

|                  |   |
|------------------|---|
| <b>Title</b>     | 原子力発電所の耐震設計における「安全余裕」の意味  |
| <b>Author(s)</b> | 標, 宣男   |
| <b>Citation</b>  | 聖学院大学論叢, 21(1): 91-107  |
| <b>URL</b>       | <a href="http://serve.seigakuin-univ.ac.jp/reps/modules/xoonips/detail.php?item_id=956">http://serve.seigakuin-univ.ac.jp/reps/modules/xoonips/detail.php?item_id=956</a> |
| <b>Rights</b>    |   |

聖学院学術情報発信システム : SERVE

SEigakuin Repository for academic archiVE

# 原子力発電所の耐震設計における「安全余裕」の意味

— 柏崎刈羽原子力発電所を例として —

標 宣 男

The meaning of safety margin in seismic design of nuclear power plants

— in the case of Kashiwazaki-Kariwa Nuclear Power Plant —

Nobuo SHIMEGI

A strong earthquake, the Niigata Prefecture Chuetsu-oki, with a magnitude of 6.8, occurred at 10:13 a.m. on 16 July 2007, affecting the 7 units of Kashiwazaki-Kariwa Nuclear Power Plant, located approximately 16 km south of the epicenter of the earthquake. Though the levels of seismic ground motion planned for in the design of the plant as the design basis event(DBE) were very significantly exceeded by the earthquake, and the shear force caused by the earthquake was a little stronger than the designed value of the unit 1 reactor, the safety related structures, systems and components of all seven units of the plant demonstrated exceptionally good performance in ensuring basic safety functions concerning control of reactivity, cooling and confinement. Consequently nuclear plant safety was maintained, due to the large safety margins provided for in the original design. However, the destructive force of the earthquake decreased public trust in nuclear power plants, in spite of the safety margin allowed for by the design of the plant, because the exceeding of planned-for levels of seismic ground motion meant that the safety precautions of this nuclear power plant were no longer enough.

---

**Key words:** the Niigataken Chuetsu-oki earthquake, Kashiwazaki-Kariwa Nuclear Power Plant, Design Basis Event, Safety Margin, Safety Logic of Nuclear Power Plant, Ground Motion, Shear Force

## 1. はじめに

2007年7月16日10時13分頃、上中越沖の北緯37度33.4分、東経138度36.5分深さ17kmを震源とするマグニチュード6.8の地震が発生した。この地震による震度6強の揺れが、震源距離にして23km、震央距離<sup>1</sup>にして16kmにある東京電力柏崎刈羽原子力発電所を襲った。柏崎刈羽原子力発電所は、沸騰水型原子炉（BWR）5基と改良型沸騰水型原子炉（ABWR）2基からなる、総出力821万2千

kwの世界最大の原子力サイトである。

地震発生時、これらの原子炉の内、3、4、7号機は運転中であり、2号機は起動中であった。1、5、6号機は定期検査のため運転を停止していた。地震発生直後、前者4基の原子炉は速やかに自動停止し、余熱の除去にも成功し、かつ、压力容器や主要な配管の破損も見られず、原子炉本体に関し、いわゆる（核分裂を）止める、（炉心を）冷やす、（放射能を）閉じ込める、という安全性の3つの基本は守られた。

震度6強の地震が原子力発電所を襲ったのは、世界でも初めてのことであり、特に、この地震により1号機の原子炉基礎盤上で観測された東西方向の加速度が、設計時に想定していた加速度の、2.5倍の680ガル（ $\text{cm/s}^2$ ）に達したため、この地震による建物あるいは機器類の損傷の程度などその影響が注目された。しかし、上記のように安全性の基本に影響するような損傷は発生しなかった。損傷に関係した主な出来事は6号機の使用済燃料プールの水溢れ、3号機の変圧器の火災、6号機の原子炉建屋天井クレーンの損傷、発電所構内道路の波打ち、排気ダクトのずれ、7号機における、原子炉自動停止後のタービングランド蒸気排風機の停止操作の遅れ、などもである。このうち、6号機における使用済燃料プール水の溢れ、および7号機蒸気排風機の停止操作の遅れのため復水器内から放出された沃素により、微量の放射能漏れが起こった。ただし、その漏洩量は、それぞれ、1年間に自然界から受ける放射線量の約10億分の1および約1000万分の1程度<sup>2</sup>であった。

この地震による原子力発電所の耐震安全性について、異なった二つの見方がある。一つは、原子力に批判的な立場からのものであり、例えば「朝日新聞」の7月19日の社説<sup>3</sup>に「背筋が寒くなったことは、原発が想定を上回る揺れに襲われたことだ。放射能を含む水が漏れ、火災も発生した。」とあり、7月26日の社説<sup>4</sup>でも、「傷はそこまで及んだのか」と言う扇動的な書き出しと共に、6号機におけるクレーンの落下について言及し、「破損をしたのはクレーンを移動させる部分であり、クレーンが落下することはない」という東電側の説明に対しても、なおその危険性を強調する記述になっている。更に8月2日の記事も「不具合1263件 過去最多、修繕進まず」<sup>5</sup>と言う見出しの下、「軽微な不具合」と「日常の修繕で対応できる不具合」が1197件と不具合のほとんどを占め、加えて原子炉事故として決定的な被害の無かったことを述べるよりも、不具合1263件という件数と原子炉が大きな揺れに見舞われたこと自体を強調し安全性が失われたかのような記事となっている。もちろん、現地の住民の原子力発電に対する見方は厳しくなったことは当然であった。なお、そのため国や地方自治体及び電力会社は説明会<sup>6</sup>などを開き、住民感情の高まりを沈静化するために懸命な努力を行っている。

