事故炉廃止措置時におけるリスク管理に関する検討

青木 孝行^{1,*}

Study on Risk Management during Decommissioning of Accident-Damaged Nuclear Power Plant

Takayuki AOKI^{1,*}

¹Graduate School of Engineering, Tohoku University, 6-6-01-2 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan

(Received October 1, 2018; accepted in revised form March 8, 2019; published online June 20, 2019)

In normal nuclear power plants, three fundamental safety functions, i.e., stopping the reactor, cooling the reactor and confining radioactive materials, must be maintained to ensure nuclear safety. Similarly, during the decommissioning of accident-damaged nuclear power plants, they must be maintained. However, in severely accident-damaged nuclear power plants, such as Fukushima Daiichi Units 1 to 3, the stopping function is lost and the confinement function is degraded. In such cases, it can be considered that the cooling function during the decommissioning period before starting fuel debris retrieval becomes more important for nuclear safety than in the other periods. This is because it plays a very important role in maintaining the physical state of the fuel and fuel debris to prevent recriticality and thus suppresses the mobility of radioactive materials. Similarly, the confinement function becomes more important during the fuel debris retrieval. Because of the high radiation level, it is very difficult to access the inside of the primary containment vessel and reactor building to investigate and/or repair equipment or components. Thus, it may be necessary to propose a decontamination and decommissioning project with remaining unknowns and to perform extensive research and development to complete the project. Such a project must be carried out strategically with the efficient and effective use of risk information. In this paper, the results of considering the basic concept and methods of risk management during the decommissioning of accident-damaged nuclear power plants from the viewpoint of safety and economic risks are reported.

KEYWORDS: *severe accident, accident-damaged reactor, nuclear decommissioning, risk management, nuclear safety risk, economic risk, facility management*

I. 緒 言

東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所(以下、1Fという。)のような過酷事故を起こした事故炉では、燃料が炉内構造物とともに熔融して原子炉圧力容器(以下、RPVという。)壁を貫通し原子炉格納容器(以下、PCVという。)底部に落下し、それに伴う高温高压によりRPVペデスタルやPCVが破損していること、また燃料被覆管のジルコニウムと冷却材(水)の反応で発生した水素がPCV外へ漏えい・爆発し原子炉建屋(以下、R/Bという。)が損傷していることなどが想定される。しかしながら、このようなダメージを受けた主要構造物ではあるものの、一定の安全機能が保持され、放射性物質の外部への放出が抑制されている。

このような事故収束後^{a)}の事故炉の状態は、その後のプ

ラント状態の変化や廃止措置活動の進捗で大きく変わっていくこととなる。損傷燃料および燃料デブリ(以下、損傷燃料および燃料デブリを総称して「燃料デブリ」という。)の取出開始前の時期では、原子力発電所の3つの基本安全機能である「止める(再臨界防止)機能」「冷やす機能」「閉じ込める機能」のうち、「止める(再臨界防止)機能」と「閉じ込める機能」は現状を保持しつつ、「冷やす機能」で放射性物質の外部への放出を抑制する。したがって、この時期は「冷やす機能」の重要性が相対的に高いといえる。燃料デブリの取り出しは「閉じ込め機能」を修復し確実な圧力バウンダリーと負圧維持機能を有するシステムを構築した後でないと開始できない。したがって、燃料デブリ取出開始後の時期は、「閉じ込める機能」の重要性が相対的に高いといえる。このように、事故炉の廃止措置に要求さ

^{a)} 本論文では、事故の急激な発生・進展が停止し、一定の安定した状態に落ち着いた後の事故炉の状態を「収束」という言葉を用いて表現した。

¹ 東北大学大学院 工学研究科量子エネルギー工学専攻

* Corresponding author, E-mail: takayuki.aoki@qse.tohoku.ac.jp

れる安全機能は廃止措置期間全体に亘って一様ではなく、廃止措置活動の進捗とともに変動する。この変動は、事故炉廃止措置時のそのときそのときの状況の特徴付けられていると考えられる。

本論文では、以上のような認識を踏まえて、5つのフェーズ、すなわちフェーズI(燃料デブリ取り出し前)、II(燃料デブリ取り出し中)、III(燃料デブリ仮保管・搬出)、IV(解体・撤去)およびV(廃棄物処理・処分)に大別し、その特徴を明確にした上で事故炉廃止措置時におけるリスク管理の考え方や方法等について検討する。なお、事故炉の廃止措置においては、作業員の異常被ばくリスクや労働安全リスク等、各種のリスクが考えられるが、ここでは安全リスクとして「廃止措置に伴う放射性物質の外部への追加放出リスク」について検討する。また、後述するように、経済性が安全性へ与える影響も大きいので、経済リスクについても検討する。

II. 事故炉廃止措置の概要

1. 事故炉廃止措置の特徴を際立たせている事項

(1) 事故炉廃止措置時における設備の状態

炉心溶融が大規模に発生した事故炉の事故収束後の廃止措置時においては、以下に列記するような通常炉とは全く異なるいくつかの特徴があると考えられる(Table 1)。

(a) RPV 内および PCV 内に燃料デブリが存在し、それ

らから遊離あるいは流出した放射性物質が RPV 内、PCV 内はもとより、R/B 内やタービン建屋内に広く散乱しているの、至る所が高放射線量率となっており、調査や現場作業のために建屋内部へ接近することが容易でない。

(b) RPV, PCV, R/B などの主要構造物は、一連の事象でダメージを受けており、3つの基本安全機能が下記のように低下している可能性がある。

- 事故で炉心が損傷し、制御棒および制御棒駆動機構が損傷している。このため、「止める」機能(臨界制御機能)に制約あり、未臨界度を自由に制御できない。また、燃料デブリが物理的に安定に支持されていない状態で RPV 内および PCV 内に残存している。
- 本設の原子炉給水系や非常用炉心冷却系の電気・制御機器が損傷しているため、新たに仮設機器を設置し、これらを含む原子炉冷却システムで原子炉冷却している。システムの信頼性はその系統構成や仮設機器の信頼性、維持管理方法等に依存するので、評価が必要である。
- PCV, R/B が事故で損傷し、その「閉じ込め」機能が低下しているの、放射性物質がわずかながら常に外部へ漏えいしている状態にある。

(c) 本設の各系統設備だけでなく、楊重設備や水、空

Table 1 Comparison between accident-damaged and normal nuclear power plants

比較項目	通常炉	事故炉	備考
1 設備全般の状態 ・本設備(機/電/制/建屋) ・換気, 照明, 揚重設備等のユーティリティ	正常 使用可能	全般的にダメージあり* 多くが使用不可	* ダメージの種類, 範囲, 程度など, 不明な場合が多い。従来と異なる環境, 経年劣化の進行に注意要。
2 安全機能 停止機能	燃料搬出後は機能不要	炉心崩壊/機能喪失, 制御操作不可	事故炉は「再臨界」が放射能外部放出へ直結。
冷却機能	燃料搬出後は機能不要	燃料およびデブリ回収まで未臨界制御要 一部仮設配管等を使用しているとしても一概に信頼性が低いとはいえない。評価要。	「冷却機能喪失」も同様。
閉込機能	継続維持	一部劣化(放射性物質の外部漏えい概念)	
3 燃料/デブリ等のハザードの所在と管理	特定の箇所限定 管理下にある	広範囲に散在する 十分な管理下でない	特に T/B にも FP が散在
4 高線量率区域	特定の箇所	広範囲	
5 高汚染区域	特定箇所に限定	ほぼ全域が汚染	
6 瓦礫・障害物	ない	瓦礫・障害物がある箇所が多い	
7 現場への接近性	容易	高線量率, 瓦礫等で容易でない 漏えい, 火災, 溢水などの事故対応が難しい(通常よりも影響度が大きい)	事故炉廃止措置の際立った特徴の1つ
8 廃炉シナリオ	設備状態に不明な点がないので廃炉手順が明確	廃炉手順が明確でないの、想定外の発見が多くある可能性がある 各ステップで複数の選択肢の準備が必要	シナリオ決定要素(デブリ位置・量, PCV 健全性等)
9 リスク管理	廃炉シナリオ, 手順が明確なので, リスク予測評価が可能	各作業ステップにおける設備状態/条件が不明な部分があり, 保守的仮定をせざるを得ない	

