



エネルギー産業における過酷事故事例および  
事故時の影響評価結果に関する分析  
(受託研究)

Review of Severe Accidents and the Results of Accident  
Consequence Assessment in Different Energy Systems  
(Contract Research)

松木 良夫\* 高原 省五 本間 俊充 村松 健

Yoshio MATSUKI\*, Shogo TAKAHARA, Toshimitsu HOMMA and Ken MURAMATSU

安全研究センター

リスク評価・防災研究グループ

Risk Analysis and Applications Research Group  
Nuclear Safety Research Center

May 2008

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,  
Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2008

エネルギー産業における過酷事故事例および事故時の影響評価結果に関する分析  
(受託研究)

日本原子力研究開発機構安全研究センター  
原子力エネルギー関連施設安全評価研究ユニット  
松木 良夫\*、高原 省五、本間 俊充、村松 健+

(2008年4月14日受理)

各種エネルギー産業（石炭、原油、天然ガス、水力および原子力）における過酷事故事例と同事故時の影響評価を行った事例を収集し、分析した。各種エネルギー産業の事故についてはスイスの Paul Scherrer Institute（以下、PSI）及び国際原子力機関（以下、IAEA）の情報を収集し、また原子力発電所における過酷事故については、これらの情報と共に破局的な原子力事故に関する米国大統領委員会報告及び欧州におけるいくつかの研究報告を整理した。調査結果は、事故の被害（死亡者数、負傷者数、避難者数および損害額）を指標として整理し、この結果を基に原子力発電と他のエネルギー産業における事故の規模を比較した。

原子力エネルギー産業における事故事例（チェルノブイリ事故）は、他のエネルギー産業における事故と比べて特に損害額が高くなる傾向があるが、急性死亡者数や負傷者数に注目した場合には、他のエネルギー産業と比べて原子力発電における事故の方が過酷な被害を伴うという傾向は確認できなかった。一方、他のエネルギー産業における事故と比較した場合、原子力事故は、事故の影響範囲が非常に広く、長期間にわたり影響を及ぼす点に特徴がある。

---

本報告書は、旧日本原子力研究所による文部科学省受託研究「原子力損害賠償制度に関する技術的基礎調査研究」の成果の一部である。

原子力科学研究所（駐在）：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

\*元 IAEA 職員

+ 研究計画調整室

Review of Severe Accidents and the Results of Accident Consequence Assessment  
in Different Energy Systems  
(Contract Research)

Yoshio MATSUKI\*, Shogo TAKAHARA, Toshimitsu HOMMA and Ken MURAMATSU<sup>+</sup>

Nuclear Facility Safety Research Unit  
Nuclear Safety Research Center  
Japan Atomic Energy Agency  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received April 14, 2008)

The cases of severe accidents and the consequence assessments in different energy systems, Coal, Oil, Gas, Hydro and Nuclear, were collected, and then they were further analyzed. In this report, the information on the accidents in various energy systems were collected from the sources of the Paul Scherrer Institute (hereinafter, "PSI") and the International Atomic Energy Agency (hereinafter, "IAEA"). The information on the severe accidents of nuclear power plants were collected from the report of the US Presidential Commission on Catastrophic Nuclear Accidents and several relevant reports issued in the countries of the European Union, together with the reports of the PSI and the IAEA. To analyze the collected information, several parameters, which are numbers of fatalities, injuries, evacuees and the costs of the damages, were chosen to characterize those accidents in different energy systems. And then, upon the comparison of these characteristics of different accidents, the impacts of the accidents in nuclear and other energy systems were compared.

Upon the results of the analysis, it is pointed out that the cost caused by the Chernobyl Accident, the severe accident in nuclear energy, tends to be higher than in the other energy systems. On the other hand, from the aspects of fatalities and injuries, it is not confirmed that the damages of the Chernobyl Accident are larger than in the other energy systems. However, it is also recognized, as the specific characteristics of the severe nuclear accident, that the impacts of the accident spread in a wider area, and stay for a longer period, in comparison with the ones in the other energy systems.

Keywords: Severe Accident, Accident Consequence Assessment, Energy Systems

---

This report partly uses the results of the research activities that were carried out as a part of the research project funded by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT) of Japan.

\* Former IAEA Staff

<sup>+</sup> Research Planning and Co-ordination Office

目次

1. はじめに.....	1
2. 過酷事故事例の調査.....	2
2.1 石炭エネルギー供給システムの事故.....	5
2.1.1 鉱脈発見と採掘における事故.....	5
2.1.2 石炭輸送中の事故.....	5
2.1.3 石炭精製プラントの事故.....	5
2.1.4 熱供給・発電プラントの事故.....	6
2.1.5 廃棄物保管・処分中の事故.....	7
2.1.6 石炭エネルギーシステム事故の原因.....	7
2.2 原油エネルギー供給システムの事故.....	9
2.2.1 原油エネルギー供給システムの概要.....	9
2.2.2 油田探索及び原油採掘作業中の事故.....	10
2.2.3 精油施設への長距離輸送および地域配送中の事故.....	13
2.2.4 精油施設での事故.....	15
2.2.5 発電プラント、熱供給プラントの事故.....	17
2.2.6 事故の原因となった原油製品.....	18
2.2.7 原油流出事故とその損害賠償.....	18
2.2.8 原油流出と生態系への影響.....	20
2.3 ガス・エネルギー供給システムの事故.....	24
2.3.1 ガス・エネルギー供給システムの概要.....	24
2.3.2 天然ガス産業の事故.....	25
2.3.3 LPG 産業における事故.....	28
2.4 水力発電システムの事故.....	30
2.4.1 建設工事中の事故.....	30
2.4.2 ダム崩壊リスクの推定.....	31
2.4.3 歴史的データに基づくダム崩壊頻度の推定.....	31
2.4.4 ダム崩壊頻度と崩壊にいたる平均時間の計算.....	33
2.4.5 ダム崩壊事故の発生頻度-影響曲線.....	35
2.4.6 ダム崩壊事故の損害額.....	38
2.4.7 ダムの用途別安全性.....	39
2.5 原子力の事故.....	40
2.5.1 原子炉で発生した過酷事故.....	40
2.5.2 商業用原子炉、原型炉、研究炉及び軍事用原子炉におけるその他の事故.....	51
2.5.3 原子炉以外の商業用核燃料サイクル施設および軍事用原子力施設における事故.....	53
2.5.4 原子炉以外の原子炉関連施設におけるその他の事故.....	55

3. 原子力エネルギー産業と他のエネルギー産業における事故の類似点 .....	57
3.1 前章までの調査結果のまとめ .....	57
3.2 エネルギー産業の事故の特徴を示すパラメータ .....	60
3.2.1 過酷事故の発生確率等の推定 .....	60
3.2.2 死亡者数による比較 .....	67
3.2.3 負傷者数による比較 .....	69
3.2.4 避難者数による比較 .....	69
3.2.5 損害額による比較 .....	71
3.2.6 事故発生地点からの一般公衆までの離隔に必要な距離 .....	75
3.2.7 事故による放射性物質の分布 .....	75
3.3 チェルノブイリ事故と他のエネルギー産業における事故の類似点 .....	78
4. まとめ .....	81
謝辞 .....	82
PSI 報告書 (Hirschberg et al., 1998) における引用文献 .....	83
米国大統領委員会報告書 (Presidential Commission, 1990) における引用文献 .....	85
参考文献 .....	85
付録 IAEA による事故分類・評価の指針 .....	86

## Contents

1. Introduction .....	1
2. The research on Severe Accidents in Energy Systems .....	2
2.1 Coal Chain accidents .....	5
2.1.1 The “Exploration” and “Extraction” stages .....	5
2.1.2 The “Transport” stage.....	5
2.1.3 The “Conversion Plant” stage .....	5
2.1.4 The “Heating and Power Station” stage .....	6
2.1.5 The “Waste storage and disposal” stages .....	7
2.1.6 Causes of coal accidents .....	7
2.2 Oil Chain accidents .....	9
2.2.1 Breakdown of the oil chain into stages .....	9
2.2.2 The “Exploration” and “Extraction” stage.....	10
2.2.3 “Transportation to Refinery” and “Regional Distribution” stages.....	13
2.2.4 “Refinery” stage .....	15
2.2.5 “Power plant” and “Heating” stages.....	17
2.2.6 Oil products involved in accidents.....	18
2.2.7 Oil spills accidents and compensation for the damage.....	18
2.2.8 Oil spills and ecological impacts.....	20
2.3 Gas Chain accidents .....	24
2.3.1 Breakdown of the gas chain into stage.....	24
2.3.2 Accidents of Natural gas chain.....	25
2.3.3 Accidents of LPG .....	28
2.4 Hydro Chain accidents.....	30
2.4.1 Accidents during the construction of dams.....	30
2.4.2 Evaluation of dam failures risk.....	31
2.4.3 Evaluation of the frequency for dam failures on the basis of historical data.....	31
2.4.4 Evaluation of the mean time for dam failures.....	33
2.4.5 Frequency-Consequence curves for dam failures .....	35
2.4.6 Cost of dam failures.....	38
2.4.7 Safety of dams corresponding to various purposes.....	39
2.5 Nuclear Chain accidents.....	40
2.5.1 Severe accidents in nuclear chain .....	40
2.5.2 Accidents in nuclear power reactors .....	51
2.5.3 Accidents in nuclear facilities for commercially and military .....	53
2.5.4 Accidents in nuclear cycle facilities .....	55

3. The similarity of the accidents between Nuclear energy and Other energy sectors .....	57
3.1 Summary of incidents research .....	57
3.2 The features of accidents in Energy sector .....	60
3.2.1 Evaluation of Severe Accident Frequency .....	60
3.2.2 Comparative Evaluation in terms of number of immediate fatalities .....	67
3.2.3 Comparative Evaluation in terms of number of injured .....	69
3.2.4 Comparative Evaluation in terms of number of evacees .....	69
3.2.5 Comparative Evaluation in terms of number of damage cost .....	71
3.2.6 Offset distance from release point to public .....	75
3.2.7 Distribution of Radioactive Materials released by severe accident .....	75
3.3 The similarity of Chernobyl accident with accidents of other energy sector .....	78
4. Summary .....	81
Acknowledgments .....	82
Reference PSI report .....	83
Reference US Presidential Commission Report .....	85
Reference .....	85
Appendix Guidance of Classification and Assessment of Accidents by the IAEA .....	86



表リスト

- 表 2.1 PSI が有する事故データベースの収集期間と各発電システムの段階区分
- 表 2.2 PSI データベースに収録されている事故原因、事故指標及び産業別の事故件数
- 表 2.3 1969 年から 1996 年までに発生した各種発電システムの過酷事故発生件数、死亡者数、負傷者数、避難者数および損害額、並びにこれら指標の単位発電電力量当りの値
- 表 2.4 炭鉱における過酷事故事例
- 表 2.5 石炭燃焼装置あるいは石炭火力発電所からの放出により一般公衆に死亡者が発生した事故
- 表 2.6 石炭火力発電所の事故により発生した損害額の一覧表
- 表 2.7 原油探索・採掘作業中に発生した過酷事故の一覧
- 表 2.8 2,000 万ドル（1996 年価値換算値）を超える原油探査中の事故
- 表 2.9 1,200 万ドル（1996 年価値換算値）を超える原油採掘中の事故
- 表 2.10 60 人以上の死亡者を出した長距離輸送及び地域配送中の事故（1969 年～1996 年）
- 表 2.11 損害額 2,000 万ドル（1996 年価値換算値）を超える精油施設への長距離輸送中の事故
- 表 2.12 損害額 1,500 万ドル（1996 年価値換算値）を超える原油地域配送中の事故
- 表 2.13 1969 年から 1996 年までに 5 人以上の死亡者を出した原油精製施設の事故
- 表 2.14 損害額 2,500 万ドル（1996 年価値換算値）を超える原油精製施設の事故
- 表 2.15 発電および熱供給プラントにおける損害額の大きな事故
- 表 2.16 海への原油流出経路
- 表 2.17 Ixtoc 1 油田事故における損害額
- 表 2.18 Amoco Cadiz 号原油流出事故による損害賠償請求額と和解額
- 表 2.19 主要なタンカーによる原油流出事故の概要
- 表 2.20 タンカーおよび原油採掘プラットフォームでの原油流出事故における損害賠償請求額、原油流出量、生態系への影響、海岸線からの距離、気象及び海流の状況
- 表 2.21 原油発電システムの各ステップにおける事故 1 回あたりの損害最高額
- 表 2.22 天然ガスと LPG の輸送と貯蔵方式の概要
- 表 2.23 図 2.6 および図 2.10 に用いられている用語の解説
- 表 2.24 ダムの種類と用途
- 表 2.25 ダムまたは水力発電所の建設工事中に発生した事故の例
- 表 2.26 ダム崩壊頻度推定の例
- 表 2.27 西側諸国におけるダム崩壊の頻度と  $MTBF_k$
- 表 2.28 全ダム崩壊事故の発生頻度
- 表 2.29 建設後 5 年以上経過して発生したダム崩壊事故の発生頻度
- 表 2.30 原子力の過酷事故とその影響
- 表 2.31 ベラルーシ、ロシアおよびウクライナにおけるチェルノブイリ事故の影響による致死がんの推定発生数
- 表 2.32 チェルノブイリ事故による被ばく線量
- 表 2.33 ロシア、ベラルーシおよびウクライナの事故復旧措置予算と支出の概要
- 表 2.34 チェルノブイリ事故の損害推定額
- 表 3.1 1969 年から 1996 年までの事故直後の死亡者数の多かった事故
- 表 3.2 1969 年から 1996 年までの負傷者数の多かった事故
- 表 3.3 1969 年から 1996 年までの避難者数の多い事故
- 表 3.4 1969 年から 1996 年までの損害額の大きな事故
- 表 3.5 原子炉事故が発生する 5 つの要素とその頻度
- 表 3.6 100 基の原子炉における事故発生確率と影響
- 表 3.7 プラント毎の PSA 評価結果の平均推定値
- 表 3.8 損害額の大きなエネルギー関連産業の事故

表 3.9 化学産業における事故の影響距離に関する情報

表 3.10 危険物の事故時の影響可能距離

表 3.11 他のエネルギー産業事故影響のチェルノブイリ事故との類似性

図リスト

- 図 2.1 1969年から1996年に5人以上の死亡者を出した石炭採掘事故の原因別発生頻度（OECD 諸国とその他の各国別）
- 図 2.2 5人以上の死亡者を出した原油産業事故の発生数（1950年～1996年）
- 図 2.3 1969年から1996年に5人以上の死亡者を出した原油産業事故のステップ毎の割合
- 図 2.4 LPGおよび天然ガス産業において5人以上の死亡者を出した事故件数
- 図 2.5 1969年から1996年に5人以上の死亡者を出した天然ガス産業事故のステップ毎の割合
- 図 2.6 天然ガス産業の輸送、加工および貯蔵ステップにおける事故の原因
- 図 2.7 1969年から1996年に発生した天然ガス輸送パイプライン事故の原因
- 図 2.8 5人以上の死亡者を出したLPG事故のステップ毎の割合
- 図 2.9 1969年から1996年に発生したLPG事故のステップ毎の割合
- 図 2.10 1969年から1996年に発生したLPG事故のステップ毎の原因
- 図 2.11 1850年から1996年までの期間に西側諸国（米国、カナダ、西ヨーロッパ、オーストラリア、ニュージーランド）で建設されたダム数および崩壊したダムの数
- 図 2.12 1850年から1996年及び1930年から1996年までの期間に建設されたダムの崩壊時期
- 図 2.13 ダム崩壊頻度 ( $fr_k$ ) と初注水から5年を越えた後に崩壊の徴候が見られた頻度
- 図 2.14 米国、カナダ、オーストラリア、ニュージーランドおよび西ヨーロッパで発生した全タイプのダム崩壊事故（貯水が全てなくなった事故に限る）において、X人以上の死亡者を出したダム崩壊事故の発生割合
- 図 2.15 米国、カナダ、オーストラリア、ニュージーランドおよび西ヨーロッパで発生した全タイプのダム崩壊事故（貯水が全てなくなった事故に限る）において、X人以上の死亡者を出したダム崩壊事故の発生頻度と死亡者数の関係
- 図 2.16 アジア・アフリカ地域、並びに西側諸国において、死亡者X人以上の死亡者を出したダム崩壊事故の発生頻度
- 図 2.17 損害額  $X \times 10^6$  ドル（1996年価値換算値）以上の損害を出した事故数
- 図 2.18 1930年から1996年までの期間に、オーストラリアとニュージーランドを含む欧米諸国におけるダム崩壊事故の用途別、様式別の発生頻度
- 図 3.1 即発性の死亡に関する相補的累積密度関数
- 図 3.2 晩発性の影響による年間死亡率の相補的累積密度関数
- 図 3.3 スイス Mühleberg 原子力発電所から 800 km 以内の住民が受ける集団線量と、そのような被ばくを引き起こしうる事故の超過発生頻度
- 図 3.4 スイス Mühleberg 原子力発電所から 800 km 以内の晩発性がんによる死亡者数と、そのようながんを発生させる事故の超過発生頻度
- 図 3.5 スイス Mühleberg 原子力発電所から暫定的立ち入り制限区域の大きさと、そのような制限区域をもたらす事故の超過発生頻度
- 図 3.6 スイス Mühleberg 原子力発電所事故に伴い発生する恒久的廃棄区域の大きさとそのような廃棄区域をもたらす事故の超過発生頻度
- 図 3.7 スイス Mühleberg 原子力発電所から 20 km 以内の晩発性がんによる死亡者数のそのようながんを引き起こしうる事故の超過発生頻度
- 図 3.8 1969年から1996年までの死亡者数5人以上（事故後短期間における死亡者数）となる過酷事故のF-N曲線（GWe・年当り）
- 図 3.9 1969年から1996年までに発生したX人以上の死亡者を出した水力発電（事故直後に死亡した人数）の発生頻度と、Mühleberg 原子力発電所を対象に実施されたPSAにより推定された晩発性死亡者数の平均値と事故発生頻度（GWe・年当り）に関するF-N曲線
- 図 3.10 1969年から1996年までに各エネルギー産業において負傷者数X人以上を出した過酷事故（負傷者数10人以上）のF-N曲線（GWe・年当り）

- 図 3.11 1969年から1986年及び1969年から1996年の期間で200人以上の避難者数を出した過酷事故件数の比較
- 図 3.12 1969年から1986年及び1969年から1996年の期間で200人以上の避難者数を出した過酷事故における避難者数の総計件数の比較
- 図 3.13 1969年から1986年及び1969年から1996年の期間で200人以上の避難者数を出した過酷事故における避難者数（GWe・年当り）の比較
- 図 3.14 1969年から1986年及び1969年から1996年の期間に発生した5百万ドル以上（US\$1996年換算値）の被害を出した過酷事故の発生件数
- 図 3.15 5百万ドル（US\$1996年換算値）以上の損害を出した過酷事故における合計損害額のエネルギー産業間における比較
- 図 3.16 5百万ドル（US\$1996年換算値）以上の損害を出した過酷事故における損害額（GWe・年当り）のエネルギー産業間における比較

## 1. はじめに

各種エネルギー産業の経済性、環境及び人間の健康への影響を評価する場合、通常の運転状態だけでなく通常状態から逸脱するような事象が発生した場合について、その影響を評価する必要がある。また、そのような異常事象の発生頻度を評価することも、社会にとって最適な選択肢を選ぶ上で重要な課題である。本報告書では、これまでにエネルギー産業において発生した過酷事故の発生頻度とその影響についてPaul Scherrer Institute（以下、PSI）が作成したエネルギー産業における過酷事故データベース（Energy-related Severe Accident Database: ENSAD）を中心に、国際原子力機関（以下、IAEA）が整理した情報（Matsuki, 2002）、原子力発電所における破局的な原子力事故に関する米国大統領委員会報告（Presidential Commission, 1990）および欧州におけるいくつかの研究報告をまとめて整理し、分析した。

PSIによる過酷事故データベースの目的は、スイスにおけるエネルギー源選択の科学的な根拠を提供することである。しかしその手法は、スイス国内に限られることのない一般的な比較リスク手法に基づいて作成されており、日本においてもエネルギー源を選択する際に有用な情報となることが期待される。データベースは、各エネルギー産業における過酷事故によって生じた影響について、経済的損害、負傷者数、死亡者数および避難者数の観点から調査を実施し、整理している。

米国における大統領委員会では、原子力事故が発生した場合に国家が費やさなければならない負担について検討するために、チェルノブイリ事故の損害額の推定を行い、原子力発電所で過酷事故が発生した場合のリスク評価を実施している。これらの検討は、主にプライス・アンダーソン法に基づく米国の原子力損害賠償制度を整備するために実施された。原子力発電所では、公衆に影響をおよぼすような事故の発生回数が非常に少ないため、他のエネルギー産業と比べ、事故の経験を基に環境や健康への影響を評価することが困難である。このため、事故条件を仮定して実施される確率論的安全評価（Probabilistic Safety Assessment: PSA）手法の結果が、影響を推定するために有用であると考えられる。大統領委員会の報告書には、同手法による検討も含まれているため、この点についても参照した。

本報告書では、これらの資料を参照し整理するとともに、原子力発電と他のエネルギー産業における事故の規模を比較し、原子力エネルギー産業における事故の特徴を抽出して、それらの事故による影響の類似点と相違点を検討する。以下、第2章では、PSIのENSADに基づく報告書の概要をまとめ、各種エネルギー産業における事故事例の調査結果を記述する。第3章では、原子力発電所において過酷事故が発生する確率を評価した米国大統領委員会の報告とPSIによるPSAの結果を整理し、原子力エネルギー産業と他のエネルギー産業における事故の特徴を比較する。同章ではIAEA（IAEA, 1996）の方法に基づき、危険物質が事故時（火災、爆発、漏洩）に影響を及ぼす可能性のある距離について記述する。第4章は、これらの調査結果を分析し、まとめた結果である。なお、上述のように本報告書の第2章と第3章はPSI報告書（Hirschberg, et al., 1998）及び米国大統領委員会の報告書（Presidential Commission, 1990）の要約を整理しており、これらの報告書における引用文献を紹介のため原文と同様に示すこととし、それらの引用文献については報告書の最後に著者らの引用文献と分けて示すこととした。

## 2. 過酷事事故事例の調査

本章では、世界の石炭、原油、天然ガス、水力および原子力の各エネルギー産業において、死亡者 5 人<sup>1</sup>、負傷者 10 人、避難者数 200 人、被害総額 500 万ドルのいずれかを越えた事故に関する調査結果を示す。本調査は、スイスの PSI が収集したデータベース（Hirschberg et al., 1998）を中心に参照しており、各産業における事故の規模と特徴を比較しながら過酷事故の事例をまとめている。各事例情報は、各エネルギー産業について燃料の採取から発電送電を経て廃棄物を処理・処分するまでの各ステップに分類して収集されている。表 2.1 に、PSI が有する事故データベースの収集期間と、各発電システムのステップを示す。なお、本章に示された見解は PSI 報告書に基づいている。

表 2.1 PSI が有する事故データベースの収集期間と各発電システムの段階区分

エネルギー源	データ収集対象期間	段階区分
石炭	1945 年～1996 年	鉱脈発見、石炭採掘・出荷準備、精製プラントへの輸送、精製処理、輸送、発電プラント、熱供給プラント、廃棄物処理、廃棄物処分
原油	1969 年～1996 年	油田発見、採掘、精油所への輸送、精油所、地域配送、発電プラント、熱供給プラント
天然ガス	1969 年～1996 年	ガス資源探査、採掘と処理、長距離輸送（パイプライン）、遠隔地・地域・局地配送、発電プラント、熱供給プラント
水力	1850 年～1996 年 1930 年～1996 年	左期間におけるダム崩壊事故データを用いた事故発生頻度の算出
原子力	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 確率論的リスク評価手法による事故発生頻度の算出</li> <li>・ チェルノブイリ事故</li> </ul>

表 2.2 に、過酷事故に関するカテゴリ（死亡者 5 人、負傷者 10 人、避難者数 200 人、被害総額 500 万ドルのいずれかを越えた事故）及び事故の原因に関するカテゴリ（全産業における人為的あるいは自然による事故、並びにエネルギー産業における人為的あるいは自然による事故）別に、同データベースに収集されている事故の件数を示す。同表からわかるように、本データベースにはエネルギー産業以外の事故も収集されており、これらは人為的あるいは自然現象の影響を受けて発生する事故を分類して計上されている。全事故のうち一部は、表 2.2 における A～F（G においてこれらを集計している）を基準とする事故分類によって過酷事故として整理されている。本報告書は、これらの分類に基づいてエネルギー産業における人為的な過酷事故 A 項、B 項、C 項及び F 項を対象とする PSI の分析結果を調査したものである。以下、本報告書における各表は、表 2.2 に示された分類 A、B、C 及び F に基づいて、ある事故における被害が死亡者 5 人、負傷者 10 人、避難者数 200 人、被害総額 500 万ドルのいずれかを越えた事故を上回る場合、その指標に関する被害のみを計上した結果である（例えば、ある事故の規模が死亡者数 10 人及び負傷者数 3 人であった場合、この事

<sup>1</sup> 本報告書における死亡者とは事故後の急性死亡によるものであり、晩発性の影響による死亡（例：放射線被ばくによるがんや微小粒子の吸引による肺塵症など）は原則含まない。

故は死亡者数の観点から過酷事故として計上されるが、負傷者数の観点からは過酷事故として計上されない。したがって、この事故による負傷者数は本報告書の検討対象とはならない。

表 2.2 PSI データベースに収録されている事故原因、事故指標及び産業別の事故件数  
( (Hirschberg et al., 1998, Table 5.4.1) 著者が一部整理して掲載)

産業別 (原因 <sup>(1)</sup> )		全事故数 (過酷事故以外も 含む)	過酷事故件数						
			A	B	C	D	E	F	G
全産業 (自然)		3850 件	2254	291	1653	0	0	221	3107
全産業 (人為)	エネルギー産業 (人為)	4290 件	846	542	174	632	30	309	1943
	エネルギー産業以外 (人為)	5774 件	1636	1285	446	0	5	877	3433
全事故数		13914 件	4736	2118	2273	632	35	1407	8483

A: 死亡者数 5 人以上

B: 負傷者数 10 人以上

C: 避難者数 200 人以上

D: 炭化水素の排出量 10,000 トン以上

E: 25 km<sup>2</sup> 以上の範囲にわたる土壌 / 水域が除染

F: 5 百万ドル (1996US\$) 以上の損害

G: A or B or C or D or E or F

<sup>(1)</sup> PSI における事故原因として人為と自然の分類は必ずしも明確ではないが、例えば本報告書の 2.4.1 でも記述しているように死亡の主な原因が自然災害によるものであっても、その遭遇機会がエネルギー産業により創出されている場合、本表における人為に分類されている。

表 2.3 に、各種発電システムの過酷事故における死亡者数、負傷者、避難者数および損害額、並びにこれら指標の単位発電電力量当りの値を示す。なお、事故の影響を示すこれらの指標は、文献や調査の時期によって異なる値が提示されていることがあるため、PSI におけるデータベースでは幅を持つ値として示されているが、本報告書では、これらの値のうち保守的に最大の値を示すこととした。

死亡者 5 人以上、負傷者 10 人以上、避難者数 200 人以上、被害総額 500 万ドルのいずれかを超える事故の発生件数では、原油の事故が他を圧倒している。原子力の事故は、わずかに 2 件が記録される。事故 1 回当たりの影響をみると、原子力事故の避難者数と損害額の大きさが極めて目立つ。原子力事故の避難者数は他のエネルギー産業における事故の 10 倍以上高く、また経済的損害額では、原子力事故のそれが他のものと比べて数 100 倍である。一方、死亡者数と負傷者数については、原子力事故は、他のエネルギー産業の事故と比較して、必ずしも大きな数字ではない。むしろ死亡者数の順位では、水力発電、石炭、原油および LPG による発電システムの次に位置し、また負傷者数では水力発電の記録に続く。また、単位発電量当りの値に注目した場合、他のエネルギー産業と比べて原子力事故による被害は、損害額を除いて特に大きくない。一方で、LPG の死亡者数、負傷者数および避難者数が大きくなっている。

以下、本章では、石炭、原油、天然ガス、水力および原子力の各エネルギー供給システムにおける過酷事故の特徴について、PSI の報告書 (Hirschberg et al., 1998) の内容を要約する。

表 2.3 1969 年から 1996 年に発生した各種発電システムの過酷事故発生件数、死亡者数、負傷者数、避難者数および損害額、並びにこれら指標の単位発電電力量当りの値  
(Hirschberg et al., 1998, Table F4; F6; F8; F10 を著者が整理して作成)

		石炭	原油	天然ガス	LPG	水力	原子力
死傷者数 5人以上の事故	発生件数	187	334	86	77	9	1
	死亡者総数*	8,272	15,623	1,482	3,175	5,140	31
	事故1件当りの死亡者数	44	47	17	41	571	31
	GWe/年当りの死亡者数	0.342	0.418	0.085	3.279	0.884	0.008
負傷者数 10人以上の事故	発生件数	28	187	62	72	2	1
	負傷者総数*	1,698	16,463	3,735	13,439	1,136	370
	事故1件当りの負傷者数	61	88	60	187	568	370
	GWe/年当りの負傷者数	0.070	0.441	0.213	13.878	0.195	0.1000
避難者数 200人以上の事故	発生件数	0	65	18	29	3	2
	避難者総数*	0	269,740	103,290	505,564	199,000	279,000
	事故1件当りの避難者数	0	4,150	5,738	17,433	66,333	139,500
	GWe/年当りの避難者数	0	7.224	5.895	522.077	34.200	75.719
経済損害 500万US\$ 以上の事故 (1996年換算価値 10 <sup>4</sup> \$)	発生数	7	226	15	27	7	2
	損害総額*	494.6	23,772.2	1,520.4	1682.9	3607.4	344,627.2
	事故1件当りの損害額	70.66	105.19	101.36	62.33	515.34	172,313.6
	GWe/年当りの経済的損失	0.020	0.637	0.087	1.738	0.620	93.530

\* 死亡者総数、負傷者総数、避難者総数及び損害総額は、入力データとなる文献によって数値に違いがあるため、PSI 報告書ではそれら数値の最大値と最小値を示しているが、本表ではそのうち最大値のみを示している。



## 2.1 石炭エネルギー供給システムの事故

石炭を使用したエネルギー供給システムの各ステップ（鉱脈発見、採掘・石炭出荷準備、精製プラントへの輸送、精製処理、輸送、発電プラント、熱供給プラント、廃棄物処理、廃棄物処分）で発生した事故について、概要を示す。

### 2.1.1 鉱脈発見と採掘における事故

鉱脈発見・探査の作業では過酷な事故は発生していないが、採掘作業における事故での死亡者数は非常に多い。例えば、英国だけでも 1850 年以來、10 万人の炭坑夫が炭坑事故で死亡している（Occupational Safety and Health Reporter, 1998）。また 1997 年の報告によると、中国では 1 年間に 1 万人以上の炭坑夫が事故で死亡している。なおこの数には、その後肺塵症で死亡した人の数は含まれていない。表 2.4 に、過酷炭鉱事故例を示す。

表 2.4 炭鉱における過酷事故事例（Hirschberg et al., 1998, Table 6.2.3）

事故発生年月日	炭坑名	場所	死亡者数	従事者数	事故の原因
1931年 2月12日	Fushun	満州	3,000	不明	—
1942年 4月26日	Honkeiko	満州	1,527	4400	一酸化炭素中毒、炭塵・メタンの発火
1906年 3月10日	Courrieres	Pas de Calais/France	1,099	7594	炭塵爆発
1895年 6月10日	北部シレジア地方	不明	550	不明	—
1963年 11月9日	三河	日本	458	2080	一酸化炭素中毒、炭塵爆発
1972年 6月6日	Wankie Colliery	ローデシア (現ジンバブエ)	427	不明	3つのガス爆発
1962年 2月7日	Luisenthal	西ドイツ西部 ザール州	299	不明	メタンの発火
1992年 3月3日	Turkey	Kozlu	272	不明	メタンの爆発
1984年 7月16日	Mei Shan	台湾	121	不明	炭坑内火災

### 2.1.2 石炭輸送中の事故

石炭輸送における事故の発生頻度は、非常に低い。最過酷の被害を伴った事故は 1983 年の 2 月 12 日、27,000 トンの石炭を積んだ石炭貨物船の事故である。この貨物船は、米国ヴァージニア州 Cincoteague の沖合いの嵐でしけた海で転覆、沈没した。36 人の乗組員の内、生存者は 3 人だけであった。

### 2.1.3 石炭精製プラントの事故

採掘後の石炭は他の鉱物などを含む為、直接暖房に使用できる一部を除き、多くは加熱処理により精製することで、はじめてエネルギー源として使用可能となる。また、市場価値を付与する為にも、これらに含まれる不純物を除去する必要がある。石炭の精製は、3 つの方法に大別できる。第一

は、練炭状にするなどの機械的な転換処理。第二は、粘結してコークス化、ガス化、液化、または燃焼して、石炭を二次的な燃料に転換処理する方法。第三は、燃料以外の用途に石炭を用いる場合（化学産業用のコール・タールや活性炭の製造）の精製処理である（Gerhartz et al., 1990）。

精製処理過程の事故で、多くの死亡者が出ることはごく希にしかない。最も被害の大きかった事故は、経済的損害の観点から、1983年の7月13日英国で発生した石炭精製処理プラントの火災事故である。死亡者は出なかったが、金銭的な損害が1200万ポンド（1996年換算値で約3000万ドル）であった。

#### 2.1.4 熱供給・発電プラントの事故

熱供給プラントあるいは発電プラントにおいて最も大きな被害を伴った事故は、1952年の12月にロンドンで発生したスモッグが原因で、4000人以上の死亡者が出たケースである。街全体が暖かい空気に覆われる中、その下の冷たい空気の層が極めて濃度の高い亜硫酸ガスと石炭の煙を含んでいた為、4000人以上が直ちに死亡し、その後しばらくして、更に8000人が死亡した（Nash, 1976）。

この他にも、特定の気象条件の下、石炭火力発電プラントもしくは石炭燃焼装置が原因で、一般公衆を死に至らしめた事故は少なくない（ACNS, 1989）。表 2.5 に、このような事故の一覧を示す。なお、産業国においてこの種の事故は、1966年以降発生していない。これは、プラントからの放出物質と大気汚染に対するより厳しい基準が設けられた為である。

表 2.5 石炭燃焼装置あるいは石炭火力発電所からの放出により一般公衆に死亡者が発生した事故 (Hirschberg et al., 1998, Table 6.2.4)

事故発生年	事故発生場所	死亡者数
1930	ベルギー、Meuse Valley	60
1948	米国、ペンシルベニア州、Donora	17
1952	ニューヨーク	約 360
1952	ロンドン	約 4,000
1956	ロンドン	約 1,000
1962	ロンドン	約 850
1962	大阪	約 60
1966	ニューヨーク	168

石炭火力発電所の事故として、5人以上の死亡者が発生した過酷事故は、以下の2事例が知られている。一つは、旧東ドイツで1948年の5月に発生した炭塵発火事故であり、50人が死亡し、70人が負傷した。もう一つは、1990年7月13日に中国のShandongで発生した事故であり、45人が死亡している。表 2.6 に、石炭火力発電所の事故により発生した損害額の一覧表を示す。

表 2.6 石炭火力発電所の事故により発生した損害額の一覧表  
(Hirschberg et al., 1998, Table 6.2.5)

場所	事故発生 年月日	損害額		原因
		100 万 US ドル (発生当時)	100 万 US ドル (1996 年価値換算)	
米国	1975 年 01 月 04 日	11.5	29.4	火災 (機械的損傷)
米国	1975 年 01 月 17 日	11.3	28.8	火災 (空気加熱機内)
米国	1976 年 11 月 21 日	21.3	52.0	火災 (石炭コンベア)
米国	1977 年 07 月 07 日	45.0	103.5	コンピュータの問題
米国	1980 年 10 月 14 日	27.0	48.8	爆発および火災
米国	1986 年 07 月 28 日	24.6	33.4	竜巻

### 2.1.5 廃棄物保管・処分中の事故

採掘と石炭の選別過程からは、石炭くずが廃棄物として発生する。例えば米国内だけでも、毎年約  $1.5 \times 10^8$  トンの石炭くずが発生しており、無視できない量である。近年の石炭産業では、安全性、経済性および環境保護の観点から、これら石炭くずの効果的な廃棄処分が、重要な課題となっている (Usmen, et al., 1987)。

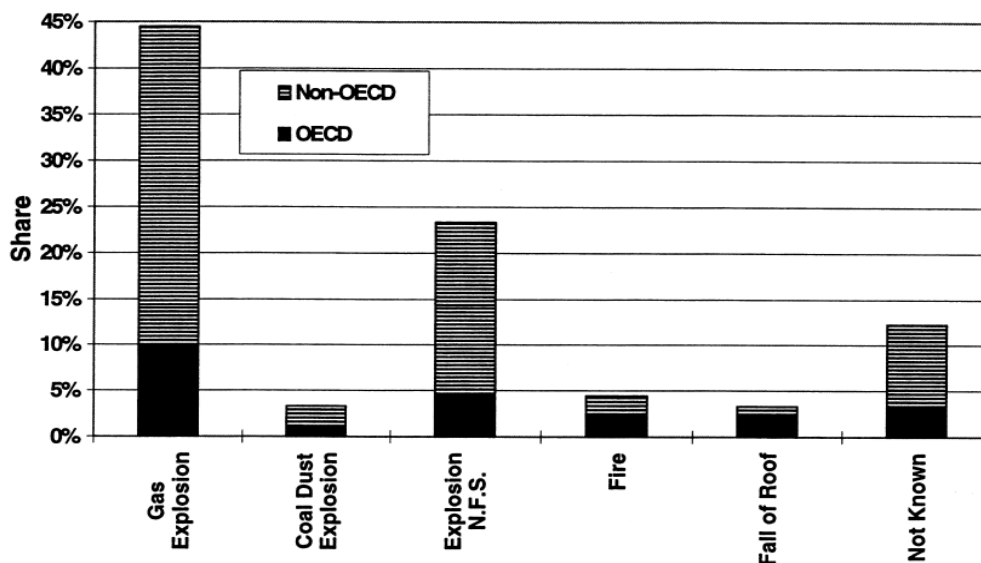
石炭廃棄物処分中の事故で最も大きな被害を伴った事故の一つは、1972 年 2 月 2 日に、ウエスト・バージニア州の Buffalo Creek Tailings ダムで発生したものである。石炭くずを堆積しただけのダムの崩壊によって発生した洪水により、125 人が死亡した。この事故の原因は、石炭くずの堆積でできたダムそのものが、工学的なダムとしての能力を欠いていたことにある (Jansen, 1983)。ダムが崩壊する直前には、水位が一番上の縁からわずか 0.3 m の下まで来ていた。ダム崩壊後、推定 6 m の高さの波が Buffalo Creek の谷を押し流した。

石炭の廃棄物は、よくスラグ片の巨大な堆積になることがある。これらの一部が山を滑り落ち、村を破壊した例もある (Clifton, 1992)。1966 年の 9 月 21 日には、南ウエールズの Aberfan で、石炭廃棄物貯蔵所の過酷な事故が起きている。この事故では山から滑り落ちたスラグ片が、ふもとにあった小学校を破壊し、144 人が死亡した (Bignell, et al., 1977)。このような事故は、特異な事故ではない。決して頻繁に起きる種類の事故ではないが、世界中で起きており、特に南ウエールズ地方で発生する頻度が高いと言われている (Klets, 1993)。

