ラスムッセン報告書(Reactor Safety Study (WASH-1400) Draft) の概要

(東京大学工学部) 都 甲 泰 正

I. はじめに

アメリカ原子力委員会(U.S.AEC)は、1974年8月、原子炉事故の確率論的評価の結果を“Reactor Safety Study—An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants—WASH-1400”(以下RSSと呼ぶ)のDraftの形で公表した。この研究は1972年夏以来、MITのラスムッセン教授指導のもとにAECで行われたので、俗に“ラスムッセン報告書”と呼ばれている。所要経費300万\$(約9億円)はすべてAECから支出されAEC側の責任者として、レビン氏が任命され、ほかにAECから数名のスタッフが参加している。

研究は専門分野ごとに、研究機関と研究契約が結ばれ、それら研究機関から多くの専門家がこの計画に参加した。主な研究機関は、Boeing, Aerojet Nuclear, Science Applications, Lawrence Livermore Lab., Sandia Lab., ORNL, Battelle Columbus Lab., Battelle Pacific Northwest Lab., Univ. of California, Los Angeles などである。

RSSは、本文約250ページのほかに10冊の付録があり全ページ数は3,000ページを越える長大なものである。その他、一般向けに質疑応答の形で30ページ程度の概要報告書が出されている。

本研究は、計画が発表された1972年夏より、世界の大きな関心を集めていた。その理由は、従来アメリカは、設計基準事故方式の安全評価の手法を採用しており、カナダ、イギリス原子力公社のように確率論的手法を採用していないので、この研究によってどのような結論を出すのか興味を持たれたのが第1点である。第2は、原子力事故の全スペクトルについて危険度の評価を行う(over-all risk concept という)のは、世界でも初めての試みであり、正直のところ、果して成功するだろうかという危惧の念が持たれていた点である。

そのため、1974年8月に結果がDraftの形で公表されると、世界各国の注目の的となった。わが国でも、このDraftを入手して間もなく、原子力安全研究協会に、「原子炉安全報告書検討グループ」を設けて検討を行なった。大学、官庁、研究所、電力、メーカ等から約20名の専門家の参加を得て、付録まで含めてRSSの検討を行い、約30の質問およびコメントを作成しU.S.AECにも送付した。

また、OECDのCSNI(Committee on Safety of Nuclear Installations)においても、関心のある各国の専門家を集めて、RSSの討論会が1974年11月27、28日の2日間パリで開催された。

さらに、RSSに批判的な見解もいくつか提出されている。UCS(憂慮する科学者同盟)およびシェラ・クラブ(環境保護論者の団体)からなるアメリカの専門家グループは、1974年末、RSSを批判する170ページの報告書を公表した。

以下、RSSの概要を述べ、ついでわが国の上記検討グループにおける検討結果、CSNI会議における討議の概要およびUCS-シェラ・クラブ報告書の批判見解の概要について簡単に紹介してみよう。

II. Reactor Safety Study(WASH-1400) Draft の概要

この研究は、アメリカにおける軽水炉のみを対象としている。BWRについてはPeach Bottom 2号機(1,065 MWe)、PWRはSurry 1号機(788 MWe)を対象とした。その理由は、これらの炉は、この研究を開始した当時運転許可を得ていた炉の中で最大出力であったからである。

1. 解析手法の概要

(1) 解析手順

第1図に、リスク評価手順を簡単に示してある。第

Summary of Reactor Safety Study (WASH-1400) Draft, Yasumasa Togo.

1の仕事は、公衆にリスクを与える可能性のある原子力発電所の故障を決めることである。このために、プラント内の放射能の存在量を求め、次に、放射能放出の原因となる可能性のある機器故障と人的過失の種々の組合せを求める。これを事故のシーケンスと呼び主に Event tree により求められる。

第1図 RSSリスク評価(WASH-1400)手順

第2の段階は、事故シーケンスの発生確率およびこのシーケンスにより放出される放射能の量の評価である。事故確率の評価には Fault tree と機器の故障率データを用い、さらに共通モード故障の検討がなされた。放射能放出は、実験データの解析と事故後の燃料の状態から評価された。

