

<b>Title</b>	福島原子力発電所の事故における「想定外」について
<b>Author(s)</b>	標, 宣男
<b>Citation</b>	聖学院大学論叢, 24(2), 2012. 3 : 121-134
<b>URL</b>	<a href="http://serve.seigakuin-univ.ac.jp/reps/modules/xoonips/detail.php?item_id=3678">http://serve.seigakuin-univ.ac.jp/reps/modules/xoonips/detail.php?item_id=3678</a>
<b>Rights</b>	



聖学院学術情報発信システム : SERVE

SEigakuin Repository and academic archiVE

〈原著論文〉

## 福島原子力発電所の事故における「想定外」について

標 宣 男

The Meaning of “Beyond the Scope of the Accident Scenario” in the Fukushima  
Nuclear Power Plant Accident

Nobuo SHIMEGI

A strong earthquake with a magnitude of 9.0 occurred offshore of the Tohoku area in March 2011. This earthquake was accompanied by a big tsunami with a height of 15 meters on the shore of Fukushima Prefecture. The earthquake and tsunami damaged the site of nuclear power plants, called “*Fukushima dai-itchi hatsudensho*” in Japanese, and damaged the safety systems of four plants. The most serious damage was the loss of all electric power supply systems, that is, the external power supply system (caused by the earthquake) and the emergency power supply system (caused by the tsunami). Due to this electric power loss, the core cooling ability was also lost, which led to a severe accident with a core meltdown, a hydrogen explosion and wide radioactive contamination in the environment by a large amount of released radioactive material. This paper discusses the causes of the accident from the standpoint of safety theory and risk evaluation through the meaning of “Beyond the scope of the accident scenario,” or “*souteigai*” in Japanese.

---

**Key words;** ‘*Fukushima dai-itchi hatsudensho*, earthquake, tsunami, loss of all electric power supply systems, safety theory, risk evaluation, severe accident

**Key words;** 福島第一発原子力発電所, 地震, 津波, 全電源喪失, 想定外, リスク評価, 安全の論理, シビアアクシデント

### 1. はじめに

東日本大震災は、よもやと思われた世界で3回目の原子力発電所の炉心溶融に至る過酷事故（通常シビアアクシデントと言う）を引き起こした。東京電力の福島第一発電所は、1号機から6号機までの6機の発電所からなるが、このうち1~4号機までがこの事故により損害を受けた。多量の

放射性物質の放出により、福島を中心とする広い範囲に放射能汚染が引き起こされ、震災復興に多大の不安の影を落としている。

商業用発電を目的とする原子炉で、シビアアクシデントが歴史上初めて起こったのは、アメリカのペンシルバニア州にあるスリーマイルアイランド原子力発電所のPWR2号機（TMI2）であり、1979年3月28日のことであった。事故の発端は、蒸気発生器への給水ポンプの停止である。その後、原子炉停止、タービントリップ、炉内の冷却不足を補う非常冷却系の作動と安全装置は予想通りに作動したかにみえた。しかしこの間炉内の圧力高を緩和する為開いた加圧器逃がし弁が開いたままになっており、かつそれに気がつかなかった運転員が、炉心の水位計の水位を見誤り炉心への注水をストップしたため、炉心の冷却が不足し炉心溶融を引き起こした。この事故は水位計の信頼度不足と運転員の判断ミスが引き起こしたものであった。つぎに、シビアアクシデントが起こったのは、旧ソ連邦のウクライナ州キエフ近郊にあるチェルノブイリ原子力発電所の4号機で、1986年4月26日のことであった。この発電所は黒鉛減速水冷却というソ連特有なもので、低出力運転時に不安定になると言われていた。事故は、低出力における実験中に起こったが、実験を開始するまで原子炉が十分不安定になっていることに運転員は気がつかず、かつ原子炉自動停止系を不作動にしてあった（規則違反）ことから、実験中生じたボイド（蒸気）のため急激に出力が上昇し、原子炉の爆発（核暴発）に至ったものである。原子炉の安全性能の不足という特性と、運転員の規則違反・判断ミスが重なったもので、格納容器がなかったことも放射能の周囲への放出を多くしたといわれている。

これら二つの事故と、今回の福島事故を比較した場合、TMI2では炉心溶融は起こったものの、放射能漏れは極わずかであり、それによる被害はなかったと考えて良い。しかし、チェルノブイリの場合、消火に当たった消防士などが多量の放射線を浴び、203人が急性放射線障害と診断されたが、約一年後1987年7月で、火災で死亡したもの行方不明になったもの一人を含め、死者は31人であった。周囲への放射能放出は、核暴発であったこともあって多量に上り、健康に影響が大きいとされるI-131、およびCs-137の量にしてそれぞれ、 $1.8 \times 10^{18}$  Bq、および $8.5 \times 10^{16}$  Bqであった。これら周辺住民への長期的健康影響は、甲状腺がん以外は科学的にはっきりしていないが多く健康不安をソ連内にうみだした。福島事故の場合は、原子炉は停止したものの全電源の喪失、冷却能力の喪失による炉心の溶融、さらに決定的な水素爆発による格納容器の破壊などにより、炉内の放射性物質の多量放出が続いた。ただし、その量は2011年4月12日の原子力安全委員会の報告によると、I-131、およびCs-137の量にしてそれぞれ、 $1.5 \times 10^{17}$  Bq、および $1.2 \times 10^{15}$  Bqとチェルノブイリの場合の十分の一程度であった。又、晩発性障害への広範囲な不安はあるものの、事故による直接の犠牲者は出なかった。

