や国内の技術との親和性も十分配慮する。
- ・ 研究開発成果として蓄積される知見・ノウハウについては、参加する国内企業・研究機関の技術力向上につながるものであり、福島第一原子力発電所事故への対応のみならず将来的に国内外の原子力安全にも資するものであることも踏まえ、知的財産を含む成果の取扱いに留意すべきである。

6. 中長期措置全体への提言

当専門部会は、中長期への取組のロードマップと技術開発課題をとりまとめることを目的に設置され、第3章、第4章、第5章では主に技術開発課題や一部安全確保に対する取組に関する提言をとりまとめた。一方、議論の過程では、現場作業における実施体制や取組に関する意見が多数あった。また第2章2項に記載している通り、TMI-2の調査結果からは、技術開発課題にとどまらず中長期措置全体の取組に反映すべき内容が抽出されている。

上記を踏まえ、技術開発課題にとどまらず中長期措置全体の取組についても本専門部会として提言すべきと判断し、以下に取りまとめた。

- ・ 国は、放射性廃棄物の処理・処分も含め廃止措置が完了するまでの中長期措置全体が安全かつ確実に推進され、完遂されることについては責任を有するとの認識の下、その取組の状況、見通し、安全確保に向けた取組等を継続して地元自治体はもとより、国民に対して説明を怠らず、事業者を適切に監督・指導していくべきこと。併せて、中長期措置を円滑に遂行していくために必要となるリソースの確保や制度の整備等に万全を図るべきである。
- ・ 事業者は、多くの前例のない取組を含む中長期措置を安全かつ迅速に進めていくために、そうした取組に着手する前の早い段階から安全規制機関と十分な協議を行って取組を計画するとともに、合理的な規制判断に資する時宜を得た説明を行っていくべきである。
- ・ 国は、保障措置について IAEA 等の関係機関と十分調整し、進めるべきである。
- ・ 国は、中長期措置全体の取組が有識者、周辺の地元自治体、一般の視点から見て安全で妥当なものであり続けるために、透明性を確保することが重要であり、第三者で構成される機関を設置し、取組状況を評価する仕組みを構築するべきである。
- ・ 中長期措置には、燃料デブリや放射性廃棄物の性状分析や処理試験等が様々な局面で必要になると考えられる。これらのニーズが発生するたびに、分析施設などへの試料の構外輸送を実施することは、現場作業の遅延に繋がる可能性が高いことから、福島第一原子力発電所の近傍にこれらの実施に必要な設備を設置するべきである。
- ・ 中長期措置には遠隔装置の活用も含めて多くの前例のない取組が含まれることから、現場を模擬したモックアップ施設において取組の妥当性を検証することが効果的である。そこで、現場付近にそうした施設を整備することが望ましい。

- 中長期措置の実施に際し、事故の原因や中長期措置の技術的な内容、現場の調査結果など詳細に記録を残して広く公開し、今後の原子力安全の確保のために利用できるようにするべきである。

7. おわりに

福島第一原子力発電所の中長期措置については、地元住民をはじめ国民の安心を早期に得るためにも、国内外の叡智を結集し、安全かつ可能な限り速やかに実現していくことが重要である。そのため、当専門部会では、燃料デブリの取出し開始までの時間的目標をステップ2終了から10年以内と設定し、この実現に必要な中長期ロードマップ（研究開発計画）を策定した。

この実現に向け、ロードマップを更に詳細に具体化し、今後、官民挙げたオールジャパン体制の下、現場作業と研究開発間のインターフェースを適切に図りながら早期に進めていくことを関係者には期待する。

また、研究開発の円滑な実施のみならず、安全規制面等の制度整備のタイムリーな実現が必要である。政府・東京電力統合対策室は、本年10月に「東京電力株式会社福島第一原子力発電所第1～4号機に対する「中期的安全確保の考え方」」をとりまとめ、廃止に向けての作業が開始されるまでの期間（3年程度以内）における公衆及び作業員の安全を確保するための安全確保の基本的目標と要件を定めている。

中期以降も継続して安全確保に関する規制整備が必要であり、並行して、残された課題へ国の関与のあり方（特に放射性廃棄物、燃料デブリ燃料の取扱い等のバックエンド関連）についても、関係者間にて検討し、早急に方向性をとりまとめていくべきである。

なお、修復措置に関わる研究開発とその実施あたっては、福島県をはじめプラント立地地域の産業・人材育成に寄与することにつねに配慮することが望まれる。

以 上

表1 使用済燃料プール内の燃料体取出し作業の流れと作業イメージ




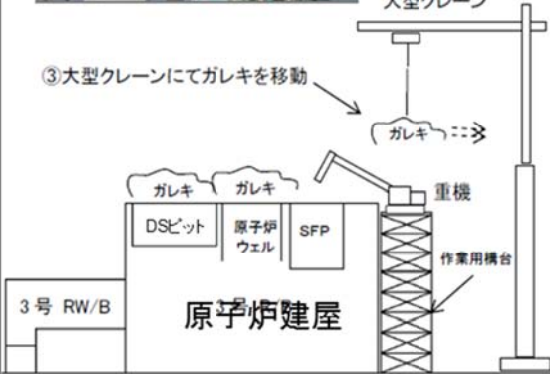
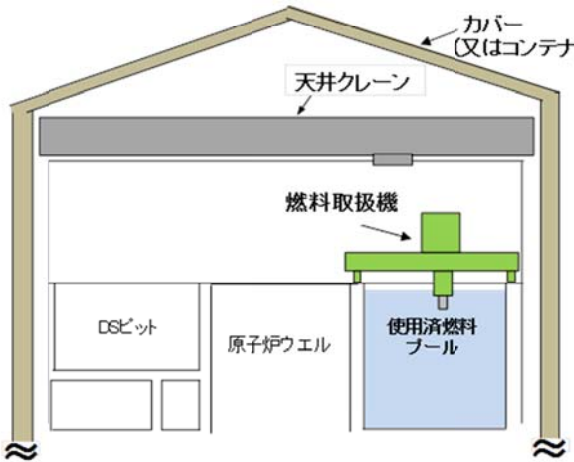

