

福島第一原子力発電所事故の推定解析

Suppositional analysis for the nuclear accidents at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station

吉田 至孝 (Yoshitaka Yoshida)*¹

要約 平成 23 年 3 月 11 日に東北地方太平洋沖地震が発生し、わが国に甚大な被害をもたらした。福島第一原子力発電所は巨大地震による津波で被害を受け、大量の放射性物質が環境に放出される事態となった。本研究は、当時の数日間において、国等から公表された限られた情報に基づき、当所が保有している事象進展予測システム (IPPS) と公衆防護措置範囲迅速予測システム (R-Cubic) を用いて大気中への放射性物質放出量を推定し、国や東京電力が公表した放射性物質放出量と比較した。その結果、(1) 国が実施した 4 回にわたる段階的公衆防護措置は、R-Cubic による放射性物質放出量の段階的評価結果と定性的に一致したこと、(2) IPPS による予測は、原子炉圧力や原子炉水位などのプラントパラメータは観測値と良く一致したが、原子炉への注水を原子炉水位の観測値に合わせて解析すると、放射性物質放出量を過少評価すること、(3) R-Cubic による予測は、原子力安全委員会および原子力安全・保安院が公表した放射性物質放出量と概ね一致したこと、(4) 東京電力が平成 24 年 5 月に発表した大気中に放出された放射性物質の放出量のうち、希ガス 0.5MeV 等価値は過少評価と考えられることを示した。

キーワード 原子力防災、公衆防護措置、過酷事故解析、ソースターム

Abstract The Great East Japan Earthquake which occurred on March 11, 2011 set off a series of events that have led to a serious nuclear disaster. The Fukushima Daiichi Nuclear Power Station suffered damage due to the huge tsunami waves triggered by the earthquake, which lead to release of large amounts of radioactive materials into the environment. Using the limited information presented by the government and others within several days after the accident, this study examined the amount of radioactive materials released into the atmosphere predicted using the incident progress prediction system (IPPS) and the radioactive release, radiation dose and radiological protection area prediction system (R-Cubic) each developed by INSS, and compared those findings with the amount of radioactive materials evaluated by the government and the Tokyo Electric Power Company. The following points were seen (1) The step-by-step public protection measures taken by the government were consistent with the amount of released radioactive materials by R-Cubic. (2) The IPPS underestimated the amount of released radioactive materials when the irradiation levels in the nuclear reactors were analyzed according to the observed nuclear reactor water levels, although these were well in agreement with the observed parameters. (3) The amounts of released radioactive materials predicted by R-Cubic agreed well with those of the Nuclear Safety Commission and the Nuclear and Industrial Safety Agency. (4) The 0.5MeV equivalent value of noble gases in the amount of radioactive materials released into the atmosphere shown by TEPCO on May 2012 was considered to be an underestimate.

Keywords nuclear emergency preparedness, emergency protective action, severe accident analysis, source term

* 1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

1. 緒言

平成 23 年 3 月 11 日に東北地方太平洋沖地震が発生し、わが国に甚大な被害をもたらした。地震発生直後において、運転中であった福島第一原子力発電所 1~3 号機は原子炉が自動停止するとともに、非常用電源系統が正常に起動して原子炉の冷却が維持されていた。巨大地震とそれに連動した地震により発生した津波は、福島第一原子力発電所付近で重合し、巨大津波となって発電所に襲いかかったと聞く。福島第一原子力発電所では、過去の地震学的知見から 5.7m の津波に耐えられるよう設計されていたが、これを大きく超える巨大津波により、原子力発電所の電源供給系統である非常用発電機、蓄電池、配電盤、配線など最重要施設が被水して使用できなくなった^{(1)~(8)}。このため、原子炉で発生する崩壊熱を除去するための監視・制御機能を失い、原子炉や格納容器の状態がよくわからない状況の中で、大量の放射性物質が環境に放出される事態となった。

本研究は、平成 23 年 3 月 11 日からの数日間において、国等から公表された非常に限られた情報に基づき、当時の公衆防護措置の意思決定に必要な放射線物質の放出量を予測するため、当所で開発し保有している事象進展予測システム (IPPS*)^{(9)~(10)}と公衆防護措置範囲迅速予測システム (R-Cubic**) ^{(11)~(17)}を用いて、当時の事故状況下において放射性物質の放出量を推定し、その後原子力安全委員会^{(18)~(20)}および原子力安全・保安院^{(1)~(22)~(23)}、日本原子力研究開発機構⁽²¹⁾、東京電力⁽²⁴⁾が発表した値と比較したものである。なお、推定解析は平成 23 年 3 月下旬から 4 月にかけて実施しており、平成 23 年 5 月下旬以降、東京電力から当時の発表データの間違いが訂正されている⁽²⁵⁾が、その情報は事故当初に入手不可能であったことから考慮していない。本内容は、事故当時の情報収集不足の点は否めず、設定した解析条件にもいろいろな批判はあるものと考えられるので、ご意見、ご批判を頂戴しより良いものになりたいと考える。

2. 事故の経過

東京電力福島第一原子力発電所は 1~3 号機が運転中、4~6 号機は定期検査中であった。14 時 46 分に発生した東北地方太平洋沖地震により 1~3 号機は自動

停止するとともに、外部電源が喪失したことにより非常用ディーゼル発電機が自動起動して原子炉は安定的に冷却されていた。4~6 号機の原子炉は停止または原子炉から燃料が取り出されていた。その後、津波が来襲し、その第二波によって福島第一原子力発電所の主要安全設備が水没・被水したとされている。原子力発電所は電気を用いて原子炉の監視・制御を行っており、電源および配電設備が水没・被水したことにより、安全設備が制御不能になるとともに、原子炉の状況を把握することができない事態に至った。3 号機は蓄電池の一部が被水を免れたため、原子炉の監視と一部の安全設備の制御が可能であった。しかしながら、原子炉から発生する崩壊熱を除去する最終ヒートシンクと呼ばれる海水系統が津波により全て失われたため、1~6 号機は原子燃料の崩壊熱を除去できなくなった。幸い 6 号機は空冷式の非常用ディーゼル発電機が正常に機能していたので、5 号機に電源を融通しながら、仮設の海水系を設置して原子炉と使用済燃料貯蔵施設の冷却を維持することができた。一方、全ての電源を失った 1 号機は非常用復水器が当初動作したものの、津波の直後に直流電源系統が喪失して隔離され、使用不能となった。2 号機と 3 号機は、運転継続に電源を必要としない原子炉隔離時冷却ポンプが起動されており原子炉への注水がしばらく維持されたが、水源となる格納容器ウェットウエルの圧力抑制プール水の温度が上昇して運転が困難となり、原子炉への注水が停止した。3 号機は蓄電池が機能していたことから、原子炉隔離時冷却ポンプが停止した後、原子炉水位低により高圧注水ポンプが自動起動し、しばらく原子炉へ注水が継続されていたが、水源の温度上昇により運転継続が困難となった模様である。これらにより、1~3 号機は炉心冷却機能を喪失し、炉心溶融に至った。その後、消防車による原子炉への代替注水が実施された。使用済燃料貯蔵施設は 3 号機と 4 号機の水が沸騰したと判断され放水が行われた。1~3 号機の原子炉事故に着目し、事故発生から 5 日間程度における時系列を表 1 に示す。以下に、1 号機から順に事故当時の国や事業者等の発表に基づき事故の経過を整理した。

2.1 1 号機

福島第一原子力発電所 1 号機は、平成 23 年 3 月 11

* : Incident Progress Prediction System

** : Radioactive release, Radiation dose and Radio- logical protection area Prediction System (R³)

表1 福島第一原子力発電所事故の時系列

日時	1号機	2号機	3号機	
三月十一日	14:46	地震発生により原子炉自動停止		
	15:41	津波により非常用ディーゼル発電機停止		
	15:42	全交流電源喪失（原災法 10 条）		
	16:36	非常用炉心冷却装置流量確認不能（原災法 15 条）		
	19:00	非常用復水器作動中	原子炉隔離時冷却系作動中	
	19:03	原子力緊急事態宣言		
	20:50	半径 2km 避難指示（福島県）		
	21:00		原子炉隔離時冷却系状態不明 原子炉水位確認不能	
21:23	半径 3km 避難，10km 屋内退避指示			
三月十二日	1:20	格納容器圧力異常上昇（15 条）		
	4:00	非常用復水器停止	原子炉隔離時冷却系作動中	
	5:44	半径 10km 避難指示		
	6:50	格納容器ベント指示 [総理指示]		
	10:17	格納容器ベント開始		
	11:00	消火水注水中		
	15:29	敷地境界放射線量 15 条超過		
	15:36	水素爆発（4 人負傷）		
	18:00	海水注入指示 [総理指示]		
	18:25	半径 20km 避難指示		
	20:00		原子炉隔離時冷却系停止	高圧注水系作動中
	20:05	海水注入指示 [総理指示]		
	20:20	海水注入開始		
	22:15	海水注入中断		
23:00		原子炉隔離時冷却系作動中		
三月十三日	2:00	海水注入実施中		
	5:10			原子炉への注水不能(原災法 15 条)
	8:41			格納容器ベント開始
	8:56	敷地境界放射線量 15 条超過		
	11:00	格納容器ベント開始		
	11:55			消火水注入開始
	12:00			逃し安全弁開放
	13:12			海水注入開始
	14:15	敷地境界放射線量 15 条超過		
三月十四日	1:10	海水注入中断		海水注入中断
	3:20			海水注入再開
	3:50	敷地境界放射線量 15 条超過		
	4:15	敷地境界放射線量 15 条超過		
	5:20			格納容器ベント開始
	7:44			格納容器圧力異常上昇
	9:27	敷地境界放射線量 15 条超過		
	11:01		原子炉建屋パネル損傷開放	水素爆発（11 人負傷）
	11:30	海水注入実施中		海水注入中断
	13:25	原子炉への注水不能（15 条）		
	16:34		海水注入開始	
	18:22		燃料全露出	
	21:37	敷地境界放射線量 15 条超過		
22:50		格納容器圧力異常上昇		
三月十五日	0:02		格納容器ベント開始	
	2:30			海水注入実施中
	6:10		圧力抑制室異音発生	
	6:14			白煙発生
	6:50	敷地境界放射線量 15 条超過		
	8:11	敷地境界放射線量 15 条超過		
	8:25		白煙発生	
	10:22			周辺で 400mSv/h を観測
	10:30		早期注水 & ドライベント指示 [総理指示]	
	10:59	オフサイトセンター避難命令，福島県庁へ退避		
	11:00	半径 20km～30km 屋内退避指示		
	16:17	敷地境界放射線量 15 条超過		
23:00	敷地境界放射線量 15 条超過			

日 14 時 46 分に原子炉が自動停止し、15 時 41 分に津波による被害で全ての非常用ディーゼル発電機が停止した。東京電力は、15 時 42 分に原子力災害対策特別措置法（原災法）第 10 条に基づく通報連絡を行っている。さらに、16 時 36 分には、蓄電池の被水によると思われる監視計器指示値の喪失により非常用炉心冷却装置（ECCS）の流量が確認できないとして、原災法 15 条該当事象の発生を通報している。19 時に行われた東京電力の記者会見では非常用復水器（IC）が作動していることが発表された。政府は、原災法 15 条該当事象の発生を受けて、19 時 3 分に原子力非常事態宣言を発出した。福島県は、20 時 50 分に半径 2km 以内の住民に対して避難指示を出し、その後政府が 21 時 23 分になって半径 3km 以内の住民に対して避難指示を出した。東京電力は、21 時と 12 日 0 時の記者会見で IC は作動中とし、12 日 0 時の時点で原子炉水位が低下していることを認めた。12 日 1 時 20 分には格納容器の圧力が上昇したため、原災法 15 条該当事象の発生を通報した。政府は、12 日 5 時 44 分に半径 10km 以内の住民に避難指示を出した。東京電力は、12 日 4 時と 6 時の記者会見で IC は停止しているが、原子炉水位は安定していると発表している。12 日 6 時 50 分に政府は東京電力に対して 1 号機の格納容器ベントを指示し、東京電力は 12 日 10 時 17 分に格納容器ベントを開始したことを発表している。東京電力は、12 日 11 時、13 時、15 時の記者会見で原子炉へ注水し原子炉容器水位は安定していると発表しているが、15 時の会見では格納容器圧力の上昇も認め、12 日 15 時 29 分に敷地境界における放射線量が上昇したため、原災法 15 条該当事象の発生を通報している。その直後の 12 日 15 時 36 分に原子炉建屋上部において水素の爆燃と考えられる爆発が発生し、4 名が負傷した。政府はこれを受けて、12 日 18 時 25 分に半径 20km 以内の住民に避難指示を出した。さらに、政府は 12 日 18 時と 20 時 5 分の 2 回にわたり、東京電力に海水注入を指示している。東京電力は、12 日 20 時 20 分に海水注入を開始し、12 日 22 時 15 分から 13 日 2 時頃までと 14 日 1 時 10 分から 11 時 30 分頃まで中断があったものの、ホウ酸を含む海水注入を継続している。

