

# 原子力発電所再稼働の是非

## Pros and Cons of Resuming the Operation of Nuclear Plant

洪 起

KOH Ki

キーワード：原子力発電所、放射能汚染、自然災害、安全性、リスク、意思決定、最大エントロピー原理

Keywords : Nuclear Plant, Radiation Contamination, Natural Disaster, Safety, Risk, Decision Making, Maximum Entropy Principle

More than one year has passed after the East Japan Earthquake Disaster on the 11<sup>th</sup> of March in 2011, the uncertainty about the safety of nuclear plant due to striking of earthquake and tsunami was pointed out by researchers and the mass media. Many people are arguing about the safety of nuclear plant since then. In this report, the pros and cons of the resuming of operations of nuclear plant after the periodic inspections of it is described from the scientific point of view, predicting the optimum cost needed to secure the safety of nuclear plant on the base of the mathematical science approach.

### 1. はじめに

原子力発電所は、ひとたび地震・津波等の自然現象による損傷・崩壊が起こると、同時に放射能汚染災害が引き起こされ、原発立地地域および近県に甚大な環境被害をもたらす、経済的にも莫大な損害を被ることになる。また、原発稼働後に残される使用済み核燃料の保管および廃炉・解体処分のための膨大な費用および損害額の変動の大きさを想定するならば、原子力発電所建設のための安定した唯一の値としての最適設計パラメータが得られないという理由で、日本国家の責任によるエネルギー政策に基づく原子力発電事業の維持管理・運営を行う場合を除いて、一民間企業の原子力発電事業は利益を追求するビジネスとして成立しないということを、文献 [1] で科学的観点から論及した。

「3.11」の東日本大震災から1年以上が経過し、地震・津波等の自然現象に対する、原発の潜在的危険性および東電の原発の安全対策の不備等が一部の研究者やメディアによって明らかにされたことで、国民の間では、これまで積極的に原発を推進してきた日本政府と東電に対する不信感が大きく広がっている。このような状況の中で、関西電力大飯原発3,4号基（福井県）の定期検査後の再稼働の是非に関する議論が繰り広げられているが、原発の安全性に関する基本的な考え方の違いから再稼働に対する賛成派と反対派に分かれることになり、それぞれの意見の溝は深く、なかなかかみ合わないようである。

福井県と近畿地方を対象にした世論調査 [2] では、各地域の諸事情により多少の差異があるが、全体的に再稼働反対派が

上回っているようであるが、意外なことは、原発立地地域で賛成派が多いことである。その理由としては、原発の安全性に関する不安よりも、むしろこれまでの安定した電力供給を通して、原発は地域経済、雇用、事業および日々の生活に深く組み込まれており、原発なしでは生活が立ちゆかなくなり、背に腹はかえられぬ思いがあったからであろう。また、再稼働しなくても、原発立地地域内に高レベルの放射能廃棄物と核燃料が既に貯蔵されており、自然災害による放射能汚染事故に対する相当のリスクが存在していることを認識しているからであると思われる。

一方、反対派は、その主な理由としては「安全でないから」ということであるが、心底では福島原発事故調査委員会の事故検証も道半ばであり、まだ最終報告書も出ていない状況下で再稼働すれば、再び大事故が起きる可能性があり、原発の安全性に大いに不安を感じているからと思われる。

この世論調査で見えてくるのは、全国で最も多くの原発を抱える福井県で原発を段階的に減らし、将来は止めるという脱原発志向が進んでいる様子が浮かんできていることであり、また再稼働しない場合は、節電や一時計画停電もやむを得ないとの意見が77%に達し、節電意識がかなり高いことである。これは、原発の安全性に関する不安を払拭したいという気持ちの表れであり、核廃棄物の最終処分を含めて、人間の力で完全にコントロールできない原子力を基幹電源としたエネルギー政策に未来はないということを理解し始めた結果であると思われる。節電や計画停電を一度経験すれば、これほどの数値にはならないだろうと云う原発推進派の意見もあるが、特別な野心のない一般市民はおおむね賢明な判断を下すものである。

各県の関係委員会は原発再稼働に対する住民の不安解消のために、住民の安全・安心の確保を最優先に対応することを求める意見書を電力会社に提出しているが、ここに、双方で安全・安心をどのように理解しているかという問題が生じる。世論調査では、原発は安全でないから、原発の再稼働に反対という意見が多かったが、恐らく、心情的に安全でないから安心できない、安心できないから心配で再稼働に反対であるということであろう。日本人は、一般的に心配性で、安心に対する欲求が大変強い。日本人は保険好きと云われる所以もここにある。この安心を求めるあまり、原発は安全か安全じゃないのかの単純な二者択一の理念で再稼働の是非を判断しようとしている人が多いのかも知れない。国民の安心が得られるように努力することは大変重要なことであるが、安心は人間一人ひとりの心の問題であり、安心の度合いも人によって異なるので、容易なことではない。もし安心が得られる何らかの方策を立てようとするならば、原発事故保険のようなものが必要になり、莫大な費用と時間がかかるだろう。因みに、どんな種類の保険も確定的利益が得られる数理モデルにより運用されているので、保険会社は損をしない仕組みになっているが、原発事故を対象にした場合は、確定的利益が得られる数理モデルの構築は困難であると思われるので、保険会社は敬遠するだろう。

一方、安全とは、科学の対象になる用語であり、基本的には相対的世界で論じられるもので、絶対的世界で論じられるものではない。それ故、絶対安全という用語は意味をなさないし、安全か安全じゃないのかのような一組のゼロカイチによる2進法的表現では、原発の安全性に関する情報を正確に伝達することはできない。

原発再稼働の是非に関する議論において前提条件となるのが、原発に潜む潜在的危険性に関する意識レベルの共有化であろう。これまでの議論で意見がかみ合わないのは、この意識レベルを共有していないからであろう。そのためには、原発の危険性の度合い、いわゆる事故率を数理科学的手法で数量化し、普遍化