一方、原子力の安全に対し好意的な見方として、当時「新潟県原子力発電所の安全管理に関する技術委員会」の座長だったM大大学院客員教授の発言<sup>7</sup>がこれに相当する見方だろう。同教授は、この地震に対する柏崎刈羽原発の耐震性について、「非常に堅固だった」といい、かつ「安心した」と答えているが、原子炉の安全性は保たれたという判断は、原子力関係者に多い。電力関係者は当

然であるにしても、学問的客観性が望まれる原子力学会<sup>8</sup>においても、想定を超える揺れが生じたにもかかわらず、原子炉の安全機能が保持されたという見解が発表されている。

このような2つの評価に対し、どのように考えればよいのであろうか。本論では、この疑問に対し、原子力の「安全の論理」の立場から考えてみたい。

## 2. 原子力の「安全の論理」

### 2.1 「安全の論理」の必要性

なぜ原子力に安全の論理が必要なのか、なぜ特にこのことが強調されなければならないのかを述べてみよう。一般的に言って、エネルギーの発生あるいは消費を伴うあらゆるシステムにおいては、何らかの安全対策が考えられねばならない。その対策を立てる際用いられる現実的で有力な方法は、事故あるいは事象についての過去の経験を利用すること、すなわち経験則を用いることである。それならば、原子力施設の場合はどうであろうか。この点について、『原子力安全の論理』の著者佐藤一男は次のように言う。

「幸か不幸か、原子炉の事故は、経験則だけで十分といえるほど多くなかったし、今後も多くなることは許されないであろう。したがって、将来に、あるいは起こるかもしれない無数の種類の事故に対して万全の対策を講ずるためには、過去の苦い経験に学ぶことが必要なのは当然であるが、それに留まらずに、その経験をふまえて未経験の領域まで我々の思考を延ばしていくこと、即ち演繹が必要になるのである。…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』にほかならない。」<sup>9</sup>

この記述の中に、「原子炉の場合には、平常時と事故時の差が極めて大きい」とあるが、これは平常時と事故時の放射線被曝量差が極めて大きいことを意味し、極めて可能性が低い極端な場合を考えると、線量だけみても5～6桁（10万から100万倍）の開きがある<sup>10</sup>ことを意味している。

原子力施設の「安全の論理」を議論する場合常に言及されるのは、安全設計における多重防護<sup>11</sup>と言う考えである。しかし本論では、この多重防護そのものに言及するのではなく「安全設計」の効果を検討するために考え出された、DBE（Design Basis Event、設計基準事象）について、前記の佐藤の著書『原子力安全の論理』に基づき述べよう。

## 2.2 設計基準事象 (DBE)

ここで、DBE を説明するにあたり、「事象」の代表的なものの一つである「事故」を用いることにする。DBE をどのように決定するかその思考の基本にあるのは、あらゆる事故は「不測」の事故であるという事実である。この「不測性」の意味するところは、「いつ起こる」という発生時期に関するものだけではない。それは多様な事象のうち「何が起こるか」わからないということをも意味している。この多様な事象に対処しなければならないものとしての DBE を、佐藤は次のように言う。

「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。」<sup>12</sup>

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現実には起こ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>13</sup>。しかし重要な点は、この DBE によって、現実には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カバーされる、「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>14</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>15</sup>ということを意味する。

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。

それでは、DBE の決定すなわち設計の責任範囲をどのように決めてしているのだろうか。一つの合理的方法は、確率論的アプローチであろう。これは、安全上重要な機器の信頼性が確保されていること (すなわち、安全上の機器の機能が働くなる確率は十分小さいこと) を前提に、DBE の包絡する事象群を定めることである。しかしながら、既存の DBE の多くは、いわゆる工学的判断の下に設定されたものであり、その妥当性は、長い経験の下に確認されて来たものである。

## 2.3 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るべきであろうか。あるいは、設計により責任を持たない事故とはどのようなものとして考えられるであろうか。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、当たり前のことなのである。…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>16</sup>

既に述べたように、DBEが有効であるためには、この人為的な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。

それでは、設計を超える事故に対しどのように考えるべきなのであろうか。まず、設計を超える事故について、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。」<sup>17</sup>

「設計を超える事故」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。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『DNE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>18</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。しかしながら、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>19</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。

## 原子力発電所の耐震設計における「安全余裕」の意味

しかしながら佐藤は、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>20</sup>

### 2.4 耐震設計について

(設計用基準地震動…DBE)

これまで、事象の代表として事故という言葉を使ってきたが、DBEは事故のような内部事象に対するものだけではなく、外部事象をも含むもっと広い概念である。地震についてのDBEはこの外部事象の一つであり、「設計基準地震動」という。