その他の石炭廃棄物貯蔵中の事故は、1982 年に中国で起きている。この事故では、滑り落ちた石炭くずが 284 人の労働者を呑み込んだ。

### 2.1.6 石炭エネルギーシステム事故の原因

世界の石炭火力産業で、5 人以上の死亡者を出した事故の原因の中の第一番は、炭坑のメタン爆発である。また、OECD 諸国以外では、石炭の採掘過程における事故のおよそ 3 分の 1 はガス爆発によるものである (図 2.1)。



N.F.S: No Further Specification

図 2.1 1969年から1996年に5人以上の死亡者を出した石炭採掘事故の原因別発生頻度 (OECD 諸国とその他の各国別) (Hirschberg et al., 1998, Fig. 6.2.5)

石炭産業における事故の特徴と傾向は、次の通り。

- この 20 年間で、OECD 諸国での事故発生件数は減少傾向にある。一方、非 OECD 諸国においては、逆の傾向が観察される。
- OECD 諸国での死亡者数は、大きく減少した。石炭の産出高が増加するにつれ、過酷事故の発生頻度も減少している。これは、法律が整備され、ガス爆発、石炭粉塵爆発、火事、ガス充満の予防に関する研究が進歩し、また、古い安全性に欠ける鉱山を閉鎖したためである。
- 石炭産業において、最も大きな事故が起きた生産過程は採掘作業である。一方、熱供給プラントおよび発電プラントにおける過酷な事故の発生は少ない。多くの死亡者を出した産業国でのスモッグ事故は、1950年代、1960年代に起きたが、その後は繰返されていない。
- 世界の石炭産業における死亡者 5人以上を出した過酷事故の主な原因は、地下採掘現場（炭坑）のメタン爆発である。OECD 諸国のこの種類の事故の発生頻度は、非 OECD 諸国のものの約 3分の1程度である。

## 2.2 原油エネルギー供給システムの事故

原油を使用したエネルギー供給システムの各ステップ（油田発見、採掘、精油所への輸送、精油所、地域配送、発電プラント、熱供給プラント）で発生した事故について、概要を以下に示す。

### 2.2.1 原油エネルギー供給システムの概要

図 2.2 に原油エネルギー供給システムで死亡者 5 人以上を出した事故の発生件数を示す。同図から 1965 年頃から事故件数が増加する傾向が観察されるが、これは 1960 年代に始まった原油需要の増加とそれに伴う油田探査、採掘、精製及び輸送活動が増大したためである。また 1965 年から 1979 年にかけて、事故発生数が大きくなり、1979 年、1980 年及び 1989 年が際立って事故の発生件数が多い。その後 1992 年以降は、急激に事故発生数が減少している。

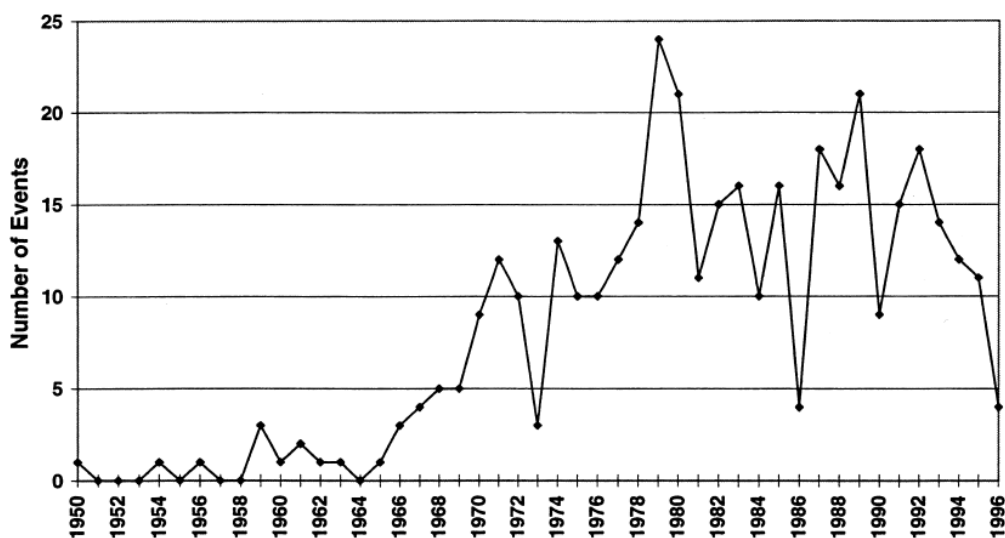


図 2.2 5 人以上の死亡者を出した原油産業事故の発生数（1950 年～1996 年）  
 (Hirschberg et al., 1998, Table 6.3.5)

極めて多くの死亡者を出した原油産業の事故としては、1982 年のアフガニスタンで発生したソビエト連邦の燃料輸送トラックと一般自動車の衝突事故により 2,700 人が死亡した事例と、1987 年にフィリピンのミンドロ沖で起きた死亡者 3,000 人を出したタンカーの衝突事故事例がある。負傷者の多い事故としては、1980 年 1 月 17 日にナイジェリア海岸沖で発生した油田 Funiwa-5 における事例がある。この事故では 3,000 人が負傷し、180 人が死亡している。

原油処理のステップ毎の事故を見ると、地域配送と精製施設への長距離輸送中の事故発生頻度が極めて高いことが分かる（図 2.3）。以下に各処理ステップ毎に事故の概要を示す。

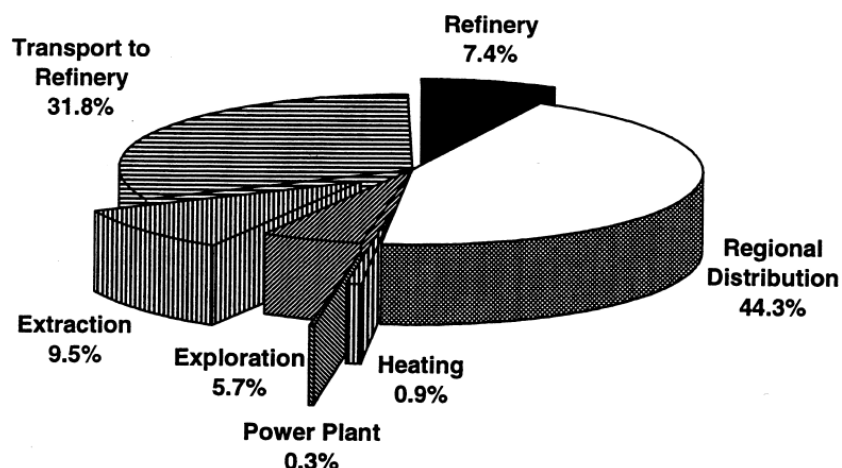


図 2.3 1969 年から 1996 年に 5 人以上の死亡者を出した原油産業事故のステップ毎の割合 (Hirschberg et al., 1998, Fig. 6.3.11)

### 2.2.2 油田探索及び原油採掘作業中の事故

1969 年から 1996 年までに発生した油田探索・採掘作業中の過酷事故の全ては、沖合いの油田で起きており、70 年代の後半から増加する傾向にある (Brown, 1981)。事故が発生する原因、あるいは過酷事故につながる原因は、海岸から油田までの距離が離れていて、作業者の作業・居住環境が通常の状態とは異なるためであると考えられる。表 2.7 に、原油探索・採掘作業中に発生した過酷事故の一覧を示す。

表 2.7 原油探索・採掘作業中に発生した過酷事故の一覧 (Hirschberg et al., 1998, Table 6.3.2)

事故発生日	作業ステップ	ユニットの種類	ユニット名	死亡者数
1988 年 07 月 06 日	採掘	Jacket	Piper Alpha	167
1980 年 03 月 27 日	探索	Semisubmersible	AlexanderKielland	123
1989 年 03 月 11 日	探索	Drilling Ship	Seacrest	91
1982 年 02 月 15 日	採掘	Semisubmersible	Ocean Ranger	84
1983 年 10 月 25 日	探索	Drilling Ship	Glomar Java Sea	81
1979 年 11 月 25 日	採掘	Jackup	Bohai II	72

「Jacket」とは油田構造物の一部で、この脚部は、海底に設置され油田を固定する。通常、鉄製であるが、最近建設された北海油田では、建設費節減の為、コンクリートが使われている。

「Jacket」は 25 年以上油田を利用する場合に設置される。「Jackup」とはジャッキ・アップ可能な移動可能な装置で、脚と大きなデッキから成る装置である。操作中は、脚は海底に停止し、容器がジャッキアップされ、デッキが海面から充分安全な高さに持ち上げられる。作業が終了すると、脚部は縮小し、装置は浮かび上がる。通常、「Jackup」は最大深さ 100 m から 120 m の油田に使用される。自力推進力は有しない。「Semisubmersible」は 2 個ないしそれ以上の船橋に取り付けられた支柱と、その上のデッキから成る装置である。通常は自力走行装置を持ち、最大水深 600 m から 800 m の海

底油田に使用される。操業中は、船橋に水が充填され、水面下に下がる。装置は通常の場合、いくつかの錨によって固定されるが、DPE (Dynamic Positioning Equipment) により固定されることもある。「Drilling Ship」は、ドリル装置付きの船で、自力航行能力がある。操業の為の位置固定には、DPE が使用され、最大水深 2000 m の海域での操業が可能である。

最過酷の原油探査中の事故は、1980 年の 3 月 27 日にノルウェー沖で起きている。5 つの脚に支えられたプラットフォーム「Alexander Kielland」が北海の強風で転覆した事故が挙げられる。錨で固定されていた脚の一つが崩れた際、212 人の内、123 人が溺死した。当時このプラットフォームは作業員の為の宿泊施設として使われていた。

最過酷の原油採掘中の事故は、1988 年 7 月 6 日にスコットランド東海岸の沖合いで発生した。事故は、夜間の圧搾作業中にガスが漏洩し、これに続いて爆発と火災が発生、プラットフォーム「Piper Alpha」を破壊した。施設の 3 分の 2 は 144 m の水深に沈み、167 人の死亡者を出した。

油田探査時に発生した事故を、損害額の観点からまとめて表 2.8 に示す。最過酷の事故は、1969 年 1 月 28 日にカリフォルニア沖でのボーリング作業中に発生した事故であり、その損害額は最高 20 億ドル (1996 年価値換算値) を記録している。これに次ぐ規模の事故は、1979 年 6 月 3 日にメキシコで発生している。この事故により米国側で求められた賠償額は 4 億ドルであるが、実際には 1800 万ドルのみが支払われている。メキシコの海岸を清掃・除染する為に 3400 万ドルが、また同油田を改修する為に 1 億ドル費やしている。

表 2.8 2,000 万ドル (1996 年価値換算値) を超える原油探査中の事故  
(Hirschberg et al., 1998, Table 6.3.5)

事故発生年月日	国	施設	名前	損害額 (当時) million US\$	損害額 (million 1996 US\$)
1969 年 01 月 28 日	米国	プラットフォーム	-	560	<b>1,947</b>
1979 年 06 月 03 日	メキシコ	プラットフォーム	Ixtoc-1	152	<b>310.9</b>
1982 年 02 月 15 日	カナダ	プラットフォーム	Ocean Ranger	86	<b>132.2</b>
1980 年 10 月 22 日	米国	プラットフォーム	Dan Prince	36	<b>65.0</b>
1990 年 09 月 22 日	英国	プラットフォーム	Ocean Odyssey	50	<b>56.7</b>
1977 年 01 月 12 日	台湾	プラットフォーム	Scan Sea	21	<b>51.5</b>
1976 年 03 月 01 日	ノルウェー	プラットフォーム	Deep Sea Driller	18	<b>47.1</b>
1984 年 08 月 16 日	ブラジル	プラットフォーム	Enchova	30	<b>44.5</b>
1983 年 10 月 16 日	東シナ海	掘削船	Glomar Java Sea	30	<b>44.8</b>
1981 年 08 月 27 日	インドネシア	掘削船	Petromar V	26	<b>42.4</b>
1985 年 09 月 18 日	マレーシア	プラットフォーム	South Sea III	24	<b>33.1</b>
1989 年 03 月 20 日	ベネズエラ	Well	-	20	<b>25.1</b>
1982 年 08 月 01 日	インド	探索プラント	Sagar Vikas	14	<b>21.5</b>

表 2.9 には原油採掘作業中の事故の損害額を示す。採掘作業中の事故の最高損害額は、北海の Piper Alpha 油田の爆発と火災によるものである。次いで、ブラジルの Enchova No.1 プラットフォームの 42 人の死亡者を出した事故である。また、水の侵入により浮力を失ない水没した、ノルウェーの Sleipner A プラットフォーム事故の損害額である。

表 2.9 1,200 万ドル（1996 年価値換算値）を超える原油採掘中の事故  
(Hirschberg et al., 1998, Table 6.3.6)

事故発生年月日	国／地域	施設	名前	損害額（当時） million US\$	損害額 million 1996 US\$
1988 年 07 月 07 日	英国	プラットホーム	Piper Alpha	1,200-1,500	1,440-1,800
1988 年 04 月 24 日	ブラジル	プラットホーム	Enchova No: 1	330	419.8
1991 年 08 月 23 日	ノルウェー	プラットホーム	Sleipner A	334.5	365.2
1978 年 04 月 16 日	サウジアラビア	ガス/油分離工場	-	54	123.1
1980 年 03 月 27 日	ノルウェー	プラットホーム	Alexander Kielland	66.2	119.5
1984 年 10 月 01 日	インドネシア	Oil and gas well	Bekapai Well BC7	55	81.6
1983 年 09 月 01 日	オーストラリア	プラットホーム	Key Biscayne	50	74.7
1986 年 10 月 24 日	米国	プラットホーム	Mexico II	53	72.0
1980 年 10 月 22 日	米国	プラットホーム	Dan Prince	36	64.9
1979 年 04 月 21 日	米国	プラットホーム	Solar Energy I	26	53.2
1980 年 12 月 11 日	エジプト	プラットホーム	Ocean Champion	25	45.1
1981 年 05 月 28 日	アンゴラ	プラットホーム	Sedco 250	22	36.0
1976 年 04 月 15 日	イラク	-	-	12	31.5
1990 年 08 月 20 日	北海	プラットホーム	West Gamma	24	27.2
1975 年 08 月 15 日	米国	Motor tanker	Globtik Sun	10	27.7
1996 年 01 月 28 日	エジプト	プラットホーム	-	25.7	25.7
1988 年 07 月 20 日	ベネズエラ	プラットホーム	-	20	25.4
1988 年 02 月 22 日	米国	プラットホーム	Keyes 302	15	19.1
1993 年 07 月 06 日	エジプト	プラットホーム	-	15	15.9
1982 年 07 月 14 日	米国	プラットホーム	Rig 52	8	12.3



### 2.2.3 精油施設への長距離輸送および地域配送中の事故

表 2.10 に、60 人以上の死亡者を出した精油施設への長距離輸送及び地域配送中の事故を示す。製油所への輸送中に発生した最過酷の事故は、1987 年 12 月 17 日にフィリピンのミンドロ沖の事故である。3,000 人を乗せたフェリーと原油タンカーが衝突し、両方とも爆発し沈没した。この事故の生存者はわずかに 26 人で、いずれもひどい火傷を負っていた。

地域配送中の事故としては、1982 年のアフガニスタンでの事故が最も深刻な被害を伴った事例である。ソビエト連邦の燃料トラックがアフガニスタン北部の Salang トンネル内で他の自動車に衝突し、爆発し炎に包まれ、有毒ガスを 2.7 km の長さのトンネル内に放出した。ソビエト連邦兵とアフガニスタン人が火傷と窒息により死亡している。

精油施設への長距離輸送では、原油輸送タンカーの爆発、火災およびが多発しており、衝突海上輸送における事故が最も多い。地域配送中の事故で一番多いものは、道路輸送である。1969 年から 1996 年の道路輸送中の事故の 52%はタンクローリー車の他の自動車との衝突、10%はタンクローリー車の路上での転倒である。

表 2.10 60 人以上の死亡者を出した長距離輸送及び地域配送中の事故（1969 年～1996 年）  
(Hirschberg et al., 1998, Table 6.3.3)

事故発生年月日	国	作業ステップ	死亡者数
1987 年 12 月 20 日	フィリピン	精油所への輸送	3,000
1982 年 11 月 01 日	アフガニスタン	地域配送	2,700
1994 年 11 月 02 日	エジプト	地域配送	580
1984 年 02 月 25 日	ブラジル	地域配送	508
1987 年 03 月 05 日	エクアドル	精油所への輸送	300
1992 年 04 月 22 日	メキシコ	地域配送	200
1984 年 10 月 15 日	ルーマニア	地域配送	150
1991 年 04 月 10 日	イタリア	地域配送	141
1989 年 03 月 08 日	ベトナム	精油所への輸送	130
1991 年 06 月 26 日	マレーシア	精油所への輸送	124
1992 年 03 月 08 日	タイ	精油所への輸送	112
1995 年 03 月 12 日	インド	地域配送	110
1978 年 11 月 22 日	ナイジェリア	地域配送	100
1991 年 11 月 22 日	インド	地域配送	90
1972 年 05 月 11 日	ウルグアイ	精油所への輸送	84
1979 年 11 月 15 日	トルコ	精油所への輸送	75
1990 年 01 月 24 日	中国	精油所への輸送	70
1978 年 10 月 12 日	シンガポール	精油所への輸送	64
1993 年 11 月 07 日	ナイジェリア	地域配送	60
1994 年 11 月 04 日	ナイジェリア	地域配送	60

表 2.11 に精油施設への長距離輸送中の事故による損害額を示す。この種の事故で最も損害額が大きい例は、1989 年 3 月 24 日のタンカー Exxon Valdez がアラスカ州の Valdez 港近くの Blight Reef に座礁した際のものである (Sharples, 1992)。当時同船は 158,000 t の原油を積んでいたが、その内

約 35,000 t の原油が海に流出した (OECD, 1991)。同事故はタンカーの原油漏洩事故として、米国史上最大のものである。

表 2.11 損害額 2,000 万ドル (1996 年価値換算値) を超える精油施設への長距離輸送中の事故 (Hirschberg et al., 1998, Table 6.3.7)

事故発生年月日	国/地域	施設	名前	損害額 (当時) million US\$	損害額 million 1996 US\$
1989年03月24日	米国	タンカー	Exxon Valdez	1200-2000	<b>1,360-2,260</b>
1977年05月11日	サウジアラビア	パイプライン	-	100	<b>244.9</b>
1976年 (日不明)	フランス	-	-	83	<b>217.3</b>
1979年07月20日	トリニダード・トバゴ	タンカー	Aegean Captain & Atlantic Empress	100	<b>204.6</b>
1978年03月15日	フランス	タンカー	Amoco Cadiz	75.0	<b>171.1</b>
1979年09月02日	米国	タンカー	Chevron Hawaii	68	<b>139.1</b>
1976年01月24日	太平洋	タンカー	Olympic Bravery	50	<b>130.9</b>
1978年04月16日	サウジアラビア	分離工場	-	54	<b>123.1</b>
1993年01月05日	英国	タンカー	Braer	115	<b>121.9</b>
1983年08月06日	南アフリカ	タンカー	Castillo de Bellver	72	<b>107.6</b>
1971年03月27日	米国	タンカー	Texaco Oklahoma	24	<b>87.8</b>
1977年07月08日	米国	パイプライン	-	35	<b>85.8</b>
1979年11月15日	トルコ	タンカー	Independenta	40	<b>81.8</b>
1976年10月17日	フランス	タンカー	Boehlen	31	<b>79.5</b>
1973年11月05日	カナリア海峡	タンカー	Golar Patricia	22.7	<b>75.9</b>
1974年02月22日	太平洋	タンカー	Giovanna Lolli Ghetti	23.1	<b>69.5</b>
1992年09月20日	インドネシア	タンカー	Nagasaki Spirit	60	<b>63.6</b>
1982年10月14日	黒海	タンカー	Unirea	39.7	<b>61</b>
1969年12月15日	カタール	タンカー	Marpresa	15.067	<b>60.8</b>
1979年 (日不明)	カナダ	タンカー	Kurdistan	30	<b>58.3</b>
1976年05月12日	スペイン	タンカー	Urquiola	18.7	<b>49.0</b>
1980年04月03日	タンザニア	タンカー	Albahaa B.	27	<b>48.7</b>
1969年07月24日	フランス	タンカー	Silja	11.6	<b>47.1</b>
1971年02月18日	大西洋	タンカー	Ferncastle	12.6	<b>46.3</b>
1972年12月19日	オマーン	タンカー	Sea Star	12.0	<b>42.8</b>
1978年02月23日	コロンビア	タンカー	Cassiopeia	14	<b>31.9</b>
1977年04月15日	パプア・ニューギニア	タンカー	Universe Defiance	11	<b>26.9</b>
1977年06月04日	サウジアラビア	充填場	-	11	<b>26.9</b>
1978年03月21日	インドネシア	タンカー	Aegis Leader	9	<b>20.6</b>

表 2.12 に地域配送中の事故の損害額を示す。最高の損害額を示した地域配送事故は、1981 年 11 月 14 日に米国で起きている。ガソリン運搬中のトラックがトレーラーと接触し、トレーラーが転倒した結果、7人が死亡した。このトラックは火災を起し、300 m に及ぶ炎の壁を作った。

表 2.12 損害額 1,500 万ドル（1996 年価値換算値）を超える原油地域配送中の事故  
(Hirschberg et al., 1998, Table 6.3.9)

事故発生年月日	国/地域	施設	損害額 (当時) million US\$	損害額 million 1996 US\$
1981 年 11 月 14 日	米国	タンカー	350	<b>571.3</b>
1981 年 01 月 19 日	米国	タンカー	280	<b>457.1</b>
1986 年 02 月 24 日	ギリシア	貯蔵区	300	<b>407.3</b>
1972 年 03 月 09 日	米国	油槽車	100	<b>355.5</b>
1992 年 04 月 22 日	メキシコ	-	300	<b>318</b>
1994 年 11 月 02 日	エジプト	-	140	<b>140</b>
1993 年 10 月 03 日	韓国	-	100	<b>106</b>
1980 年 03 月 07 日	フランス	タンカー	30	<b>54</b>
1993 年 03 月 06 日	チリ	-	50	<b>53</b>
1983 年 10 月 10 日	ニカラグア	-	25	<b>37.4</b>
1983 年 08 月 30 日	英国	貯蔵プラント	15	<b>22.5</b>
1972 年 10 月 25 日	米国	-	5	<b>17.8</b>
1969 年 11 月 20 日	オランダ	貯蔵プラント	4.9	<b>17.1</b>
1994 年 10 月 20 日	米国	-	15	<b>15</b>

#### 2.2.4 精油施設での事故

原油精製施設内の事故における死亡者数は、油田探索、採掘並びに輸送中の事故に比べ少ない。表 2.13 に、1969 年から 1996 までの期間に発生した原油精製過程での事故を示す。最も深刻な被害を伴った事故は、1983 年に 30 人以上の死亡者を出した、ルーマニアの Teleajen 精油所の爆発である。次いで、1988 年の中国上海の精油所爆発・火災事故により、25 人が死亡している。

ほとんど全てのケースで、爆発の後、火災が発生している。また、爆発はほとんど警告なしに起こり広範な区域を破壊している。爆発の中心部は通常全壊する。原油精製施設のどの部分が一番事故を誘発しやすいかについては、良く分かっていない。今迄の例では、脱硫プラント、パイプ、配管作業、圧縮機、再結合器 (Reformer unit)、触媒反応機 (Catalytic cracker unit)、蒸留器、分留塔 (Fractionating tower) から事故が始まっている。

表 2.13 1969 年から 1996 年までに 5 人以上の死亡者を出した原油精製施設の事故  
(Hirschberg et al., 1998, Table 6.3.4)

事故発生年月日	国	死亡者数
1983 年 12 月 06 日	ルーマニア	30 人以上
1988 年 10 月 22 日	上海	25
1992 年 10 月 08 日	米国	16
1992 年 09 月 01 日	ギリシャ	14
1976 年 08 月 12 日	米国	13
1984 年 07 月 24 日	米国	13
1988 年 08 月 28 日	メキシコ	12
1984 年 03 月	ナイジェリア	10
1971 年 07 月 10 日	オランダ	9
1992 年 10 月 16 日	日本	9
1969 年 11 月 11 日	メキシコ	8
1993 年 06 月 03 日	イタリア	7
1977 年 03 月 17 日	米国	7
1988 年 05 月 05 日	米国	7
1972 年 08 月 26 日	フランス	6
1991 年 12 月 12 日	オランダ	6
1992 年 11 月 09 日	フランス	6
1990 年 08 月 11 日	ロシア	6
1969 年 03 月 06 日	ベネズエラ	5
1970 年 (日不明)	日本	5
1972 年 04 月 07 日	韓国	5
1987 年 05 月 30 日	ナイジェリア	5

表 2.14 に 2,000 万ドル (1996 年価値換算値) を超える損害を出した原油精製施設の事故を示す。最高の損害を出した事故は、ナイジェリアで起きた 1987 年 5 月 30 日の精油所事故である。燃料を積載したタンカーが Lagos へ向けて精油所を出港する際、雷が船に落ち、5 人の船員が爆発で死亡している。

表 2.14 損害額 2,500 万ドル（1996 年価値換算値）を超える原油精製施設の事故  
 (Hirschberg et al., 1998, Table 6.3.8)

事故発生年月日	国	損害額（当時） million US\$	損害額 million 1996 US\$
1987年 05月 30日	ナイジェリア	700	<b>916.4</b>
1992年 11月 09日	フランス	370	<b>392.2</b>
1989年 01月 28日	ナイジェリア	300	<b>360</b>
1989年 09月 17日	米国	272	<b>326</b>
1984年 07月 23日	米国	203.2	<b>301.6</b>
1981年 08月 20日	クエート	175	<b>286.2</b>
1970年 12月 05日	米国	69	<b>266.6</b>
1991年 12月 10日	ドイツ	184.6	<b>201.5</b>
1992年 10月 16日	日本	157.8	<b>167.3</b>
1975年 12月 10日	ベルギー	50	<b>137.8</b>
1994年 07月 24日	英国	106	<b>106</b>
1991年 03月 11日	メキシコ	90	<b>102.1</b>
1992年 06月 22日	スペイン	87	<b>92.2</b>
1981年 12月 06日	英国	52	<b>84.9</b>
1991年 04月 13日	米国	75	<b>85.1</b>
1985年 03月 26日	米国	50.5	<b>69.6</b>
1992年 10月 08日	米国	55	<b>58.3</b>
1978年 10月 03日	米国	22	<b>50.1</b>
1971年 07月 10日	オランダ	13.5	<b>49.5</b>
1971年 08月 04日	イタリア	12.0	<b>43.8</b>
1987年 03月 22日	英国	26.7	<b>35.0</b>
1990年 02月 22日	フランス	29	<b>32.9</b>
1974年 04月 25日	ルーマニア	10.2	<b>30.3</b>
1985年 12月 21日	イタリア	20	<b>27.6</b>
1991年 03月 03日	米国	23	<b>26.13</b>

### 2.2.5 発電プラント、熱供給プラントの事故

発電プラントおよび熱供給プラントにおいて、事故が発生した事例は非常に少ない。最過酷の事故は、1978年2月14日にフランスの熱供給プラントの爆発で9人が死亡した事例である。表 2.15 に、発電プラント、熱供給プラントでの事故の内、損害額の大きかったものを示す。損害額が最高を示した例は、1982年12月19日にベネズエラで発生した原油火力発電所の事故である。24万バレルの沸騰した原油が、屋上タンクから流れ、焼けた原油が400mに渡り、近隣の建物を破壊した。損害額合計は1996年価値換算値で、6,150万ドルとなっている。

表 2.15 発電および熱供給プラントにおける損害額の大きな事故  
(Hirschberg et al., 1998, Table 6.3.10)

事故発生年月日	国	施設	損害額 (当時) million US\$	損害額 million 1996 US\$
1982年12月19日	ベネズエラ	発電プラント	40	61.5
1992年02月15日	ドイツ	発電プラント	46.5	49.3
1985年08月09日	米国	発電プラント	24.8	34.1
1982年04月10日	米国	発電プラント	19.7	28.9
1976年07月18日	米国	タンク	25	65.5
1989年02月03日	フランス	発電プラント	11.5	14.6
1979年10月01日	ドイツ	貯蔵プラント	2.6	5.3

### 2.2.6 事故の原因となった原油製品

油田探査・原油採掘作業並びに原油精製施設への長距離輸送にともなう過酷事故の主役は原油である。油田探査・原油採掘作業における事故の原因は、油田から発生するプロパン、ブタン、メタンなどのガスの発火である。1988年7月の英国の Piper Alpha 油田の全壊は、このような漏洩ガスの爆発により起きている。一方、原油精製施設での過酷事故に含まれる原油化学物質は多種多様で、特定の物質が事故の主要な原因になっているとは言えない。例えば地域配送中の過酷事故では、ガソリンによる事故が半数近くを占める。

### 2.2.7 原油流出事故とその損害賠償

採掘作業中に起きた最過酷の原油流出事故は1979年6月3日にメキシコ海岸沖の Ixtoc -1 油田で発生した原油噴出事故である。また、輸送船からの原油流出事故としての最過酷の事故は、1979年7月20日に西インド諸島 Trinidad Tobago の沖合いで、ギリシャの Atlantic Empress 号が他の一隻のタンカーと衝突した事故である。この事故で流出した原油は 258,750 t (Sharples, 1992) で、ロンドンの保険会社が支払った保険金額は約 1 億ドルである。これ以外に大量の原油を流出した事故としては、250,000 t を流出した 1983年8月6日の Castillo de Bellver 号の事故、並びに 230,000 t を流出した 1978年3月15日の Amoco Cadiz 号の事故がある。

全世界の海に流出した原油の量を特定することは難しいが、年間 300 万 t から 400 万 t が流出していると推定されている。主な流出源は、河川への産業施設からの放出、タンカーからの放出、下水、大気中への放出、タンカー以外の海上輸送である (OECD, 1991)。海運事故による原油の流出は、量的には大きくない。表 2.16 に各種経路から海中への原油の流入割合を示す。原油の流出量は、必ずしも損害に比例しない。

原油の流出事故の損害賠償の請求額と調停合意額は 30 倍以上の開きがある。直接定量化出来ないような生態系の損害も、もし金銭に換算したなら、本当の損害額は、合意された金額よりも大きくなる可能性がある。以下に、1979年6月3日にメキシコ海岸沖の Ixtoc 1 油田で発生した原油噴出事故と、1978年3月15日の Amoco Cadiz 号の事故の損害賠償例を示す。

表 2.16 海への原油流出経路 (Hirschberg et al., 1998, Table 6.3.11)

汚染源	海への原油流出割合 (%)
川沿いに工業地帯があるような河川	26.1
タンカーの運航中の放出 (近年は減ってきている)	22.5
自然な浸出 (200 事例以上が判明。いつかは 25 トン/日を漏出する)	9.8
大気中への放出 (自動車、産業からの排出が降雨により海へ流れる)	9.6
タンカー以外の海上輸送 (ビルジ・オイル、燃料油のスラッジ)	7.4
排水からの放出 (海岸廃棄物、生活廃棄物、及び産業廃棄物の投棄)	5.0
精製されない産業廃棄物	5.0
都市からの排出	5.0
海岸の原油精製施設	3.4
タンカーの事故 (地域的には重大で、マスコミの注目を受ける)	1.6
沖合いの油田探査、原油採掘、及びパイプライン	1.2
その他	3.4

### Ixtoc 1 油田事故

史上最大の原油噴出事故は、メキシコ海岸沖の Ixtoc 1 油田で発生した例である。推定 375,000 t の原油が、7 ヶ月間に渡り海に流出した。その結果として原油の油膜が、800 km にわたり 80 km の幅で形成された。当初、2,000 百万ドルが観光産業の損害賠償額として、また 6,000 百万ドルが漁業補償額として請求されたが、その数ヶ月後、米国内で要求された賠償額総額は 4,000 百万ドルとなった。表 2.17 に Ixtoc 1 油田事故損害賠償要求額の一覧を示す (Sharples, 1992)。和解費用は、最終的に 12 百万ドルとなった。そこで表 2.17 に示された要求額と和解額の違いは、33 倍ということになる。一方、原油会社の損害額 (保険が効かない分) は、152 百万ドルである。漁業者から請求された長期的な影響に伴う損害、及び海岸からの悪臭や、収入の減少に対する賠償はされなかった (Seymour, et al., 1992)。

表 2.17 Ixtoc 1 油田事故における損害額 (Hirschberg et al., 1998, Table 6.3.12)

財産所有者	要求額 (100 万ドル)
漁業 (魚、甲殻類、牡蠣、貝)	155
土地、ホテル、モーテル、コンドミニアム、レストラン	100
観光に関連した財産の所有者、レンタル品やリース品の運用者	100
市および州機関の税収の減少	50
米国法務省による洗浄	6
合計	411

### Amoco Cadiz 号の事故

タンカーAmoco Cadiz 号は Brittany の海岸で難破し、フランス北西部の海岸地帯に 23 万トンの原油を流出した。新聞記事によるとこの原油流出による損害額は、当初 2000 百万ドルとされている。表 2.18 に、同事故の損害賠償請求額と和解額を示す (Sharples, 1992)。裁判での請求額は 202 百万ドルであったが、その 10 年後に和解し、和解額は 45 百万ドル及びその 10 年間の利子となった。その後、裁判所が損害額算定の際に一部を間違えたことが分かったため、30 百万ドルが加えられた<sup>2</sup>。したがって、このケースの賠償請求額と和解額の違いは 3 倍である。一方、The US National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) は Amoco Cadiz 号事故の調査を行い、実際の経済的損害は 190 百万ドルから 290 百万ドルであると結論している。

表 2.18 Amoco Cadiz 号原油流出事故による損害賠償請求額と和解額  
(Hirschberg et al., 1998, Table 6.3.13)

賠償請求事項	影響	請求額 (US \$)	和解額 (US \$)
清掃業	政府	66,406,000	30,007,000
	地方自治体	111,582,000	8,449,000
	鳥類保護地域の洗浄と損失	668,000	54,000
漁業	漁業者/牡蠣養殖業者	7,779,000	4,326,000
	牡蠣・貝類・ムール貝の輸送業者	446,000	329,000
	養殖場の復旧	464,000	393,000
	海苔養殖	31,000	31,000
	諸手当	172,000	112,000
	牡蠣生産者	1,399,000	0
経済的損失	政府 (スポーツおよび娯楽分野)	660,000	315,000
	ブリタニー・フェリーズ (フェリー運行会社)	1,493,000	360,000
	その他	8,425,000	604,000
その他	Ministry of Labour (雇用プログラム)	283,000	147,000
	Ministry of Industry (調査)	1,915,000	585,000
	水産加工品	87,000	38,000
	計	201,810,000	45,750,000

### 2.2.8 原油流出と生態系への影響

表 2.16 に示したように、タンカー事故による海洋への原油流出の寄与は、わずか 1.6 % である。しかし、海洋環境への影響は大きく、経済的な損害も高価である。例えば、1989 年 3 月 23 日に発生したタンカーExxon Valdez 号の事故が環境へ与えた影響は、90,000 羽の海鳥、1,000 頭のラッコ、150 羽の白頭ワシの死であった。この損害を金銭に換算すると、12 億ドルから 20 億ドルになるとされる。

表 2.19 に、過去の主要な原油流出事故における原油流出量、事故現場から海岸線までの距離、気象状況、生態系への影響と損害額を示す。タンカーCastillo de Bellver の事故のケースでは、海岸線が汚染されなくとも、農地が汚染されている。沿岸地帯で発生した 18 件のタンカーからの原油流出

<sup>2</sup> 当該事故による最終的な損害額は 75 百万ドルとなる (表 2.20 参照)。



事故を評価した結果、海岸の生態系の感受性と、事故現場と海岸の距離の 2 要素が、海洋環境への影響を左右するものであることが分かっている。多くの場合、海に流れ込んだ原油の量は、二義的に重要となる。例えば、表 2.20 に示すように、タンカーExxon Valdez 号の事故は、海に流出した原油の量は他の過酷原油流出事故と比べて決して多いとは言えないが、海岸線に近い地点で事故が起こったこと、風と波が油膜を海岸に押し上げたことから、生態系への被害は甚大なものとなった。流出した原油は、アラスカ州の海岸線に沿って流れた。汚染した広大な地域には、国有林、4 つの自然動物保護区、3 つの国立公園、5 つの州立公園、4 つの絶滅に瀕する動物の州立保護区、及び一つの州立狩猟許可区が含まれる。原油は結局、流出地点から 600 マイル南西の海岸線に到達している。推定 1,000 マイルの海岸線が原油により汚染した。

表 2.19 主要なタンカーによる原油流出事故の概要 (Hirschberg et al., 1998, Table 6.3.14)

船名	事故発生年	発生地点	原油流出量 (t)
Atlantic Empress	1979	西インド諸島 (トバゴ島沖)	287,000
Castillo de Bellver	1983	南アフリカ (サルダニャ港沖)	252,000 <sup>(1)</sup>
Amoco Cadiz	1978	フランス (ブルターニュ沖)	223,000 <sup>(1)</sup>
Haven	1991	イタリア (ジェノバ)	144,000
Odyssey	1988	カナダ (ノバスコシア州沖 700 海里)	132,000
Torrey Canyon	1967	英国 (シリー諸島)	119,000
Urquiola	1976	スペイン (ラ・コルーニャ)	100,000
Hawaiian Patriot	1977	ホノルル沖 300 海里	95,000
Independenta	1979	トルコ (ボスフォラス海峡)	95,000
Jakob Maersk	1975	ポルトガル (オポルト)	88,000
Braer	1993	英国 (シェットランド諸島)	85,000
Khark 5	1989	モロッコ (大西洋沖 120 海里)	80,000
Aegean Sea	1992	スペイン (ラ・コルーニャ)	74,000
Sea Empress	1996	英国 (ミルフォードヘーブン)	72,000
Katina P.	1992	モザンビーク (マプト沖)	72,000
Assimi	1983	オマーン (マスカット沖 55 海里)	53,000
ABT Summer	1991	アンゴラ沖 700 海里	51,000
Metula	1974	チリ (マゼラン海峡)	50,000
Wafra	1971	南アフリカ (アグリアス岬沖)	40,000
Exxon Valdez	1989	米国 (アラスカ、プリンス・ウィリアム湾)	37,000

<sup>(1)</sup> 第 2 章 2.7 節において述べた値と異なっているが、引用文献でもそのようになっているためそのまま掲載する。

表 2.20 タンカーおよび原油採掘プラットフォームでの原油流出事故における損害賠償請求額、原油流出量、生態系への影響、海岸線からの距離、気象及び海流の状況 (Hirschberg et al., 1998, Table 6.3.15)