しておく必要がある。その一つとしてリスクという概念がある。

一般に、科学技術の進歩は人間に便利さと幸せをもたらすが、時には大きなリスクをもたらすことがある。身近な乗り物の飛行機は大変便利で広く利用されているが、ひとたび事故が起きると、乗客の多くが死に至る大惨事が起きる。このように、通常、安全とされている飛行機も絶対安全ではなく、過去の事故例からも分かるように墜落に対する相当のリスクが存在するのである。日本では、飛行機は当初、恐れと不安のあまり乗るものではなく、見るものであると云われていたそうである。最近、アフリカのジンバウエで、スリルを経験し楽しむバンジージャンプのロープが切れる事故があった。無事、落下した女性は助かってよかったが、絶対安全と云われていたバンジージャンプも事故発生のリスクが存在するのである。

そもそもリスクとは、自由意思である行動をおこす場合、不確定にしか予見できない事象により遭遇する危険及び被る損失の可能性を意味し、そこには責任が伴う。リスクという概念は、責任の所在を明確にしたがらない日本社会ではなかなか馴染まないようであるが、その意味を理解したうえでリスクを共有することができれば、お互いの理解に基づく信頼のうえで、これまでと異なるより深い論議がなされると思われる。暫定安全基準案で規定された安全対策を講じることで、従来のリスクと比べて半分になるとかまたは一桁低い値になるというように、具体的数値を用いた相対的評価により再稼働に対するリスクを評価することができれば、原発の安全性向上を相対的にイメージでき、また安全性に関する理解も深まることになるかも知れないのである。そうすれば、再稼働に関わる議論もこれまでとは異なった様相を示した筈であり、仮に事故が発生しても、事故処理に関わる種々の手続きにおいて合理的かつ効率的な対応が可能になると思われる。

原発のリスク評価の現状は、原発の機械装置システムの故障などの内部要因によるリスク評価は既になされているが、地震・津波等の外部要因に対しては、解明しなければならない不確定要因が多く、まだなされていないようである。しかしながら、今後、原発ばかりでなく、今後も起こりうる同種の問題等に対する危険度を客観的に理解し共有するためにも、総合的リスク評価システムの研究開発が望まれる。リスクの正しい解釈に従えば、リスクの対象となる事象が発生したことにより、被害・損害を被るものに対しては事前に再稼働に対する同意を得る必要が生じ、またそれに対する責任も生じる。因みに、従来の安全神話に基づく絶対安全の世界では、同意と責任が生じる余地はない。

現在、原発再稼働の是非に関する問題は、主に原発の安全性に注目した一元的議論になっているが、地球環境問題という大きな枠組みの中で考えると、現在、原発の代用としてフル稼働している火力発電を含めて、電力供給システム全体に関する多元的議論が必要である。確かに、原発が事故を起こせば、放射能汚染災害を引き起こす恐れがあり、広範囲の地域環境を破壊する。一方、核燃料の代わりに化石燃料を用いた火力発電は、地球温暖化の原因となる二酸化炭素を増加させる。二酸化炭素が増加し地球温暖化が進めば、熱帯低気圧（台風、サイクロン、ハリケーン）の強度変化を増幅させ、地球環境を破壊する。異論を唱える研究者もいるが、最近の地球規模の異常気象の原因にもなっている。放射線による大気汚染の危険性と同時に、二酸化炭素は200年間は大気中に留まると云われているように、化石燃料による大気汚染の危険性もあり、いずれの発電も地球環境破壊という一面を有している。それ故、核燃料による原子力発電および化石燃料による火力発電は、地球環境破壊という面から考えると、どちらにもリスクがあり、好ましい電源では

ない。

福島原発事故前までは、原発は温室効果ガスの主要成分である二酸化炭素を削減し、地域温暖化を阻止する電源として位置づけられ、地球環境を守る切り札として見なされていたのである。さらに、日本政府は、世界的なエネルギー転換の趨勢に従い、石油や石炭の化石燃料等を電源とする電力供給システムから脱し、再生可能エネルギーに基づく低炭素社会への移行を念頭に、温室効果ガスを2020年までに25%削減する目標を掲げ、原発シェアを2030年までに50%に高めるべく努力を行っていた最中であり、福島事故はこのような状況下で発生したのである。

それ故、政府首脳は、これまでのエネルギー・環境政策を踏襲した電源としての原発の必要性を強調し、経産省原子力安全・保安院による大飯原発再稼働のための暫定安全基準案で規定された安全対策に基づき、関西電力に免震棟、フィルター付きベント設備および防波堤のかさ上げ等の安全確保のための処置に関する実施計画の提出を求め、その内容のみを精査することで再稼働決定の判断を下した。事故調査委員会の最終報告書が提出されていない段階で、早々再稼働を決定した手順に問題はあがあるが、これまでのエネルギー・環境政策を堅持し、以前の大量の二酸化炭素排出社会に戻さないためにも、再稼働決定の判断は止むを得ないことであろう。

しかしながら、福島原発事故が自然環境と社会環境に与えた甚大な被害と、未だ原発事故が収束していないという現実および原発立地地域住民の人権等を考えれば、事故調査委員会の最終報告書が提出された後、事故原因の究明を待って、安全確保のための処置を実施した後に再稼働決定の判断を下すべきであろう。このような手順を取らずに、早々に再稼働を決めたのは、国民が抱く原発の安全性に関する不安の払拭よりも、再稼働の判断を遅らせた場合の経済的損失を問題視したのでであろう。ことの道理より経済的損失を優先した結果である。

過去に、一部の研究者によって核エネルギー開発に対する反対運動が展開されたが、国民の多くは経済発展に必要な電源として核エネルギー開発を黙認した経緯を考えれば、原発事故が起きたから原発反対・再稼働反対と主張するのはかなり身勝手と云わざるを得ない。残念ながら、この辺の事情をよく分かったうえでの判断が、早々の再稼働決定なのかも知れない。

