

PSAによる原子力プラントの信頼性解析とその活用

2008年10月30日

リスク工学専攻グループ演習7班

加藤悠太, 豊田安由美, 本田航, 長谷川雄士

指導教員 岡島敬一, 内山洋司

1. 背景と研究意義

現在, 日本では全国で55基の原子炉が稼働しており, 原子力発電による電力は電力生産量全体の約3割を担っている。また, 近年の地球温暖化問題等を背景に, 原子力発電はCO₂をほとんど排出しない発電法として注目を集めている。

このような背景の中, 一方で原子力発電は発電によって放射性廃棄物が発生するために, 他産業以上に高度な安全性・信頼性が求められる。そのため, 不具合によりある系統が作動しない場合に備えて, それを補完するための多重防衛設計が図られている。このような複雑なシステムを持つ原子力施設の安全性を評価する手法としては, 従来, 研究機関や電力事業者により確率論的安全評価(Probabilistic Safety Assessment: PSA)が用いられてきた。内閣府原子力安全委員会は発電用原子炉施設の安全目標を炉心損傷頻度(Core Damage Frequency: CDF)で「10⁻⁴/年」程度と定め[1], また, 各事業者が自らプラントの安全水準を定期的に評価する定期安全レビューにおいてはPSAの活用が推奨されている。

しかし, PSA結果の詳細や分析過程については公開されておらず, 現在の原子力発電所における安全対策の費用対効果や多重化の有効性が一般市民に周知されているとは言い難い。そこで本研究では, まずPSAを用いて原子力発電所における系統の多重性変化が炉心損傷頻度へ与える影響についてのシミュレーション分析を進めた。

一方, 原子力発電はわが国において電力供給の中核的な役割を担っているが, 社会受容の醸成が不十分であるという問題を抱えている。例えば, 建設立地確保に途方もなく長い年月をかけた挙句建設に至らなかった例[2], 核燃料廃棄物処分場が未だ定まらない現状等, 原子力施設の立地は容易ではない。そうした中で, 原子力発電に対する社会意識を調査する研究(例えば, [3][4][5])は盛んに行われているが, 炉心損傷頻度や安全対策に必要な費用等の指標を具体的な数値で示した例はほとんどない。そこで本研究では, 上記で算出したPSA結果を用い, 一般市民の原子力発電安全対策に関する社会意識についてアンケート調査を実施した。

2. 研究概要

本研究では, まず, 国内の原子力発電所におけるトラブル事例を調査し, トラブル発生頻度の高い系統を

分析対象とするとともに, 対象系統の多重性を変化させ, 炉心損傷頻度への影響を分析した。その際には, 信頼性解析ソフトである「Relex Reliability Studio 2007」を用いた。

また, 上記で求めたPSA結果を用いて対策費用や事故被害額の期待値等の指標を算出し, 原子力発電安全対策に関する社会意識についてのアンケート調査を実施した。

3. PSAについて

PSAは, 原子力施設等で発生し得るあらゆる「事故シナリオ」を抽出し, その「発生頻度」と「被害」を定量的に予測し, それらの積をもって事故リスクを算出する手法である。原子力発電所におけるPSAは, 公衆への被害に関しては放射性物質漏えい事故の影響が支配的であること, 放射性物質は炉心に集中していることを理由として炉心損傷事故に注目して行われる。また, PSAは目的に応じてレベル1~3に分類され, レベル1は炉心損傷頻度の評価を, レベル2はレベル1に加え格納容器破損頻度およびブースタームの評価を, レベル3はレベル2に加え放射線放出に伴う公衆被曝量を評価対象とする。本研究においては, 系統の多重性変化に伴う炉心損傷頻度変化の観測を目的とすることから, レベル1PSAを行う。

レベル1PSAは, 3工程からなる。まず, 炉心損傷を引き起こす原因となる起因事象を定め, そこから炉心損傷に至るまでのあらゆる事故シーケンスを, 各系統の成功/失敗の2分岐型論理モデルであるイベントツリーを用いて洗い出す。次に, 各系統の失敗確率をフォルトツリーを用いた信頼性解析により求める。その際, 各系統を構成する機器について, 過去の運転データ等に基づく既知の故障率を代入することにより, 系統の失敗確率を定量的に評価することができる。最後に, 起因事象の発生頻度とフォルトツリー解析で求めた結果を事故シーケンスに沿って掛け合わせることで, 各シーケンスごとの炉心損傷頻度を求め, その総和をもって炉心損傷頻度とする。