2.2 2号機

福島第一原子力発電所 2 号機は、平成 23 年 3 月 11 日 14 時 46 分に原子炉が自動停止し、15 時 41 分に津

波による被害で全ての非常用ディーゼル発電機が停止した。東京電力は、15 時 42 分に原子力災害対策特別措置法（原災法）第 10 条に基づく通報連絡を行っている。さらに、16 時 36 分には、蓄電池の被水によると思われる監視計器指示値の喪失により ECCS の流量が確認できないとして、原災法 15 条該当事象の発生を通報している。19 時に行われた東京電力の記者会見では原子炉隔離時冷却系（RCIC）が作動していることが発表された。政府は、原災法 15 条該当事象の発生を受けて、19 時 3 分に原子力非常事態宣言を発出した。福島県は、20 時 50 分に半径 2km 以内の住民に対して避難指示を出し、その後政府が 21 時 23 分になって半径 3km 以内の住民に対して避難指示を出した。東京電力は、21 時の記者会見で RCIC の状態と原子炉の水位が確認できなるとし、12 日 0 時の時点で RCIC の状態は依然不明であるが、原子炉水位は安定していると発表した。東京電力は 12 日 4 時に RCIC が作動中であると発表した。政府は、12 日 5 時 44 分に半径 10km 以内の住民に避難指示を出した。東京電力は、12 日 6 時以降の記者会見で RCIC は作動しており、原子炉水位は低い状態で安定しているとした。12 日 6 時 50 分に政府は東京電力に対して 2 号機の格納容器ベントを指示し、東京電力は 13 日 11 時に格納容器ベント開始を発表している。14 日 11 時 1 分に 3 号機の爆発によって原子炉建屋ブローアウトパネルの損傷・開放が確認された。東京電力は 14 日 11 時 30 分に原子炉水位の低下と原子炉圧力の上昇が認められることを発表し、14 日 13 時 25 分には原子炉への注水が停止したと発表した。14 日 16 時 34 分に海水注入が開始されているが、14 日 22 時 50 分には格納容器圧力の異常上昇が確認され、15 日 0 時 2 分に格納容器ベントが実施されている。原子力安全・保安院は、15 日 6 時 10 分に圧力制御室で異音が発生し、ウェットウェル圧力が低下したと発表した。15 日 8 時 25 分には原子炉建屋から白煙が確認され、15 日 10 時 30 分に政府は原子炉への早期注水とドライウェルからの格納容器ベントを指示し、15 日 11 時には半径 20～30km 圏の住民に対して屋内退避を指示している。

2.3 3号機

福島第一原子力発電所 3 号機は、平成 23 年 3 月 11 日 14 時 46 分に原子炉が自動停止し、15 時 41 分に津波による被害で全ての非常用ディーゼル発電機が停止

した。東京電力は、15時42分に原子力災害対策特別措置法（原災法）第10条に基づく通報連絡を行っている。19時に行われた東京電力の記者会見ではRCICが作動していることが発表され、以後12日20時に高圧注水系（HPCI）に切り替わったことが発表されるまで作動中とされている。東京電力は13日5時10分にHPCIが作動不能と判断して原災法15条該当事象の発生を通報している。東京電力は、13日5時30分にはHPCIが停止し、格納容器ベントを実施したことを発表した。原子力安全・保安院は13日8時41分に格納容器ベントを開始したことを発表した。東京電力は13日9時に格納容器スプレイを停止したと発表、13日11時55分から消火水系統から真水の注水を開始している。13日12時の東京電力の発表では、格納容器ベントは実施済みであり、原子炉容器逃し安全弁が開放され、原子炉にホウ酸水が注水されている。原子力安全・保安院は、13日13時12分から原子炉に海水を注水したと発表した。14日1時10分に海水注入は中断され14日3時20分に再開されている。原子力安全・保安院は、14日5時20分に格納容器ベントを開始したが、7時44分に格納容器圧力が異常上昇したことを発表した。その後、14日11時1分に原子炉建屋で水素の爆轟と考えられる爆発が発生し、作業員11人が負傷して、14日11時30分には海水注入が中断されていることが発表された。東京電力は15日2時30分に海水注入が再開されていることを発表した。

3. IPPS による原子炉事故の推定解析

原子力安全システム研究所では、原子力防災対応の支援を行うため、IPPSを整備し関西電力の全プラントに適用している。事象進展予測技術は平成13年に開発・整備し、毎年の原子力防災訓練時に適用して技術の改良・高度化研究を行ってきた。IPPSは、ORIGEN2.2⁽²⁶⁾を用いた炉心蓄積放射エネルギーデータベースが組み込まれたシビアアクシデント時従業員被ばく線量評価システム（SADOSE）^{(27)~(30)}とシビアアクシデント解析コードMAAP4^{(31)~(34)}および大気拡散計算コードAREDES⁽³⁵⁾を組み合わせたもので、シビアアクシデント挙動から環境への放射性物質放出量の推定、さらには公衆防護の指標となっている予測線量まで一貫して解析するシステムである。東京電力福島第一原子力発電所事故を受け、事故初期の段階で国や東京電力から発表された情報が散在している状況であり、これらを集約・整理することから始めた。平行し

て、炉心蓄積放射エネルギーから簡易的に放射性物質の放出量を推定する試みを実施してきたが、IPPSを用いた予測技術の性能や課題を把握するため、福島第一原子力発電所1~3号機事故の推定解析を実施することとした。しかし、福島第一原子力発電所1~3号機のプラントモデルが無く、原子炉設置許可申請書等を用いてプラントモデルを整備してから解析に着手したため、推定解析は平成23年4月下旬までかかった。以下に示す推定解析は、当時の限られた情報からの推定や5月下旬以降に東京電力から何度か誤りが訂正された情報を当時の間違っただまの状態で使用しているため、その後に公表された政府や東京電力のシビアアクシデント解析⁽¹⁾⁽⁸⁾とは条件が異なっている。ここでは、当時の混乱した状況下において、福島第一原子力発電所のプラントモデルを保有していた場合、事故発生直後にIPPSでどこまで推定できたかに着目して説明する。情報ソースは、プレス発表および断片的に観測された原子炉水位、原子炉圧力、ドライウェル圧力、圧力抑制室圧力を用いた。また、消火水および海水注水はA-2ポンプ性能を持つ消防車を想定し、注水流量は3月17日に発表された約180ℓ/分程度で原子炉水位を基準に制御した。

3.1 1号機

福島第一原子力発電所1号機は原子炉熱出力1,380MWのBWR3型原子炉システムとMark I型格納容器を組み合わせたもので、ECCS及び注水系はタービン駆動式のHPCIと電動式の炉心スプレイ系、原子炉停止時冷却系、および自然循環式のICで構成され、格納容器は圧力抑制プールが付いたフラスコ型になっている。炉心の燃料は、平成22年7月21日10時に原子炉が起動され、平成22年8月22日0時に一旦停止した後、平成22年9月24日10時に再起動されて平成23年3月11日14時46分まで合計201日間運転されていた。1号機のプラントパラメータの観測値を図1に示す。表1と図1に基づき作成した1号機の解析条件を表2に示す。ICは11日19時頃に作動中と発表され、12日4時頃に停止と発表された。当時発表されたプラントパラメータからICを正常に作動させると原子炉の圧力、水位挙動が全く異なり、原子炉容器破損時期が大幅に遅れるため、ICの性能を定格の100分の1と仮定した。解析結果の主要事象の発生時刻を表3に示す。1号機は、ICによる炉心冷却が不十分であるため、事故発生後3.7時間で炉心が

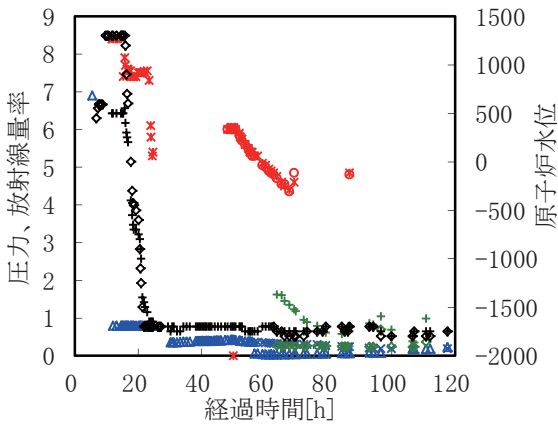
表2 1号機の解析条件

3月11日	14:46	原子炉自動停止
	15:41	非常用ディーゼル発電機停止
	19:00頃	非常用復水器作動中
3月12日	1:20	格納容器圧力異常上昇
	4:00頃	非常用復水器停止
	10:17	格納容器ベント開始
	11:00頃	(消火水注水開始)
	15:00頃	(消火水注水停止)
	15:36	水素爆発
3月13日	20:20	海水注入開始
	22:15	海水注入中断
	3月13日	2:00
3月14日	1:10	海水注入中断
	11:30	海水注入再開

(カッコ内は時系列から推定)

表3 1号機の主要事象の発生時刻

主要事象	発生時刻
地震発生	0時間
原子炉自動停止	0時間
全交流電源喪失	0.9時間
炉心露出	3.7時間
燃料被覆管破損	5.0時間
炉心損傷	5.6時間
原子炉容器破損	11.0時間
格納容器最高使用圧力超過	11.1時間
格納容器最高使用圧力2倍超過	12.5時間
格納容器ベント	19.5時間
格納容器過温状態	19.5時間
海水注入開始	29.6時間
海水注入停止	58.4時間
海水注入再開	68.7時間



- ▲ A系 原子炉圧力 (MPa)
- × B系 原子炉圧力 (MPa)
- * D/W圧力 (0.1MPa abs)
- S/C圧力 (0.1MPa abs)
- + CAMS D/W(A) (100Sv/h)
- × CAMS D/W(B) (100Sv/h)
- ▲ CAMS S/C(A) (100Sv/h)
- ◆ CAMS S/C(B) (100Sv/h)
- ◇ 原子炉水位(燃料域)(A) (mm)
- + 原子炉水位(燃料域)(B) (mm)

図1 1号機プラントパラメータの観測値 (D/W: ドライウェル, S/C: サプレッションチェンバ, CAMS: 格納容器線量率)

露出し、5.6時間後には炉心が損傷した。炉心溶融物は原子炉容器下部に蓄積し、11時間後に原子炉容器が破損して直後に格納容器圧力が最高使用圧力を超過した。その際、原子炉容器内は高压であったため、高压溶融物噴出 (HPME) が発生した可能性があり、格納容器直接加熱 (DCH) や格納容器側壁へ噴出し

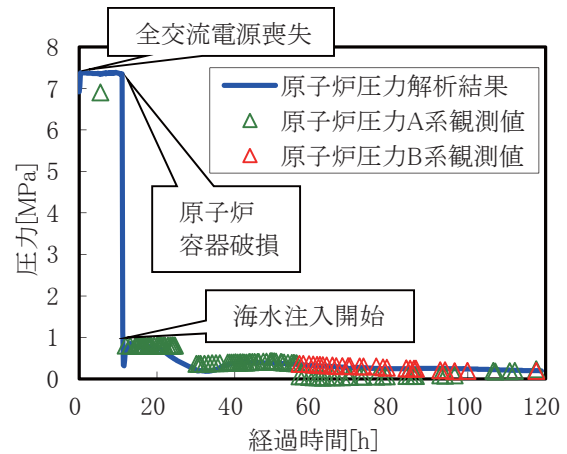


図2 1号機原子炉圧力の解析結果と観測値の比較

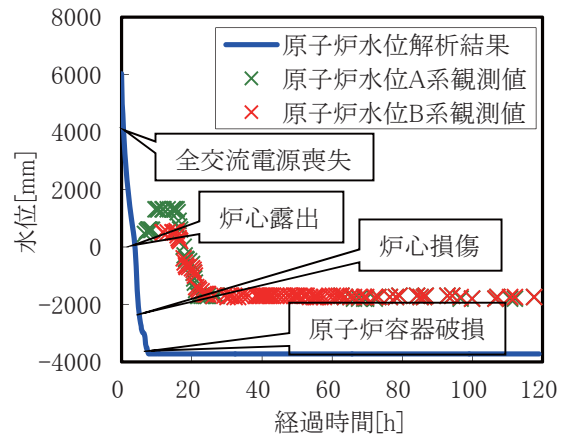


図3 1号機原子炉水位の解析結果と観測値の比較

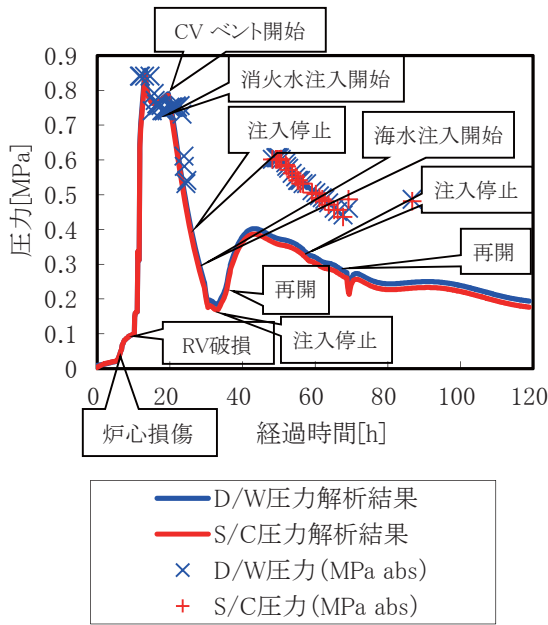


図4 1号機格納容器圧力の解析結果と観測値の比較 (RV:原子炉容器, CV:格納容器)