今後は、ひとたび原発事故が起きれば、福島のような甚大な被害が発生することを教訓として、日本の将来の経済社会を念頭にいった新しいエネルギー・環境政策の枠組みの中で、原発の位置づけおよび電源の構成比率等を国民的議論を通して熟考する必要があるだろう。

原発再稼働の是非の判断を下す問題は、数理科学的観点から述べると、一つ的意思決定問題と見なすことができる。ここからは、このような観点からこの問題を考えてみよう。

通常、意思決定問題は複数の選択肢があり、その中の一つの選択肢を選んだときに予想される期待利得（利得の期待値）の最大化を図るアプローチが用いられ、ゲーム理論で応用されている。しかしながら、福島原発事故後の被害状況と、事故災害による莫大な損害額を考えれば、利得ではなく、利得と双対関係にある損害額を用いて、その最小化を図る意思決定問題として論じたほうが得策であろう。それ故、ここでは原発事故が発生したときの損害額の最小化を図るアプローチにより、原発再稼働の是非の判断に関する問題を論及する。

自然災害や電力不足により生じる事象は確定的事象ではなく、不確定要因を含んだ確率的事象であるから、これらの事象により生じる損害額は確定的に評価できない。それ故、確率空間で定義される期待値という概念を用いて、原発再稼働の是非の判断において予想される主な損害額の期待値を列挙してみる。

(A) 再稼働を是とする場合の損害額の期待値

- (1)  $a_1 = (\text{電力不足が起きた場合の損害額}) \times (\text{電力不足が起きる確率})$
- (2)  $a_2 = (\text{原発事故が起きた場合の損害額で、損害賠償金を含む}) \times (\text{原発事故が起きる確率})$
- (3)  $a_3 = (\text{再稼働に必要な安全対策費}) \times (\text{この事象が生じる確率で、ほぼ1とする})$

(B) 再稼働を非とする場合の損害額の期待値

- (1)  $b_1 = (\text{電力不足が起きた場合の損害額}) \times (\text{電力不足が起きる確率})$
- (2)  $b_2 = (\text{原発事故が起きた場合の損害額で、損害賠償金を含む}) \times (\text{原発事故が起きる確率})$
- (3)  $b_3 = (\text{再稼働を非とすることで原発立地地域に生じる種々の損害額}) \times (\text{この事象が生じる確率で、ほぼ1とする})$
- (4)  $b_4 = (\text{電力会社に与える損害額}) \times (\text{この事象が生じる確率で、ほぼ1とする})$

再稼働を是とした場合も、何らかの電力環境の変化により電力不足が生じる可能性はゼロではないので、両方の側に電力不足による損害額を計上した。尚、電力不足が起きる確率が大きい(B)の損害額  $b_1$  が(A)の損害額  $a_1$  より大きくなるのは当然である。また、同様に、原発事故が起きた場合の損害額も両方の側に計上した。再稼働を非としても、前述のように、原発立地地域には高レベルの放射能廃棄物と核燃料を貯蔵しているため、事故の程度によっては、それ相当の損害が発生する恐れがあるからである。

原発再稼働の是非の判定式は、損害額の期待値の和が小さい方が経済的に合理的な選択であるとすれば、前述の(A)と(B)から、次式で表すことができる。

$$\begin{aligned} a_1 + a_2 + a_3 < b_1 + b_2 + b_3 + b_4 & \quad \text{ならば、再稼働は是} \quad (1-1) \\ a_1 + a_2 + a_3 > b_1 + b_2 + b_3 + b_4 & \quad \text{ならば、再稼働は非} \quad (1-2) \end{aligned}$$

日本政府としても、確率1で原発事故が生じた場合の損害額  $a_2$  は甚大であることは十分に承知しているが、原発事故が起きる確率は短期的には極めて小さいと判断したと思われる。それ故、政府は再稼働を是とした場合の損害額の期待値の和が小さい、すなわち、(1-1)式が成立すると見なして、再稼働を決定したのであろう。さらに、 $b_3, b_4$  は、この事象が生じる確率がほぼ1であるから、確定的損害額になる。再稼働を非として廃炉を決定すれば、解体処分のための費用のみがかかる不良資産となり、短期的には会社運営に致命的な損害をもたらすと予想されることも、再稼働を是とした理由であらう。東電役員が「再稼働しないとむしろもったいない」という妄言があったが、これは、この裏返しである。その他にも、原発を推進する立場にある人による妄言が繰り返され、新聞、テレビ等で報道されているが、これらは相対化社会が生んだ産物と言っていいたいだろう。

(1-1)式と(1-2)式の不等式に含まれる損害額は不確定性を含み、一般に正確な評価は困難である。特に、 $a_2$  の損害額は不等式の成立に大きな影響を与える。専門家による検討会では、大飯原発が集中する福井県敦賀半島近傍で、複数の活断層の連動によっては予想より大きな規模の地震の揺れが生じる可能性があると言及されており、さらに原発の真下に走っている新しい断層の発見に関する結論もまだ出ていない段階にある。それ故、原発立地地域で予想される地震・津波の規模は不明であり、またこの生起確率の評価によっては、 $a_2$  が極めて大きくなる。この場合は、不等号が逆転し(1-2)式が成立するので、

再稼働は非ということになる。

本報告は、原発再稼働の是非の判断において、それぞれの事象に含まれる不確定性により判断の結果がどうなるかははっきりしない状況下にあるとき、間違った判断を下さないための意思決定プロセスを表す数理モデルを提案する。さらに、原発再稼働時に必要な初期投資額を定義し、その中に占める最適な安全対策費を数理科学的手法により推定し、原発再稼働に対する賛成派と反対派の考えの深い溝から抜け出す打開策を科学的観点から論じることで、原発再稼働の是非の議論に加わることとする。