気、電源等のユーティリティ設備も損傷し、使用できない状態にあるので、現場の調査や現場作業に当たってはユーティリティ設備あるいは遠隔操作ロボット等を整備する必要がある。

(2) 事故炉廃止措置の特徴

前項で述べた事故炉の設備状態を踏まえて事故炉の廃止措置を考えてみると、下記のように特徴付けることができると考えられる。

- (a) 原子炉冷却により、燃料デブリの崩壊熱を除去し、その物理的状态を安定させ、放射性物質の移動を抑制することにより、閉じ込め機能が低下しているPCVからの放射性物質の外部放出を抑制している。このように、事故状態が収束した後の廃止措置段階ではあるものの、プラント状態は原子炉冷却によって安定を保っているという面があるので、「特殊な運転状態」にあると考えるべきである。
- (b) 事故時に燃料を含む各種の主要設備(RPVやPCV等の鋼構造物やR/B等のコンクリート構造物などの安全機能を担っている主要な設備)がどのようなダメージを受けたかを示す情報が必ずしも十分に残っていないことに加え、R/B内等が高放射線量率であるため、接近性に制約があり、プラント設備の現状を把握するのが難しい。このため、必要と考えられるすべての情報が得られ、それらを反映した準備ができてから行動を開始する通常のプロジェクトと異なり、燃料の状態や燃料デブリの位置・量・特性、主要設備の状態など、不明な点を多く抱えながら燃料デブリ取り出しのための事前調査や準備作業、本作業などをステップ・バイ・ステップで進めざるを得ない¹⁾。
- (c) ステップ・バイ・ステップで現場作業を進めると、その都度、新事実が判明し、その度に方針変更や燃料デブリ取り出し方法の変更、現場作業のやり直しや手戻りなどが必要となる可能性があるため、作業ステップごとにバックアップを含む複数の実施方法を準備するとともに、可能な限りやり直しがきく方法を採用する等の配慮が必要である。
- (d) ステップ・バイ・ステップで現場作業を一步前進させる際に現場に加えたじょう乱で燃料デブリの再臨界につながるリスクが上昇する場合があるが、そのような場合であってもリスク上昇を最小限化する措置をとることによってこれを許容する必要がある¹⁾。
- (e) 燃料デブリは炉内構造物やコンクリート等の構造物と溶融・混合していると考えられ、そのような燃料デブリを取り扱った経験は世界的にみても少ないので、燃料デブリの特性や機械的性質等に不明な点が多い^{2,3)}。このため、安全性の確保を前提とした燃料デブリの取出方法や処理・処分方法等の研究開発には、膨大な時間と労力、予算が必要になる。

(f) 研究開発された燃料デブリ取出装置を使用して燃料デブリを取り出す作業についても、膨大な作業量をステップ・バイ・ステップで慎重に進めることとなり、長期間を要するものになると推測されるので、その間に事故でダメージを受けた主要設備が経年劣化し、その安全機能がさらに大きく低下することのないように適切な設備保全管理を実施する必要がある。

(g) このような複雑多岐に亘り長期を要するプロジェクト、しかも数多くの新たな技術開発が必要なプロジェクトは、投入できるリソースが有限であることを強く認識し、効率的・効果的に進めることが通常のプロジェクトと比較して格段に強く求められる。事故炉廃止措置は、「安全性」を確保するための安全リスク管理だけでなく、同時に原資が枯渇することがないように経済リスク管理を適切に行う必要がある^{4,5)}。この点は極めて重要な事故炉廃止措置の特徴の1つといえる。

(3) 安全性と経済性の確保

一般に原子力発電所を含む産業プラントを運営する事業を企画・実施する場合、まず、その前提としてその事業に投入するリソースを確保する必要がある。その上で運営方針やプラント運転開始後のパフォーマンスに関する目標(安全性と経済性に関する目標)を設定し、その目標を達成できるようにプラントの運転(生産)と保全を行い、全体として利益を生み出せるようにする。そして、プラントの運転(生産)を通じて製品を社会に提供・販売し、利益を得、その一部をリソースの確保のための原資や更なる安全対策および経済対策の原資とする。事業はこのようにして社会の中で営まれる(Fig. 1)。

ここで重要なことは、前述のように、産業プラントにとって「安全性」と「経済性」のいずれを欠いても社会に存続し得ないということである。そして、さらに次のことにも気付くべきである。それは、もし一定のレベルの経済性を確保できなければ、必要な原資をリソースの確保や安全対策へ投入することもできず、結果として「安全性」をも損なうことになり兼ねないというメカニズムがあることである。このような意味で「経済性」の確保は、「安全性」の確保と同様、極めて重要であるので、安全リスク管理とともに経済リスク管理も必要である。

一方、事故炉の廃止措置は利益を生む「生産」がないということにおいて上記の事業とは全く異なるが、投入できる資金が無尽蔵にあるということではないので、安全性に影響を与えるような経済状況にしないこと、あるいは経済的に破綻しないようにすることが必要である。これは上記の事業における経済性確保の考え方と基本的に同じである。廃止措置という特殊な事業であっても、事故炉リスクの防止を前提とした上で実施が必要と思われる多くの事項に対して重要度・緊急度等の分析評価を実施し優先度の高

Fig. 1 Relationship between safety and economy

Fig. 2 Efficient and effective way to achieve safety and economic goals

い事項を実施すること、費用便益分析を実施し投資効果の高いものに資金投入することを徹底することが必要である。

効率的・効果的に安全性や経済性を確保し、さらにそれを向上させようとする場合、下記の方策を取り入れることが重要である。

- (a) 組織がもっているリソースは有限であることを認識し、効率的・効果的な手法、特にリスク情報を活用することによってリソースを重点投入すべき事項を判断できる方法や日常業務活動のパフォーマンス実

績に基づき優先的に実施すべき事項を明確にできる方法を採用する。

- (b) 具体的目標を設定してその達成に向かって常に努力することを促す仕組みを導入するとともに、その目標との関係が明確で、定量的にカウントできるパフォーマンス指標を設定して常に目標と実績のギャップを監視し必要な是正を実施する仕組みを導入する。
- (c) 新たに認識された課題や問題にチャレンジし迅速に目標を達成できるように組織を牽引するリーダーシッ

Fig. 3 Framework of USNRC reactor oversight process

プと日常業務活動のPDCAサイクルを計画どおり適切・確実に回すために組織を動かすマネジメントを重視した組織運営を行う。

- (d) 組織に属する全員が安全性と経済性に対する正しい理解をもち、目標達成に向かって一丸となって取り組める環境あるいは風土・文化を構築する。

上記(a)～(d)は以下のように解釈できる。すなわち、上記(a)で目標達成のために実施しなければならない事項を必要最小限にし、上記(b)～(d)でそれらの事項を迅速・確実に実施できるように、人間の特性(目的意識や集中力、緊張感を長期間維持することが苦手等)をコントロールしパフォーマンスの低下につながらないような対策を導入する、ということである。上記(a)は米国の原子力規制委員会(NRC)が採用している Risk-informed Regulation⁶⁾と Performance-based Regulation⁶⁾に対応すると考えることができる。これは原子力発電所を俯瞰し安全リスク上重要なハードウェアとそれに関わる活動や操作、措置などのソフトウェアを特定しそれにリソースを重点投入するとともに、そのような方法で実施した発電所運営の結果生じた事象や問題に対して重要度分析を実施し、重要度の高い事項にリソースを重点投入するという効率的・効果的方法である(Fig. 2)。同様に、上記(b)はNRCが原子力発電所の安全性の維持・向上のために採用している原子炉監視プロセス(ROP: Reactor Oversight Process)⁷⁾である(Fig. 3)。上記(c)は迅速に目標を達成するには組織を牽引する適切なリーダーシップ(リーダ)が、日常業務を確実に実施するには適切なマネジメント(マネージャ)が必要であるこ