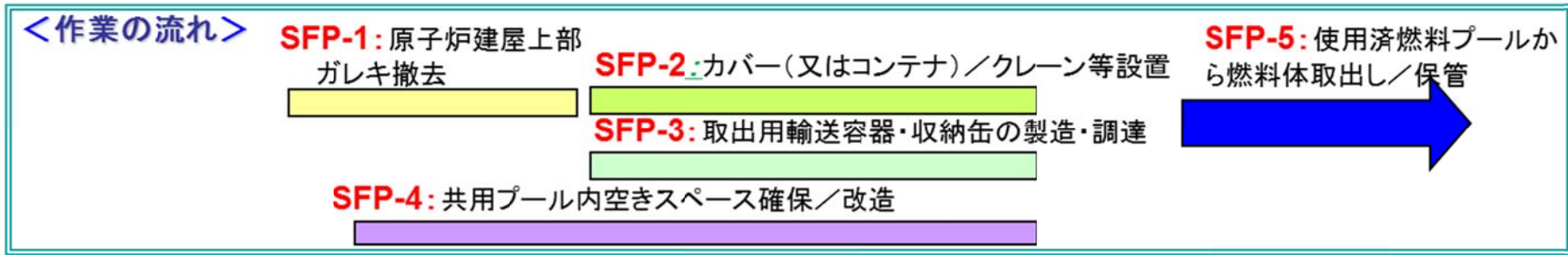
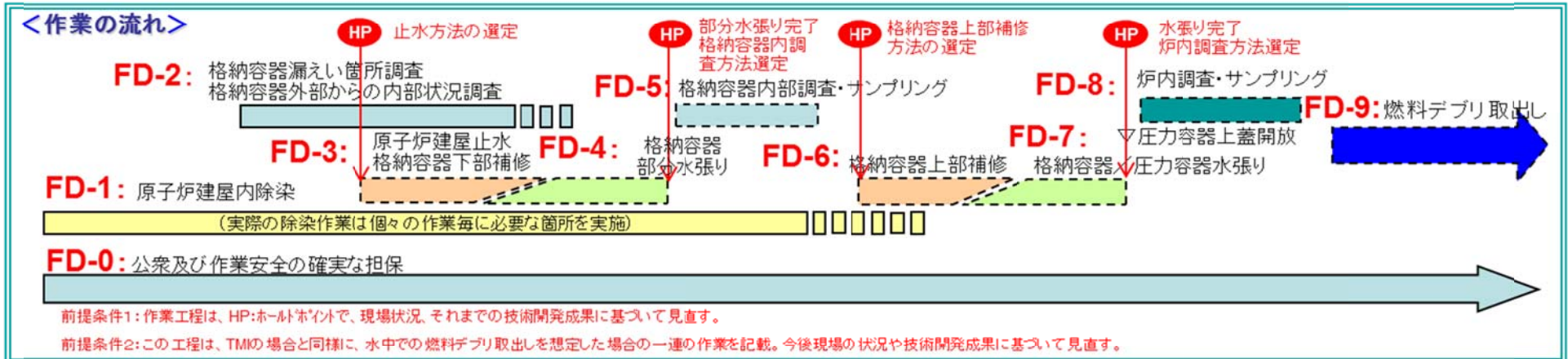
フロー	SFP-1: 原子炉建屋上部ガレキ撤去	SFP-2: カバー(又はコンテナ)/クレーン等の設置	SFP-3: 取出用輸送容器・収納缶の製造・調達
イメージ	  <p>③大型クレーンにてガレキを移動</p>		<p><輸送容器の例: NH-25></p>  <p>1 m</p>
内容	大型クレーンや重機を用いて原子炉建屋上部のガレキを撤去。	原子炉建屋を覆うカバー(又はコンテナ)を設置し、プール燃料取出しに必要な天井クレーン、燃料交換機を設置。	プールから取出した燃料体を共用プールに移送するため、既存のキャスク技術を用い、キャスク・収納缶等を設計・製造。
技術開発における留意点と課題	-	-	-

表1 使用済燃料プール内の燃料体取出し作業の流れと作業イメージ(2/2)