事故発生年	ユニット名	原油流出量 (トン)	海岸線からの距離 (km)	気象と海流	生態系への影響	損害額 (百万ドル)
1979年	Atlantic Empress	258,750	16-500	良好な気象条件。	特に影響はない(特別な影響は観察されていない)。	100
1983年	Castillo de Bellver	255,000 <sup>(1)</sup>	71	流出した原油が風によって 150 km <sup>2</sup> の範囲に広がった。	海岸の汚染はなかったが、ブラクオオイルを含む降雨により、農作地に被害が出た。	NA
1978年	Amoco Cadiz	230,000	0.5-1	海流と風の影響を受け、流出した原油が海岸まで広がった。	海岸、漁場および牡蠣養殖場が汚染された。	75
1979年	Burmah Agate	37,500	6	海流と風の影響を受け、流出した原油が海岸まで広がった。	テキサスの海岸線が 260 km にわたって汚染された。	NA
1989年	Exxon Valdez	32,500	0.5-1	悪天候により流出した原油を制御できない状況となった。	90,000羽の海鳥、1000匹のラッコ及び150羽の白頭ワシが死亡。この他、海岸線と漁場が汚染された。	1,200-2,000
1977年	Ekofisk B	20,000	NA	海流と風の影響を受け、流出した原油が外海へ押し出された。	海岸および漁場での汚染は確認されていない。	NA
1976年	Argo Merchant	17,500	0.5-1	悪天候により流出原油の帯が拡散され、また、沖の風によって生態学的な災害を防ぐ海からの風が散逸してしまっった。	海鳥が死亡した。	NA
1969年	Santa Barbara	10,000	1-2	海流と風の影響を受け、流出した原油が海岸まで広がった。	4000羽の海鳥、150匹のアシカ及び5頭のクジラが死亡した。	560

NA: Not Available

<sup>(1)</sup>第2章2.7節において述べた値と異なっているが、引用文献でもそのようになっているためそのまま掲載する。

表 2.21 に、原油発電システムの各ステップの事故 1 回あたりの損害額を示す。

表 2.21 原油発電システムの各ステップにおける事故 1 回あたりの損害最高額  
(Hirschberg et al., 1998, Table 6.3.16)

ステップ	1996 年価値換算値百万 US ドル
油田探査	1947
原油採掘	1,440-1,800
原油精製施設への長距離輸送	1,360-2,260
原油精製施設	916
地域配送	571.3
熱供給・発電プラント	61.5

## 2.3 ガス・エネルギー供給システムの事故

天然ガスを使用したエネルギー供給システムの各ステップ（ガス資源探査、採掘と処理、パイプラインによる長距離輸送、遠隔地・地域・局地配送、発電プラント、熱供給プラント）、並びに LPG（Liquefied Petroleum Gas）を使用したエネルギー供給システムの各ステップ（精製所、天然ガス処理プラント、遠隔地・地域・局地配送、熱供給プラント）における事故の概要を以下に示す。

### 2.3.1 ガス・エネルギー供給システムの概要

天然ガスは、気体炭化水素の混合物で、主にメタンで構成されている。パイプラインで天然ガスが輸送できるようになるまでには、いくつかの処理があり、ガス採掘地点あるいは集中処理施設でこれらの処理が行われる。天然ガスに関してもう一つの重要な処理は、製品の品質条件を満たす為に行なうガス処理である。この過程では、エタンや LPG、及び天然ガソリンなどの炭化水素を分離する。

天然ガスが採掘されてから消費者に至るまでには、複雑な輸送システムが介在する。ガスが処理されると、始発地点から幹線（Trunk lines）と呼ばれるパイプラインに送り込まれる。この幹線が各地点のステーション間をつないでおり、この部分の圧力は 70 から 100 bar に達する。その後、天然ガスは長距離輸送用のパイプラインにより、65 から 70 bar 程度の圧力で輸送され、消費者がガスを受け取る引き取りステーション（Take-over station）に到達する。そこからガスは、25 から 40 bar 程度の圧力で、地域配送システムのコントロール・ステーションに送られる。その後の段階では、輸送圧力は 20 bar となり、産業の大口消費者または個人消費者に配送される（Bartholome, et al., eds., 1975）。

ガス資源として重要なものに、もう一つ LPG がある。LPG には大雑把に分けて 2 通りの製造工程がある。第一は、ガス、原油の採掘地点あるいはその近傍における原油もしくは天然ガスから分離する方法である。第二は、原油の精製過程で抽出する方法である（Gerhartz, et al., 1990）。また、原油精製過程の中の変換工程で製造することも出来る。LPG は、主にプロパン、ブタン、イソブタン、プロペン、並びにブテンなどを主成分とした炭化水素の混合物から成る。通常温度と圧力では、これらの成分は気体であるが、冷却もしくは加圧により液化する。

LPG の輸送は、LPG 製造プラントと消費者の位置関係により、パイプライン、圧力容器付き船舶、トラック、鉄道貨車などにより行われる。特に米国内では、大量な天然ガスが、パイプラインにより輸送されている。消費者への輸送に際しては、シリンダー（ボンベ）及び各種サイズの輸送用自動車用が用いられている。

LPG の貯蔵には、通常気温では加圧貯蔵、通常気圧では冷蔵貯蔵、もしくは部分的な加圧と冷蔵の組み合わせが用いられる。表 2.22 に、天然ガスと LPG の輸送と貯蔵方式の概要を示す（Bützer, 1988）。

LPG は、多様な用途へ利用されており、主に、調理や暖房に用いられる他、自動車燃料としての価値があり、排ガスがガソリンに比べて少ない点で魅力がある。また、LPG は原油精製産業、原油産業において、ガソリンの製造、揮発性と燃料のオクタン価を増す為用いられる。この他、ポリエチレン $((-\text{CH}_2-\text{CH}_2-)_n)$ 、ポリビニルクロライド $((-\text{CH}_2-\text{CHCl}-)_n)$ 、及びポリプロピレン $((-\text{CH}(\text{CH}_3)\text{CH}_2-)_n)$ などのポリマーの中間生成物の製造に用いられる。なお、LPG は照明用ガス製造、コークス製造の過程、並びに溶鉱炉でも発生する。

表 2.22 天然ガスと LPG の輸送と貯蔵方式の概要 (Hirschberg et al., 1998, Table 6.4.1)

ガス	輸送の種類	輸送方式	貯蔵
LPG	長距離輸送	タンク貨車、パイプライン	タンクヤード
	地域輸送	タンク貨車、パイプライン	中間貯蔵、 装荷ステーション
	局地輸送	タンクローリー車	タンク
	消費者配送	パイプライン	—
天然ガス	長距離輸送	大直径・高圧輸送パイプライン	—
	地域輸送	高圧パイプライン	一連の貯蔵パイプ、 球形ガスタンク
	局地輸送	加圧パイプライン	一連の貯蔵パイプ、 球形ガスタンク
	消費者配送	低圧パイプライン	—

### 2.3.2 天然ガス産業の事故

図 2.4 に、1950 年から 1996 年までに起きた世界のガス産業の事故発生件数を示す。ENSAD に収集されたエネルギー関連事故のうち最過酷となる 2 件の事故は LPG 産業に関係したものである。その一つは、1989 年 6 月 4 日、ロシアの Asha と Ufa の間で発生した過酷爆発と火災である。この事故では 600 人が死亡し、700 人が負傷した。通過する列車が発したスパークが、付近のパイプラインから漏洩したガソリン 30 % と LPG 70 % から成る雲に引火し、過酷事故となったものである。LPG に関連した第二の過酷事故は、1984 年 11 月 19 日にメキシコの San Juan Ixhuatepec で発生している。事故の原因は明確ではないが、漏洩した LPG に、ガスバーナーの火が引火したものと考えられている。引火数分後に、2 つの球形タンクが同時に爆発した。続く 75 分間に多くの BLEVE (圧力が加わった状態で液化した可燃性ガスを含む容器が、突如破壊・破断するよう時に起こる爆発) が発生し、54 個あった容器の内の 4 つだけが無傷で残った。同事故により、約 500 人が死亡した。

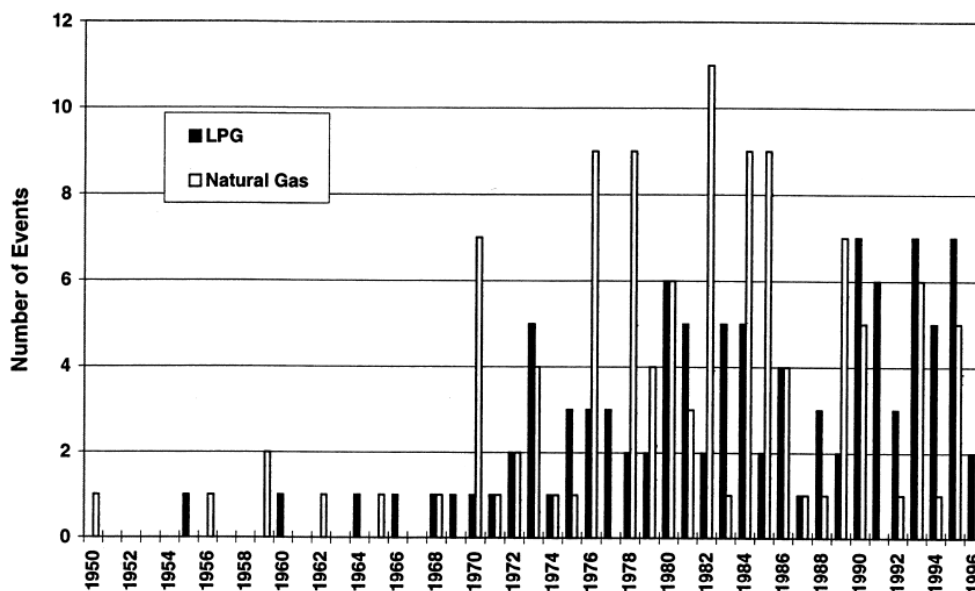
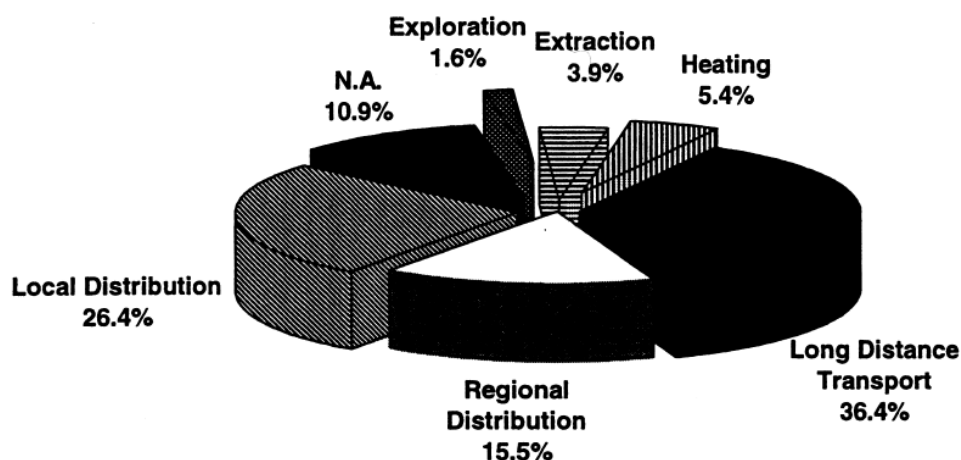


図 2.4 LPG 及び天然ガス産業において 5 人以上の死亡者を出した事故件数 (Hirschberg et al., 1998, Fig. 6.4.8)

最も過酷な被害を出した天然ガス産業における事故は、1984年12月2日にグルジアの Tbilisi で発生した火災である。ここでは約 100 名の死亡者が出た。また 1970 年 4 月 8 日には大阪でも同様の火災事故があり、約 100 名の死亡者を出している。

LPG は、また多数の避難者数を出した事故があることでも知られる。1979 年 11 月 11 日にカナダの Mississauga で発生した事故では、約 22 万人が避難している。次いで多くの避難者を出したのは、1984 年 11 月 19 日にメキシコの San Juan Ixhuatpec で起きたもので、20 万人が避難している。天然ガスの事故で多くの避難者を出した事例としては、1982 年 1 月 20 日のメキシコの La Venta で発生したもので、ここでは 4 万人が避難している。

図 2.5 に天然ガス産業において 5 人以上の死亡者を出した事故発生件数を、各ステップ別に示す。75 % を越える事故が、輸送中（長距離輸送、地域配送及び局地配送）に発生しており、長距離輸送中の事故の内、74 % はパイプライン輸送中、10 % は貯蔵中、また 6 % はタンクローリーによる道路輸送中に起きている。このパイプライン事故の原因のいくつかは、機械的な故障（35 %）、並びに自動車や地上での作業活動における衝撃による損傷（36 %）によるものである。機械的な故障により発生した主な事故は、腐食したパイプからの天然ガスの漏洩であり、漏洩ガスの発火により過酷事故が引き起こされた事例もある。図 2.6 に、死亡者数 5 人を超えない規模の事故も含み、世界の天然ガス産業における 288 件の事故の原因別発生件数を示す（表 2.23 に図 2.6 の用語解説を示す）。この図から、パイプラインによる輸送ステップにおいて同産業における事故が最も多く発生していることがわかり、この傾向は 5 人以上の死亡者となる規模の事故と同様であることが分かる。また、原因が不明であった事故を除けば、死亡者数に係わらず事故の原因となった事象も 5 人以上の死亡者となる事故と同様の傾向を示しており、機械的故障及び自動車の衝突や地上での作業活動における衝撃が大きな割合を占めている（図 2.7）。



N.A.: Not Available

図 2.5 1969 年から 1996 年に 5 人以上の死亡者を出した天然ガス産業事故のステップ毎の割合  
(Hirschberg et al., 1998, Fig. 6.4.14)

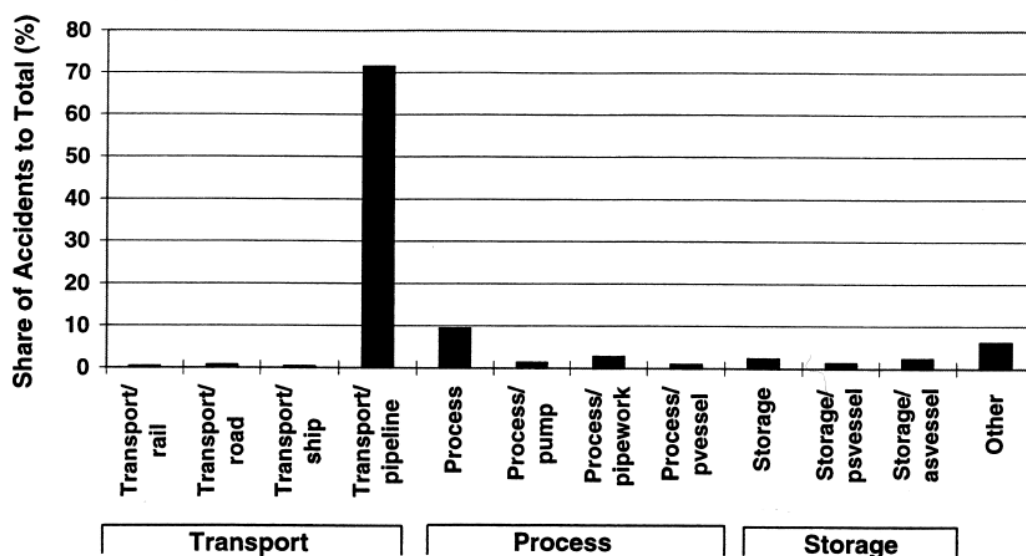


図 2.6 天然ガス産業の輸送、加工および貯蔵ステップにおける事故の原因 (Hirschberg et al., 1998, Fig. 6.4.15)

表 2.23 図 2.6 および図 2.10 に用いられている用語の解説 (Hirschberg et al., 1998, Table 6.4.2)

用語	解説
Dom/com	家庭用使用もしくは市販品に起因した事象
Process	ガス処理プラントまたはその周辺の未特定事項に起因した事象
Process/pipework	プラントまたは周辺配管、バルブまたは配管接続部に起因した事象
Process/pump	プラントまたは周辺ポンプ、圧縮機、放出器またはファンに起因した事象
Process/pvessel	プラントまたはその周辺の処理容器に起因した事象
Storage	貯蔵施設の未特定部分に起因した事象
Storage/asvessel	貯蔵プラント内の大気圧での貯蔵容器に起因した事象
Storage/psvessel	貯蔵プラント内の加圧貯蔵容器に起因した事象
Transfer	荷積み、荷降ろしに起因した事象
Transport/pipeline	パイプライン輸送
Transport/rail	タンク貨車による鉄道輸送
Transport/road	タンクローリーによる道路輸送
Transport/ship	洋上船舶による輸送
Waste	廃棄物貯蔵または投棄場所

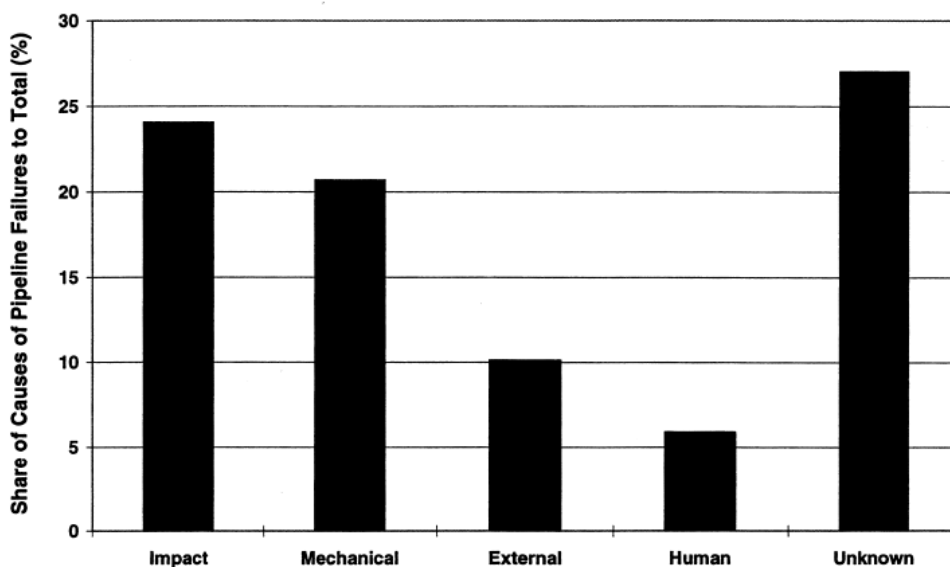
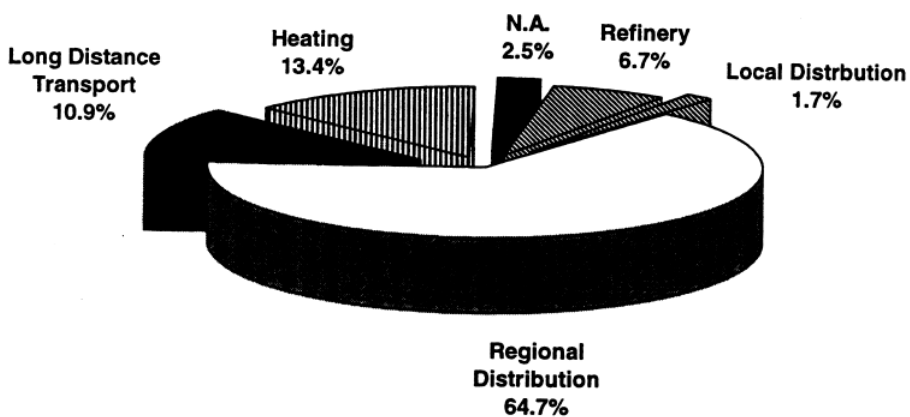


図 2.7 1969 年から 1996 年に発生した天然ガス輸送パイプライン事故の原因 (Hirschberg et al., 1998, Table 6.4.16)

### 2.3.3 LPG 産業における事故

図 2.8 に、5 人以上の死亡者を出した LPG 産業の事故の内訳を示す。ほぼ 65% の LPG 事故は地域配送中に発生している。また、11% が長距離輸送中の事故である。天然ガス処理プラントでもいくつかの火災、爆発事故が発生しているが、死亡者数、負傷者数、または避難者数のいずれの点で、いずれも過酷事故に相当するものは無い。



N.A. : Not Available

図 2.8 5 人以上の死亡者を出した LPG 事故のステップ毎の割合 (Hirschberg et al., 1998, Fig. 6.4.17)



図 2.9 に LPG 事故の発生条件別集計結果を示す。この図は、死亡者数 5 人以上の過酷事故以外の小さな事故も含む 165 件の事故のデータを基に作られている。約 50% が輸送中の事故で、特に鉄道と道路輸送中の事故が多い。この他、貯蔵中 (15.8%)、積み降ろし (15.2%) 及び LPG 処理過程 (10.3%) での事故が多い。図 2.10 に 1969 年から 1996 年までに起きた LPG 事故の原因を示す。これによると、道路、鉄道輸送中の LPG 事故における一番重要な原因は、衝撃による損傷であることが分かる。LPG 処理プロセス、荷積み・積み降ろし作業、及び貯蔵中の LPG 事故については、機械的な故障が最も多い原因である。

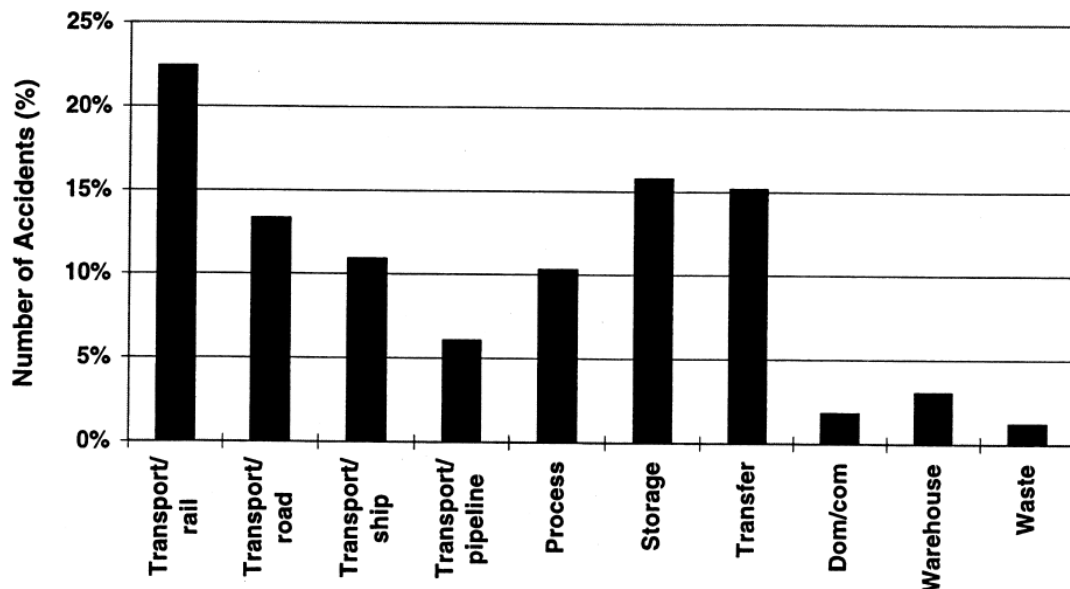


図 2.9 1969 年から 1996 年に発生した LPG 事故のステップ毎の割合 (Hirschberg et al., 1998, Fig. 6.4.18)

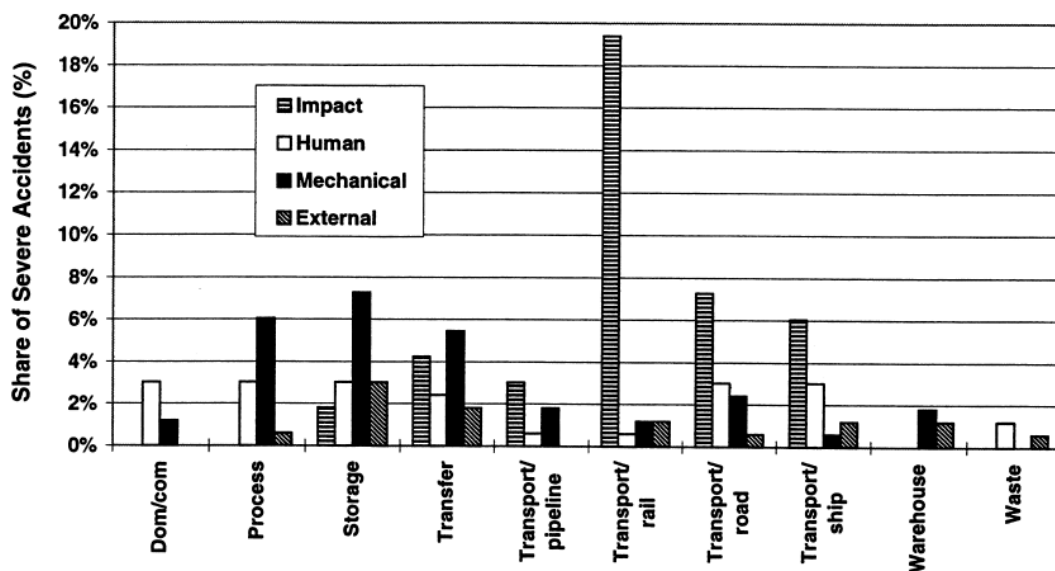


図 2.10 1969 年から 1996 年に発生した LPG 事故のステップ毎の原因 (Hirschberg et al., 1998, Fig. 6.4.19)

## 2.4 水力発電システムの事故

水力発電システムに関連して発生した事故の概要について、以下に示す。表 2.24 にダムの種類と目的を示す。Earth 式及び Rockfill 式ダムは、土砂もしくは岩石を詰めた土手のような構造をしたダムである。これらは傾斜地に建設され、その高さよりも長さの方が大きい。Gravity 式ダムは、コンクリート、石、あるいはそれらの両方を用いて建設され、これら材料の重量がその強度を担保するものである。Arch 式ダムは、コンクリートもしくは石で造られ、アーチの根元の支えの部分に大きな水圧がかかるようにしたものである。Buttress 式ダムは、水に接していない側に一定の間隔で支えを設ける構造である。また、Arch 式と Earth 式の組み合わせや、Earth 式と Rockfill 式を組み合わせたダムや、Gravity 式、Rockfill 式及び Earth 式を組み合わせたダムもある。

表 2.24 ダムの種類と用途 (Hirschberg et al., 1998, Table 6.6.1)

ダムの種類		ダムの用途	
記号*	種類	記号*	用途
Te	Earth	H	水力発電
Er	Rockfill	I	灌漑
Pg	Gravity	C	治水
Pg (M)	Gravity dam built of masonry (石造の Gravity 式ダム)	S	水源
Va	Arch	N	船舶航行
Cb	Buttress	R	リクリエーション
Mv	Multi-Arch		

\* 以下の各表の記号に対応するもの。

### 2.4.1 建設工事中の事故

ダムの建設工事中の事故が、作業員や一般公衆を巻き添えにすることもある。例えば、土砂崩れ、雪崩、落石などを起こす場合である。表 2.25 に、ダムないしは水力発電所の建設工事中に発生した事故の例を示す。同表によれば、ダム建設工事中の作業員の死亡の主な原因は、台風や土砂崩れのような、ダム工事以外の要素によるものである。このような場合、法的な損害賠償責任は、明らかにこれらの外的な要因にあるが、その一方、作業員を建設現場に配置したのは、ダム建設プロジェクトそのものである。したがって、このような建設工事中の事故も、水力発電システムの事故として計上できる。

表 2.25 ダムまたは水力発電所の建設工事中に発生した事故の例  
(Hirschberg et al., 1998, Table 6.6.2)

ダム名	国	事故発生年あるいは建設期間	死亡者数(人)	負傷者数(人)	原因
Mauvoisin	スイス	1954年	6	不明	塔の倒壊
Vorderrhein	スイス	1956年-1961年	22	不明	雪崩、落石
Oros	ブラジル	1960年	40	不明	洪水
Limmern	スイス	1960年-1963年	19	不明	不明
Mattmark	スイス	1965年	88	不明	氷の滑落
Torrejon Tajo	スペイン	1965年	30	不明	トンネル入口の崩壊
Honigrin	スイス	1966年	6	不明	トンネル内ガス
Sempor	インドネシア	1967年	200	不明	台風と稚拙な土台
Sarganserland	スイス	1974年	≥2	不明	不明
Guavio	コロンビア	1983年	70	33	2件の土砂崩れ

#### 2.4.2 ダム崩壊リスクの推定

ダム崩壊事故のリスクを推定する方法は2通りある。第一は、事故の歴史データを元に、統計処理を実施する方法である。この方法で得られたリスク推定値の有効性は、データの存在と、そのデータが他のケースへも適用できる例かどうかにか依存する。第二は、ダムの崩壊を引き起こす事故シナリオ（地震、地滑り、洪水など）に関する確率、及び財産や一般公衆の被害を計算する方法である。

Serafim (Serafim, 1981) は、ダム崩壊事故の歴史的データは一様でなく、様々な構造、シナリオ、条件がある為、これらを用いた統計調査の結果は、誤った判断を招く可能性があるとしている。また、ダムの設計や建設技術は年を追う毎に向上している為、異なるダムを比較することは出来ないとしている。更に、多くの場合、事故の原因が異なっていたり、原因に関する情報が無かったりする為、これを特定することは困難である。一方、確率論的リスク評価を用いてダム崩壊リスクを推定する場合にも、多くの難しい問題がある。Baecherらは、ダムが崩壊するモード(mode)は無数に存在し、それを明らかにすることは出来ないとしている(Baecher, 1980)。その為、限界はあるものの、事故発生の歴史的データを統計処理することで、事故発生頻度を評価する方法が、過去に多く用いられている。

#### 2.4.3 歴史的データに基づくダム崩壊頻度の推定

いくつかの研究グループにより、歴史的データに基づくダム崩壊頻度の推定が行われている(Schnitter, 1976; Basler & Hofmann, 1978; Baecher et al., 1980; Hoffmann et. al., 1984)。水がダムから部分的、もしくは過酷に流れ出すような事故の発生率を、歴史的な事故データをもとに計算した例を、表 2.26 に示す。比較の為に、最後の3行には、原因別の事故発生確率を示す。

表 2.26 ダム崩壊頻度推定の例（（Hirschberg et al., 1998, Table 6.6.3）一部略）

国	ダムの種類	ダム崩壊の原因	事故発生頻度 (per dam-year)
ヨーロッパ	Gravity, Arch	特定せず	$3 \times 10^{-5} - 3 \times 10^{-4}$
米国	全種類	特定せず	$2 \times 10^{-4} - 5 \times 10^{-4}$
日本	全種類	特定せず	$4 \times 10^{-5}$
スペイン	全種類	特定せず	$6 \times 10^{-4}$
世界	全種類	特定せず	$2 \times 10^{-4}$
アルプス地方	Gravity, Arch	水がダムを超えて溢れ出した	$1.8 \times 10^{-5}$
ノルウエー	Rockfill	水理・水文、地震、内部の侵食	$6.3 \times 10^{-5} - 5.6 \times 10^{-4}$
カナダ	Earth	水理・水文	$2.8 \times 10^{-6} - 6.9 \times 10^{-6}$

図 2.11 に、1850 年から 1996 年までに米国、カナダ、西ヨーロッパ、オーストラリア、ニュージーランドで建設され、また崩壊したダムの数を示す。これを見ると、ダムの種類により、建設された数や事故の発生頻度が異なっている。したがってダム崩壊事故を考察する場合、ダムの種類を認識することが重要な要素である。しかし事故発生頻度を考える場合、これに影響する主要な要素は、種類別のダムの数ではなく、むしろ建設後の経過年数である。図 2.12 に、世界のダム崩壊が、建設後何年で発生しているかを示す。同図から、ダム建設終了後の初注水期間及び注水後 5 年以内に約 50 %のダム崩壊が発生していることがわかる。

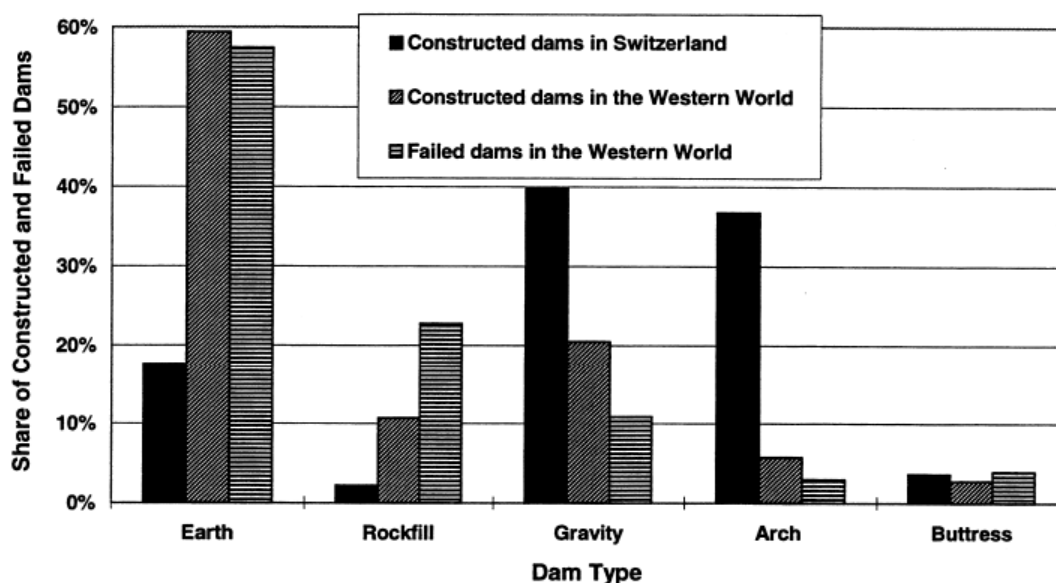
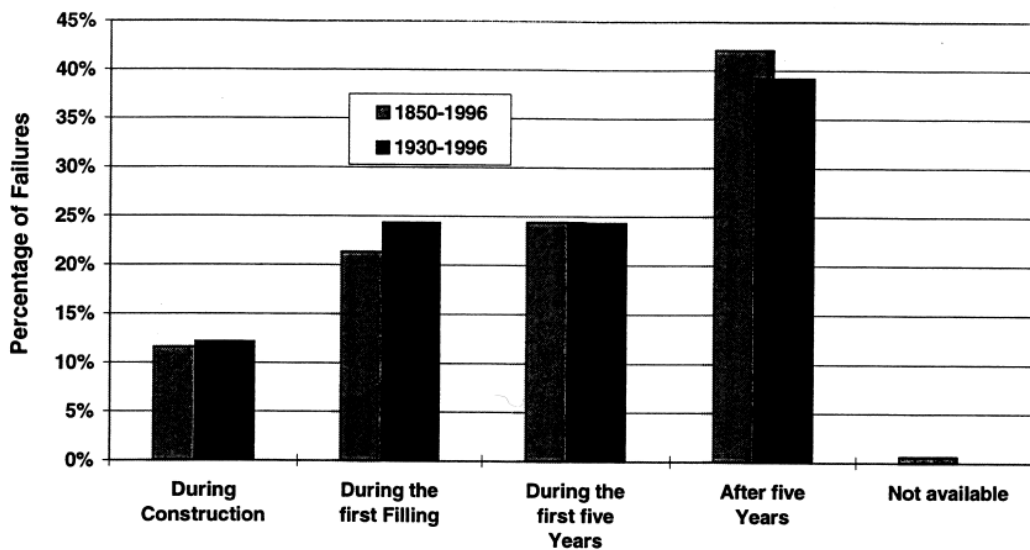


図 2.11 1850 年から 1996 年までの期間に西側諸国（米国、カナダ、西ヨーロッパ、オーストラリア、ニュージーランド）で建設されたダム数および崩壊したダムの数（Hirschberg et al., 1998, Fig. 6.6.4）



(左の棒が1850—1996、右の棒が1930—1996)

図 2.12 1850 年から 1996 年及び 1930 年から 1996 年までの期間に建設されたダム の崩壊時期 (Hirschberg et al., 1998, Fig. 6.6.5)

#### 2.4.4 ダム崩壊頻度と崩壊にいたる平均時間の計算

ダム の崩壊頻度 ( $fr_k$ ) は、次の計算式により求められる。

$$fr_k = \frac{k}{OT_k} \quad \dots (2.1)$$

$k$  はダム の崩壊事故数、 $OT_k$  は 1850 年 (又は 1930 年) から  $k$  番目 の事故の発生するまでの全ダム の合計操業時間である。

$$OT_k \approx \frac{ND_k}{2} \cdot k \cdot MTBF_k \quad \dots (2.2)$$

ここで、 $MTBF_k$  はあるダム崩壊から、次のダム崩壊が起こるまでの平均時間、 $ND_k$  は 1850 年 (又は 1930 年) から  $k$  番目 の事故の発生した年までの間に建設されたダム の合計数である。2 で除する理由は、(ダム の数は年を追って、正比例の関係で増えると仮定して) これらの期間中に運転されるダム の数の平均を求める為である。上の 2 式から、次の関係が求まる。

$$fr_k = \frac{k}{OT_k} \approx \frac{k}{\frac{ND_k}{2} \cdot k \cdot MTBF_k} = \frac{1}{\frac{ND_k}{2} \cdot MTBF_k}$$

$$MTBF_k \approx \frac{1}{fr_k \cdot \frac{ND_k}{2}} \quad \dots (2.3)$$

データベースより、西側諸国（北アメリカ、西ヨーロッパ、オーストラリア、ニュージーランド）におけるダムの崩壊頻度を算出し、これを基に  $MTBF_k$  を算出して表 2.27 に示す。同表は、各期間別（1850 年～1996 年、1930 年～1996 年）及びダムの崩壊時期別（ダムの全操業期間中における崩壊と初注水から 5 年以上経過した後の崩壊）に、崩壊事故の発生頻度と  $MTBF_k$  をまとめたものである。また、図 2.13 に同表に基づくダム崩壊事故の発生頻度を示す。1850 年から 1996 年までの期間全体に比べて 1930 年から 1996 年までの期間では、全ダム型式において建設後の全期間における崩壊事故発生頻度が前期間の方が大きくなる。この特徴は、建設から 5 年を超えて発生した事故についてもほぼ該当するが、Arch 式および Buttress 式ダムについては該当せず、むしろ 1930 年から 1996 年の方が、1850 年から 1996 年までの期間よりも事故発生頻度が高くなっている。これは 1850 年から 1996 年の間に、この 2 つのタイプのダムで建設から初注水から 5 年を超えた後の崩壊が発生していないためである。

表 2.27 西側諸国におけるダム崩壊の発生頻度と  $MTBF_k$   
 （（Hirschberg et al., 1999）の Table 6.6.4～Table 6.6.21 を著者が再整理して掲載）

ダムタイプ (種類記号)	期間	崩壊事故数	ダム崩壊時期	全ダム合計稼働時間 (年)	事故発生頻度 $1 / (\text{dam} \cdot \text{year})$	ダムの数 (基)	$MTBF_k$ (年)
Gravity 型	1850 年～1996 年 (Pg or Pg(M))	10	全期間	120,625	$8.3 \times 10^{-5}$	2,300	10.5
		6	5 年以上経過		$5.0 \times 10^{-5}$		95.0
	1930 年～1996 年 (Pg)	0 <sup>(3)</sup>	全期間	62,814	$1.3 \times 10^{-5}$	1,620	17.4
			5 年以上経過				
Arch 型 (Va)	1850 年～1996 年	3	全期間	29,553	$1.0 \times 10^{-4}$	651	30.7
		0 <sup>(3)</sup>	5 年以上経過		$2.8 \times 10^{-5}$ <sup>(4)</sup>		110.0
	1930 年～1996 年	1	全期間	20,032	$5.0 \times 10^{-5}$	528	75.8
		0	5 年以上経過				$4.2 \times 10^{-5}$ <sup>(4)</sup>
Buttress 型 (Cb)	1850 年～1996 年	4	全期間	14,759	$2.7 \times 10^{-4}$	307	24.1
		0 <sup>(3)</sup>	5 年以上経過		$5.7 \times 10^{-5}$		114.3
	1930 年～1996 年	0 <sup>(3)</sup>	全期間	9,067	$9.3 \times 10^{-5}$	355	75.8
			5 年以上経過				
Earth 型 (Te)	1850 年～1996 年	58	全期間	245,803	$2.4 \times 10^{-4}$	5,704 <sup>(2)</sup>	2.7
		31	5 年以上経過		$1.3 \times 10^{-4}$		114.3
	1930 年～1996 年	16	全期間	162,647	$9.8 \times 10^{-5}$	4,813	4.2
		6	5 年以上経過				$3.7 \times 10^{-5}$
Rockfill 型 (Er)	1850 年～1996 年	22	全期間	36,270	$6.1 \times 10^{-4}$	1,150	2.8
		6	5 年以上経過		$1.7 \times 10^{-4}$		10.2
	1930 年～1996 年	8	全期間	26,422	$3.0 \times 10^{-4}$	1,037	6.4
		0 <sup>(3)</sup>	5 年以上経過				$3.2 \times 10^{-5}$

