

## 環境・エネルギーシリーズ

## 原子力発電・放射線基礎講座 Ⅲ 福島第一原発の事故経緯と教訓

Seminar—The Basics of Nuclear Energy and Radiation—

Ⅲ The Cause of Fukushima Daiichi Nuclear Accident and the Lessons Learned

伊藤 晴夫 富永 研司

Ito Haruo

Tominaga Kenji

福島第一原発事故から2年半を経過した現在でも、多くの避難住民が我家に戻れないでいる。また多くの原子力発電所が運転停止を余儀なくされている。原子力の信頼回復のためには、事故に謙虚に学び、継続的な原子力安全を追及する意識改革、即ち安全文化の醸成が必要である。

2.5 years after the Fukushima Daiichi Nuclear accident, many refuge inhabitants still cannot come back to their home. In addition, almost all Japanese nuclear power plants have been forced to shutdown. To recovery of the nuclear reliability, we have to learn humbly from the accident and need consciousness reform to investigate continuous nuclear safety, so-called the safe culture.

キーワード：福島第一原発事故，津波，過酷事故，全電源喪失，地震，安全文化，水素爆発

## 1 はじめに

2011年3月11日の東日本大震災において、東京電力福島第一原子力発電所（1～6号機まであり、いずれも沸騰水型軽水炉（BWR）、以下福島第一原発と呼ぶ）は予想を超える津波に対応できず、1号機、2号機、3号機で炉心溶融が発生し、環境に大量の放射性物質を放出した過酷事故（SA：シビアアクシデント）となった。国際原子力事象評価尺度（INES）によってレベル7（深刻な事故）に位置づけられた。事故発生から2年半経過した今日でも、約15万人の避難住民が我家に戻れず苦勞されている。また全国の原子力発電所は、一部を除いて運転停止を余儀なくされ、電力安定供給面でも大きな負担が生じている。（大飯3、4号機が停止し、現在の運転はゼロ）

本事故については、TVや新聞報道を始め、各界から多くの事故調査報告書が発行されているが、我々技術者は事故の原因や発生事象について今一度振り返り、教訓に学ぶことが重要である。本講座（第Ⅲ回）では、紙面の都合上、炉心溶融が起こった福島第一原発1号機～3号機を中心に、何が起こり、何故過酷事故を未然に防止できなかったのかを科学的技術的観点から考察する。そして今後の見通しについて述べるとともに事故の教訓を考える。

## 2 事故の原因

## 2.1 事故の直接原因（津波＋全電源喪失）

福島第一原発の地震は、設計基準地震動（Ss）を上回る大きさであったが、原子炉は制御棒の緊急挿入（スクラム）により設計通り自動停止した。送電線の損傷により外部電源も喪失したが、非常用ディーゼル発電機が設計通り自動起動し非常用交流電源を確保した。この時点では、発電所は設計通りの状態および機能を維持していた。

しかし、地震発生から約50分後に発電所を襲った津波（敷地浸水高さ約15.5m）は、海水冷却系を機能喪失させ、また建屋内に浸水し非常用交流電源（非常用ディーゼル発電機）、配電盤、そして直流電源（3号機の一部を除く）を水没させ全電源喪失状態となった。水没した電気設備の配置については、長期に亘るプラント運転の中で何故見直されることがなかったのか反省点の一つである。

地震、津波の影響を受けた原子力発電所は、他に福島第二原子力発電所、東北電力女川原子力発電所、日本原電東海第二発電所があるが、いずれも敷地高さや事故時の対応策等が功を奏し、過酷事故に発展するのを防ぐことができた。最終的には非常用交流電源と直流電源が利用できたのが命運を分ける結果となった。福島第一原発の場合は、配電盤の機能喪失や瓦礫障害物により、事故後電

源車が現場に到着しても炉心に冷却水を送るポンプに電源を供給することができず、炉心融融を進展させることになった。また、直流電源喪失により制御盤の状態表示が不能となったためプラントの状況把握が極めて困難となり、運転員は放射線線量率の増加と絶え間なく発生する余震の中、真っ暗な中央制御室において事故の拡大防止に苦心した。電源系に関しては、我が国の安全設計審査指針において、非常用電源の信頼性が高いとして長期間の非常用電源喪失を考慮していなかったことも問題であった。