## 2. 原発再稼働の是非に関する数理モデル

この項では、数理社会学の分野で示されている信頼に関する比較的単純な数理モデル[3]を拡張して、原発再稼働の是非を判断するための数理モデルを提案する。

一般に、数理モデルを構築する場合、出来るだけ少ない要素で現実の現象を説明できることが望ましいので、ここでは、原発再稼働の是非の判断を下せる立場にある日本政府と電力会社(以後、代表して、日本政府とする)と、日本政府の信頼に応えて安定的に稼働することができるか否か不明な原発の2つの要素を用いることにする。

Fig.1で示したように、再稼働の是非を判断するための前提条件として、はじめに、日本政府は原発の安全性を信頼するか否かを選択する。信頼しないという選択肢は形式的な選択肢を示したもので、原発に潜む潜在的危険性を危惧し、原発は非という考えに基づく選択肢で、再稼働も非という立場を表す。しかしながら、原発を推進してきた日本政府の立場からすれば、仮に、その安全性に何らかの不安を感じていたとしても、信頼しないという選択肢を選ぶことはできない。

一方、信頼するという選択肢はこれまでの電力安定供給の実績を鑑み、福島原発事故を教訓として制定された暫定安全基準案に基づいて十分な安全対策を講じれば、その安全性は信頼されるだろうという立場を表す。

次の選択肢で示されている(1-1)式と(1-2)式の損害額の期待値の定量的評価が可能であれば、前述のように、損害額の和が小さいほうが経済的に合理的な選択であるという条件のもとで再稼働の是非の判断が下せる。しかしながら、これらの定量的評価が困難な場合は、総合的評価に基づく政治的判断以外、再稼働の是非の判断は下せない。この場合は、再稼働は是と見なして次の選択に移る。

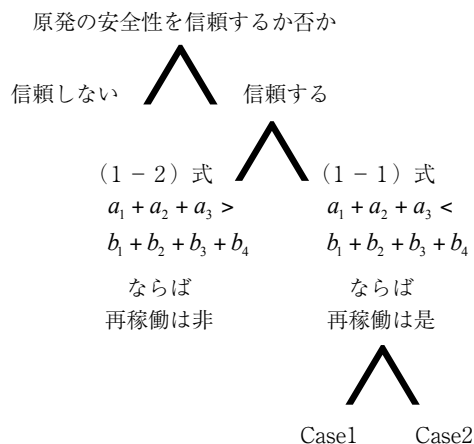


Fig.1 原発再稼働の是非に関する数理モデル

原発再稼働を是とした場合、次の Case1 と Case2 の 2 つの状況が想定される。

Case1：暫定安全基準案で規定された安全対策を講じて再稼働したが、安全対策が不十分であったため、原発は日本政府の信頼を裏切り、原発事故を起こしてしまう場合 ( $P_1$ )

Case2：安全対策が十分であったため、日本政府の信頼に応じて、安定的に稼働する場合 ( $P_2$ )

原発事故が一度起きてしまった以上、原発の安全性に関する不確定性が存在し、相当のリスクが存在することがはっきりしたのである。結局、日本政府が原発の安全性を信頼し再稼働を決定しても、原発はその信頼に応じて安定的に稼働するとは限らないし、安全対策の内容によっては政府の信頼を裏切ることはあり得るのである。Fig.1 はこの状況を表している。

原発には、人間と同様な意思があるわけではないが、信頼に応えようとする意志の度合いは安全性を確保するために投資される金額に比例するものと見なしても自然である。このような条件を仮定すれば、Case1 は、原発の安全確保のための資本投資が不十分であるため、日本政府の信頼を裏切り事故を起こしてしまう場合に相当し、また、Case2 は、資本投資が十分であるため、日本政府の信頼に応じて安定的に稼働する場合に相当する。

ここで、次のような初期投資の配分に関する問題を考えてみる。

原子力発電所建設には、大規模な初期投資が必要になる。原発再稼働を、この初期投資を回収するための経済活動とすれば、長期的かつ安定的に原発を稼働させる必要があり、そのための安全対策は必須である。再稼働後に安全対策が不十分であったために原発事故を起こすようなことになれば、初期投資の回収が不可能になるばかりでなく、会社の存続危機はもとより、自然環境および社会環境にもたらす甚大な被害を想定すれば、絶対に回避しなければならない。しかしながら、一方では、再稼働は電力会社の初期投資を回収するための経済活動でもあるから、利益確保も考慮しなければならない。そのため、あまり多くの費用を安全対策に投入することはできない。ここで、再稼働時にどの程度の資金を安全対策に投じれば、安全性の確保は可能であり、同時に事業利益も得られるかという配分に関する問題が生じる。

今回の大飯原発再稼働は建設時より高い安全性を確保するという条件のもとでの発電事業の再開であるから、無論、それ相当の初期投資が必要であり、この初期投資を必要とする投資対象にどの程度の比率で割り当てるかに関する配分問題である。ここでは、初期投資の配分対象として、破壊 (Case1) と非破壊 (Case2) の 2 つの排反事象系を想定し、それぞれの事象にどの程度の比率で配分するかを考えてみる。Case1 の事象が生じた場合に必要費用は損害賠償金等を含む事故処理対策費であり、Case2 の事象が生じた場合に必要費用は安全確保を図るうえで必要な安全対策費である。最終的に、初期投資額の中で安全対策費が占める比率が大変高く、事業展開上受け入れがたい比率になった場合は、この時点で再稼働は非という選択肢が生じる。

初期投資を Case1 と Case2 の 2 つの事象系に配分する比率は、不確定な確率空間で推定されるため、ここでは、この比率を配分確率とする。これについては次項で述べる。

### 3. 配分確率の決定

原発再稼働に伴う初期投資に関する問題設定をより簡単にするために、原発を再稼働することで、発電事業を新たに立ち上げる場合を想定する。再稼働による事業開始に際して、地震・

