

# 福島第一原子力発電所事故の PSA の観点からの検討(再検討)

松岡 猛†

† 宇都宮大学地域連携教育センター 〒321-8505 宇都宮市峰町 350

E-mail: † mats@cc.utsunomiya-u.ac.jp

**あらまし** 平成 23 年 3 月 11 日に発生した福島原子力発電所事故を確率論的安全評価 (PSA) の観点から検討した。地震及び津波により原子力プラントの全電源が喪失し、その結果炉心溶融に至った事故であるが、以前事故発生直後にこの状況をイベント・ツリー手法で解析し、炉心損傷確率を算出し報告した。その後、新たに事故時の状況が種々明らかになったので、今回より現実的な条件を考慮し再評価を実施した。評価結果では 3 日後での炉心損傷確率は 2、3 号機で 0.13~0.25 と小さな値であったが、7 日後には全ての号機で 0.95 以上となった。この評価結果の意味するところを考慮し、福島第一原子力発電所の事故について検討する。

**キーワード** 福島第一原子力発電所事故、確率論的安全評価、全電源喪失、炉心損傷確率、人的要因

## A study of Fukushima nuclear power plant accidents by a viewpoint of PSA (Reconsideration)

Takeshi MATSUOKA†

† Center for Education and Research of Community Collaboration, Utsunomiya University,  
350 Minemachi, Utsunomiya City, Tochigi, 321-8505 Japan

E-mail: † mats@cc.utsunomiya-u.ac.jp

**Keywords** Fukushima nuclear power plant, PSA, Total loss of power, Reactor core damage probability, Human factors

### 1. はじめに

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東日本大地震とそれともなう津波により、東京電力福島第一原子力発電所の 1 号機~3 号機が炉心溶融を起こすという未曾有の事故が発生してしまった。

確率論的安全評価 (PSA: Probabilistic Safety Assessment) では、原子力プラント建設の前にプラント運転にともなうリスク評価 (炉心損傷頻度等) を実施することが可能である。その評価結果は、設計の改善、運転管理、万一の事故時の対応策、あるいはプラント建設決定にとって貴重な情報となる。米国では全ての原子力プラントを PSA 手法により評価・チェックすることが義務付けられている<sup>(1)</sup>。我が国では、アクシデントマネジメントの有効性検討や定期安全レビューにおける定量的な評価への適用が行われており、現在原子炉の立地審査に PSA を導入すべく検討が進められている<sup>(2)</sup>。

福島原子力発電所事故発生直後に、福島第一原子力プラントの炉心損傷確率をイベント・ツリーにより評価したが<sup>(3)</sup>、その後、新たに事故時の状況が種々明らかになってきたので、今回より現実的な条件を考慮し再解析を実施した。解析方法の技術的な内容については前報を参照して頂きたい。本報告では、新たに得ら

れた知見を紹介し、それらを盛り込んだイベント・ツリー解析について説明する。最後に評価結果の意味するところを考察し、福島第一原子力発電所の事故について検討する。

### 2. 事故時の状況

#### 2.1. 事故後に取られた対応

福島第一原子力発電所 1 号機~3 号機で地震発生直後から実際に行われた炉心冷却関係での対応操作は各種事故調査報告書での記載があるが、平成 23 年 5 月 16 日東京電力発表の資料<sup>(4)</sup>を基に概要をまとめると以下の様になっている。

地震直後には自動炉停止が速やかに行われ、外部電源喪失に対応すべく全ての非常用発電機が起動されており特に問題はなかった。

炉心冷却の対応では 1 号機の非常用復水器系 (IC) が自動的に起動された。2,3 号機には非常用復水器系ではなく RCIC が備えられており、RCIC を手動で起動した。ただし、起動までにはやや時間遅れがあり、それぞれ 16 分後、20 分後であった。