た熔融物が直接接触した可能性も考えられる。格納容器圧力はその後も急上昇し、12.5時間後には最高使用圧力の2倍を超過した。19.5時間後に格納容器ベントが開始されると同時に格納容器温度が耐力値（過温損傷の目安として約300℃）を超過した。格納容器温度の異常な上昇により、フランジ部などの接合箇所から放射性物質の異常な漏えいが生じた可能性が考えられる。原子炉圧力、原子炉水位、格納容器圧力の解析結果と観測値の比較を図2～4に示す。原子炉圧力は原子炉容器破損により急激に低下して海水注入可能な圧力まで低下した。原子炉容器水位は、消防車による注水が実施され有効燃料長の半分程度の高さで観測されているが、解析では原子炉容器の破損に伴い、水位が形成されることはなかった。格納容器圧力は原子炉容器破損後急激に上昇し、格納容器ベント操作後に低下した。格納容器ベント後の格納容器圧力は観測値より低めに推移する結果となった。環境への放射性物質の放出は、格納容器ベントにより開始されたものとして推定した。結果を図5に示す。1号機から当初5日間の間に環境に放出される可能性のある放射性物質の量は、希ガス0.5MeV等価換算値で $5.91 \times 10^{17}\text{Bq}$ 、ヨウ素131等価換算値で $7.75 \times 10^{13}\text{Bq}$ 、ヨウ素131で $6.88 \times 10^{13}\text{Bq}$ 、セシウム137で $2.95 \times 10^{12}\text{Bq}$ と推定した。

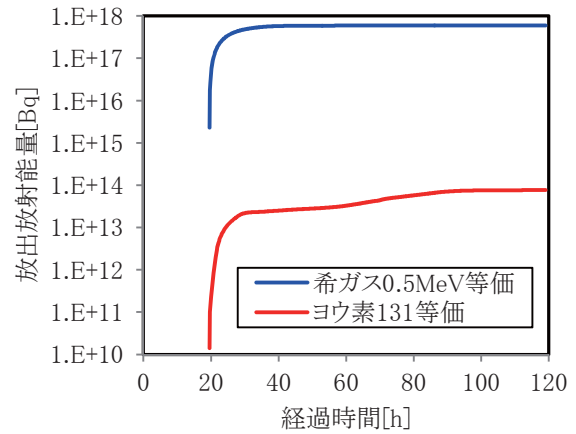


図5 1号機放射性物質放出量（積算値）の推定結果

3.2 2号機

福島第一原子力発電所2号機は原子炉熱出力2,381MWのBWR4型原子炉システムとMark I型格納容器を組み合わせたもので、ECCS及び注水系はタービン駆動式のHPCI、RCICと電動式の炉心スプレイ系、残留熱除去系（低圧注水系）で構成され、格納容器は圧力抑制プールが付いたフラスコ型になっている。炉心の燃料は、平成22年11月13日11時に原子炉が起動され、平成23年3月11日14時46分まで118日間運転されていた。2号機のプラントパラメータの観測値を図6に示す。表1と図6に基づき作成した解析条件を表4に示す。RCICは、初期は圧力抑制プールを水源とし、水温の上昇により12.9時間後に外部タンク側へ水源を切替したと仮定した。RCICは水位設定値に基づき起動・停止を繰り返す仕組みとなっているが、電源喪失によって無制御状態のまま連続運転されていることから、本解析では崩壊熱に見合う注水を継続しているものと仮定した。2号機は格納容器ベント操作の実施が2回発表されているが、1回目は圧力上昇が緩やかになる程度であり、ベント口径の30%程度の開度と仮定した。2回目はベント操作事態は失敗した模様であるが、圧力制御室の異音とともに格納容器圧力が急激に低下していることから、格納容器が破損してベント口径の2倍の面積の開口部ができたと仮定した。RCIC停止により消防車による海水注入が実施されており、原子炉容器水位は観測値に従って維持されているものとして解析した。解析結果の主要事象の発生時刻を表5に示す。RCICにより炉心の

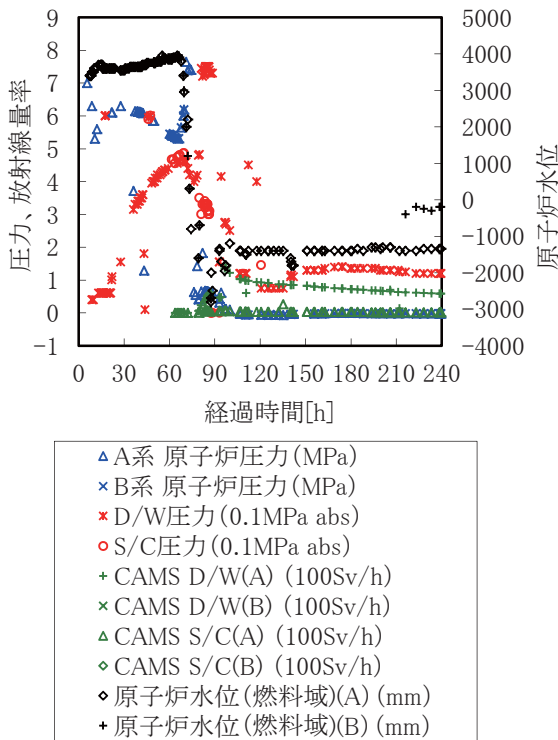


図6 2号機プラントパラメータ観測値

表4 2号機の解析条件

3月11日	14:46	原子炉自動停止
	15:41	非常用ディーゼル発電機停止 (原子炉隔離時冷却系作動)
3月13日	11:00	格納容器ベント開始 (30%開度)
3月14日	13:25	原子炉隔離時冷却系停止
	16:34	海水注入開始
	18:22	燃料全露出
	22:50	(逃し安全弁開放)
3月15日	23:30頃	(逃し安全弁全弁開放完了)
	0:02	格納容器ベント操作 (失敗)
	6:10	圧力制御室異音発生 (格納容器破損 ベントの2倍面積)

(カッコ内はプラントパラメータから推定)

冷却は維持された状態が継続するが、40.5時間後に格納容器圧力が最高使用圧力を超過し、その後も格納容器圧力は徐々に上昇を続けた。70.4時間後に原子炉隔離時冷却系が停止したため、78.8時間後に炉心が露出、原子炉圧力を下げるため80時間後に逃し安全弁 (SRV) を開放して原子炉減圧を開始すると、原子炉内の高温蒸気によって直後に格納容器圧力が最高使用圧力の2倍を超過し、81.6時間後には炉心が損傷した。87.2時間後に圧力制御室付近での異音発生により格納容器が破損し、格納容器圧力が急激に低

表5 2号機の主要事象の発生時刻

主要事象	発生時刻
地震発生	0時間
原子炉自動停止	0時間
原子炉隔離時冷却系起動	0時間
全交流電源喪失	0.9時間
原子炉隔離時冷却系水源切替	12.9時間
格納容器最高使用圧力超過	40.5時間
格納容器ベント (30%開度)	44.1時間
原子炉隔離時冷却系停止	70.4時間
海水注入開始	73.5時間
炉心露出	78.8時間
逃し安全弁開放	80.0時間
格納容器最高使用圧力2倍超過	80.1時間
燃料被覆管破損	81.0時間
格納容器ベント操作 (失敗)	81.2時間
逃し安全弁全弁開放完了	81.2時間
炉心損傷	81.6時間
圧力制御室異音発生 格納容器破損 (ベント口径2倍)	87.2時間

下した。原子炉圧力、原子炉水位、格納容器圧力の解析結果と観測値の比較を図7~9に示す。原子炉圧力はRCICの運転期間中に低下が見られるが、推定解析では一定に維持された。SRV開放により原子炉圧力は大きく低下した。原子炉水位は、RCIC停止によって急激に低下し、SRV開放時に全炉心が露出して炉心損傷に至っている。格納容器圧力はRCIC停止に伴い徐々に上昇し、SRV開放時に急激に上昇した。その後格納容器破損により圧力が低下する結果となった。環境への放射性物質の放出は、最初の格納容器ベ

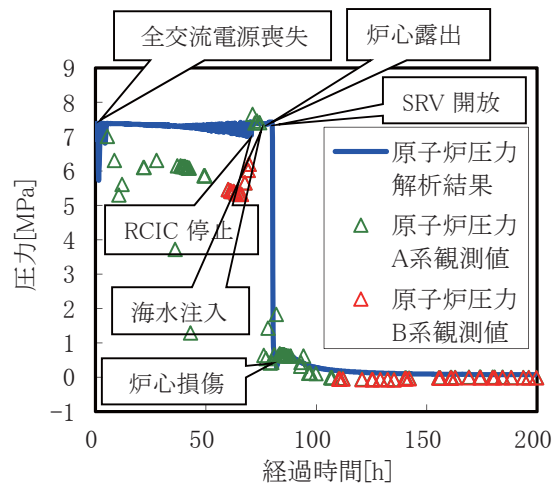


図7 2号機原子炉圧力の解析結果と観測値の比較

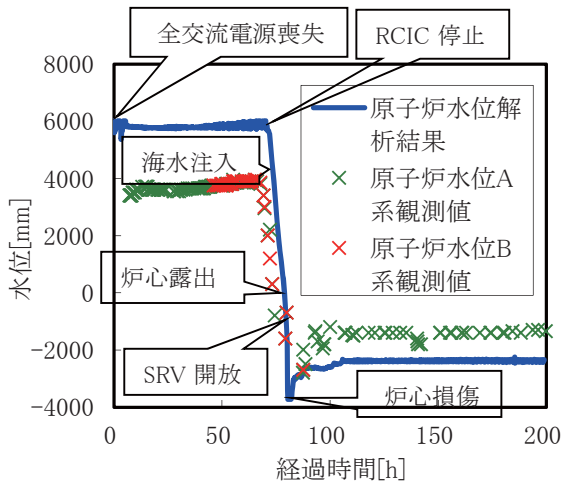


図8 2号機原子炉水位の解析結果と観測値の比較

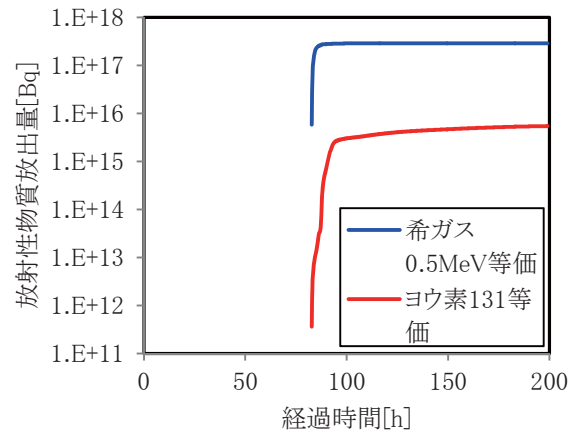


図10 2号機放射性物質放出量（積算値）の推定結果

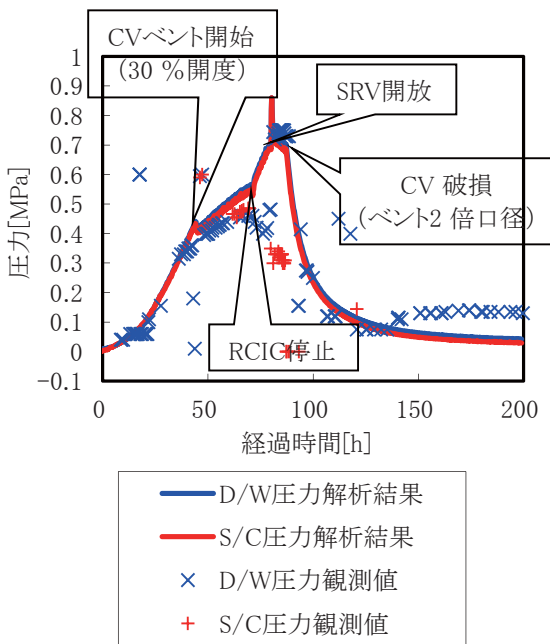


図9 2号機格納容器圧力の解析結果と観測値の比較

ントにより開始されたものとして推定した。結果を図10に示す。2号機から当初9日間程度の間環境に放出される可能性のある放射性物質の量は、希ガス0.5MeV等価換算値で 2.86×10^{17} Bq、ヨウ素131等価換算値で 6.07×10^{15} Bq、ヨウ素131で 5.87×10^{15} Bq、セシウム137で 4.24×10^{14} Bqと推定した。