津波等の自然現象により予想される全損害額の期待値は、原発が崩壊し、原発事故を起こしたときの賠償金を含む損害額の期待値と、原発の資産 (暫定安全基準案に基づいて実施される安全対策に要する費用を含む) の和で表されるだろう[1],[4],[5]。ここでは、原発のような重要建築物と一般建築物を対象にして相対的に論じるために、次のような表現式を用いる。

$$C_D = nC_1 \left( \frac{P_f}{l} \right) + mC_2 \quad (3-1)$$

ただし、 $C_D$ ：原発建屋が崩壊し、原発事故を起こしたときに予想される全損害額の期待値

$nC_1$ ：原発建屋が崩壊したときの損害額で、そのときに予想される損害賠償金等を含む

$mC_2$ ：再稼働時の原発の残存価値で、暫定安全基準案に基づいて実施される新たな安全対策に要する費用を含む、または原発の建設費

$P_f/l$ ：再稼働後に、原発事故を起こす確率

尚、原発のような重要建築物の場合は  $n, m, l > 1$  であり、 $n = m = l = 1$  の場合は一般建築物を表す。

(3-1) 式は前記の (A) で示した原発再稼働を是とした場合に予想される損害額の期待値である。(1-1) 式の  $a_1$  の損害額の期待値は (3-1) 式の右辺と比べて十分小さいと見なして無視する。(3-1) 式の右辺の第 1 項と第 2 項は  $a_2$  と  $a_3$  に対応する。また、発電事業開始時に予想される全損害額であるため、再稼働後の定期検査・補修等の費用は考えていない。 $mC_2$  は原発の残存価値を表すが、乱暴な評価をすれば、原発建設費から再稼働までの回収分を差し引き、暫定安全基準案に基づいて実施される新たな安全対策に要する費用を加えたものと見なすこともできるだろう。また、原発建設時に予想される損害額を想定する場合は、 $mC_2$  は原発建設費になる。種々の技術開発のための研究費は建設費に含まれる。

(3-1) 式的全損害額の期待値は、原発再稼働による事業をおこすときに予想される出費の期待値でもある。この出費は事業開始時の初期投資額と見なすこともできるから、(3-1) 式と同様な表現式を用いて初期投資額を表すことは可能である。それ故、初期投資額を APPENDIX の (A-1) 式で表されるものとしよう。無論、このような表現式を用いることで一般性が失われることはない。

(A-1) 式の右辺の第 1 項は、原発事故が生じたときに予想される損害賠償金を含む損害額に配分確率  $P_1$  を乗じた額で、賠償のための保険金または積立金等を念頭において初期投資額に組み入れたものである。さらに、 $mC_2$  には、安全確保を図るための費用以外にも、建設中に生じる不測の事態や事故のための保険等の費用も含まれていると見なし、 $C_f$  を破壊と非破壊、言い換えれば、事故発生と安全確保の 2 つの排反事象系を想定したときに必要費用をどの程度の配分確率で割り当てるかという問題に置換するために、(A-2) 式のように変形する。(A-2) 式の右辺の第 1 項は、Case1 の事象が生じたときの賠償金等に必要な費用として予想される事故処理対策費であり、第 2 項は、Case2 の事象が生じるために必要な費用として予想される安全対策費である。

現在、原発再稼働の是非に関する議論が繰り返されているが、賛成派と反対派の意見はなかなかみ合わず、溝は大変深い。その主な理由は、双方の立場で全く異なった欲求を心に抱いているからである。賛成派は、その代表として電力企業側から述べると、原発建設時に投入した大規模な初期投資を、再稼

働によりなるべく早く回収したいという欲求であり、反対派は、原発の安全性に関する不安をなるべく早く払拭してほしいという欲求である。この2つの欲求を満足させる論理を組み入れた定式化が可能であれば、双方の溝を埋める何らかの打開策が生まれる筈である。

賛成派の初期投資を早く回収したいという欲求は、(A-2)式で表される初期投資額の期待値  $C_T$  を最小にすることで事業利益を確保し、回収を早めることができるものとすれば、そのときの定式化は(3-2)式になる。

次に、反対派の原発再稼働の安全性に関する不安を払拭してほしいという欲求を、どのような論理構成に基づき定式化できるかを考えてみる。

現在の科学的知見では、地震・津波等の自然現象に含まれる未知な多くの不確定要因のために、それらを確定的事象として定義できるまでには至っていない。地震・津波等の外部要因を対象とする限り、原発の破壊および非破壊は確定的事象ではなく、不確定事象として確率空間のなかで評価されなければならない。それ故、原発の非破壊を意味する安全確保を維持し、不安を払拭してほしいという欲求は、確率空間への写像を通して確率空間の中で実現されなければならない。

原発の安全性は、そのために投資される安全対策費に依存するが、これらを確定的に関係づけることは全く困難であり、確率空間の中で安全対策費を規定する配分確率の組み合わせを確定的に決めるための有効な科学的知見もない。そのため、(3-2)式を満たす  $P_1, P_2$  の中から一つの組み合わせを選ぶことは大変複雑であり、困難でもある。このような場合、Case1 と Case2 のそれぞれの事象系が有するあいまい性が最大、すなわち一番複雑な事象を表す最大エントロピー事象を想定しておくことは賢明であるという原理がある [6]。