その後の 1 号機の推移は以下の様になっている。

自動起動していた IC の弁を 15:03 に手動で閉とし、その後津波が来る 15:35 まで弁の開閉を繰り返した。

津波による全電源喪失時フェイルセーフ機構により IC の弁が閉じられた状態に固定され、冷却不能となった。約 2 時間半後の 18:10 になり IC の弁が開かれたが、18:25 には再度弁が閉じられ 15 分間の冷却で終わっている。その後 21:30 になり IC による冷却が再開されたとされている。炉心溶融は 20 時頃発生と推定されている。翌日 12 日 01:48 に IC ポンプの故障が発生し冷却が停止。12 日 15:36 に水素爆発発生。

この時点で 1, 2 号機では非常用バッテリーが水没して HPCI の起動が不可能になっていた。

2 号機では、起動した RCIC を 26 分後の 15:28 に停止してしまった。津波来襲後いずれかの段階で RCIC を再起動し（翌日 12 日 02:55 に動作を確認）、さらにその後水源を圧力制御室へと変更した。途中の大事な時に中断があったが、冷却が長期間続けられ 14 日 13:25 に停止状態となったと推定されている。その後消火ポンプによる海水の炉心注水が 16:34 になり開始された。この間約 3 時間の注水中断があった。炉心溶融は 14 日午後 11 時頃、15 日 6:10 頃放射性物質の大量放出開始。

3 号機でも起動した RCIC を 15:25 に停止している。13 分の注水中断後の 15:38 に再度手動による起動がなされ、約 20 時間後の 12 日 11:36 に停止状態となった。その後 12:35 に HPCI が起動できた。この間注水中断時間は約 1 時間であった。HPCI による冷却が約 14 時間継続した翌 13 日 02:42 に手動停止を行い消火ポンプでの注水を試みるが減圧できず注水に失敗した。その後消火ポンプによる真水の炉心注水が 11:55 になり開始された。この間約 9 時間の冷却中断となった。14 日 11:01 水素爆発発生。14 日 22:00 炉心溶融発生。水素爆発の 1 時間前に炉心溶融が起こっていたとする説もある。

2, 3 号機とも冷却操作は比較的適切に実施されたが、途中何度か中断が挟まり、時にはその中断も長期にわたっていた。

## 2.2. 新たに判明した事実

日本学術会議総合工学委員会原子力事故対応分科会では、事故直後から福島事故の分析を実施し、直接東京電力からの聞き取り、専門家からの意見収集等を実施してきている。以下はその知見を参考にしている。

### 2.2.1 3号機HPCIの実効期間

全電源喪失後、各号機とも炉心冷却を何らかの形で実施してきたが、3 号機では翌日 12 日 11 時過ぎに RCIC が停止し、その後 HPCI を起動し冷却を継続したとされている。

東電からの聞き取り、公表データによると、HPCI 起動後 5 時間後には原子炉圧が低下し蒸気流量が少なくなりポンプ突出圧も低下し、冷却水の注入量はほぼ零

になっていた。HPCI は本来大流量での原子炉注水を目的としており、長期間の冷却維持にはテストラインを使用して注水量の大部分を戻すという流量調節の微妙な操作が要求される。今回の RCIC の代替としての長期冷却には不向きなシステムであったと言える。

### 2.2.2 消火ポンプによる炉心注水の有効性

2, 3 号機では非常用冷却系が停止した後、消火ポンプを接続し真水及び海水での炉心注水が実施された。しかし、これらが有効に機能していなかった事が NHK、法政大学宮野等により指摘された<sup>(5)</sup>。接続した注入系のラインが低圧復水ポンプ軸のシール部に繋がっており、ここを通して注入した冷却水が復水タンクに流れ込み、炉心へは到達していなかったということである。通常復水ポンプが回転しているときは回転力によるシール水の圧力で密封された状態となっているが、ポンプが停止した状態では漏洩経路となってしまう。

この様な漏洩経路が 1 号機では 10 カ所、2 号機、3 号機ではそれぞれ 4 カ所存在すると指摘された。

消火ポンプによる冷却が有効に機能するためには、これらの漏洩箇所を塞いでおく必要がある。

### 2.2.3 空気作動弁の動作条件

格納容器のベントを実施するためには配管途中の空気作動弁の開操作が必要となる。この開操作成功のためには蓄圧タンクの他に直流電源が必要となる。直流電源により電磁弁を開とし空気圧を空気弁まで導入する。さらに空気作動弁の開状態を維持するためには直流電源が維持され続ける必要がある。