原子力発電所の耐震審査指針は、平成18年改定されたが、柏崎・刈羽原子力発電所は改正前の昭和56年制定の「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」（以下旧指針という）によるものであるため、ここではこの旧指針に基づいて、本論に必要なところを述べることにする。この旧指針では、原子炉施設の耐震設計上の施設別重要度を、地震により発生する可能性のある放射線による環境への影響の観点から、表1ように分類している。

表1 施設に対する耐震設計上の重要度の分類<sup>21</sup>

|      |   |
|------|---|
| Aクラス | 自ら放射性物質を内蔵しているか又は内蔵している施設に直接関係しており、その機能喪失により放射性物質を外部に放散する可能性のあるもの、及びこれらの事態を防止するために必要なもの並びにこれらの事故発生の際に、外部に放散される放射性物質による影響を低減させるために必要なものであって、その影響、効果の大きいもの。なお、Aクラスの機器のうち特に重要度の高い者をAsクラスとしている。 |
| Bクラス | 上記において、影響、効果が比較的小さいもの。  |
| Cクラス | Aクラス、Bクラス以外であって、一般産業施設と同等の安全性を保持すればよいもの。  |

この表より明らかのように、原子炉の耐震上、特に重要なのは、Aクラスの機器であるので、以下ではこのAクラスの機器に対する耐震設計について述べよう。

旧指針によると、安全上重要なAクラスの構造物は、静的地震力<sup>22</sup>と動的地震力<sup>23</sup>の双方に対して十分な耐震性を有するように設計しなければならない。

静的地震力としては、Aクラスの構造物等は、建築基準法の定める一次設計の地震力の三倍の力に加えて、上下方向にその2分の1の地震力が同時に不利な方向に加わると仮定し、機器配管等は更にこの20%増しの力を想定して設計する。さらに、動的地震力を推定するには、まず地震時に強

固な岩盤（「解放基盤面」<sup>24</sup>と呼ばれる）の揺れ方を定めなければならない。上記のAsクラスの機器を例にとると、敷地近傍での地震の歴史的記録、断層（5万年前以降に活動、又は地震の再来期間が5万年未満のもの）などの分布、地震地体構造論による推定などのより、敷地に影響を与える可能性のある最も強い地震を想定するに加えて、原子炉直下マグニチュード（M）6.5の地震が発生すると無条件で仮定して、地盤の変位振幅、速度振幅、加速度振幅のスペクトルを求め、これから設計の基準となる地震の震動の波形が合成される。この際震源の深さは、旧指針には具体的な指定はないが、多くの場合10kmを採用している。これが耐震設計に対するDBEの一つである「設計限界時振動」 $S_2$ <sup>25</sup>になっているわけである。これは、人工的に作り出された波形ではあるが、「その寿命期間中にほとんど生じることのないほど強い仮想的な大きな揺れ」<sup>26</sup>と理解されており、このような波形について設計しておけば、現実の地震の時の震動（これこそ千差万別）に対して、構造物が耐えられるはずだということなのである<sup>27</sup>。

#### （耐震設計と安全余裕）

耐震の安全性は、外力により、原子炉施設・設備を作る部材の内部に発生する力（応力）とそれと共に生ずる歪にとって評価される。ここでは、応力によって設計上の安全余裕について説明する。例えば、「設計限界地震動」 $S_2$ による設計を取上げるが、通常、 $S_2$ は現実の地震より厳しい仮想的なものとして想定されているがゆえに、この想定自体安全余裕を含むものと考えられている。また、原子炉压力容器の「設計限界地震動」 $S_2$ に対する許容値は、塑性破壊が生じないように、容器の板厚全領域にわたって発生する応力（一次一般膜応力）については「設計引張強さ」（部材が引張力を受けて破断するときの強さをいう）に対して約1.5倍<sup>28</sup>の余裕がとられている。これに関して、2007年度の秋の原子力学会で、班目<sup>29</sup>は、この余裕のほかに、「発生応力値を算定する際の余裕、発生応力値が許容値に対する余裕」があるという。また通常、施設・機器の振動時の振幅に強く影響する減衰定数などは、保守的に設定されており、「設計引張り強さ」なども実際の値より小さく設定されているなども、余裕となっている。また、班目は、前記に続いて「多度津の工業試験所では、耐震信頼性試験を平成14年まで実施。ここでは、加振して機器を壊す実験などを行った。それらの結果から、許容値自体にはおよそ9倍の強さが設定されていることがわかった」と述べている。

以上のべたことは、耐震設計としての安全余裕であるが、原子力発電所の施設・機器にかかる力は、地震ばかりではない。主なものとして、自重及び内圧が考えられる。全許容応力を100とした場合の、これらと地震による発生する応力の設計値の比較を表2<sup>30</sup>に示す。この表より、もっとも地震による応力の割合が大きいのは、配管（主蒸気系）であるが、それでも余裕が35あるので、2.7倍程度までの地震力に耐えられることになる。