4. トラブルマップの作成と対象系統の選定

日本の原子力発電所におけるトラブルの発生傾向を把握するためにトラブルマップを作成し, その結果を踏まえて対象とする系統を選定した。

4.1 トラブルマップの概要

本研究において対象としたトラブル情報及び分類

項目の概要を表 1 に示す。分析対象とした情報は、原子力発電所を運用する国内の電力会社 11 社と電気事業連合会及び日本原子力技術協会が共同で運営する「原子力施設情報公開ライブラリー(以下、NUCIA)」[6]において公開されている情報のうち、1993 年 1 月 1 日～2008 年 7 月 25 日までに発生したトラブル 285 件である。また、分類項目に関しては、1) トラブルの発生箇所に関する項目と 2) 事故影響度に関する項目を基準として用いた。1) に関しては、NUCIA の分類基準に基づき設備と系統の 2 段階で作成し、2) に関しては、国際原子力機関(IAEA)及び経済協力開発機構原子力安全機関(OECD/NEA)が運用する国際原子力評価尺度(International Nuclear Event Scale: INES)を用いた。INES は 1992 年 3 月に策定され、日本では 1992 年 8 月から採用されたことより、分析対象とするトラブル情報の収集期間を上述の通りに定めた。

表 1 トラブル情報及び分類項目の概要

対象トラブル	285 件(1993 年 1 月 1 日～2008 年 7 月 25 日)	
1) 発生箇所	設備	18 分類
	系統	78 分類
2) 事故影響度	INES 評価	8 段階

4.2 対象系統の選定

まず、原子力施設で発生したトラブルの経年変化を調べるために、INES レベル別のトラブル発生件数及び原子炉 1 基当たりのトラブル発生件数の推移を図 1 に示す。図より、1993 年以降トラブルは年 12 件～25 件の間で推移しており、1 基当たりのトラブル発生件数に関しても 0.2～0.5 件と大きな増加・減少傾向は見られなかった。また、INES レベルに着目すると、発生したトラブルはいずれもレベル 1 以下のものであり、その過半数が「安全に影響を与えない事象」と定義される 0- であることがわかる。

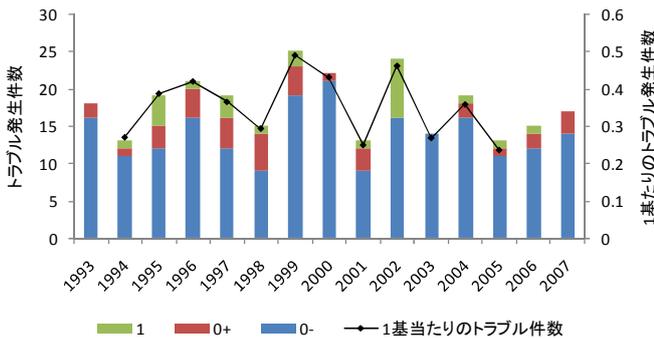


図 1 トラブル発生件数の経年変化

次に、設備と INES レベルを基準として、全トラブル(n=285)を分類した結果を図 2 に示す。図より、トラブルの約半数は原子炉冷却系統設備で発生しており、以下、原子炉本体、タービン設備の順で続く。また、INES レベルに着目すると、計測制御系統設備及び電気設備での事故は、発生件数に対して影響度の大きいトラブルの割合が高いと言える。さらに、以上で述べた常時稼働設備でのトラブル発生時に作動する

非常用炉心冷却設備でのトラブルも複数発生しており、これらのトラブルは重大事故へつながる可能性が高いため、本研究では非常用炉心冷却設備を対象とする。また、非常用炉心冷却設備で発生したトラブル 14 件を、系統及び INES レベルを指標として分類した結果(図 3)より、トラブルの半数は、残留熱除去系及び低圧炉心スプレー系で発生していることより、具体的には、この 2 つの系統及び回路を共有する低圧注入系を対象と定めた。