<sup>(1)</sup> 評価期間中に稼働しているダムの平均数に基づく値。

<sup>(2)</sup> （Hirschberg et al., 1999）では、全期間及び 5 年以上経過した場合で値が異なる。全期間が 5,704 基、5 年以上経過が 5,702 基である。

<sup>(3)</sup> 崩壊事故数がゼロの場合、発生頻度は対数正規近似（Lognormal approximation）を用いて算出している。

<sup>(4)</sup> 図 2.13 に示す値と異なるが原文に従いこのまま記載する。

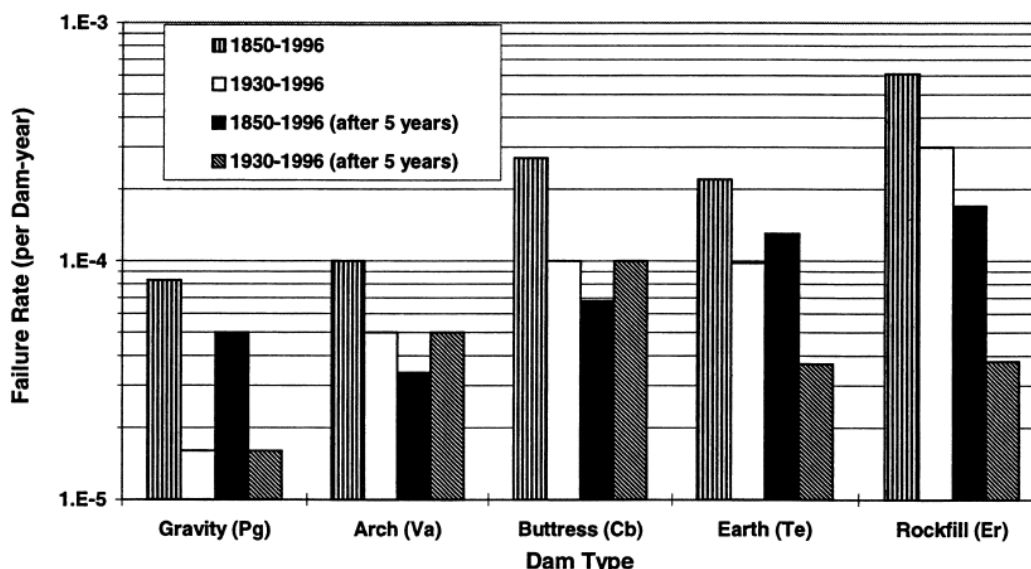


図 2.13 ダム崩壊頻度 ( $fr_k$ ) と初注水から 5 年を越えた後に崩壊の徴候が見られた頻度 (Hirschberg et al., 1998, Fig.6.6.6)

#### 2.4.5 ダム崩壊事故の発生頻度-影響曲線

ダム崩壊事故のデータを用い、ダム崩壊事故の発生頻度-影響曲線を求めることが出来る。まず、米国、カナダ、オーストラリア、ニュージーランド、及び西ヨーロッパにおいて X 人以上の死亡者を出したダム崩壊事故の発生割合を、図 2.14 に示す。図 2.14 上の点は、ダムの貯水が全て流出した実際の事故のみを対象としている。1900 年から 1969 年までの期間と 1900 年から 1996 年までの期間における事故割合-影響曲線の差は小さい。これは、過去 30 年間には西側諸国では過酷な影響を出した事故が少ないことを反映している（但しこの点は、水が全部流出しないような小規模なダム崩壊事故については該当しない）。また、図 2.15 に、図 2.14 を基に作成されたダム崩壊事故の発生頻度-影響曲線を示す。図 2.14 の事故発生割合を合計操業年数で規格化し、事故発生頻度にするると、1900 年から 1996 年の期間における事故発生頻度の方が 1900 年から 1969 年までの頻度よりも小さくなっており、貯水が全流出してしまう過酷事故は 1900 年から 1996 年まで均等な頻度で発生しているわけではなく、最近の約 30 年間（1969 年から 1996 年）において過去よりも発生頻度が小さくなっていることが推察される。

図 2.16 に、オーストラリアとニュージーランドを含む欧米及びアジア・アフリカ地域における死亡者が X 人以上発生した事故の発生頻度を示す。同図によれば、1900 年から 1996 年に至る期間に事故発生頻度が減少し、ダムが安全になったように見える。また、同図では、オーストラリアとニュージーランドを含む欧米の方が、アジア・アフリカ地域よりも、40 人以上の死亡者を出した事故の発生頻度が少ないことがわかる。しかし、アジア・アフリカのデータベースは十分でないので、この違いは実際にはこれより大きくなると思われる。図 2.16 に示された死亡者数 23 万人の事故は、1975 年 8 月 5 日に発生した、中国の Banqiao ダムと Shimantan ダムの事故である。事故直後の推定死亡者数は、公式発表の 85,600 人から非公式発表の 23 万人までの幅があった (Qing, 1998; Human Right Watch / Asia, 1995)。表 2.28 と表 2.29 に、世界のダム崩壊事故発生頻度の一覧表を示す。

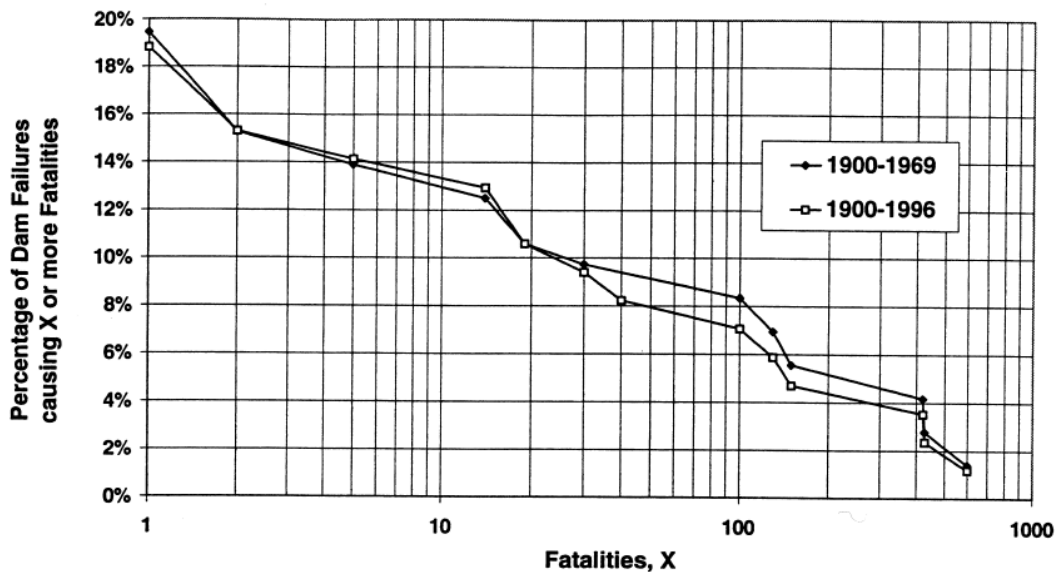


図 2.14 米国、カナダ、オーストラリア、ニュージーランドおよび西ヨーロッパで発生した全タイプのダム崩壊事故（貯水が全てなくなった事故に限る）において、X 人以上の死亡者を出したダム崩壊事故の発生割合（Hirschberg et al., 1998, Fig. 6.6.10）

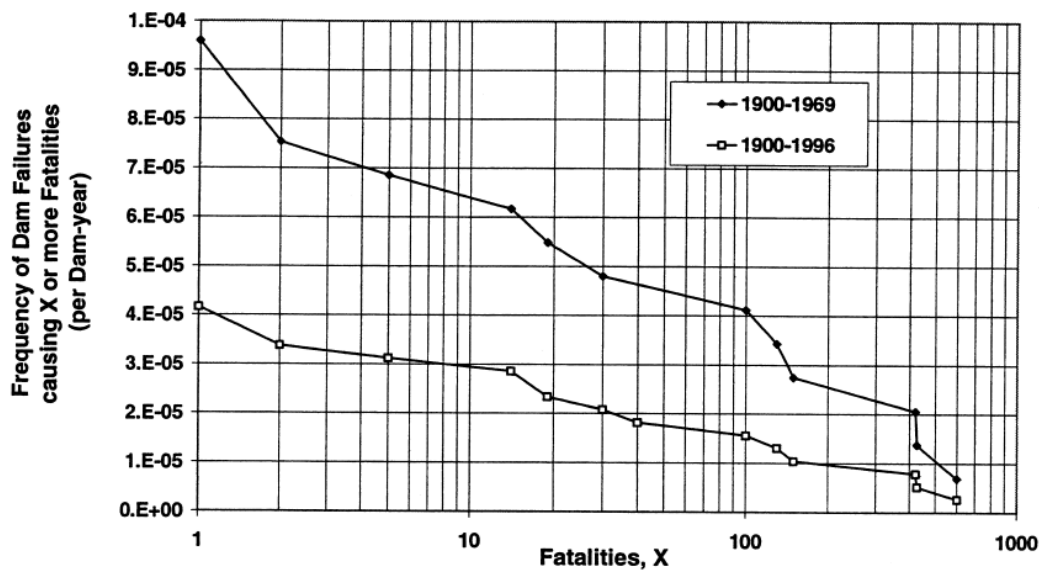


図 2.15 米国、カナダ、オーストラリア、ニュージーランドおよび西ヨーロッパで発生した全タイプのダム崩壊事故（貯水が全てなくなった事故に限る）において、X 人以上の死亡者を出したダム崩壊事故の発生頻度と死亡者数の関係（Hirschberg et al., 1998, Fig. 6.6.11）



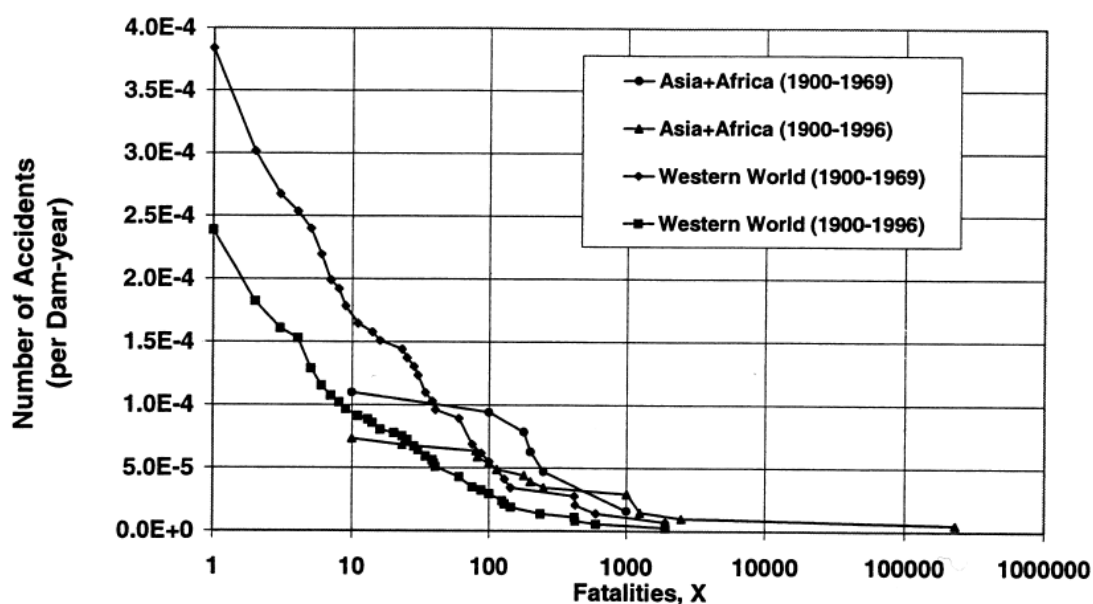


図 2.16 アジア・アフリカ地域、並び西側諸国において、死亡者 X 人以上の死亡者を出したダム崩壊事故の発生頻度<sup>3</sup> (Hirschberg et al., 1998, Fig. 6.6.12)

表 2.28 全ダム崩壊事故の発生頻度 (Hirschberg et al., 1998, Table 6.6.24)

集計期間	ダムの種類と発生頻度 (per dam・year)				
	Gravity(Pg)	Arch(Va)	Buttress(Cb)	Earth(Te)	Rockfill(Er)
1850-1996	MV: $8.3 \times 10^{-5}$	MV: $1.0 \times 10^{-4}$	MV: $2.7 \times 10^{-4}$	MV: $2.4 \times 10^{-4}$	MV: $6.1 \times 10^{-4}$
	LB: $5.1 \times 10^{-5}$	LB: $4.6 \times 10^{-5}$	LB: $1.3 \times 10^{-4}$	LB: $1.9 \times 10^{-4}$	LB: $4.3 \times 10^{-4}$
	UB: $1.4 \times 10^{-4}$	UB: $2.6 \times 10^{-4}$	UB: $6.2 \times 10^{-4}$	UB: $2.9 \times 10^{-4}$	UB: $8.7 \times 10^{-4}$
1930-1996	MV: $1.3 \times 10^{-5}$	MV: $5.0 \times 10^{-5}$	MV: $9.3 \times 10^{-5}$	MV: $9.8 \times 10^{-5}$	MV: $3.0 \times 10^{-4}$
	LB: $8.2 \times 10^{-7}$	LB: $1.8 \times 10^{-5}$	LB: $5.7 \times 10^{-6}$	LB: $6.7 \times 10^{-5}$	LB: $1.8 \times 10^{-4}$
	UB: $4.8 \times 10^{-5}$	UB: $2.4 \times 10^{-4}$	UB: $3.3 \times 10^{-4}$	UB: $1.5 \times 10^{-4}$	UB: $5.5 \times 10^{-4}$

MV : 平均値、LB : 低い方から数えて 5%の値、UB : 下から数えて 95%の値

<sup>3</sup> 図 2.16 の縦軸は、「Number of Accidents」と表現されているが、単位が頻度 (per dam・year) であるため、本報告書では頻度と表現する。

表 2.29 建設後 5 年以上経過して発生したダム崩壊事故の発生頻度 (Hirschberg et al., 1998, Table 6.6.25)

集計期間	ダムの種類と発生頻度 (per dam・year)				
	Gravity(Pg)	Arch(Va)	Buttress(Cb)	Earth(Te)	Rockfill(Er)
1850 年～1996 年	MV: $5.0 \times 10^{-5}$	MV: $2.8 \times 10^{-5}$	MV: $5.7 \times 10^{-5}$	MV: $1.3 \times 10^{-4}$	MV: $1.7 \times 10^{-4}$
	LB: $2.7 \times 10^{-5}$	LB: $1.7 \times 10^{-6}$	LB: $6.7 \times 10^{-5}$	LB: $9.5 \times 10^{-5}$	LB: $9.1 \times 10^{-5}$
	UB: $9.8 \times 10^{-5}$	UB: $1.0 \times 10^{-4}$	UB: $1.5 \times 10^{-4}$	UB: $1.7 \times 10^{-4}$	UB: $3.3 \times 10^{-4}$
1930 年～1996 年	MV: $1.3 \times 10^{-5}$	MV: $4.2 \times 10^{-5}$	MV: $1.0 \times 10^{-4}$	MV: $3.7 \times 10^{-5}$	MV: $3.2 \times 10^{-5}$
	LB: $8.2 \times 10^{-7}$	LB: $2.6 \times 10^{-6}$	LB: $3.5 \times 10^{-6}$	LB: $2.0 \times 10^{-5}$	LB: $1.9 \times 10^{-6}$
	UB: $4.8 \times 10^{-5}$	UB: $1.5 \times 10^{-4}$	UB: $2.0 \times 10^{-4}$	UB: $7.3 \times 10^{-5}$	UB: $1.1 \times 10^{-4}$

MV : 平均値、LB : 5%値、UB : 95%値

### 2.4.6 ダム崩壊事故の損害額

本節では、損害額 5 百万ドル以上 (1996 年価値換算値) を出したダム崩壊事故の平均的な損害額の推定を行う。この損害額では、崩壊したダムの再建費用を考慮し、一方で商業、農業、及び産業区域の浸水による個人収入の一時的な中断について考慮しないこととした。また、文化遺産の損傷や、環境の被害の損害額は含まれない。水力発電の場合、ダム再建までの期間に発電事業が中断することによる損害額は、事故により被害を与える建物などの所有物への損害総額と、ほぼ同程度の額となる。例えば、1975 年の米国 Walter Bouldin ダムの再建費用は、40 百万ドルとされているが、1840 百万 kWh の発電が 4 年間停止による収入損害額は、60 百万ドルで、これとほぼ同程度の大きさであった (Federal Energy Regulatory Commission, 1978)。図 2.17 に、1945 年から 1996 年までに発生した、x 百万ドルかそれ以上の損害額を出した事故の発生数と損害額の関係を示す。同図中の直線は、次の式により表される。

$$y = 114.54 \cdot x^{-0.602}$$

ここで、x は、1996 年価値換算値で示した損害額、y は、損害額 x、またはそれ以上の損害を及ぼす事故の数である。

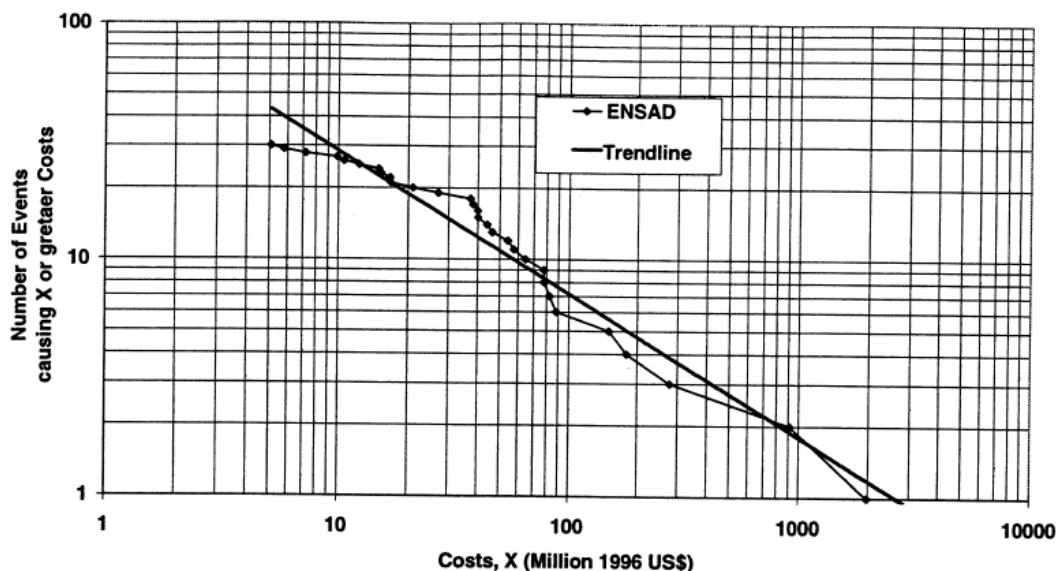


図 2.17 損害額  $X \times 10^6$  ドル(1996 年価値換算値)以上の損害を出した事故数 (Hirschberg et al., 1998, Fig. 6.6.14)

### 2.4.7 ダムの用途別安全性

図 2.18 に、オーストラリアとニュージーランドを含む欧米諸国における、ダムの用途別の事故発生率を示す。河の治水用ダムの事故発生率は低く、これに続いて水力発電用、灌漑用、水供給用のダムが続く。この図によると、同種類の建築様式のダムについては、事故の発生率は、その用途に関わりなく、ほぼ同じ程度であることがわかる。

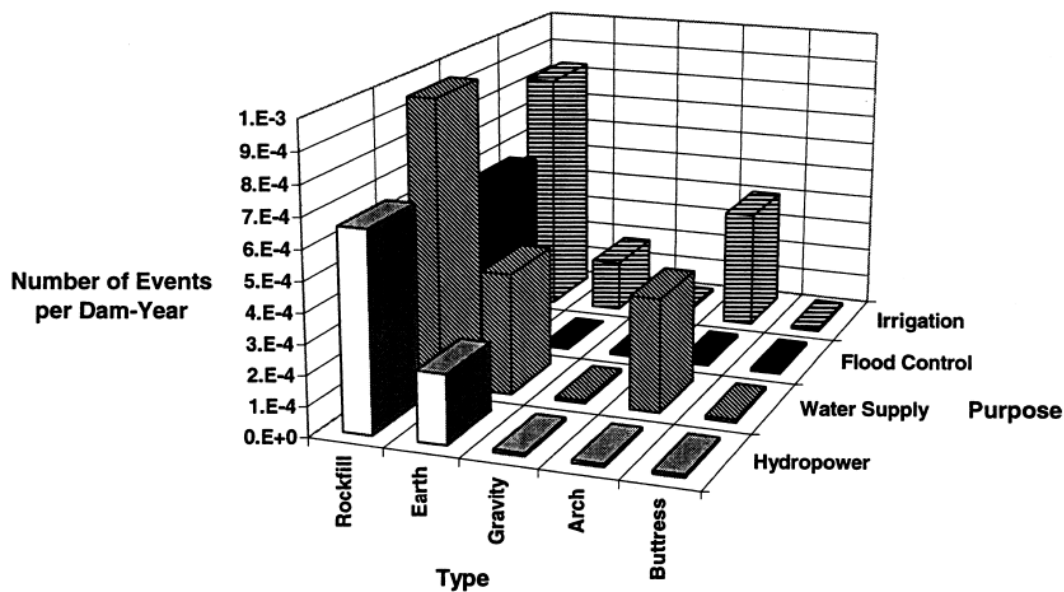


図 2.18 1930 年から 1996 年までの期間に、オーストラリアとニュージーランドを含む欧米諸国におけるダム崩壊事故の用途別、様式別の発生頻度 (Hirschberg et al., 1998, Fig. 6.6.16)

## 2.5 原子力の事故

原子力に関連した事故の歴史と解析評価結果について、スイスの PSI が整理した資料 (Hirschberg et al., 1998) を中心に、スリーマイルアイランド発電所 2 号機事故 (1979 年 3 月 28 日発生、PWR 843 MWe、以下 TMI-2)、チェルノブイリ発電所 4 号機事故 (1986 年 4 月 26 日発生、RBMK 1,000 MWe) を含む原子炉で発生した過酷事故の事例、商業用原子炉、原型炉、研究炉、軍事用原子炉で発生したその他の事故事例、並びに原子炉以外の商業用原子燃料サイクル施設及び軍事用原子力施設における過酷事故及びその他の小規模事故の事例を順に示す。但し、原子力潜水艦や原子力船の事故に関するものは含まない。なお、表 2.30 に、1996 年までに世界で発生した、原子力における死亡者数 5 人以上、負傷者数 10 人以上、避難者数 200 人または 500 万ドル (1996 年価値換算値) 以上の損害額を出した事故の概要を示す。

### 2.5.1 原子炉で発生した過酷事故

#### (1) TMI-2 事故

TMI-2 事故は、ヒューマン・エラーと機器故障が原因で発生した。その結果、少量の放射能が放出され、一般公衆が推定約 40 人・Sv の集団実効線量を受けた。一般公衆一人当たりの推定被ばく線量は極めて低く、最大でも 1 mSv を超えることは無い (UNSCEAR, 1993)。また、周辺公衆から一人のがんが発生すると推定されている。なお、事故発生直後に、144,000 人がプラント周辺から避難した (Sorensen et al., 1987)。プラントの汚染除去・清掃作業には、1,300 億ドルが費やされた (Komanoff, 1986)。この内、40 億ドルは敷地内の機器破損、清掃、暫定代替電源に関わる費用である。また残りの 1,260 億ドルは、米国内の原子力発電への波及効果 (特に PWR に対するもの) で、プラント建設やその為の資金調達の遅れ、代替電力調達の為の化石燃料購入費用、およびその他の投資 (運転、保守管理および安全管理の向上の為) などに関わるものである。また、この事故の波及効果は各国で観察されており、例えば、原子力の廃絶に踏み切った国もいくつかある。その後、(Sorensen, 1994) が、TMI-2 事故の損害額を 400 億 ECU であると推定している。この場合も同様の波及効果が含まれている。TMI-2 事故は、IAEA による INES 事故評価尺度においてレベル 5 に分類される事故である (INES 事故評価尺度については付録を参照)。

#### (2) チェルノブイリ事故

チェルノブイリ発電所 4 号機事故は、RBMK 型原子力発電所の設計上の欠陥、不十分な試験準備、およびプラント管理者と職員との不十分なセーフティ・カルチャーが原因で発生した。同事故は INES 事故評価尺度において最大のレベル 7 に分類される事故であり (付録参照)、原子力発電所の炉心崩壊により広範な環境と健康影響をもたらしている。1996 年に IAEA が取りまとめた報告書 (EC/IAEA/WHO, 1996) は、この事故の影響を次のように報告している。

##### i) チェルノブイリ事故による避難と移転

事故後の最初の年 1986 年に、高いレベルの放射線被ばくを避けるため、135,000 人の一般公衆が避難した。最も放射能汚染が高い地域には、半径 30 km (4,300 km<sup>2</sup>) の立ち入り禁止区域が設定され、一般公衆の立ち入りが禁止された。この区域はソビエト連邦が崩壊した後も、ロシア、ベラルーシおよびウクライナの 3 カ国により継承されている。また、立ち入り禁止区域の外側には数 100 km に及ぶ厳重管理区域が設定されていた。これは、555 kBq/m<sup>2</sup> を超える放射能濃度の区域で、住民の数は 270,000 人と言われる。立ち入り禁止区域並びに厳重管理区域の他にも、汚染区域が指定されており、この区域内には、ロシア、ベラルーシおよびウクライナの 3 カ国合計で 6,800,000 人が居住している。

1990 年から 1995 年にかけて、環境の放射エネルギーが確認されるに従い、社会的な不安が徐々に高まったため、この状況を解決するため政治的な事情から移転が実施された。この結果、ウクライナで

約 53,000 人、ベラルーシで約 107,000 人、ロシアで約 50,000 人が移転した。このように事故後の長期期間を経てもなお事故への対応が必要となる点は、原子力事故の特徴であるといえる。また、このような避難と移転は、ソビエト連邦の崩壊に伴う生活環境の変化、移住先の異なる生活環境などとあわせて、多くの社会問題をもたらした。

## ii) チェルノブイリ事故による健康影響

### ・急性放射線障害

発電所員及び緊急時対策要員の内 237 人が急性放射線障害の疑いで入院し、その内 134 人が急性放射線障害と診断された。事故発生直後の時点で、28 人が放射線被ばくが原因で死亡し、2 名が事故現場で放射線障害以外の理由で死亡、さらに 1 名が動脈血栓で死亡したと推定されている。その後の 10 年間に、14 人が死亡しているが、その死因は直接事故の急性放射線障害との関連が無い為、放射線被ばくとの因果関係を特定することはできない。

### ・晩発性放射線障害

次に、長期的に発生するがん、白血病の発生数の推定結果を、表 2.31 に示す。また、表 2.32 にチェルノブイリ事故による被ばく線量の概要を示す。

事故処理作業は、発電所員の他、臨時に招集された消防署員、軍人・兵隊、一般の志願者から成る膨大な数の作業員により実施された。総計 60 万人から 80 万人が、なんらかの形で事故処理・清掃作業に従事したと言われる。これらの作業員はリクイデーター (Liquidators) と総称される。放射線被ばくが最も高かった 1986 年から 1987 年までの期間に、推定約 20 万人がチェルノブイリ地区の作業に参加している。この 20 万人の中から放射線被ばくにより致死がんを罹患する人数は 2,000 人と推定されている。通常でも 20 万人の規模の一般公衆からは 41,500 人のがんが発生することを考慮すると、これはリクイデーターからのがん発生率が、一般公衆のがん発生率の 5% 増となることを意味する。また、この 20 万人のリクイデーターからは 200 人の白血病患者が発生すると推定されている。これは 20 万人の一般公衆から通常 800 人の白血病患者が発生することを考慮すると、リクイデーターからの白血病発生数が、一般公衆よりも 20% 増となることを意味する。現在使われている白血病発生数の推定モデルによると、白血病にかかると推定される 200 人のリクイデーターの内の 150 人は最初の 10 年間に発病すると推定されている。しかし、実際には通常発生する数の白血病を超えるような数の白血病患者の増加は、この期間には見られていない。

立ち入り禁止区域から避難した一般公衆からは、事故に伴う放射線被ばくにより 150 人の致死がん患者が発生すると推定されている。これは、一般に 135,000 人の公衆から発生するがん患者数が 21,500 人であることを考慮すると、立ち入り禁止区域からの避難者のがん発生率が、一般公衆のもの 0.7% 増であることを意味する。またこれら避難者から発生すると推定される白血病患者数は 10 人で、これも 135,000 人の集団で通常発生する白血病患者数 500 人であることを考慮すると、避難者達の白血病発生率が、一般公衆の 2% 増であることを意味する。

嚴重管理区域の住民、約 27,000 人の中から、事故に伴う放射線被ばくにより発生すると推定される致死がん患者数は、1500 人である。これは同規模の一般公衆から通常発生する致死がん患者数が 43500 人であることを考慮すると、嚴重管理区域住民のがん発生率が、一般公衆の 3% 増であることを意味する。また、白血病については、この区域の 270,000 人の住民から、事故に伴う放射線被ばくにより、100 人が罹患すると推定されているが、これはこの規模の一般公衆から通常発生する白血病患者数が 1,000 人であることを考慮すると、この区域の住民の白血病発生率が、一般公衆より 9% 高いことを意味する。

汚染区域の住民、約 680,000 人の一般公衆から発生すると推定される致死がんの患者数は 4600 人で、これは 6,800,000 人の一般公衆から通常発生と言われる致死がん患者数が 1,088,000 人であることを考慮すると、同汚染区域住民のがん発生率が、一般公衆のものより 0.4% 高いことを意味する。また、白血病については、200 人が罹患すると推定されているが、これは一般公衆から通常発生

する白血病患者数が 24,000 人であることを考慮すると、汚染区域住民は、一般公衆より 1.5 % 白血病発生率が高いことになる。

これまでのところ、甲状腺がんの発生が、特に小児について顕著に見られ、事故発生当時に小児だった個人の甲状腺がんは、明らかに事故との関係があると考えられる。1995 年末までに、ロシア、ベラルーシおよびウクライナの 3 カ国で報告されている 0 歳から 15 歳までの小児の甲状腺がんの患者数は、1,000 人近くである。この内約 400 人はベラルーシ国内で発生している。1996 年の報告では、10 人の小児が甲状腺がんにより死亡している。なお、甲状腺がんの生存率は 90 % から 95 % とされる。チェルノブイリ事故の放射線被ばくによる甲状腺がんの発生推定値は、最も影響が予想されるグループ（約 100 万人の小児）の中で、4,000 から 8,000 人とされている。これは通常の発生頻度の 100 倍から 400 倍の数値である。また、この内、200 から 800 件は致死性のがんである。

#### ・放射線障害以外の健康影響

放射線障害以外にも、無視できない健康障害や症状が認められている。例えば、不安、憂鬱等の心理的な不調は、この地域の住民の精神的なストレスに起因するものである。もちろん放射線障害ではなく、事故直後の情報不足、命令による移住・避難、それに伴う社会的なつながりの分断、及び被ばくによる健康影響を住民やその子供達が被るかも知れないという不安が、社会心理学的な影響をもたらしている。しかし、これらの社会心理学的な影響を、ソビエト連邦の崩壊に伴う経済的な問題に起因するものと区別することは難しい。

#### 他国への影響

他のヨーロッパ諸国では、ブルガリア、オーストリア、ギリシャ、及びルーマニアが比較的高いレベルの放射能汚染を受け、その他の中央ヨーロッパ、南東ヨーロッパ、及び北ヨーロッパ諸国がこれらに続く汚染を受けている。UNSCEAR（国連科学委員会）の推定によれば、ソビエト連邦以外の諸国における、同事故による最初の年の平均個人被ばく線量は 0.8 mSv で、更に 2056 年までの 70 年間の同地域最高の平均預託個人線量は 1.2 mSv と推定されている。

表 2.30 原子力の過酷事故とその影響<sup>a</sup> (Hirschberg et al., 1998, Table D.1)

発生年月日	場所	国	施設 <sup>b</sup>	大気中への放射能(Bq) <sup>c</sup>	急性死亡(従事者)	推定潜伏死亡者数 <sup>k</sup>	負傷者	汚染面積 <sup>d</sup> (km <sup>2</sup> )	避難者数	損害額(10 <sup>6</sup> US\$)
1993年 4月6日	Tomsk-7	ソビエト連邦 (シベリア)	Rp (M)	2 × 10 <sup>13</sup> - 4 × 10 <sup>13</sup>	na (情報なし)	na	na	~100 (> 10 μR/h)	0	na
1986年 4月26日	Chernobyl	ウクライナ (旧ソ連)	R (C)	1.2 × 10 <sup>19</sup> - 1.5 × 10 <sup>19</sup>	31	W~2,200-2,700 P~7,000-30,000	370 <sup>c</sup>	~154,620 <sup>f</sup> (> 37 kBq/m <sup>2</sup> Cs-137) <sup>e</sup>	115,000- 135,000 <sup>g</sup>	~20 × 10 <sup>3</sup> - 320 × 10 <sup>3</sup>
1979年 3月28日	Three Mile Island	米国 (ペンシルバニア州)	R (C)	3.7 × 10 <sup>17</sup>	0	P~1	0	0	144,000 <sup>h</sup>	~5 × 10 <sup>3</sup>
1967年	Lake Karachay	南ウラル、マヤク地区 (旧ソ連)	WS(M)	2.2 × 10 <sup>13</sup>	---	P~16	---	1,800-2,700 (> 3.7 kBq/m <sup>2</sup> Cs-137/Sr-90)	0	na
1957年 10月8日	Windscale	英国	R (M)	1 × 10 <sup>15</sup> - 5 × 10 <sup>15</sup>	0	P~100	0	520 (ban of milk for I-131)	0	£ 60,000 <sup>i</sup>
1957年 9月29日	Chelyabinsk 40	南ウラル、マヤク地区 (旧ソ連)	Rp (M)	7.4 × 10 <sup>6</sup>	na	P~125	na	~23,000 (> 3.7 kBq/m <sup>2</sup> Cs-137/Sr-90)	10,800 <sup>j</sup>	na
1955年 7月15日	Aue	ザクセン (旧ドイツ)	M (M)	---	33	---	na	---	---	na

<sup>a</sup>. 死亡者数5人以上、負傷者数10人以上、避難者数200人または損害額500万ドル(1996年価値換算値)以上の事故のみ掲載。

<sup>b</sup>. R: 原子炉、Rp: 再処理プラント、WS: 廃棄物貯蔵庫、M: 燃料採掘、(C): 商業用、(M): 軍事。

<sup>c</sup>. 同位体の成分の記録は無い。この表だけでは、事故の影響の比較は出来ない。

<sup>d</sup>. この表に示される全ての事故について、放射性同位元素を比較する為の参考元素(Reference radioactive species)を用いることは考慮されていない。従って、この表に示された面積は、汚染の大きさの程度を示すだけのものである。汚染の種類については、本文中に示した。

<sup>e</sup>. 事故直後に400人が急性放射線障害の疑いで入院し、その内31人が死亡したことから求めた値。400-31=約370。

<sup>f</sup>. この面積は、最も影響を受けたロシア、ウクライナの3カ国のものだけを含む。

<sup>g</sup>. 恒久的な避難。1986年に避難した住民の数。事故後の10年間で、他のグループも移住しているが、自発的な移住者と区別された報告書がないので、上の表からは除外した。

<sup>h</sup>. 暫定的。

<sup>i</sup>. 事故の影響で使えなくなったミルクの損害額だけを含む。

<sup>j</sup>. 事故発生後、18ヶ月以内に避難した住民数。その後、1990-1995年にかけて、ウクライナ、ベラルーシ及びロシアにおいて約20万人が移転している。

<sup>k</sup>. 晩発性死亡による死亡者数。W: 従事者、P: 一般公衆。

表 2.31 ベラルーシ、ロシアおよびウクライナにおけるチェルノブイリ事故の影響による致死がんの推定発生数  
(Hirschberg et al., 1998, Table D.2.3)

カテゴリー	グループの人数 (平均個人被ばく線量) [集団被ばく線量]	がんの種類	自然発生がん 推定発生数	推定死亡者数	推定自然死亡者数からの増 加の割合
リクイデーター (1986年-1987年)	200,000 (100 mSv) [20,000 person-Sv]	白血病 その他	800 41,500	200 2,000	20 % 5 %
避難者数 (1986年)	135,000 (12 mSv) <sup>b</sup> [1,600 person-Sv]	白血病 その他	500 21,500	10 150	2 % 0.7 % <sup>k</sup>
嚴重管理地区の住民 (> 55kBq/m <sup>2</sup> )	27,000 (50 mSv) [15,000-30,000 person-Sv] <sup>c</sup>	白血病 その他	1000 43,500	100 1,500	9 % 3 %
その他の汚染区域の住民	6,800,000 (7 mSv) [53,000-150,000 person-Sv] <sup>c</sup>	白血病 その他	24000 1,088,000 <sup>d</sup>	370 4,600 <sup>e</sup>	1.5 % 0.4 % <sup>f</sup>
0-14 歳の小児 (1986年時点)	1,000,000 <sup>g</sup> (500 mGy)	甲状腺がん	< 1-2 <sup>h</sup>	200-800 <sup>i</sup>	100-400 倍
合計	7,405,000 人 (小児 1,000,000 人)	白血病 その他 甲状腺がん	26300 1,194,500 (2)	680 8250 200-800	2.6 % 0.7 % 100-400 倍
		全種類のがん	約 1,221,000	9130-9730 2.5-2.6 (total) <sup>j</sup> 0.5-0.6 (worker) <sup>j</sup> 1.9-2.0 (public) <sup>j</sup>	約 0.8 %

a. 事故後 70 年間の集団実効線量 (collective effective dose)  
 b. (EC/IAEA/WHO, 1996) では 10 mSv となっており、集団被ばく線量 1600 人・Sv と矛盾する。国際会議の時点では 1,300 人・Sv と発表されていた。  
 c. 最低値は、おおよそ平均個人被ばく線量と集団の数の積に合っている。  
 d. 再計算値。(EC/IAEA/WHO, 1996) の国際会議では、16%の一般人は自然にがんにかかるかと発表しており、これは WHO の統計に矛盾しないが、680 万人のグループに該当する自然のがん死の数は 80 万人で、わずか 12%に過ぎない。  
 e. (EC/IAEA/WHO, 1996) に示される自然のがん死の平均値。白血病も含み、2,700 人から 7,500 人の間がある。  
 f. 対応する第 4 列と第 5 列の数字を用いて得られた値。(EC/IAEA/WHO, 1996) では、同じグループの人々に対するがん死のバックグラウンド値である 80 万人を用い、0.6 %が与えられている。  
 g. 甲状腺がんについては、小児は一般公衆からは分けて取扱われる。  
 h. 引用文献では 10 から 14 のケースが報告されている。ここでは、死亡者数は死亡率 5 %を基に計算されている。  
 i. この引用文献では 4,000 人から 8,000 人のがんが報告されている。  
 j. 規格化の為に、3,680CWe・年を仮定した。  
 k. 原文では 0.1 であるが、これは表の上での誤計算と思われる。