Fig. 4 Effective way to achieve a goal considering human traits

とを説いており(Fig. 4)、国際原子力機関(IAEA: International Atomic Energy Agency)の基本安全原則⁸⁾にも安全に対するリーダーシップとマネジメントが重要であることが記載されている。上記(d)は人間は生来怠惰であり目的意識や集中力、緊張感を長期間維持できず、ときに過失やエラーを犯すが、よい環境や条件が整うと意欲・やる気を起こし極めて効率的に働き効果を上げるので、そのような環境と条件を整備すべきことを説いている。これはIAEAのいう安全文化(Culture for Safety)^{9,10)}に対応すると考えられる。

事故炉廃止措置においても、上記(a)～(d)の考え方を取り入れて実践していくことが重要であると思われる。

2. 事故炉廃止措置のために実施する必要がある活動(廃止措置活動と設備保全活動)

事故炉の廃止措置は通常炉のそれと決定的な違いがある。それは通常炉には不要な燃料デブリの取り出しとその後の除染が事故炉の廃止措置には必要不可欠でありこれに長期を要するので、この間、放射性物質の外部への追加放出を抑制するため「止める」「冷やす」「閉じ込める」の3つの基本安全機能を一定以上の信頼性レベルに維持する必要があるという違いである。このため、事故炉の廃止措置は燃料デブリ取り出し等の廃止措置活動に加え、主要設備の基本安全機能を維持するための設備保全活動が必要となる。

以下に事故炉廃止措置のために実施する必要がある廃止措置活動と設備保全活動の概要およびその両者の関係について検討する。

(1) 廃止措置活動の概要

事故炉の廃止措置活動は、一口にいえば、燃料デブリの取出方法の検討やそのための現場調査、取出装置の設計・製作・据付等を行い、燃料デブリを取り出すとともに、それらを処理・処分する活動のほか、主要構造物の解体・撤去を実施する活動である。この活動は、燃料デブリへのアクセス方向や取出方法などの組み合わせとなり、多種多様に考えられるが、どのような方法を最終的に採用しようと、その活動の手順は基本的に下記のように考えると考えられる。

- 事前調査・検討(現場状況調査, 燃料デブリ・サンプリング, 分析, 特性把握等)
- 準備作業(除染, エリア確保等), アクセスルート確保工事
- 新規バウンダリーの構築等を含む負圧維持システムの設置, 運転
- 燃料デブリ冷却およびダスト抑制のための原子炉冷却システムの設置, 運転
- 再臨界防止対策
- 燃料デブリ取出装置等の設置工事, 試運転
- 燃料デブリ取り出し, 一時保管, 搬出移送
- 主要鋼構造物および建屋内の除染, 解体撤去, 一時保管, 搬出移送
- 放射性廃棄物処理, 放射性廃棄物保管, 搬出移送
- 放射性廃棄物の最終処分

この活動を現場作業が進捗する時間軸に沿って3つの基本安全機能の観点からみていくと、その進捗とともに要求される基本安全機能の重心が以下に述べるように移り変わっていくことがわかる。

(a) フェーズ I(燃料デブリ取り出し前)

燃料デブリ取り出し前の段階は「冷やす」機能を有する

原子炉冷却システムで時間とともに崩壊熱が減少する燃料デブリを冷却することによってその物理的安定(形状等)を保って再臨界を防止するとともに、熱的安定を確保し、放射性物質の移動・拡散を抑制している。いい換えると、「冷やす」機能によって「止める(再臨界防止)」機能および「閉じ込める」機能を補完し、その結果として放射性物質の外部への追加放出を抑制しているので、「冷やす」機能の重要性が相対的に増している段階とみることができる。

(b) フェーズ II(燃料デブリ取り出し中)

時間の経過とともに徐々に減少するとはいえ、引き続き崩壊熱を除去するための冷却が必要である他、本フェーズは燃料あるいは燃料デブリに手を加える作業を実施するので、当該作業に起因する燃料デブリの意図せぬ移動や冷却水の浸入による再臨界や切削による放射性ダストの発生リスクが増大する段階であるといえる。したがって、本フェーズは「止める(再臨界防止)」「冷やす」「閉じ込める」の3つの基本安全機能すべてが重要となる段階である。

(c) フェーズ III(燃料デブリ仮保管・搬出)

燃料デブリの取り出しが終了し、それらが仮保管されるとともに、所定の場所へ順次搬出される段階であるので、「止める(再臨界防止)」機能および「冷やす」機能は不要となる。したがって、建屋内等に残存する事故起因の放射性物質を含む全放射性物質を確実に閉じ込めておくための「閉じ込める」機能が重要となる段階である。

(d) フェーズ IV(解体・撤去)

燃料デブリの取り出しが終了した後の、建屋や鋼構造物を解体・撤去する段階であるので、基本的に通常炉と同様に建屋内等に残存した放射性物質を確実に閉じ込めつつ解体・撤去を行うため、引き続き「閉じ込める」機能を確保する必要がある段階である。

(e) フェーズ V(処理・処分)

燃料デブリの搬出、建屋や鋼構造物の解体・撤去を実施した後の段階であるので、「止める(再臨界防止)」「冷やす」「閉じ込める」の3つの基本安全機能はいずれも不要となる。

以上述べた廃止措置活動の流れをまとめて Fig. 5 に示す。

廃止措置活動は「止める(再臨界防止)」「冷やす」「閉じ込める」の3つの基本安全機能の観点からみると、上記のように決して一様ではなく、活動のフェーズによって確保すべき機能の重要性が増したり減少したりして移り変わっている。このことを十分認識してそのときそのときの重視すべき安全機能を確実に確保できるように主要設備の設備保全活動を効率的・効果的に行う必要がある。

(2) 設備保全活動の概要

次に、廃止措置活動の前提となる、主要設備が担っている「止める」「冷やす」「閉じ込める」の3つの基本安全

Fig. 5 Relationship between nuclear decontamination & decommissioning activity and facility maintenance management activity

機能を確実に確保するために実施する設備保全活動について検討する。

原子力発電所を構成している設備は、それぞれ必要な機能をもっている。例えば、炉心、炉心支持構造物、制御棒および制御棒駆動機構等は炉心の核反応を停止させるための「止める」機能を有している。RPVや主要配管等は、燃料を冷却するための「冷やす」機能を有している。R/Bは放射性物質の外部への放出を抑制するための「閉じ込め」機能のほか、主要機器を支え、建屋内での職員や作業員の活動を可能にするため構造保持機能(空間保持機能)を有している。ここでいう「止める」「冷やす」「閉じ込める」の3つの基本安全機能は、主要設備の静的構造体としての構造保持機能があって始めて成立するものであり、構造保持機能はいわばその前提である。その上で3つの安全機能を実現するための動的機器を含むシステムが機能して始めて「止める」「冷やす」「閉じ込める」の3つの機能が確保される。したがって、設備保全活動は、主要設備の静的構造体としての健全性を維持するための活動(主要設備本体の健全性維持活動)と動的機器も含めたシステム全体の信頼性維持活動(安全機能の信頼性維持活動)の2つの活動からなるといえる(Fig. 5)。