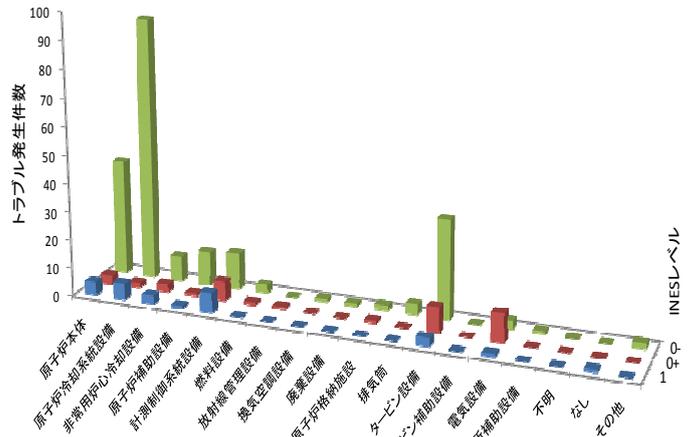


図 2 全系統のトラブルマップ

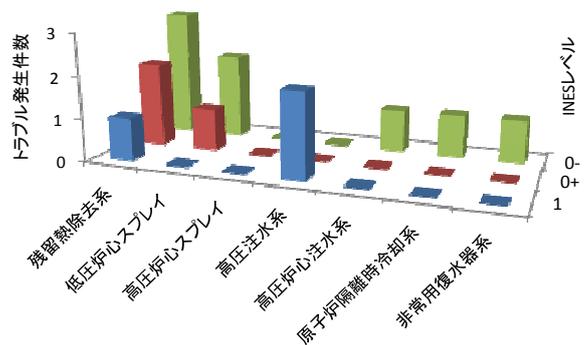


図 3 非常用炉心冷却設備のトラブルマップ

5. ヒアリング調査による知見

PSA 実施手順および原子力プラントの構成について専門家の助言と意見を得るために、独立行政法人日本原子力研究開発機構(茨城県那珂郡東海村)を訪問した(2008 年 7 月 8 日)。得られた知見は以下である。

- 1) PSA を効率的に行うためのプラント構成の単純化の程度
 - 実際の原子力プラントは多くの系統・機器から構成されるが、効率的に PSA を行うためにはシステムを適切なレベルで単純化してモデルを作成する必要がある。例を図 4 に示す。
- 2) PSA の社会意識調査への活用事例の有無
 - 従来、原子力に対する社会意識の調査目的において PSA 結果を用いた例はないとのこと。

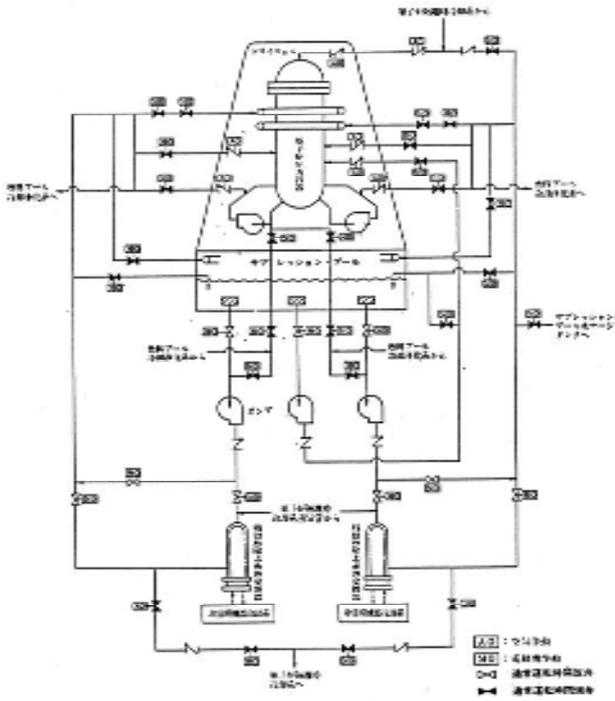


図 4 残留熱除去系系統図

6. Relex による PSA 実施

システムの信頼性解析を行うための汎用ソフトウェア「Relex」を用いて、各系統についてのフォルトツリー解析とイベントツリーの作成を行った(別図)。

6.1 汎用機器と原子力用機器の信頼性比較

プラント全体の解析に先立ち、一般に使用されている汎用機器と原子炉用機器との信頼性の比較調査を行った。その際には、対象系統である残留熱除去系、低圧炉心スプレー系及び低圧注入系の各系統について[7]を基にフォルトツリー及びイベントツリーを作成し、汎用機器の信頼性としては米国 NPRD-95(Non-electronic Parts Reliability Data)データを、原子炉用機器の信頼性については、米国のデータ(Nuclear Regulatory Commission : NUREG)と日本のデータ(NUCIA)を用いた。表 2 にその結果を示す。なお、稼働条件は 1 ヶ月間の継続運転とした。

表 2 汎用/原子力用機器使用時の非信頼度比較

系統	NPRD-95	NUREG	NUCIA
低圧炉心スプレー系	1.42E-01	3.93E-02	3.74E-04
低圧注入系(独立系)	1.42E-01	3.93E-02	3.74E-04
低圧注入系(共有系)	2.52E-01	3.95E-02	3.77E-04
サブプレッションプール冷却系	2.99E-01	4.11E-02	3.79E-04
停止時冷却系	3.75E-01	8.32E-02	4.52E-04