### 2.2.4 1号機HPCIとICの優先順位

1 号機には炉心冷却手段として IC（非常用復水器系）と HPCI（高圧炉心注水系）が備えられていた。IC は 2 基備えられていたが、タンクの容量からそれぞれ 8 時間の冷却能力しかない。従って長期の冷却のためには IC を先に起動すると途中で HPCI の起動が必要となる。

1 号機では本来 HPCI が事故時に優先して起動するようになっていたが、稼働を続ける中で IC の起動設定圧力を変更し、HPCI に優先して起動するようになっていた。そのため実際の事故時には IC が自動的に起動した。

## 3. イベント・ツリー解析における条件

### 3.1. 主要解析条件

地震動では原子炉を構成する機器は損傷しないとした。地震動発生時原子炉は自動的に停止される。

外部電源喪失後 45 分で津波が襲来。この間、運転員は想定される津波被害に対して適切な対応を取る。

外部電源喪失直後から炉心は高圧注入系（IC、RCIC、HPCI 等）で 72 時間（3 日間）冷却する。

その後、消火ポンプを接続し外部タンクあるいは海

水からの炉心注水を 96 時間（4 日間）継続する。

7 日後までの間に外部電源の復旧を期待する。

72 時間後および 168 時間後での炉心損傷確率を評価する。

### 3.2. 詳細解析条件

直流電源は津波襲来後 3 号機のみで使用可能とする。1, 2 号機における直流電源の復旧率を 0.05/時間とする。従って 8 時間、36 時間、72 時間後における直流電源の復旧確率はそれぞれ 0.33、0.8、0.973 となる。

電動弁は直流電源が無い場合には開閉操作不可能。空気作動弁の開閉は直流電源と空気源を必要とする。

空気タンクは空気圧が無くなる前に取り替える。取り替えの成功確率を 0.973 と設定。

格納容器のベントは空気弁の開操作を必要とする。圧力容器逃がし弁の開には直流電源を必要とする。

HPCI の起動には直流電源を必要とする。配管途中の弁の開操作に油ポンプにより供給される作動油を必要とするため。このポンプの動作に直流電源が必要。

IC の弁は全電源停止後制御ボタンが“auto”に押されているとフェイルセーフ機構により全て閉じられてしまう。制御ボタンを“OPEN”に押ししておく状態が維持される。

HPCI と RCIC の弁は全電源喪失時“As is”の状態が保たれる。

スイッチボード (MCC) は被水後 2、3 時間で機能が回復するとした。

### 3.3. 炉心注水時の漏洩防止

消火ポンプによる炉心注水時に漏洩経路があることが NHK 及び宮野によって指摘されているが、この経路をすべて塞ぎ炉心注水を成功させる確率を以下の様に設定した。

炉心注水に先立ち、各漏洩経路を同定し、経路途中の弁を閉鎖する等の対策を取る必要がある。これは全電源喪失事故の様な緊急時にはかなり困難な作業となるが、1 経路当たりの成功確率を 0.5 とすると、各号機の漏洩防止成功確率は、それぞれ、

$$0.5^{10}=0.00098(1 \text{号機}), 10^4=0.063 (2, 3 \text{号機})$$

となる。

### 4. 故障率

前章の解析条件の他に、各機器のランダム故障を考慮してイベント・ツリー中のヘディングに現れる安全系の機能成功確率を評価した。

主要機器の故障率としては、原子力学会レベル 1 PSA 実施基準<sup>(6)</sup>に記載されている値を参考に以下の様に設定した。

非常用発電機：起動失敗  $1.1 \times 10^{-3}/D$

連続運転中の故障率  $2 \times 10^{-4}/\text{時間}$

電動駆動弁：開閉操作失敗  $3.6 \times 10^{-3}/D$

連続使用中の故障率  $2 \times 10^{-7}/\text{時間}$

ポンプ：起動失敗  $3.6 \times 10^{-3}/D$

連続運転中の故障率  $1.4 \times 10^{-4}/\text{時間}$

手動減圧失敗： $3.9 \times 10^{-2}/D$

### 5. 福島第一原子力発電所の全電源喪失時のイベント・ツリー

以上の条件を考慮して、全電源喪失後の対応可能な冷却系を考慮してイベント・ツリーを作成する。1 号機については図 1 の様になる。ここでは、IC2 系統、HPCI による冷却に引き続いて消火ポンプを接続し炉心を冷却するシーケンスを評価するようになっている。

