燃料デブリ取り出しに関する研究の現状と課題

国際廃炉研究開発機構 鈴木 俊一

福島第一原子力発電所4号機の使用済み燃料プールからの燃料取り出しが2013年11月18日から開始されたことで、「東京電力(株)福島第一原子力発電所1～4号機の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」は次なるフェーズ(第2期)に移行した。第2期のゴールは、2020年以降に燃料デブリの取り出しを開始することであり、必要な現場作業や関連研究開発の迅速な遂行が求められている。米スリーマイル島2号機事故(TMI-2)対応での経験に基づき、現在、作業員の被ばくを最小限に抑えるため、原子炉格納容器を冠水状態にして燃料デブリの取り出しを行うことが前提となっている。一方、2013年6月27日の中長期ロードマップ改訂にあたっては、従来の方向性に加え、「冠水方式の検討・実施に伴い発生すると予想される種々の課題を考慮し、代替工法の検討も開始すること」が明記されており、デブリ取り出しのための着実な準備が求められている。

1. はじめに

燃料デブリ取り出しを早ければ2020年度上半期からスタートするというのが現状の計画である。燃料デブリの取り出しについては、「冠水方式」を大原則としている。しかしながら、TMI-2と比較して福島第一では大幅に困難になることが想定される。主たる違いは原子炉周りの損傷状況と下部構造である。福島第一とTMI-2の主な差異を第1表に示す。これらを踏まえて、デブリ取り出し準備に関して約15の研究開発プロジェクトが進められている。燃料デブリ取り出しに向けて、取り出しステップごとの主な課題を次章に示す。

2. 燃料デブリ取り出しのステップと想定する課題

ステップ1：原子炉建屋内除染

建屋内の線量低減は、後段の作業実施に不可欠であ

第1表 福島第一原子力発電所とTMI-2の主な差異

比較項目	TMI-2	福島第一原子力発電所
原子炉建屋(R/B)の状況	損傷は限定的	水素爆発による損傷(1号機、3号機、4号機)
水バウンダリ	原子炉容器からの漏えいはなし	原子炉圧力容器(RPV)、原子炉格納容器(PCV)とも漏えい(1号機～3号機)
燃料デブリ位置	原子炉容器底部	RPV外に落下している可能性
原子炉底部形状	半球状の下鏡構造物なし	多数の制御棒駆動機構等が貫通した複雑な形状

The Current Status of and Research and Development Issues in Respect of Preparation to Remove Fuel Debris : Shunichi SUZUKI, Hirofumi KINOSHITA, Shigeru YUKINORI, Hiroaki ANEKAWA.

(2014年5月26日受理)

る。除染・線量低減作業の現状に関しては、本特集の前期にて紹介しているので本報では省略する。主な技術的課題は、①高線量(最大Sv/hオーダー)、②原子炉建屋(R/B)内に散乱した瓦れき等の障害物除去、③BWR-3・BWR-4元来の狭隘な建屋設計によるアクセス性の制限などである。

ステップ2,3：PCV漏えい箇所特定と補修

PCV外部から漏えい箇所を特定し、補修を実施する。主な技術的課題は、①PCV内の高線量と湿度、②濁度の高い水中にある損傷箇所(推定)、③高濃度汚染水が流れている条件下での漏えい箇所の補修などである。

ステップ4,5：PCV下部の水張り、PCV内部の調査

PCV下部に水を張り、PCV内部を詳細に調査するとともに、デブリの分布状況を把握する。主な技術的課題は、①高線量に伴う低アクセス性、濁度による視界の制限、②調査装置の耐放射線性、③調査機器挿入箇所に必要な漏えい対策などである。

ステップ6,7：PCV上部の補修、PCVの冠水

PCV漏えい箇所を補修した後、内部を冠水する。その後、炉内機器や燃料デブリ取り出しのためのクレーン、R/Bコンテナを設置する。PCV内に十分な水位まで水張りが完了した後、PCV及び原子炉圧力容器(RPV)の上蓋を開放する。主な技術的課題は、①高線量に伴う低アクセス性、②冠水後の耐震安定性確保、③PCVからの放射性物質放出の抑制、④冠水時の再臨界防止などである。