このような福島原発事故に対し、いわゆる深層防護も機能せず、炉内への影響も破壊的であり、炉心の溶融や水素爆発などによる外部への放射能の漏洩の多さを考え、IAEAは、この事故を暫定

的に「国際原子力事象評価尺度 (INES)」<sup>(1)</sup> で最も高い評価レベル7に分類している。これはチェルノブイリの場合と同じ評価である。

それでは、福島原発事故の原因は過去の二つの事故と比べどこが異っていたのであろうか。はっきりしているのは、前者二つが、装置と人間との狭間で起きたのに対し、福島のそれは、自然現象に端を発していることである。本論文では、日本のエネルギー事情のみならず、世界的にも影響を及ぼしたこの福島原発事故の原因を、事故直後しばしば耳にした「想定外」という言葉が原子力発電所施設の安全設計上どのように位置づけられているのか検討しつつ考えてみようと思う。

## 2. 事故の経緯と「想定外」の問題

### 2.1 福島原発事故の経緯

以下この事故の経緯について、日本政府がIAEAに提出した報告書<sup>(2)</sup>に基づき、その概要を述べる。

(1) 東日本の太平洋岸地帯は、2011年3月11日14時46分に発生した東北地方太平洋沖地震に襲われた。この地震は、日本海溝沿いに太平洋プレートが北アメリカプレートの下に沈み込む領域で発生した我が国観測史上最大のマグニチュード9.0の地震であった。震源は北緯38.1度、東経142.9度、深さ23.7kmであった。3月11日の地震発生前の福島第一原子力発電所の運転状況は、1号機は定格電気出力運転、2号機と3号機は定格熱出力の運転中であり、4号機、5号機及び6号機は定期検査中であった。このうち、4号機については大規模修繕工事を実施中であり、原子炉圧力容器の中にあった核燃料は全て使用済燃料プールに移送されていた状態であった。また、共用の使用済燃料プールには6,375体の使用済燃料を貯蔵中であった。

福島第一原子力発電所において、原子炉建屋基礎盤上で観測された地震動の加速度応答スペクトルが、一部の周期帯で設計の基準地震動の加速度応答スペクトルを超えた。地震当日の福島第一原子力発電所において、合計6回線の外部電源が接続されていたが、地震による遮断器等の損傷や送電鉄塔の倒壊によって、これら6回線による受電が全て停止した。

津波の襲来については、最初の大きな波は3月11日の15時27分頃(地震発生後41分後)に、次に大きな波は15時35分に到達した。福島第一原子力発電所において、設置許可上の設計津波高さが3.1mとされていた。また「原子力発電所の津波評価技術」(土木学会)に基づく評価(2002年)では最高水位が5.7mとされ、これに対して東京電力は6号機の海水ポンプの取付け高さのかさ上げを行っていた。しかし、今回の津波の浸水高は14~15mに達し、全号機の補機冷却用海水ポンプ施設が冠水して機能を停止したほか、6号機を除き原子炉建屋やタービン建屋の地下階に設置されていた非常用ディーゼル発電機及び配電盤が冠水して機能を停止した。

福島第一原子力発電所の1号機から3号機は運転中であったが、同日の14時46分に地震の発生

を受けて制御棒が自動的に入り、運転を停止した。同時に地震によって計6回線の全ての外部電源が失われたため、非常用ディーゼル発電機が起動した。しかし、襲来した津波の影響を受けて冷却用海水ポンプ、非常用ディーゼル発電機や配電盤が冠水したため、6号機の1台を除く全ての非常用ディーゼル発電機が停止した。このため、6号機を除いて全交流電源喪失の状態となった。6号機では、非常用ディーゼル発電機1台（空冷式）と配電盤が冠水を免れ、運転を継続した。また、津波による補機冷却用海水ポンプ（以下海水ポンプ）の冠水のため、原子炉内部の残留熱を海水へ逃すための残留熱除去系や多数の機器の熱を海水に逃すための補機冷却系が機能を失った。事故が、シビアアクシデントへと進展した最大の理由は、海水ポンプの機能停止と全電源の喪失にある。

東京電力の運転員は同社の過酷事故手順書に従い、自動起動した炉心冷却設備や炉心への注水設備の継続運転中に、多数の原子炉安全系の機器を回復するために、政府とも協力しつつ緊急に電源を確保する試みを行ったが、結局、電源を確保することはできなかった。1号機から3号機では、交流電源を用いる炉心冷却機能が失われたため、交流電源を用いない炉心冷却機能の作動がなされたか、又はその作動が試みられた。それらは、1号機の非常用復水器（アイソレーション・コンデンサ）の作動、2号機の原子炉隔離時冷却系（RCIC）の作動と3号機の原子炉隔離時冷却系と高圧注水系（HPCI）の作動である。その後、これらの交流電源を用いない炉心冷却機能も停止し、消防ポンプを用いた消火系ラインによる淡水又は海水の代替注水に切り替えられた。