表 2.32 チェルノブイリ事故による被ばく線量 (Hirschberg et al., 1998, Table D.2.2)

カテゴリー	人数	被ばくの種類	被ばく線量	
			グループ別	被ばくレベル
リクイデーター (1986年-1989年)	600,000	全身ガンマ線	0.02% 8% 47% 45%	>500 mSv 250-500 mSv 100-250 mSv <100 mSv
避難者 (1986年)	130,000	全身ガンマ線	幅 平均	30-500+ mSv 120 mSv
		小児の甲状腺 (I-131)	幅 平均	0.1- 2(5) Gy 0.3 Gy
嚴重管理地区の住民	270,000	ガンマ線による 預託実効線量当量	平均 4% 800人	60 mSv > 100 mSv > 200 mSv
ソビエト連邦の ヨーロッパ地区	75,000,000	合計預託実効線量当量	平均	6-7 mSv

### iii) チェルノブイリ事故の損害額の推定

PSI (Hirschberg et al., 1998) では、チェルノブイリ事故による損害額に関する情報を、次のように整理している。(Nucleonics Week, 1994) によれば、チェルノブイリ事故の推定損害額は、200 億ドルから 3,200 億ドルの範囲であるとされる。この幅は主にルーブルの米ドルへの換算レートの変動によるものであるが、同資料は損害額の内訳を明らかにしていない。Sørensen によれば、チェルノブイリ事故の損害は 6,000 億 ECU である。この内訳は、プラントの停止に伴う代替電源確保の為の化石燃料の購入、安全性改善工事などの原子力発電事業全般への波及効果、および、健康障害の貨幣換算値が含まれている (Sørensen, 1994)。

ロシアの緊急事態省の Voznyak は 1996 年 IAEA の国際会議において、ソビエト連邦崩壊までの 1986 年から 1991 年までの期間の、チェルノブイリ事故の直接の損害と関連の支出の合計が 238 億 3,700 万ルーブル (ドル等への換算値は原文に示されていない) であると報告している (Voznyak, 1996a)。1986 年から 1989 年間の損害額については、ECOSOC<sup>4</sup>を訪れたソビエト連邦、ウクライナ (連邦当時) 並びにベラルーシ (連邦当時) の代表団が国連事務局長に宛てた 1990 年 7 月 6 日付け文書の中で、92 億ルーブルと公式報告されている (Voznyak, 1996a)。なお、UNESCO への報告では、1986 年から 1989 年までに清掃作業の費用は 100 億ルーブルであるとしているが、根拠となる資料はわかっていない (Savchenko, 1995)。1990 年には 33 億 2,400 万ルーブルがソビエト連邦で費やされ、これに加え、事故の影響を受けた共和国単独の支出合計が 10 億 1,400 万ルーブルあった。1991 年には、同年のソビエト連邦崩壊までの期間に、103 億ルーブルがこれら共和国で確保されていた。これらの支出額には、資産の損失、農業生産高の損害、影響緩和対策費用、新たな住居とインフラストラクチャーの建設費、移住する住民の移動費用と日当、土壌の汚染除去費用、森林と水源の保護対策費、及び賠償費用が含まれる。1988 年から 1989 年の二年間には、297 万ルーブルが国外から援助されている。

Voznyak は、また、1996 年の同国際会議において、1992 年から 1995 年の 4 年間、事故影響回避措置にソビエト連邦が費やした支出額に関する情報を提供している。合計は 3 兆 3490 億ルーブルで、各年末毎の公式通貨交換レートを用いてこれを換算すると、1 兆 1550 億ドルとなる (Voznyak,

<sup>4</sup> United Nations Economic and Social Council

1996b)。この額は、GDP（国内総生産）の数%に相当する。これを年別に見ると、1992年には670億ルーブルだったが、1995年には1兆7,360億ルーブルに跳ね上がっている。

ウクライナでは、1991年9月より特別基金<sup>5</sup>が設置されている（Ukraine, 1996）。1995年まで、この支出額は国家収入の1.7%から2.8%を占めた。例えば、1995年には、約94兆2,000億karbovanets<sup>6</sup>を記録した。1994年に発表された資料によれば、1991年からの3年間の支出額を公式通貨交換レートを用いて換算すると、30億ドルを超えているが、ウクライナにおける商品等の市場価値と、外貨であるドルとの交換レートとは必ずしも連動していないため、将来ウクライナ通貨の価値が正当に評価されれば、この値はさらに上がることが予想される。

ベラルーシでは、事故に伴う経済的損害を、今後30年間での復興費用として計算し、事故発生前の年間予算の32倍に相当する2,350億ドルとした（Rolevich, et al., 1996）。Solevichは、1986年から2015年までのベラルーシにおける経済的な損害は、1995年1月時点の価値換算で6,000億ルーブルであると推定している（Savchenko, 1995）。このうち2140億ルーブルが社会保障額、1870億ルーブルが天然資源の放射能汚染による損害、及び800億ルーブルが放射性廃棄物管理費用である。また、1996年頃の事故復興対策に対する年間支出額は、数兆ルーブルであった。例えば、1995年の支出額は、ベラルーシ共和国の年間予算の11.5%に相当する3兆20億ルーブルで、その58.7%が生活環境の改善、10.6%が移住、28%が賠償、2%が健康管理、0.2%が環境の放射線・放射能モニタリングに使用された（Rolevich, et al., 1996）。

ロシア、ベラルーシおよびウクライナによって示された上述のデータには、明らかな食い違いが見られる。従って、これらの情報に基づいて合計の支出額を予測することは時期尚早である（Hirschberg et al., 1998）。しかし、これら3カ国からの情報は、チェルノブイリ事故の損害額が、少なくともNucleonicsの推定額の上限を更に上回るであろうことを示唆している（Nucleonics Week, 1994）。表2.33に、ロシア、ベラルーシおよびウクライナにおける事故復旧措置予算と支出の概要をまとめる。

<sup>5</sup> Measure to Eliminate the Consequence of the Chernobyl Disaster and Provide for Social Welfare

<sup>6</sup> 1995年当時のウクライナにおける暫定通貨

表 2.33 ロシア、ベラルーシおよびウクライナの事故復旧措置予算と支出の概要  
(Ukraine, 1996; Rolevich, et. al., 1996; Savchenko, 1995; Voznyak, 1996a; 1996b)

	ロシア		ベラルーシ		ウクライナ	
	百万ルーブル	百万 US ドル	百万ルーブル	百万 US ドル	百万ルーブル	百万 US ドル
ソ連邦崩壊前	1986年から1989年までの直接損害総額					
	1986年から1991年までの直接損害総額					
	1986年から1989年までの清掃作業 (ソビエト連邦分)					
	1990年の清掃作業 (ソビエト連邦分)					
	1990年の清浄作業 (共和国分: 上記ソビエト連邦分を以外)					
	事故影響を受けた共和国での費用 <sup>(a)</sup> (1990年時点)					
	1992年から1995年	3,349,000	1,155,000	9200 (100 万ルーブル)		
	1992年	67,000 <sup>(b)</sup>		23,837 (100 万ルーブル)		
	1995年	1,736,000 <sup>(b)</sup>		10,000 (100 万ルーブル)		
	1991年から13年間の特別予算合計			3,324 (100 万ルーブル)		
	特別予算が国家収入に占める割合 (独立後 1991年9月~1995年)			1,014 (100 万ルーブル)		
	30年間の復興期間にかかる推定費用		235,000	10,300 (100 万ルーブル)		1.7%~2.8%
ソ連邦崩壊後	合計					
	1986年から2015年までの30年間にかかる推定費用		600,000			
	社会保障		214,000			
	放射能汚染による天然資源の損害		187,000			
	放射性廃棄物管理		80,000			
	合計		3,002,000			
	生活環境改善		1,762,174			
	移住と定着		318,212			
	賠償		840,560			
	健康診断等		60,040			
	環境放射能測定		6,004			
	国の年間予算に対する比率		11.5%			

<sup>(a)</sup>土地建物と農業の損害、事故影響の回避措置、新しい住居と社会基盤の建設、移住者の移動費用と日当、土壌汚染、森林と水資源の保護措置、及び損害賠償費用

<sup>(b)</sup>1992年と1995年の間の年間予算額に関する情報はない

### 米国大統領委員会におけるチェルノブイリ事故による損害額の推定

米国における 1990 年の大統領委員会（Presidential Commission, 1990）において、チェルノブイリ事故の推定損害額に関する報告が行われている（Wilson, 1989）。これによると、過酷な原子力事故が発生した場合、国家が負担する最高推定額は、約 200 億ドル（約 2 兆円）である。これは、ソビエト連邦の科学者から得られた情報を基に、チェルノブイリ事故の回収作業に関わる主要な作業項目の各々について、アメリカ合衆国の尺度で損害額を再試算した結果である。試算方法としては、ルーブルとドルの交換レートを単純に乗ずる方法を採用せず、チェルノブイリ事故の対応の為に行なわれた各種活動と、使用された各機材の価値と量を評価し、当時の米国で想定される価値に換算して試算された。試算結果を、表 2.34 に示す。

表 2.34 チェルノブイリ事故の損害推定額（Wilson, 1989）

項目	ソビエト連邦 (10 億 rouble)	アメリカ合衆国で同じ対応を行なった場合 (10 億 \$)
代替プラントを含む代替電源	1.5	4
石棺建設	1.5	4
機材	0.05	0.05
回収作業労働者	0.15	3
家屋使用制限による損害	0.3	2.25
農地使用制限による損害	2	4
避難民	1	3
合計	8.1	20.3

代替電力については、この事故が原子力発電所 1 基を電力グリッドから永久に取り除いてしまった為の損害を 15 億ルーブルと仮定し、米国での損害額を 40 億ドルと推定した。石棺建設費用については、この建造物が世界で初めての為、建設工事費用の推定はほとんど不可能であるとしながらも、原子炉とその土台を上回る建設費用が予想されること、石棺建設の工事法が効率的でなかったことを考慮し、大雑把に 40 億ドルと推定した。機材およびロボット等の費用については、当時のソビエト連邦が対応に必要な機器が不足していた為、500 万ドル～1,000 万ドル相当の西ヨーロッパ製、特に西ドイツ製の機材を購入したと報告されていること、また、この仕事に携った 100 人から 200 人の科学者と支援職員の給与を加算して、保守的に 5,000 万ドルと推定した。回収（清掃）費用については、発電所周辺の清掃・回収作業には、道路の洗浄、汚染表層土および樹木の除去・廃棄作業などの作業ステップを考慮し、各作業ステップを通じて 3 年間以上に渡り合計 3 万人が従事したとの公式の情報を基に、作業期間 5 年間と、1 人当たり年間 3 万ドルの人件費を仮定し、30 億ドルが計算された。住居が使用出来なくなったことによる損害は、建物の額の約半分になると仮定し、合計 3 万戸のアパートが空家になったと考え、これに米国でのアパートの平均価格 15 万ドルを乗じて、22 億 5,000 万ドルを試算した。なお、農地使用制限に関する損害と避難民に関する損害を導出する際の仮定及び定量的な根拠については、Wilson の報告書には示されていない<sup>7</sup>。

また、大統領委員会における報告書では、チェルノブイリ事故における損害と、損害に対する賠償に関して以下の点が指摘されている。

<sup>7</sup> 農地使用制限に関してはチェルノブイリ原子力発電所周辺が松林であったこと、またゴメル地区北部に位置する農耕地において農業活動が制限され、当該地区において生産された食料が検査の対象となっていることを指摘している（Wilson, 1989）。

- 米国での事故を想定した場合、これらの損害推定額は、対応に必要な費用であって市場における価格によって決定される値ではない。
- 米国での事故を想定した場合、過度に誇張された損害賠償請求が、事故後の負担額を何倍にも増加させる可能性がある。
- TMI-2 事故では、プライス・アンダーソン法を基に避難住民へ賠償金が支払われたが、チェルノブイリ事故ではこのような賠償はなされていない<sup>8</sup>。
- チェルノブイリ事故での対応には、自主的な対応が多く実施されており、それらの対応は費用として記録されていない。

#### iv) チェルノブイリ原子力発電所と西側諸国の原子力発電所の安全性の違い

PSI (Hirschberg et al., 1998) は、チェルノブイリ原子力発電所の事故は、同発電所の設計と運転条件がスイス及びほとんどの西側諸国の原子力発電所のものとは根本的に違う点で、これらプラントの安全性評価には無関係なものであると評価し、次の点を論拠として挙げている。

技術：設計に用いられた工学が、ロシア型原子炉と西欧型原子炉では明らかに異なる。事故を起こした原子炉と同型の RBMK 型原子炉では、事故時の原子炉の物理的な特性が不安定である。また、ソビエト連邦では、安全性や事故の影響に関する調査・研究が十分実施されておらず、事故時のプラント挙動に関する知識が不足していた。チェルノブイリ原子力発電所の原子炉には格納容器が無く、事故時のプラント停止などの為の独立した安全システムにも欠陥があった。

規制要件：1988 年ないしは 1989 年頃まで、ソビエト連邦には原子力規制機関が存在しなかった。運転許可なるものは無く、従って許認可条件も、関連の立法も存在しなかった。従って、設計と建設は、自主的な規制に任されていた。

セーフティ・カルチャー：ソビエト連邦ではセーフティ・カルチャーについても品質保障についても大きな問題があった。更にソビエト連邦の原子力発電サイトでは、書面化された緊急時対策計画に基づく訓練が実際に施行されていず、事故時の対応については、運転員個人の資質と経験に任されていた。西側諸国のプラントでは、緊急時対策計画に基づく訓練がサイト毎に実施され、規制機関がこれを検査している。

確率論的安全評価 (PSA) の結果：一般的欧米プラントの炉心溶融確率に関する PSA 評価結果は  $10^{-5}$ /炉・年程度である。一方ロシア型原子炉炉心の溶融確率は、悪い場合には  $10^{-2}$ /炉・年まで上がる。

### (3) ウインズケール事故 (Hirschberg et al., 1998)

1957 年 10 月 8 日、英国のカンブリア地方のウインズケールにある軍事用原子炉（軍事用のプルトニウムとトリチウムの製造用のグラファイト減速、空気冷却型原子炉）の 3440 チャンネルの内、約 140 のチャンネルから火災が発生した。原因として、燃料における過剰な熱の発生が燃料被覆を破壊し、ウラニウムを酸化させ、原子炉を加熱したこと、またはリチウム-マグネシウム合金のメッキ（被覆）の破損とそれに続く酸化、もしくは比較的低温で起こり得る高度に放射化されたグラファイトの酸化などが考えられている。火災は 10 月 8 日に発生し、炉心は 10 月 12 日に冷却されている。水が火災の抑制に用いられた。180 トンの炉心中のウラニウムの内、22 トンは復旧することが出来なかった。5 トンが燃焼したと考えられている。

<sup>8</sup> 委員会で答弁した Wilson は、TMI-2 事故において支払われた 2000 万ドルに言及し、チェルノブイリ事故の損害額には、実際に存在せず、また正当化されない健康損害が含まれていないと述べている。

この事故の結果、放射性物質が放出されたが、そのほとんどは I-131 で、他の核分裂生成物のほとんどは炉心中に残り、また出たとしても排気塔の頂部にあるフィルターで捕捉されたと考えられる。大気中に I-131 が 16,200～27,000 Ci、Cs-137 が 600～1230 Ci、Sr-89 が 80～200 Ci、Sr-90 が 2～9 Ci、Te-132 が 12,000～16100 Ci、Ru-106 が 80～160 Ci、Ce-144 が 80～109 Ci、また、Po-210 が数百 Ci 放出されたと推定されている。またこの他、H-3 が 100,000 Ci 放出された可能性がある。これを含めると、空気中への放射性物質の推定放出量の合計は約  $1 \times 10^{15} \sim 5 \times 10^{15}$  Bq となる。I-131 により汚染されたことが判明した為、520 km<sup>2</sup> の地域で牛乳の消費が禁止された。その後、健康影響に関する調査が実施されたが、放射能放出量、人への移行経路、並びに低いレベルの被ばく線量とその健康への影響の関係が不確実な為、評価結果もばらついている。この事故の影響で数十年後に発生が予想される英国内の致死性がんの件数は、低レベルの放射線の影響を含めた集団の被ばく線量とその健康影響の評価モデル、5 %とされる甲状腺がんの死亡率、及び ICRP1977 のリスク係数 (Crick et al., 1982/83) を考慮し、最高 33 件 (甲状腺がん 13 ケース他、肺がん、腸がん)、非致死がんの発生数は 237 件と推定されている。一方、UNSCEAR 1988 リスク係数 (UNSCEAR 1988) を用いると、英国内の 40 年から 50 年間の致死がんの発生数は、最高 100 件 (主に肺がん)、非致死がんは 90 件 (主に甲状腺がん)、並びに遺伝的影響は 10 件と評価される (Clarke, 1988)。主な経済的損害は、牛乳廃棄処分によって発生しており、約 6 万ポンドと推定されている。当該事故は、IAEA の事故評価尺度のレベル 5 に区分される。

## 2.5.2 商業用原子炉、原型炉、研究炉及び軍事用原子炉におけるその他の事故

PSI 報告書 (Hirschberg et al., 1998) に記載された商業用原子炉、原型炉、研究炉、及び軍事用原子炉で発生したその他の事故の概要を以下に示す。環境と健康への影響の観点からは過酷事故と見なされないが、損害額の面は確認されていない。

・ もんじゅ (日本) 1995 年 12 月 8 日

280 MWe の高速増殖炉原型炉での事故。ナトリウムが中間熱交換器出口側の二次系ループ配管から漏洩したが、放射能の環境への漏洩も、発電所員への影響も無かった。

・ Constituyentes (アルゼンチン) 1983 年 9 月 23 日

臨界装置 RA-2 の安全規則外の組み替えにより、出力が異常上昇し、炉心から 3~4 m 離れた距離にいた運転員 1 名が高いレベルの放射線 (ガンマ線 21 Gy, 中性子線 22 Gy) を被ばくし、死亡した。IAEA の事故評価尺度では、敷地内事故という点で、レベル 4 に区分されている。

・ Saint-Laurent-des-Eaux (フランス) 1980 年 2 月 10 日

515 MWe のガス・グラファイト原子炉の急速な出力上昇により、20 kg の照射済み燃料が溶融した。プラントは放射能汚染したが、一般公衆への被ばく線量が最大許容レベルを超えることはなかった。修繕工事には 1 年間以上が費やされた。IAEA の事故評価尺度では、敷地内事故という点で、レベル 4 に区分されている。

・ Bohunice (旧チェコスロバキア) 1976 年 1 月 5 日

110 MWe の重水減速・炭酸ガス冷却原子炉の運転中の燃料装荷作業に際し、急激な炉心の圧力低下が発生した。運転員 2 名が窒息した。放射能が環境中に放出されたが、量は定かでない。

・ Grenoble (フランス) 1974 年 7 月 19 日

Laue-Langevin Institute の 47 MWth の高濃縮度燃料、高中性子線束のプール型原子炉中に、 $9 \times 10^{13}$  Bq (2,500Ci) の Sb-124 が放出され、更に環境中へ放射能が放出され、地下水の放射能汚染を招いた。

・ Savannah River (米国、南カリフォルニア) 1974 年 5 月 2 日

放射能が軍事用重水炉から放出され、外部のトリチウム汚染が起きた。

・ Chevtchenko (ソビエト連邦) 1973 年 9 月

1,000 MWth、150 MWe の高速増殖炉 (一部はカスピ海の海水脱塩に利用) の 2 次系ナトリウムに、400 kg の海水が流入し、ナトリウムと水の反応による爆発が発生した。この爆発に伴い、環境中への放出と、水素火災が発生した。死亡者数などの情報は明らかにされていない。

・ Lucens (スイス) 1969 年 1 月 21 日

地下洞窟に設置された 6 MWe (28 MWth) の重水減速・炭酸ガス冷却型のプロトタイプ原子炉での事故。原子炉運転停止中に、一次系のガス送風装置の水シールから漏洩が起こり、いくつかの燃料要素マグネシウム被覆が腐食した。原子炉運転開始時に、この腐食生成物がガスの循環を妨げ、多くの燃料エレメントが加熱され、溶融し、更に周辺の燃料被覆が火災を起こした。圧力管が破裂し、重水タンクを破壊した。これは一次系の健全性の喪失である。放射能汚染した重水と炭酸ガスが洞窟内に漏洩したが、洞窟の外の環境に達した放射能は無視できるレベルである (約  $3.4 \times 10^{12}$  Bq (92 Ci) の希ガス、 $2.7 \times 10^7$  Bq (740  $\mu$ Ci) のエアロゾル)。

・ Grenoble (フランス) 1967 年 11 月 7 日

15 MWth の実験用プール型原子炉 Siloé の燃料一つ（濃縮度 90%）が溶融し、 $2 \times 10^{15}$  Bq（5500 Ci）がプール中に放出され、更に  $7.4 \times 10^{13}$  Bq（2200 Ci）が空气中に放出された。

・ Mol（ベルギー）1965年12月30日

研究用原子炉で出力暴走（power excursion）が発生し、1名が放射線障害により、片足を切断しなければならなかった。

・ Idaho Falls（米国、ユタ州）1961年1月3日、国立原子炉試験所（National Reactor Testing Station）

3MWth の原子炉 SL1（Stationary Low Power Reactor No.1）の事故。この原子炉はウラニウム・アルミニウム合金の板状の高濃縮度ウラン（93%）燃料を装荷し、軽水減速・冷却システムを用いたタイプのもので、本来は北極の軍事基地での使用（200KWe の発電と給湯の為）を目的として設計されたものである。事故発生前からすでに制御棒がつかえて動かなくなることが何度もあり、時々運転員が手動で制御棒を上げたり下げたりすることがあった。このような状況で事故が発生し、保守要員 3 名が死亡した。事故の原因は、運転員の一人が中央の制御棒を手動で持ち上げた際に、炉心が臨界を超えたことであると考えられている。燃料は粉々に砕け、炉心を収納していた容器は圧力の上昇により破壊された。この操作を行なった運転員の天井にぶら下がった遺体には、制御棒が突き刺さっていた。少量のヨウ素と希ガスが空气中に放出されたが、99.99%の放射能は建物の内部に収まっていた。この建物は除染され、約1年半後に撤去された。

また、この事故の発生する前にも、同じ研究所内で、2回同種の事故が起きているが、いずれも大きな影響はなかった。最初の事故は、1955年11月29日に、EBR-1（Experimental Breeder Reactor, 1.2 MWth, 初の液体金属により冷却するシステム）で起きている。冷却率が低下し、出力が上昇すると共に制御の限界を越えた。炉心の半分が溶融したが、職員の被ばくは無かった。第二の事故は1958年11月18日に HTRE-3（Heat Transfer Reactor Experiment, 120 kW<sub>th</sub>, 水素と化合したジルコニウムにより中性子を減速し、空気中で炉心を冷却するシステム）で発生した。機具の誤使用が原因で、制御出来ない出力上昇を招き、炉心の一部が溶融した。

・ Vinca（旧ユーゴスラビア）1958年10月24日

重水減速型の研究炉で出力暴走が発生した。爆発には至らなかったが、6人が高線量の放射線を被ばくし、一人が死亡した。

・ Marcoule（フランス）1956年12月14日

ガス冷却グラファイト減速型の軍用原子炉 G2（200 MWth、36 MWe）の出力上昇中、一つのチャンネルの温度が上昇したが、それを検知することができず、燃料の被覆が破裂し、1200 のチャンネルの内、100 本が汚染した。冷却材の炭酸ガスは炉内の補修工事の為に大気中に放出された。政府の発表によれば、一般公衆への影響は小さいと考えられているが、補修工事に携った作業員の被ばく線量は高い。

・ Marcoule（フランス）1956年10月

軍用ガス冷却グラファイト減速型原子炉 G1 が始めて最高出力（40 MWth、3 MWe）に達した際、一つのチャンネルの燃料が酸化し、溶融した。フィルターシステムがあった為、敷地外への放射能汚染は無視し得る程度に抑えられた。

・ Chalk River（カナダ、オンタリオ）1952年12月21日

40 MWth の重水炉 NRX における制御棒操作ミスにより発生した出力上昇の結果、炉心が損傷した。運転員の放射線被ばくは小さい（31人が4から17remを被ばくした）。原子炉心は2年後に取り替えられた。



### 2.5.3 原子炉以外の商業用核燃料サイクル施設および軍事用原子力施設における事故

PSI 報告書 (Hirschberg et al., 1998) を基に、原子炉以外の商業用核燃料サイクル施設及び軍事用原子力施設で発生した事故の概要を以下に示す。

#### ・Tomsk-7 (ロシア、シベリア) 1993年4月6日、軍用化学再処理工場

ウラニウム溶液の有機相が濃硝酸と反応して (恐らく分離器の中で) 分解し、爆発が起きた。建物は、蒸気とガスの混合物の爆発により破壊された。放射能は環境中に放出され、敷地外の約 100 km<sup>2</sup> の面積を、幅最大 6 km、長さ 25 km にわたり汚染した。汚染された区域の放射線量率は 10 μR/h を超えた。この区域に沈着した放射能は、合計 20 から 22 TBq (530~590 Ci) で、その内訳は 1%が Ru-103、31%が Ru-106、22%が Zr-95、45%が Nb-95、0.02%が Pu-239 である。ホット・パーティクルが地面に沈着している。放射能放出時の放射性雲の通過により、一般公衆は Pu-239 の吸入により平均して一人当たり 15 μSv (1.5 mrem) 未満の被ばくを受けた。事故の直後、Georgevka 村が 60 kBq/m<sup>2</sup> (1.6 Ci/km<sup>2</sup>) のレベルの汚染を受けた。この村落における平均生涯被ばく線量への同事故からの寄与は、天然放射線からのものに比べればごくわずかと計算されている。飲料水の汚染は許容限度を超えている可能性がある。

#### ・Lake Karachay (ソビエト連邦、南ウラル地方、Mayak サイト) 1967年、軍事施設

Techa 河に放出された高レベル放射性廃棄物は 1951 年 9 月以来、湖に流れ込んでいた。1953 年には中間的な廃棄物貯蔵施設が建設され、高レベルの放射性廃棄物の放出は止まったが、中レベルの放射性廃棄物の放出はその後も続いた。合計の放射能放出量は、Cs-137 が 3.6 EBq、Sr-90 が 0.74 EBq とされている。1967 年夏に、大干ばつが発生し、約 22 TBq (約 600 Ci) の放射能が風に吹き飛ばされ、面積 1,800 km<sup>2</sup> から 2,700 km<sup>2</sup> の地域に拡散し、距離にして 75 km 先までを 3.7 kBq/m<sup>2</sup> 以上 (0.1 Ci/m<sup>2</sup> 以上) の放射能で汚染し、その区域内の 41,000 人の住民に影響を与えた。この区域は、その南東部分にある別の事故 (下の Kyshtym 事故) の影響も受けている。

この湖は依然放射能汚染している。1990 年の調査では、水の汚染濃度は Cs-137 が 4.4×10<sup>8</sup> Bq/l、Sr-90 が 6.3×10<sup>7</sup> Bq/l と報告されている。また、沈積物の放射能は Cs-137 が 5.2×10<sup>10</sup> Bq/kg、Sr-90 が 1.1×10<sup>10</sup> Bq/kg であった。同じ年に、ひと一人が湖の岸辺に立った場合の被ばく線量は 18 から 20 rem/hr であった。湖から最大 2.5km から 3km 離れた地点での推定 4×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> の地下水の放射能汚染は、セシウムとストロンチウムの合計で、5,000 Ci とされている。1985 年以降、1995 年までの期間に、湖は放射能の飛散・拡散を防止する為に、埋め立てられた。

#### ・Chelyabinsk 40 (現在の Chelyabinsk 65、ソビエト連邦、南ウラル地方、Mayak サイト) 別名

「Kyshtym 事故」、1957年9月29日、軍事施設 (Medvedev, 1979; Trabalka et al., 1979; Pharabod et al., 1988; UNSCEAR, 1993; Bradley, 1996; Bennet, 1995; Cochran, 1993; Aarkrog, 1995; Buldakov, 1996; Chukanov, 1995; Alexakhin, 1996; Karavaeva, 1994)

ソビエト連邦の崩壊までの 30 年間、この事故の原因と影響については、機密事項として、ソビエト政府の厳重な管理下に置かれた。初期の推定はロシアの生物化学者 Medvedev と 米国オークリッジ国立研究所が発表したものである。これらの調査によると、恐らく軍用再処理施設または放射性廃棄物貯蔵施設で、臨界事故または大きな化学反応による爆発が発生したはずであるとの報告がされている。高いレベルの放射能汚染により、おおよそ 1,000 km<sup>2</sup> の区域への一般公衆の立ち入りが禁止された。ORNL の報告では、約 100 km<sup>2</sup> の地域がおおよそ 1,000 Ci/km<sup>2</sup> の Sr-90 (参照核種) で汚染され、1 Ci/km<sup>2</sup> 以上の汚染区域は、1,000 km<sup>2</sup> を超える可能性がある」と結論されている。また、ストロンチウムの放出量合計は、10<sup>5</sup>~10<sup>6</sup> Ci 程度と推定されている。

1990 年代になり、ソビエト連邦で機密とされていた情報が公開され、核分裂生成物 (70 から 80 トンの廃棄物 (UNSCEAR, 1993) を含む硝酸ナトリウム (最高 100g/l) とナトリウムアセテート (最高 80g/l) の溶液を貯蔵した 300 m<sup>3</sup> タンクが、化学反応を起し爆発したことが報告書により明らか

かになった。このタンクには、合計 20 MCi (UNSCEAR によれば、おおよそ 1 EBq) の放射能が含まれていた。爆発は水冷却システムの故障から、ナトリウム塩の自己加熱を招き発生した。ナトリウム塩は乾燥すると爆発物となる。環境に放出された放射能は 74 PBq (2 MCi) で、残りはタンク周辺に残った。放出された放射能のほとんどは縦 300 km、横 50 km の「東ウラル放射能跡」と呼ばれる区域内に沈着した。その内 23,000 km<sup>2</sup> は Sr-90 が 3.7 kBq / m<sup>2</sup> 以上のレベル (0.1 Ci / km<sup>2</sup> 以上) の放射能汚染を受けている。この横長の放射能汚染区域は、一定の風向と降雨の無い状況が作り上げたものである。環境に放出された放射性同位元素で重要なものは、Ce-144 (49 PBq)、Zr-95 と Nb-95 (19 PBq)、Sr-90 (4.0 PBq)、及び Ru-106 (2.7 PBq) である。Cs-137 は 27 TBq に過ぎない。同位体の性質から、事故発生から 3 年後には、Sr-90 とその娘核種の Y-90 が優位となり、その割合をは 99.3% と報告している。

避難者数は合計で約 10,800 人と報告されている。Sr-90 の汚染レベルが 150 KBq / m<sup>2</sup> 以上の区域からのほとんどの住民の避難は、事故発生から 8 ヶ月後に開始され、さらにその 10 ヶ月後に終了している。事故後 10 日以内に避難した 1154 人の一人当たりの平均実効線量は 520 mSv、外部からの被ばくは 170 mSv、胃腸管内の被ばくは 1,500 mSv、集団線量は約 600 人・Sv となった。

最も影響を大きく受けた Rybnikovo と Scherbakovo の 2 サイトにおける 1993 年までの集積内部被ばく線量は、骨に対し 112 から 196 mSv、骨髄に対し 51 から 88 mSv、実効線量当量は 4~7 mSv となっている。大腸下部の平均線量は 15~110 mSv で、胃腸管に対する実効線量当量は 4~7 mSv である。最も汚染した地域における外部被ばく線量は、3~17 mSv の範囲である。1955 年~1957 年までに生まれた小児を含む、最も問題となる集団に対する全ての放射線源からの合計実効線量当量は、48~52 mSv と推定される。疫学調査の結果、放射能汚染地域の住民の即発性障害及び晩発性障害・疾病は、周辺地域全体の平均的な値よりも、また他の過疎地の疾病発生数よりも、有意に大きいことが分かった。

30 年間に渡る集団被ばく線量は 2,500 人・Sv と推定されている。この値は、高汚染区域から避難した住民 (集団被ばく線量は 1,300 人・Sv) と低汚染区域に残った住民 (約 26 万人) を均等に含めて計算した値である。リスク係数「0.05 致死がん / Sv」を適用すると、125 人の致死性がんの発生が計算される。

事故発生直後に、致命的な急性放射線障害が、農場の家畜に見られた。畑を耕す要領で、土地を深くすくようにしながら、6,200 ヘクタールの土地が除染された。1958 年の時点では 106,000 ヘクタールが、農業利用から除外されたが、1961 年にはすでに 47,000 ヘクタールが、再び農作地として使用されている。しかし 1990 年の段階で、Chelyabinsk 地区の約 19,000 ヘクタールは、依然いかなる経済活動にも使用されていない。

放射能汚染が 180 Ci / km<sup>2</sup> (6,660 kBq / m<sup>2</sup>) を超える 20 km<sup>2</sup> の区域で、最初の 1 年間に 3,000 から 4,000 rad を針葉の全てに受けた松の木が 1959 年の秋までに死んでしまっている。また、Sverdlovsk 地域の森林地帯が、Sr-90 により 1.5 から 63.4 kBq / m<sup>2</sup>、Cs-137 により 13 kBq / m<sup>2</sup> 未満の汚染を受けた。1992 年から 1994 年までの期間に、Sverdlovsk 地区の南東部の 1,600 km<sup>2</sup> の区域で実施された調査の結果、放射能がひろがって行った軸に沿った Tygish 湖の北東部の広大な地域の Sr-90 の平均放射能汚染は、37 から 111 kBq / m<sup>2</sup>、またスポットでは 185 kBq / m<sup>2</sup> を超えると、Chukanov らは報告している。

この事故は IAEA の事故評価尺度によれば、レベル 6 と区分されている。これは敷地外放出の観点から下された判断である。

・ Aue, Wismuth-pit 250 (旧東ドイツ、Erzgebirge/Sachsen) 1955 年 7 月 15 日

地下ケーブル火災が原因で、33 人の死亡者を出した事故。ドイツ経済省の情報によれば、この事故が、1955 年から 1990 年までの旧東ドイツにおけるウラニウム鉱山での、死亡者 5 人以上を出した唯一の過酷事故である。当時、同鉱山はソビエトと東ドイツの合弁会社により管理・運営されていた。産出したウラニウムは、主にソビエト連邦の軍事目的に使われていた。

## 2.5.4 原子炉以外の原子炉関連施設におけるその他の事故

以下に、PSI 報告書 (Hirschberg et al., 1998) に記載された原子炉以外の商業用核燃料サイクル施設及び軍用原子炉施設で発生したその他の事故の概要を示す。

### ・ La Hague (フランス) 1986年5月20日、再処理施設

パイプラインの保守・点検中、突如高い放射能濃度の溶液が噴出した。2名が 11 rem 及び 25 rem (後者は皮膚にも 200 rem) を被ばくした。

### ・ Windscale (英国) 1973年9月26日

この事故は、二酸化ウラン燃料エレメントの処理 (燃料被覆を剥ぎ取り、硝酸に燃料を溶解し、溶解出来ない部分を分離する) が行われる B204 建屋において、ここで作られた溶液が Windscale-2 (Magnox 燃料が処理される場所) に、ウラニウムとプルトニウムの分離の為に送られる前に起きた。この施設はすでに 1969 年から運転され、事故発生までの期間に 120 トンの燃料が再処理されていた。事故の原因は、溶解出来ない残滓、ジルコニウムの精製鉍、Butex 溶液 ( $\beta\beta$  dibutoxy-diethyl ether、現在は使用が禁止され、TBP (Tributylphosphate) にとって代わられている。) を収容するタンク内の外因性の一連の化学反応である。発生したガスは放射性の Ru-106 を含み、タンクのあった区画から拡散し始め、機器の機械的な操作の為の中継ルートを通して、隣の区画へ伝わり、建屋全体にひろがった。事故発生当時に建屋内にいた 35 人の従業員が、空気中の高レベル放射能を吸引した。0.01 から 40  $\mu\text{Ci}$  (370 から  $1.5 \times 10^6$  Bq) の放射能は、数レムから数百レムの生涯線量に相当する (当時年間 5 レムが従業員達の被ばく管理限度であった)。大気中への放射能放出は無かった。この施設の運転は 5 年間停止され、建屋は除染された。その後、火災があり、1978 年に完全に閉鎖された。同事故は、その敷地内への影響という点で、IAEA の事故評価尺度により、レベル 4 と判定されている。その他の大きなセラフィールド再処理施設での事故は次の通り：1979 年 10 月 16 日、B30 施設の火災では大気中に 1.04 GBq の Sr-90、0.44 GBq の Ru-106、2.2 MBq の I-131、13.8 GBq の Cs-134、92 GBq の Cs-137、24 MBq の Ce-144、1.4 MBq の Pu-239、1.34 MBq の Am-241 が放出された。1979 年 11 月 11 日には B242 施設から Pu-239 が 11 GBq、Am-241 が 2.5 GBq 放出された。また、1984 年 7 月 17 日には Pu-239 が 0.01 GBq、Am-142 が 0.36 GBq、B241 施設のスラッジタンクから放出された。

### ・ Rocky Flats (米国、コロラド) 1969年5月11日

火災により、プルトニウムが環境中に放出された。1957 年の火事と 1958 年及び 1968 年のプルトニウムに汚染された油の漏洩事故に伴い、敷地内のプルトニウム汚染レベルは  $74 \text{ kBq/m}^2$  に達した。数人のがん発生が計算で予測されている。

### ・ Wood River Junction Plant (米国) 1964年7月24日

濃縮ウランの溶液を不適切な形をしたタンクに入れる際に、臨界事故が発生し、操作員 3 名が被ばくした。この内 1 名は、15,000 rem を被ばくし、死亡している。

### ・ Hanford (米国ワシントン州) 1962年4月7日

プルトニウムの溶液を不適切な形状のタンクに入れる際、臨界事故が発生し、操作員 3 名がそれぞれ、16、33、87 rem を被ばくした。

### ・ National Reactor Testing Station (米国、アイダホ州) 1959年10月16日

濃縮ウランの溶液を移し替える際に、臨界事故が発生し、操作員 2 名がそれぞれ、32、50 rem を被ばくした。

### ・ Los Alamos (米国、ニューメキシコ州) 1958年12月30日

プルトニウムと水溶液を含んだ有機溶剤の分離器内の臨界事故。事故は、攪拌機が固相、液相と一緒に攪拌しはじめた時点で発生した。操作員 1 名が 6,000 rem を被ばくし、死亡し、他の 2 名が 50 及び 180 rem をそれぞれ被ばくした。

・Oak Ridge (米国、テネシー州) 1958 年 6 月 16 日

保守・点検作業中に、濃縮ウランを含む溶液を不適切な形状のタンクに移す際の、不注意な取り扱いにより発生した臨界事故。5 人が 250 から 350 rem を被ばくし、3 人が 20 から 70 rem を被ばくした。