以下にこの2つの活動の内容について検討する。

(a) 主要設備本体の健全性維持活動

この活動は主要設備本体の構造保持機能を維持するための設備保全活動である。

通常の設備保全であれば、設計・建設時の情報と運転開始以降の情報に基づき、設備の検査、評価、是正(補修等)を実施し、設備の健全性を維持するのが設備保全活動である。しかしながら、事故炉の廃止措置時における設備保全活動は高放射線量率等の制約から設備に接近できない場合が多く、検査と是正(補修等)を思いどおりに現場で実施で

きないというところが通常の場合と大きく異なるところである。また、事故時のプラント情報が十分に取得されておらず、事故によって設備がどの程度のダメージを受けたか、必ずしも十分に把握できないことが事故炉の特色でもある。このような不明点や不確定性の多い条件下で効率的・効果的に設備保全を行っていく必要がある。それにはとおり一遍ではなく、特別なアイデアに基づく戦略的な取り組みが必要である。

具体的には、まず、事故前の経年劣化と事故によるダメージ、そして廃止措置が完了するまでの経年劣化の全体を視野に入れて、その時点で活用できるデータや情報に基づき主要設備本体の健全性に有意な影響を与える可能性のある部位(ここではこれを重要部位と呼ぶ。)を特定し、今後注目しなければならない対象をできるだけ縮小する方針を取ることが重要である。その上でさらに対象部位を絞り込むため、必要な試験研究や調査を実施し、得られたデータ等を用いて抽出された重要部位の個々の健全性を詳細に評価し、今後長期に亘って管理していかなければならない部位(ここではこれをクリティカル部位と呼ぶ。)を特定する。そして、このクリティカル部位に対して設備保全計画(検査計画と是正計画)を立案する。その際、高放射線量率等の理由で当該重要部位に接近できない場合が多いので、

- 検査を実施しなくても試験研究等を実施し、当該部の評価に必要なデータ等を獲得した上でその健全性を予測・推定する方法
- 遠隔制御技術を開発して検査を実施し、当該部の状態や環境を把握した上でその健全性を予測・推定する方法
- ハードウェアの是正(補修等)を実施せず、環境を変えること等により、経年劣化を抑制し当該部の健全性を一定期間維持する方法

- 遠隔制御技術を開発して是正(補修等)を実施し、当該部の健全性を維持する方法

などを考案し、できるだけ不明点や不確定性を解消する必要がある。また、このような検討は、主要設備のクリティカル部位が具体的に特定され、何を実施しなければならないのかそのニーズが明確になれば、具体的な技術開発が可能になるのは明白である。これらの具体的方法については次章で検討する。

以上、不明点や不確定性の多い事故炉廃止措置のための設備保全活動は、上記のような戦略的な方法を取ることが極めて重要であり、必要不可欠である。

(b) 基本安全機能の信頼性維持活動

主要設備の静的構造体としての健全性を一定以上に維持したとしても、それだけでは設備が担う「止める」「冷やす」「閉じ込める」の3つの基本安全機能を発揮させることはできない。なぜなら静的構造体としての主要設備だけでは、「止める」「冷やす」「閉じ込める」という状態を実現できず、どうしても主要設備に動的機器を含む設備を加えた「安全機能を発揮できるシステム」を構築する必要があるからである。すなわち、「止める」機能については中性子吸収材を燃料デブリに供給して未臨界状態を維持するシステム、「冷やす」機能については冷却材供給ポンプ等の動的機器を用いて冷却材を燃料デブリに供給する冷却システム、「閉じ込める」機能については吸気ファン等の動的機器を用いて圧力バウンダリーを負圧に維持するシステムの構築が必要であり、そのシステムの信頼性維持対策が必要である^{11,12)}。このため、3つの基本安全機能ごとに静的機器だけでなく、動的機器を含めたシステム単位の信頼性を維持するための設備保全活動が必要となる。

これらのシステムは一定以上の信頼性を確保するため、設計、製作、据付、試運転等の適切なプロセスを経て設置され、運用されることになると思われる。その際、高放射線量率等の事故炉特有の条件を考慮するのはもちろんのこと、機器故障等による内的事象と地震・津波等による外的事象を考慮したシステムの信頼性評価(確率論的リスク評価(以下、PRAという。))やストレステスト等のリスク情報を活用した評価)を実施し、その特性を十分に把握した上で適切な対策を講じることが重要である。また、システムの運用開始後はその信頼性評価の結果を踏まえ、現場の環境条件等を考慮して過不足のない効率的・効果的な設備保全計画を立案し、無理なく実行できるようにすることが重要である。

(3) 廃止措置活動と設備保全活動の関係

上記(1)および(2)で述べたように、長期を要する事故炉の廃止措置では、燃料デブリの取り出し等を行う廃止措置活動とともに、主要設備本体とそれに接続する動的機器等を含む全体システムの安全機能を維持するための設備保全活動が必要である。しかしながら、これら2つの活動は、以下に示すようにそれぞれ影響し合い、関連し合う関

係となっており、切り離すことができない(Fig. 5)。

- 前述のように、廃止措置活動が進捗するに連れて、確保すべき安全機能の重要性が増したり低下したり変化する。例えば、後述するように、事故が収束し崩壊熱が低下した後、燃料デブリの取り出しを開始するまでの期間は、燃料デブリを冷却することによってプラントの安定が得られており、無闇に主要設備等に手を加えず、プラントの状況把握等に努める方がよい時期であると考えられるので、この期間は「冷やす」機能の重要性が増している時期といえる。この期間が終わり、いよいよ燃料デブリの取り出し準備や取り出し作業が開始され、それが完了するまでの期間は、「止める(再臨界防止)」機能と「冷やす」機能の確保は前提であるものの、「閉じ込め」機能の重要性が高くなる時期といえることができる。このようにそのときそのときの廃止措置活動の状況に伴って確保すべき3つの基本安全機能のうちのいずれに重要性が増すときが生じる。3つの基本安全機能の重心が移り変わるのである。このため、そのような状況に合わせて重視すべき安全機能を担うシステムの監視および設備保全活動を強化・充実させることが重要である。
- 主要設備本体とそれに接続する動的機器等を含む全体システムは、時間の経過とともに経年劣化するが、放射性物質の外部への追加放出を抑制し、職員や作業員の現場作業のための安全な作業環境を確保するために必要不可欠である。また、これは廃止措置活動の前提でもある。したがって、廃止措置活動が完了するまで主要設備および必要な安全機能は維持する必要がある。逆に、主要設備および必要な安全機能が維持できなくなる時点よりも前に廃止措置活動を完了する必要があるといえる。

以上のように、廃止措置活動は、燃料デブリの状態やプラントの状態を的確に把握し、燃料デブリの取り出し方法の検討、取出設備の設計・製作、現場作業などを安全リスクを過度に上昇させないように慎重に進める必要がある一方で、主要設備の安全機能を維持できる期間内に完了しなければならないという時間的制約があるので、時間軸を意識した取り組みが必要である。また、設備保全活動は、主要設備の経年劣化やそれに伴う安全機能の低下等、時間とともに進展する事象を管理する活動であるので、経年劣化によるリスク増加を考慮していつまでに何を実施しなければならないか、あるいは主要設備の健全性や安全機能がいつまで維持できるか常に注意しなければならない。廃止措置活動の進捗に伴って要求される安全機能の重心が移り変わるので、それに合わせた設備保全活動も必要である。

III. 事故炉廃止措置の戦略的取り組みとリスク管理の考え方

前章で述べたように、事故炉廃止措置時における廃止措置活動と設備保全活動は、互いに関連し合い、切り離せない関係にある。この検討結果を踏まえ、以下に「安全性」と「経済性」の観点から事故炉廃止措置時における廃止措置活動と設備保全活動への戦略的取り組みとリスク管理の考え方等について検討する。