## 2.2 事故の動機的原因

事故の動機的原因にメスを入れると、マネジメント面の不備に対する指摘は免れない。原子力発電所の安全性は、前回の講座Ⅱでも述べられているように深層防護の考え方により支えられている。国際基準では炉心融融を起こしたスリーマイル島事故や原子炉暴走を起こしたチェルノブイリ事故に鑑み、過酷事故対策として表 1 に示す 5 層の深層防護を講ずることが常識となっていた。

表 1：国際基準と我が国の深層防護の比較

防護層	IAEA の深層防護	我が国の深層防護 (その手段)
第 1 層	異常発生防止	異常発生防止 (入念な設計・保守や品質保証、フェイルセーフ設計、インターロック、バックアップシステムの採用等)
第 2 層	異常拡大防止	異常拡大防止 (監視装置、安全停止装置、原子炉緊急停止装置の設置等)
第 3 層	事故時の影響緩和	事故時の影響緩和 (非常用炉心冷却系、格納容器の設置等)
第 4 層	SA マネジメント (事故の進展防止と SA の影響緩和)	—
第 5 層	サイト外の緊急時対応 (放射性物質の放出による放射線影響の緩和)	—

我が国でもそれなりのアクシデントマネジメント (AM) 対策は考慮されていたが、3 層の深層防護が主で過酷事故に対する安全重要性や取組みの認識が低く、訓練・演習がしっかりと行われて来なかった。このため、結果的に第 4 層、第 5 層の対策である事故緩和や緊急時のマネジメント面での対応が遅れ、事故が拡大した。また、米国が 9・11 テロ

を教訓として発行した安全対応策 (B5b と呼ばれる) は規制当局が入手していたが、何故か産業界にはフィードバックされないままであった。

今後は、産官学の専門家同士がより一層協力して英知を出し合い、また、組織においては経営層を含め原子力安全第一で自由にタブーなく議論し、それを実行に移す安全文化の醸成と実践が必要である。

## 3 事故の経緯と拡大

### 3.1 炉心の冷却機能喪失

原子炉は停止後も、燃料から崩壊熱 (停止直後は全出力の約 7%、1 時間後は約 1%) が発生しているのでスクラム後も炉心の冷却が必須である。全交流電源喪失に備えて、1 号機には非常用復水器 (IC : Isolation Condenser) が、2 ~ 4 号機には原子炉隔離時冷却系 (RCIC) と高圧炉心注水系 (HPCI) が設置されていた。

図 1 は 1 号機の IC システム構成図である。IC は原子炉の隔離事象が発生すると、原子炉圧力高信号で隔離弁が自動的に開き、原子炉発生蒸気は IC の復水器で冷却され、その凝縮水が水頭差で炉心に注入される静的な原子炉冷却システムとなっている。地震後に IC は正常作動したものの、運転操作や最終的には弁交流電源と直流電源喪失の時間的経緯により IC 隔離機能ロジック回路から全弁閉 (フェールクローズ) 信号が出て IC の作動は停止した。

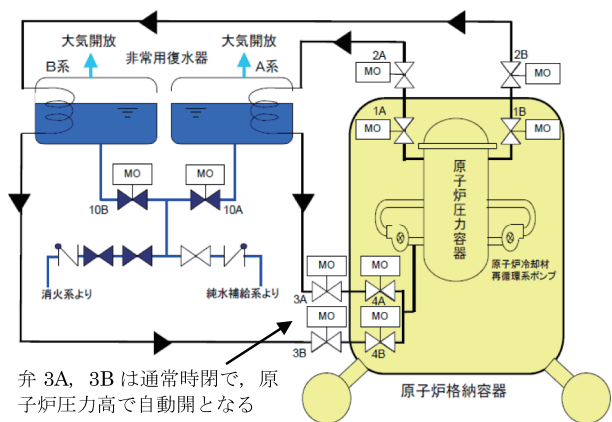


図 1 非常用復水器 (IC) のシステム構成

このため期待したほど原子炉は冷却されず、原子炉圧力は上昇し、崩壊熱で発生した蒸気は逃し安全弁から格納容器の圧力抑制室に放出された。

この間、原子炉水位は徐々に低下し、津波到来後3～4時間で炉心が露出し炉心損傷が始まったと考えられている。また、水頭差を利用した原子炉水位計は、過酷事故時の環境下では通常時と異なった挙動を示すことや直流電源喪失により正確な水位を読み取れなかった。