原子力発電所の耐震設計における「安全余裕」の意味

表2 建設時の条件における地震力の影響割合\*

| 機 器       | 考慮すべき荷重 |    |     | 発生応力 | 余裕 |
|-----------|---------|----|-----|------|----|
|           | 自重      | 圧力 | 地震力 |      |    |
| 原子炉圧力容器   |         |    |     |      |    |
| 胴体部       | 1       | 30 | 2   | 33   | 67 |
| 基礎ボルト     | 5       | -  | 20  | 25   | 75 |
| 原子炉格納容器   |         |    |     |      |    |
| ドライウエル上鏡  | 2       | 2  | 1   | 6    | 94 |
| 炉内構造物     |         |    |     |      |    |
| 蒸気乾燥機     | 6       | -  | 2   | 8    | 92 |
| 炉心支持構造物   |         |    |     |      |    |
| シュラウド     | 1       | 1  | 5   | 7    | 93 |
| 容器（熱交換器等） |         |    |     |      |    |
| 銅版        | 10      | 5  | 5   | 20   | 80 |
| 基礎ボルト     | -       | -  | 10  | 10   | 90 |
| ポンプ       |         |    |     |      |    |
| 基礎ボルト     | 0       | -  | 1   | 1    | 99 |
| 配管（主蒸気系）  | 30      | 15 | 20  | 65   | 35 |

\*許容応力を100とした場合の応力の割合（%）

以上述べたように、耐震上の安全余裕は、様々な設計上の過程で考慮されておりそのため余裕の大きさは、事実上かなり大きくなっていると思われる。しかし、許容応力を引っ張り強さ（極限強さ）より小さくする理由は、部材の強度について、次のような不確実<sup>31</sup>さを持つが故であることも指摘しておかなければならない。

- ・ 使用材料の不均一性・荷重の見積りの不正確さ
- ・ 応力算定の正確さ
- ・ 不連続部における応力集中
- ・ 腐蝕による衰耗
- ・ 工作の精度

従って、必ずしも安全余裕の大きさがそのまま安全性の度合いを比例的に示しているわけではないことにも、特に「安全の論理」の上から、留意すべきである。

### 3. 「安全の論理」と柏崎・刈羽原子力発電所の耐震設計

#### 3.1 設計用基準地震動 $S_2$ と中越沖地震動

柏崎刈羽原子力発電所を襲った中越沖地震の性質を、この際との原子炉の設計において DBE として最も厳しいと想定された地震  $S_2$  と比較してみよう（表 3）。

表 3 設計用基準地震動  $S_2$  と中越沖地震動の比較

|                    | $S_2$ | 中越沖地震動                                    |
|--------------------|-------|---|
| マグニチュード M          | 6.5   | 6.8 ( $S_2$ の約2.8倍のエネルギー E) <sup>32</sup> |
| 震源深さ (km)          | 10    | 約17                                       |
| 柏崎刈羽原発までの震源距離 (km) | 10    | 約23                                       |
| 柏崎刈羽原発までの震央距離 (km) | 0     | 約16                                       |

この表より、中越沖地震は、直下に震源を想定した  $S_2$  と比較して、発生エネルギーは約2.8倍であるが、この2.8倍のエネルギーが、原子炉サイトの破壊エネルギーとして、必ずしもそのまま、現れるわけではない。これは、原子炉サイトと震源との距離や又地下の地盤構造によって影響される。この点については、「(今回観測されたのは) M6.8ですが、変な話しですけども、地震継続時間などを眺めて見ますと、実は震源からの距離がそれまで考えていた M6.5の方が短いのです。ですから、エネルギーだけ計算すると、今回の M6.8の地震というのは想定した中に入っているのです。」<sup>33</sup>のような意見もある。しかし、原子炉サイトをでの地震動のエネルギーについては今後の課題であろう。

この地震によって、震度6強の揺れが原子炉サイト近傍を襲ったが、その揺れの加速度と  $S_2$  による想定（設計）加速度の比較を、表 4 に示す。

表 4 地震による揺れ加速度の実測データと想定値の比較<sup>34</sup>

(原子炉建屋基礎盤上の最大加速度 単位：ガル (cm/s<sup>2</sup>), ( ) 内は想定された設計値)

| 号機 | 水平－<br>南北方向 | 水平－<br>東西方向 | 垂直        |
|----|-------------|-------------|-----------|
| 1  | 311 (274)   | 608 (273)   | 408 (235) |
| 2  | 304 (167)   | 606 (167)   | 282 (235) |
| 3  | 308 (192)   | 384 (193)   | 311 (235) |
| 4  | 310 (193)   | 492 (194)   | 337 (235) |
| 5  | 277 (249)   | 442 (254)   | 205 (235) |
| 6  | 271 (263)   | 322 (263)   | 488 (235) |
| 7  | 267 (263)   | 356 (263)   | 355 (235) |

## 原子力発電所の耐震設計における「安全余裕」の意味

この表より、観測された建屋基盤上の加速度は、全ての原子炉で想定された値を超え、最大加速度としては680ガル（1号機）、設計値との比では最大3.6倍（2号機）に達した。

この揺れに対する損傷は、BおよびCクラスの設備については損傷が確認されているものの、安全上重要なAsおよびAクラスの設備に損傷は確認されていない（表5）。それゆえ、原子炉の安全上最も重要な、（核分裂を）止める、（炉心を）冷やす、（放射能を）閉じ込める、という安全性の3つの基本は守られたといえよう。