ステップ8：RPV内部調査、デブリサンプリング

RPV内部の状況やデブリの分布・性状を調査する。主な技術的課題は、①高線量、低アクセス性、濁度による視界の制限、②必要な高線量下遠隔操作機器の開発、③デブリサンプリング技術の開発などである。

ステップ9：RPV/PCVからの燃料取出し

RPV/PCVから炉内構造物や燃料デブリを取り出す。主な技術的課題は、①BWRの複雑な炉底部構造物やRPV外部まで落下している燃料デブリの取り出し方法、②多種の金属やコンクリートとの混合による燃料デブリの核特性、機械的特性、化学特性の事前把握、③再臨界防止、④燃料デブリ保管技術の確立などである。

3. 燃料デブリ取り出し準備の現状

(1) PCV漏えい箇所の特特定(下部気中漏えい箇所)

PCV漏えい調査及び補修に関しては、気中の漏えい箇所を調べるためのロボットが開発されている。第1図に、PCV下部とトーラス室、サプレッションチャンバー(以下、S/C)、ベント管、そのジョイント部分やS/C上部にあるバルブ、サンドクッションドレン管等の配置を模式的に示す。第2図は、PCVとS/Cを結ぶベント管とジョイント部やS/C下部、並びにS/C上部バルブを目視調査するための気中調査ロボットである。ベント管接合部調査ロボット①は、ベント管の外部表面に吸着し、ベント管とコンクリート壁の間からベント管とドライウェル(D/W)の接合部に接近して損傷を調査する。S/C上部調査ロボット②は、トーラス室のキャットウォークから最高で約3m、S/C上部構造物からの漏えいを調べる。四足歩行ロボット+小型走行車③は、ベント管の下部付近からの漏えい有無の調査のために使用する。

1号機のPCV下部周辺で漏えい箇所の有無を水上調査ロボット④にカメラを搭載して調査した結果、サンドクッションドレン管及びS/C壁に漏えいが確認された。(本開発は現在IRIDの専門部会として承継されている遠隔技術分野の有識者から成るタスクフォースでの議論を受けて実施。)第3図はサンドクッションドレン管からの漏えい状況の写真である。なお、損傷箇所がどこかは現在確認されていない。2号機S/C全周の気中部に漏えい箇所がないかは東京電力が四足歩行ロボットを使っ

第1図 PCV下部のS/C、トーラス室の断面模式図

① ベント管ジョイントの調査ロボット

② S/C上部調査ロボット

③ 四足歩行ロボット

④ 水上調査ロボット

第2図 気中の漏えい箇所調査用ロボット

て調査した。第4図は、2号機のS/Cベント管スリーブ部、サンドクッションドレン管、ベント管下部の写真である。気中部においては水の漏えいは確認されなかった。

第3図 1号機PCV下部サンドクッションドレン管からの水の漏えい状況

第4図 2号機PCV下部, S/C周辺の気中漏えい調査

(2) PCV 漏えい個所の特定(水中漏えい箇所)

トーラス室及びS/C内に水が入っており、かつ漏えい量が多くないと推定される条件にあって、水中の漏えい箇所をどのように確認するかは課題である。現在、S/C下部を調査するロボット、水中を遊泳しながら調査するロボット、水中内床面を走行するロボットの開発が進められている(第5図)。トーラス室水中壁面調査ロボットである水中遊泳ロボット⑤は、カメラ映像を見るオペレーターによって遠隔操作され、建屋ペネトレーションの損傷を調べる。床面走行ロボット⑥は、水中床面を走行し、離れた場所における漏えいを調べるために超音波を用いる。S/C下部調査ロボット⑦は、S/C外面、外部構造物及びペネトレーション配管における損傷を表面に吸着して調べる。