第3の段階は、放射能の環境放散の計算で、これには、確率論的モデルを用いた。このモデルには、放散放射能による人体への影響と財産損害の計算が含まれている。

最後は、原子力事故リスクの全体評価と、これを原子力以外のリスク(天然現象や他の技術によるもの)と比較することである。

以上の手順をもう少し詳しく以下に述べてみる。

(2) 事故シーケンスの決定

事故のシーケンスは、燃料の溶融により公衆にリスクを与えるかも知れないものを選び出す。

使用済み燃料プールでの事故はリスク寄与が小さいので、詳細な検討は行わなかった。炉心中での燃料溶融がリスクのほとんどを占める。炉心溶融の事態を見出すには、発熱率が過大になるか、または熱除去系の故障が原因となる。これらを初期事象(Initiating event)と呼ぶ。「配管破断」はその好例である。事故シーケンスを表わすには Event tree を用いる。Event tree は、各機能が働くか否か(yes か no か)に従って枝分かれてゆく。

最初に作られた Event tree から非論理的なパス、無意味なパスを除き、さらに、各機能の相互関係を考慮しながら簡略化してゆく。第2図に、簡略化された冷却材喪失事故の Event tree を示してある。

第2図 簡略化された冷却材喪失事故の Event tree (WASH-1400)

圧力バウンダリーの破断に続いて電源の有無、ECCS機能の有無、F.P.除去機能の有無、格納容器の完全さが関連する。Event tree を作成するに当たっては、考え落しを少なくするため、また最良の工学的判断を得るために、多くの専門家の意見を聞いている。

(3) Fault Tree

Event tree における各 event の確率を求めるために Fault tree を用いる。第3図は ESF (工学的安全施設)への電力喪失の Fault tree である。故障率計算に必要な機器または装置の故障率データは、類似の化学プラント等のデータも集めて求めている。トップ事象の確率を求めるに際し、Tree の各点での確率が独立であるか、互いに相関があるかを注意深く検討する必要がある。

(4) 放射能放出量

燃料溶融から格納容器の状態を経て、環境に放出される放射能量の計算には CORRAL コードを用いた。このコードでは、F.P.の各核種のいろいろな事故シーケンスにおける放出量を計算することができる。放出

ESF: 工学的安全施設

第3図 工学的安全施設への電力喪失の Fault tree (WASH-1400)

放射能量と事故確率との関係をヒストグラムに示したのが第4図である。同図のようなヒストグラムを作成するためには、重要な放射能放出を起すすべての事故を明確にし、その発生確率を求めなければならない。

第4図 放射能放出量と事故確率のヒストグラム (WASH-1400)

放射能放出を起す可能性のある事故の数は非常に多いが、放出量のほとんどは比較的少数の事故に起因している。支配的な Event tree がPWR では9つ、BWR では6つ選ばれている。

(5) 気象条件

24種の気象条件 (パスキルの安定性A～Fの6段階と風速を0.8～7m/secを4段階に分けた) と雨の状態1つを加えて総計25種類の異なった気象条件を採用した。各気象条件の出現頻度は、39の原子炉敷地の気象データから計算した。ブルームはガウスのブルームモデルを用いた。ブルーム上昇の計算には、ブルーム放出時の熱エネルギーとブルーム中でのF.P.崩壊熱を考慮した。雨の場合には雨による水洗効果が効くので、A～Fの安定性クラス分けはあまり重要でない。

(6) 人口密度

66敷地の22.5°のセクター(全部で1,056セクター)について、20マイルまでの人口を多い順に並べてこれを105セクターずつの10個に分けた。さらに、最初の105セクターは人口密度が高いのでさらに4個(1, 2, 2, 5%)に分け全体では13区分とした。最初の1%のところのリスクが最も厳しい。

(7) 公衆に対する影響

放出量に関する確率、気象条件の確率、人口密度についての頻度の3つを組み合わせることにより、公衆に与える影響を計算できる。

公衆に対する影響を求めるモデルは、3種類の放射線量を計算する。通過雲からの外部線量、地上への沈着放射性物質よりの外部線量、および吸入による内部線量である。

健康への効果としては、急死、急性疾患および晩発性効果(全人口への man-rem 線量から計算)を計算した。急死の確率は、全身線量133 rem で0, 400 rem またはそれ以上で1とし、133と400 remの間は直線的に変化すると仮定した。急性疾患の割合は、100 remで0, 200 remで1で、その間は直線と仮定している。晩発性効果はガン、甲状腺結節、遺伝的效果につき考慮する。

そのほか、財産損害として、再生産財に近寄れないことの損失、土地が使用できない期間の損失、住民の一時的な移転に伴う諸費用、食物連鎖を通して汚染が起らないように保証するための費用などが見込まれる。