・Rockey Flats (米国、コロラド州) 1957 年 9 月、核兵器工場  
火災により、プルトニウムが環境に放出された。

・Los Alamos (米国、ニューメキシコ州) 1946 年 5 月 21 日  
臨界事故。死亡 1 名。

・Los Alamos (米国、ニューメキシコ州) 1945 年 8 月 21 日  
臨界事故。死亡 1 名。

### 3. 原子力エネルギー産業と他のエネルギー産業における事故の類似点

前章までに、原子力並びに、石炭、原油、ガス、及び水力の各発電システムにおいて過去に発生した過酷事故に関する情報を整理した。本節では、チェルノブイリ事故などの原子力の過酷事故と、特性の似た他産業における事故を比較する。

#### 3.1 前章までの調査結果のまとめ

本節では、前章までの調査結果をまとめ、原子力事故と類似した特徴を持つ他エネルギー産業の事故を特定するためのパラメータを考察する。まず、前章までの調査の結果は、以下の様に整理出来る。

- ・ 1969年から1996年までに、5人以上の死亡者が発生した各種エネルギー産業での過酷事故の発生件数は、石炭：187件、原油：334件、天然ガス：86件、LPG：77件、水力：9件、及び原子力1件である。
- ・ 1969年から1996年までに、事故による死亡者数（事故直後の死亡者数）の多い事故上位10件は、原油：5件、水力：3件、LPG：2件で、それぞれ3,000人から500人程度の死亡者を出している（表3.1）。
- ・ 1969年から1996年までに、負傷者の多い事故上位10件は、LPG：4件、原油：5件、水力：1件となっている（表3.2）。
- ・ 1969年から1996年までに、避難者数の多い事故上位10件は、LPG：2件、水力：2件、原子力：2件、原油：3件、天然ガス：1件となっている（表3.3）。
- ・ 1969年から1996年までに、損害額の大きな事故上位10件は、原子力：2件、原油：5件、水力：2件、天然ガス：1件となっている（表3.4）。
- ・ 死亡者数、負傷者数の点では、原子力の事故は過去の各種産業事故と比べて、極めて大きな事故ではない。しかし、チェルノブイリ事故における事故直後の死亡者数、負傷者数（表3.3）以外に、晩発性の放射線障害推定発生件数（表2.29）を含めると、原油事故による死亡者数3,000人、LPG事故における負傷者数7,000人と比べて大きな数字になる。
- ・ 避難者数においては、TMI-2やチェルノブイリ事故よりも、LPGや水力の事故が上回る。
- ・ 損害額においては、チェルノブイリ事故が他のエネルギー産業の事故と比べて、はるかに大きな事故である。
- ・ 海洋における原油漏出事故では、漏洩量ではなく、気象条件および沿岸や生態系との離隔が、事故による環境影響に大きく作用する。これは、原子力の事故とも通じる点である。
- ・ 原油流出事故の損害賠償の例では、裁判所が認めない環境・生態系への影響がある。従って、公式発表の損害額に含まれていない損害があると考えられる。

表 3.1 1969 年から 1996 年までの事故直後の死亡者数の多かった事故 (Hirschberg et al., 1998, Table 9.1.1)

エネルギー	発生国 (発生日時)	ステージ	死亡者数	負傷者数	避難者数	損害額 百万ドル (1996 年価値)
原油	フィリピン (1987.12.20)	Transport to Refinery	<b>3,000</b>	26	0	—
原油	アフガニスタン (1982.11.1)	Regional Distribution	<b>2,700</b>	400	0	-
水力	インド (1979.8.11)	Power Plant	<b>2,500</b>	—	150,000	1,024
水力	中国 (1993.8.27)	Power Plant	<b>1,250</b>	336	—	27
水力	インド (1980.9.18)	Power Plant	<b>1,000</b>	—	—	—
LPG	ロシア (1989.6.4)	Long Distance Transport	<b>600</b>	755	0	—
原油	エジプト (1994.11.2)	Regional Distribution	<b>580</b>	—	0	140
原油	ブラジル (1984.2.25)	Regional Distribution	<b>508</b>	150	2,500	—
原油	韓国 (1995.6.29)	Regional Distribution	<b>500</b>	952	0	—
LPG	メキシコ (1984.11.19)	Regional Distribution	<b>498</b>	7231	200,000	2.9

表 3.2 1969 年から 1996 年までの負傷者数の多かった事故 (Hirschberg et al., 1998, Table 9.1.2)

エネルギー	発生国 (発生日時)	ステージ	死亡者数	負傷者数	避難者数	損害額 百万ドル (1996 年価値)
LPG	メキシコ (1984.11.19)	Regional Distribution	498	<b>7,231</b>	200,000	2.9
原油	ナイジェリア (1980.1.17)	Extraction	180	<b>3,000</b>	0	-
原油	メキシコ (1992.4.22)	Regional Distribution	200	<b>1,400</b>	5,000	318
原油	ロシア (1988.10.4)	Regional Distribution	5	<b>1,020</b>	0	-
原油	ベネズエラ (1982.12.19)	Power Plant	160	<b>1,000</b>	40,000	61.5
LPG	米国 (1969.1.25)	Regional Distribution	2	<b>976</b>	100	12.9
原油	韓国 (1995.6.29)	Regional Distribution	500	<b>952</b>	0	-
水力	米国 (1976.6.5)	Power Plant	14	<b>800</b>	35,000	2,219
LPG	メキシコ (1972.7.1)	Regional Distribution	8	<b>800</b>	300	3.6
LPG	ロシア (1989.6.4)	Long Distance Transport	600	<b>755</b>	0	-

表 3.3 1969 年から 1996 年までの避難者数の多い事故 (Hirschberg et al., 1998, Table 9.1.3)

エネルギー	発生国 (発生日時)	ステージ	死亡者数	負傷者数	避難者数	損害額 百万ドル (1996 年価値)
LPG	カナダ (1979.11.11)	Regional Distribution	0	0	<b>220,000</b>	20.5
LPG	メキシコ (1984.11.19)	Regional Distribution	498	7,231	<b>200,000</b>	2.9
水力	インド (1979.8.11)	Power Plant	2,500	-	<b>150,000</b>	1,024
原子力	米国 (1979.3.28)	Power Plant	0	0	<b>144,000</b>	5,427.2
原子力	ウクライナ (1986.4.26)	Power Plant	31	370	<b>135,000</b>	339,200
原油	メキシコ (1988.5.25)	Regional Distribution	0	70	<b>100,000</b>	-
原油	ベネズエラ (1982.12.19)	Power Plant	160	1,000	<b>40,000</b>	61.5
天然ガス	メキシコ (1982.1.20)	Long Distance Transport	33	500	<b>40,000</b>	85
水力	米国 (1976.6.5)	Power Plant	14	800	<b>35,000</b>	2,219
原油	ニカラグア (1983.10.10)	Regional Distribution	0	17	<b>25,000</b>	37.4

表 3.4 1969 年から 1996 年までの損害額の大きな事故 (Hirschberg et al. 1998, Table 9.1.4)

エネルギー	発生国 (発生日時)	ステージ	死亡者数	負傷者数	避難者数	損害額 百万ドル (1996 年価値)
原子力	ウクライナ (1986.4.26)	Power Production	31	370	135,000	<b>339,200</b>
原子力	米国 (1979.3.28)	Power Production	0	0	144,000	<b>5,427.2<sup>a</sup></b>
原油	米国 (1989.3.24)	Transport to Refinery	0	0	0	<b>2,260</b>
水力	米国 (1976.6.5)	Power Production	14	800	35,000	<b>2,219</b>
原油	米国 (1969.1.28)	Extraction	0	0	0	<b>1,947</b>
原油	英国 (1988.7.7)	Extraction	167	0	0	<b>1,800</b>
水力	インド (1979.8.11)	Power Production	2,500	-	150,000	<b>1,024</b>
原油	ナイジェリア (1987.5.30)	Refinery	5	-	0	<b>916.2</b>
原油	バハマ (1990.12.20)	N.A.	0	0	0	<b>742</b>
天然ガス	ノルウェー (1985.10.6)	Exploration	0	0	0	<b>622</b>

<sup>a</sup>TMI-2 事故における避難と清掃を含む直接的なコストは当時 40 億ドルである。

N.A.:Not Available

### 3.2 エネルギー産業の事故の特徴を示すパラメータ

本節では、まず公衆に対して特定の影響を及ぼしうる原子力事故の発生確率（または頻度）を推定した結果（米国大統領委員会、PSI）についてまとめる。次に、それらの結果とチェルノブイリ事故による影響を踏まえて、原子力事故と他のエネルギー産業事故に関する死傷者数、避難者数、損害額を比較する。

#### 3.2.1 過酷事故の発生確率等の推定

##### i) 米国大統領委員会による過酷事故の発生確率等の推定 (Presidential Commission, 1990)

米国における大統領委員会は、チェルノブイリ級の過酷な原子力事故が米国で起きる可能性にも言及している (Rasmussen, 1990)。同委員会報告書では、炉心溶融、原子炉压力容器破壊を経て、格納容器破壊と放射性物質の大気中への放出に至るシーケンスが発生する可能性が小さく、また仮にこれが起きたとしても、格納容器中に放射性物質の多くが沈着し、チェルノブイリ事故のように即時に放射性物質が大気中へ放出される可能性が極めて低いとの意見が述べられている。また、原子炉压力容器が破壊されてから、わずか数分後に格納容器が破壊するならば、放射性物質が格納容器中に沈着する時間が少ないので、大気中に放出される割合が増え、事態はチェルノブイリ事故のようになるが、この点については、PSA の結果に答えを托し、この事態が起きる確率が低い点を示唆した。

また、同委員会報告書では、NRC が作成した発電用原子炉からのリスクに関する 2 つの報告書 (NRC, 1975; NRC, 1990) を基に、原子炉事故に起因する各種の健康影響リスクを定量的に評価した結果が掲載されている。この報告書の中で、過酷な事故への対応とは「大きな影響を伴う一方で、発生頻度の低い事故」を取扱うものであるとの見解を示した (Rasmussen, 1990)。また、そうした極端に大きな事故は、幾つもの要素が偶然に重なる場合にのみ生ずる点を説明している。以下に報告書の抜粋を示す。

例えば、まず炉心が溶融し、次に地上の格納容器が崩壊し、風向が比較的高い人口密度の地域に向かって吹き、大気逆転層が存在し、更に公衆の防護対策が失敗するといった条件が重なった場合にのみ、本件委員会が問題とする事故が発生する。しかし、このような事故が発生する確率は、1 原子炉当たり、10 億年に 1 回の割合である。この低い確率は、表 3.5 に示されるような、5 つの要素の発生確率により導かれる。

表 3.5 原子炉事故が発生する 5 つの要素とその頻度 (Rasmussen, 1990)

炉心溶融確率	一プラント当たり 1 万年に 1 回
格納容器の崩壊確率	100 回に 1 回
風向が人口密集地に向く確率	10 回に 1 回
大気逆転層が発生する確率	10 回に 1 回
避難が失敗する確率	10 回に 1 回
これらの 5 つの要素の積は、10 億年に 1 回となる。	

アメリカ合衆国では、約 100 基の原子炉が運転されている為、全米を通じて極端に大きな事故が発生する確率は約 1,000 万年に 1 回 (10 億年に 1 回を 100 倍した値) となる。もちろん、この値は、この 1,000 万年の間にプラントの安全性が全く向上しないことを仮定して算出された値である。一方、プラント 1 基当たりの寿命を 30 年とすれば、全米のプラント 100 基合計の寿命は 3,000 年・基である。これに極端に大きな事故が発生する確率 (10 億年に 1 回) を乗ざると、全米を通じて現在運転中の



プラント寿命中に極端に大きな事故が1回発生する確率（約33万年に1回）が求まる。図3.1および図3.2の曲線は、原子力発電所事故に起因する即発性および晩発性死亡の発生確率を示している。表3.6には、3種類の晩発性影響の推定発生数と、それぞれの発生確率を示す。自然に発生するこれらの影響の発生数は、同表の一番下の行に示される。

NUREG-1150（NRC, 1990）における晩発性の影響は、WASH1400（NRC, 1975）の約3分の1である。これは、NUREG-1150では低いソース・タームが採用されていることが主な原因である。

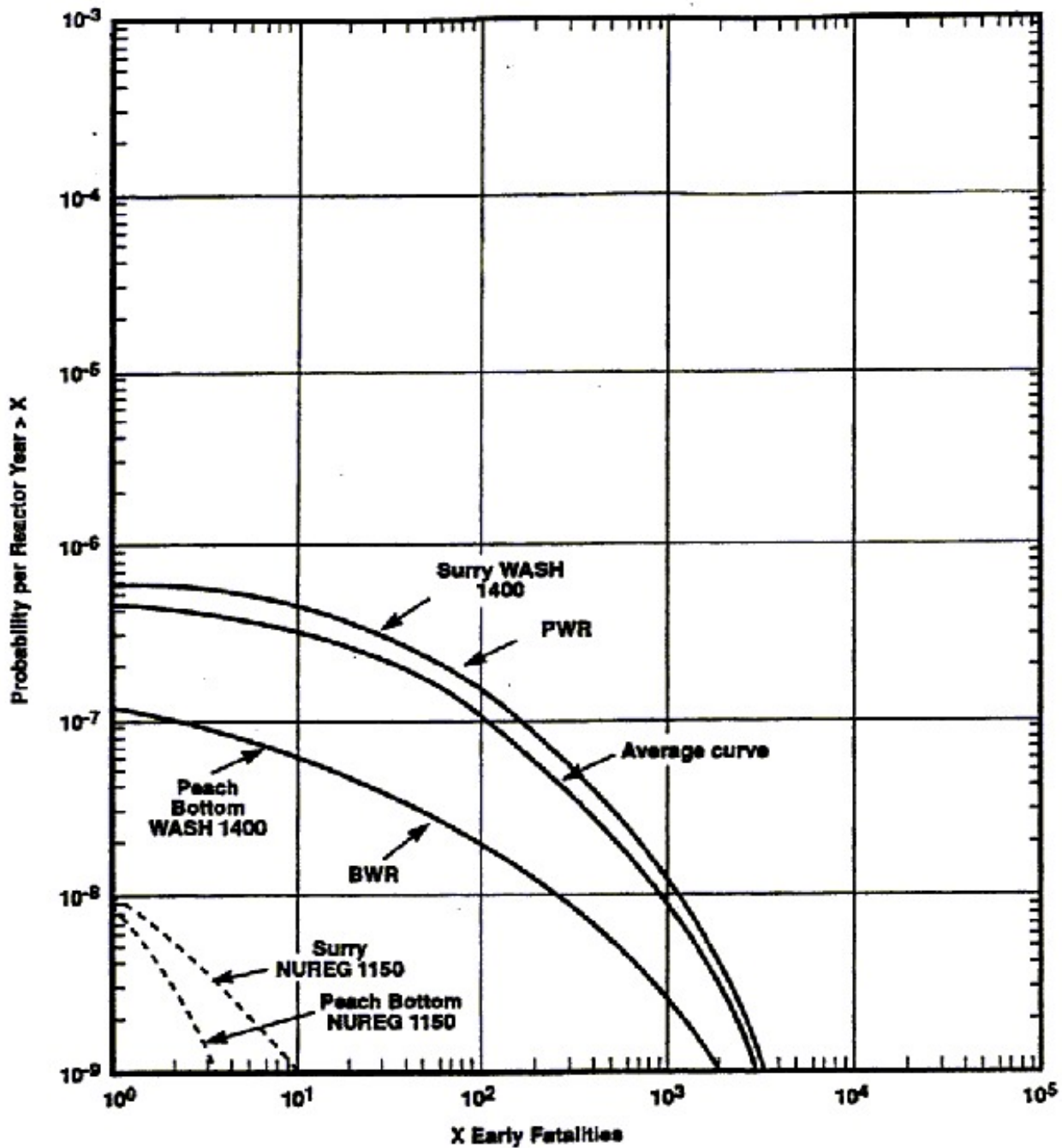
表 3.6 100基の原子炉における事故発生確率と影響（NRC, 1975）

事故の 年間発生確率	影響発現数		
	晩発性のがん <sup>(b)</sup> (年間)	甲状腺がん <sup>(b)</sup> (年間)	遺伝的影響 <sup>(c)</sup> (年間)
200分の1 <sup>(a)</sup>	< 1.0	< 1.0	< 1.0
1万分の1	170	1,400	25
10万分の1	460	3,500	60
100万分の1	860	6,000	110
1000万分の1	1,500	8,000	170
自然発生数	17,000	8,000	8,000

<sup>(a)</sup> 100基の原子炉の年間の炉心溶融確率推定値。

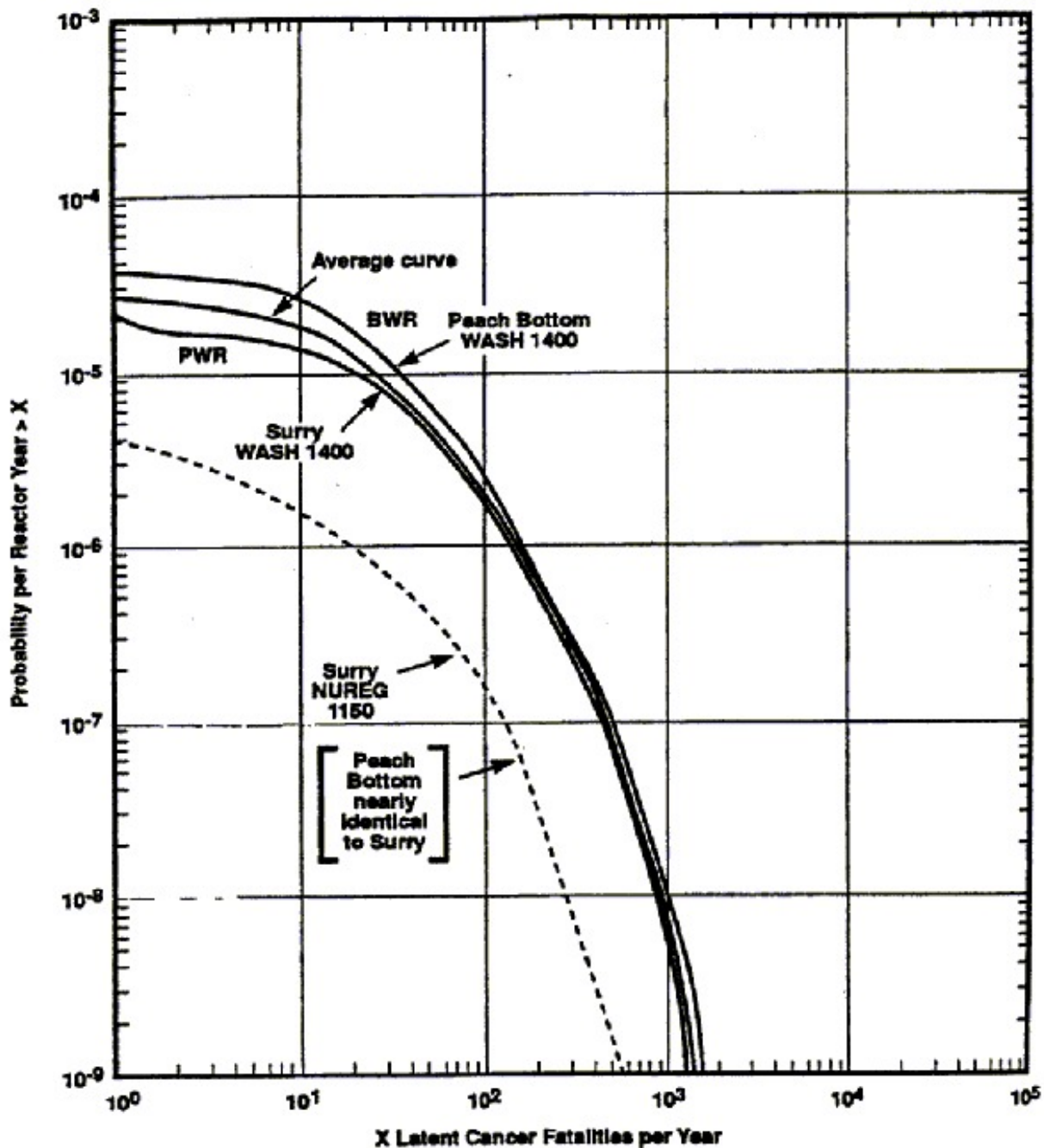
<sup>(b)</sup> 事故一回発生後、おおよそ10年間から40年間に発生するであろう割合。

<sup>(c)</sup> 事故発生後の、第一世代に関する割合。その後の世代については、更にこの割合は下がると思われる。



影響の大きさのおおよその不確かさは1/4から4倍程度、また確率の値の不確かさは、おおよそ1/5から5倍程度

図 3.1 即発性の死亡に関する相補的累積密度関数 (Rasmussen, 1990)



影響の大きさのおおよその不確かさは1/6から3倍程度、また確率の値の不確かさは、おおよそ1/5から5倍程度

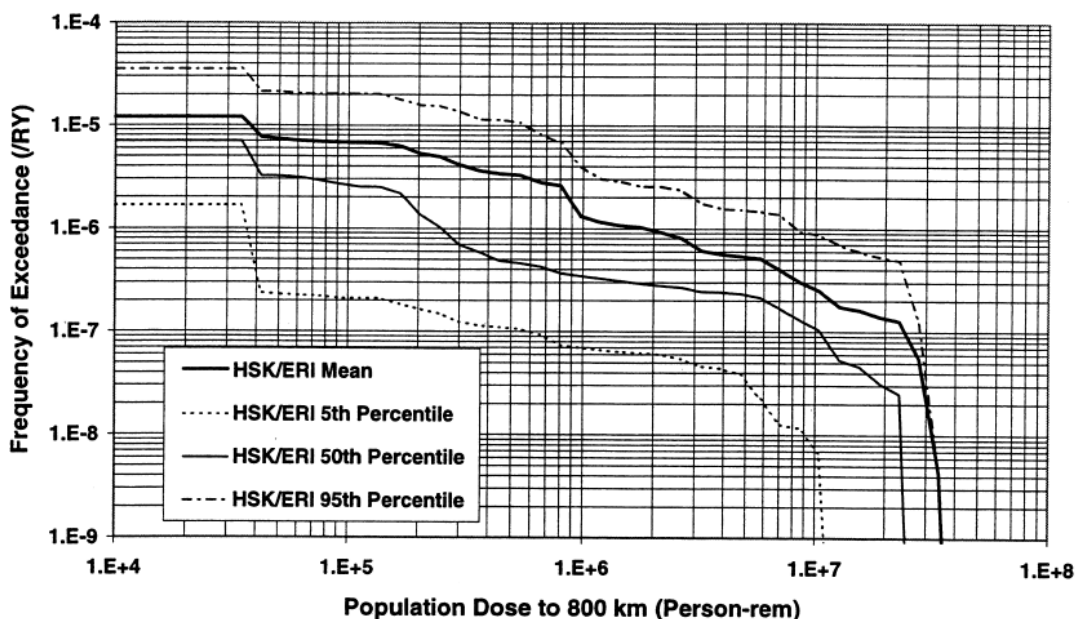
図 3.2 晩発性の影響による年間死亡率の相補的累積密度関数 (Rasmussen, 1990)

ii) PSI による原子力発電所の事故による影響の推定

Hirschberg ら (Hirschberg, 1994) は、NUREG-1150 (NRC, 1990) と類似の方法により、スイスの Mühleberg 原子力発電所の事故による敷地外影響を計算し、報告している。図 3.3 から図 3.7 に放出点から 800 km 以内の住民について、集団被ばく線量、晩発性がんおよび立ち入り制限区域の範囲と、それらをもたらさうる規模の事故が発生する超過発生頻度を示す。表 3.7 には、これらの計算結果の平均値を示す。同表には、スイスの Mühleberg 原子力発電所に関するこれらの計算結果に対応する NUREG-1150 に示された米国のプラントに関する評価結果を共に示す。晩発性がんによる死亡者数については、現在利用可能な MACCS コードに実装されている線量-効果係数が、これら 3 つのプラントの評価に用いられている。これは、同表に示される結果が過少評価であり、これを補正する為には、約 3 倍の係数を乗すべきことを意味する。

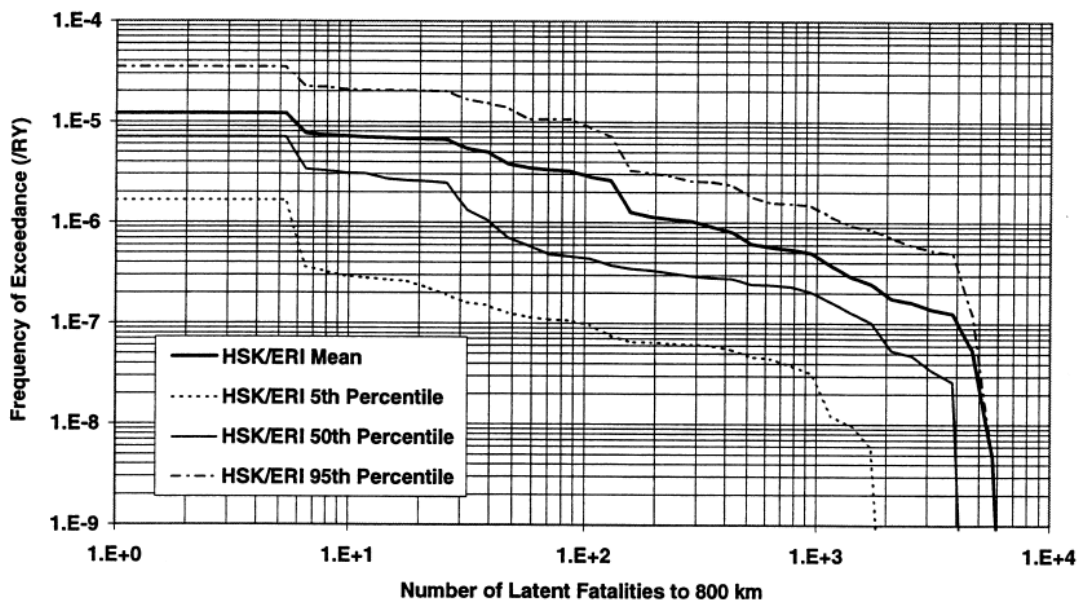
計算に用いられるパラメータの不確かさ伝播はモンテカルロ法 (LHS 法) により計算された。最初にプラント損傷状態(PDS) の頻度から始め、続いてこれらの PDS 毎の事故の進展、更に事故進展の最終状態のそれぞれについてのソース・ターム、そして最後にソース・タームの代表的な一つのセットを用いたときの影響という順である。解析の最後のステップで、リスク尺度を求めている。全てのソース・ターム条件毎の影響は、MACCS コード (Chanin et al., 1987) を用いて計算された。天候と周辺人口分布データについては、Mühleberg 発電所固有のものが用いられた。緊急時対策については、現在のスイスにおける敷地外の予防活動戦略がモデル化された。

なお、Mühleberg 原子力発電所に関する計算結果には、外部事象からの寄与が含まれている。内部事象の合計値への貢献度はおおよそ 50 %程度である。この推定に伴う不確かさについて言えば、Mühleberg 原子力発電所の場合、800 km 以内の晩発性がんによる死亡者数の 5 %値と 95 %値は、1GWe・年当たりそれぞれ  $1.7 \times 10^{-4}$  および  $7.2 \times 10^{-2}$  である。ここでは、ICRP (ICRP, 1990) によって示された線量-効果係数が用いられた。



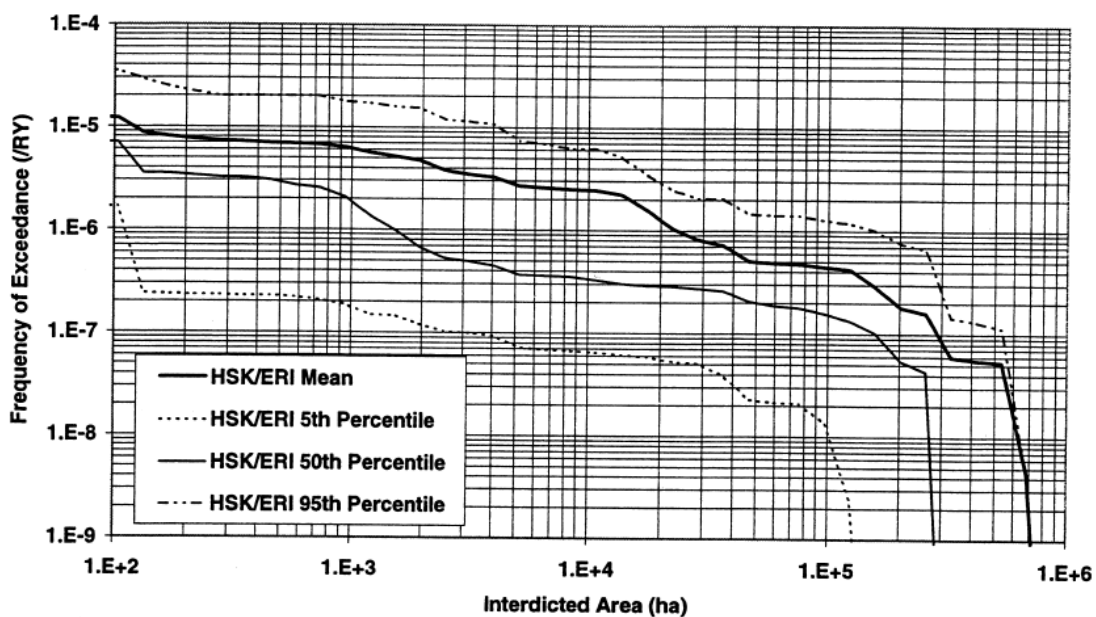
縦軸:事故の発生頻度 (1/炉・年) 横軸:800km 以内の集団被ばく線量(man-rem)

図 3.3 スイス Mühleberg 原子力発電所から 800 km 以内の住民が受ける集団線量と、そのような被ばくを引き起こさうる事故の超過発生頻度 (Hirschberg et al., 1998, Fig. 6.5.6)



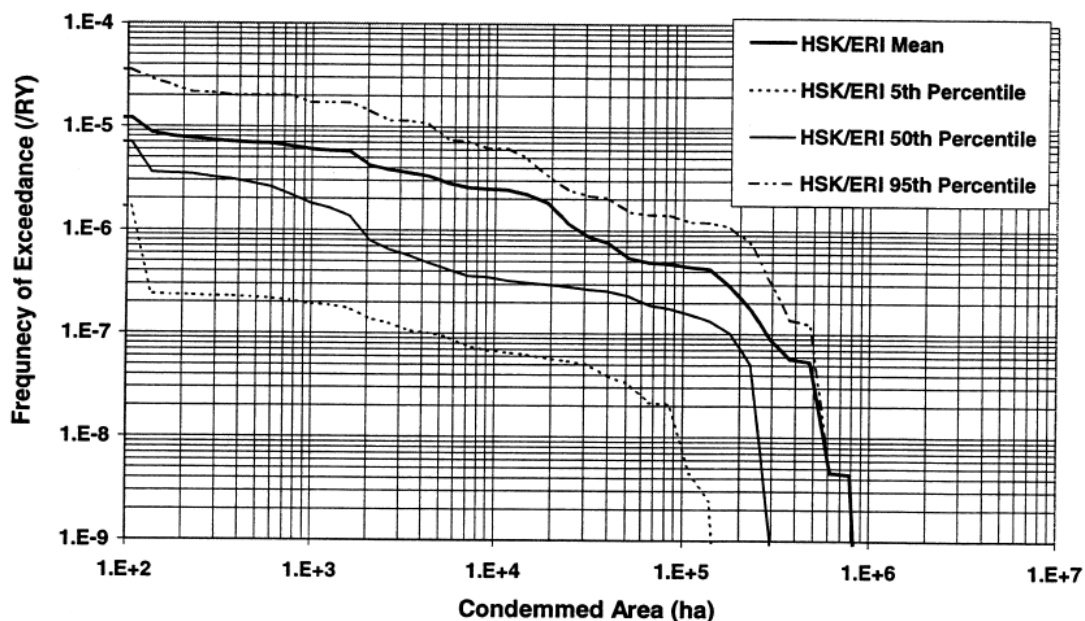
縦軸：事故の発生頻度（1/炉・年）横軸：800km 以内の晩発性がんによる死亡者数

図 3.4 スイス Mühleberg 原子力発電所から 800 km 以内の晩発性がんによる死亡者数と、そのようながんを発生させる事故の超過発生頻度 (Hirschberg et al., 1998, Fig. 6.5.7)



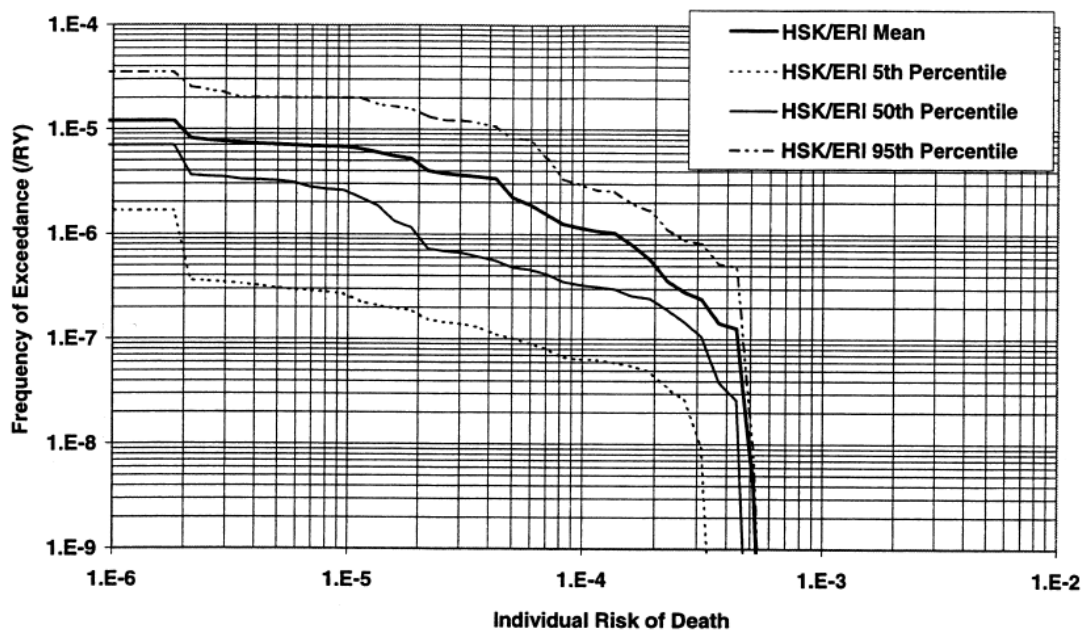
縦軸：事故の発生頻度（1/炉・年）横軸：暫定的立ち入り制限区域の大きさ

図 3.5 スイス Mühleberg 原子力発電所から暫定的立ち入り制限区域の大きさと、そのような制限区域をもたらす事故の超過発生頻度 (Hirschberg et al., 1998, Fig. 6.5.8)



縦軸：事故の発生頻度 (1/炉・年)、横軸：廃棄区域の大きさ (ha)

図 3.6 スイス Mühleberg 原子力発電所事故に伴い発生する恒久的廃棄区域の大きさとそのような廃棄区域をもたらす事故の超過発生頻度 (Hirschberg et al., 1998, Fig. 6.5.9)



縦軸：事故の発生頻度 (1/炉・年)、横軸：20km 以内の個人の晩発性がんによる死亡者数

図 3.7 スイス Mühleberg 原子力発電所から 20 km 以内の晩発性がんによる死亡者数のそのようながんを引き起こす事故の超過発生頻度 (Hirschberg et al., 1998, Fig. 6.5.10)

表 3.7 プラント毎の PSA 評価結果の平均推定値 (Hirschberg et al., 1998, Table 6.5.2)

平均リスク尺度	Mühleberg	Peach Bottom <sup>(1)</sup>	Zion <sup>(1)</sup>
急性死亡の GWe・年当りの発生頻度 (GWe 年 <sup>-1</sup> )	$<10^{-12}$	$3.5 \times 10^{-8}$	$1.0 \times 10^{-5}$
潜伏期にあるがん (800 km 圏内) (GWe 年 <sup>-1</sup> )	$6.7 \times 10^{-3}$	$6.2 \times 10^{-3(2)}$	$2.4 \times 10^{-2(2)}$
800 km 以内の集団線量 (man・rem)	40.4	40.2 <sup>(2)</sup>	161.8 <sup>(2)</sup>
個人のがん死亡リスク <sup>(4)</sup> (GWe 年 <sup>-1</sup> )	$1.6 \times 10^{-9}$	$6.7 \times 10^{-10}$	$9.4 \times 10^{-9}$
恒久的に廃棄される地域面積 (km <sup>2</sup> )	$5.9 \times 10^{-3}$	$1.5 \times 10^{-2(3)}$	$1.2 \times 10^{-1(3)}$
過酷放出の GWe・年当りの発生頻度 (GWe 年 <sup>-1</sup> )	$<1 \times 10^{-9}$	$1.3 \times 10^{-9}$	$7.5 \times 10^{-7}$

<sup>(1)</sup>内部事象のみ <sup>(2)</sup>1600 km 以内 <sup>(3)</sup>NUREG-1150 には示されていない (外挿により計算) <sup>(4)</sup>ICRP の線量-効果関係を用いた (ICRP, 1990)

### 3.2.2 死亡者数による比較

IAEA によって紹介されている産業リスクのレベル区分の考え方 (IAEA, 1996) に従い、事故発生頻度と影響に関する F-N 曲線を用い、原子力とその他エネルギー産業事故の比較を行なう。

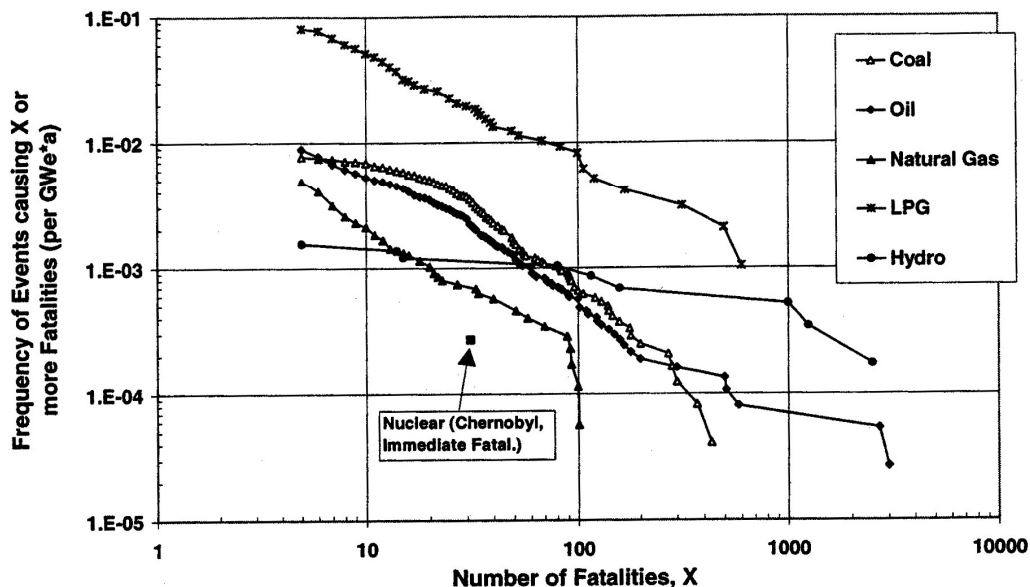


図 3.8 1969 年から 1996 年までの死亡者数 5 人以上 (事故後短期間における死亡者数) となる過酷事故の F-N 曲線 (GWe・年当り) (Hirschberg et al., 1998, Fig. 7.2.11)