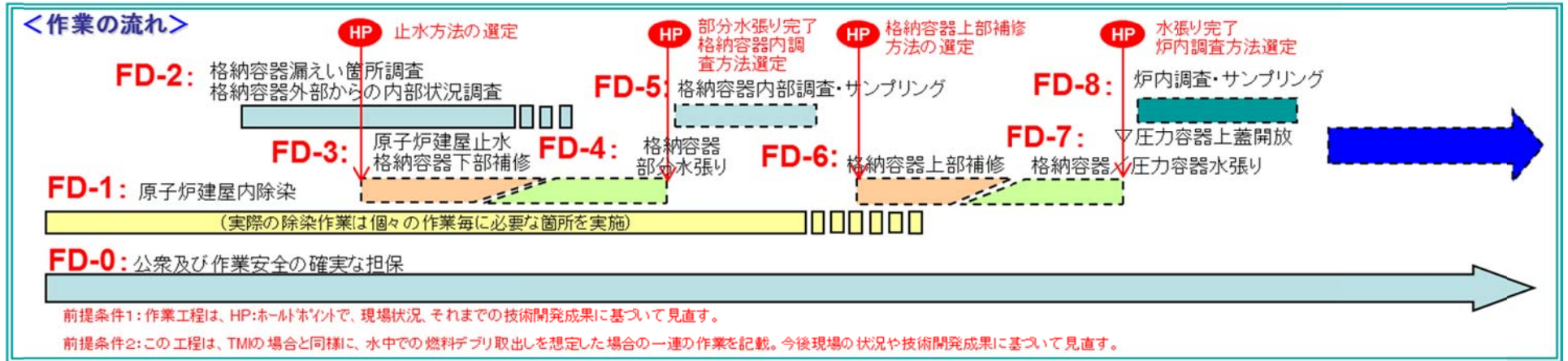
フロー	SFP-4: 共用プール内空きスペース確保／改造	SFP-5: 使用済燃料プールから燃料体取出し／保管
イメージ	<p><現在></p> <p>順次搬出し、キャスクを構内に仮置き</p> <p>○改造工事 ・洗浄、検査設備 ・破損燃料用ラック</p> <p>既存(健全)燃料保管エリア 隔壁 燃料受入・洗浄・除染・検査エリア</p>	<p>カバー(又はコンテナ) 天井クレーン 燃料取扱機 輸送容器 使用済燃料プール 搬出</p>
内容	<p>共用プール内に既貯蔵中の燃料体をキャスクに装荷して順次搬出し、構内に仮置きする。空きスペースを確保した上で、受入れに必要な隔壁、洗浄・検査設備、破損燃料用ラック等を設置。</p>	<p>燃料体の健全性を確認(外観確認、荷重試験等)し、破損燃料は収納缶に収納した上で輸送容器に装荷し、搬出。共用プール内空きスペースに保管。</p>
技術開発における留意点と課題	<p>・塩分付着燃料及び漏えい燃料の洗浄／除染／検査方法の検討</p>	<p>-</p>

表2 燃料デブリ取出し作業の流れと作業イメージ(1/3)



フロー	FD-1: 原子炉建屋内除染 (FD-2以降の作業毎に必要な箇所を順次実施する)	FD-2: 格納容器漏えい箇所調査 格納容器外部からの内部状況調査	FD-3: 原子炉建屋止水 格納容器下部補修
イメージ			
内容	格納容器へのアクセス性を向上するため、高圧水、コーティング、表面はつり等により、作業エリアを除染。	格納容器及び原子炉建屋の漏えい箇所を、手動または遠隔の線量測定やカメラ等で調査。また、格納容器外部からγ線測定、音響調査等により、格納容器内部の状況を推定調査。	燃料デブリの取出しは、水中で実施することが放射線の遮へいの観点からも有利と考えられることから、格納容器の漏えい箇所を補修・止水。まずは格納容器内調査に向け、下部を優先して実施。
技術開発における留意点と課題	<ul style="list-style-type: none"> ◆高線量箇所(数100~1,000mSv/hレベル)の存在。 ◆建屋内ガレキによるアクセスが制限されていること。 ・上記を踏まえた遠隔除染方法の検討・確立が必要	<ul style="list-style-type: none"> ◆調査対象が高線量エリア、汚染水中、狭隘部などにあること。 ・漏えい箇所調査方策・装置の開発 ・格納容器外部からの内部調査方策・装置の開発	<ul style="list-style-type: none"> ◆炉心循環冷却のための注水を継続しながら、高線量下・流水状態で止水すること。 ・漏えい箇所の補修・止水技術・工法の開発 ・代替方策の検討・開発
安全確保に向けた主な留意点	<ul style="list-style-type: none"> ・炉心安定冷却の維持 ・除染作業に伴う空気中への放射性物質拡散防止 ・作業員の被ばく低減(遠隔化、遮へい等) 	<ul style="list-style-type: none"> ・炉心安定冷却の維持 ・作業員の被ばく低減(遠隔化、遮へい等) 	<ul style="list-style-type: none"> ・炉心安定冷却の維持 ・作業員の被ばく低減(遠隔化、遮へい等)

表2 燃料デブリ取出し作業の流れと作業イメージ(2/3)



フロー	FD-4: 格納容器部分水張り	FD-5: 格納容器内部調査・サンプリング	FD-6: 格納容器上部補修
イメージ	<p>格納容器下部のバウンダリ構築が実現すれば、循環注水冷却の取水源をトラス室から格納容器に変更</p>		
内容	格納容器内部調査の開始に向け、格納容器下部に部分的な水張りを実施。	格納容器内を調査し、圧力容器から流れ出たと推定される燃料デブリの分布状況の把握、サンプリング等を実施。	格納容器を満水まで水張りすべく、上部の漏えい箇所を、手動または遠隔にて補修。
技術開発における留意点と課題	<p>◆FD-3と同様</p> <ul style="list-style-type: none"> 格納容器下部のバウンダリ構築(トラス室にグラウト充てんする案も含む)が大前提 	<p>◆高線量によるアクセス性の制約、格納容器内部環境(内部水の濁り、燃料デブリの所在等)が不明</p> <ul style="list-style-type: none"> 上記を踏まえた遠隔調査方法及びサンプリング方法の開発 	<p>◆FD-2と同様</p> <ul style="list-style-type: none"> 格納容器漏えい箇所の補修・止水技術・工法の開発(FD-3と同様)
安全確保に向けた主な留意点	<ul style="list-style-type: none"> 炉心安定冷却の維持 未臨界確認 	<ul style="list-style-type: none"> 炉心安定冷却の維持 未臨界確認 格納容器内の放射性物質の拡散防止 作業員の被ばく低減(遠隔化、遮へい等) 	<ul style="list-style-type: none"> 炉心安定冷却の維持 作業員の被ばく低減(遠隔化、遮へい等)