最大エントロピー原理は確率空間の中で定義されるものであり、この原理より決められた配分確率であれば、そこには、安全性に関する従来型の先入観や事業利益追求のための企てがないということで、安全性に関する政府不信に基づく不安は払拭されるものと仮定しよう。そのときの定式化は(3-3)式になる。

$$C_T = (nC_1 + mC_2)P_1 + mC_2P_2 \Rightarrow \text{最小化} \quad (3-2)$$

$$H = -P_1 \ln P_1 - P_2 \ln P_2 \Rightarrow \text{最大化} \quad (3-3)$$

条件式：  $P_1 + P_2 = 1$

ただし、  $C_T$ ：初期投資額の期待値

$H$ ：情報論的エントロピー

$P_1$ ：Case1の事象が生起する場合で、 $nC_1$ と $mC_2$ の和の中で損害賠償等のために必要な費用が占める比率を表す配分確率

$P_2$ ：Case2の事象が生起する場合で、 $mC_2$ の中で安全確保を図るうえで必要な費用が占める比率を表す配分確率

尚、 $n = m = 1$ の場合の  $P_1, P_2$  は一般構造物の配分確率

(3-2)式と(3-3)式を同時に満足させる式は、次式で表現されるとしても矛盾は生じない。

$$F = \frac{C_T}{H} \Rightarrow \text{最小化} \quad (3-4)$$

条件式：  $P_1 + P_2 = 1$

(3-4)式の  $P_1, P_2$  に関する2回微分は正であるから、最小値は存在する。ここで、Lagrangeの未定乗数  $\lambda$  を用いると、(3-4)式の解は次式から得られる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial P_1} [F + \lambda(P_1 + P_2 - 1)] &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial P_2} [F + \lambda(P_1 + P_2 - 1)] &= 0 \end{aligned} \quad (3-5)$$

上式から得られる  $P_1, P_2$  を最適配分確率  $P_{1,opt}, P_{2,opt}$  とすれば、次式になる。

$$\begin{aligned} P_{1,opt} &= \frac{\exp\left\{-\frac{nC_1 + mC_2}{C_T} H\right\}}{\exp\left\{-\frac{nC_1 + mC_2}{C_T} H\right\} + \exp\left\{-\frac{mC_2}{C_T} H\right\}} \\ P_{2,opt} &= \frac{\exp\left\{-\frac{mC_2}{C_T} H\right\}}{\exp\left\{-\frac{nC_1 + mC_2}{C_T} H\right\} + \exp\left\{-\frac{mC_2}{C_T} H\right\}} \end{aligned} \quad (3-6)$$

$$\text{ただし、} H = -P_{1,opt} \ln P_{1,opt} - P_{2,opt} \ln P_{2,opt}$$

さらに、上式から次式が得られる。

$$K \frac{C_1}{C_2} = \frac{1 - \frac{P_{2,opt}}{H} \ln \frac{P_{1,opt}}{P_{2,opt}}}{1 + \frac{P_{1,opt}}{H} \ln \frac{P_{1,opt}}{P_{2,opt}}} - 1 \quad (3-7)$$

ただし、 $K = \frac{n}{m}$  で、 $C_1/C_2$  の倍率を表す

$K = 1$  の場合は一般建築物を表す

(3-6)式または(3-7)式から得られる配分確率は、原発再稼働の賛成派と反対派が抱くそれぞれの欲求を同時に満たすことを条件に、数理科学的手法により推定された最適配分確率であり、 $mC_2P_{2,opt}$  は初期投資額の中で安全確保を図るうえで必要な最適費用になる。この費用が高額になり、事業計画上受け入れがたい額になる場合は、前述のように、この時点で再稼働は非という選択肢が生じる。

本報告で提案した数理モデルには時間的な概念が入っていないという意味で、かなり乱暴である。(3-2)式の配分確率が一瞬で均衡する系として評価されているため、時間的な概念が考慮されていない。しかしながら、古典的経済学における市場均衡等の問題でも時間的な概念は考慮されていない。本来は、複雑系としての数理モデルが望ましいのは無論である [7], [8]。

#### 4. 原発再稼働の是非に関する判断

この項では、初期投資額の中で安全確保を図るうえで必要な最適費用を表す安全対策費を、(3-6)式または(3-7)式から求め、原発再稼働の是非の判断を下すことにする。

最初に、 $mC_2$  が建設費を表す場合について述べる。それ故、この費用の中には新たな安全対策費は含まれない。

表1は(3-6)式から得られる  $P_{1,opt}, P_{2,opt}$  と一般建築物 ( $K = 1$ ) を対象にして、 $(C_1 + C_2)/C_T, C_2/C_T, C_1/C_2$  のそれぞれの比率を表にして示した。この表から  $C_1/C_2$  が大きいほど、すなわち一般建築物の建設費と比べて一般建築物が崩壊したときの損害賠償金等が大きくなるほど、 $P_{2,opt}$  が大きくなり安全確保を図るう

えて多額の資金を建設費の中に組み込まなければならないことを意味する。 $C_2 P_{2,opt}$  は数理科学的手法により推定された安全確保を図るうえで必要な費用であり、建設時に必要とされる最適安全対策費とも言える。

表 1  $K = 1$  の場合の最適配分確率

$P_{1,opt}$	$P_{2,opt}$	$\frac{C_1 + C_2}{C_T}$	$\frac{C_2}{C_T}$	$\frac{C_1}{C_2}$
0.1	0.9	7.084	0.324	20.86
0.15	0.85	4.486	0.385	10.65
0.2	0.8	3.218	0.445	6.23
0.25	0.75	2.496	0.511	3.88
0.3	0.7	1.970	0.584	2.37
0.35	0.65	1.622	0.665	1.44
0.4	0.6	1.361	0.759	0.79
0.45	0.55	1.161	0.869	0.34
0.5	0.5	1.0	1.0	0.0
0.55	0.45	0.869	1.161	—
0.6	0.4	0.759	1.361	—
0.65	0.35	0.665	1.622	—
0.7	0.3	0.584	1.970	—
0.75	0.25	0.511	2.496	—
0.8	0.2	0.445	3.218	—
0.85	0.15	0.385	4.486	—
0.9	0.1	0.324	7.084	—