1. 廃止措置活動の戦略的取り組みとリスク管理の考え方

事故炉の廃止措置時における現場環境は極めて劣悪であると考えられ、主要設備の状態を把握するのですら容易ではなく、廃止措置のための事前調査や燃料デブリ取り出しのための事前準備、アクセスルートの確保、燃料デブリ取出装置の設置、取出作業など、複雑多岐に亘り錯綜する作業の流れと膨大な数の作業ステップからなる活動にも多くの困難と安全上のリスクが予想される。このような場合、闇雲に不明な点や問題点をすべて解消しながら前に進めたり、必要と思われる事項をすべて実施したりするというやり方では有限なリソースの下では経済的に破綻する可能性が高くなる。これを避けるためには、投入できるリソースが有限であることを認識し、効率的・効果的に廃止措置を進めるための戦略的な取り組みが必要である。

一般に安全リスクを管理しようとする場合、下記の戦略で取り組むことが重要である。

- リスク管理対象のプロジェクトが完了するまでの間のリスク総和の最小限化に努める。
- できるだけリスク・レベルを低く、その継続時間を短くする。
- リスク上昇がある場合、その上昇量、継続時間、発生頻度を最小限にする。

また、これらに加えて事故炉廃止措置の場合は、さらに下記のような戦略的取り組みが極めて重要である。

- 大きなハザード源あるいはリスク源を優先して除去・低減することにより、できるだけ早期に許容できる状態を実現する。事故炉廃止措置の場合、不安定な形で RPV 内あるいは PCV 内に存在している燃料デブリが主要なハザード源あるいはリスク源であるので、何よりも優先して燃料デブリをなんらかの方法で安定化しリスクを大幅に低減することがリスク管理上重要である (Fig. 6)。例えば、ジオポリマー等による充填で物理的に固定化し放射性物質が移動し難い状態にしたり¹³⁾、あるいは中性子吸収材を混ぜた冷却材の連続散布や中性子吸収材を含む物質の塗布等により十分に深い未臨界度を確保したりする等の対策である。これにより、十分な時間的余裕を確保し、燃料デブ

リ取出方法の考案や装置の開発、現場作業を着実に進めることが可能となる。

- 燃料デブリを取り出すことによって安全リスクを許容できるレベル以下に低下させようとする際、その取出作業そのものが一時的に再臨界による放射性物質の外部への追加放出リスクを上昇させることになるので、そのリスク上昇と継続時間を一定範囲内で許容する必要がある (Fig. 7)。また、このとき、燃料デブリの取出時期はプラントが安定状態になった後、速やかに実施すれば、廃止措置期間中のリスク総和を最小限にすることができるが、その反面、現場状況の把握や燃料デブリ取出装置の設計・製作、試運転、トレーニングなどの準備を実施する期間が短くなるという問題がある。逆に、燃料デブリ取出準備やライセンシング、関係者への説明等に十分な時間余裕を確保しようとして過度に時間を取り過ぎたり、なんらかの理由で準備が予定どおり進まず遅延したりすると廃止措置期間中のリスク総和が増大することになる。したがって、重要事項の実施を決断する際は、プロジェクト全体の状況を把握しリスク情報を活用したバランスのよい的確な判断を行う必要がある。

安全リスクの観点から想定される廃止措置活動を概観すると、時間とともにリスクを減少させる因子と増大させる因子があることに気付く。これらの主要なものを列記すると、下記ようになる。これらを Fig. 8 に示すような定性的な形ででも示すことができれば、事故炉廃止措置の特徴を捉えることができ、リスク管理上役立つと考えられる。

(1) 安全リスクを一時的に上昇させるが、その後、リスク低減につながる因子

- 燃料デブリの取出作業

(2) 安全リスクを減少させる因子

- 「止める(再臨界防止)」機能に関連するもの：再臨界防止対策(冷却材への中性子吸収材添加、物理的固定化による放射性物質の可動性抑制等)
- 「冷やす」機能に関連するもの：崩壊熱の減少、原子炉冷却システムの信頼性向上対策および保全の改善
- 「閉じ込める」機能に関連するもの：PCV 補修、R/B 補修、新規バウンダリーの設置

(3) 安全リスクを増大させる因子

- 主要設備の構造強度に影響するもの：燃料デブリ取出装置、PCV バウンダリー補強設備等の新規設置
- 「止める(再臨界防止)」機能に関連するもの：燃料/燃料デブリを支える炉内構造物の経年劣化
- 「冷やす」機能に関連するもの：原子炉冷却シス

Fig. 6 Strategic approach to safety risk management

Fig. 7 Risk increase due to fuel debris retrieval work at site and acceptance criteria

Fig. 8 Changes of risk of fundamental safety function loss

テムの経年劣化

- 「閉じ込める」機能に関連するもの：PCVとR/Bの経年劣化

ところで、前述の各フェーズにおける廃止措置活動は具

体的にどのような内容となり、どこに放射性物質の外部への追加放出リスクが潜在しているであろうか。これは事故炉の廃止措置を成功裏に完遂する上で最も重要なキーともいべき事項の1つである。これがわかれば必要な対策を的確に講じることができるので、安全に廃止措置を実施できる可能性が格段に高くなる。このため、PRA手法に従って廃止措置の現場で展開される一連の廃止措置活動を追って放射性物質の外部への追加放出につながるシナリオを明確にし、その発生頻度と影響の大きさを定量評価したいところである。しかしながら、事故炉の現場は高放射線量率等のため接近すること自体が容易でなく、燃料デブリの所在や量、各種の特性あるいは現場の設備状態等を正確に知ることが難しい。また、この評価・検討を行うには、燃料デブリを取り出すための準備作業やアクセス・ルートの確保、膨大な作業ステップ数に上る燃料デブリの取出作業など、複雑多岐に亘る一連の作業が明確になっている必要がある。このような一連の作業に起因して放射性物質の外部への追加放出につながるシナリオを網羅的に抽出しそ

の安全リスクを評価するのは容易なことではない。むしろこのような安全リスクを評価することにこだわるよりも中性子吸収材を用いて深い未臨界度を確保する等の対策を講じながら現場作業を進める等の方策を採用する方が現実的であるかもしれない。いずれにしてもこのような大きな課題を克服し、燃料デブリの取出方法を確立する必要がある。そのためには、燃料デブリ取出装置等の設計・製作や詳細な現場での作業手順の開発を行い、その方法のリスク情報を活用した評価、検証等を実施するとともに、必要なリスク低減対策や燃料デブリ取り出しのトレーニングを行った上で現場作業に望む必要がある。

なお、1Fの廃止措置計画においては、PCV内の調査結果等を踏まえて鋭意燃料デブリの取出方法の検討や各種技術開発が進められているが、燃料デブリの取出方法等の具体化に時間を要しており、現状では燃料デブリ取出方法の方向性の検討や概念設計の段階に留まっている^{11,12)}。また、燃料デブリの取出方法の確立は上記のようにたいへんな難題であるが、現状の限られた情報に基づき、よいアイデアの抽出を目指して既存概念に捉われずに自由に専門家同士が意見交換し、燃料デブリ取出方法の腹案を考案しようとする試み(プレーストミング)が行われている¹³⁾。

一方、経済性については、通常のプロジェクトと同様、プロジェクト全体を俯瞰し予算シーリングや優先度の高い必須事項への予算の重点配分など、コスト管理を徹底する必要がある。事故炉の廃止措置は燃料デブリを含む主要設備の状態等に不明な点を残したまま複雑多岐に亘る燃料デブリ取出作業を進めざるを得ない状況も予想される。またこれに要する費用も莫大なものとなる可能性がある。したがって、廃止措置全体を俯瞰し戦略的な方針の下に必要な不可欠な実施事項を厳選したり重要度や緊急度を分析・評価し優先順位を明確にしたりして前に進めるなど、効率的・効果的な方法で活動を進めていくことが重要である。ここで特に重要なことは安全性と経済性を同じテーブルの上で同時に分析・評価し、実施する事項の効果が投資に見合ったものか、その妥当性・正当性を検証する必要がある。な