2号機ではRCICが、3号機ではHPCIが原子炉水位低信号で自動起動して、両系統とも原子炉発生蒸気を用いたタービン駆動ポンプにより原子炉圧力容器に冷却水を注水した。しかし最終的に制御用の直流電源が喪失したため、両系統は機能を停止し、1号機と同様に炉心が露出し炉心熔融に至った。過酷事故時を想定したAM操作手順書では、RCICやHPCIが作動している間に原子炉の減圧を実施し、消火水系などの代替低圧系に切り替えて冷却することとなっていたが、結果的に格納容器減圧と原子炉冷却ができずに炉心熔融を招いてしまった。また、仮設ポンプを使った外部からの海水注入を試みたが間に合わなかった。

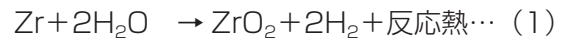
### 3.2 格納容器の機能喪失

BWRでは格納容器底部に圧力抑制室があり、大量の水が蓄えられている。この水は、冷却材喪失事故時においては破断口からの流出蒸気を効果的に凝縮するとともに非常用炉心冷却系の水源としても利用される。今回のように全交流電源喪失が長時間継続する事象では、事象発生後約1日分の崩壊熱を凝縮する能力を有するものの、それ以上電源喪失が継続すると水温が100℃を超え、その蒸気圧により格納容器圧力は徐々に上昇し、やがては最高使用圧力を超えることになる。格納容器破損を防ぐため格納容器圧力を抜くベント操作を試みていたが、格納容器上蓋ガスケットや電気ケーブル貫通部の高温損傷により内部のガスが原子炉建屋に流出し、これにより格納容器圧力上昇が静定したと考えられ、格納容器の大破損は免れることができた。

### 3.3 水素爆発と放射性物質の拡散

軽水炉の燃料は、中性子吸収の少ないジルコニウム(Zr)合金の被覆管で保護されているが、この表面温度が約900℃を超えると(1)式に

示す水金属反応が加速度的に進み、Zr酸化により大量の水素が発生することが知られている。



このようにして発生した水素は、逃がし安全弁や炉心熔融による圧力バウンダリーの損傷部から格納容器に放出された。BWRの格納容器は、通常は不活性の窒素ガスで置換されているため水素爆発が起こることはないが、全電源喪失により熱除去ができないため、格納容器は高温高压となり、格納容器上蓋のガスケット等が高温損傷し、放射性物質とともに水素を含んだガスが原子炉建屋内に漏えいしたと推定され、原子炉建屋に漏えいした水素ガスは空気と混合して爆轟気を形成し、1号機、3号機そして4号機の原子炉建屋を破壊するに至った。なお、4号機の水素爆発は、非常用ガス処理系を経由して3号機の水素ガスが逆流したことが原因であった。格納容器の高温漏洩および水素爆発による原子炉建屋の破壊により、環境には、Cs-134/137がそれぞれ約10PBq(ペタベクレル=10<sup>15</sup>ベクレル)、またI-131が約500PBqの放射能が放出された。

## 4 今後の見通し

### 4.1 福島第一原発の現状

炉心熔融、水素爆発による原子炉建屋の破壊、放出放射能による住民退避など、拡大を続けた事故は、炉心注水手段の確立と仮設電源の設置により冷却機能を回復した。

熔融炉心に注水した冷却水は、格納容器の漏えい箇所からタービン建屋に流出したため、放射性物質をフィルターで除去した後に再び炉心に注入され、その余剰水は汚染水としてサイト内のタンクに保管されている。現在、タービン建屋に地下水が約400m<sup>3</sup>/日で流入しており、保管タンクの数が増え続けている。この汚染水をどう処理するか、汚染水タンクからの海洋への漏洩をどう防止するかは大きな社会問題であり、早急な抜本的対策に取り組むことになった。