3.3 3号機

福島第一原子力発電所3号機は原子炉熱出力2,381MWのBWR4型原子炉システムとMark I型格納容器を組み合わせたもので、ECCS及び注水系はタービン駆動式のHPCI、RCICと電動式の炉心スプレイ系、残留熱除去系（低圧注水系）で構成され、格納容器は圧力抑制プールが付いたフラスコ型になっている。炉心の燃料は、平成22年9月18日10時に原子炉が起動され、平成23年3月11日14時46分まで174日間運転されていた。3号機のプラントパラメータの観測値を図11に示す。表1と図11に基づき作成した解析条件を表6に示す。RCICは、初期は圧力抑制プールを水源とし、水温の上昇により12.9時間後に外部タンク側へ水源を切替したと仮定した。HPCIの作動は、ポンプ駆動用蒸気の抽気量が崩壊熱を大きく上回っているため、原子炉圧力が低下することは自明であることから圧力低下開始時点とし、注水量も駆動蒸気の抽気量に見合う量が注水されるものと仮定した。HPCIの流量喪失は、同様の理由で原子炉圧力上昇時点と仮定した。RCIC及びHPCIは水位設定値に基づき起動・停止を繰り返す仕組みとなっているが、本解析では崩壊熱に見合う注水を継続しているものと仮定した。解析結果の主要事象の発生時刻を表7に示す。最初は原子炉隔離時冷却系により炉心の冷却は維持された状態が継続するが、21.4時間後にHPCIが起動し36.7時間後まで注水された。HPCI停止により駆動蒸気の抽出が無くなり、原子炉圧力が上昇し、41.7時間後にSRVを開放することによって原子炉圧力が低下した。その直後の41.8時間後に格納容

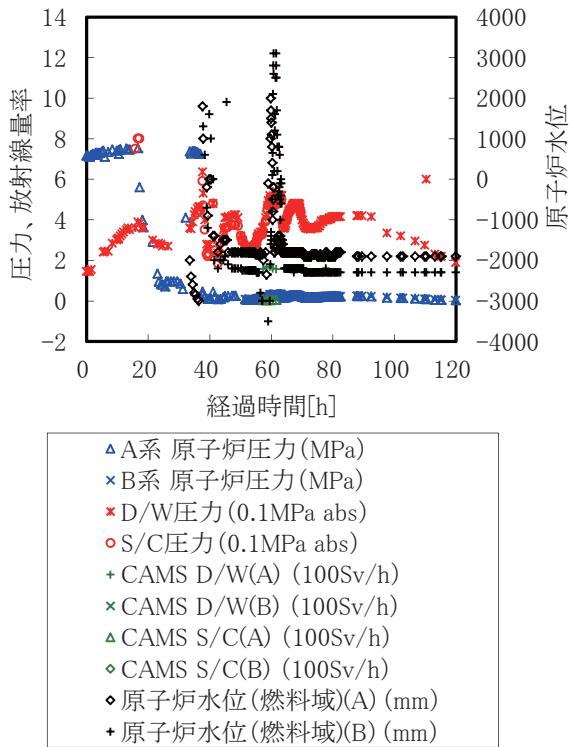


図 11 3号機プラントパラメータ観測値

表 7 3号機の主要事象の発生時刻

主要事象	発生時刻
地震発生	0時間
原子炉自動停止	0時間
原子炉隔離時冷却系起動	0時間
全交流電源喪失	0.9時間
原子炉隔離時冷却系水源切替	12.9時間
高压注水系起動	21.4時間
原子炉隔離時冷却系停止	29.2時間
高压注水系流量喪失	36.7時間
高压注水系停止	38.4時間
安全逃がし弁開放	41.7時間
格納容器最高使用圧力超過	41.8時間
格納容器ベント開始	41.9時間
安全逃がし弁全弁開放完了	42.3時間
炉心露出	45.0時間
消防ポンプ起動	45.2時間
消防ポンプ停止	58.4時間
炉心損傷	59.6時間
消防ポンプ起動	60.6時間
消防ポンプ全流量注入	63.7時間
消防ポンプ流量調整	64.1時間

表 6 3号機の解析条件

3月11日	14:46	原子炉自動停止
	15:41	非常用ディーゼル発電機停止 (原子炉隔離時冷却系作動)
3月12日	12:10頃	(高压注水系作動)
	20:00頃	(原子炉隔離時冷却系停止)
3月13日	3:30頃	(高压注水系流量喪失)
	5:10	高压注水系停止
	8:30頃	(安全逃がし弁開放)
	8:41	格納容器ベント開始
	9:10頃	(安全逃がし弁全弁開放完了)
	11:55	消火水注入開始
3月14日	13:12	海水注入開始
	1:10	海水注入中断
	3:20	海水注入再開
	6:30頃	(海水流量増加)
	8:30頃	(海水流量減少)

(カッコ内はプラントパラメータから推定)

器圧力が最高使用圧力を超過し、ラプチャディスクが作動して41.8時間後から格納容器ベントが開始され、格納容器圧力が低下した。原子炉への注水停止と逃し安全弁による減圧で、原子炉水位が大きく低下し、45.0時間後に炉心が露出、59.6時間後には炉心が損傷した。原子炉圧力、原子炉水位、格納容器圧力の解

析結果と観測値の比較を図12~14に示す。原子炉圧力は、RCICによってしばらく一定に維持され、HPCIが作動することにより大量の駆動蒸気が抽出され、圧力は大きく低下した。これはHPCIの定格駆動蒸気量が炉心崩壊熱によって発生する蒸気量を大きく上回ったため、HPCIが定格流量で注水できない状態となっていることが示唆される。HPCIの停止により駆動蒸気の抽出が止まり、原子炉圧力が上昇し、SRV開放によって減圧される結果となった。原子炉

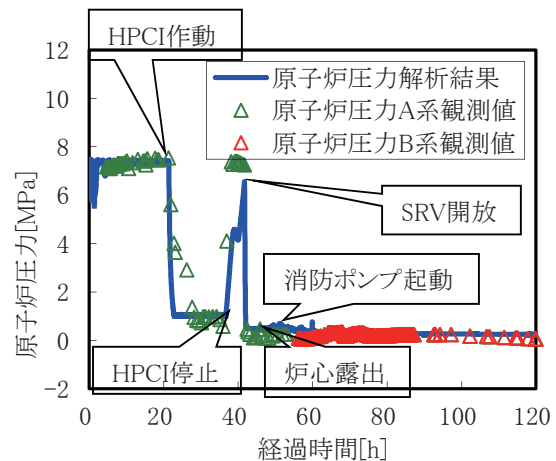


図 12 3号機原子炉圧力の解析結果と観測値の比較

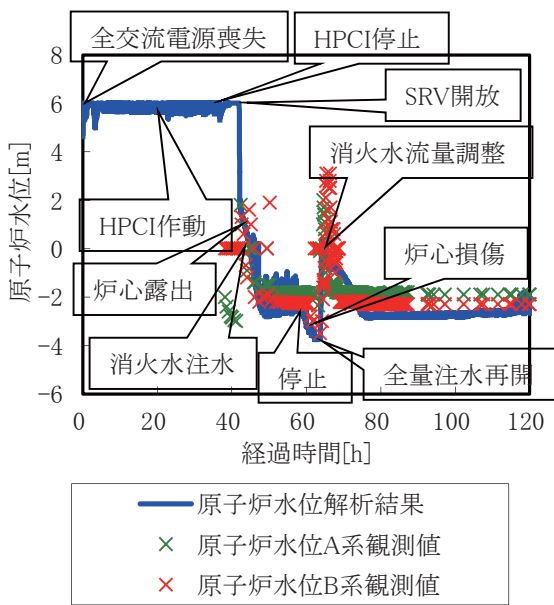


図13 3号機原子炉水位の解析結果と観測値の比較

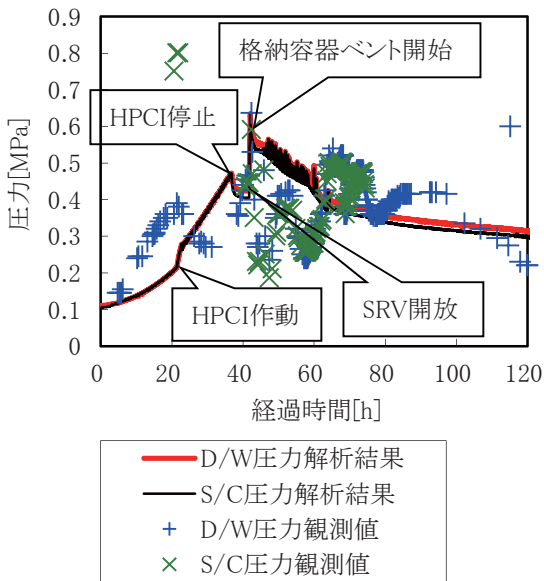


図14 3号機格納容器圧力の解析結果と観測値の比較

水位は、RCIC および HPCI によってほぼ一定に維持され、HPCI が停止し SRV が開放されたことにより急速に低下して炉心が露出し、その後炉心損傷に至っている。格納容器圧力は徐々に上昇し、SRV 開放によって急激に上昇して格納容器ベントのラプチャディスクが破損して減圧される結果となった。その後も消防車による海水注入が実施されており、原子炉容器水位は観測値に従って維持されているものとして解析した。このため、炉心溶融物は原子炉容器内に保持され

る結果となった。IPPS では炉心を半径方向に5ノード、軸方向に30ノードに分割しており、炉心部の状況を図15~17に示す。炉心損傷は炉心中心部から始まり、炉心全体が溶融・崩壊して下部に溶融プールが形成され安定する結果となった。環境への放射性物質の放出は、最初の格納容器ベントにより開始されたも

- 健全
- ▨ 被覆管損傷
- ▩ 燃料崩壊
- ▧ 燃料溶融
- ▣ 溶融塊
- ボイド

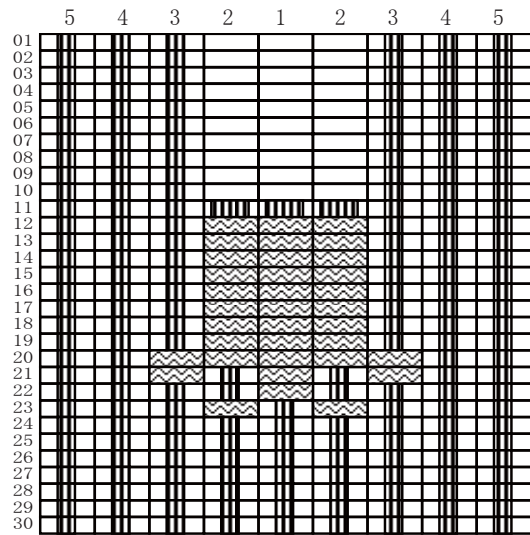


図15 61.1時間経過後の炉心部の状態

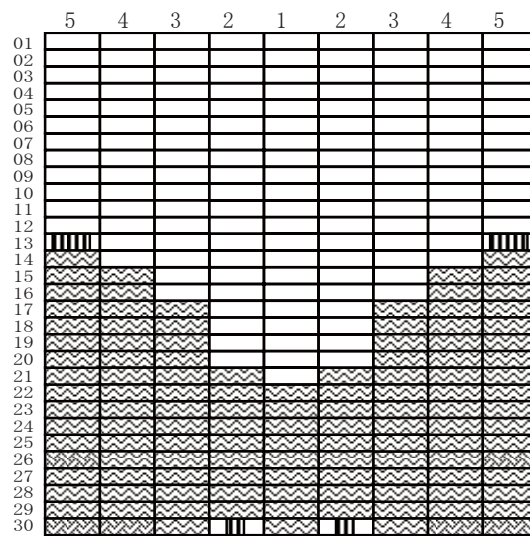


図16 65.3時間経過後の炉心部の状態

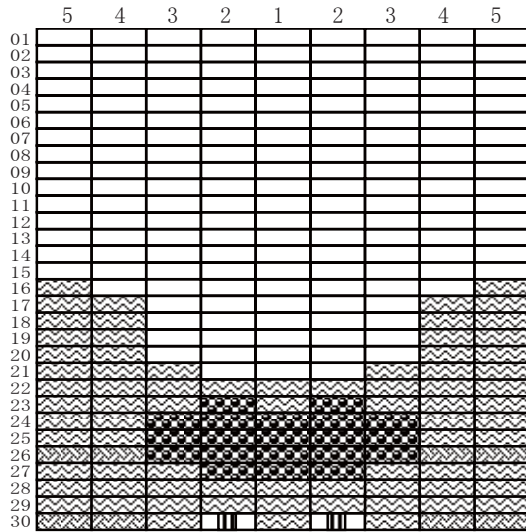


図 17 100 時間経過後の炉心部の状態

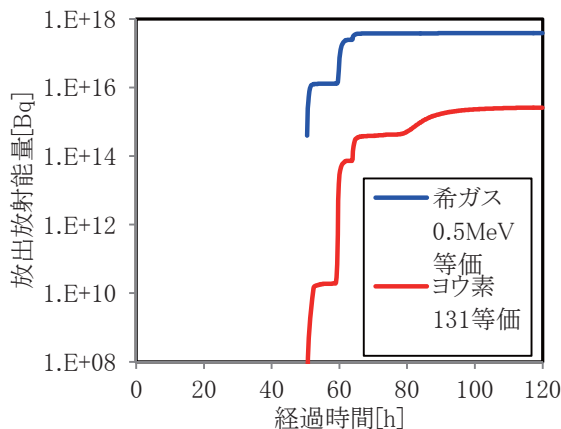


図 18 3号機放射性物質放出量（積算値）の推定結果

のとして推定した。結果を図 18 に示す。3号機から当初5日間程度の間環境に放出される可能性のある放射性物質の量は、希ガス 0.5MeV 等価換算値で 3.91×10^{17} Bq, ヨウ素 131 等価換算値で 2.67×10^{15} Bq, ヨウ素 131 で 2.54×10^{15} Bq, セシウム 137 で 1.72×10^{14} Bq と推定した。3号機は格納容器ベントと消防車による注水が継続されていたので、消防車による注水のみを実施した場合、格納容器ベントのみを実施した場合、両方を組み合わせた場合の影響を推定した。解析結果を図 19~20 に示す。消防車による注水のみを実施した場合は、格納容器圧力が上昇して限界圧力（最高使用圧力の約3倍）に達し破損する結果となった。一方、格納容器ベントのみを実施した場合は、格納容器圧力は低下するものの、原子炉容器破