ぜなら、前述のように有限なリソースの下に行うプロジェクトにおいては、安全性と経済性の間に切り離せない関係があり、経済性の悪化が安全性を確保するために実施する必要のある対策のタイムリーな実施に影響を与えることがあるからである。廃止措置は、運転プラントと異なり、売電による利益がないので、同列には扱えないが、予算には限りがあるので、同様のセンスでプロジェクトを運営する必要がある。

以上、安全性と経済性について述べた事項をまとめてFig. 9に示す。

2. 設備保全活動の戦略的取り組みとリスク管理の考え方

前述のように、設備保全活動には主要設備の健全性維持向上活動と基本安全機能の信頼性維持向上活動がある。この2つの観点から設備保全活動の戦略的取り組みとリスク管理について以下に検討する。

(1) 主要設備の健全性維持向上活動

通常、設備保全活動は、設備の現状を把握するための検査、その結果を用いて当該設備の将来における健全性や次回検査時期を知るための評価、その結果に基づき必要に応じて実施する是正(補修等)の3つの活動からなっており、必要と考えられる範囲の検査や是正措置はすべて実施されることが前提で実施される。しかしながら、事故炉廃止措置時において実施される設備保全活動は、高線量率等の理由で設備への接近性に大きな制約があるため検査と是正が十分に実施できず、また設計条件を大きく逸脱した環境に晒されている箇所が多いため当該設備の将来における健全性や次回検査時期を正確に評価するのが容易でない等の問題がつかまとう。事故炉の設備保全活動は、このような大きな制約と不明な点を抱えながら、放射性物質の外部への追加放リスクを最小化するための長期設備保全計画を立案しようとする前例のない試みとなる。

このようなニーズに応えられる長期設備保全計画を立案するには、長期を要する廃止措置期間中に主要設備が担う基本安全機能を確保する上でクリティカルとなる主要設備の部位を絞り込み、それらの部位に集中特化した保全を行う等、効率的・効果的な設備保全計画となるような戦略的アプローチが必要となる。これを実現するには、基本安全機能を確保する上でクリティカルとなる主要設備の部位の絞り込み方法が真っ先に必要となる。これを適切に行うことができれば下流の保全活動を適切に縮小でき、極めて効率的となる。このクリティカル部位の抽出に当たっては、設計上の評価、事故前の検査結果、事故時ダメージ評価と検査結果、事故後の経年劣化評価の観点から情報を整理し全体を俯瞰しながら総合的に評価・決定することが重要である(Table 2)。

具体的には下記の手順で検討を進めることが考えられる(Fig. 10)。

Fig. 9 Measures for securing safety and economic risk management

Table 2 Table for extracting critical parts of major components and structures (Example)

主要 構造物	設計 (高応力部, 高累 積疲労部等)	事故時							事故後	
		点検実績 (劣化部位) (世界の運転 保守経験情報)	大地震	過大圧力 温度	爆発	デブリ (反応, 熱)	放射線	海水	腐食	他
1 原子炉 建屋	? (解析結果)	? (劣化部)	? (解析結果) (点検結果)	? (点検結果)	建屋 上層階 (点検 結果)	RPV ペデスタル PCV 床面	? ペデスタル 建屋下層階水 没び割れ部	RPV ペデスタル 建屋下層階水 没び割れ部	RPV ペデスタル 建屋下層階水 没び割れ部	? ペデスタル 建屋下層階水 没び割れ部
2 格納 容器	PCV サンド クッション部? PCV サブチャン コラムサポート	? (劣化部)	? (解析結果) (点検結果)	フランジ シール部 ペローズ 電気ベネ	? (点検 結果)	PCV 内面 (床面近傍)	? PCV 内面 (床面近傍)	PCV 内面 (床面近傍)	PCV 外面 (サンド クッション) PCV 内面 (床面近傍)	? (サンド クッション) PCV 内面 (床面近傍)
3 原子炉 容器	主フランジ 給水ノズル RPV スカート アンカーボルト	? (劣化部)	アンカー ボルト (ゆるみ)	給水ノズル S/E CS ノズル S/E	? (点検 結果)	RPV スカート アンカー ボルト	? ペデスタル 建屋下層階水 没び割れ部	? ペデスタル 建屋下層階水 没び割れ部	アンカー ボルト (ゆるみ)	? (サンド クッション) PCV 内面 (床面近傍)
4 主配管	PCV 内主要配管	? (劣化部)	? (解析結果) (点検結果)	? (点検 結果)	? (点検 結果)	? (点検 結果)	? ペデスタル 建屋下層階水 没び割れ部	? ペデスタル 建屋下層階水 没び割れ部	給水配管 CS 配管 FPC 配管	? (サンド クッション) PCV 内面 (床面近傍)
5 その他	(注) 個々の事故炉ごとに設計や運転実績, 事故状況等が異なるので, 本表を作成するに当たっては, 事故炉ごとに 詳細な調査や評価検討が必要である。なお, 本表は, 本検討のイメージを明確にするため, エンジニアリング・ ジャッジにより重要部位として思い当たる箇所を記載したものである。不明なところには「?」を記載した。

Fig. 10 Procedure for extracting critical sites of major components and structures

- 主要設備に対して事故前の経年劣化, 事故時のダメージ, そして事故後の経年劣化を評価し安全機能を確保する上でクリティカルとなる可能性のある主要設備の部位(ここではこれを重要部位と呼ぶこととする。)を広めに抽出する(Table 2)。なお, Table 2 は, 本検討のイメージを明確にするため, 原子炉建屋からの放射性物質の外部への追

加放出に着目し, それに関連する主要設備として原子炉建屋, 格納容器, 原子炉圧力容器, 主配管を代表例として取り上げて示したものである。今後, 実際に具体的な詳細検討を実施する際には, 事故後設置された仮設備を含む原子炉冷却システムのほか, 今後閉じ込め機能を修復するために新設されるであろう原子炉建屋バウンダリーや排

気ファン等を含む負圧維持システムなどの主要設備も含めて本表の検討を実施する必要がある。また、タービン建屋や汚染水対策のために設置された設備など、その他の設備についてもそれら設備の機能を必要とする期間を想定して同様の検討を必要に応じて実施する必要がある。

- 重要部位ごとに経年劣化の3要素である材料、応力、環境の観点から情報収集し、重要部位の現状把握を試みる。このとき、重要部位の現状がどのようなになっているか、また当該部の環境はどうなっているか、情報が十分に収集できず、不明な点が多く残される場合が考えられる。このような場合、特に必要度の高いと思われるものについては可能な範囲で既存検査技術を用いて現場検査を実施したり、類似プラントの状況を調査したりすることにより、不明点の解消に取り組む必要がある。
- 上記で入手できた情報のみで重要部位の将来における健全性を暫定評価し、健全性が確認できたものについては管理対象外に、確認できないものについては次のステップに進んで、さらに管理すべき対象を絞り込むための検討・評価を行う。このときもまた、評価のための情報が十分に収集できず、不明な点が多く残される場合が考えられる。このような場合は、抽出された重要部位に対して最悪の状態を想定したバウンディング解析や主要パラメータの分布を仮定したモンテカルロ・シミュレーション等を行う等、その時点で最適と思われる長期健全性評価を暫定的に行う。
- 上記の結果、廃止措置中の経年劣化で放射性物質の外部への追加放出につながる可能性のある部位か判定できない場合、特にそれがリスク管理上極めて重要であると判断される場合は、新たに遠隔検査技術の開発や最良推定評価のための試験研究等を実施することによって不明点を解消したり不確定性を小さくしたりして健全性の予測・推定精度を向上させ、判定できない範囲の縮小に努める必要がある。このとき、それを実現する手段が重要である。それらは効率的・効果的であり、現実的な方法である必要があることはいまでもない。そのような方法として考えられる例を