このように、いくつかの放出カテゴリー(PWRの場合9つ、BWRは6つ)、25の気象条件、13の人口密度の各ケースの全組合せについて、公衆への影響を計算して公衆へのリスクが求められる。

(8) 全体のリスク評価

以上のような計算により、死亡、疾患、長期的健康効果および財産損失の4種の影響のおおのにつき、確率と規模との関係が求められる。これを各影響ごとに合算することにより、原子力発電所の事故による公衆への全体のリスクが各影響ごとに求められる。

2. RSS(WASH-1400)で開発された手法

この研究を進めるに当って苦心した点は次の通り。

(1) 最初は Fault tree で事故シーケンスとその確率を計算しようとしたが、Fault tree の手法は全体の仕事には複雑すぎて不向きであることがわかり、事故シーケンスの決定には Event tree の手法を用いることにした。そして、Event tree の各機能の作動確率を求めるのに Fault tree を用いた。

(2) 機器故障率と人の過失率の適当なデータが得られるかという疑問が最初からあった。信頼度解析では、故障率が高い精度(例えば3倍の精度)で必要となるが、リスク評価では、原子力事故のように発生確率の小さい場合には、かなり大きい誤差(10倍またはそれ以上)も結果にあまり効かない。感度解析によって、大きな誤差幅が結果の妥当性にあまり効かぬことを確かめることができる。系の故障率の解析に当っては、機器の故障率、保守間隔、保守時間などをすべて対数正規分布と仮定し、適当な誤差幅(3～30倍)を与えてモンテカルロ法で中間値と誤差幅を求めている。

(3) 最も不確かな分野は共通モード故障の取扱いであった。RSSにおける共通モード故障の取扱いは極めて巧妙である。例えば、故障率 $10^{-3}/\text{yr}$ の機器が独立に2系統設けられているケースを考えると、最小の故障率は2系統が完全に独立(共通モード故障なし)とし

た場合の $10^{-6}/\text{yr}$ であり、最大の故障率は $10^{-3}/\text{yr}$ (完全な共通モード故障の時) である。共通モード故障を考慮すると、故障率は $10^{-3} \sim 10^{-6}/\text{yr}$ の間にあることになる。この間の分布を対数正規分布と仮定すると、故障率の中間値は $\sqrt{10^{-3} \cdot 10^{-6}} = 3 \times 10^{-5}$ となる。さらに、上下誤差幅10倍の間 ($3 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-6}$) に90%が含まれるという仮定を用いて、共通モード故障を取り扱っている。

(4) 従来行われている工学的システムの故障率の評価では、実際の経験に比べ著しく小さい故障率を与えている。従来の評価方法をこの研究に用いたところ、同じく信じ難いほど小さい故障率が得られた。上記共通モード故障の取扱い等の手法を用いることにより、計算値と経験値がよい一致を見せるようになった。

3. RSS(WASH-1400)の結論

解析の結果は、第5、6図および第1表に示されている。RSSの結論は次のとおりである。

(1) 原子炉に基因する死者数および財産損害のリスクは、多くの人的または天然のリスクよりも小さい。100基の原子力発電所のリスクは、隕石落下によるリスクと同程度であり、既存のリスクに有意の増加をもたらすことはない。

(2) 原子力事故による急性疾患、晩発性疾患、遺伝効果および晩発ガンについても計算したが、他の人的または天然災害に起因する同じようなリスクについてのデータがないので比較は行っていない。

第5図 各種リスクによる死者数と発生頻度 (WASH-1400)とUCS-シェラ・クラブ報告書(UCS Revised, Revised II)

第6図 各種リスクによる財産損失の比較(WASH-1400)

(3) 炉心溶融事故は必ずしも大きな公衆災害を与える事故に至るとは限らない。炉心溶融事故の発生確率は約 $6 \times 10^{-5}/\text{yr}$ である。いままでの商業軽水炉および艦艇用軽水炉の経験を合わせると、2,000炉・年の経験がある。いままで炉心溶融事故は1度も起っていないことから、炉心溶融事故は、 $10^{-3}/\text{炉} \cdot \text{年}$ より小さいと考えることができる。経験によると、大事故は小事故よりも遙かに起りにくい。このことは第5、6図

第1表 各種事故による個人の死亡リスク (アメリカの全人口平均 1969年)