表5 損傷の有無<sup>35</sup>

| 耐震クラス | 設備の例   | 損傷                    |
|-------|--|-----------------------|
| As    | <input type="checkbox"/> 原子炉圧力容器<br><input type="checkbox"/> 原子炉格納容器<br><input type="checkbox"/> 制御棒 | 無                     |
| A     | <input type="checkbox"/> 非常用炉心冷却系<br><input type="checkbox"/> 原子炉建屋                                  | 無                     |
| B     | <input type="checkbox"/> タービン設備<br><input type="checkbox"/> 放射性廃棄物処理系                                | 原子炉建屋天井クレーンジョイント部     |
| C     | <input type="checkbox"/> 主発電機<br><input type="checkbox"/> 変圧器<br><input type="checkbox"/> 所内ボイラー     | 所内変圧器、主排気筒ダクト、消火系配管など |

### 3.2 中越沖地震と「安全の論理」（DBE, 安全余裕）

先に述べたように、「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」。柏崎刈羽原子力発電所の耐震設計の場合は、どうであろうか。表3に示したように、起因事象S<sub>2</sub>のマグニチュードは、中越沖地震より小さいが、震源距離などは実際に起こった地震より短く、厳しめに想定されている。しかし、耐震評価で重要な点は、原子炉の設置されている岩盤がどのような揺れを起こすと想定するかである。

DBEの想定を超えた地震に襲われた日本の原子力発電所は、柏崎刈羽が初めてではない。2005年8月、マグニチュード7.2の宮城県沖地震に襲われた東北電力女川原子力発電所<sup>36</sup>においては、震度5強、観測された加速度は888（想定673）、2007年3月、マグニチュード6.9震源深さ11km、発電所との震央距離約18km、震源距離約21kmの能登半島地震に襲われた北陸電力志賀原子力発電所<sup>37</sup>の震度6強、加速度は711ガルを記録し、旧来の指針に基づく想定374ガルを9割上回った。しかし、それぞれ想定された加速度を超えてはいるが、その超え方は比較的小さく、目立った被害は報告されていない。

一方、柏崎刈羽原子力発電所の場合も、表4に示したように、想定を大きく上回った加速度が計測されが、表5に纏めたように、原子炉として致命的な損傷は出なかった。しかし、実際この加速

度により、どのような応力が原子炉に乗じたのであろうか。これについては、次のような解析結果がある。まず、一番新しい7号機について、「中越沖地震による原子炉建屋のせん断力は、地上部では設計用地震力を下回り、地下部ではほぼ同程度のレベルであった」<sup>38</sup>。次に、一番古い1号機について、「中越沖地震による原子炉建屋のせん断力は、地上部は設計用地震力と同程度、地下部は設計用地震力をやや上回るレベルであった」<sup>39</sup>。加えて、この7号機について、「中越沖地震による原子炉建屋のせん断力は、設計配筋による負担せん断力に対して十分な余裕がある。」<sup>40</sup>という解析結果があり、1号機についても、「中越沖地震による原子炉建屋のせん断力は、7号機ほどではないが設計配筋による負担せん断力に対して余裕がある。」<sup>41</sup>という。前記の原子力学会で班目も、柏崎刈羽原子力発電所の耐震設計との関連で、「設計余裕は数十倍あると推定される」<sup>42</sup>と述べた。1号機および7号機についての後半の解析結果を見ても、これらの意見は、工学的に見て正しいと思われる。

しかし、そうであるならば、柏崎刈羽原子力発電所の耐震設計は安全上問題ないというのであろうか。一つの問題は、数十倍といってもこの設計余裕が厳密に「定量化」されていない点である。しかし、そもそも安全余裕とは、部材の物性値のばらつきなどの不確実性を考慮という側面を持つものであるということから、厳密な定量化は原理的に不可能であろう。もう一つの問題は、「安全性という見地からすると『ある考え方で設定した基準で作った。ところが予想をはるかに超える地震動が来ても壊れなかった。実力があるから大丈夫だ』というのは、いかがなものかと思います。」(太字：引用者)、という意見が意味している点である。ここで問われているのは、「安全の論理」とりわけDBEとは如何なるものとして設定されているのかという問題と理解することが出来よう。2章で述べたように、DBEに基づく設計とは、「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(この場合地震)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」( () 内、引用者付加)ものである。柏崎刈羽を襲った地震の場合の影響は、表4、及び表5に示してあるが、特に問題になったのは表4に示した原子炉格納施設のひとつである原子炉建屋基盤の加速度の大きさである。これは、「あらかじめの想定」値を大きく超えている。さらに、先に述べた、特に1号機の原子炉建屋の剪断力に対し、「地下部は設計用地震力をやや上回るレベルであった」(太字：引用者)とされた。しかし、それが僅かであってもDBEの枠を超えた地震であった事実は重要である。たとえ、地震による実質的な被害が、結果的に想定範囲内であったにせよ、DBEが事象のシーケンス全体を「包絡」しなければならない点を考えると、これらの点における柏崎刈羽原子力発電所の耐震設計に「安全の論理」上の**綻び**があったと言うべきであろう。この点では、過去においてDBEを超えた地震に見舞われた、原子炉に対しても同様なことが言えよう。