Table 3 に示す。

このようにして抽出されたクリティカル部位に対して長期間の廃止措置期間中に適用される設備保全計画(検査・モニタリング計画と補修や環境改善等の是正計画)を立案・実施する。

(2) 基本安全機能の信頼性維持向上活動

主要設備の設備保全活動には、前項で述べた主要設備の健全性維持活動の他、主要設備が担っている「止める(再

Table 3 Examples of integrity prediction estimation methods for structure and component parts which have uncertainties about their conditions because of limited accessibility

No.	接近困難等の理由で状態把握が難しい部位の健全性予測・測定方法の例	左記方法を適用できる可能性がある箇所と取得情報の具体例
1	モックアップ試験、試験片設置による健全性確認	●PCV サンドクッション部の腐食状況、化学環境データ採取
2	設置可能な箇所へのセンサー設置による健全性確認	●原子炉建屋外壁への加速度計設置による建屋躯体状況確認 ●PCV 内生態遮蔽への加速度計設置によるRPVベデスタル状況確認
3	類似箇所の検査結果に基づく健全性の推定	—
4	部分検査結果から全体を推定する統計手法の活用	●炉心シュラウドの部分検査結果から全体を推定する統計手法 ¹⁴⁾
5	経年劣化による主要設備の安全機能低下シナリオを明確にしたリスク評価	●主要設備の各部位の保全重要度の決定や検査必要範囲・頻度の絞り込み等

臨界防止)」「冷やす」「閉じ込める」の3つの基本安全機能の信頼性を維持するための活動がある。この基本安全機能が十分に発揮されず、外部への追加放出につながるリスクを考えると、Fig. 1 に示す廃止措置活動の流れに従ってフェーズごとに要求される基本安全機能の重心が以下に示すように3つの機能の中で移動すると考えられる。

すなわち、フェーズI(燃料デブリ取り出し前の段階(現場調査・計画立案段階))では、前述のように、「止める」機能が十分機能せず、「閉じ込め」機能が劣化している状況において燃料デブリを冷却することによりその物理的形状を維持し再臨界を防止して「止める」機能を補完するとともに、高温になって放射性物質が動きやすくなるのを抑制して「閉じ込め」機能を補完しているとみることもできる。このような意味において本フェーズは「冷やす」機能の重要性が増しているフェーズであるということが出来る。したがって、このような状況にある期間は「冷やす」機能を有する原子炉冷却システムに着目してその信頼性(放射性物質の外部への追加放出リスク)を評価し、その結果に基づき効率的・効果的な運転管理および保安全管理を実施することが重要であると考えられる(Fig. 11)。この場合、「止める」機能に関連して再臨界を発生させるような人為的操作を加えないこと、また「閉じ込め」機能に関連してR/BおよびPCV バウンダリーの現状を人為的に大きく変更しないこと、あるいはこれらにより有意なリスク上昇が生じないような方法で実施することが前提である。このような仮定でフェーズIのリスク状態を確率論的リ

Fig. 11 Importance of cooling function in the period before starting the retrieval of fuel debris

スク評価手法を用いて評価した例がすでに報告されている¹⁵⁾。この報告には下記が述べられている。

- 原子炉冷却システムによる注水機能喪失の認知失敗という人的過誤確率が「冷やす」機能の喪失による放射性物質の外部への追加放出頻度に大きな影響を与えること、したがって人的過誤確率を低減させる対策(例えば、監視対象範囲を特定し絞り込むとともに、検知方法を改善すること等)が有効であることがわかった。
- リスク重要度の高い機器にフォーカスして運転員による監視と原子炉冷却システムを構成する主要な機器の保全とを適切に組み合わせることにより、安全性を効率的・効果的に向上させることができる可能性がある。

フェーズ II(燃料デブリ取り出し中の段階)は、物理的な手段を用いて燃料デブリに直接手を加えて取出作業を実施する段階であり、当該作業に起因する燃料デブリの意図せぬ移動や切削時の水の浸入による再臨界や切削による放射性ダストの発生リスクがあるので、「止める(再臨界防止)」「冷やす」「閉じ込める」の3つの基本安全機能をすべて確保することが重要となる。特に、燃料デブリ取出作業は、PCV内の状態や燃料デブリの位置、量、形態などの条件の他、燃料デブリへのアクセスルートやそのルート周辺の設備状態、取出作業手順や方法など、複雑多岐に亘る条件が関与するため、放射性物質の外部への追加放出リスクを評価するためのシナリオの構築は極めて困難なものになると予測される。このため、再臨界については、燃料デブリ取り出し中は常時、中性子吸収材などによって未臨界度を十分深く確保する対策を、また、燃料デブリの冷却不足については崩壊熱が十分減少した時点以降に冷却を十分確保できる対策を取ることを前提とすれば、フェーズ IIの安全リスクを適切に把握する方法として「閉じ込め」機能を有する PCV バウンダリーの負圧維持システムに着目し、その信頼性を放射性物質の外部への追加放出頻度を評価することによって把握する方法が考えられる。

Fig. 12 Importance of confinement function in the period before starting the retrieval of fuel debris

燃料デブリに手を加える作業を実施する段階であり、当該作業に起因する燃料デブリの意図せぬ移動や切削時の水の浸入による再臨界や切削による放射性ダストの発生リスクがあるので、「止める(再臨界防止)」「冷やす」「閉じ込める」の3つの基本安全機能をすべて確保することが重要となる。しかしながら、「止める(再臨界防止)」機能は燃料デブリの状態とそれらの取出作業とが相まって複雑な作業となり、それに伴って発生し得る事象を正確に予測しリスク評価を実施することは容易でないで、現実的にはボロン等の中性子吸収材を活用して未臨界度を十分に深くして再臨界を確実に防止できるような対策を取りながら、また、原子炉冷却システムに冷却あるいはダスト飛散防止対策を行いながら新設する負圧維持システムによる負圧管理を確実に行うという方法を取ることが現実的であると思われる。この場合、その間のリスク管理としては、負圧維持システムの信頼性を評価し、その結果を踏まえて効率的・効果的な方法で運転保安全管理することが重要であると考えられる (Fig. 12)。

フェーズ III(燃料デブリ仮保管・搬出)では、燃料デブリの取り出しが終了した段階であるので、建屋内等に残存した放射性物質を確実に閉じ込めておくための「閉じ込める」機能が重要となる。

上記の検討は、設備の経年劣化、ランダム故障、人的過誤などの内的事象のほか、地震、津波、火災等の外的事象も考慮した検討が必要である。

IV. 結 論

事故炉廃止措置の特徴のうち通常炉と決定的に異なるのは、作業空間が高放射線量率であるため、必要なときに必要な所へ接近して作業することが容易でなく、このことが事故炉廃止措置を格段に困難にしている原因である。作業員が燃料デブリに接近して直接回収することや主要設備に接近して検査・補修等の保全活動を自由に実施することができないのである。事故炉廃止措置は、このような条件下で放射性廃棄物の外部への追加放出リスクを最小化する活

動であり、それを管理する活動であるということが出来る。

例えば、通常の設備保全であれば、設計・建設時の情報と運転開始以降の情報に基づき、設備の検査、評価、是正(補修等)を実施し、設備の健全性を維持するのが保全学が教える設備保全の常道である。しかしながら、事故炉の廃止措置時における設備保全活動は、下記のような通常炉とは全く異なる厳しい制約条件下で放射性物質の外部への追加放出力リスクの最少化を追求した長期保全計画の立案を必要とし、それに基づき実際の保全活動を実施するという前例のない取り組みとなる。