福島第一原子力発電所の1号機から3号機について、それぞれ原子炉压力容器への注水ができない事態が一定時間継続したため、各号機の炉心の核燃料は水で覆われずに露出し、炉心溶融に至った。溶融した燃料の一部は原子炉压力容器の下部に溜まった。燃料棒被覆管等のジルコニウムと水蒸気との化学反応により大量の水素が発生するとともに、燃料棒被覆管が損傷し、燃料棒内にあった放射性物質が原子炉压力容器内に放出された。そして、原子炉压力容器の減圧の過程でこれらの水素や放射性物質は格納容器内に放出された。注入された水は原子炉压力容器内で核燃料から気化熱を奪い水蒸気になるが、こうして炉心冷却機能が失われた原子炉压力容器では内圧が上昇し、この水蒸気が格納容器内に安全弁を通して漏出していった。このため、徐々に格納容器の内圧が上昇したので、1号機から3号機では格納容器が圧力により破損することを防ぐため、格納容器内部の気体をサブプレッションチェンバーの気相部から排気筒を通じ大気中に逃す操作である格納容器ウェットウェルベントが数回行われた。

1号機と3号機では、格納容器ウェットウェルベント後に、格納容器から漏えいした水素が原因と思われる爆発が原子炉建屋上部で発生し、それぞれの原子炉建屋のオペレーションフロアが破壊された。これらによって環境に大量の放射性物質が放散された。なお、3号機の建屋の破壊に続いて、定期検査のために炉心燃料がすべて使用済燃料プールに移動されていた4号機においても原子炉建屋で水素が原因とみられる爆発があり、原子炉建屋の上部が破壊された。この間、2号機では格納容器のサブプレッションチェンバー室付近と推定される場所で水素爆発が発生し破損が生じたと

みられる。

## (2) 「想定外」について

前記の IAEA への政府報告書の中には事故を拡大した要因として、「このように、大規模な津波の襲来に対する想定と対応が十分なされていなかった。」という記述が見られる。さらに、事故関係者が今回のことは「想定外」であったとしばしば発言したことから、この言葉に対し「想定外を言い訳にするな」という意味の激しい非難が新聞紙上でも繰り返された<sup>(3)</sup>。しかし、言い訳かどうかはともかくとして「想定外」とは正確には何を意味するのであろうか。

木下は「リスク学から見た福島原発事故」<sup>(4)</sup> のなかで、「想定外」の意味を次のように整理分類している。

- (i) 発生確率が極めて低いので想定からはずしたという意味での想定外
- (ii) 発生の確率のあることを主張する者はいたが、それは少数者で、学問分野全体としての見解は低確率であったために想定外とされたもの
- (iii) 発生の確率がある程度示されているのに、それを主観的に低いと見積もって想定から外したという意味で想定外（たとえば過信ないし慢心から。また過酷な現実を目を向けたくなくて、問題を意識の外に追いやってしまうなど。これらは技術者の倫理の問題である）
- (iv) 発生の確率が存在することは理解するが、外部的要因とのトレードオフの結果、想定外としたもの（例えばコストがかかり過ぎるとか、政治的配慮とか）
- (v) 発生の確率があるにもかかわらず、想像力や情報の不足で、思いがそこに至らず、結果的に想定外になってしまったもの（無知ないし勉強不測の罪、またイマジネーション能力の不足）

さらに、木下は「上述した、5種類の想定外のうち、最初に掲げた想定外が本来の想定外であって、……ことに3番目と5番目は、いずれもあってはならない想定外であり、……リスク学的に見て特に気になるのは、4番目の想定外、すなわちコスト面への配慮から想定外としたというケースである。……問題はリスクとコストのトレードオフが、どのような基準、ないし価値観で評価されるのかである。」と指摘する。

これらのどの想定外に今回の事故は当たるのであろうか。多かれ少なかれ、これらすべてが関係しているように見えるが、以下では原子力発電所の安全設計のなかで、「想定」あるいは「想定外」が何を意味するのか詳しく検討し事故拡大の要因を探ってみよう。

## 3. 原子力安全の論理と「想定」

### 3.1 原子力安全性の考え方—DBE—

日本に限っていえば原子力発電所の安全性について最もよく纏められているのは、佐藤一男の『原

子力安全の論理』<sup>6)</sup>であろう。佐藤は、この著書の中で、「原子炉の場合には、平常時と事故時の差が極めて大きいので、我々の思考の演繹の度合いも又大きいものとならざるを得ない。このような演繹を正しく行って、誤りのない結論に到達するためには、事故を支配している自然法則について十分な理解がなければならないが、同時に、思考の展開が誤りなく出来ることを保障するための、確固たる論理と方法、あえて言えば『哲学』が必要になる。これが……『安全の論理』に他ならない。』<sup>6)</sup>という。また、佐藤は「事故というものは、それが現実が発生するときは常に『不測の事故』である。」といい、さらに、「事故が不測のものであるからこそ、我々の事故対策は、より一般的なものに基づいた、有効範囲の広い柔軟なものでなければならない。このような対策を、設計の立場から体系的に準備する方法は、多分いくつも考え出すことが出来る。その一つとして軽水炉をはじめ他の炉型においても、広く採用されているのが、DBE (Design Basis Event: 設計基準事象) というかんがえである。』<sup>7)</sup>としている。