表 2 より、汎用機器を用いた場合と原子力用機器を用いた場合の非信頼度では最大で 1000 倍以上の差が生じることがわかった。また同時に原子力用機器に関しても NUREG と NUCIA のデータを用いた場合で

は大きな差が見られた。NUREG, NUCIA のデータ間では電動ポンプや弁などの故障率が 100 倍近く違っており、この影響が結果に現れたものとみられる。なお、本研究では詳細な解析を行わない他の系統の信頼性に関しては[7]のデータを使用した。[7]は NUREG の故障率データをベースとして行われた解析であり、本研究ではこれとの整合性を鑑み、以降の解析では NUREG データを使用するものとする。

6.2 炉心損傷頻度の変化

本解析では残留熱除去系(サブプレッションプール冷却系及び停止時冷却系)、低圧炉心スプレー系及び低圧注入系の多重性変更による炉心損傷事故の発生確率への影響を観測することを目的とする。なお、その際には外部電源喪失を起因事象とした。

まず[7]を基に外部電源喪失から炉心損傷に至るフローを網羅したイベントツリーを作成した(図 5)。

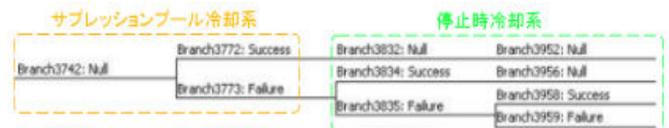


図 5 イベントツリー作成例

さらに対象系統である低圧炉心スプレー系(1 系統)、低圧注入系(3 系統)、サブプレッションプール冷却系(2 系統)、停止時冷却系(2 系統)の成功/失敗分岐に算出した 1 ヶ月運転時の信頼性の値を代入し、炉心損傷頻度の変化を調査した。多重性変更について厳密に議論を行うためには非常時のプラント運用に関する知識に基づいたイベントツリーの再構築が必要となるが、今回は簡単のため、既存のイベントツリー上の同系統の成功/失敗確率を変更することで対応した。また、3 系統ある低圧注入系のうち 2 系統はサブプレッションプール冷却系及び停止時冷却系とラインを共有するため、これらの多重性の増減はまとめて行うこととする。表 3 はこの解析結果である。

表 3 系統別の多重性変化に伴う炉心損傷頻度

	0 系統	1 系統	2 系統	3 系統	4 系統
低圧炉心スプレー系	2. 60E-04	2. 60E-04	2. 60E-04		
低圧注入系(独立系)	2. 60E-04	2. 60E-04	2. 60E-04		
" (共有系)	1. 30E-01	5. 81E-03	2. 60E-04	2. 41E-04	2. 24E-04

以上より、1)低圧炉心スプレー系における多重化は炉心損傷頻度へ大きく影響しなかったが、低圧注入系、サブプレッションプール冷却系、停止時冷却系の多重化は比較的影響が大きいこと、また、2)これら 3 種の系統については一定数以上の多重化に対して炉心損傷頻度の変化が極めて小さくなるが、これは系統増加による炉心損傷頻度の変化が系統数に対して指数的に増減するためと考えられることがわかった。

なお、本分析で使用した NUREG データは米国で

の調査結果であり、調査実施年に関しても古く 6.1 で示した NUCIA データとの比較結果からもわかるように、比較的高い故障率を示している。そのため、日本での稼働実績で分析を行った場合は、炉心損傷頻度がさらに低くなると推測される

7. アンケート調査の実施と結果の考察

6章で求めた PSA 結果を用い、原子力発電所の安全対策に関する社会意識についてアンケート調査を行った。

7.1 アンケート調査概要

本調査では、原子力発電の安全対策に関する社会意識を調査するために、回答者の居住地域に発電所が建設されるという条件で、自らが直接リスクにさらされているという状況を設定した。その上で安全システムが 0~4 系統の 5 種類の建設プラン A~E についてどのプランを選択するかを質問した。また、プラン選択時の指標として、PSA を用いて算出した炉心損傷頻度の他、プランの実行に必要な費用、事故時被害額の期待値、個人負担及び電気料金値下げの変動を組み合わせで示し、安全対策に関する意識の変化を促す要因を調査した。さらにこれらの変化の傾向と回答者の属性との関係を調べるために、性別、年齢の他、原子力発電に対する知識や態度も併せて調査した。表 4 にアンケート項目の要旨を、図 6 にアンケートの一例を示す。