第5図 水中の漏えい箇所調査ロボット

第6図 PCV下部の止水のための工法概念

(3) PCV 下部の補修(止水)概念

PCVの冠水に向けた漏えい箇所補修(止水)の工法として有力な案の一つは、ベント管内で止水をしてベント管より上に水を張る方式である。具体的には、ベント管端部にエアバックのような膨張シールを挿入し、膨らませてベント管に栓をした後、止水材(グラウト：流動性と水中不分離性能を併せ持ったモルタル状高強度遮水材)を注入して、閉塞・止水を行う。(第6図)

現場での作業工程としては、まず、R/B1階の床を穿孔して、ベント管にアクセスし、次に膨張シールをベント管端部で膨張させ、その後、グラウトを注入して止水

第7図 オペレーティングフロアとPCV底部の距離

する。現在、グラウトによるベント管部止水の基礎試験が進められている。

(4) PCVの内部調査

PCV内部調査は、PCVからの燃料デブリの取り出しに先立ってPCV内のデブリの位置・形状を調査するために実施される。現在、制御棒を交換するRPV下のエリアを使って、RPV底部やPCV下部を目視調査できる遠隔操作機器を開発中である。

2号機ではX-53と称する貫通孔から制御棒交換レールを使ってPCV内部にアクセス可能である。一方、1号機では同一貫通孔付近の線量が非常に高いため、簡単には作業員がアクセスできない。そのため、X-100Bと称するX-53とは反対側に位置する貫通孔からアクセスする計画であるが、X-100Bは直径が10cmと、機器を挿入するには狭い。現在、カメラと線量計及びクローラを縦一列に配列して、貫通孔からPCV内に入った後にコの字型に変形して床面を走行するロボットを開発中である。

(5) RPVの内部調査

RPV内部調査は燃料デブリの取り出しに先立ってRPV内部の情報を得るために実施される。原子炉内のデブリ位置を調査するだけでなく、RPV内上部の構造物がどのような状態になっているか確認する必要がある。冠水法による燃料デブリ取り出しでは、まず、PCV、RPVの蓋を外し、炉上部にあるドライヤー、気水分離器等の機器を取り出した後、デブリを取り出す。そのため原子炉上部に設置された機器の状況や雰囲気線量などをまず確認する必要がある。

燃料デブリ位置については、過酷事故(SA: Severe Accident)解析コードにより炉心状態の推定が行われている。東京電力は、シビアアクシデント総合解析コードMAAP (Modular Accident Analysis Program) を用いて、また、JAEAは、シビアアクシデント進展解析コードMELCORで計算した結果、1号機では燃料のほとんどがPCV下部に落ちており、2号機、3号機では半分以上がPCVの下部に落ちているという推定となった。これらの解析精度を向上させるべく、種々の研究開発を実施しており、解析情報は経済協力開発機構(OECD)のプロジェクトと一緒に世界的安全研究者と共有し

ている。また、素粒子ミューオンによる原子炉内部の透視技術の適用性評価等を実施する計画がスタートしている。デブリサンプリングのための開発も進めている。

(6) 燃料デブリ取り出し

冠水工法を前提とした場合、燃料デブリ取り出し及びPCV/RPV内部調査において以下のような課題が考えられる。

- ・高い線量率(2号機 R/B の最上階で最大毎時 880mSv)
- ・複雑な炉内構造物や狭隘なPCV内空間
- ・複雑かつ多様なため漏えいを止めることが困難なPCVペネトレーション
- ・オペフロからPCV底部までの物理的距離(第7図)