DBEとして考えられた事故は、その発端となる事象(起因事象)を含め、事故のシーケンスも決して現実にかかる可能性があるものとは限らない。時としてそれは、物理的にはほとんどありえないような仮定を含んでいることもある<sup>8)</sup>。しかし重要な点は、このDBEによって、現実にかき起る可能性がある多様な事故群、あるいは事故シーケンス群がカバーされ、「包絡」されていることである。すなわち、「DBEに基づいて安全設計を行った結果立てられた設計上の対策により、このDBEで代表される現実の事故シーケンス群による影響が、あらかじめ決められた範囲に収まらなければならない。言い換えると、その影響が、ある許された範囲に留まるように、事故の進展を食い止めなければならない。』<sup>9)</sup>ということである。このことは、「DBEによって包絡される範囲というのは、とりもなおさず設計上の対策によって安全を確保すべき範囲、すなわち設計の責任範囲である。』<sup>10)</sup>ということを意味する。以上まとめると、DBEは多様な事象を包絡するものではあるが、あらゆる事象を包絡するものではない。すなわち設計には、安全を保障する責任範囲があり、その責任範囲を確認するのがDBEである、ということとなる。

### 3.2 設計の範囲を超える事故

それでは、DBEを超える事故に対してはどのように考えられているのであろうか。これについて、佐藤は次のように言う。

「……一つの起因事象からでも、それから発生する事故シーケンスは無限にある……無限にある事故シーケンスの中には、DBEによって包絡されないもの、つまり設計の範囲を超えては急拡大するものも含まれているのは、当たり前なことなのである。……このような事故シーケンスが、設計の責任でなくてもよいという理由は、何よりもこれらの事故シーケンスの蓋然性あるいは発生確率が十分低いということであろう。確率が低くなるのは、大まかに言って二つの場合がある。一つは、自然法則上、そのようなシーケンスはもともと起こりにくいという場合である。もう一

つは、人為的な対策によって、その設計の範疇を超える事故シーケンスの発生を極力防止できた場合である。この場合というのは、とりもなおさず、DBEに基づいて立てられた安全対策が有効なものであり、十分な信頼性が確保され維持されている場合だということである。<sup>(11)</sup>

ここで述べたように、DBEが有効であるためには、この人為的対策が信頼性を持っていることが前提となる。この信頼性の下に、DBEで包絡される事象群に対し設計が責任を持つといえる。この人為的対策の信頼性を保障するものが、深層防護<sup>(12)</sup>という設計思想であり深層防護を構成する対策の信頼性である。

それでは、DBAを越える事故（すなわち設計を超える事故）とはどのような事故を意味しているのであろうか。これについて、佐藤は次のように言う。

「『設計を超える事故』というのは、設計者が想定していなかった事象（たとえば設計で想定した以上の多数の故障）が発生して、このため、事故シーケンスが設計で考えたものと異なるものとなり、設計上予想された以上の影響を生ずる事故のことである。」

この設計上予想された以上（想定していなかった、すなわち「想定外」）の影響を生ずる事故のうち代表的なものは、シビアアクシデントと言われる事故であるが、このシビアアクシデントについて、佐藤は原子炉安全基準部会・共通問題懇談会（当時）が、1990年に提出した報告書中にある次のような定義を引用している。

「シビアアクシデントとは、設計基準事象（厳密に言えば『DBEで包絡される事象群』である：筆者注）を大幅に超える事象であって、安全設計の評価上想定された手段では、適切な炉心の冷却または反応度の制御が出来ない状態であり、その結果、炉心の重大な損傷にいたる事象を言う。シビアアクシデントの重大さは、この損傷の程度や格納施設の健全性の喪失の程度による。」<sup>(13)</sup>

ここで明らかなことは、シビアアクシデントとは、設計の範囲を大幅に超え炉心を含む格納施設の損傷にいたるものであるということである。それが起こる確率は非常に小さい、と言うよりも非常に小さくなるように、多重故障の確率を小さくするなど、安全設計の信頼性を高めねばならない。すなわち、原子炉の安全設計における「想定外」の事象とは、元来機器の信頼性の向上などにより、そのことの起こる確率が十分小さいと考えられる故に想定することをしなくても良いとされた事象のことである。

なお、シビアアクシデントに至らないが、設計基準事象を逸脱はしている境界近傍の事象についてはどのように対処するのであろうか。佐藤は、このシビアアクシデントにいたる前に、「設計の範囲とシビアアクシデントの間には、そのどちらにも属さないグレイゾーンが存在する」<sup>(14)</sup>という。この範囲は、厳密に言えば、設計の責任範囲ではない。一方、工学的な施設において、企画や基準ぎりぎりに設計することは無いのが普通であり、必ず余裕（安全余裕）を持った設計をすることが普通である。DBEを逸脱したグレイゾーンの事象はこの設計の余裕により対処できる範囲である。



しかし佐藤は、この設計の余裕について次の重要な指摘をしている。

「余裕はあくまで余裕として確保しておかねばならない。……工学という常に現実に直面している学問が持っているいわば『理中の理』というべきものであって、この『理中の理』が、実は工学の産物を私達が安心して利用できる基礎となっている。」<sup>(15)</sup>