表 4 アンケート項目

問 1	原子力発電推進に対する賛否
問 2	原子力発電の仕組みに関する知識
問 3	PSA に関する知識
問 4	原子力発電所の安全対策に対する満足度
問 5	安全装置が 0 系統の時受ける印象(確率表示なし)
問 6	安全装置が 4 系統の時受ける印象(確率表示なし)
問 7	PSA(炉心損傷頻度：表 3 低圧注入系(共有系)参照)
問 8	PSA+被害額(円) A:3900 億, B:174.3 億, C:7.8 億, D:7.2 億, E:6.7 億 (原発事故時の被害額[8]に各プランの炉心損傷頻度を乗じ期待値としてプランごとの被害額とした)
問 9	PSA+被害額+安全対策コスト(円) A:0, B:20 億, C:40 億, D:60 億, E:80 億 (1 系統増やすのに 20 億円と見積もりプランごとの安全対策コストとした)
問 10	PSA+被害額+各家庭の負担額(円) A:0, B:1,325, C:2,650, D:3,975, E:5,300 (日本全国の原発 55 基に対し安全装置を設ける際の費用を各家庭で負担すると仮定した)
問 11	PSA+被害額+電気料金値下げ(円) A:7,083, B:5,417, C:3,750, D:2,083, E:416 (原発建設に伴い一年間にわたり電気料金が値下げされると仮定し、さらに選択したプランにより値下げ額が決まるとした)



図 6 アンケート例(問 8)

7.2 調査結果

アンケート調査の結果を表 5 及び以下の図に示す。

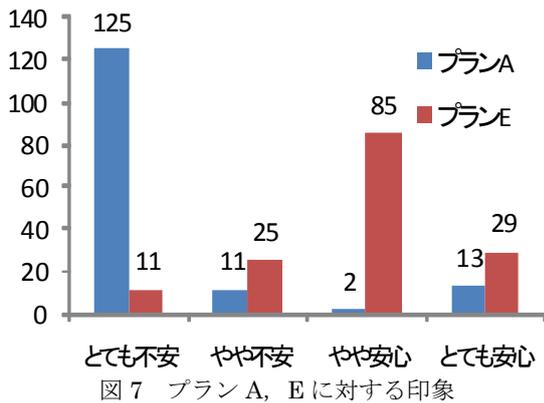
対象者の属性は表 5 の通りであり、性別に関しては男性が 60%、女性が 37%、年齢及び職業に関しては 20 代の学生が最も多い結果となった。全回答数は 151 である。また、問 1 の原子力発電の推進に関しては、賛成 62%、反対 17%、わからない 21%であり、賛成の理由としては、「発電効率が良く、電力の安定供給に役立つから」「石油の消費を抑えることができるから」という意見が多く、反対の理由としては、「事故が起こったときの被害が大きいため」「放射能汚染の恐れがあるから」という意見が多かった。問 2 の原子力発電の仕組みに関しては、「よく知っている」「少し知っている」と答えた人が 51%「あまり知らない」「全く知らない」と答えた人が 48%とほぼ半数であった。さらに問 3 の PSA に関しては「よく知っている」「名前だけ聞いたことがある」と答えた人が合わせて 28%と約 4 分の 1 であった。

一方、原子力発電所における現状の安全対策に対しては、問 4 において、「満足」「やや満足」と答えた人が 33%、「あまり満足していない」「満足していない」と答えた人が 42%、「わからない」と答えた人が 25%だった。また、安全装置に対する意識の傾向としては、問 5、6 より、0 系統(A プラン)にすることに対しては多くの人が強い不安感を感じるが、4 系統(E プラン)にした場合では「やや安心」と答えた人を中心に、「とても安心」「やや不安」等ばらつきが見られた(図 7)。

問 7 以降のプラン選択に関しては、回答結果に対する全体の集計の他、属性による意識の傾向を調査するために男女別及び原子力発電の推進に対する賛否別に集計を行った。

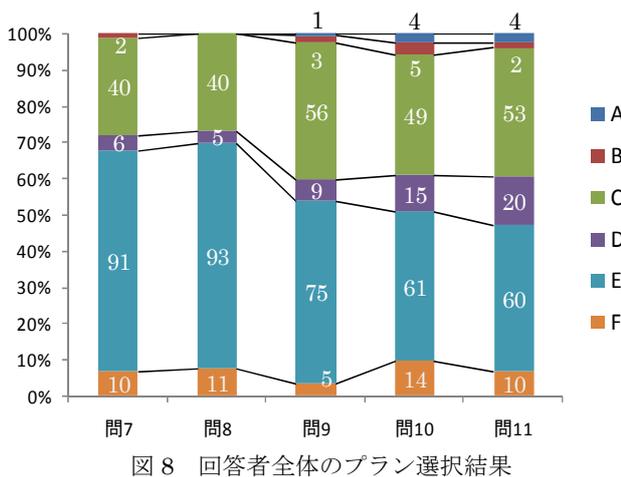
表 5 対象者の属性(人)