- 事故による大きなダメージとその後の長期に亘る廃止措置期間中に徐々に進行する劣化を把握する必要がある
- 設計条件やこれまで通常炉が経験してきた条件と全く異なる環境条件を考慮する必要がある。(例えば、燃料デブリからの放射線下での腐食)
- 接近性の制約から設備の現状を把握するための検査と必要に応じて実施する是正(補修等)が自由に実施できない。

このような厳しい条件下で事故炉の廃止措置を行うには、通り一遍の方法ではうまく行かないであろうことは容易に想像できる。特別なアイデアに基づく戦略的な取り組み、効率的・効果的な方法の採用が必要である。この問題に答えるため、本論文では以下に列記する内容を含むいくつかのアイデアを明確に提案した。

- 事故炉廃止措置時における主要設備の状態や事故炉廃止措置の特徴を整理した上で、事故炉廃止措置を成功裏に完遂するためには、安全性だけでなくそれに大きな影響を与える経済性の観点も含めて事故炉のリスク管理を適切に実施する必要があること、投入できるリソースは有限であることを認識し重要度の高い事項へのリソースの重点投入や優先実施すべき事項の抽出を可能にする方法を採用する必要があること、米国 NRC の ROP 制度等に見られるような目標設定とその達成に向かって常に努力することを促す仕組みを導入することが重要であること等を明確にした。
- 事故炉廃止措置のために実施する必要のある活動は、廃止措置活動のみでなく、それと並行して3つの基本安全機能を担う主要設備の設備保全活動が必要であること、廃止措置活動は5つのフェーズに大別され現場作業の進捗とともに要求される3つの基本安全機能の重心が各フェーズにおいて変化すること、設備保全活動は安全機能を担う主要設備本体の健全性維持活動と動的機器を含むシステムの信頼性維持活動の2つからなりいずれも高放射線量率等の事故炉特有の条件を考慮して過不足のない効率的・効果的な設備保全計画を立

案して実施されるべきであること、廃止措置活動と設備保全活動は強く関連し合っておりそれぞれの状況に応じた対応が必要であること等を示した。

- 廃止措置期間中における安全リスク総和の最小限化等の基本戦略の他、大きなハザード源あるいはリスク源の優先的な除去・低減や燃料デブリ取り出し等の必要不可欠な作業に伴う一時的な安全リスク上昇に対する許容等、廃止措置活動に対する戦略的取り組み方法と安全リスク管理上の考え方と方法を示すとともに、不明な点を残したまま複雑多岐に亘る燃料デブリ取出作業を進めざるを得ない状況からこれに要する費用も莫大なものとなる可能性があるので必要不可欠な実施事項の厳選や優先度評価に基づく実施等、経済リスク管理の考え方と方法を示した。
- 高放射線量率等のため、検査や補修が困難な状況下で如何に効率的・効果的に設備保全活動を実施すべきか検討した結果、今後長期に亘って管理していかなければならない主要設備についてその管理すべきクリティカル部位を絞り込み、その限定された部位に対して設備保全計画(検査計画と是正計画)を立案・実施する方法、検査や補修が実施できない場合に当該部位の状態を予測する方法や必要な技術開発を特定する方法、原子炉冷却システムや原子炉建屋/格納容器の負圧維持システムの信頼性評価方法等、設備保全活動の戦略的取り組みおよび安全リスク管理の考え方と方法を示した。

本論文では事故炉廃止措置全体を俯瞰して廃止措置を行うに当たって必要となる廃止措置活動と設備保全活動の概要を明確にするとともに、廃止措置時におけるリスク管理(放射性物質の外部への追加放出力リスクの管理)の考え方等について検討した。長期に亘る事故炉廃止措置を安全着実に進め、成功裏に完遂するには、今回の検討成果を踏まえ、さらに具体的かつ詳細な検討を行う必要がある。本検討がそれらの検討や実際の廃止措置作業に役立つことが期待される。

本研究の一部は「文部科学省英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」により実施された「廃止措置のための格納容器・建屋等信頼性維持と廃棄物処理・処分に関する基盤研究および中核人材育成プログラム」の成果に基づくものである。

— 参考文献 —

- 1) 原子力損害賠償・廃炉等支援機構、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炉のための技術戦略プラン 2017, 2017年8月31日。

- 2) 資源エネルギー庁 原子力発電所事故収束対応室, 経済産業省の廃炉に関する 研究開発の取組状況, 第7回廃炉研究開発連携会議(2018年06月18日)(資料1-2).
(<http://www.dd.ndf.go.jp/jp/decommissioning-research/dr-committee/materials/07/doc1-2.pdf>)
- 3) 鷺谷忠博, 荻野英樹, 高野公秀 et al., “燃料デブリの特性に関する研究概要,” 日本保全学会第12回学術講演会要旨集, 2015, 47-52.
- 4) 阿部真千子, 杉山直紀, 安全性と経済性の両立に向けて～持続的な安全性向上を可能とする原子力発電のあり方を議論しよう, (株)三菱総合研究所ホームページ.
(https://www.mri.co.jp/opinion/column/atomic_energy/aenergy_20161011.html)
- 5) T. Aoki, N. Kodama, K. Takase, K. Miya, “Study of the optimization of maintenance plan for nuclear power plants,” *E-J. Adv. Maintenance*, **6**, 1-13 (2014).
(<http://www.jsm.or.jp/ejam/Vol.6No.1/AA/AA74/AA74.pdf>)
- 6) USNRC, *Risk and Performance Concepts in the NRC's Approach to Regulation*, USNRC Home Page.
(<https://www.nrc.gov/about-nrc/regulatory/risk-informed/concept.html#RiskPerf>)
- 7) USNRC, *Reactor Oversight Process*, NUREG-1649, Rev. 6, Jul. 2016.
(<https://www.nrc.gov/docs/ML1621/ML16214A274.pdf>)
- 8) IAEA, *Safety Fundamental Principles: Safety Fundamentals*, IAEA Safety Standards Series No. SF-1, 2006.
(https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1273_web.pdf)
- 9) IAEA, *Culture for Safety*, IAEA Leaflet.
(https://www.iaea.org/sites/default/files/culture_for_safety_leaflet.pdf)
- 10) IAEA, *Safety Culture*, IAEA Safety Series No. 75-INSAG-4, 1991.
(https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub882_web.pdf)
- 11) 高守謙郎, “燃料デブリ取り出し工法の検討状況,” 日本原子力学会水化学企画セッション, 2017年9月13日, 13-17.
(http://www.aesj.or.jp/~wchem/2017_aki_kikaku_3.pdf)
- 12) 高守謙郎, IRIDの研究開発の状況—安全と実現性を高める概念設計と今後の技術開発—, IRIDシンポジウム2018.
(http://irid.or.jp/_pdf/Sympo2018_Takamori.pdf)
- 13) 鈴木俊一, 酒井泰地, 岡本孝司, “ジオポリマーを活用した燃料デブリ取り出し工法の提案(その2),” 日本保全学会第15回学術講演会要旨集, 409-412.
(http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/130426/130426_02d.pdf)
- 14) 堂崎浩二, 伊東 敬, 馬淵靖宏, “円筒形炉内構造物に対する評価における未点検範囲の扱いに関するガイドラインの改訂について,” 日本保全学会第5回学術講演会要旨集, 2008年7月.
- 15) 青木孝行, 杉原一洋, 諏訪秀和, 根岸孝行, 森田 毅, “事故炉廃止措置時における安全機能の信頼性評価とリスク管理に関する検討,” 日本原子力学会和文論文誌, **17**[2], 2018.