### 3.3 リスク評価における「想定外」

先に示したように、佐藤によれば、『設計を越える事故』というのは、設計者が想定していなかった事象が発生して、このため、事故シーケンスが設計で考えたものと異なるものとなり、設計上予想された以上の影響を生ずる事故のことである。さらに、佐藤は設計範囲を超える要因を次のように言う。「事故が設計の範囲を超えて拡大する要因として、まず考えられるのは、人間の誤った行動などであって、これを総称して『人的因子』と呼んでいる。……第二に考えられるのは、ある起因に対処して、これから派生する事故シーケンスを、設計の範囲に食い止める役目をする幾つかの系統に、設計で予想しなかった故障や設計で予想したよりも多数の故障などが発生した場合である。重要度の高い設備は、少々の故障でも必要最小限の機能は確保されるように設計されているが、それでも限度以上の故障が発生すれば、安全機能喪失、ないし不全ということになる。もしその安全機能が、事故の急拡大を、設計の範囲内に食い止めるのに必須のものだったらとすると、これが損なわれれば事故シーケンスが設計の範囲を超えるのは当然である。従ってこの種の「多重事故」が、設計の範囲を超える重要な因子の一つとなる。第三に考えられるのは「複合起因事故」とも言うべきものである。……全く関連のない、すなわち完全に独立な2つ以上の起因事象が同時に起こるといのは、前に述べた安全性の第一のレベル（注の12参照：筆者注）がある程度以上しっかりしていれば、確率は極めて低いといえるだろう。」

池田三郎は、この福島第一発電所の事故をリスク評価の立場から考察しし次のように指摘する。「この想定の問題は、……古典的なリスク概念から学際的な脱皮を図ったリスクの3重項：R=(S, P, D)における『S：シナリオ』の導出に密接の関係する」<sup>(16)</sup>。ここで、PはSという事故事象の発生頻度あるいは生起確率、Dは被害の程度である。

ここでは、これまで述べたDBEおよびそれを越えるシビアアクシデントをこのリスクの3重項の考えに基づいて整理してみよう。

ここでDBEとして考えている、リスクの表現を

$$R_d = (S_d, P_d, D_d), \quad (1)$$

シビアアクシデントとして考えるリスクの表現を

$$R_s = (S_s, P_s, D_s) \quad (2)$$

としよう。先に述べたように、S<sub>d</sub>には「現実に起きる可能性がある多様な事故群あるいは事故シーケンス群が『包絡』されている」と考えており、現実に設計上用いるS<sub>d</sub>とP<sub>d</sub>が正確に一对一に対

応しているわけではないが、Sdで包絡される全事象の生起確率を考えた場合、リスク評価の立場から無視できないということである。しかしながら、DBEが安全評価の検討対象である安全装置（通常、工学的防護装置という）の働きによって、その被害の程度Ddがあらかじめ定められた許容範囲であればこのRdは許容されたということになり、当該事象の対策は十分取られていると判断される。

次に、シビアアクシデントについてはどのように考えれば良いのであろうか。佐藤は、先に「シビアアクシデントとは、設計の範囲を大幅に超え炉心を含む格納施設の損傷にいたるものであるということである。」と定義した。この場合、最終的なエンドポイントは、これによる地域住民の被曝であろう。ここで、Rsを許容するための方策としては、一般にPsとDsのいずれかあるいは両方の値を小さくすることが考えられる。Dsを小さくするとは、格納容器の破損にいたるような状態が生じて、地域住民の安全が確保されるような方策を講じることであるが、これは現在の設計思想には採用されていない。Psについては、もしSsがSdの延長上に在るとすれば、Sdで検討対象とした一連の安全装置を含め、この事故の進展に伴って問題となる安全に関連した装置・設備の信頼性の向上により、Ssにいたる確率を小さくすることによりRsを許容できるほど小さくすることである。すなわち、そこで問題とされる確率は、単に事象の生起確率だけではなく、深層防護に関連した安全装置の高い信頼性（低い故障率）をも含むものである。

これまで、シビアアクシデント発生の確率は、原子炉1機あたり10万年に一度程度であるといわれ、この低確率がシビアアクシデントを想定しないでよいものとしてきたといえる。

それでは、現在のDBEとはどのようなものが考えられているのであろうか。特に福島第一発電所の原子炉と同型のBWRについてDBEとして考えられているのは、原子炉制御系に対する制御棒落下事故であり、冷却設備ECCS系に対する大小規模の冷却材喪失事故であり、さらに耐震設備の信頼性の評価に対する設計用基準地震動などである。このDBEの一つである冷却設備ECCS系に対するDBEである冷却材喪失事故のシナリオSdと、その延長であるシビアアクシデントのシナリオSsの関係の一例を、次頁の図1に示す。

この図において、 $P_A$ は起因事象（初期異常）である配管破断の発生確率であり、それぞれの安全設備の故障確率が小さいことを考慮すると、 $P_d \approx P_A$ となる。そのほかの事故シーケンスにおいて、炉停止の失敗、冷却の失敗を伴うシーケンスはシビアアクシデントとみなせよう。一般に、この図に示された各設備の故障のシーケンスに従い、シナリオSsが決まり、想定した設備の故障率（アンペアラビリティという） $Q$ と $P_A$ にしたがって、発生頻度 $P_s$ が決まる。この場合のように、Sdの延長上あるいはSsの起因事象をSdと同じくする場合、安全設備の信頼性の確保がシビアアクシデントへの対策となる。この図において最も下にある $P_s = P_A \times Q_B$ は起因事象A（冷却材喪失事故）が生じかつ全電源が喪失したことを意味する。全電源の喪失はたとえフェイルセーフ構造によって原子炉停止系が働いてもシビアアクシデントへつながることは、今回の福島の例に見られたとおり