事故の種類	死者数	死亡リスク (yr ⁻¹)
自動車	55,791	3×10^{-4}
転落	17,827	9×10^{-5}
火災	7,451	4×10^{-5}
溺死	6,181	3×10^{-5}
毒物	4,516	2×10^{-5}
銃火器	2,309	1×10^{-5}
機械 (1968)	2,054	1×10^{-5}
水上輸送	1,743	9×10^{-6}
飛行機旅行	1,778	9×10^{-6}
落下物	1,271	6×10^{-6}
感電	1,148	6×10^{-6}
鉄道	884	4×10^{-6}
雷	160	5×10^{-7}
トornado	91	4×10^{-7}
ハリケーン	93	4×10^{-7}
その他	8,695	4×10^{-5}
全事故合計	—	6×10^{-4}
100原子力発電所の事故	0	3×10^{-9}

からも知ることができる。原子炉事故でも同じような傾向があると思われるが、いままで、燃料温度の異常上昇という事故も起っていないので、それより大きい溶融事故の発生確率は 10^{-3} /炉・年 よりさらに小さいと考えてよいだろう。このような考察から、炉心溶融の確率は、ここで得られた 6×10^{-3} /yr という値より大幅に大きくなることはありそうにない。

Ⅲ. 原子炉安全報告書検討グループ における検討結果

- (1) この解析がすべての事故を包含していることをどのようにして確かめることができるか。
- (2) 発生確率の小さい事故は最初から無視されているが、無視する基準が明確でない。
- (3) 故障率データの不明確さなどは誤差幅で処理しているが、感度解析を行なって誤差が結果にどのように効くか明確にすべきである。
- (4) 共通モード故障の取扱いをもっと突込む必要がある。
- (5) 地震に対する取扱いが不十分である。とくに、設計地震をこえるような大地震に対する評価を詰める必要がある。
- (6) 保守間隔および期間が結果を大きく左右しているが、これらのデータが不十分である。
- (7) ATWS (Anticipated Transient Without Scram) をどのように取り扱ったか。
- (8) 事故条件下における機器の故障率データはどのようにして得たか。
- (9) 気象条件のうち、雨のケースの取扱いが不十分である。
- (10) 計算モデルおよび計算に用いられている仮定から考えて、解析結果は安全度をもっていると思われる。最も確からしい値に比べて、どの程度の安全余裕があるか定量的に明確にする努力をすべきである。
- (11) この手法を、飛行機事故、鉄道事故などに適用し、結果を事故統計データと比較することにより、手法の妥当性を確かめてはどうか。
- (12) この手法を、最近の軽水炉プラントに適用したらどうなるか。

以上主なものを記したが、その他にも多くの専門的事項および報告書内の数値の矛盾について質問が用意された。

Ⅳ. CSNI 会議における討議の概要

CSNI の討論会の席上の議論のうち興味のあったいくつかを述べる。

(1) この手法が原子炉安全の意志決定（例えば安全審査など）に用いられるか否かという点については、アメリカとイギリスの意見が対立した。アメリカが、この計算に必要な情報はPSAR(予備安全解析書)の段階では10%程度しか明らかでないので、この手法は使えないと述べたのに対し、イギリスは、すでに同様の手法を数年来意志決定に用いていると主張した。

(2) フランスも同様の計算を行なっているが、3～10倍の精度でアメリカの計算結果と合致する。

(3) 原子炉圧力容器の破断確率 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ /yr は小さ過ぎるというコメントがあった。アメリカの見解は、これが1桁大きくても結果にあまり効かないが、2桁大きくなるとかなり効くということであった。

(4) 地震の取扱いが不十分で、少し不安全側ではないかとの意見が出された。

(5) 退避の問題につきアメリカより、洪水、ダム決壊のおそれのあったときなどに、退避を行なった経験につき説明があった。とくに、最近の San Fernando 地震のあと、緊急放水のため80,000人を一時退避させたが、大きな混乱は生じなかった。なお退避を考慮しないと結果は約3倍になる。

(6) サボタージュについては、適当な手法がないのでまだ計算していないが、サボタージュにより大きな原子力事故を起させることはかなり困難である。

(7) 格納容器を溶融炉心が貫通した後、放射能の除染係数として 10^{-3} をとっているのは小さ過ぎないかという意見があった。

(8) アメリカから、とくに ① 退避の action level 10 rem, ② 長期間の気象モデル, ③ 拡算計算の際のブルーム上昇について、情報または意見を求めたいと述べられた。

(9) U.S. AEC で、今後ともこのような研究を継続するかとの質問に対し、すでに AEC に30名程度のスタッフがおり、今後、最初の100原子炉につき評価を続けるとの解答があった。