全電源喪失時に IC による冷却が終了した後 HPCI を起動させるのが困難なことは前にも述べたが、炉心冷却を HPCI のみで実施する場合のイベント・ツリーは図 1 に比較してより単純化したものになる。

2 号機の場合は RCIC による炉心冷却が主となり、HPCI は代替手段となっている。3 号機のイベント・ツリーは 2 号機とほぼ同様であるが、直流電源が使用可能である分やや簡略化した構造となっている。

### 6. 評価結果

評価の結果、福島第一原子力発電所が外部電源喪失及び波高 15m の津波の来襲で全電源喪失の状態になった場合に 72 時間後（3 日後）における炉心損傷確率は 1、2、3 号機で 0.73、0.25、0.13 と得られた。

さらに消火ポンプによる炉心冷却を考慮した場合、168 時間後（7 日後）における炉心損傷確率はそれぞれ 0.9998、0.963、0.957 となった。（図 2）

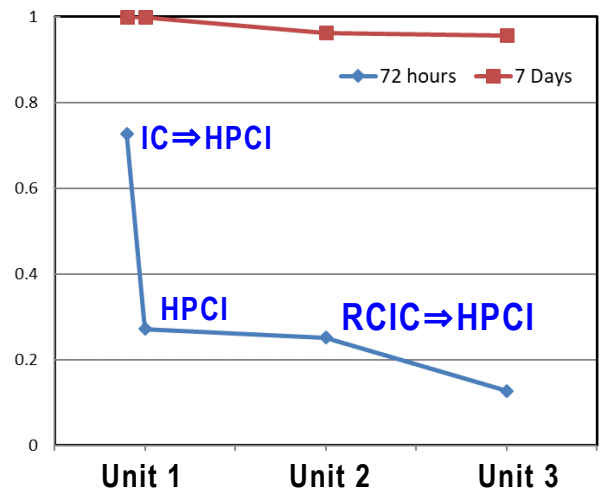


図 2 炉心損傷確率の評価結果

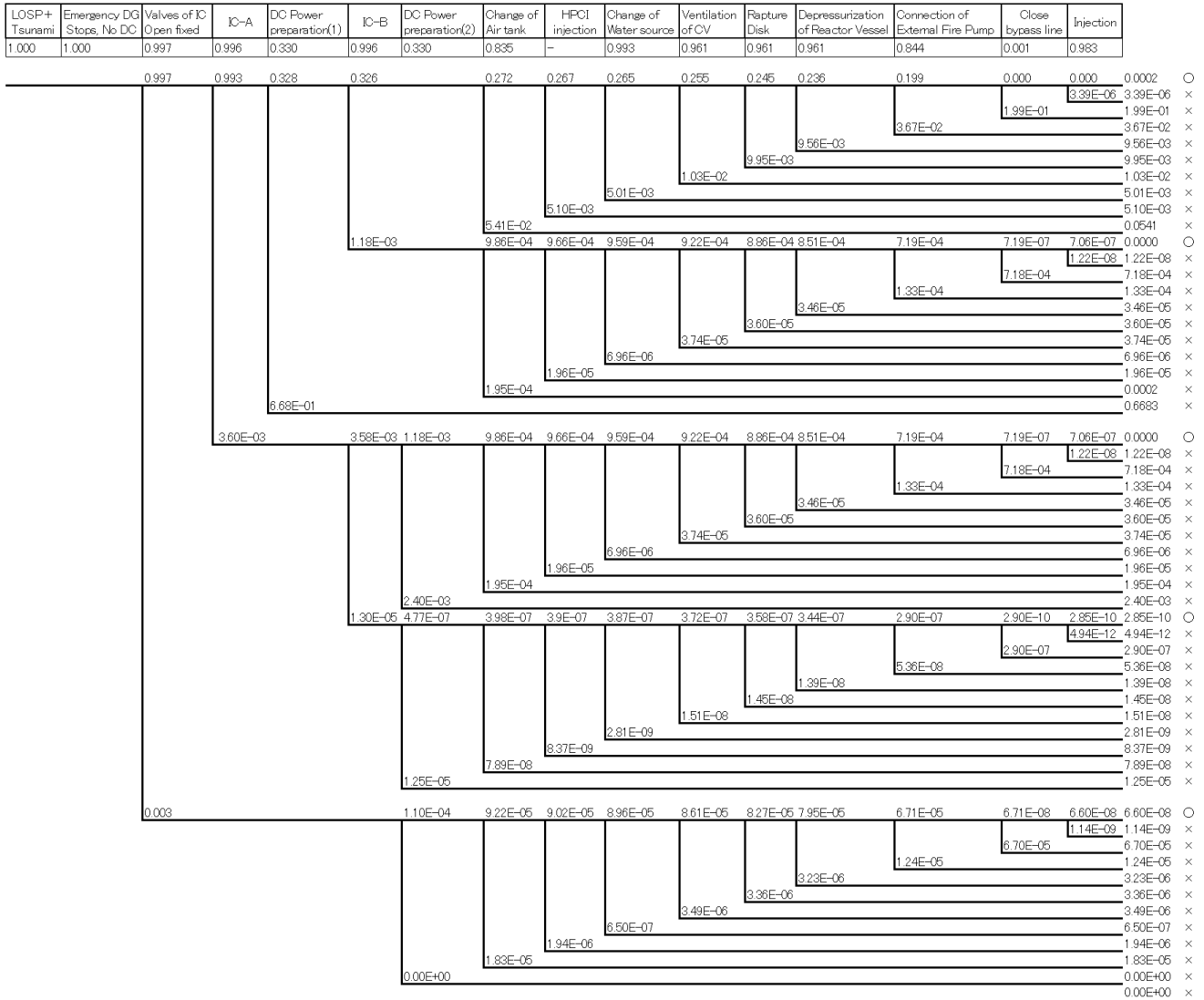


図1 福島第一原子力発電所1号機における全電源喪失時のイベント・ツリー

## 7. 考察

ICの運転継続時間から考えて本事故時に1号機でICを使用したのは間違いといえる。HPCIを選択していれば1号機の炉心損傷確率は2,3号機と同等となっていた。

1号機が5時間以内に炉心溶融に至ったのはたまたまではなくICを起動させたためほぼ必然であった。2,3号機の炉心溶融はほぼ3日後に発生しているが、この事は本解析結果と附合している。