ところで、その**綻び**はどのようにして生じたのであろうか。まず、起回事象S<sub>2</sub>の震源のエネルギー規

## 原子力発電所の耐震設計における「安全余裕」の意味

模の想定が甘かったのであろうか。この点について、実際に起こった地震のマグニチュードが想定された起因事象のそれよりも大きかったことは既に述べた。しかし、これだけではない、中越沖地震の震源は、3つのアスペリティ<sup>43</sup>のために、通常と同程度の地震より強い地震力が発生している<sup>44</sup>といわれる。また、この震源の特徴以上に、原子炉サイトにおける地盤の揺れを想定より大きくした要因は、震源と原子炉サイトの間に横たわる地層の特性である。耐震設計の難しさは、震源の特性のみならず建物に加わる地震力が、この地層特性に強く影響されることである。この点に関し、柏崎刈羽原子力発電所の深部地盤における不整合性が、地震波を屈折させ集める傾向があったことが大きく、また、敷地下の褶曲構造が地震動を増幅する効果も、震源の特異性と同程度に揺れを大きくしたものと考えられている<sup>45</sup>。2章で述べたが、多くの機械設計におけるDBEは、いわゆる専門家の経験に基づく工学的判断の下に設定されてきた。しかし、何万年と言う長い間の地層の動きに関係した地震については、工学的判断の範囲を超えた地質学的問題であると思われる。それ故、DBEの初期事象としての震源の特性をどの様に考えるか、耐震設計指針が改正され<sup>46</sup>、13～12万年以降活動した活断層の考慮や残余リスクの検討など旧指針と比べ考慮しなければならない点を多くした。しかし、保守的でありかつ合理的な初期事象の設定は、今後も重要なテーマとして残るであろう。

## 4. 結 論

耐震設計者が、「(原子炉の) 寿命期間中ほとんど生じることのないほど強い仮想的な揺れ」と思っていた揺れを大幅にこえる地震が柏崎刈羽原子力発電所を襲った。原子炉の重要な機器の健全性は守られ、その結果、「(核分裂を) 止める、(炉心を) 冷やす、(放射能を) 閉じ込める」、という安全性の3つの基本は守られた。それは、原子炉設計の持つ、膨大な安全余裕の故であり、この点からすれば原子炉は安全であった。

しかし、耐震設計に関する「安全の論理」、特にDBEの設定にかかわって、設計上の綻びが見られた。この綻びは、まず初期事象の設定が不十分であり、そのため原子炉を襲った揺れが、想定された揺れを大幅に超えたこと、さらにその揺れが、原子炉建屋の一部に耐震上の想定を越えた剪断力を生じせしめたことである。それゆえ柏崎刈羽原子力発電所を襲った中越沖地震は、一部と言え

DBEの「包絡」の外にはみ出した、「DBEを超えた」事象（実際に起こるとは思えなかった設計の責任範囲を超えた事象）が起こってしまった、ということになる。

2章に述べたように、DBEを超えた事象に対する備えが設計上なされていないわけではない。DBEとシビアアクシデントとの中間にあるグレイゾーンの事象は、この安全余裕により対処するものとされている。それが耐震設計のみの持つ余裕だけで対処できたものなのか明瞭ではないが、

グレイゾーンの事象とみなすことが出来る中越沖地震に対する柏崎刈羽原子力発電所の健全性及び安全性は、その大きい安全余裕によって守られたことは事実であろう。しかし、DBEの想定をほみ出したが、安全に保たれた故に、問題がないとするならば、DBEを設定する意味は無くなってしまい、「安全の論理」に矛盾しよう。

さらに、1章に示したように、安全余裕が、何がしかの不確実性を含むことと考えあわせるならば、安全余裕の考え方に対する、佐藤の次のような意見は重要であろう。

「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と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。」(太字：引用者)

この言葉を中越沖地震に即して用いるならば、地震に襲われた柏崎刈羽原子力発電所は、安全に保たれたものの、公衆の安心の基礎を揺り動かしてしまったと言えよう。

「安全」であっても「安心」が得られないという現象は、「リスク心理学」上の大きな研究課題である。現代のリスク心理学は、そこには「信頼」が大きく関っているという。<sup>47</sup>この点について、安全工学の側からいうならば、少なくとも「安全の論理」の完遂こそ「信頼」への途ではないであろうか。

(注)

- 1 地震発生の原因となる、地球内部の岩石の破壊が開始した地点を震源、震源の真上にあたる地表の地点を震央という。
- 2 原子力安全・保安院「原子力発電所の耐震安全性について」4頁、経済産業省(平成20年1月)
- 3 2007年7月19日「朝日新聞」朝刊、社説
- 4 2007年7月23日「朝日新聞」朝刊、社説  
傷は、そこまで及んでいたのか。

新潟県中越沖地震の直撃を受けた東京電力柏崎刈羽原子力発電所で、6号機の原子炉建屋の天井クレーンに破損が見つかった。6号機は定期点検中だったが、運転中なら核反応が進む炉の真上でトラブルが起こったことになる。そう考えると、改めてぞっとした。東京電力によると、壊れたのはクレーンを移動させる部分に限られ、この破損によって300トンを超えるクレーンそのものが下に落ちることはないという。

だが、たとえそうであっても、軽く見てはいけぬ。

この破損は、建屋の天井付近の揺れの激しさを物語っている。一見ただけではわからない傷やひずみが、クレーンの本体や周りに発生しているかもしれない。6号機だけでなく、別の原子炉のクレーンで似たようなことが起こっている恐れもある。