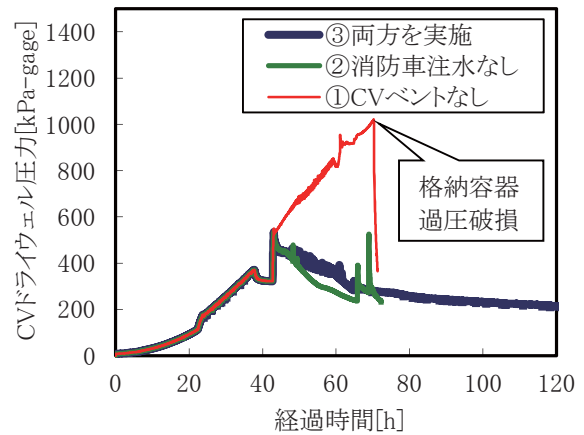


図 19 3号機格納容器ベントの効果確認

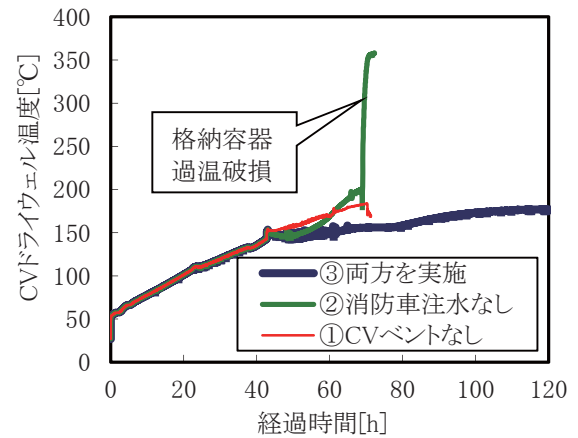


図 20 3号機消防ポンプによる注水の効果確認

損に伴い格納容器内の温度が上昇して接合部などが破損（過温損傷の目安として約 300℃）する結果となった。これらの感度解析により、3号機で実際に操作されたタイミングにおいて、格納容器ベントと消防車による十分な注水を組み合わせて実施することにより、格納容器破損と原子炉容器破損の防止に効果があることが確認できた。

4. R-Cubic による推定解析

原子力安全システム研究所では、原子力防災対応の支援を行うため、日本エヌ・ユー・エス(株)と共同で R-Cubic を開発し、関西電力各発電所に導入いただいている。R-Cubic は、平成 17 年に実施された原子力安全委員会の原子力防災指針⁽³⁶⁾⁽³⁷⁾の見直しに際して、放射性物質の放出前または直後の避難のために必要な放射性物質の放出量と公衆の被ばく線量の予測結

果を迅速に提供する目的で開発したものである。R-Cubic は、異常事態等の発生時刻情報に基づき、時間依存方程式⁽¹⁶⁾を解き、気象場は風向、風速、大気安定度の最大幅を指定することにより、公衆防護措置範囲を迅速に提示できる。対象とする事故は、原子炉施設事故、使用済燃料貯蔵施設事故、気体廃棄物処理施設事故である。加圧水型軽水炉を例として原子炉事故の計算手順の概念を図 21 に示す。本共同開発において、当所は放射性物質の環境への放出量と格納容器を線源とする放射線量を推定する技術開発を担当している。東京電力福島第一原子力発電所事故を受け、電源が喪失してプラント情報がほとんど得られない状

況下において、R-Cubic の予測性能を確認するため、同発電所の R-Cubic 用モデルを整備してから放射性物質の放出量の推定を実施した。以下に示す推定解析は、当時の限られた情報から時間依存方程式を用いた解析により、表 8 に示す事故発生後 4 回にわたり実施された公衆防護措置の意思決定の際に R-Cubic が放出源情報としてどのような値を提供できたかに着目して説明する。なお、R-Cubic の推定解析は事故直後に実施⁽³⁸⁾しているが、本報告ではその後の BWR プラント用モデルの検証作業を踏まえた新しい R-Cubic を用いて再計算を実施したものである。

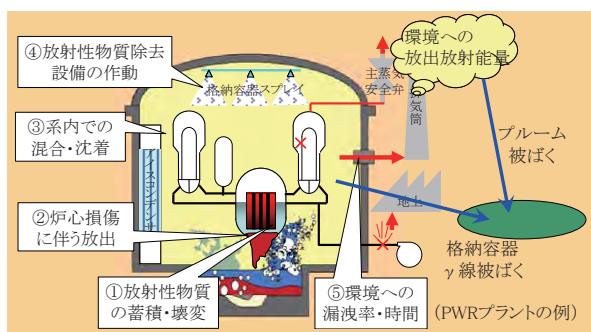


図 21 R-Cubic システムの計算手順

4.1 半径 3km 圏内からの避難指示

半径 3km 圏内からの避難と 3~10km 圏の屋内退避指示は、3 月 11 日 16 時 36 分に福島第一原子力発電所 1、2 号機の原子炉への注水状態が確認できなくなったことにより原災法 15 条事象発生の通報が行われた後、約 5 時間経過した時点の 11 日 21 時 23 分に発令された。R-Cubic では 1 号機と 2 号機の炉心冷却機能の喪失を表 9 の条件として解析した。解析結果を表 10 に示す。この段階においては、放射性物質の放出は希ガスが主体で、希ガス 0.5MeV 等価換算値は 1 号機が 5.03×10^{15} Bq、2 号機が 8.56×10^{15} Bq、合

表 8 公衆防護措置の発令とプラントの状態

	1号機	2号機	3号機	4号機
① 半径 3km 圏内からの避難、3~10km 圏内の屋内退避指示	炉心冷却機能喪失	炉心冷却機能喪失		
② 半径 10km 圏内からの避難指示	炉心冷却機能喪失 & 格納容器圧力異常上昇	同上		
③ 半径 20km 圏内からの避難指示	炉心冷却機能喪失 & 格納容器漏洩	炉心冷却機能喪失 & 格納容器圧力異常上昇		
④ 半径 20~30km 圏内の屋内退避指示	同上	炉心冷却機能喪失 & 格納容器漏洩	炉心冷却機能喪失 & 格納容器ベント使用済燃料の水中破損	使用済燃料の水中破損

表 9 半径 3km 圏内からの避難指示時点の解析条件

		1号機	2号機
運転期間		約 7 ヶ月	約 4 ヶ月
炉心冷却機能全喪失	喪失	1 時間 50 分後	1 時間 50 分後
	回復	見込まず	見込まず
圧力抑制プール		サブクール	サブクール
漏えい箇所		ドライウエル	ドライウエル
格納容器圧力	観測時刻	(事故発生時)	(事故発生時)
	観測値	(0.1kPag)	(0.1kPag)
格納容器最高使用圧力超過時刻		-	-
格納容器漏洩率	最高使用圧力以下	設計値	設計値
	最高使用圧力超過	設計値	設計値
放出箇所		非常用ガス処理系	非常用ガス処理系
格納容器ベント	実施有無	無し	無し
	開始時刻	-	-
計算時間		事故発生後 24 時間	事故発生後 24 時間

カッコ内は推定値

表 10 半径 3km 圏内からの避難指示時点における放射性物質放出量の推定解析結果 (単位: Bq)

	1号機	2号機	合計
希ガス等価	5.03E + 15	8.56E + 15	1.36E + 16
ヨウ素等価	1.54E + 11	2.82E + 11	4.36E + 11
I-131	1.08E + 11	1.97E + 11	3.05E + 11
Cs-137	8.05E + 09	1.32E + 10	2.13E + 10

計 1.36×10^{16} Bq と推定された。この放出量は、気象条件に依存するものの、おおよそ敷地境界付近において防護措置が必要と考えられるものである。ヨウ素 131 等価換算値は 1 号機が 1.54×10^{11} Bq、2 号機が 2.82×10^{11} Bq、合計 4.36×10^{11} Bq と推定され、この値は敷地外において防護措置が必要となる放出量を大きく下回った。1 号機と 2 号機の放射性物質放出量の時間変化を図 22~23 に示す。何れも事故発生から 4 時間程度で炉心が損傷し、環境へ放出される放射性

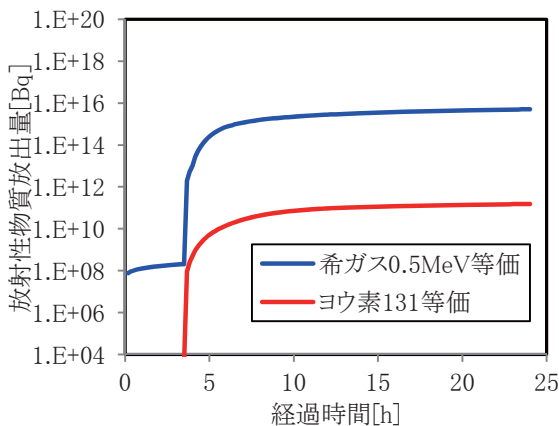


図 22 1号原子炉の放射性物質放出量 (積算値)

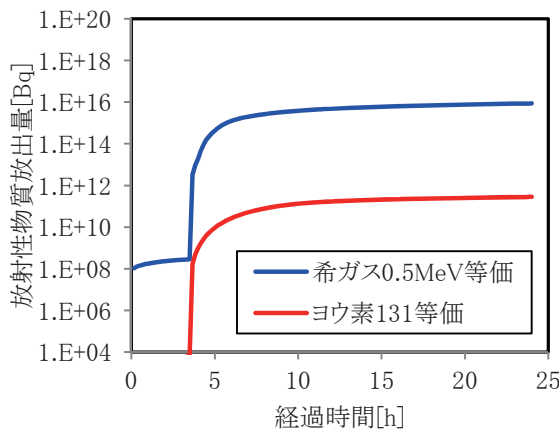


図 23 2号原子炉の放射性物質放出量 (積算値)

物質が増加した。

4.2 半径 10km 圏内からの避難指示

半径 10km 圏内からの避難指示は、3 月 12 日 1 時 10 分に 1 号機の格納容器圧力の異常上昇により原災法 15 条事象発生 of 通報が行われた後、約 4 時間経過した時点の 12 日 5 時 44 分に発令された。R-Cubic では 1 号機の格納容器圧力の異常上昇を受けて表 11 の条件 (2 号機は変更なし) で解析した。解析結果を表 12 に示す。この段階では、1 号機の放出による影響が主体で希ガス 0.5MeV 等価換算値は合計 4.10×10^{17} Bq、ヨウ素 131 等価換算値は 1.39×10^{15} Bq となった。この値は、気象条件に依存するものの、原子力安全委員会の防災指針に示されている EPZ* の根拠となる放出量⁽³⁶⁾に近い値であり、EPZ 範囲内において防護措置が必要と考えられるものである。1 号機の放射性物質放出量の時間変化を図 24 に示す。10 時間 34

* Emergency Planning Zone

表 11 半径 10km 圏内からの避難指示時点の解析条件

		1号機	2号機
運転期間		約 7 ヶ月	
炉心冷却機能全喪失	喪失	13 時間 14 分後	
	回復	見込まず	
圧力抑制プール		飽和状態	
漏えい箇所		ドライウエル	
格納容器圧力	観測時刻	-	
	観測値	-	
格納容器最高使用圧力超過時刻		10 時間 34 分後	
格納容器漏洩率	最高使用圧力以下	設計値	
	最高使用圧力超過	設計値の 100 倍	
放出箇所		非常用ガス処理系	
格納容器ベント	実施有無	無し	
	開始時刻	-	
計算時間		炉心冷却機能喪失後 24 時間	

表 9 の解析条件および表 10 の解析結果に同じ

表 12 半径 10km 圏内からの避難指示時点における放射性物質放出量の推定解析結果 (単位: Bq)

	1号機	2号機	合計
希ガス等価	4.02E + 17	8.56E + 15	4.10E + 17
ヨウ素等価	1.39E + 15	2.82E + 11	1.39E + 15
I-131	9.83E + 14	1.97E + 11	9.83E + 14
Cs-137	7.36E + 13	1.32E + 10	7.36E + 13