消火ポンプによる外部水源の炉心への注水は、漏洩経路が多数存在するため殆ど期待できないことが判明した。

本解析では7日後にはすべての号機で炉心溶融に至っている。現実には1,2,3号機で炉心溶融が発生してしまった状況を示していると考えられる。

もし、1号機の炉心冷却をHPCIで行っていれば、3日間は炉心溶融も水素爆発も発生しなかったはずであ

る。それ故、2日目には2号機での電源供給が完了し、いずれの号機においても炉心溶融は防げたはずである。

福島第一原発の事故の様相は大幅に異なっていたであろう。

## 文 献

- [1] U.S. NRC, "Individual Plant Examination Program: Perspectives on Reactor Safety and Plant Performance, Summary Report", NUREG-1560, Vol.1, 1997.
- [2] 原子力安全・保安院, 原子力安全規制への『リスク情報』活用の基本的考え方, 平成17年5月31日.
- [3] 松岡猛, 福島第一原子力発電所事故のPSAの観点からの検討, 信学技報, Vol.111, No.143, 2011.
- [4] 東京電力公表資料, 平成23年5月16日 (<http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/index10-j.html>).
- [5] NHKスペシャル『メルトダウン』取材班, 福島第一原発1号機冷却「失敗の本質」、講談社現代新書2443、2017.
- [6] 日本原子力学会, 原子力発電所の地震を起因とした確率論的安全評価実施基準: 2007(AESJ-SC-P006:2007), 平成19年.