図 3.8 に原子力による GWe・年当りの事故発生頻度 ( $=2.7 \times 10^{-4}$ ) と、他のエネルギー産業における事故発生頻度と死亡者数の F-N 曲線を示す。急性の死亡が発生した事故の頻度と規模はエネルギー

一産業間において上記のような関係が観察されるが、死亡者数に関する同図を参照する場合、以下の点に注意する必要がある。まず、水力発電に関する F-N 曲線は全世界を対象に導出されたものであるため、同図を参照する場合、ダム崩壊事故には地域特性が見出されている点を考慮する必要がある（図 2.16 参照）。また、第 2 点として、本 F-N 曲線は急性死亡者数に基づき導出されているため、事故後の長期にわたる影響を考慮していない。特に、チェルノブイリ事故による晩発性影響に関しては、現在（1998 年当時）までの研究で約 9,000 人～33,000 人の晩発性死亡者が見込まれているため、こうした推定値をどのように扱うか今後検討する必要がある。図 3.9 に全世界における 1969 年～1996 年の間に発生した水力の事故と、チェルノブイリの世界規模の晩発性放射線障害による死亡者数推定値の幅を同一の F-N 曲線に示す。また同期間中、OECD 諸国では米国 Teton における過酷事故しか発生しておらず、OECD 諸国と OECD 諸国以外の各国においてダム崩壊事故発生頻度が異なる傾向にあることを示している。また、チェルノブイリ事故における晩発性放射線障害による死亡推定値は、同図に示したようダム事故の発生頻度と同レベルの発生頻度であり、その死亡者数の一桁上に位置している。

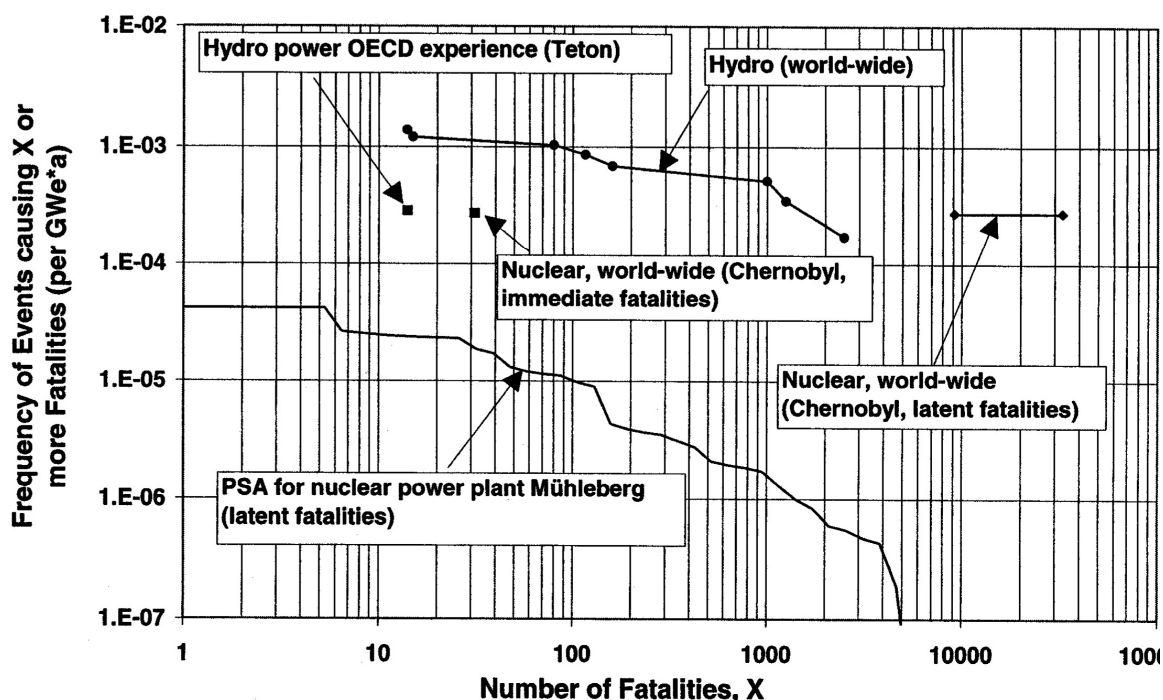


図 3.9 1969 年から 1996 年までに発生した X 人以上の死亡者を出した水力発電（事故直後に死亡した人数）の発生頻度と、Mühleberg 原子力発電所を対象に実施された PSA により推定された晩発性死亡者数の平均値と事故発生頻度（GWe・年当り）に関する F-N 曲線（Hirschberg et al., 1998, Fig. 9.1.11）

図 3.8 および図 3.9 では単位発電量（GWe・年当り）を事故発生頻度を示す単位として使用している。この表現方法は、IAEA による比較リスク手法でも用いられており、比較リスク評価における近年の主流である（IAEA, 1999）。ただし、単位発電量当りの発生頻度を計算するための総発電量は 1969 年から 1996 年までの全世界における各発電手続の発電量である<sup>9</sup>。

<sup>9</sup> 電気料金収入を事故の損害賠償制度の枠組の中でとらえるような場合には、このように事故発生頻度を単位発電量で示すことは大いに意味を持つものと思われる例えば、原子力事故損害賠償措置の資金プールを、他のエネルギー



### 3.2.3 負傷者数による比較

図 3.10 に負傷者数と事故発生頻度の F-N 曲線を示す。図 3.10 を見る限り、チェルノブイリ事故に最も近い負傷者に関する F-N 曲線は、原油、天然ガス及び水力の事故である。負傷者数が最も大きかった事故は LPG エネルギー産業において発生しており、全ての負傷者数領域において LPG における事故発生頻度が最も高くなっている。

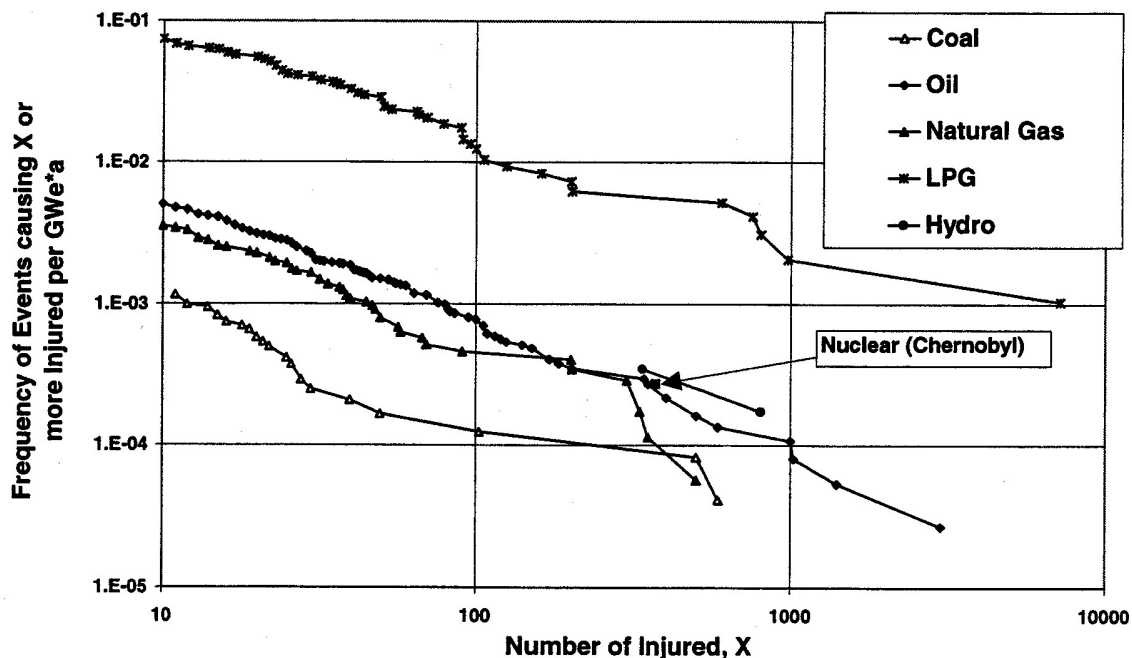


図 3.10 1969 年から 1996 年までに各エネルギー産業において負傷者数 X 人以上を出した過酷事故（負傷者数 10 人以上）の F-N 曲線（GWe・年当り）（Hirschberg et al., 1998, Fig. 7.3.6）

### 3.2.4 避難者数による比較

図 3.11 に 1969 年～1986 年と 1969 年～1996 年の期間で避難者数 200 人以上を出した過酷事故の件数をエネルギー産業ごとに示す。避難者数の観点から過酷と定義された事故は原油エネルギー産業において最も多く発生しており、一方、石炭産業においては避難を実施するような事故は発生していない。原子力発電所における事故では 1979 年 3 月に発生した TMI 事故と 1986 年 4 月のチェルノブイリ事故が記録されている。前者の事故では、事故後、避難地域へと住民が復帰しているが、後者の事故では復帰していないという相違点がある。

過酷事故により避難した住民等の総数を図 3.12 に示す。避難者数は LPG の過酷事故<sup>10</sup>が最も多く、次いで原子力と原油産業が多くの避難者を出している。また事故 1 件当りの避難者数では、対象となる過酷事故が 2 件しか発生していない原子力の事故による値が最も大きくなるが、事故 1 件当りの避難者数の観点から最も大きな事故は LPG において発生しており、図 3.13 にも示すように単位発電力量当りの避難者数は LPG が最も高くなる。ただし、表 3.3 及び図 3.12 にて計上されているチェルノブイリ事故による避難者数は、事故後の短期間において避難を実施した人数であって、事

<sup>10</sup> 表 3.3 に示したように単独の事故を見ても、LPG における事故が最多数の避難者をだしている。1979 年 11 月 11 日にカナダの Mississauga で発生した LPG の地域配送中の事故では、約 22 万人が避難した。次いで多くの避難者を出したのは、1984 年 11 月 19 日にメキシコの San Juan Ixhuatetpec で発生した LPG の地域配送中の事故で、20 万人が避難した。

位発電力当りの避難者数は LPG が最も高くなる。ただし、表 3.3 及び図 3.12 にて計上されているチェルノブイリ事故による避難者数は、事故後の短期間において避難を実施した人数であって、事故後の数ヶ月あるいは数年後に実施された移転の人数は計上されていない点に注意しなければならない。

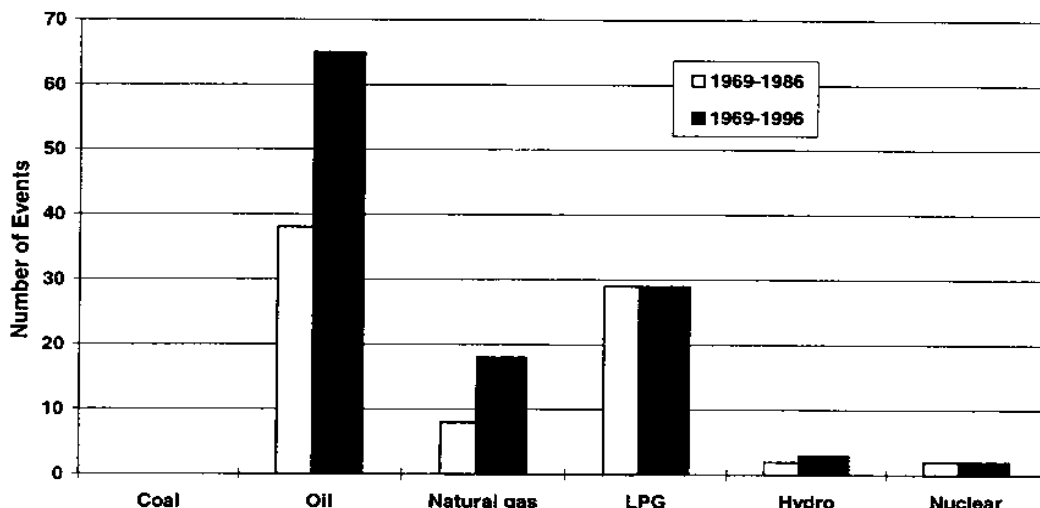


図 3.11 1969 年から 1986 年及び 1969 年から 1996 年の期間で 200 人以上の避難者数を出した過酷事故件数の比較 (Hirschber, et al., 1998, Table 7.4.1)

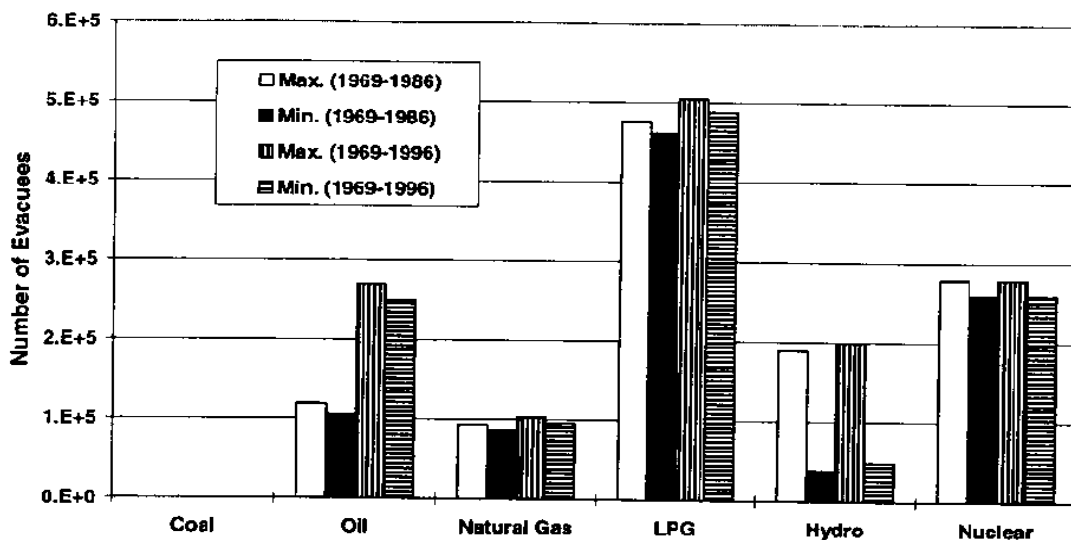


図 3.12 1969 年から 1986 年及び 1969 年から 1996 年の期間で 200 人以上の避難者数を出した過酷事故における避難者数の総計件数の比較 (Hirschber, et al., 1998, Table 7.4.2)

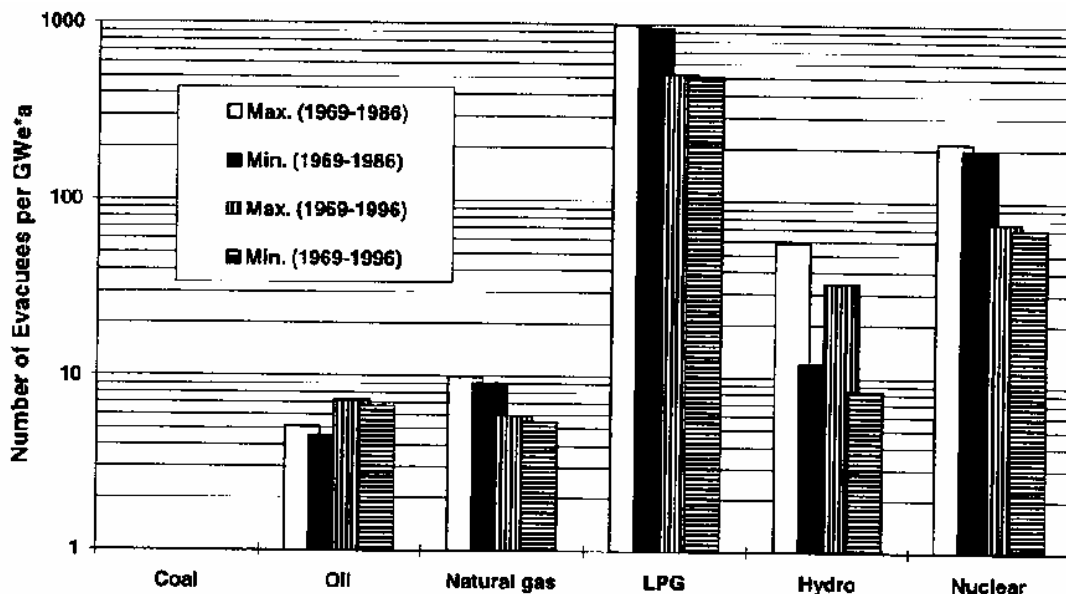


図 3.13 1969 年から 1986 年及び 1969 年から 1996 年の期間で 200 人以上の避難者数を出した過酷事故における避難者数 (GWe・年当り) の比較 (Hirschber, et al., 1998, Table 7.4.4)

### 3.2.5 損害額による比較

図 3.14 に 1969 年～1986 年及び 1969 年～1996 年の期間に発生した過酷事故 (5 百万ドル以上の被害を出した事故) の事故発生件数をエネルギー産業別に示す。両期間において発生した事故数は原油エネルギー産業に関する事故が著しく多く、この傾向はいずれの期間においても変わらない。図 3.15 にこれらの過酷事故による損害額の総額をエネルギー産業別に示す。原子力事故による損害額の総額は、他のエネルギー産業と比べ 1 桁～2 桁程度大きくなる。また、表 3.4 にも示した通り単独の事故による損害額の比較でもチェルノブイリ事故と TMI-2 の原子力発電事故が、原油、水力および天然ガスの事故における最大損害額を 1 桁～2 桁上回り、これらを凌駕している。単位発電力量当りの損害額もこの傾向は変わらず、原子力発電所における事故の損害額が他を上回っている (図 3.16)。

表 3.8 に、表 3.4 に示された原子力、水力および原油の各事故の損害額に関するおおまかな内訳を示す。原子力の事故の次ぎに損害額が大きいものは、原油漏出事故である。特に、タンカー Exxon Valdez 号の事故では、海に流出した原油の量は決して多いとは言えない (表 2.18) が、海岸線に近い地点で事故が起きたこと、風と波が油膜を海岸に押し上げたことから、生態系への被害は甚大なものとなった。

チェルノブイリ事故は、他のエネルギー関連産業の事故とは、大分様相が異なる。例えば、避難者数は LPG の事故が、原子力の事故のそれを上回る記録を持つが、事故の影響は一過性で、チェルノブイリ事故のような長期にわたる避難民の住宅、インフラストラクチャーの手当て、医療措置、環境や食物の放射能モニタリングの必要は生じないため、チェルノブイリ事故に比べて損害額は小さい。原油漏出事故は、土地や自然が利用出来なくなるか、破壊されるというような、長期的な影響を与える点では、チェルノブイリ事故と似た性格を持つが、海岸線や生態系への影響という点で、集落の過酷な避難・移住を伴うチェルノブイリ事故とはやや異なる。生態系への影響の評価については、十分説明のできない点がある。チェルノブイリ事故の場合でも、発電所付近の赤松林が枯れた現象などは、放射線の影響との因果関係が判明しておらず、この点は類似している。しかし、チェルノブイリ事故の場合、実際に居住者の避難・移住が行われ、これに伴うインフラストラク

チャーの整備や医療措置などが、事故後 15 年が経過した後も継続して行われていることが、損害額を大きくしている原因であると言える。

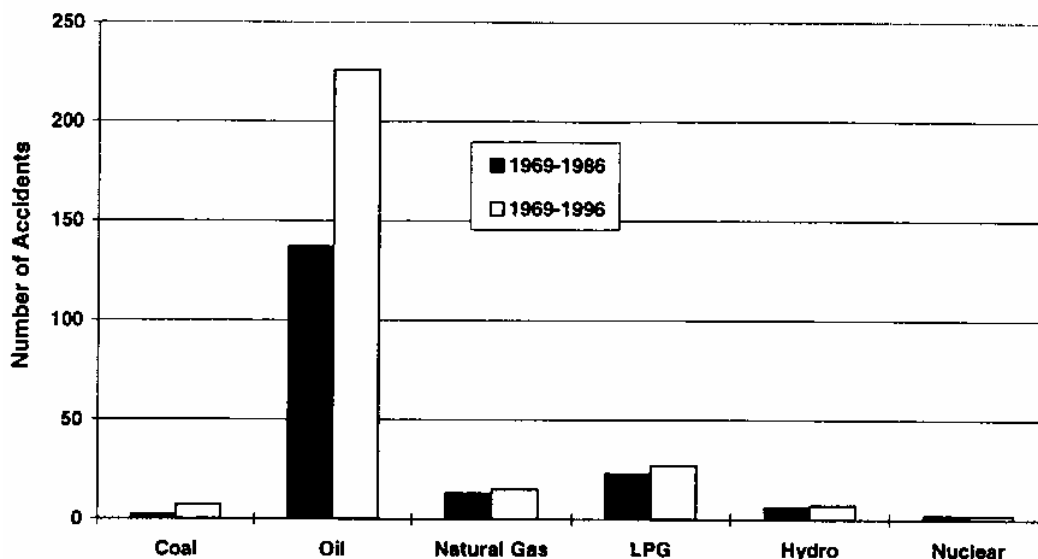


図 3.14 1969 年から 1986 年及び 1969 年から 1996 年の期間に発生した 5 百万ドル以上 (US\$1996 年換算値) の被害を出した過酷事故の発生件数 (Hirschberg, et al., 1998, Table 7.5.1)

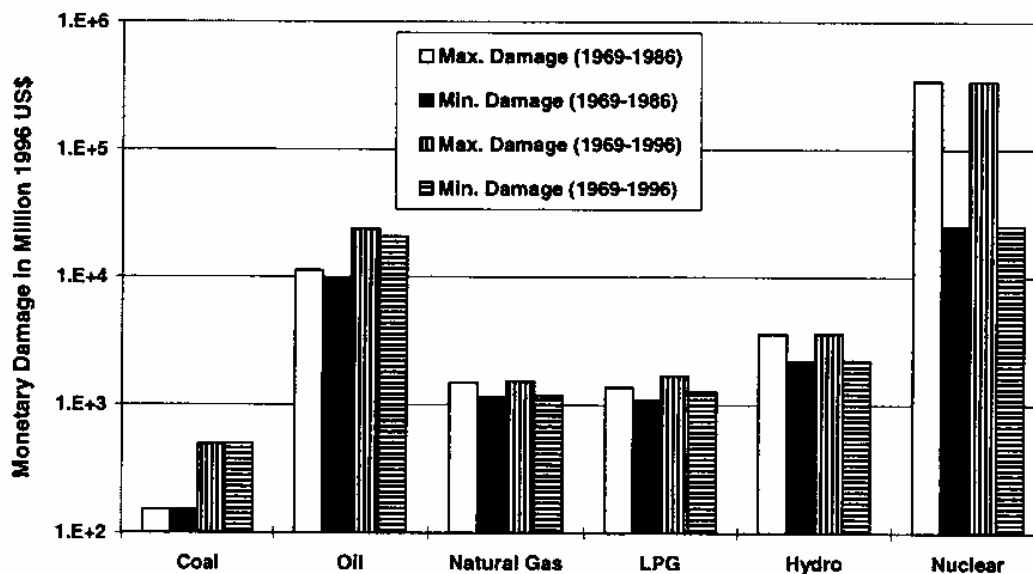


図 3.15 5 百万ドル (US\$1996 年換算値) 以上の損害を出した過酷事故における合計損害額のエネルギー産業間における比較 (Hirschberg, et al., 1998, Table 7.5.2)

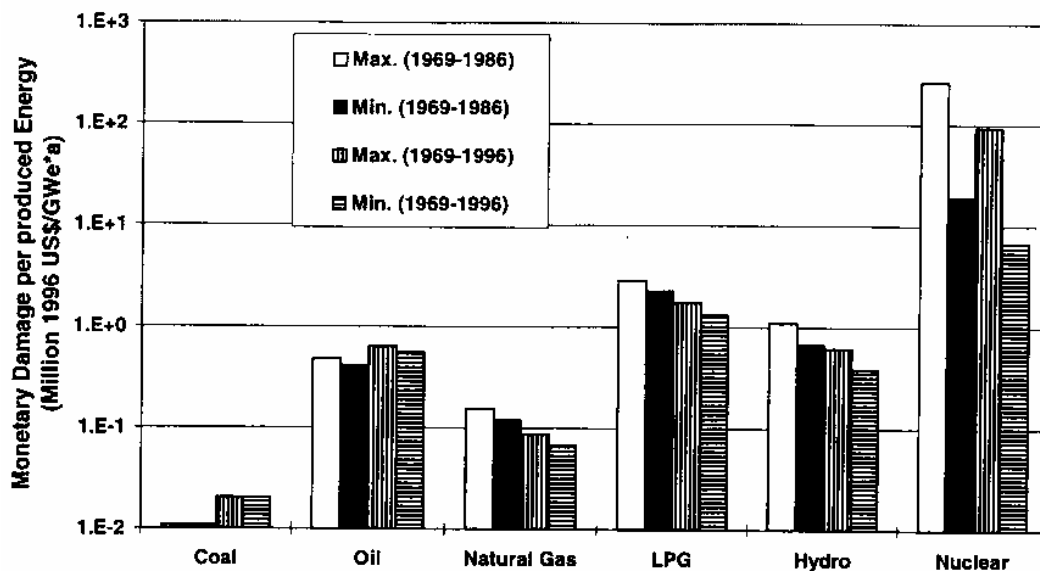


図 3.16 5 百万ドル (US\$1996 年換算値) 以上の損害を出した過酷事故における損害額 (GWe・年当り) のエネルギー産業間における比較 (Hirschberg, et al., 1998, Table 7.5.3)

表 3.8 損害額の大きなエネルギー関連産業の事故 (Hirschberg et al., 1998 を基に著者作成)

エネルギー	発生国 (発生日時)	ステージ	費用内訳	損害額 100 万\$ (1996 年価値)
原子力 <sup>a</sup>	ウクライナ (1986.4.26)	発電所	<ul style="list-style-type: none"> <li>・プラントの停止に伴う代替電源確保のための化石燃料の購入</li> <li>・安全性改善工事等の原子力発電全般への波及効果</li> <li>・放射性廃棄物管理</li> <li>・清掃作業 (clean up)</li> <li>・生活環境の改善</li> <li>・移住と定着</li> <li>・賠償、社会保障</li> <li>・健康診断等</li> <li>・生態系での放射線測定</li> <li>・土地建物の損害</li> <li>・農業の損害</li> <li>・事故影響の回避措置</li> <li>・新しい家の建設</li> <li>・インフラストラクチャー整備</li> <li>・移住者の移動費用と日当</li> <li>・土壌の除染</li> <li>・森林資源・水資源の保護措置</li> </ul>	339,200 (Nucleonics, (1994))
原子力 <sup>b</sup>	米国 (1979.3.28)	発電所	<ul style="list-style-type: none"> <li>・プラントの汚染除去・清掃作業 (敷地内の機器破損、清掃)</li> <li>・代替電源 (暫くの期間に限る)</li> <li>・避難</li> </ul>	5,427.2
原油漏出	米国 (1989.3.24)	タンカー輸送	<ul style="list-style-type: none"> <li>・国有林(1 箇所)、自然動物保護区(4 区)、国立公園(3 箇所)、州立公園(5 箇所)、絶滅に瀕する動物の州立保護区(4 区)、及び州立狩猟許可区(1 区)の汚染</li> </ul>	2,260
原油	米国 (1969.1.28)	原油探査	<ul style="list-style-type: none"> <li>・メキシコの海岸の清掃・除染費用</li> <li>・同油田を改修するための費用</li> </ul>	1,947
水力 <sup>c</sup>	—	ダム	<ul style="list-style-type: none"> <li>・崩壊したダムの再建築費用</li> <li>・建物などの所有物への損害</li> </ul>	10-2,000

<sup>a</sup> チェルノブイリ事故の損害額 3,392 億ドル (1996 年価値) は、(Nucleonics, 1994) に基づく数値であるが、同資料には内訳が記載されない。そこで、費用内訳の欄は、事故の対策に関する記述のある他の資料の情報を借用した (Sørensen, 1994; EC/IAEA/WHO, 1996; Voznyak, 1996a; Savchenko, 1995; Rolevich, 1996)。そのため、金額はこれらの記述と連携しない参考値である。

<sup>b</sup> TMI-2 事故の損害額は、避難、敷地内の機器破損、清掃、代替電源 (暫定期間) の費用 40 億ドルに基づく値である。この他、1260 億ドルが、プラント建設やそのための資金調達遅れ、代替電力調達のための化石燃料購入費用、及びその他の投資 (運転、保守管理、及び安全管理の向上のため) などの米国内の原子力発電への波及効果 (特に PWR に対する) としてかかったとしている (Komanoff, 1986)。

<sup>c</sup> 商業、農業、及び産業区域が水浸しになることによる、個人の収入の一時的な中断は、考慮しない。また、文化遺産の損傷や、環境の被害の損害額は含まない。

### 3.2.6 事故発生地点からの一般公衆までの離隔に必要な距離

長期間に渡る住民の避難・移住と、それにとまなう行政措置は、チェルノブイリ事故における、一つの大きな特徴である。チェルノブイリ事故では、事故を起こした発電所を中心に、最も放射能汚染された地域は、30 km にわたって立ち入り禁止区域と呼ばれ、一般公衆が立ち入れない区域 (4,300 km<sup>2</sup>) とされた。立ち入り禁止区域の外側には数 100km におよぶ厳重管理区域が設定されている。この区域の定義は、555 kBq/m<sup>2</sup> を超える放射能濃度がある区域で、住民の数は 270,000 人と言われる。立ち入り禁止区域および厳重管理区域の他にも、汚染区域が指定されており、同区域内にはロシア、ベラルーシおよびウクライナの 3 カ国合計で 680 万人が居住している。

チェルノブイリの隔離地域と比較する意味で、ここで住民の避難や移住の基準とすべき必要な事故発生地点からの住民の離隔距離について、他の産業の事故のケースを考察する。まず、表 3.9 に化学産業における過去の事故の影響距離の例を示す。

表 3.9 に例示した各危険物質が事故時 (火災、爆発、漏洩) に影響を及ぼす可能性のある距離を、IAEA 方式 (IAEA, 1996) で用いて求めた結果について表 3.10 に示す<sup>11</sup>。表 3.7 を見ると、硝酸アンモニウムの爆発時に影響を及ぼす可能な距離は最大 200m 程度で、1921 年のドイツの Oppau の硝酸アンモニウムと硫酸アンモニウムの混合物 4,500 t の爆発事故の情報におおよそ相当する。また、同表では、50t のシクロヘキサンの影響距離は 25m 以内であるが、これは 1974 年の英国の Fixborough でのシクロヘキサン 50t の爆発事故の影響に近い。1984 年のメキシコシティでの精製所からの LPG 輸送パイプラインの漏洩による爆発事故は、表 3.10 の最大影響距離約 500m に符合している。

有毒物質については、1939 年 12 月、ルーマニア (Zarnesti) において、貯蔵タンクの破断が原因となり発生した塩素漏洩 (24 t) の影響として、250 m 離れた鉄道の駅で数人が死亡し、また 800 m の距離の場所で一人が死亡した。この影響は、表 3.7 の推定影響距離 200 m から 500 m に該当する。さらに、1973 年、南アフリカ (Potchetstroom) において、アンモニアの漏洩事故 (約 38 t) の影響として、事故発生地点から 150m から 200m の距離で 5 人が被害を受けており、表 3.7 の推定影響距離 200-500 m に合致する。一方、最大の化学工場の事故である 1984 年 12 月のインドの Bhopal における 41 t のイソシアン酸メチルの漏洩事故については、表 3.10 はその最大影響距離が他の有毒物質や可燃物よりも、広い範囲であることを示唆している。

表 3.10 の可燃物、爆発物、並びに有毒物質を比較すると、影響可能な範囲が大きく、毒物が長期的に残る可能性があるという点から、有毒物質が原子力発電関連した放射能漏洩事故に、比較的類似した性質であると言える。

### 3.2.7 事故による放射性物質の分布

放射性物質が漏洩した場合、事故に起因する放射性物質は、広範囲に分布し、気象条件等の影響を受け点在する。このため放射性物質の分布やその範囲は、LPG、天然ガスおよび天然ガスよりも、化学物質の漏洩事故と類似性がある。しかし、放射線を被ばくにより誘起される健康影響に関しては、低線量および低線量率の被ばく状況に関して、線量および線量率と健康影響の関係が明らかになっていないため、どの程度の距離をもって影響の有無の境界とするかについては難しい議論がある。

<sup>11</sup> 具体的な方法については本報告書の付録参照

表 3.9 化学産業における事故の影響距離に関する情報（(IAEA, 1998) を基に著者が再整理）

発生年	場所	危険物質 (危険物質量)	事故の種類	事故の影響距離
1921 年	ドイツ Oppau	硝酸アンモニウムと 硫酸アンモニウムの 混合物 (4500t)	Dense phase explosion	爆発による 561 人の死亡者の内 4 人は、7 km 離れた Mannheim の町の中で出ている。1500 人が負傷し、Oppau 近くの町の 75% の建物は破壊された。破壊された建物の数は 1000 戸にのぼる。250m から 300m にある全ての建物は破壊され、直径約 100m、深さ 10m のクレーターが出来た。建物の破壊は 45km の距離の遠隔地からも報告されている。
1974 年	英国 Fixborough	シクロヘキサン (50t)	蒸気雲爆発	プラントと敷地内にあった建物が破壊され、従業員 28 人が死亡した。ほとんどは中央制御室で爆発に巻き込まれた。付近の家屋は大きな破壊を受け、また 15km に及び窓ガラスが割れるなどの被害が出た。
1984 年	メキシコ メキシコシティ	精製所 LPG 輸送 パイプラインの漏洩	膨張蒸気爆発 (BLEVE)	少なくとも死亡者 500 人と負傷者 7000 人、6 万人が避難した。48 個あった貯蔵槽の内、土台上に残ったのは 4 個である。約 20t の貯蔵槽一つが 1200m 離れた場所で発見されている。また、敷地内には 6 個の球形貯蔵槽があったが、その内の最も小さな 4 個は爆発し、その大きな破片は少なくとも 400m 離れた位置に飛んでいる。大きい方の 2 個は球形貯蔵槽は、爆発しなかったが、脚部の締め具が抜け倒壊した。半径 300m にある家屋は大きな被害を受けている。
1939 年 12 月	ルーマニア Zarnesti	塩素 (24t)	有毒物質	貯蔵タンクの破断により発生した塩素 (24t) が漏洩。60 人が死亡した。死亡者の多くは貯蔵タンク近くにいた人々であるが、数人は 250m 離れた鉄道の駅で死亡し、また 800m 離れた場所で 1 人死亡している。
1973 年	南アフリカ Potchetstroom	アンモニア (約 38t)	有毒物質	アンモニアとの接触で 18 人が死亡した。この内 6 人は作業場外にいた人々である。5 人は、事故発生地点から 150m から 200m 離れた場所で被害を受けた。
1961 年	米国 ルイジアナ州 La Barre	塩素 (約 27~35t)	有毒物質	15 km <sup>2</sup> の地域に生息する動物に害を及ぼしたとされている。
1971 年	米国 アーカンサス州 Floral	アンモニア (約 600t)	有毒物質	アンモニア (約 600t) がパイプラインから漏出した。水路に流れ込み、数千匹の魚を殺した。
1984 年 12 月	インド Bhopal	イソシアン酸メチル (41t)	有毒物質	2500 人の死亡者と推定 20 万人の障害者。
1976 年	イタリア Seveso	ダイオキシン (約 2 kg)	有毒物質	約 17 km <sup>2</sup> の地域に影響を与えた。約 4 km <sup>2</sup> の農作地を使用不能とし、この影響は、その後数年間続いた。



表 3.10 危険物の事故時の影響可能距離 (IAEA, 1996) を基に著者作成<sup>(1)</sup>

影響可能距離(m)	事故時の貯蔵または取り扱ひ量 (t)							
	5-10	10-50	5-200	200-1,000	1,000-5,000	5,000-10,000	>10,000	
0-25				シクロヘキサン (タンクピット貯蔵)				
25-50	LPG(精製・貯蔵) 硝酸アンモニウム (バルク)				シクロヘキサン (タンクピット貯蔵)	シクロヘキサン (タンクピット貯蔵)		
50-100	イソシアネート (タンクピット貯蔵) アンモニア	LPG(精製・貯蔵) 硝酸アンモニウム	硝酸アンモニウム				シクロヘキサン (タンクピット貯蔵)	
100-200	塩素(冷却液化)	アンモニア	LPG 精製・貯蔵	硝酸アンモニウム				
200-500	塩素(加圧液化)	イソシアネート (タンクピット貯蔵)塩素(冷却液化)、塩素(加圧液化)						
500-1,000			イソシアネート (タンクピット貯蔵)、 塩素(加圧液化)	塩素(冷却液化)、 アンモニア	塩素(冷却液化)、 アンモニア			
1,000-3,000	冶金、電気産業の表面加工剤 Arsine(超毒性)			イソシアネート (タンクピット貯蔵)、 塩素(加圧液化)	イソシアネート (タンクピット貯蔵)、 塩素(加圧液化)	塩素(冷却液化)、 アンモニア		
3,000-10,000		冶金、電気産業の表面加工剤 Arsine(超毒性)	冶金、電気産業の表面加工剤 Arsine(超毒性)			イソシアネート (タンクピット貯蔵)	イソシアネート (タンクピット貯蔵) 塩素(冷却液化)、 アンモニア	

<sup>(1)</sup> 作成手順については付録参照

### 3.3 チェルノブイリ事故と他のエネルギー産業における事故の類似点

表 3.11 に、チェルノブイリ事故と他のエネルギー産業の事故の影響を示すパラメータ毎の特徴を比較し、チェルノブイリ事故と他のエネルギー産業の事故の類似点を示す。

#### 事故の範囲

可燃物の火災・爆発事故は、毒物や放射能汚染の場合と比べて、立ち入り禁止区域や事故の影響を受ける範囲が比較出来ないほど小さい。火災・爆発事故が及ぼす影響範囲は、現実に存在し得る危険物の貯蔵、保管、輸送の形態と規模から推定して、半径 200 m から 500 m の同心円内もしくはそれに近い形状の範囲に限られる。一方、有毒物質の事故時の影響距離は 10 km にも及ぶ場合があり、汚染区域がある程度継続し、土地の回復のための清掃作業が必要である点など、チェルノブイリ事故との類似点がある。特に 1984 年 12 月にインドの Bohopal で発生した 41 t のイソシアン酸メチルの漏洩事故は、環境影響の面で、チェルノブイリ事故に性格が類似している。また、1976 年のイタリアの Seveso における約 2 kg のダイオキシンの漏洩事故は、約 17 km<sup>2</sup> の地域に影響を与えた。約 4 km<sup>2</sup> の農作地を使用できない状態とし、その効果はその後も数年間続いている。