配管破断 A	電源 B	炉停止系 C	非常用 炉心冷却 D	放射能 除去 E	格納容器 F	発生確率	シーケ ンス
初期異常 P	故障 Q <sub>B</sub>	作動	故障 Q <sub>C</sub>	失敗 Q <sub>D1</sub>	破損	$P_A$	A
					失敗	$P_A \times Q_{F1}$	AF <sub>A</sub>
					破損	$P_A \times Q_{E1} \times Q_{F1}$	AE <sub>1</sub>
					失敗	$P_A \times Q_{E1} \times Q_{F2}$	AE <sub>1</sub> F <sub>2</sub>
					失敗	$P_A \times Q_{D1}$	AD <sub>1</sub>
					失敗	$P_A \times Q_{D1} \times Q_{E2}$	AD <sub>1</sub> E <sub>2</sub>
					失敗	$P_A \times Q_C$	AC
					失敗	$P_A \times Q_C \times Q_{E3}$	ACE <sub>3</sub>
					失敗	$P_A \times Q_C \times Q_{D2}$	ACD <sub>2</sub>
					失敗	$P_A \times Q_C \times Q_{D2} \times Q_{E1}$	ACD <sub>2</sub> E <sub>4</sub>
					失敗	$P_A \times Q_B$	AB

図1. 事故シーケンスの一例 (起因事象として配管破断を想定した場合)<sup>(17)</sup>

(P: 起因事象の発生確率, Q: 危機の故障及び不動作率)

である。通常シビアアクシデントの発生は Q<sub>B</sub> が極小であるゆえにリスクは非常に小さいとされている。それでは、今回の事故はどのように考えれば良いであろうか。福島原発の場合、実は Q<sub>B</sub> の大きさが起因事象 A (津波という外部事象) に依存していたと考えられることではなからうか。一方、上記の原子炉内の配管の破断を起因事故とするケースでは、外部にある電源の信頼性に配管破断は影響しないのである。

したがって、問題はこれら DBE 自身の決定方法ということになる。先のリスク評価の言葉を用いると、いかにシナリオ Sd を決めるのかということである。DBE の決定の一つの合理的方法は、確率論的アプローチであろう。一般のリスク評価においても最も重要かつ難しいのは、ハザードの特定も含むシナリオの抽出である。それは、あらゆるケースを想定する網羅性が求められるのに対し、抽出できないシナリオについてのリスク解析・評価はできないからである。シナリオの抽出は、当該システムおよび関連する同様のシステムにおける過去の事例調査、設計図をもとにした検討などによることが多いが、ベテランの経験・勘や想像によるところもあり、合理的な方法の確立が求められている。

原子炉の場合も佐藤は、「既存の DBE の多くは、これは今までの経験に基づいた工学的判断による、いわば歴史的所産であるといえる」<sup>(18)</sup> という。このことから、大津波を起因事象として、事故

のシナリオにする発想が、少なくとも福島第一発電所設計時の経験的な工学的判断の中になかったことが、このたびの事故拡大の原因の一つにあったと考えられよう。

今回の事故に際し、原発関係者が使った「想定外」がどのようなものであったか判らないらないが、注意しなければならない「想定外」の意味は、設計上の「想定外」であるシビアアクシデントが起こったことではなく、より根本的にはシナリオ Sd の決め方に関連し、地震のほか津波をも同時に起因事象とするシナリオ Sd を持つ DBE を考えていなかったことである。言い換えれば、電源確保の重要性は図 1 でも明らかで十分認識できたにもかかわらず、地震と津波の同時発生を起因事象として（しばしば後者は前者に付随する）想定した事故に対し発電機の位置、外部電源保護など電源についての深層防護的な配慮が防災工学上なされていなかったことである。以上から、単一の起因事故の発生が、安全性上重要な装置の破損を引き起こしシビアアクシデントに至るという点、図 1 の記号を用いるならば  $P=Q$  となり、それ故、式 (2) の  $P_s$  を用い  $P_s=P$  となるという点で、本項の冒頭に述べた「設計を越える事故とその要因」の中では考慮しきれなかった事故であるといえる。