### 4.2 福島第一原発の収束計画

図2は2011年12月のプラント安定状態宣

言後に発表された1～4号機の廃止措置長期ロードマップの概要である。デブリ燃料の取り出しは経験のない分野であり、国際社会（IAEA等）の協力を得て安全を確保しながら研究開発と併行して進めることから、廃止措置終了までには、長い年月が必要となる。2013年6月に内容の詳細見直しが行われ、第2期の期間が～1.5年程度短縮されることになった。

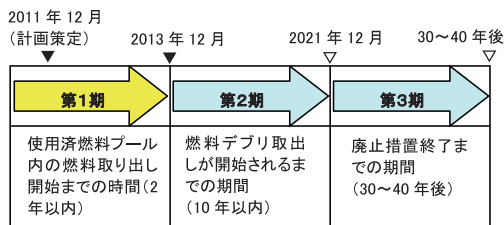


図2 中長期ロードマップの概要

### 4.3 サイト外の除染活動

放出された放射性物質で、影響が大きいのは半減期の長いCs-137（30年）であるが、除染活動やウエザリング効果（降雨等）により平均空間線量率は徐々に低下しつつある。しかし、除染により発生する放射性廃棄物を保管する中間処分地の建設が遅れており、除染計画は計画通りに進んでいない。

現在の除染基準である一律1 mSv（ミリシーベルト）/年は、国際放射線防護委員会（ICRP）が健康に障害を与えないとする値（100 mSv/年）を遥かに下回る値で定められている。除染が進まず国民への経済的負担が膨大となる現実と避難住民が帰還できないジレンマから、健康影響と除染程度を見直すべきとの意見もある。なお、原子力・放射線部会では、福島の人達に寄り添う形で除染情報プラザに専門家を派遣し支援・協力をを行っている。

## 5 事故の教訓と今後の取り組み

### 5.1 安全文化の醸成と実践

福島第一原発事故後、原子力規制委員会が新しく組織され、過酷事故を含めた新規制基準が発行された。各電力会社では、この新基準に適合するように安全対策を講じ、許認可申請が始まったところである。特に過酷事故が発生した場合の深層防護の第4層、5層に相当する事故拡大防止の緩和策及び緊急時の防災体勢強化のため、ハード

面、ソフト面（手順書整備、教育訓練・演習、コミュニケーションのあり方等）の対応が進められている。従って、再起動はこれらの安全が確認されてからとなる。

しかし、継続的な原子力安全を維持するためには、安全を第一とし弛まぬ安全性向上に配慮する意識改革、すなわち安全文化の醸成と実践が極めて重要である。このことは、公益を確保し、技術や社会変化に対応する弛まない継続研鑽（CPD）を義務・責務とする技術士のミッションに通じるものがある。

### 5.2 一般国民とのリスクコミュニケーション

不安の中で暮らしている一般国民や避難住民の苦痛を思うとき、原子力の信頼を回復するためには産官学の英知を結集し、タブーを設けない技術的に自由な討議を重ね、除染作業や廃炉作業及び安全運転に有効な知見を反映することが極めて重要である。また、資源の乏しい我が国にとって原子力は貴重な資源であることは論を待たず、原子力と放射線の理解に対して、一般国民との正しいリスクコミュニケーションを図りつつ進めることが肝要である。

#### <参考文献>

- 1) 福島原子力事故調査報告書（中間及び最終）、東京電力（株）、2012年6月20日
- 2) 原子力発電所過酷事故防止検討会報告書「過酷事故を起こさないために国、原子力界は何をなすべきか」、2013年4月22日

伊藤 晴夫（いとう はるお）  
技術士（原子力・放射線部門）

原子力安全推進協会 情報分析部  
JANSI 技術士会 会長  
e-mail : Ito.haruo@genanshin.jp



富永 研司（とみなが けんじ）  
技術士（機械／原子力・放射線／  
総合技術監理部門）

原子力安全推進協会 安全性向上部  
e-mail : tominag.kenji@genanshin.jp