一般に、建設時の構造計算の段階で、建築物の安全性を表す指標として安全率が用いられている。一般建築物の安全率は、建築物が崩壊したときの損害額が、概ね建設費の 10 倍程度の倍率を想定して決められているとされている。想定する損害額が大きいほど安全率は高くなる。言い換えれば、想定する多額の損害額の支払いを回避するために、安全率を大きくとり建築物の崩壊を回避する考え方である。そこで、この倍率を表すパラメータは  $C_1/C_2$  の比率で表されるものとすれば、表 1 から  $C_1/C_2$  が 10 のときの  $P_{2,opt}$  の値は 0.844 (84.4%) になる。これは、一般建築物の建設時において、建設費  $C_2$  の 84.4% が安全確保を図るうえで必要な費用であることを意味する。表 1 は、初期投資額の配分対象を単純化し、破壊と非破壊の 2 つの排反事象系のみを対象にして推定した値であるため、現実の状況を正しく評価したものではないだろう。実際はもう少し低い比率になっていると思われる。

表 2  $P_{2,opt}$  の値 ( $C_1/C_2 = 10$ 、単位：%)

$K$	1	2	3	4	5	6
$P_{2,opt}$	84.4	89.4	92.1	93.5	94.5	95.2

表 2 は  $C_1/C_2 = 10$ 、 $K = 1, 2, 3, 4, 5, 6$  で、原発のような重要建築物の場合の  $P_{2,opt}$  の値を示した。 $K$  は建築物の重要度を  $C_1/C_2$  の倍率で表したパラメータである。 $K = 1$  は一般建築物の場合であり、前述のように、 $C_1/C_2 = 10$  に対する  $P_{2,opt}$  の値は 84.4% である。 $K = 2$  は一般建築物の  $C_1/C_2$  の 2 倍 ( $C_1/C_2 = 20$ ) の損害額を想定する程度の重要性を有することを意味する。

重要建築物である原子炉建屋の構造設計で用いられている安

全率 3 は、原子炉建屋が崩壊したときの損害額が一般建築物のそれよりかなり大きくなることを想定して決められている。それ故、一般建築物の  $C_1/C_2$  よりさらに 2～6 倍大きくなる場合を表す  $K = 2, \dots, 6$  のときの  $P_{2,opt}$  を示した。そのときの値はそれぞれ 89.4%, 92.1%, 93.5%, 94.5%, 95.2% となり、 $mC_2$  の中で安全確保を図るうえで必要な費用が占める比率は、ほぼ 90% 以上の相当高い値を示す。 $K = 5$  より大きい場合は約 95% 以上となり、安全確保を図るうえで必要な費用が大部分を占めることになる。

原発建設費は同規模の一般建築物と比べるとかなり高額であり、また、前述のように、原発建設費の中で安全確保を図るうえで必要な費用が占める比率も極めて高い。これは、核反応装置の安全運転と核廃棄物の安全保管、およびこれらの装置等が設置されている原子炉建屋の安全性への十分な配慮のために高額になっている。文献 [9] でも示されているように、原発建設費の大部分は安全を確保するための安全コストであるという指摘を裏付けるものである。

以上のことから、初期投資額の中で安全確保を図るうえで必要な費用が占める比率により、安全確保の意識レベルの度合いを概ね推定することができることを示した。

次に、大飯原発 3, 4 号基の再稼働に際して、暫定安全基準案に基づく新たな安全対策が実施されたときの安全確保の意識レベルを、同様な観点から考察してみる。この場合の  $mC_2$  は新たな安全対策費を含めた残存価値を表す。

大飯原発の残存価値を評価することは難しい。それ故、ここではかなり乱暴であるが、再稼働までの回収分を無視し、原発の残存価値として、大飯原発建設費 (3 号基：平成 3 年建設で建設費は 4600 億、4 号基：平成 5 年建設で建設費は 2500 億) から算出される平均的建設費を用いて、3500 億円程度とし、この費用の中には再稼働時の新たな安全対策費を含むものと仮定する。

東電によると、2012 年 4 月の時点で原発事故の賠償に必要な総額は 2 兆 5500 億円程度と見込んでいるが、崩壊した原発の解体処分および除染のための費用は含まれておらず、最終的に、原発事故の賠償金は 5～6 兆円以上の規模に膨れ上がる可能性があるとされている。それ故、賠償金を含めた損害額を  $K$  の値で換算すれば、1.43～1.71 より大きくなる。一般建築物は  $K = 1$  であり、その倍程度であるから、あながち間違った倍率ではないだろうが、原子炉建屋の設計で用いられている安全率 3 はそれより大きい損害額を想定したときの数値であると思われる。

しかしながら、この賠償金は被災者に相当な忍耐と苦渋を強いた場合の見込み額であり、大飯原発再稼働後に、仮に再度、原発事故を起こすようなことになれば、被災者に対する財政的、制度的責任は福島原発事故時のそれよりかなり大きなものになるし、無論賠償金もさらに増大するだろう。

今回、暫定安全基準案に基づく新たな安全対策を講じることを条件に大飯原発の再稼働が決定されたが、仮に再度、原発事故を起こすような事態になった場合、どの程度の損害賠償金が発生するのか、また新たな安全対策を講じることにより、どの程度の損害額を想定することになるのかは、無論不明であるが、前述の原発の残存価値及び福島原発で予想される損害額から推定して、 $K$  は 2 より大きくなると想定しても自然であろう。言い換えれば、 $K$  が 2 より大きい損害額の支払いを回避するために、新たな安全対策を講じたと云うことになる。

ここで、大飯原発建設時に想定した損害額として  $K = 2$  を仮定すれば、新たな安全対策後の損害額  $K = 3, 4, 5, 6$  に対する  $P_{2,opt}$  の増加分、すなわち再稼働のための新たな安全対策費は、表 2 から 2.7%, 4.1%, 5.1%, 5.8% になる。金額にすると、それぞれ 94.5 億円、143.5 億円、178.5 億円、203 億円になる。因みに、福