以下略・・・・・・・・

- 5 2007年8月2日「朝日新聞」朝刊  
新潟県中越沖地震で被災した東京電力柏崎刈羽原子力発電所は1日、地震発生から11日間で、天井クレーンの破損など1263件に及ぶ原発内の不具合を確認したと発表した。同原発はふだんから、不具合の件数を毎月公表しているが、今回の11日間だけで、過去最多だった03年4月(805件)の1.5倍。東電によると、修繕はほとんど進んでいないという。

## 原子力発電所の耐震設計における「安全余裕」の意味

地震発生の7月16日から26日までに確認された施設の損傷やトラブル、職員の不的確な行為などを集計・分類した。地震で多発したため、前倒して発表した。

内訳は「最も危険度が高く、法律や安全協定に反する不具合」が3号機の変圧器火災や6号機の天井クレーンの破損など10件▽「危険度が高く、社外に大きな影響を及ぼす不具合」が固体廃棄物貯蔵庫内で低レベル放射性廃棄物が入ったドラム缶数百本が倒れたことなど33件。

「周辺自治体に限定的な影響のある不具合」がタービン建屋のパネルが外れるなど21件▽「軽微な不具合」が軽油タンクの地盤沈下や建屋内の亀裂など491件▽「日常の修繕で対応できる不具合」が706件▽分類対象外2件となっている。

同原発はこの日、6号機原子炉建屋地下1階付近の非管理区域のケーブル用通路に約3トン分の水たまりができていたと新たに発表した。放射性物質は確認されていないという。(三浦英之)

6 新潟県は、国とは別に公開の「新潟県原子力発電所の安全管理に関する技術委員会」を開き、TEPCOは、2ヶ月に1回の割合で定期的に「地域の皆さまへの説明会」なる説明会を開いている。

7 2007年8月4日「朝日新聞」朝刊

・・・

宮氏は会見で「7月16日に起きたことは大変ショックだった」と述べたうえで、原発の耐震性について「非常に堅固だった」と解説した。報道陣に「安心したか」と尋ねられると、「安心した。何というか、代え難い実験だったんですね。歴史的な実験かも知れない」と答えた。

・・・・・・

8 2007年秋原子力学会「秋の大会」から、「柏崎刈羽発電所の安全機能は維持されたのかー中越地震による影響と今後について、学会が特別セッション」日本原子力学会誌、Vol49, No10, 4～7頁(2007)

9 佐藤一男『改訂 原子力の安全の論理』101頁、日刊工業新聞社(2006年)

10 佐藤一男、前掲注9の書、94～95頁

11 多重防護(深層防護)の考え方

多重防護のとは軍事用語である。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。多重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。

12 佐藤一男、前掲注9の書、154頁

13 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断に対するECCSの性能を保証するものである。

14 佐藤一男、前掲注9の書、163頁

15 佐藤一男、前掲注9の書、163頁

16 佐藤一男、前掲注9の書、202頁

17 佐藤一男、前掲注9の書、205頁

18 佐藤一男、前掲注9の書、207頁

19 佐藤一男、前掲注9の書、209頁

20 佐藤一男, 前掲注9の書, 206頁

21 科学技術庁原子力安全調査室監修『原子力安全委員会案全審査指針集』63～64頁, 大成出版会 (1994)

上記耐震設計上の重要度分類によるクラス別施設を以下に示す。

|       |   |
|-------|---|
| A クラス | i) 「原子炉冷却材圧力バウンダリ」(軽水炉についての安全設計に関する審査指針について記載されている定義に同じ。)を構成する機器・配管系  |
|       | ii) 使用済燃料を貯蔵するための施設   |
|       | iii) 原子炉の緊急停止のために急激に負の反応度を付加するための施設及び原子炉の停止状態を維持するための施設   |
|       | iv) 原子炉停止後, 炉心から崩壊熱を除去するための施設   |
|       | v) 原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故後, 炉心から崩壊熱を除去するために必要な施設   |
|       | vi) 原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故の際に圧力障壁となり放射性物質の拡散を直接防ぐための施設   |
|       | vii) 放射性物質の放出を伴うような事故の際にその外部放散を抑制するための施設で上記vi)以外の施設<br>なお, 上記Aクラスの施設中特にi), ii), iii), iv)及びvi)に示す施設を限定してAsクラスの施設と呼称する |
| B クラス | i) 原子炉冷却材圧力バウンダリに直接接続されていて一次冷却材を内蔵しているか又は内蔵しうる施設  |
|       | ii) 放射性廃棄物を内蔵している施設, ただし内蔵量が少ないか又は貯蔵方式によりその破損によって公衆に与える放射線の影響が年間の周辺監視区域外の線量限度に比べ十分小さいものは除く                            |
|       | iii) 放射性廃棄物以外の放射性物質に関連した施設で, その破損により公衆及び従業員に過大な放射線被曝を与える可能性のある施設  |
|       | iv) 使用済燃料を冷却するための施設   |
|       | v) 放射性物質の放出を伴うような場合, その外部放散を抑制するための施設でAクラスに属さない施設   |
| C クラス | A, Bクラスに属さない施設  |

## 22 静的地震力

地震力は, 時時刻刻と力が変化するものであるが, これを水平方向にある一定の力が作用するとして置き換えた力。建築基準法では, 建築物の高さや振動特性等によって耐震設計に用いる静的地震力が定められている。