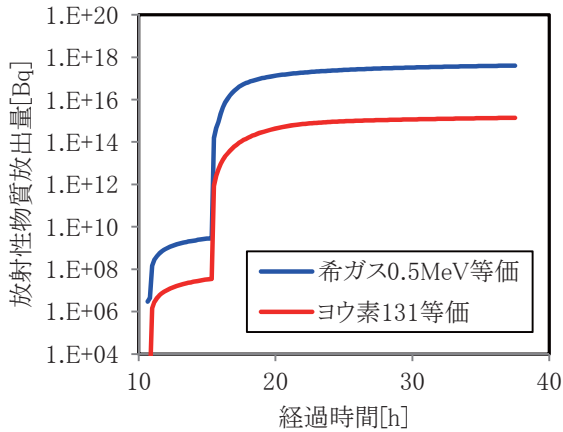


図 24 1号原子炉の放射性物質放出量（積算値）

分後に格納容器圧力が最高使用圧力を超過し、原子炉冷却材放射能の放出量が増加するが、その後13時間14分後に炉心冷却機能を喪失し、14.5時間後に炉心が損傷して、環境へ放出される放射性物質が大幅に増加した。なお、格納容器圧力の異常な上昇が認められた場合の格納容器最高使用圧力超過後の漏洩率は、原子力防災訓練時の漏洩想定に一般的に使われている値（設計値の100倍）⁽³⁹⁾を用いた。

4.3 半径 20km 圏内からの避難指示

半径 20km 圏内からの避難指示は、12日15時29分に敷地境界付近の放射線量が上昇して原災法15条事象の通報が行われるとともに15時36分に1号機原子炉建屋が水素の爆燃と考えられる爆発により損傷を受けた後、約3時間経過した時点の12日18時25分に発令された。R-Cubicでは1号機の格納容器から異常漏洩が発生したものと捉え、2号機の格納容器圧力の異常な上昇を受けて表13の条件で解析した。解析結果を表14に示す。1号機は格納容器ベントによって放射性物質が大量に放出され、希ガス0.5MeV等価換算値は1号機が 1.47×10^{18} Bq、2号機が 6.87×10^{17} Bq、合計 2.16×10^{18} Bqとなった。希ガスによる被ばくは一過性ではあるが、風向きによっては相当深刻な被ばくが生じる放出量である。ヨウ素131等価換算値は1号機が 4.44×10^{16} Bq、2号機が 2.32×10^{15} Bq、合計 4.67×10^{16} Bqとなった。これより推定された放出量は、気象条件に依存するものの、原子力防災指針のEPZの目安となる放出量を1桁上回っており、EPZを大きく超える領域まで防護措置が必要と考えられるものであった。1号機の放射性物質放出

表 13 半径 20km 圏内からの避難指示時点の解析条件

		1号機	2号機
運転期間		約7ヵ月	約4ヵ月
炉心冷却機能全喪失	喪失	13時間14分後	22時間14分後
	回復	見込まず	見込まず
圧力抑制プール		飽和状態	飽和状態
漏えい個所		ドライウエル	ドライウエル
格納容器圧力	観測時刻	-	22時間9分後
	観測値	-	110kPag
格納容器最高使用圧力超過時刻		10時間34分後	-
格納容器漏洩率	最高使用圧力以下	設計値	設計値
	最高使用圧力超過	設計値の100倍	設計値の100倍
放出箇所		非常用ガス処理系	非常用ガス処理系
格納容器ベント	実施有無	有り	無し
	開始時刻	19時間31分後	-
計算時間		炉心冷却機能喪失後24時間	炉心冷却機能喪失後24時間

表 14 半径 20km 圏内からの避難指示時点における放射性物質放出量の推定解析結果（単位：Bq）

	1号機	2号機	合計
希ガス等価	1.47E + 18	6.87E + 17	2.16E + 18
ヨウ素等価	4.44E + 16	2.32E + 15	4.67E + 16
I-131	3.07E + 16	1.63E + 15	3.23E + 16
Cs-137	2.20E + 15	1.06E + 14	2.31E + 15

量の時間変化を図25に示す。10時間34分後に格納容器圧力が最高使用圧力を超過し、原子炉冷却材放射能の放出量が増加するが、その後13時間14分後に炉心冷却機能を喪失し、14.5時間後に炉心が損傷して、環境へ放出される放射性物質が大幅に増加した。19時間31分後に格納容器ベントを実施したため、環境への放射性物質放出量はより一層増大した。2号機の放射性物質放出量の時間変化を図26に示す。22時間14分後に炉心冷却機能が喪失し、24.2時間後に炉心が損傷して環境へ放出される放射性物質が増加した。26.7時間後に格納容器圧力が最高使用圧力を超過し、環境への放射性物質放出量が大幅に増加した。

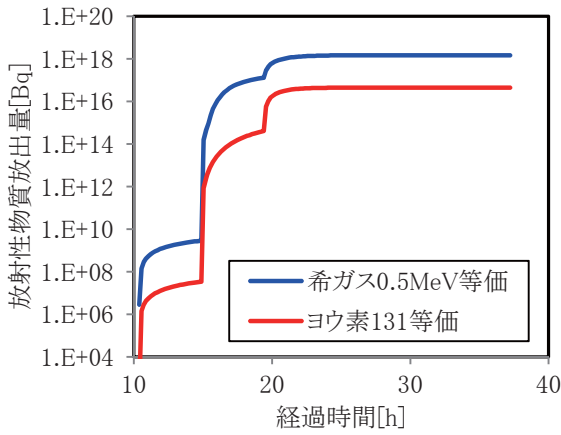


図 25 1号原子炉の放射性物質放出量（積算値）

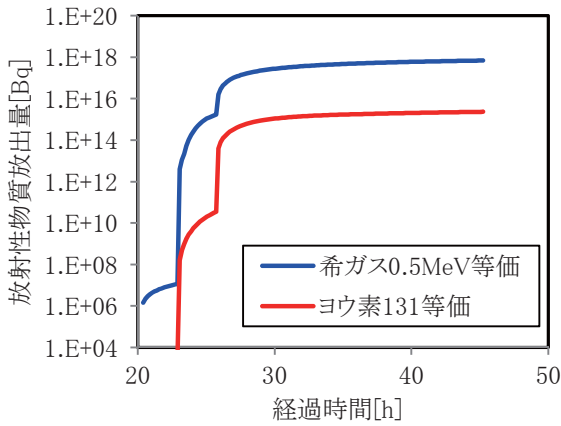


図 26 2号原子炉の放射性物質放出量（積算値）

4.4 半径 20～30km 圏内の屋内退避指示

半径 20～30km 圏内の屋内退避指示は、14 日 5 時 20 分に 3 号機格納容器ベントが開始され、11 時 1 分に 3 号機の原子炉建屋で水素の爆轟と考えられる爆発が発生、15 日 6 時 10 分頃に 2 号機圧力抑制室付近で異音が発生、4 号機原子炉建屋の壁に穴が開いていることが確認され、15 日 9 時 38 分には 4 号機原子炉建屋 4 階付近で火災を確認、10 時 22 分には 3 号機周辺で異常に高い放射線量を検知、10 時 30 分には 2 号機に対して早期の注水とドライウエルからのベント指示が出された後、約 30 分経過した時点の 15 日 11 時に発令された。R-Cubic では 1 号機の状況に大きな変化はなく、2 号機の格納容器から異常漏洩が発生したものと捉え、3 号機は格納容器ベントと原子炉建屋爆発による使用済燃料の損傷、4 号機も使用済燃料の損傷を考慮して、表 15～16 に示す条件で解析した。解

表 15 半径 20～30km 圏内の屋内退避指示時点の解析条件（原子炉事故）

		1号機	2号機	3号機
運転期間			約 4ヵ月	約 6ヵ月
炉心冷却機能全喪失	喪失		70 時間 39 分後	38 時間 24 分後
	回復		見込まず	注水停止時間 26 時間 20 分
圧力抑制プール			飽和状態	飽和状態
漏えい個所			ドライウエル	ドライウエル
格納容器圧力	観測時刻		-	33 時間 30 分後
	観測値		-	360kPag
格納容器最高使用圧力超過時刻			81 時間 16 分後*	-
格納容器漏洩率	最高使用圧力以下		設計値	設計値
	最高使用圧力超過		100%/日*	設計値の 100 倍
放出箇所			主排気筒	非常用ガス処理系
格納容器ベント	実施有無		無し	有り
	開始時刻		-	41 時間 55 分後
計算時間			炉心冷却機能喪失後 24 時間	炉心冷却機能喪失後 24 時間

*：格納容器内で異音が発生し破損と仮定

表 16 半径 20～30km 圏内の屋内退避指示時点の解析条件（使用済燃料貯蔵施設事故）

		3号機	4号機
直近冷却期間		268 日	105 日
燃料貯蔵体数		514 体	1331 体
内訳 (仮定)	直前取出	129 体	548 体
	2 回前	129 体	131 体
	3 回以上前	256 体	652 体
破損形態		水中での機械的破損	水中での機械的破損
破損割合		10%	1%
放出箇所		地上放出	地上放出
建屋換気率		100%/h	100%/日
計算時間		損傷後 24 時間	損傷後 24 時間

3. 4 号機ともに建屋爆発による瓦礫の落下を想定

析結果を表 17 に示す。1 号機原子炉からの放出量は計算条件に変更はなく 20km 圏内からの避難指示の場合と同一である。2 号機原子炉は、格納容器破損によって放射性物質が大量に放出され、希ガス 0.5MeV 等価換算値は 7.18×10^{17} Bq、ヨウ素 131 等価換算値は 2.44×10^{17} Bq となった。3 号機原子炉は、格納容器ベントにより希ガス 0.5MeV 等価換算値が $2.41 \times$

表 17 半径 20~30km 圏内の屋内退避指示時点における放射性物質放出量の推定解析結果 (単位: Bq)

		希ガス 等価	ヨウ素 等価	I-131	Cs-137
原子 炉	1号機	1.47E+18	4.44E+16	3.07E+16	2.20E+15
	2号機	7.18E+17	2.44E+17	1.78E+17	1.17E+16
	3号機	2.41E+18	9.95E+16	6.90E+16	4.88E+15
S F P	3号機	1.31E+11	2.64E+02	2.64E+02	7.86E+11
	4号機	2.24E+10	8.68E+07	8.68E+07	1.30E+11
	合計	4.60E+18	3.87E+17	2.78E+17	1.88E+16

SFP: 使用済燃料貯蔵施設

10¹⁸Bq, ヨウ素 131 等価換算値が 9.95 × 10¹⁶Bq となった。3号機使用済燃料貯蔵施設は、514体の燃料が貯蔵されており、建屋が水素爆轟と考えられる爆発により大破し、重量物を含む瓦礫が使用済燃料貯蔵施設に落下したと考えられることから、貯蔵燃料の10%が水中で破損したと仮定すると、希ガス 0.5MeV 等価換算値で 1.31 × 10¹¹Bq, ヨウ素 131 等価換算値で 2.62 × 10²Bq, 長半減期核種であるセシウム 137 は 7.86 × 10¹¹Bq であった。4号機使用済燃料貯蔵施設は、原子炉から取り出された比較的冷却期間が短い燃料 548 体を含む 1331 体の燃料が貯蔵されており、建屋の爆発と考えられる損傷により、瓦礫が使用済燃料貯蔵施設に落下したと考えられることから、貯蔵燃料の1%が水中で破損したと仮定すると、希ガス 0.5MeV 等価換算値が 2.24 × 10¹⁰Bq, ヨウ素 131 等価換算値が 8.68 × 10⁷Bq, セシウム 137 が 1.30 × 10¹¹Bq であった。なお、使用済燃料貯蔵施設のプール水位が低下して貯蔵燃料の露出が懸念されたが、保有水量と崩壊熱の関係から水位は十分に確保されていると考えられること、航空機により4号機プール水位が十分にあることが確認されていることから、解析条件に考慮しなかった。これらの原子炉および使用済燃料貯蔵施設からの放射性物質放出量の合計は、希ガス 0.5MeV 等価換算値で 4.60 × 10¹⁸Bq, ヨウ素 131 等価換算値で 3.87 × 10¹⁷Bq となった。これより推定された放出量は、EPZ の目安となる放出量を遙かに上回っており、EPZ を大きく超える広範囲の汚染が懸念されるレベルとなった。放射性物質の主たる放出原は1~3号機の原子炉であり、使用済燃料の損傷による寄与は無視できる程度と推定した。2号機原子炉の放射性物質放出量の時間変化を図 27 に示す。70 時間 39 分後に炉心冷却機能が喪失し、72.5 時間後に炉心損傷によって放出量が増大した。81 時間 16 分後に格納容器が破損して、放射性物質の大量放出となった。