現行ロードマップはTMI-2の対応をベースに考えられているが、TMI-2はオペフロから炉容器底部まで約14mである。一方、BWRの場合には、オペフロから原子炉底部まで約25m、PCV底部までは約35mである。しかも、燃料デブリは炉内の機器等を溶かし込んでいることから、TMI-2とは組成が異なっている可能性がある。燃料デブリ取り出しの機器開発を行う上で、硬さ、靱性、加工性、機械的特性、不均一性の把握が必要である。海外では、TMI-2やSA研究で実デブリ分析や模擬デブリ作製の実績があるものの、BWR(福島第一)とPWR(TMI-2)のデブリ成分系の差異や、福島第一原子力発電所特有の条件などから、既存の知見を直接活用することには限界がある。取り出し機器の開発のためには、①ウランU/ジルコニウムZr比率、②炉底部構造材(Fe/Ni)の混合、③コンクリートの混合(MCCI: Molten Core Concrete Interaction)生成物、④高温状態の持続時間などを考慮したデブリ特性を把握する必要がある。

4. さらなる研究開発のための 情報提供依頼の状況

IRIDでは、PCV/RPVの内部調査技術とPCV/RPVからの燃料デブリ取り出し技術に関して、国内外の英知を結集すべく情報提供依頼(RFI: Request for Information)を実施した。

トピックA: PCV/RPVの内部調査

A-1: PCV/RPV内部調査の代替工法の概念検討

A-2: PCV/RPV内部調査のために必要とされる技術

トピックB: PCV/RPVからの燃料デブリ取り出し

B-1: 燃料デブリ取り出し代替工法の概念検討

B-2: 燃料デブリ取り出しのために必要とされる技術

第2表に情報提供の状況をトピック別、国別の件数で示す。約200件近くの情報を頂いており、国別には日

第2表 国内外からの内部調査、燃料デブリ取り出しに関する情報提供の状況

RFIの募集分野		合計	国別内訳							
			日	米	英	独	仏	ベルギー	加	露
PCV/RPV内部調査 トピックA	A-1：概念検討	33	20	7	3	-	2	-	1	-
	A-2：必要とされる技術	58	32	6	10	6	2	2	-	-
燃料デブリ取り出し トピックB	B-1：概念検討	43	23	8	3	2	5	-	1	1
	B-2：必要とされる技術	60	41	7	3	4	2	2	-	1
合計（情報件数）		194	116	28	19	12	11	4	2	2
合計（組織・機関数）*		95	61	13	8	4	4	1	2	2

本が半分以上、以降件数順で、米国、英国、ドイツ、フランス、ベルギー、カナダ、ロシアから種々の概念が提供された。原子炉内部の調査に関しては、直接見る技術とか、素粒子ミュオンにより間接的に内部を見る（透視）技術など、いろいろなアイデアが寄せられた。

燃料デブリの取り出し技術としては、冠水、部分冠水、気中で取り出す方法、取り出し方向も上部以外に、横から、下からなどの提案が出されている。デブリの切断では、反力の観点からレーザー技術を使った技術提案が多く見られた。

5. おわりに

廃炉を取り巻く現状は、従来経験したことのない複雑かつ困難な課題を内包しており、IRIDは、その解決のために国際的な協業により代替工法も含む多面的なアプローチの検討が必要であると認識している。燃料デブリ取り出しのためには、まずはデブリ位置を確認することが重要であり、また、どのように取り出すか手法の概念を検討する必要がある。このため、IRIDでは国際的な英知と経験を結集するために、PCV/RPV内部調査、及びPCV/RPVからの燃料デブリ取り出しについて国内

外からの情報提供を依頼した。現在、これらの技術の整理が行われており、今後選定のステップを経て、概念研究、実用化研究を進める予定である。

本件は、資源エネルギー庁の補助金事業「平成23年度発電用原子炉等事故対応関連技術開発補助金」及び「平成24年度発電用原子炉等事故対応関連技術開発補助金」にかかる成果の一部を取りまとめたものである。

著者紹介

鈴木 俊一（すずき・しゅんいち）
技術研究組合国際廃炉研究開発機構
（専門分野/関心分野）原子炉材料/廃炉技術一般

木下 博文（きのした・ひろふみ）
本誌，56[8]，p.00(2014)参照．

行則 茂（ゆきのり・しげる）
本誌，56[8]，p.00(2014)参照．

姉川 弘明（あねかわ・ひろあき）
本誌，56[8]，p.00(2014)参照．