性別	男	女	無回答				
	91	55	5				
年齢	10代	20代	30代	40代	50代	60以上	無回答
	15	87	19	15	12	2	1
職業	会社員	主婦	教員	学生(文系)	(理系)	(その他)	
	35	12	9	80	(12)	(56)	(12)



➤ 全体集計

結果を図8に示す。図よりPSA結果(炉心損傷頻度)のみを示した場合、27%の人がCを60%の人がEを選択しているのが確認できる。それぞれの主な選択理由として、Cを選んだ人は「C~Eで確率変化が小さいから」、Eを選んだ人は「一番安全だから」と答えており、確率変化に注目するグループと安全性を優先するグループに分かれることがわかる。また、問8の結果より、事故被害額の期待値の提示は意識の変化にあまり影響がないと見ることができる。プランの選択が最も大きく変化した問は問9であり、Eを選択した人の割合が減少し、C、Dを選択した人の割合が増加している。これは安全対策にかかるコストの提示が意識の変化と強く関係しており、炉心損傷頻度と安全対策コストを比較した上で最も合理的であるプランCを選択する人が増加したと考えられる。さらに問10以降情報を追加していくことで、Eを選択する人の割合がやや減少し、一方でA~Dを選択する人が増加している様子が窺える。

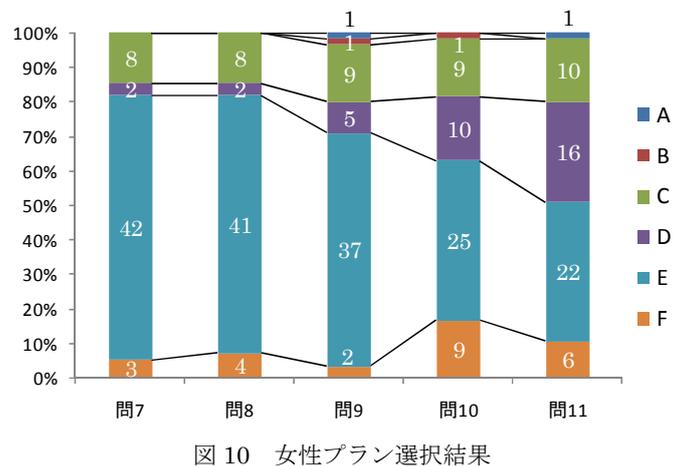
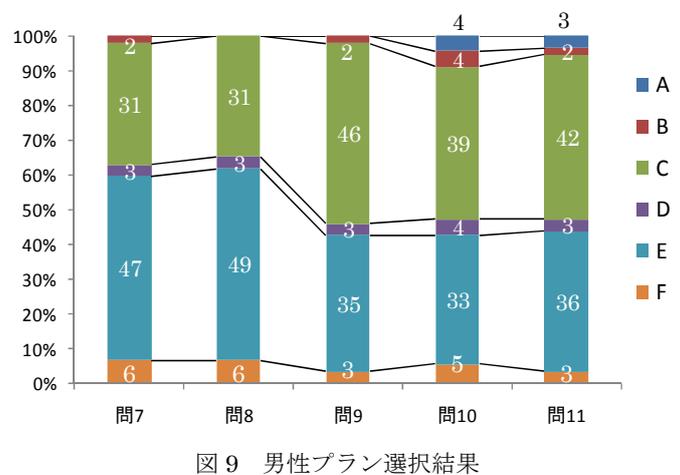


➤ 男女別集計

結果を図9, 10に示す。図より、男性は絶対数で見るとプランEを選択する人が最も多いが、女性と比較するとプランCを選択する傾向が強いことがわかる。特に、問7, 8と比べて、問8, 9, 10においてプランCを選択する人が増加している。主な理由として、プランC, D, Eについて、安全対策コスト

は一定して増加するのに対し炉心損傷頻度の低下が横ばいであることが挙げられていた。炉心損傷頻度と安全対策コストの費用対効果を考慮し意思決定する傾向が強いことがわかる。