Ⅴ. UCS-シェラ・クラブ中間報告書の概要

この報告書は MIT のケンドール教授(物理学)をはじめ10名で構成している RSS 再検討委員会がとりまとめたものである。

1. 反対見解の概要

(1) Event tree/Fault tree の手法を用いることに欠陥がある。その理由は

- ① RSS で重要な事故シーケンスをすべて決定したといっているが、それは不可能である。
- ② 解析手法は、機器の設計の適否を判断していない。
- ③ 人的過失は、Fault tree 解析では取り扱うことが困難である。
- ④ 構造物破損は非常にまれなので、良好な破損確率データが得られない。
- ⑤ RSS では機器破損が独立に発生するとして取り扱っている。
- ⑥ 機器の2次故障を取り扱っていない。
- ⑦ 共通モード故障の取扱いが不十分である。
- ⑧ 故障率データの使用に疑問がある。

Event tree/Fault tree の手法は、系相互間の相対的評価をするには適しているが、事故確率など絶対値を求めるには不適當である。

(2) 公衆の健康への影響および財産損害の見積り方に弱点がある。

- ① 炉心溶融事故時に放出される放射エネルギーが約2倍過小評価されている。
 - ② 放射線被曝に伴う人体への影響が過小評価されている(死亡、急性疾患3~4倍、晩発ガン4~6倍、遺伝効果1~2倍、甲状腺疾患4倍)。
 - ③ RSS は退避と建物による遮蔽効果を考慮しているが、この2つの仮定は相互に矛盾する。
 - ④ 周辺の将来の人口増加を考慮していない。
- 以上の点を考慮すると、安全側に見ても修正係数16倍が必要である。

(3) 国の原子力計画に問題になる点がある。

- ① 洋上発電所につき RSS は触れていない。炉心溶融事故が発生すると、大規模の海洋汚染を引き起すおそれがある。
- ② サボタージュによるリスクが過小評価されている。

(4) RSS は、いままで信じられて来た多くの概念をひっくり返した。これらの概念は、いままで AEC や原子力産業界の、原子炉リスクは無視しうる程度に小さいという主張の根源になっていたものである。

- ① 炉心溶融事故の確率は、従来考えられて来たよりもずっと大きくなった(60倍)。
- ② 従来、冷却材喪失事故で最悪の場合は、直径 20 in. 以上の大口径破断事故であったが、RSS では、最悪の事故は 3/4 ~ 6 in. 配管の破断になった。RSS の結論は、このような重要な誤解が過去10年以上信じられていたことを示している。
- ③ RSS はまた、いままで信じられて来た WASH-740 の多くの結論を覆えた。

2. 再計算の結果

この報告書では、事故の結果に影響を及ぼす7つの因子について修正係数 RF (Recoverable Factor) を第2表のように評価している。 $RF=16$ を用いて RSS の結果を再計算した結果を第5図に UCS Revised とし示してある(事故の頻度は RSS のものをそのまま用いている)。RSS では1,000万年の間に起る最大の事故で死者2,300人、急性疾患5,600人となっているが、この UCS Revised ではそれが死者36,800人、急性疾患90,000人に増加している。

第2表 UCS-シェラ・クラブによる
修正係数(RF)

項 目	RF -最大値	RF -安全側
放射線影響	4	4
退 避	5	1.5
遮 蔽	1.6	1.2
ブルーム上昇	1.7	1.0
炉心よりの放射能放出量	2	1.5
人口増加(10年間)	1.6	1.2
地上線量被曝時間	1.5	1.2
RF 合計	261	15.6

この UCS Revised の曲線は、RSS で事故発生確率を過小評価している点を考慮していない。われわれと委員のあるものは、この係数を10~300倍と考えているので RSS の対数正規分布の手法を用いると中間値は60となる。UCS Revised の曲線の頻度を60倍にしたものを UCS Revised II とし第5図に示してある。Revised II の曲線によると、原子力発電所のリスクは、他の人的リスクと同程度かあるいはそれを超えることを示している。

Ⅶ. お わ り に

従来、原子力の安全分野の努力は主として自然科学的観点からなされて来ており、いかにして安全を高めるかという目標に向かって進められて来た。今後、原子力が本格的に社会に受け入れられるためには、「どの程度安全ならば社会が充分安全と認めるか」という問題につき国民的合意が必要な時期に到達している。

このためには、自然科学のみならず、社会科学的に問題を掘り下げることが必要となろう。その手法の一つとして、RSS のような確率論的リスク評価の手法は、今後ますます重要になってくると思われる。