### 3.4 歴史的産物としての DBE について

津波を伴った地震発生を同時に起因事象とした DBE を考えていなかったことが、今回の事故の原因であるといったが、それでは何故そうなったのであろうか。これまでの DBA の選定が歴史的産物であるとするならば、40 年前に建設された原子力発電所を建設したときの歴史経験は、少なくとも日本のものではない。それはアメリカのものであったと考えて良いであろう。アメリカの原子力発電所は多くは内陸にあり、かつ地震の少ない東部に集中していることを考えると、そこには津波を起因事象としなければならない必然性はない。日本では 2006 年原子炉の耐震設計審査指針が改定され、耐震に対する DBE に用いる地震動について、「この基準地震動 S は、施設の耐震安全性を確保するための耐震設計の前提となる地震動であり、その策定に当たっては、個別の安全審査時における最新の知見に照らして、その妥当性が十分確認されなければならない。」<sup>(19)</sup> とされ、個別の状況の考慮が払われるべきであることが明記されている。しかしながら、この地震動に対する安全性という点から見ると、今回の地震においても先の中越沖地震時における柏崎原子力発電所でも、観測された地震の揺れは設計地震動を越えてしまい、なお余裕のあるものの<sup>(20)</sup> 耐震裕度の減少をもたらした。これは先の佐藤の指摘、「余裕はあくまで余裕として確保しておかねばならない。」に違反している。

また、津波に対しては、2006 年の耐震設計審査指針の改定に際し、地震随件事象として初めて言及され、次のように記述されている。

「施設は、地震随件事象について、次に示す事項を十分考慮したうえで設計されなければならない。……施設の供用期間中に極めてまれではあるが発生する可能性がある」と想定するこ

とが適切な津波によっても、施設の安全機能が重大な影響を受けるおそれがないこと。』<sup>(21)</sup>

海岸に設置された原子力発電所の耐震評価にあったって想定すべきは、海底に震源を持つ大地震は大きい津波を引き起こす危険性があるということであろう。この耐震基準の改定に伴い、原子力安全基盤機構は、津波の発生確率を1とし、津波によるシビアアクシデントの可能性についての解析を2009年に実施している<sup>(22)</sup>。この解析では機器の故障は波高によって生じるとの仮定のもと、波高が一定の高さを越えると、炉心損傷頻度は、津波発生頻度と同一になると結論している。炉心損傷の発生は機器の故障条件から決められており、それ故損傷程度は計算されていないが、全電源喪失と海水ポンプの機能喪失はそれぞれ炉心損傷の原因とされている点が注目されよう。

福島原発の場合、とくに、1~4号機に付随した多くの建物が設置されている10mの高さのグラウンドレベルは、標高35メートルの敷地を掘削して作ったものである。ここを15mの高さの津波が襲い、全交流電源の喪失と海水ポンプの機能不全を引き起こすという、まさに解析で予想されたことが起こった。東京電力によると、1号機設置時に予想された津波の高さはチリ津波の高さである3.12mであり、グラウンドレベル10mによって安全を確保しているとしていた。

地震のついでに配慮すべきものとして位置づけられた津波によって事故が拡大し甚大な被害が生じたことは、皮肉なことであり、災害はシステムの弱点を狙う<sup>(23)</sup>、という言い古された言葉がここでも妥当性を持っているように思う。

#### 4. 結論

以上「想定外」の意味をDBEとの関連で考察してみた。結果として、津波を伴う地震発生をDBEの起回事象とするような発想が、安全設計の考え方の中になかったことが事故を大きくしてしまった原因であるといえよう。しかし、シビアアクシデントの発生の頻度が、10万年に一度であることを持って、そのリスク対策を免れるとするならば、標高をも含めた電源系統の配置やそれらの津波に対する不十分な防護状態の下では、過去に起きた大きな地震と津波の発生頻度とくに、岡村らの貞観地震の指摘<sup>(24)</sup>を考慮すると、福島第一発電所におけるシビアアクシデントの発生確率はずっと大きく、当然津波を伴った地震発生を起回事象としたDBEを想定し、関連した機器の有効性を検証しなければならなかったと考えられる。しかしそうしなかった。

結果として今回の事故は、第2章の「想定外」の分類(ii)~(v)のいずれかのレベルに相当するであろう。これが(v)の「発生の確率があるにもかかわらず、想像力や情報の不足で、思いがそこに至らず、結果的に想定外になってしまったもの（無知ないし勉強不測の罪、またイメージネーション能力の不足）」であるとすれば、それは「多くの事故原因は機械と人とのインターフェイスにある」という事故に対する一般的な考えが深く染み渡っていたためかもしれない。現に過去二回起ったシビアアクシデントの原因はここにあった。さらに先の原子力安全基盤機構の評価が生かされなかった

ことは、福島原発の耐震安全関係者は、10万年に一回という低確率に発生頻度を抑えなければならぬシビアアクシデントについての理解がどの程度あったのだろうか、という疑問を生じさせる。大津波は極まれにしか生じないと言ったときの、「極まれにしか」という言葉の意味の捉え方の問題がそこにある。そしてもし、(iv)の「発生の確率が存在することは理解するが、外部的要因とのトレードオフの結果、想定外としたもの（例えばコストがかかり過ぎるとか、政治的配慮とか）」であるとすれば、ここに安全性と経済性との間に存在する古典的問題があらわれていると言えよう。このような考えの下では、古い原子炉を廃炉にしより安全な原子炉を採用することは難しく、その結果これまでの原子力安全研究の成果が生かされず、原子力業界全体が、常に40年も前の古い技術故の脆弱性をいつまでも持つこととなる。常に革新が進む現代科学技術の世界では、このようなことは考えられないことである。今回の事故はそのことをあからさまに示していよう。