島原発電事故後の安全対策のための見込額は、公表分だけで原発50基に対して計5000億円に達し、1基当たり概ね100億円（尚、関西電力は11基で、2000億円超）程度になっていることを考えると、少し乱暴な解釈をすれば、想定した損害額 $K$ が2から約3（100億円程度に相当する値）に大きくなったことになり、原発再稼働時の安全確保の意識レベルは建設時のそれと比べて1.5倍程度大きくなっていることを意味する。また、原発建設時にもう少し大きい損害額を想定して $K=3$ とすれば、同様にして $K=4,5,6$ に対する $P_{2,opt}$ の増加分は、金額にするとそれぞれ49億円、84億円、108.5億円となり、安全対策費100億円に相当する $K$ は6程度に達し、建設時に想定した損害額の約2倍になる。結局、この場合の安全確保の意識レベルは建設時のそれと比べて2倍程度大きくなることを意味する。そのときの安全確保を図るうえで必要な費用は初期投資額の95%以上になる。

今後、原発を将来の安定的電源として位置づけるならば、これ程高い安全意識を持たなければならない原発、裏返して言えば、これ程危険な原発を電源としなければならない合理的理由を、日本政府と電力会社は説明する必要があるだろう。

以上、ひとたび原発事故が起こったときの損害額の想定を条件に、安全確保の意識レベルの度合いを数理科学的手法により評価する試験的試みを展開した。無論、理論的にも、また損害額等の数値的評価の面においても不十分なところがあるが、得られた結果の全体的傾向に関しては大過ないと思っている。

原発事故後、国民の間には、原発再稼働反対のデモに参加することで、自分の生活と生命は自分で守るという人権意識が浸透してきている。また、原発の安全性に関する情報にもかなり敏感になり、今後も人権意識と安全意識の向上とともに、原発の安全性への要求レベルが上がり、その度に高額な安全対策費が必要になり、将来的に安全対策費は上がることはあっても、下がることはないだろう。さらに、民間企業であれば事業利益をも考えなければならない。結局のところ、そのために必要な費用はすべて電気料金の値上げに跳ね返ってくることになり、そこには、経済合理性は存在しないし、人間が放射線を完全にコントロールすることができる技術革新が生まれない限り、原発の将来に明るい展望は望めない。また、ウランの核反応により人工的につくられるプルトニウムの利用に基づく高速増殖炉の実用化は困難な状況になっており、原発の燃料であるウランの枯渇で原発が使えなくなる時期が60～70年程度で来ると云われていることを考慮すれば、原発を持続可能な社会における安定な電源として位置づけることに無理があるように思われる。

現在、世界では大きなエネルギー転換が起きており、化石燃料に頼った大量の二酸化炭素を排出する社会から脱し、再生可能エネルギーに基づく低炭素社会へ移行する途上にあることを考えれば、日本の将来の新しいエネルギー・環境政策の中で、原発を暫定的電源の一つとして位置づけ、日本国家の責任のもとで維持管理・運営し、同時に脱原発へのシナリオを時系列上で明確に示し、持続可能な社会に相応しい電力供給システムの構築が必要である。再生可能エネルギー普及のための国際的な技術革新競争に勝ち抜くためにも、早い決断が望まれる。因みに、現在の日本の再生可能エネルギーの比率は1%強である。毎週金曜日に行われている原発再稼働反対のデモも脱原発への劇的転換ではなく、脱原発へのシナリオを求めている筈である。

最後に、日本人の国民性として、危機や災厄に直面すると、自分を守るため歩調を合わせるかのように、極端な方向に走る傾向があるが、その結果が脱原発であるとすれば、合理的な選択とは言えない。

## 5. 結論

原発再稼働の是非の判断において、それぞれの事象に含まれる不確定性により、判断の結果がどうなるかはっきりしない状況にあるとき、間違った判断を下さないための意思決定プロセスを表す数理モデルを提案し、科学的観点から論及した。原発再稼働時に必要な初期投資額を定義し、原発再稼働に対する賛成派と反対派が抱く欲求を同時に満たす条件のもとで数理科学的手法により最適な安全対策費を推定した結果、初期投資額の中に占める安全対策費の比率は一般建築物のそれよりかなり高くなることを数量的に示した。この比率から算出される安全対策費は、国民の人権意識と安全意識の向上とともに上昇し、上がることはあっても下がることはない。そこには、経済合理性は存在しないし、人間が放射線を完全にコントロールすることができる技術革新が生まれない限り、原発の将来に明るい展望は望めない。それ故、日本の将来の新しいエネルギー・環境政策の中で原発を暫定的電源の一つとして位置づけ、日本国家の責任のもとで維持管理・運営を行い、同時に脱原発のシナリオを時系列上で明確に示し、持続可能な社会に相応しい電力供給システムの構築が必要である。

## APPENDIX

$P_f/l$  を  $P_1$  で置換すれば、次式になる。

$$C_T = nC_1P_1 + mC_2 \quad (A-1)$$

ただし、 $C_T$ ：原発再稼働による電力事業をおこすときの初期投資額の期待値

上式で、 $P_1 + P_2 = 1$  を用いると次のように変形できる。

$$C_T = (nC_1 + mC_2)P_1 + mC_2P_2 \quad (A-2)$$

## 参考文献

- [1] 洪起：原子力発電所建設の是非、長岡造形大学研究紀要、第9号、2011年
- [2] 朝日新聞の世論調査、2012年4月24日
- [3] 社会をモデルでみる、数理社会学会監修、勁草書房
- [4] 神田順、他：地震荷重を変動させたときの各種建物の建設費について、日本建築学会大会学術講演梗概集、1994年
- [5] 洪起：構造信頼性理論に基づく最適設計、日本建築学会構造系論文集、481号、1996年3月
- [6] 有本卓：確率・情報・エントロピー、森北出版株式会社
- [7] 井庭崇、福原義久：複雑系入門、NTT出版
- [8] 複雑系叢書、4. 複雑系としての情報システム、共立出版
- [9] 小熊英二：原発コスト、朝日新聞、2012年4月26日