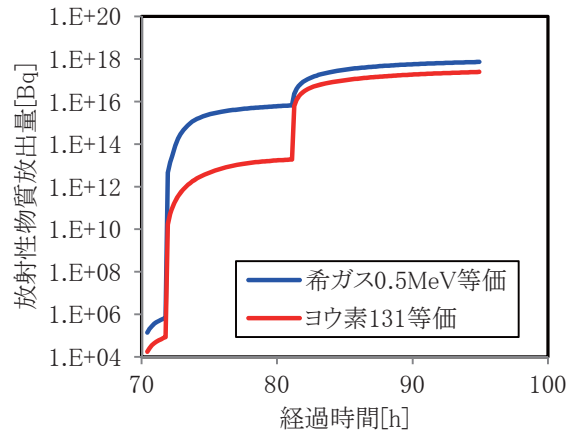


図 27 2号原子炉の放射性物質放出量 (積算値)

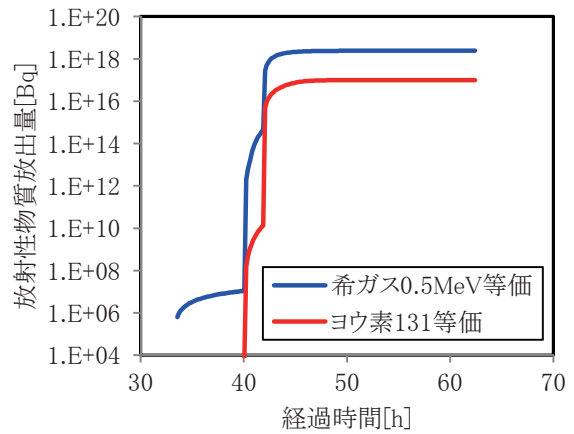


図 28 3号原子炉の放射性物質放出量 (積算値)

3号機原子炉の放射性物質放出量の時間変化を図 28 に示す。38 時間 24 分後に炉心冷却機能が喪失し、40.4 時間後に炉心損傷によって放出量が増大した。41.6 時間後に最高使用圧力を超過し、41 時間 55 分後に格納容器ベントを開始したため、放射性物質の大量放出となった。3号機および4号機の使用済燃料貯蔵施設の放射性物質放出量の時間変化を図 29~30 に示す。いずれも建屋損傷によって貯蔵燃料が損傷し、放射性物質が放出される結果となった。

4.5 段階的公衆防護措置の考察

国から出された4回の公衆防護措置に関する指示時点において、R-Cubicによる放射性物質放出量の推定を行った。希ガス 0.5MeV 等価とヨウ素 131 等価の放出量の推定結果を図 31 に示す。この図から事態の進展によって放射性物質放出量の予測値は順に大き

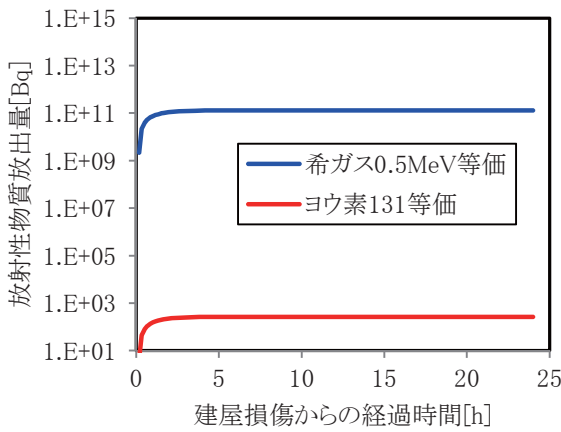


図 29 3号 SFP の放射性物質放出量 (積算値)

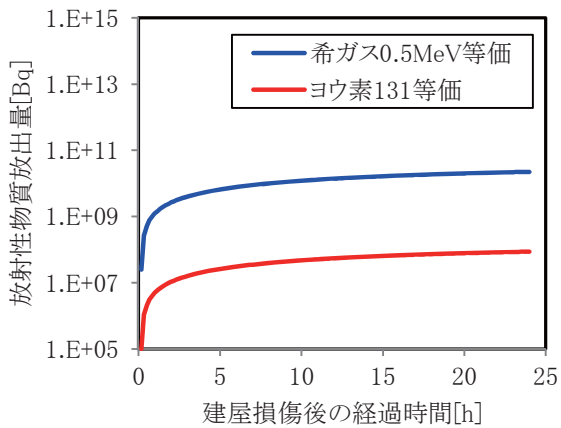


図 30 4号 SFP の放射性物質放出量 (積算値)

くになっており、段階的に公衆防護措置範囲を拡大する必要性を示している。原子力防災指針⁽³⁷⁾によれば、中高出力炉用の防護指標の下限値を与える放射性物質放出量は概ね希ガス 0.5MeV 等価換算値で 1×10^{16} Bq、ヨウ素 131 等価換算値で 1×10^{13} Bq である。また、EPZ で防護措置が必要となる放射性物質放出量の目安は、BWR で EPZ を 10km とすると希ガス 0.5MeV 等価換算値で 3.5×10^{17} Bq、ヨウ素 131 等価換算値で 2.5×10^{15} Bq となっている。これらの値から、4 回の公衆防護措置に関する指示時点において推定された放射性物質放出量は、公衆防護措置が敷地境界周辺で必要→EPZ 内で必要→EPZ を超過する範囲で必要→EPZ を大幅に超過した汚染の可能性の順となり、当時実施された段階的公衆防護措置と定性的に一致したものであった。但し、公衆防護措置範囲の適切さという観点では、当時の気象状況を勘案した大

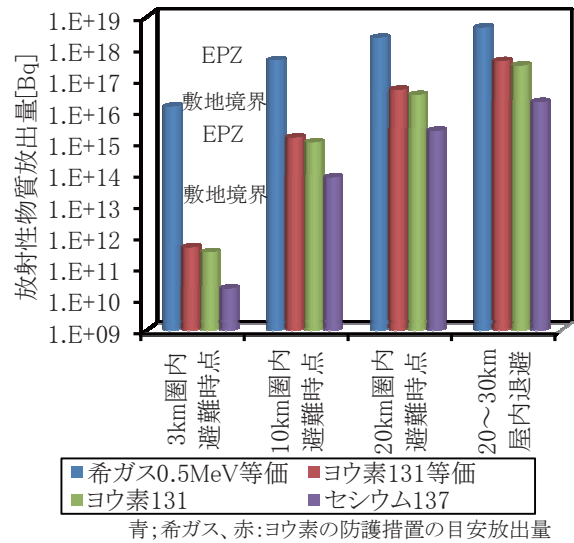


図 31 段階的公衆防護措置実施時点における推定結果

気拡散計算を行う必要があると考えられる。

5. 国および東京電力の発表した値との比較

ここまで、IPPS と R-Cubic の解析により、放射性物質放出量を推定してきた。一方、原子力安全委員会と原子力安全・保安院は平成 23 年 5 月に入ってから、ヨウ素 131 とセシウム 137 の環境へ放出された放射性物質の量の推定結果を発表^{(1) (18)~(23)}した。その後、見直しが行われ数値が若干変更されているが、オーダーは変わっていない。また、東京電力は、平成 24 年 5 月に同様の推定結果を発表⁽²⁴⁾した。ここでは、国や東京電力が発表した値と IPPS を用いて 1~3 号機原子炉が海水注入により安定するまでの間に、原子炉から環境へ放出された放射性物質の量を推定した結果、および R-Cubic を用いて半径 20~30km 圏内の屋内退避指示が出された時点における 1~3 号機原子炉と 3、4 号機使用済燃料から環境へ放出された放射性物質の量を推定した結果を比較した。

原子力安全委員会は、放射性物質による汚染状況を把握するために作成された地表濃度の測定結果と当時の気象条件を再現した緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム (SPEEDI)⁽⁴⁰⁾による大気拡散計算結果から放射性物質放出量を逆算した結果を公表した。5 月時点ではヨウ素 131 が 1.5×10^{17} Bq、セシウム 137 が 1.3×10^{16} Bq とされていたが、その後 8 月 22 日にヨウ素 131 が 1.3×10^{17} Bq、セシウム 137 が 1.1×10^{16} Bq に見直しされている。原子力安全・保

安院は、シビアアクシデント解析コード MELCOR⁽⁴¹⁾⁽⁴²⁾などを用いて放射性物質放出量を概算した結果を公表した。5月に公表されたIAEA向け報告書では、ヨウ素131が $1.3 \times 10^{17}\text{Bq}$ 、セシウム137が $6.0 \times 10^{15}\text{Bq}$ とされていたが、6月6日にヨウ素131が $1.6 \times 10^{17}\text{Bq}$ 、セシウム137が $1.5 \times 10^{16}\text{Bq}$ に、さらに平成24年3月28日にはヨウ素131が $1.5 \times 10^{17}\text{Bq}$ 、セシウム137が $8.2 \times 10^{15}\text{Bq}$ に見直しされている。東京電力は、平成24年5月24日に希ガス0.5MeV等価値が約 $5.00 \times 10^{17}\text{Bq}$ 、ヨウ素131が約 $5.00 \times 10^{17}\text{Bq}$ 、セシウム134が約 $1.0 \times 10^{16}\text{Bq}$ 、セシウム137が約 $1.0 \times 10^{16}\text{Bq}$ と発表した。本推定解析では、3章で述べたIPPSによる推定解析結果と4章で述べた20~30km圏内の屋内退避指示時点でのR-Cubicによる推定解析結果の2種類があり、それぞれの合計値を用いて比較した。比較結果を表18に示す。IPPSの推定結果は、ヨウ素131で $8.48 \times 10^{15}\text{Bq}$ 、セシウム137で $5.99 \times 10^{14}\text{Bq}$ となり、国が公表した値より1桁以上過少評価となった。IPPSによるシビアアクシデント解析は、原子炉への消防車による注水量を原子炉水位の計測値に見合うものと仮定したため、注水による放射性物質の除去効果を過大に見積もるとともに、炉心の熔融進展が途中で停止し、格納容器内に放出された放射性物質の量が少なくなったことによるものと考えられる。R-Cubicの推定結果は、ヨウ素131で $2.78 \times 10^{17}\text{Bq}$ 、セシウム137で $1.88 \times 10^{16}\text{Bq}$ となり、国が公表した値と概ね一致した。R-Cubicの推定では、原子炉への注水継続時間等の時間依存方程式に基づいており、1~3号機の炉心は大きく損傷して原子炉容器も破損し、原子炉容器水位の不確かさに影響を受けなかったためと考えられる。東京電力が公表した値は、希ガス0.5MeV等価

値が少なすぎ、逆にヨウ素やセシウムは多すぎるように見える。特に、希ガスは原子炉3基分がほぼ全量放出されたと見られるため、明らかに過少評価であると考えられる。

6. 結言

東京電力福島第一原子力発電所事故時において、事故当初数日間において、国等から公表された非常に限られた情報に基づき、当時の公衆防護措置の意思決定に必要な放射性物質の放出量を予測するため、当所で開発し保有している事象進展予測システム(IPPS)と公衆防護措置範囲迅速予測システム(R-Cubic)を用いて推定し、観測値との比較ならびに原子力安全委員会および原子力安全・保安院が発表した放射性物質放出量と比較した。

以下に得られた知見を示す。

- (1) IPPSによる3号機原子炉の解析では、高圧注水系(HPCI)の起動・停止は、定格駆動抽気量が炉心崩壊熱を上回っていたため、原子炉圧力が低下・上昇することから検知できた。その後に発表された、国や東京電力が発表した解析では地震でHPCIの損傷の可能性を指摘していたが、当時の本解析ではHPCIの損傷を想定しなくても観測パラメータと良く一致する結果が得られていた。
- (2) 国が実施した段階的公衆防護措置は、R-Cubicによる放射性物質放出量の段階的評価と定性的に一致した。本推定に用いた仮定は、これまでの原子力防災訓練などの状況を踏まえたものであるが、実用性があるものと考えられる。
- (3) IPPSによる予測は、観測されたパラメータと良く一致したが、原子炉への注水を原子炉水位の観測

表18 国および東京電力が発表した放射性物質放出量との比較(単位: Bq)

		希ガス 0.5MeV 等価	ヨウ素 131	セシウム 134	セシウム 137
本研究	IPPS 推定結果	1.27E + 18	8.48E + 15	7.08E + 14	5.99E + 14
	R-Cubic 推定結果	4.68E + 18	2.78E + 17	1.91E + 16	1.88E + 16
原子力安全委員会 公表値	H23.4.12 ⁽¹⁸⁾	-	1.50E + 17	-	1.20E + 16
	H23.5.12 ⁽¹⁹⁾	-	1.50E + 17	-	1.30E + 16
	H23.8.22 ⁽²⁰⁾	-	1.30E + 17	-	1.10E + 16
日本原子力研究開発機構推定値 ⁽²¹⁾		-	1.20E + 17	-	9.00E + 15
原子力安全・保安院 概算値	H23.4.12 ⁽²²⁾	-	1.30E + 17	-	6.10E + 15
	H23.6.6 ⁽¹⁾	-	1.60E + 17	1.80E + 16	1.50E + 16
	H24.3.28 ⁽²³⁾	-	1.50E + 17	-	8.20E + 15
東京電力推定値 ⁽²⁴⁾		5.00E + 17	5.00E + 17	1.00E + 17	1.00E + 17