安全設計上から考えて、福島第一原発事故のより根本的な教訓は、DBEの決め方、すなわちリスク評価の3重項中のシナリオSの決め方（「想定」の仕方）が重要であることであろう。このことから、今回の事故は、その原因が設計段階の思想にまでさかのぼって存在する組織事故<sup>(25)</sup>であるといえる。その組織要因としてのシナリオSの決め方の不備が、地震および津波という現場要因によって始めてあらわになったと考えられる。この点から考えても、今後安全設計時におけるDBEの設定に当たって、何らかの合理的で網羅的なシナリオの決め方が求められよう。

一方、もし今後のDBEの考え方がなおも他国の歴史的産物にとどまるならば、我々は自己の歴史を積み重ねる努力をしないことになる。それは、「欧米原子力先進国は……多くの基礎研究を積み重ねながら、時に失敗しながら、知識を蓄え、その集大成として原子力利用技術を獲得したのである。……日本は本音からでなく建前から入った。日本人特有の器用さで『ものづくり』としては世界一の製品をつくってきたかもしれないが、どこかまだ借り物技術のひ弱さが見られないだろうか。」<sup>(26)</sup>とこの事故に対し言われた原子力研究者の言葉が妥当性を持って聞こえるように思う。原子力の安全性について、安全文化などというあいまいな表現で済まらず、「哲学」の問題として改めて原理原則から考えなおす時であろう。

#### 注

- (1) 例えば、佐藤一男『原子力安全の論理』200頁、日刊工業新聞社（2006）
- (2) 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—」平成23年6月
- (3) 朝日新聞、2011年3月18日朝刊「（声）想定外を言い訳にするな」
- (4) 木下富男「リスク学から見た福島原発事故」日本原子力学会誌 Vol. 53, No7（2011）
- (5) 佐藤一男、前掲注1の書
- (6) 佐藤一男、前掲注1の書、101頁
- (7) 佐藤一男、前掲注1の書、154頁
- (8) 例えば、沸騰水型軽水炉（BWR）の緊急冷却装置 ECCS の性能を評価するための、起因事象は、再循環ポンプのギロチン破断（両端破断）事故であるが、この両端破断の想定は現実には起こりそうも

ないものである。このような、現実には起こりそうも無いほど厳しめの仮定の下における検証は、あらゆる大きさの破断あるいは配管破損に対する ECCS の性能を保証するものである。

- (9) 佐藤一男, 前掲注1の書, 163頁
- (10) 佐藤一男, 前掲注1の書, 163頁
- (11) 佐藤一男, 前掲注1の書, 202頁
- (12) 深層防護のものは軍事用語である。それは、防衛が最前線から後方まで及んでいることを意味している。深層防護はシステムに潜在する危険が人間社会への侵入（むしろ侵出と言うべきか）を妨げる為にある。

多重防護の一つの考え方は、次の3つのレベルからなる防護を考えることである。

第一のレベルは、最も重要な異常発生の防止である。

第二のレベルは、たとえ異常が発生してもその波及拡大を抑制することである。

第三のレベルは、事故時の影響緩和することである。

多重防護で重要なことは、それぞれのレベルが其れのみで完全に働き、目的を果たすように期待されていることである。また、この第一のレベルである、異常発生の防止のために、重要な機能に関し、人間系と機械系の両方に付いて、同じ性質のものを複数備えること（冗長性）、異なる性質のものを複数備えること（多様性）、複数系統が同一原因によって機能喪失しないようにする（独立性）等の考えが取り入れられている。

- (13) 佐藤一男, 前掲注1の書, 209頁
- (14) 佐藤一男, 前掲注1の書, 209頁
- (15) 佐藤一男, 前掲注1の書, 206頁
- (16) 池田三郎『『想定外』は『リスク分析』の枠外か?』日本リスク学会誌, Vol. 21, No 1 (2001)
- (17) 近藤俊介『原子炉の安全性』196頁, 同文書院(平成2年)
- (18) 佐藤一男, 前掲注1の書, 164頁
- (19) 原子力安全委員会「耐震設計審査指針の改訂」, 原子力安全委員会ホームページ: <http://www.nsc.go.jp>
- (20) 蝦沢勝三「JNESにおける耐震安全研究」原子力施設の耐震安全に関する最新知見と安全研究資料, 原子力安全委員会安全研究フォーラム 2009, 東洋大学, (2009年2月)
- (21) 原子力安全委員会, 前掲注19の書
- (22) 原子力安全基盤機構「平成21年度地震に係る確率論的安全評価手法の改良=BWRの事故シーケンスの試解析=」10原確報—0009(平成22年)
- (23) 木下富男, 前掲注4の書
- (24) 2009年, 経済産業省で開かれた, 古い原発の耐震性を再検討する専門家会合。産業技術総合研究所活断層・地震研究センターの岡村行信センター長は, 過去に大きな津波があり, 再び来る可能性があることを指摘するが取り上げられなかった。  
「総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会 耐震・構造設計小委員会 地震・津波, 地質・地盤合同WG(第32回)議事録」平成21年6月  
「総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会 耐震・構造設計小委員会 地震・津波, 地質・地盤合同WG(第33回)議事録」平成21年7月
- (25) James. Reason (塩見弘監訳)『組織事故』日科技連(2000)
- (26) 矢川元樹「巻頭言」, 日本原子力学会誌「ATOMOS」1頁, Vol. 53, No. 10 (2011)