一方、女性は男性と比較するとEを選ぶ割合が高く、より安全性の高いプランを選択する傾向が強いことがわかる。問7, 8, 9の選択理由として、コストが高くともより安全なプランを望むという理由が多く挙げられている。この点に注目すると男性よりも原子力発電所に求める安全性の水準が高い傾向にあると言える。しかし、問10, 11では他の問いに比べてEを選択する人が減少している。この理由として、費用・値下げ金額と安全性の兼ね合いを考慮して選択したという理由が挙げられていた。これらのことから、より現実的な事柄を考慮する傾向があることがわかる。



➤ 原子力発電所建設に対する賛否別集計

結果を図11, 12, 13に示す。図より、賛成派はプランCを選択する人の割合が比較的高く、指標を追加した際の選択変化も大きいことが挙げられる。また、プランEからCへの変化が多いという傾向が見られた。一方で反対派は指標を追加した際、選択にある程度の変化は見られるもののその幅は小さく、終始プランEを選択する割合が高かった。また、プランEか

ら D への変化が比較的多かった。これらは、両者ともに PSA と被害額のみ情報下ではより安全性の高いプランを望むことは共通しているが、賛成派は情報の付加、とりわけコストの提示に際し、炉心損傷頻度と安全対策コストの費用対効果を考慮する傾向が窺える。一方反対派は、賛成派と比較すると、コストがかかってでも安全性を求める傾向が窺える。また、わからないと答えた人は、問7の時点でプラン E を選択した人の割合が約 8 割と最も高く、指標の追加に従う変動も最も高かった。

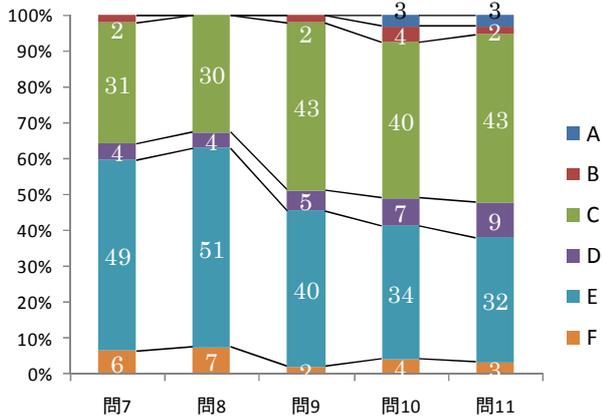


図 11 「賛成」派 プラン選択結果

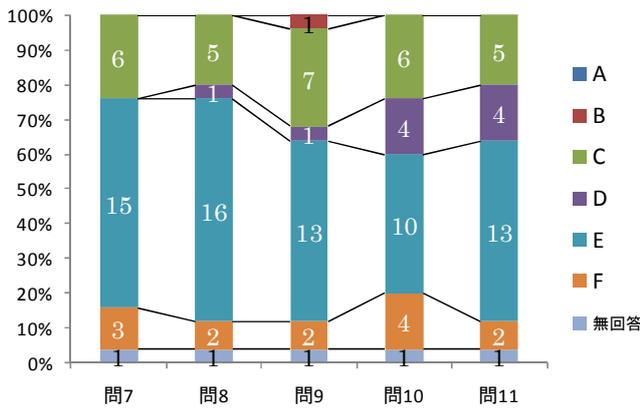


図 12 「反対」派 プラン選択結果

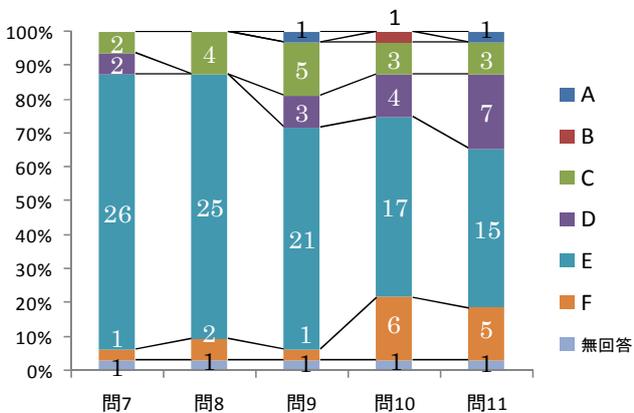


図 13 「わからない」と答えた人の選択結果

アンケートまとめ

アンケート調査を通じて以下の知見が得られた。

- 1) 原子力発電所の安全対策に関しては、概ね費用対効果を重要視するグループと安全性の向上を優先するグループの 2 つに分類できることがわかった。
- 2) PSA のみではより高い安全性を望む傾向が強いが、付加情報を得ることにより安全対策に関する意識が変化することがある。とりわけコスト情報を付与すると安全性と比較した合理的な判断を下すようになる傾向がある。
- 3) 対象者の属性により、安全対策に関する意識を変化させる情報と変化率の大きさは異なる傾向がある。今回の調査では、男女別、原子力発電推進に対する賛否別を調査した結果、男女別では、男性は費用対効果に、女性は身近な問題に判断基準を置く傾向が強いことがわかった。賛否別では、賛成派は費用対効果に、反対派はコストよりも安全性に判断基準を重く置く傾向があることがわかった。