表3 中長期的措置における課題と研究開発項目について(1/5)

項目	作業要素	課題	必要な技術またはデータ	既存技術、データの適用性評価	研究開発項目
I 使用済燃料プールからの燃料体の取出し	SFP-1:原子炉建屋上部ガレキ撤去	・原子炉建屋上部のガレキを撤去する際、空气中へ放射性物質が多量に飛散する可能性があること。	・飛散抑制技術 ・モニタリング技術	・飛散抑制技術は既存技術(飛散防止剤)が適用可能。 ・モニタリング技術は既存技術が適用可能。	—
	SFP-2:カバー(またはコンテナ)ノクレーン設置	—	—	—	—
	SFP-3:取出し用輸送容器・収納缶の製造・調達	—	—	—	—
	SFP-4:共用プール内空きスペース確保ノ改造	・燃料体は海水に曝されていたため、他の健全燃料に悪影響を与える可能性があり、間仕切りが必要なこと。	・共用プール内の間仕切り技術	・共用プール内の間仕切りは既存技術で適用可能。	—
	SFP-5:使用済燃料プールからの燃料体取出しノ保管	・遠隔でプール内の燃料体を取り出す際に燃料体が落下する可能性があること。 ・燃料体を長期間保管する場合に海水によって長期健全性に影響を及ぼす可能性があること。また長期間の保管や処理する上で必要な措置(洗浄)が未定であること。 ・使用済燃料プール内の燃料体が損傷していた場合の損傷燃料の処理・処分方策について未定であること。 ・使用済燃料プール内の燃料体が損傷していた場合の損傷燃料(破損粉末含む)の計量管理及び検認の方法が未定であること。	・落下防止技術 ・燃料体の長期健全性評価技術 ・燃料体の洗浄技術及び長期保管、処理上の洗浄のクライテリア ・損傷燃料の処理・処分方策 ・損傷燃料のための核測定技術	・落下防止技術は既存技術が適用可能 ・評価技術は既存技術が適用可能。海水に曝されていた燃料体の長期健全性を示す既存データはなし。 ・洗浄技術は既存技術が適用可能。また、長期保管や再処理工程へ悪影響を与えないクライテリアはなし。 ・損傷燃料を処理する際のハンドリング技術は損傷状態に応じた技術の開発が必要。 ・化学処理工程の不純物の影響については評価が必要。 ・損傷燃料のための核測定技術がない。	・海水に曝されていた燃料体の長期健全性評価。 ・長期保管、処理する上で遵守する洗浄のクライテリアの策定。 ・損傷状況に応じたハンドリング技術の開発。 ・化学処理工程への不純物の影響評価。 ・損傷燃料のための核測定技術の開発。

表3 中長期的措置における課題と研究開発項目について(2/5)