値に合わせて解析すると、他の評価結果と比べて放射性物質放出量を過少評価した。

- (4) R-Cubic による予測は、原子力安全委員会および原子力安全・保安院が公表した放射性物質放出量と概ね一致した。よって、情報が限定された状況下における予測手法として R-Cubic が利用可能であると考えられる。
- (5) 東京電力が平成 24 年 5 月に発表した大気中に放出された放射性物質の放出量のうち、希ガス 0.5MeV 等価値は原子炉内蔵量のほぼ全量が放出されたことを考えると、過少評価していると考えられる。

参考文献

- (1) 原子力災害対策本部, 原子力安全に関する IAEA 閣僚会議に対する日本国政府の報告書 - 東京電力福島原子力発電所の事故について -, www.kantei.go.jp/jp/topics/2011/iaea_houkokusho.html, (2011).
- (2) 東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会, 中間報告, icanps.go.jp/post-1.html, (2011).
- (3) 日本再建イニシアティブ, 福島原発事故独立検証委員会調査・検証報告書, ディスカヴァー・トゥエンティワン, (2012).
- (4) 福島第一原子力発電所事故調査検討会, 東京電力(株)福島第一原子力発電所の事故の検討と対策の提言, www.gengikyo.jp/archive/pdf/F1_Jiko_Houkoku.pdf, (2011).
- (5) 東京電力株式会社, 福島第一原子力発電所東北地方太平洋沖地震に伴う原子炉施設への影響について, www.nisa.meti.go.jp/earthquake/houkoku6/230909_1F.pdf, (2011).
- (6) 東京電力株式会社, 福島原子力事故調査報告書(中間報告書), www.tepco.co.jp/cc/press/betu11_j/images/111202c.pdf, (2011).
- (7) 東京電力株式会社, 福島第一原子力発電所事故の初動対応について, www.tepco.co.jp/cc/press/11122211-j.html, (2011).
- (8) 東京電力株式会社, MAAP コードによる炉心・格納容器の状態の推定, www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/images/handouts_120312_02-j.pdf, (2012).
- (9) 吉田至孝, “原子力防災の研究課題と原子力安全システム研究所の取り組み”, 原子力 eye, 53 [7], pp. 48-51, (2007).
- (10) 吉田至孝, “原子力防災対応支援技術の開発”, 原子力 eye, 48 [7], pp. 54-58, (2002).
- (11) 吉田至孝, “原子力防災用公衆防護措置範囲迅速予測技術の開発 - (1) 放射性物質放出量の予測手法 -, ” 原子力学会 2007 秋の大会予稿集, F48, (2007).
- (12) 鈴木政時, “原子力防災用公衆防護措置範囲迅速予測技術の開発 - (2) 被ばく線量と防護措置範囲の予測手法 -, ” 原子力学会 2007 秋の大会予稿集, F49, (2007).
- (13) 吉田至孝, “原子力防災用公衆防護措置範囲迅速予測技術の開発 - (3) 放射性物質放出量の比較計算 -, ” 原子力学会 2008 春の年会予稿集, B30, (2008).
- (14) 鈴木政時, “原子力防災用公衆防護措置範囲迅速予測技術の開発 - (4) 予測線量の比較計算 -, ” 原子力学会 2008 春の年会予稿集, B31, (2008).
- (15) 吉田至孝, 鈴木政時, “原子力防災用公衆防護措置範囲迅速予測技術の開発 - (5) 格納容器を線源とする放射線影響の考慮 -, ” 原子力学会 2011 春の年会予稿集, H06, (2008).
- (16) 吉田至孝, “原子力防災用放出放射線量迅速予測技術の開発”, INSS ジャーナル Vol.14, pp. 346-360, (2007).
- (17) M. Suzuki, Y. Yoshida, “Development of a rapid prediction technology for emergency protection area at nuclear accidents”, HARMO12, Cavtat Hrvatska, Vol.43, pp.500-504, (2008).
- (18) 原子力安全委員会, 福島第一原子力発電所から大気中への放射性核種(ヨウ素 131, セシウム 137)の放出総量の推定的試算値について, www.nsc.go.jp/info/20110412.pdf, (2011).
- (19) 日本原子力研究開発機構, 福島第 1 原子力発電所事故に伴う ^{131}I と ^{137}Cs の大気放出量に関する試算, 第 31 回原子力安全委員会資料第 4-2 号, (2011).
- (20) 日本原子力研究開発機構, 福島第一原子力発電所事故に伴う ^{131}I と ^{137}Cs の大気放出量に関する試算(II) - 3月12日から15日までの放出率の再推定 -, 第 63 回原子力安全委員会資料第 5 号, (2011).
- (21) 茅野政道, “大気放出量推定”, 環境放出と拡散の再構築ワークショップ, 平成 24 年 3 月 6 日,

- 東京, (2012).
- (22) 原子力安全・保安院, 東北地方太平洋沖地震による福島第一原子力発電所の事故・トラブルに対する *INES* (国際原子力・放射線事象評価尺度) の適用について, <http://www.meti.go.jp/press/2011/04/20110412001/20110412001.html>, (2011).
- (23) 原子力安全・保安院, “別添資料 2 ii. 1~3 号機の事象進展に関する整理と考察”, 東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故の技術的知見について, <http://www.meti.go.jp/press/2011/03/20120328009/20120328009.html>, (2012).
- (24) 東京電力株式会社, 福島第一原子力発電所事故における放射性物質の大气中への放出量の推定について, http://www.tepco.co.jp/cc/press/2012/1204619_1834.html, (2012).
- (25) 東京電力株式会社, 東北地方太平洋沖地震発生当時の福島第一原子力発電所プラントデータ集, <http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/index10-j.html>, (2011).
- (26) S. B. Ludwig, A. G. Coff: *Revision to ORIGEN2 Version 2.2*, CCC-371/ORIGEN2.2, (2002).
- (27) 吉田至孝, 入江隆, 郡山民男, 工藤清一, 西村和哉, “シビアアクシデント時従業員被ばく線量評価手法の検討”, 日本原子力学会和文論文誌, 2[1], pp.85-95, (2002).
- (28) 恩田隆司, 吉田至孝, 工藤清一, 西村和哉, “シビアアクシデント時の発電所内線量評価手法の改良”, *INSS Journal*, Vol. 10, pp. 241-249, (2003).
- (29) 恩田隆司, 吉田至孝, 清水彰直, 坂本幸夫, “シビアアクシデント時原子力発電所内線量評価システムの改良 - IE 法によるビルドアップ係数の整備と QAD, G 33 両コードの深層透過問題への対応 -”, *INSS Journal*, Vol. 11, pp. 229-255, (2004).
- (30) 佐々木泰裕, 南則敏, 吉田至孝, “シビアアクシデント時原子力発電所内線量評価システムの改良 - 線量率換算係数の導入とアクセスルート編集機能の追加 -”, *INSS Journal*, Vol.13, pp. 296-302, (2006).
- (31) R. J. Hammersley, L. J. Godin-jacqmin, D. Leaver, J. Li, R. Sher: “Aerosol Deposition in Reactor Containments; A Comparison of Nauehygros and MAAP4”, *Trans. American Nucl. Soc.* 69, p. 524, (1993).
- (32) Y. M. Song: A Review of MAAP4 Code Structure and Core T/H Model, KAERI-TR-1003-98, Korea Atomic Energy Research Institute, (1998).
- (33) M. T. Leonard, S. G. Ashbaugh, R. K. Cole, K. D. Bergeron, K. Nagashima: A Direct Comparison of MERCOR 1.8.3 and MAAP4 Results for Several PWR&BWR Accident Sequences, SAND-96-2053-C, U. S. Dep. of Energy, (1996).
- (34) 原子力学会シビアアクシデント時の格納容器内の現実的ソースターム評価特別専門委員会, シビアアクシデント時の格納容器内の現実的ソースターム評価, 日本原子力学会, (2010).
- (35) N. Suzuki, K. Sugai, K. Hayashi, M. Suzuki, H. Suwa, Y. Kato, F. H. Liu, and S. Kodama, “Construction of System for Evaluation of Environmental Emergency Dose,” *International Radiation Protection Association 10*, May 2000, Hiroshima, (2001).
- (36) 原子力安全委員会, 「原子力施設等の防災対策について」の改訂について, 第 2 回原子力安全委員会資料第 1-1 号, (2007).
- (37) 原子力安全委員会, “原子力施設の防災対策について,” 原子力安全委員会安全審査指針集, 改訂 13 版, 大成出版, (2011).
- (38) 吉田至孝, “福島第一原子力発電所事故の推定解析” 原子力学会 2011 秋の大会予稿集, L12, (2011).
- (39) 建部恭成, 南則敏, 吉田至孝, “平成 21 年度福井県原子力防災総合訓練のプラント事象進展シナリオ解析”, *INSS Journal*, Vol.17, pp.308-316, (2010).
- (40) 永井晴康, 古野朗子, 寺田宏明, 梅山信昭, 山澤弘実, 茅野政道, *SPEEDI* による三宅島火山性ガスの大気拡散シミュレーション, JAERI-Research-2001-012, (2001).
- (41) R. O. Gauntt, R. K. Cole, et al., *MELCOR Computer Code Manuals*, NUREG/CR-6119, (2001).
- (42) 原子力安全基盤機構, 東京電力株式会社福島第一原子力発電所の事故に係る 1 号機, 2 号機及び 3 号機の炉心の状態に関する評価報告書,

JNES-RE-2011-0002, (2011).

補足：加圧水型軽水炉の相違点

東京電力福島第一原子力発電所は、フラスコ型格納容器を持つ沸騰水型軽水炉（BWR）であり、原子炉自動停止などの異常発生時には原子炉が格納容器内に隔離されて、炉心の崩壊熱は格納容器内に放出される設計となっている。このため、原子炉が自動停止すると原子炉内で発生した蒸気は格納容器内の圧力抑制プールに放出されて凝縮される。圧力抑制プールに蒸気を放出しつづけると水温が上昇して格納容器の圧力が上昇するため、残留熱除去系の熱交換器を通して海水に熱を放出する仕組みとなっている。すなわち、異常発生時には崩壊熱の逃がし場所として最終的に海水との熱交換機能が必須となっていたので、津波により海水系統が失われると、格納容器の圧力が上昇するため、放射性物質を含む蒸気を格納容器から放出（フェーズⅠの格納容器ベントと呼ばれる）して、炉心崩壊熱を継続的に除去する手段を取る必要があった。今回の事故では、1～3号機ともに炉心損傷前（フェーズⅠ）の格納容器ベントに失敗し、炉心損傷により放射性物質の大量放出を伴う炉心損傷後（フェーズⅡ）の格納容器ベントが試みられている。

一方、大型格納容器を持つ加圧水型軽水炉（PWR）では、原子炉自動停止などの異常発生時には、通常と同じく蒸気発生器を通して熱交換が行われ、放射性物質を含まない蒸気が大気中に放出される設計となっている。すなわち、異常発生時には崩壊熱の逃がし場所として最終的に大気への蒸気放出が行われるため、津波により海水系統が失われても蒸気駆動のポンプで蒸気発生器に給水を継続することにより、格納容器内に熱が閉じこもることなく、原子炉を安定に冷却することができる。ここで間違えやすい点として、BWRでは原子炉で蒸気を作るため、原子炉水位の低下に応じて水を補給する必要があり、東京電力福島第一原子力発電所1～3号機は最終的に海水注入を実施したが、PWRでは原子炉は水で満たされており、崩壊熱による冷却水の蒸発もないので、原子炉に直接水を補給する必要は無く、蒸気発生器の2次側に水（海水も可）を補給して原子炉を冷却することにより事態を収束できるということを認識しておく必要がある。PWRでは原子炉冷却材ポンプのシール部が熱的影響を受けて原子炉冷却水の漏れが発生することが考えられるが、そのような事態においても蒸気発生器

で原子炉を冷却・減圧して、シール部からの漏洩を最少に抑制するか、あるいは原子炉圧力を安全弁の吹き止まり圧力以下にして漏えいを停止させることにより安全性が確保できる。

次に、万一炉心が損傷した場合を考えると、フラスコ型格納容器を持つBWRでは格納容器内での原子炉容器の設置位置が高く、東京電力福島第一原子力発電所事故においても原子炉容器を水に浸すことが困難であった。このため、1号機では高温の溶融炉心から出る熱により格納容器内が高温となって配管貫通部などが熱的損傷を受けた可能性や、原子炉が高圧状態で破損して炉心溶融物が飛散し、格納容器壁を損傷させるなどの可能性が疑われる。PWRでは原子炉容器は格納容器下部にあり、格納容器自体が大きな空間を持っているため、原子炉本体を水没させることが可能で、炉心溶融物は冷却されやすい構造となっている。さらに、格納容器外部に消火水を用いたスプレー装置が設置されているものや、格納容器内部に大型の空調冷却器を備えているものがあり、これに通水して格納容器の冷却を行うなど、環境への放射性物質の放出を伴う格納容器ベントに頼らなくても放射性物質の閉じ込め機能維持に十分な手段が準備されている。

このようにBWRとPWRとでは設計が異なることから、東京電力福島第一原子力発電所の事故を受け、それぞれの特徴を踏まえた緊急安全対策が実施されている。