8. まとめと今後の課題

本研究では、研究の第 1 段階として、全国の原子力発電所におけるトラブルを調査し、トラブル発生頻度の高い低圧スプレー系、残留熱除去系及び低圧注入系を対象として選定し、それらの多重性を変化させた場合の炉心損傷頻度への影響を PSA 手法を用いて分析した(レベル 1PSA)。その結果、6 章の 1)2)3)システムを 0 重から 4 重に変化させた結果、炉心損傷頻度は指数関数的に変化することが明らかとなり、現行の安全装置に対する炉心損傷頻度を変異点に、そこから除去すると大幅に損傷確率が上昇すること、逆に増加しても損傷頻度はそれほど下がらないことがわかった。

また、研究の第 2 段階であるレベル 1PSA 結果を用いた原子力発電安全対策に関する社会意識調査では、7 章の 1)2)3)PSA のみでも一定の効果があること、それに付加情報を加えると安全対策と炉心損傷頻度に関してより合理的な方向へ意識変化がなされる傾向があることを明らかにした。また、それは対象者の属性により差異があることもわかった。

アンケートの結果より、今後の原子力発電に関する情報の提示に関しては、人々の理解が深まるような形で、(例えば個人負担等)情報を公開していくことが重要であると考えられる。従来、原子力プラントの管理・運用面を中心に活用されてきた PSA だが、社会受容問題を抱える原子力分野にはリスクコミュニケーションとしての活用法も考えていくことが意義のあることである。

今後の課題としては、PSA に関しては、1)機器故障率について現状の稼働実績を踏まえたデータを利用すること、2)管路等を共有する系統間における共通要因故障等の関係を考慮することが挙げられ、アンケート調査に関しては、1)被害期待値や負担金

額等の試算に使用したデータを精査すること、2)属性の偏らない集団で実施することが挙げられる。また、今回はレベル 1PSA 結果のみの活用を検討したが、さらに原子炉からの放射性物質の漏えい頻度等を扱うレベル 2, 3PSA 結果の活用も検討することで、PSA のリスクコミュニケーションとしての活用の可能性が広がると考える。

謝辞

本研究を進めるにあたり、独立行政法人日本原子力研究開発機構の渡辺憲夫氏、本間俊充氏とリスク工学専攻客員教授の村松健先生に資料のご提供と多くのご助言を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

<参考文献>

- [1]原子力安全委員会安全目標専門部会：発電用軽水型原子炉の性能目標について－安全目標案に対応する性能目標について－，平成 18 年 3 月 28 日
<http://www.nsc.go.jp/mokuhyo/index.htm>
- [2]東北電力：プレスリリース，巻原子力発電所計画の撤回について，平成 15 年 12 月 24 日
<http://www.tohoku-epco.co.jp/whats/news/2003/31224b.htm>
- [3]申紅仙，正田亘：リスク認知に関する一研究－原子力発電所所在地住民の原子力発電に対する態度－，人間工学，Vol.36, No. 4, pp.215-221, 2000
- [4]林知己夫：原子力発電に対する日本人の意識，原子力工業，41(6), pp. 47-53, 1995
- [5]角田勝也：原子力発電に関するリスク認知の規定因に関する考察，日本リスク研究学会誌，11(1), pp. 54-60, 1999
- [6]原子力情報公開ライブラリーNUCIA
<http://www.nucia.jp/>
- [7]渡辺憲夫、近藤雅明、宇野清隆、千草剛、原見太幹：BWR における外部電源喪失起因のイベントツリー解析，日本原子力研究所，1989 年 3 月
- [8]日本原子力産業会議：「大型原子炉の事故の理論的可能性及び公衆損害に関する試算」，1960 年
京都大学原子炉研究所 HP：原子炉研究グループ，原発関係一般，その他，原発事故による放射能災害－40 年前の被害試算－
<http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/NSRG/genpatuindex.htm>