項目	作業要素	課題	必要な技術またはデータ	既存技術、データの適用性評価	研究開発項目
II 燃料デブリの 取出し準備 作業	FD-1: 原子炉建屋内の除染作業	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉建屋内は高線量であること。 建屋内を除染する際、除染の効果は汚染の程度、部位(材料)に依存するため、適切な除染技術を選定する上で十分なデータが得られていないこと。 建屋内にガレキがありアクセス性が悪いこと。 	<ul style="list-style-type: none"> 汚染状況の遠隔調査技術。 	<ul style="list-style-type: none"> 汚染計測技術は既存技術の適用可能。 ガレキの散乱など現場に合わせた遠隔移動装置の開発が必要。 	<ul style="list-style-type: none"> 測定装置と遠隔移動装置を組み合わせた建屋内遠隔汚染調査装置の開発。
			<ul style="list-style-type: none"> 建屋内遠隔除染技術。 	<ul style="list-style-type: none"> 高汚染部位に対する既存除染技術の有効性についての評価と装置開発が必要。(TMIの技術が参考可) ガレキの散乱など現場に合わせた遠隔移動装置の開発が必要。 	<ul style="list-style-type: none"> 汚染状況に適した除染技術の選定または開発及び装置開発。 上記装置と遠隔移動装置を組み合わせた遠隔除染装置の開発。
			<ul style="list-style-type: none"> 遮へい技術。 	<ul style="list-style-type: none"> 遮へいについては既存技術の適用可能。 	—
	FD-2: 原子炉建屋、PCVからの漏えい箇所の調査/PCV外部からの内部状況調査	<ul style="list-style-type: none"> 汚染水が漏えいしている箇所は高線量、狭隘、水中環境にあること。 PCV近傍は高線量、狭隘であること。 	<ul style="list-style-type: none"> 高線量、狭隘、水中環境で漏えい箇所の遠隔調査技術。 	<ul style="list-style-type: none"> 漏えい箇所を特定するための既存技術(カメラ、線量測定)の有効性についての評価と装置開発が必要。 水中遠隔移動装置は存在するが、狭隘部での調査のために現場に合わせた改良が必要。 	<ul style="list-style-type: none"> 漏えい箇所の特定に適した調査技術の選定または開発及び装置開発。 上記装置と遠隔移動装置を組み合わせた漏えい箇所遠隔調査装置の開発。
			<ul style="list-style-type: none"> 高線量、狭隘でPCV外部からの遠隔内部調査技術。 	<ul style="list-style-type: none"> PCV外部から内部を調査する既存技術(γ線測定、音響測定等)の有効性についての評価と装置開発が必要。 調査対象部位に合わせた遠隔移動装置の開発が必要。 	<ul style="list-style-type: none"> PCV外部から内部調査技術の選定または開発及び装置開発。 上記装置と遠隔移動装置を組み合わせたPCV外部からのPCV内部遠隔調査装置の開発。
	FD-3: 原子炉建屋漏えい箇所止水・PCV下部補修作業	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉建屋からの汚染水漏えい箇所は高線量、狭隘、水中環境であること。 流水状態で止水する必要があること。 PCV近傍は高線量、狭隘であること。 	<ul style="list-style-type: none"> 高線量、狭隘、水中環境・流水状態での遠隔止水技術。 	<ul style="list-style-type: none"> 漏えいが想定される部位に対する既存止水技術(グラウト、シール材)の有効性・長期健全性についての評価と装置開発が必要。 	<ul style="list-style-type: none"> 建屋の漏えい箇所に適した止水技術の選定または開発及び装置開発。
			<ul style="list-style-type: none"> 高線量、狭隘での遠隔補修技術。 	<ul style="list-style-type: none"> 補修技術は既存技術が適用できるが、装置開発が必要。 漏えいが想定される部位に合わせて遠隔移動装置の開発が必要。 	<ul style="list-style-type: none"> 補修装置開発と遠隔移動装置を組み合わせたPCV遠隔補修装置の開発。
	FD-4: PCV部分水張り	<ul style="list-style-type: none"> 水張りの際に燃料デブリ廻りの冷却水量が変化する場合に臨界となるリスクが高まる可能性があること。 	<ul style="list-style-type: none"> 燃料デブリの臨界評価技術。 	<ul style="list-style-type: none"> 臨界状態の時間的変化を詳細に評価するには解析技術の開発が必要。 	<ul style="list-style-type: none"> 臨界状態の時間的変化を評価する解析コードの開発。
			<ul style="list-style-type: none"> 臨界検知技術。 	<ul style="list-style-type: none"> 検出器は既存技術が適用できるが、検出器の設置場所は高線量下であることが想定され、廻りの高い放射線と測定対象の放射線を識別可能な検出器システムの開発が必要。 	<ul style="list-style-type: none"> 廻りの高い放射線と測定対象の放射線を識別可能な検出器システムの開発。
			<ul style="list-style-type: none"> 臨界防止技術。 	<ul style="list-style-type: none"> 臨界防止技術は既存技術が適用可能。 	—
	FD-5: PCV内部調査・サンプリング	<ul style="list-style-type: none"> PCV内は高線量、狭隘、高温、多湿、水中環境であること。 PCV内部水の濁り、燃料デブリの位置など内部環境が不明であること。特に燃料デブリがペステル内にある可能性があり、アクセス性が悪いこと。 サンプリングするにあたって燃料デブリの基礎物性が不明であること。 サンプリングの際に燃料デブリに対する水減速材の相対量に変化し、臨界となるリスクが高まる可能性があること。 デブリ(サンプリング試料含む)の計量管理及び検認の方法が未定であること。 	<ul style="list-style-type: none"> 高線量、狭隘、高温、多湿、水中環境での遠隔内部調査技術。 	<ul style="list-style-type: none"> 高温、高線量下の既存調査技術(水中カメラ等)の有効性についての評価と装置開発が必要。 	<ul style="list-style-type: none"> 高温、高線量下で観察可能な技術の選定または開発及び装置開発。 上記装置と遠隔移動装置を組み合わせたPCV内遠隔調査装置の開発。
			<ul style="list-style-type: none"> 高線量、狭隘、水中環境での燃料デブリの遠隔サンプリング技術。 	<ul style="list-style-type: none"> TMIの技術が参考になるが、PCV内からサンプリングする技術は新たな技術開発が必要。 燃料デブリをサンプリングする位置・環境に合わせて遠隔移動装置の開発が必要。 	<ul style="list-style-type: none"> PCV内燃料デブリのサンプリング技術の開発及び装置開発。 上記装置と遠隔移動装置を組み合わせた遠隔サンプリング装置の開発。
<ul style="list-style-type: none"> 燃料デブリの炉内分布の予測技術。 			<ul style="list-style-type: none"> 既存の解析コード(MAAP, MELCOR, THALES, SAMPSON)により概略評価は実施できるが、精度を高めるために更なる改良が必要。 	<ul style="list-style-type: none"> 苛酷事故解析コードの高度化。 	
<ul style="list-style-type: none"> 燃料デブリの基礎物性データ。 			<ul style="list-style-type: none"> TMIの燃料デブリのデータが参考となるが、福島事故における燃料デブリの生成条件を踏まえたデータも必要。 	<ul style="list-style-type: none"> 事故時の生成条件を模擬した燃料デブリ基礎物性データの取得。 	
<ul style="list-style-type: none"> 燃料デブリのための核測定技術。 			<ul style="list-style-type: none"> 燃料デブリのための核測定技術がない。 	<ul style="list-style-type: none"> 燃料デブリのための核測定技術の開発。 	