## 23 動的地震力

耐震設計において, 実際の地震と同様に時時刻刻と大きさや方向を変化させながら構造物に作用させる力。

## 24 注20の文献

「解放基盤表面」とは基盤(概ね第三紀層及びそれ以前の堅牢な岩盤であって, 著しい風化を受けていないもの)面上の表層や構造物がないものと仮定した上で, 基盤面に著しい高低差がなく, ほぼ水平であって相当な拡がりのある基盤の表面をいう。

25 注20の文献より, Aクラスの施設は下記に示すS<sub>1</sub>クラスの地震動に耐えることが必要であり, 特にAsクラスの施設はさらに, S<sub>2</sub>クラスの地震動に耐える必要がとされる。

(i) 上記基準地震動S<sub>1</sub>をもたらず地震(「設計用最強地震」という。)としては, 歴史的資料から過去において敷地又はその近傍に影響を与えたと考えられる地震が再び起こり, 敷地及びその周辺に同様の影響を与えるおそれのある地震及び近い将来敷地に影響を与えるおそれのある活動度の高い活

## 原子力発電所の耐震設計における「安全余裕」の意味

断層による地震のうちから最も影響の大きいものを想定する。

- (ii) 上記基準地震動  $S_2$  をもたらす地震（「設計用限界地震」という。）としては、地震学的見地に立脚し設計用最強地震を上回る地震について、過去の地震の発生状況、敷地周辺の活断層の性質及び地震地体構造に基づき工学的見地からの検討を加え、最も影響の大きいものを想定する。

なお、同指針の解説には、 $S_2$  を評価するに当たって、この活断層としては、5万年前以降に活動、又は地震の再来期間が5万年未満のものを考慮しなければならないとし、更に次の事項が加えられている。

「基準地震動の策定に当たって基準地震動  $S_2$  として考慮する近距離地震には  $M=6.5$  の直下地震を想定するものとする。」

- 26 新潟県原子炉安全対策課「設備健全性、耐震安全性に関する小委員会（第2回）議事録」3頁（2008年4月）
- 27 佐藤一男、前掲注9の書、158頁
- 28 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987（社団法人日本電気協会電気技術基準調査委員会）
- 29 注8の文献、6頁
- 30 原子力学会から「地震による設備健全性への影響などの議論－学会が柏崎刈羽発電所と中越沖地震で特別セッション」日本原子力学会誌、vol.50, No6（2008）,16頁
- 31 落合兼寛「原子力発電所耐震設計手法に関する設計実務者へのご質問回答」、新潟県原子炉安全対策課「第3回設備健全性・安全性に関する小委員会」添付資料No.2、新潟県（2008年5月）
- 32 地震が発するエネルギーの大きさを  $E$ （単位：J）マグニチュードを  $M$  とすると  
 $\log_{10}E = 4.8 + 1.5M$
- 33 新潟県原子炉安全対策課「第3回設備健全性・安全性に関する小委員会」議事録、10～11頁、新潟県（2008年5月）
- 34 東京電力「新潟県中越沖地震による柏崎刈羽原子力発電所の『設備健全性、耐震性』に関する健康状況について」、新潟県「第1回 設備健全性、耐震安全性に関する小委員会」添付資料、No.10（2008年3月）
- 35 東京電力「新潟県中越沖地震による柏崎刈羽原子力発電所の『設備健全性、耐震性』に関する健康状況について」、新潟県「第1回 設備健全性、耐震安全性に関する小委員会」添付資料、No.10（2008年3月）
- 36 朝日新聞取材班『震度6強が原発を襲った』134～136頁、朝日新聞社（2007）
- 37 原子力安全・保安院「能登半島地震を踏まえた志賀原子力発電所の耐震安全性確認に関する検討結果について」、「能登半島地震を踏まえた志賀原子力発電所の耐震安全性に関する評価結果について」別添、経済産業省（平成19年8月）
- 38 東京電力「柏崎刈羽原子力発電所7号機原子炉建屋の耐震設計上の安全余裕について」3頁、原子力安全委員会、耐震安全評価特別委員会、第5回施設健全性評価委員会、添付資料5-3（平成20年6月）
- 39 注38の文献、13頁
- 40 注38の文献、9頁
- 41 注38の文献、14頁
- 42 注8の文献、3頁
- 43 地震は地下の岩盤が急激にずれることで生じるが、岩盤のずれは決して断層面全体にわたって一様ではなく、大きくずれるところとほとんどずれないところがある。通常は強く固着しているが、地震時に急に大きくずれるところを「アスぺリティ」を呼ぶ。
- 44 原子力安全基盤機構「2007年新潟県中越沖地震により柏崎刈羽原子力発電所で発生した地震動の分析」37頁、「総合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9回）」添付資料 合同W9-2-1、経済産業省（2008年5月）
- 45 東京電力「柏崎刈羽原子力発電所における平成19年新潟県中越沖地震に取得されたデータの分析及び基準地震動にかかわる報告書」第5章、「総合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9回) 添付資料 合同W9-1-1, 経済産業省 (2008年5月)

46 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>

47 中谷内一也『安全。でも安心できない…信頼をめぐる心理学』ちくま新書 (2008)