表3 中長期的措置における課題と研究開発項目について（3/5）

項目	作業要素	課題	必要な技術またはデータ	既存技術、データの適用性評価	研究開発項目
II 燃料デブリの 取出し準備作業	FD-6:PCV 上部補修	・補修箇所は高線量、狭隘であること。	・高線量、狭隘での遠隔補修技術。	・補修技術は既存技術が適用できるが、装置開発が必要。 ・漏えいが想定される部位に合わせて遠隔移動装置の開発が必要。	・補修技術と遠隔移動装置を組み合わせた PCV 遠隔補修装置。
	FD-7:RPV/PCV 水張り	・水張りの際に燃料デブリに対する水減速材の相対量が増え、臨界となるリスクが増える可能性があること。	・臨界評価、検知、防止技術。	・FD-4 と同様	・FD-4 と同様。
	FD-8:炉内調査・サンプリング	<ul style="list-style-type: none"> ・RPV 内は高線量、狭隘、高温、水中環境であること。 ・RPV 内部水の濁り、燃料デブリの位置など内部環境が不明であること。 ・燃料デブリ取出しにあたって、取出ツールや燃料デブリ収納缶の設計に必要となる基礎物性が不明であること。 ・サンプリングの際に燃料デブリに対する水減速材の相対量が増え、臨界となるリスクが高まる可能性があること。 ・デブリ(サンプリング試料含む)の計量管理及び検認の方法が未定であること。 	・高線量、狭隘、高温、水中環境での遠隔内部調査技術。	・高温、高線量下の既存技術(水中カメラ等)の有効性についての評価と装置開発が必要。 ・炉内へのアクセスは既存技術の改良が必要。	・高温、高線量下で観察可能な装置の開発。 ・炉内にアクセスするためのプラットフォーム装置の開発。
			・高線量、狭隘、水中環境での燃料デブリの遠隔サンプリング技術。	・TMI の技術が参考になるが、燃料取替床から燃料デブリまでの距離が福島のほうが長く、新たに技術開発が必要。	・RPV 内燃料デブリのサンプリング技術の開発及び装置開発。 ・上記装置と遠隔移動装置を組み合わせた炉内遠隔サンプリング装置の開発
			・燃料デブリの炉内分布の予測技術。	・既存の解析コード(MAAP, MELCOR, THALES, SAMPSON)により概略評価は実施できるが、精度を高めるために更なる改良が必要。	苛酷事故解析コードの高度化。
			・燃料デブリの基礎物性データ。	・FD-5 と同様。	・FD-5 と同様。
			・臨界評価、検知、防止技術。	・FD-4 と同様。	・FD-4 と同様。
・燃料デブリのための核測定技術。	・燃料デブリのための核測定技術がない。	・燃料デブリのための核測定技術の開発。			
III 燃料デブリ取出し技術の開発と取出し作業	FD-9:燃料デブリ取出し技術の開発と取出し作業	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料デブリが RPV 外を含め広範囲に分布している可能性があること。 ・燃料デブリ取出しの際に燃料デブリに対する水減速材の相対量が増え、臨界となるリスクが増える可能性があること。 ・燃料デブリ取出しにあたって模擬燃料デブリの基礎物性ではなく、より正確な基礎物性が必要であること。 ・燃料デブリの収納・保管方法が未定であること。 ・デブリ(サンプリング試料含む)の計量管理及び検認の方法が未定であること。 ・燃料デブリの将来的な扱いについて未定であること。また TMI の燃料デブリも長期保管状態にあり、世界的にも処理・処分技術は確立されていない。 ・水張り困難な場合には、燃料の取出しの目途が得られていないこと。 	・広範囲、狭隘、水中環境での遠隔燃料デブリ取出し技術。	・RPV 内の燃料デブリについては TMI の技術が参考になるが、燃料取替床から燃料デブリまでの距離が福島のほうが長く、新たに技術開発が必要。また RPV 外の燃料デブリ取出し技術は国外にも既存技術はない。 ・燃料デブリ取出しは現場に合わせた遠隔回収技術、装置開発が必要。	・RPV 内外燃料デブリの取出し技術の開発及び装置開発。 ・上記技術を遠隔で実施するための遠隔燃料デブリ取出し装置の開発。
			・臨界評価、検知、防止技術。	・FD-4 と同様。	・FD-4 と同様。
			・実燃料デブリの基礎物性。	・実燃料デブリの分析は既存技術で可能。TMI の燃料デブリのデータが参考となるが、生成条件が異なるため、より正確なデータが必要。	・実燃料デブリ基礎物性データの取得。
			・燃料デブリのための核測定技術。	・燃料デブリのための核測定技術がない。	・燃料デブリのための核測定技術の開発。
			・燃料デブリの収納・保管技術。	・燃料デブリの収納・保管技術は国内にない。TMI の技術が参考となるが、海水に曝された影響を考慮する必要がある。	・海水の影響を考慮した燃料デブリ収納・保管技術の開発。
			・燃料デブリの処理・処分技術。	・既存処理・処分技術の適用性は評価されてない。	・燃料デブリの既存処理・処分技術の検討。
			・水張り困難時の燃料取出し技術。	・水張りなしで燃料を取出す既存技術はない。	・水張りなしの燃料取出し技術の開発。

表3 中長期的措置における課題と研究開発項目について(4/5)

項目	作業要素	課題	必要な技術またはデータ	既存技術、データの適用性評価	研究開発項目	
IV 公衆及び作業安全の確実な確保	未臨界維持	・燃料デブリに対する水減速材の相対量が増え、臨界になるリスクが増える可能性があること。	・飛散抑制技術。 ・モニタリング技術。	・FD-4と同様	・FD-4と同様	
	燃料デブリの安定冷却の維持	・各作業における原子炉の循環冷却注水への影響評価	・各作業におけるリスク評価。	・既存技術(PSA)により評価可能。	—	
	環境への放射性物質拡散防止	・原子炉建屋上部のガレキ撤去時の空気中への放射性物質が多量に飛散する可能性があること。	・SFP-1と同様。	・SFP-1と同様	・SFP-1と同様	・SFP-1と同様
		・RPV/PCVは海水に長期間曝されていたため、腐食によりRPV/PCVの長期健全性に影響を及ぼす可能性があること。	・海水に曝されていたRPV/PCV腐食による長期健全性評価データ。	・海水に長期間さらされていたRPV/PCVの長期健全性評価データはなし。	・海水に長期間さらされていたRPV/PCVの腐食に対する長期健全性評価データの取得	
		・高温の海水で長期間曝されていたため、防錆剤が有効に効かない可能性があること。	・高温の海水に曝されていた機器に対する腐食抑制技術。	・高温の海水に曝されていた場合の既存の腐食抑制剤の有効性については評価されていない。	・高温の海水に曝されていたRPV/PCVに対する腐食抑制剤の選定または開発	
		・海水成分を含む汚染水処理により発生する二次廃棄物(廃ゼオライト、廃スラッジ、濃縮廃液等)の処理・処分方法、安定的な長期保管方法について未定であること。	・二次廃棄物の安定的な保管・処理・処分技術。	・長期安定保管する上で二次廃棄物の性状分析、水素ガスや発熱などに関する安全性評価、腐食に対する健全性評価がされていない。 ・廃棄体化は原子炉や再処理等から発生する廃棄物に適用される廃棄体評価が参考となるが、性状により新たな評価が必要。	・二次廃棄物の性状分析、安全性評価、腐食に対する健全性評価 ・廃棄体化検討・処分方法検討	
		・作業で発生した放射性廃棄物の扱いが未定であること。	・放射線廃棄物を分類するための性状分析技術。	・既存の分類をもとに整理が可能。 ・性状分析は廃棄物の性状に応じた分析が必要。	—	
			・放射線廃棄物の処理、処分技術。	・廃棄物の形態により新たな扱いが必要となる可能性がある。	・放射性物質の性状に応じた分析技術	
			・RPV上蓋を開放する際、二次格納施設(原子炉建屋)が損傷しているため、放射性物質が環境へ拡散する可能性があること。	・原子炉建屋からの放射性物質拡散防止技術。 ・モニタリング技術。	・カバー(又はコンテナ)による原子炉建屋のカバーが適用可能。 ・既存技術でモニタリング可能。	—
	・海水への放射性物質の拡散を長期的に防止する必要があること。	・海水への拡散防止技術。 ・モニタリング技術。	・立坑からの止水、シルトフェンス設置、海水循環型浄化装置の設置 ・遮水壁の設置より拡散防止可能。 ・既存技術でモニタリング可能。	—		
	作業員の被ばく低減	・各作業は高線量、高汚染・多湿環境下での作業であるため、作業員が多量に被ばくすること。	・除染技術。	・FD-1と同様。	・FD-1と同様。	
			・遮へい技術。	・FD-1と同様。	・FD-1と同様。	
			・高線量の放射線保護技術 ・高汚染・多湿環境化における内部被ばく保護技術	・高線量下における作業性を考慮した外部被ばく保護具はなし。 ・高汚染・多湿環境に対応した内部被ばく保護具はなし。	・作業性を考慮した外部被ばく保護具の開発。 ・高汚染・多湿環境に対応した内部被ばく保護具の開発	

表3 中長期的措置における課題と研究開発項目について（5 / 5）

	作業要素	課題	必要な技術またはデータ	既存技術、データの適用性評価	研究開発項目
V	事故原因の究明、炉心損傷時の挙動評価等	・福島第一原子力発電所事故の事故原因究明のために必要な炉心溶融進展挙動や PCV 内の挙動については、電源喪失によりプラントデータが不足しており、詳細な挙動について把握されていない。	・海水注入なども考慮した苛酷事故解析コード ・解析コードの高度化に必要なデータ	・既存の解析コード(MAAP, MELCOR, THALES, SAMPSON)による評価により事象進展の概要の把握は可能であるが、さらに詳細を把握するためには解析コードの高度化開発及びこれに伴うデータの取得が必要である。	・苛酷事故解析コードの高度化

表4 遠隔技術に係る研究開発項目の課題の整理

作業要素	研究開発項目	操作範囲	遠隔装置開発に係る課題												
			場所	作業内容(○内は例)							機構	制御			
				計測(画像、形状測定、温度、湿度、放射線等)	除染	サンプリング	遮へい設置	穴開け/切断	止水(含む補修)	移動	狭隘/複雑形状空間での位置決め	マンマシンインターフェース	通信		
遠隔操作技術の適用	原子炉建屋内の除染作業	遠隔汚染調査装置の開発	原子炉建屋内床面、壁面、天井、機器配管表面、PCV 外表面	○ (画像、放射線)		○ (吸引、ホーリング)	○ (重量物運搬)					○ (段差、高所)	○ 装置の設置位置及び接近必要範囲に応じた、共用遠隔操作ロボットと各種計測・作業を行う作業ツール(エンドエフェクタ)の組合せの概念設計の集約	○ 装置構成の種類に応じて、ある程度の標準化	○ 操作基地からの遠隔通信は共通インフラの導入。建屋内外での無線の管理
		遠隔除染装置の開発			○ (高圧スプレー、はつり)						○ (段差、高所)				
	原子炉建屋、PCV からの漏えい箇所調査/PCV 外部からの内部状況調査	漏えい箇所遠隔調査装置の開発	原子炉建屋(水中含む)、PCV 外表面、サブプレッションチェンバ外表面	○(画像、形状計測、温度、放射線、赤外線、音)		○ (吸引)	○ (重量物運搬)	○ (コンクリート床、壁穴開け)				○ (水中、狭隘部)			
		PCV 外部からの PCV 内部遠隔調査装置の開発		○ (放射線、音)							○ (段差、高所)				
	原子炉建屋漏えい箇所止水・PCV 下部補修作業	PCV 遠隔補修装置の開発	原子炉建屋(水中含む)、PCV 外表面	○ (画像、形状計測)			○ (重量物運搬)	○ (コンクリート床、壁穴開け)	○ (グラウト、溶接)		○ (段差、高所)				
	PCV 内部調査・サンプリング	PCV 内遠隔調査装置の開発	原子炉建屋(水中含む) PCV 内部、PCV 外表面	○ (画像、形状計測、温度、湿度、放射線)			○ (重量物運搬)	○ (金属穴開け、切断)		○ (ハウダリ形成)	○ (水中、狭隘部)				
		遠隔サンプリング装置の開発	原子炉建屋(水中含む) PCV 内部、PCV 外表面	○ (画像、放射線)		○ (吸引、ホートサンプリング、金属片ハンドリング)					○ (水中、狭隘部)				
	PCV 上部補修	PCV 遠隔補修装置	PCV 外表面	○ (画像、形状計測)			○ (重量物運搬)	○ (穴開け)	○ (グラウト、溶接)		○ (段差、高所)				
	炉内調査・サンプリング	炉内遠隔サンプリング装置の開発	原子炉建屋(燃料取替床)、RPV 内部	○ (画像、形状計測、放射性)		○(吸引、ホートサンプリング、金属片ハンドリング)	○ (重量物運搬)				○ (水中、狭隘部)				
	燃料デブリ取出し	遠隔燃料デブリ取出し装置の開発。	原子炉建屋(燃料取替床)、RPV 内部	○ (画像、形状計測)		○(吸引、ホートサンプリング、金属片ハンドリング)	○ (重量物運搬)	○ (金属穴開け、切断)			○ (水中、狭隘部)				

表5 中長期措置技術ロードマップ(1/2)

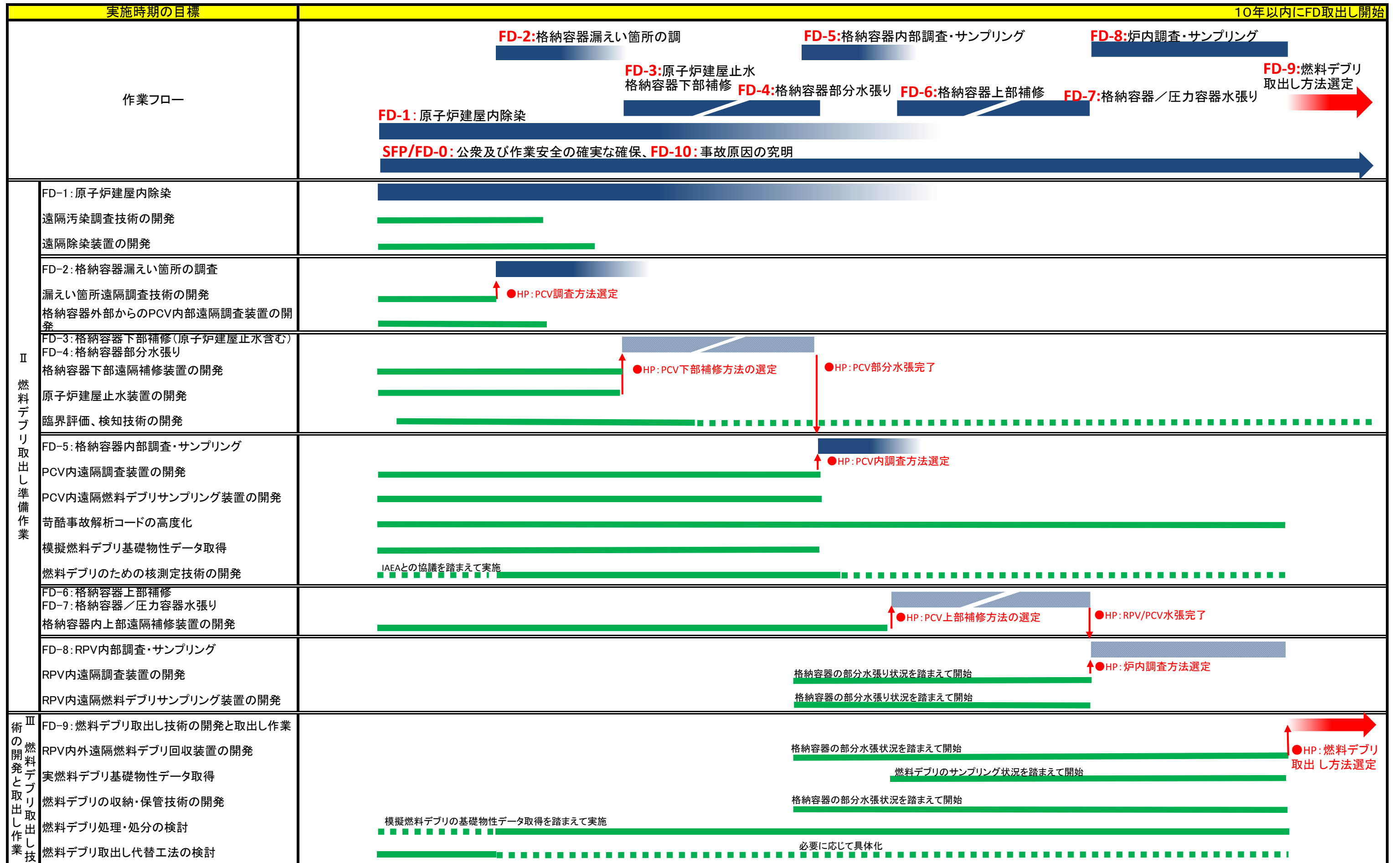


表5 中長期措置技術ロードマップ(2/2)



図1. 研究開発体制のイメージ