#### 事故の影響期間

チェルノブイリ事故は、事故発生後の初期の時点では、死亡者数、負傷者数、避難者数などのパラメータは、水力、原油、天然ガス、LPG の事故と比較してもそれほど大きな値ではないため、事故への対応措置の観点からは、これらのいずれとも類似点があると言える。しかし、チェルノブイリ事故では、晩発性の放射線障害の推定値が数千人とも言われており、長期的な医療補償と医療活動が必要であり、また広範な地域に広がった放射能汚染の追跡調査や、ミルクや野菜などの食物のモニタリング、あるいは汚染地域からの移転が継続して行われている点で、多くの他のエネルギー関連産業の事故と比較して、特異な性格を持つ。この点で、他に類似する性格を持つ事故をさがすとすれば、事故で漏洩した物質が長期に土地に残り、除去に多くの費用がかかるものとして、原油の漏洩事故に類似性が見られる。また塩素、アンモニア等の化学物質の漏洩事故も、その影響範囲が広い点で、類似性が見られる。チェルノブイリ事故後の対応で観察されるような、長期にわたる避難者の住宅、インフラストラクチャーの整備、医療措置、環境や食物の放射能モニタリングの必要性は、他のエネルギー産業の事故では生じない。その規模が大きく、回収作業の期間が比較的長いものとしては、原油漏洩事故とダム崩壊事故が、チェルノブイリ事故の性格を持つと言えなくも無い。

#### 事故による損害額

図 3.8 および図 3.10 から推定しても、原油や天然ガスの事故の発生頻度はチェルノブイリ事故や TMI-2 事故の単位発電力量当たりの事故発生頻度よりも 1 桁から 2 桁高いと考えられる。このことは、たとえチェルノブイリ事故の損害額が 2 桁高くとも、数世代にも渡る長期間には、他のエネルギーにおける事故がより多く発生し、結果として発生頻度の小さいチェルノブイリ級の事故の損害額も、原油や天然ガスの事故の合計損害額と比べて、そう大きな額ではなくなる可能性があることを示唆している。すなわち、他エネルギーによる電力収入と原子力による電力収入が等しいと仮定し、また、原油や天然ガスにおける事故が経済的に許容される事故であると仮定するならば、チェルノブイリ級の原子力の事故も、その相対的な発生頻度が他のエネルギーにおけるそれよりも 2 桁小さい限り、もし長期的な資金プールさえ確保出来れば、経済的に決して許されない規模の事故ではないかもしれない。

表 3.11 他のエネルギー産業事故影響のチェルノブイリ事故との類似性

比較パラメータ	チェルノブイリ事故	原油流出	火災・爆発 (原油・天然ガス、LPG ガス事故含む)	毒物漏洩	ダムの崩壊
急性障害	急性放射線障害による死亡者数は31名。	チェルノブイリ事故との類似性なし。	死亡者数は、チェルノブイリ事故を凌ぐ。	チェルノブイリ事故の犠牲者数を超える事故もいくつかある。	チェルノブイリ事故の犠牲者数を超える事故もいくつかある。
晩発性障害	晩発性放射線障害の影響は数千名と推定されているが、バックグラウンドよりはるかに小さく、確認の方法は無い。	チェルノブイリ事故との類似性なし。	チェルノブイリ事故との類似性なし。	晩発性障害についての可能性もある。	チェルノブイリ事故との類似性なし。
地球規模の影響	敷居無しを仮定した低線量被ばくによる影響の計算値はあるが、本件調査では、賠償措置の対象とはみない。	生態系への影響があるかも知れないが、現在の科学では推定不可能。	チェルノブイリ事故との類似性なし。	不明。	チェルノブイリ事故との類似性なし。
避難者数	10 数万人が段階的に避難している。	チェルノブイリ事故との類似性なし。	LPG 事故では、チェルノブイリ事故を凌ぐ避難者を出している。	インド Bohopal の事故では、避難の時間がなく、2500 人の死亡者と推定 20 万人の障害者を出した。	チェルノブイリ事故級の避難者の例がある。
使用できなくなった土地面積	<ul style="list-style-type: none"> <li>「Exclusion Zone」4,300 km<sup>2</sup></li> <li>そのまた外側には 555kBq/m<sup>2</sup> を超える放射能濃度の数百 km の距離に及ぶ「Strict Control Zone」が設定されている。</li> <li>上記「Exclusion Zone」並びに「Strict Control Zone」の他にも「Contaminated area」が指定されている。ロシア、ベラルーシ、ウクライナの 3 カ国合計で 680 万人が居住している。</li> </ul>	タンカー Exxon Valdez 号の事故では、推定 1000 マイルの海岸線が原油により汚染された。	塩素、アンモニア、イソシアネート等の毒物は、10km の距離を汚染する可能性がある。	1961 年米国ルイジアナ州 La Barre で、推定 27t から 35t の塩素が漏出し、15 km <sup>2</sup> の地域に生息する動物に害を及ぼしたとされている。	洪水、水没等で、広範な地域が影響を受ける。
長期医療措置	必要	不要	不要	必要	不要

<p>損害賠償</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• プラント停止に伴う代替電源確保のための化石燃料の購入</li> <li>• 安全性改善工事等の原子力発電全般への波及効果</li> <li>• 放射性廃棄物管理</li> <li>• 清掃作業 (clean up)</li> <li>• 生活環境の改善</li> <li>• 移住と定着</li> <li>• 賠償、社会保障</li> <li>• 健康診断等</li> <li>• 生態系での放射線測定</li> <li>• 土地建物の損害</li> <li>• 農業の損害</li> <li>• 事故影響の回避措置</li> <li>• 新しい家の建設</li> <li>• インフラストラクチャー整備</li> <li>• 移住する人たちへの移動費用と日当</li> <li>• 土壌の除染</li> <li>• 森林・水資源の保護措置</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 国有林、自然動物保護区、国立公園、州立公園、動物の保護区の汚染の補償</li> <li>• 海岸清掃・除染費用</li> <li>• 同油田を改修するための費用</li> </ul>	<p>不明</p>	<p>不明</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 崩壊ダムの再建築費用</li> <li>• 所有物(建物等)への損害</li> </ul>
-------------	--	--	-----------	-----------	--

#### 4. まとめ

原子力施設の事故として、人間や環境への影響が最も甚大であったチェルノブイリ事故と他のエネルギー産業（石炭、原油、天然ガスおよび水力）における事故の被害を比較した結果、以下の点を指摘できる。まず、負傷者数および事故直後の死亡者数の比較から前者の方が後者よりも事故の規模が特別大きくなるとは指摘できない。ただし、図 39 にも示したように晩発性影響による死亡者数を含めた場合、死亡者数の観点からも原子力事故に特徴的な影響を指摘できる可能性がある。しかしこの点については、他のエネルギー産業における死亡者数が経験に基づく客観的な数値を用いているのに対し、原子力事故による晩発性影響が多くの仮定を含む推定値であるため単純に比較することはできず、本報告書において結論を述べることはできない。避難者数では、チェルノブイリ事故や TMI-2 事故よりも LPG 事故のほうが過酷な被害を引き起こしている。ただし、この避難者数は事故後の短期間に実施された避難によるものであり、チェルノブイリ事故では、事故後も長期間にわたり移転が実施されている。これら長期的な対策による移転者数を含めて考慮した場合、その値は LPG 事故を上回るため、避難者数の解釈には注意が必要である。損害推定額では、チェルノブイリ事故の方が原油や天然ガスの事故の損害額よりも約 2 桁高い。しかし、単位電力量当たりの事故発生頻度に注目すると、原油、天然ガスおよび LPG の事故は、チェルノブイリ事故よりも 1 桁から 2 桁高いと考えられるので、仮に原油や天然ガスにおける事故が経済的に許容される事故であるとするならば、チェルノブイリ級の原子力の事故も、もし数世代にも渡って確保できるような長期的な資金があれば、経済的な観点に限って論ずれば、決して許されない規模の事故ではなくなる可能性がある。

可燃物質や爆発性物質による事故の影響は、一過性で継続期間が比較的短く、影響の範囲も過去の事例では数 100 m に留まる。一方、化学産業における有毒物質の漏洩事故については、影響の範囲が 10 km を超える可能性があり、長期的な土地利用制限等の管理が必要になる場合がある。また、原子力事故の場合にも、影響を受ける範囲は非常に広範にわたり、長期にわたる防護措置（住民の避難・移転、心理的影響あるいは晩発性がんへの長期医療など）が必要である。この点は、原子力事故の特徴であり、可燃性物質や爆発性物質による事故よりも有毒物質の漏洩事故と類似性がある。

上記の結論は、一般的な原子力エネルギー産業と他のエネルギー産業における事故を比較した結果ではない。チェルノブイリ事故という特定の原子力発電所における事故と、他のエネルギー産業における事故を比較した結果であって、解釈には注意が必要である。事実、日本を含む西欧諸国で稼動している原子炉は、チェルノブイリ型の原子力発電所とは異なる設計であり、またこれを規制する制度のあり方も大きく異なっている。本報告書において言及したように、各種エネルギー産業における事故の規模は、施設周辺の人口分布や社会的基盤の整備状況などの社会的な要素に加え、気象や地形など自然環境のあり方によって大きな影響をうける。したがって、上記のような情報は、これのみで特定のエネルギー産業を正当化する根拠としては成立しない。むしろ、原子力産業と他産業との間で見出された事故影響の類似性は、新たな施設の立地や防災計画の立案に有効であるし、これまでの指針や防護を再検討する際に示唆を与える入力となりうる。またチェルノブイリ事故における損害額に関する報告は、不確実な要素が大きいものの、賠償が必要となる項目やその配分等について示唆を与えており、原子力損害賠償制度や防災計画において有用な情報である。さらに事故影響と発生確率を表現する F-N 曲線のように定量的な情報は、今後エネルギー源を選択する際に基本的な情報として活用できる可能性がある。

**謝辞**

本報告書を作成するにあたり、文献の引用等においてご助言下さったスイス Paul Scherrer Institute の Hirschberg S. 氏に感謝の意を表したい。

PSI 報告書 (Hirschberg et al., 1998) における引用文献 (本報告書で示した分のみ)

- Aarkrog, A., 1995, "Global radioecological impact of nuclear activities in the former Soviet Union," Proceedings of the International Symposium "Environmental Impact of Radioactive Relocases," 8-12 May 1995, IAEA, Vienna.
- ACNS, 1989, "Alternative Electrical Energy Systems – A comparison of the Risks of Occupational and Public Fatalities," ACNS-10, Advisory Committee on Nuclear Safety, Ottawa, Canada.
- Alexakhin, R.M., Fesenko, S.V., Sanzharova, N.I., 1996, "Serious radiation accidents and the radiological impact on agriculture," in "Environmental Contamination, Radiation Doses and Health Consequences after the Chernobyl Accident," Special Commemorative Issue of Radiation Protection Dosimetry, 64 1/2, 37-42.
- Baecher, B., Paté, M.E. and de Neufville, R., 1980, "Risk of Dam Failure in Benefit-Cost Analysis," Water Resources Research, 16, pp.449-456.
- Bartholomé, E., Biekert, E., Hellmann, H., Ley, H. and Weigert, M., eds., 1975, "Ullmann's Encyklopädie der technischen Chemie. 4 th Ed., Verlag Chemie, Weinheim, Germany.
- Basler & Hofmann, 1978, "Überlegungen zur Autretenswahrscheinlichkeit von Talsperrenbrüchen," Report TB 645-ASK-14, Basler & Hofmann, Zurich Switzerland.
- Bennet, B.G., 1995, "Exposure from worldwide releases of radionuclides," Proceedings of the International Symposium "Environmental Impact of Radioactive Release," 8-12 May, 1995, IAEA-SM-339/185, Vienna pp. 3-12.
- Bignell, V., and Peters, G, 1977, "Catastrophic Failures," New York: The Open University Press, Milton Keynes.
- Bradley, D.J., Frank, C.W. and Mikerin, Y., 1996, "Nuclear Contamination from Weapons Complexes in the Former Soviet Union and the United States," Physics Today, 40-45.
- Brown, R., 1981, "Health and Environmental Effects of Oil and Gas Technologies: Reserch Nees," MTR-81W77, Mitre Corporation.
- Buldakov, L.A., Demin, S.N., Kostyuchenko, V.A., Koshurnikova, N.A., Krestinina, L.Yu., Saurov, M.M., Ternovsliij, I.A., Tokarskaya, Z.B. and Shvedov, V.L., 1996, "Medical Consequences of the Radiation Accident in the Southern Urals in 1957," in Ramzaev P.V. (Ed.) , "Mediacal Consequences of the Chernobyl Accident," Nova Science Publisher Inc., New York, pp. 15-28.
- Bützer, P., 1988, "Gefährdungsanalyse von Flüssiggas (propan, Butan) und Erdgas.
- Chanin, D. I., et al., 1987, "MACCS Accident Consequence Code System," Vol. I User's Guide. NUREG/CR-4691, Sandia National Laboratories, USA.
- Chukanov, V.N., Bazenov, A.V., Korobitsin, B.A., Kuligin, A.P., Volobuev, P.V. and Zukovsky, M.V., 1995, "Consequences of the radioacitve contamination of the Sverdlovsk Oblast caused by the accident in 1957 at the Mayak industrial complex," in "Environmental Impact of Radioactive Releases," IAEA Proceedings Series, Vienna.
- Clarke, R.H., 1988, "Current radiation risk estimates and implications for the health consequences of Windscale, TMI and Chernobyl accidents," Medical Response to Effects of Ionising Radiation (Crosbie W.A. and Gittus J.H., Eds.) , Elsevier, Amsterdam.
- Clifton, J.J., 1992, "The Historical Record of Major Accidents in the Energy Industries," Applied Energy 42 pp. 17-32.
- Cochran, T.B., Standish Norris R. and Suokko, K.L., 1993, "Radioactive contamination at Chelyabinsk-65, Russia," Annu. Rev. Energy Environ, pp. 507-528.
- Crick, M.J. and Linsley, G.S., 1982/83, "An assessment of the radiological impact of the Winscale reactor fire, October 1957," NRPB R135 (May 1982) and Addendum (September 1983) .
- EC/IAEA/WHO, 1996, EC/IAEA/WHO International Conference: "One Decade after Chernobyl – Summing up the Consequences of the Accident," 8-12 April 1996, Vienna, Austria.
- Federal Energy Regulatory Commission, 1978, "Walter Bouldin Dam Failure and Reconstruction, DOE/FERC-0017, Office of Electric Power Regulation, Washington, D.C., USA.
- Gerhartz, W. and Elvers, B., eds., 1990, "Ullmann's Encyclopaedia of Industrial Chemistry, Vol. 17, 5th Ed., VCH Verlagsgessellschaft mbH, Weinheim, Germany.

- Hirschberg S., Cazzoli E. 1994, "Contribution of severe accidents to external costs of nuclear power," PSNPRA and Severe Accidents, Proc. Mtg Ljubljana, 1994, STRITAR, A., MAVKO, B., Eds, Nuclear Soc. of Slovenia, Ljubljana pp. 242-249.
- Hoffmann, H.-J., Oedekoven, L. and Ott, K.O., 1984, "Statistical Trend Analysis of Dam Failures Since 1850," Special Report No. 245, Kernforschungsanlage Jülich, Germany.
- Human Right Watch / Asia, 1995, Ther Three Gorges Dom in China: Forced Resettlement, Suppression of Dissent and Labor Rights Concerns, Vol. 7, No. 2.
- ICRP, 1990, Recommendation of the International Commission on Radiological Protection. Oxford, New York.
- Ilyin, L.A. et al., 1990, "Radiocontamination patterns and possible health consequences of the accident at the Chernobyl nuclear power station," J. Radiol. Prot. 10, 3-29.
- Jansen, R., 1983, "Dams and Safety," A Water Resources Technical Publication. US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Washington D.C., USA.
- Karavaeva, Ye.N., Kulikov, N.V., Molchanova, I.V., Pozolotina, V.N., Yushkov, P.I., 1994, "Accumulation and distribution of long-living radionuclides in the forest ecosystems of the Kyshtym accident zone," Sci., Total Environ., 157, Elsevier, Amsterdam pp. 147-151.
- Kletz, T., 1993, "Lessons form Disasters," Houston: Gulf Publishing Company.
- Komanoff Energy Associates, 1986, "Costs of the Three Mile Island Accident," In Le Vrai coût d'un accident nucléaire, Science et Vie, No. 829 pp.36-39.
- Medvedev, Z.A., 1979, "Nuclear Disaster in the Urals," Norton, New York (1979) and Angus & Robertson, London.
- Nash, R.J., 1976, "Darkest Hours," Chicago: Nelson-Hall.
- NRC, 1990, "Severe Accident Risks: An Assessment for Five U.S. Nuclear Power Plants," NUREG-1150 Vol.1, 2, 3.
- Nucleonics Week, 1994, "Outlook on International Nuclear Liability," Special Report to the Readers of Nucleonics Week, Inside N.R.C., and Nuclear Fuel. Nucleonics Week, 29 September 1994, Inside N.R.C., 3 October 1994, Nuclear Fuel, 10 October 1994.
- Occupational Safety and Health Reporter, 1998, "China logs one of worst safety records," Occupational Safety and Health Reporter, Vol. 27, No. 34, 1320.
- OECD, 1991, "The State of the Environment ," OECD, Pris.
- Qing, D., 1998, "The River Dragon Has Come! The Three Gorges Dam and the Fate of China's Yangtze River and its People," Probe International, International Rivers Network, M.E. Sharpe, Armonk, New York, London, England.
- Pharabod, J.-P. and Schapira, J.-P., 1988, "Les jeux del'atome et du hasard – Les grands accident nucléaires, de Windscale á Tchernobyl. De tels accidents peuvent – ils surberri en France?" Calmann – Lévi, France.
- Rolevich, I.V. et al., 1996, "Topical Session 6: Social, Economic, Institutional and Political Impact. Report for Belarus," EC/IAEA/WHO International Conference: "One Decade after Chernobyl - Summing up the Consequences of the Accident," Vienna 8-12 April 1996, IAEA Proceedings Series, Vienna, 411-428.
- Savchenko, V.K., 1995, "The Ecology of the Chernobyl Catastrophe – Scientific Outlines of an International Programme of Collaborative Research," UNESCO, Paris, and The Partenon Publishing Group Limited, Casterton Hall, Carnforth, Lancs., UK.
- Schnitter, N., 1976, "Statistische Sicherheit von Talsperren," Wasser, Energie, Luf – Eau, Énergie, A ir, 68. Jahrgang, Herg 5, pp.126-129.
- Serafim, J., 1981, "Safety of Dams Judged from Failures," Water Power & Dam Construction, p. 32.
- Seymour, R. and Geyer, R., 1992, "Fates and Effects of Oil Spills," Annual Review of Energy and the Environment, Vol. 17, pp.261-83, California, USA.
- Sharples, B., 1992, "Oil Pollution by the Offshore Industry Contrasted with Tankers: An Examination of the facts," Proceedings Institutional Mechanical Engineers, 206, pp. 3-14.
- Sorensen, J., et al., 1987, "Impacts of Hazardous Technology – The Psychosocial Effects of Restarting TMI-1," State University of New York Press.
- Sørensen, B., 1994, "Impacts of Major Nuclear Accidents," Private Communication to N. Eyre, M. Dreicer and A. Rabi.



- Trabalka, J.R., Eyman, L.D. and Auerbach, S.I., 1979, "Analysis of the 1957-58 Soviet Nuclear Accident," Environmental Sciences Division, Publication No. 1445, ORNL-5613, Oak Ridge National Laboratory, Tennessee.
- Ukraine, 1996, "Topical Session 6: Social, Economic, Institutional and Political Impact. Report for Ukraine," EC/IAEA/WHO International Conference: "One Decade after Chernobyl-Summing up the Consequences of the Accident," Vienna 8-12 April 1996, IAEA Proceedings Series, Vienna 429-444.
- UNSCEAR, 1988, "United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, "Report to the United Nations," New York.
- UNSCEAR, 1993, "1993 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes," United National Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations Sales Publication E.94.IX.2, New York, USA.
- Usmen, M. and Cheng, S., 1987, "Reliability and Risk Assessment of Coal Refuse Disposal Facilities," Published in Carlson, C., Swisher, J., Innovative Approaches to Mined Land Reclamation, pp.693-717, Southern Illinois University, Carbondale, Il., USA.
- Voznyak, V.Ya., 1996a, "Topical Session 6: Social, economic, Institutional and Political Impact. Report for the Russian Federation," EC/IAEA/WHO International Conference: "One Decade after Chernobyl- Summing up the Consequences of the Accident," Vienna 8-12 April 1996, IAEA Proceedings Series, Vienna, 369-378.
- Voznyak, V.Ya., 1996b, "Topical Session 6: Social, economic, Institutional and Political Impact. Report for the Russian Federation," EC/IAEA/WHO International Conference: "One Decade after Chernobyl- Summing up the Consequences of the Accident," Vienna 8-12 April 1996, IAEA Proceedings Series, Vienna, 379-410.

#### 米国大統領委員会報告書 (Presidential Commission, 1990) における引用文献

- NRC, 1975, "Reactor Safety Study," United States Nuclear Regulatory Commission Report WASH-1400.
- NRC, 1990, "Severe Accident Risks: An Assessment for Five U.S. Nuclear Power Plants," NUREG-1150 Vol.1, 2, 3.
- Rasmussen, N.C., 1990, "The Nature of Severe Accidents," Presidential Commission 1990, VOLUME 1, Appendix B.

#### 参考文献

- Hirschberg et al., 1998, "Severe Accidents in the Energy Sector," Paul Sherrer Institut, Switzerland
- IAEA, 1996, "Manual for the classification and prioritization of risks due to major accidents in process and related industries, Inter-Agency Programme on the Assessment and Management of Health and Environmental risks from Energy and Other Complex Industrial Systems," IAEA-TECDOC-727 Rev. 1.
- IAEA, 1998, "Guidelines for integrated risk assessment and management in large industrial areas, Inter-Agency Programme on the Assessment and Management of Health and Environmental Risks from Energy and Other Complex Industrial Systems," IAEA-TECDOC-994.
- IAEA, 1999, "Health and Environmental Impacts of Electricity Generation Systems: Procedures for Comparative Assessment," IAEA Technical Reports Series No. 394.
- Matsuki, Y., 2002, "Comparison of health and environmental impact of energy systems," International Journal of Risk Assessment and Management, Vol. 3, No. 1, 2002 pp. 1-15
- Presidential Commission, 1990, "Presidential Commission on Catastrophic Nuclear Accidents, Report to the Congress from the Presidential Commission on Catastrophic Nuclear Accidents," Volume 1, 2, Washington, DC
- Wilson, R., 1989, "The Cost of Catastrophic Nuclear Accidents: the experience at Chernobyl, paper written for the President's Commission on Catastrophic Nuclear Accidents," Presented in Washington, DC, 1989 (Presidential Commission (1990) , VOLUME 2)

## 付録 IAEA による事故分類・評価の指針

UNEP (United Nations Environment Programme Organization)、UNIDO (United Nations Industrial Development) および WHO (World Health Organization) と IAEA が、共同でまとめたガイドライン IAEA-TECDOC-727: 「可燃物・危険物を扱う産業のリスクの分類とリスクレベルの順位付けに関するマニュアル」の概要を説明し、可燃物・危険物を扱う産業のリスクの分類とリスクレベルの順位付けの考え方を示す。

### 2.1 危険物を扱う産業のリスクの分類とリスクレベルの順位付け

本節では、IAEA のガイドライン (IAEA, 1996) (以下 IAEA ガイドライン) に示される内容を中心に、化学産業等における過酷事故の包括的な分類および事故発生確率の計算を含めた重要度の測定に関する指針を紹介する。以下、工場操業中あるいは輸送中の危険物による事故の評価・判定の指針、リスクの重要度分類を順次説明する。

#### 2.1.1 事故の規模の表現 (クラス分けの一助として)

IAEA ガイドラインでは、事故が発生した場合に影響を与えると思われる地域の広さ、人口密度および影響を受ける人数の観点から、一般産業のリスクをクラス分けしている。本節では、IAEA ガイドラインの例示に従いながら、危険物のカテゴリーおよびリスク分類の手順を説明する。

例えば 2,000 t のガソリン貯蔵所があったとする。また、その付近に、もしこの貯蔵タンクで事故が発生した際に、重大な影響 (爆発に巻き込まれる) を受けると思われる村があったとする。村は貯蔵所から最短距離で 30 m の地点から 100 m の距離の地点までの同心円内にあり、その半径 100 m の円内の 20 % を占めるエリアに広がっている。表 1 から表 3 に、産業活動別に事故が発生し得る場所と事故の原因となる物質を示し、それらの場所と原因物質から導出される事故のリスクレベルを検索番号を示す。

表 1 より、ガソリン貯蔵所のリスクレベルを導く検索番号 (4) が得られる。また表 3 に、取扱う危険物の重量別に、事故が影響を及ぼす面積によるクラス分け (影響カテゴリ) が示されている。同表を基に、検索番号 (4) のガソリン 2,000 t は、影響カテゴリ CII に該当する。影響カテゴリは、事故による影響が及ぼす範囲に関する分類であり、表 5 にその意味が示されている。すなわち、同表から影響カテゴリに対応する、事故による影響を受ける最大距離 (影響距離) とその面積 (影響面積) が導出される。例えば影響カテゴリ CII は、影響距離が 100 m、影響面積が 1.5 ha であることを意味している。

以上の影響面積を基に、同ガソリン貯蔵所における事故の規模を、影響を受ける人数 (死亡者数) として示すことも可能である。それには、まず人口密度の情報が必要だが、ここでは表 8 に示される典型的な地域別人口密度の例から、「村」の典型的な例である 20 人 / ha を使うことにする。次に「想定する半径 100 m の円周内の区域で、ガソリンの流出と爆発の影響を受ける村の面積が 20 % である」という冒頭の情報 (仮定) と、本ケースで発生する雲の拡散カテゴリが II であることをもとに、表 9 から影響を受ける人口分布の補正係数 (この場合は 0.4) を得る。また、表 10 から事故対応作業による影響緩和係数 (この場合はガソリン貯蔵所の検索番号 (4) に対応するものは 1) を探す。以上の数値を基に、影響を受ける人数を、以下のように計算することが出来る。

$$\begin{aligned} & \text{影響面積} \times \text{人口密度} \times \text{人口分布補正係数} \times \text{影響緩和係数} \\ & \Leftrightarrow 1.5 \text{ha} \times 20 \text{人} / \text{ha} \times 0.4 \times 1 = 12 \text{人} \end{aligned}$$

表1 一般産業活動におけるリスクのクラス分けチェックリスト (IAEA, 1996, Table II)

産業活動		重要な危険物	検索番号 (表-3、表-4と関連)
燃料貯蔵	配給基地	ガソリン	6
	自動車基地	ガソリン、LPG	7
	中間貯蔵所	ガソリン	6
		LPG	7、9
	主貯蔵所	原油	1、3
		ガソリン	4、6
		LPG	7、9、10、11
天然ガス		10、11	
ガス・シリンダー貯蔵	各種ガス	13	
燃料処理と貯蔵	精製所 (アルキル化処理)	LPG、プロパン	7、9
		フッ化水素	31
	ナフタ・クラッカー	ブチレン	7、9
		エチレン	12
		酸化エチレン	30
		プロピレン	7、9
		塩化ビニール	7、9
燃料輸送	パイプ・ライン	LPG、プロパン	8
		天然ガス	12
		ガソリン	5
		原油	2
	水 (河川、運河の水路)	LPG (圧力)	9
		LPG (冷却)	11
		ガソリン	6
		原油	3
	鉄道・道路	LPG	7
		ガソリン	6
		原油	4
	過酷冷却施設	屠殺場、搾乳所、醸造所、マーガリン工場、アイスクリーム工場、チョコレート工場、肉、魚、果物、花等の貯蔵所、アイススケート・リンク	アンモニア
食品、興奮性飲料	砂糖工場	亜硫酸ガス	31
	小麦粉工場	臭化メチル	32
	油・脂肪の抽出	ヘキサン	1、3
	イースト工場、蒸留酒製造所	可燃性液体	4、6
	コココーラ工場	ヘキサン	1、3
特殊基礎産物	皮革産業	アクロレイン酸	18、21
	製材産業	フォルムアルデヒド	32
	製紙産業	酸化エチレン	30
		エピクロロヒドリン	16、17
	ゴム産業	スチレン	4、6
		アクリロニトリル	18、21
	繊維産業	酸化エチレン	30
フォルムアルデヒド アルキル・フェノール		32	
冶金、電子産業	溶鉱炉	一酸化炭素	31
		アンモニア	31

	表面処理	アルシン	34
特定の化学物質	化学肥料	アンモニア	31、36
		燃焼生成物	43
	硫酸	各種酸化硫黄	45
	合成樹脂	各種酸化エチレン	30
		塩素	32
		アクリロニトリル	18、21
		ホスゲン	33
		フォルムアルデヒド	32
	プラスチック・合成物	塩化ビニール	7、9
		アクリロニトリル	18、21
		塩素	32
		燃焼生成物	46
	絵の具・塗料	気状燐化水素 (ホスフィン)	33
		溶剤、溶媒	4、6
		燃焼生成物	46
	塩素、フッ素化炭素 (CFCs)	塩化水素	40、42
		塩素	32
		フッ化水素	31
	塩素	塩素	32、37
	塩化ビニール	塩素	32
		塩化ビニール	7、9
		塩化水素	40、42
	アンモニア	アンモニア	31、36
	塩化水素	塩化水素	40、42
		塩素	32
	繊維 (ファイバー)	2 硫化炭素	18
		硫化水素	32
医薬品	塩素	32	
	溶剤、溶媒	4、6	
(化学) 重合	ブチレン	7、9	
	エチレン	12	
	プロパン	7、9	
	ビニール・アセテート	1、3	
合成繊維	メタノール	1、3	
アルカリ塩素	塩素	32	
	水素	12	
殺虫剤	原材料製造	ホスゲン	33
		イソシアン酸塩	26、29
		塩素	32
	燃焼生成物	43	
	製品化と貯蔵	燃焼生成物	43
小売りと貯蔵	燃焼生成物	43	
	臭化メチル	32	
爆発物	製造と貯蔵	各種	14
	弾薬の貯蔵	各種	14、15
公共区域と施設	給水設備	塩素	32
	殺虫剤の貯蔵	燃焼生成物	43
港湾施設	コンテナ	各種	A
	貯蔵タンク類	各種	A
輸送	パイプライン	塩素	41

		アンモニア	40
		酸化エチレン	40
		塩化水素	41、42
	道路と鉄道 (切り替えヤードを含む)	可燃性ガス B : 23、236、239	7
		可燃性液体 B : 33、336、338、339、333、 X338、X323、X423、446、 539	6
		有毒ガス (高度) B : 26、265、266	32
		有毒ガス (中程度) B : 236、268、286	31
		有毒液体 B : 336、66、663	19
	水路、水上	爆発性 B : 1.1、1.5	14
		可燃性ガス B : 23、236、239	9C、11D
		可燃性液体 B : 33、336、338、339、333、 X338、X323、X423、446、 539	6
		有毒ガス (高度) B : 26、265、266	32C、37D
		有毒ガス (中程度) B : 236、268、286	31C、36D
		有毒液体 B、E : 336、66、 663	20

A : 各種危険物の索引番号については、表-2 を参照のこと。

B : 輸送に関する国際分類コード (なお、表-3 も参照のこと)。

C : 加圧状態

D : 冷却状態

E : 不溶解性 (1kg/dm<sup>3</sup> 以下)

表2 危険物・毒物のリスト (IAEA, 1996, Appendix I)

検索番号	危険物タイプ	危険物 (例)
1~3	可燃性液体 蒸発圧力 摂氏 20 度で 0.3 bar 未満。 (引火点 摂氏 20 度を超える)	アリル・アルコール アニリン 脱水ベンザル (Benzaldehyde) 塩化ベンジル ブタノール ブチル・チグリコル ジクロロ・ベンゼン ジクロロ・プロペン デイゼル・オイル 炭酸ジエチル ジメチル・フォルムアミド エタノールアミン 蟻酸エチル エチルグリコール・アセテート 珪酸エチル エチレン・クロロハイドリン エチレン・グリコール 燃料オイル ファーファラル (Furfural) フリル・カルビノール (Furyl carbinol) イソアミル・アルコール イソブタノール イソプロパノール メチル・ブチル・ケトン メチル・グリコール メチル・グリコール・アセテート ナフタレン ニトロ・ベンゼン 原油 フェノール スチレン トリオクサン キシレン
	可燃性液体 蒸発圧力 摂氏 20 度で 0.3 bar 未満。 (引火点 摂氏 20 度以下)	アセタール アセトアルデヒド アセトン アセトン・ニトリル ベンゼン 塩化ベンジル ブタンジオン (Butanedione) ブタノール ブタノン 塩化ブチル 蟻酸ブチル サイクロヘキサン (Cyclohexene) ジクロロエタン ジクロロプロパン ジエチルアミン ジエチル・ケトン 炭酸ジメチル

		<p>ジメチル・サイクロヘキサン          ジオクサン          エタノール          エチル・アセテート          アクリル酸エチル (Ethyl acrylate)          エチルベンゼン          蟻酸エチル          ヘプタン          ヘキサン          イソブチル・アセテート          イソプロピル・エーテル          メタノール          メチル・アセテート          メチル・サイクロヘキサン          メチル・イソブチル・ケトン          メタクリル酸メチル (Methyl methacrylate)          メチル・プロピオネート          メチル・ビニール・ケトン          オクタン          パイペリジン (Piperidine)          プロピル・アセテート          ピリジン (Pyridine)          トルエン          トリエチル・アミン          ビニールアセテート</p>
4～6	<p>可燃性液体          蒸発圧力 摂氏 20 度で 0.3 bar 以上。</p>	<p>2 硫化炭素          コロジオン溶液          サイクロ・ペンタン          ジエチル・エーテル          臭化エチル          イソプロペン          イソプロピル・アルコール          蟻酸メチル          ナフタ          凝縮天然ガス          ペンタン          ガソリン          プロパノール (プロピル・アルコール)          酸化プロピレン</p>
7～9	<p>可燃性ガス          (圧力により液化)</p>	<p>1、3-ブタジエン          ブタン          ブテン          一酸化炭素          サイクロ・ブタン          サイクロ・プロパン          ジフロロエタン          ジメチル・エーテル          エタン          塩化エチル          酸化エチレン          フッ化エチル          イソブタン          イソブチレン</p>

		<p>LPG  メチル・エーテル  フッ化メチル  プロパジエン (Propadiene)  プロパン  プロピレン  塩化ビニール  ビニール・メチル・エーテル  フッ化ビニール</p>
10, 11	<p>可燃性ガス  (冷却により液化。圧力により液化する可燃性ガス (検索番号7-9のリスト) もあわせて参照のこと)</p>	<p>エチレン  メタン  メチル・アセチレン  天然ガス (LNG)  エチレン  メタン  メチル・アセチレン  天然ガス (LNG)</p>
12	<p>可燃性ガス  (加圧により可燃となるもの)</p>	<p>エチレン  水素  メタン  メチル・アセチレン  天然ガス (LNG)</p>
13	<p>シリンダー中の可燃性ガス</p>	<p>アセチレン  ブタン  水素  LPG  プロパン</p>
14, 15	<p>爆発物</p>	<p>硝酸アンモニウム (タイプA1・科学肥料)  弾薬  ニトログリセリン  有機過酸化物 (タイプB)  TNT火薬</p>
16, 17	<p>低レベル毒性液体</p>	<p>塩化アセチル  アリル・アミン  臭化アリル  塩化アリル  クロロピクリン  ジクロロ・ジエチル・エーテル  ジメチル・ヒドラジン  ジメチル硫酸塩  硫化ジメチル  エピクロロヒドリン  エタンエチオール (Ethanethiol)  イソ・シアン酸エチル  エチル・トリクロロ・シラン  鉄ペンタコーボニル (Iron pentacarbonyl)  イソプロピルアミン  メタクロレイン  メチル・ヒドラジン  4酸化オスミウム  パークロロメチルチオール (Perchloromethylthiol)  パークロロメチル・メルカプタン  塩化フェニルカービルアミン</p>



		<p>3 価の燐を含む酸塩化物          3 価の燐を含む 3 塩化物          塩化サルフリル (Sulphuryl chloride)          4 エチル鉛          4 メチル鉛          トリクロロシラン (Trichlorosilane)          塩化ビニリデン (Vinylidene chloride)</p>
18~21	中レベル毒性液体	<p>アクロレイン          アクリロニトリル          臭素          硫化炭素          クロロ・アセトアルデヒド          クロロメチルエーテル          臭化シアン          ジメチル・ジクロロ・シラン          塩化蟻酸エチル (Ethyl chloroformate)          エチレンイミン          フォルムアルデヒド溶液          フッ化水素の酸性物          イソブチルアミン          メチル・クロロ蟻酸塩          メチル・ジクロロシラン          沃化メチル          メチル・トリクロロシラン          硝酸 (蒸発)          オレウム (蒸発硫酸)          プロピレン・イミン          酸化プロピレン          4 塩化スズ</p>
22, 25	高毒性液体	<p>シアン化水素          2 酸化窒素          3 酸化硫黄          テトラ・ブチルアミン</p>
26,29	高高度毒性液体	<p>イソ・シアン酸メチル          ニッケル・カーボニル          ペンタボラン (Pentaborane)          5 フッ化硫黄</p>
30, 35	低レベル毒性ガス	<p>エチルアミン          酸化エチレン          塩化ビニール</p>
31, 36, 40	中レベル毒性ガス	<p>アンモニア          3 フッ化ボロン          一酸化炭素          3 フッ化塩素          ジメチルアミン          フッ素          フッ化水素          メチル・バイオマイド          3 フッ化窒素          フッ化パークロリル (Perchloryl fluoride)          シラン (Silane)          4 フッ化シリコン</p>

		亜硫酸ガス トリメチルアミン 臭化ビニール
32, 37, 41, 42	高レベル毒性ガス	3 塩化ボロン 硫化カーボニル 塩素 二酸化塩素 ジクロロアセチレン 4 酸化ジニトロゲン (Dinitrogen tetroxide) フォルムアルデヒド ゲルマン (Germane) ヘキサ・フロロアセトン 臭化水素 塩化水素 硫化水素 塩化メチル 一酸化窒素 フッ化サルフリル (Sulphuryl fluoride) 4 水素化スズ
33, 38	高高レベル毒性ガス	ボロエタン (Boroethane) 塩化カーボニル フッ化カーボニル シアン フッ素 セレン化水素 (Hydrogen selenide) ケテン (Ketene) 塩化ニトロシル 2 フッ化酸素 ホスゲン ホスフィン スチビン (Stibine) 4 フッ化硫黄 6 フッ化テルリウム
34, 39	超高レベル毒性ガス	アルシン セレン化水素 オゾン 6 フッ化セレンウム

なお、表 1 および表 2 に掲載されていない危険物については、毒性の度合いは次に示される一般的なルールにより分類される。

- (a) 摂氏 20 度における蒸発圧力が 1 bar 未満の状態では液体とみなされる物質。
- (b) 摂氏 20 度における蒸発圧力が 1 bar を超える状態では気体とみなされる物質。
- (c) 下の表における LC50 と物理的特性にそれぞれ対応する (a) 欄と (b) 欄の数字を合計した値で分類する。

(a) に関する毒性評価指標 (IAEA, 1996, Appendix I)

LC50 rat 4 h in ppm	計算用数値(a)
0.01-0.1	8
0.1-1	7
1-10	6
10-100	5
100-1,000	4
1,000-10,000	3
10,000-100,000	2

(b) に関する毒性評価指標 (IAEA, 1996, Appendix I)

物理的特性		計算用数値(b)	
液体	摂氏 20 度での圧力	<0.05 bar	1
		0.05-0.3 bar	2
		0.3-1 bar	3
圧縮された液化ガス	沸点	> 265 K	3
		< 265 K	4
冷却された液化ガス	沸点	> 245 K	3
		< 245 K	4

(a) と (b) の合計による毒性分類 (IAEA, 1996, Appendix I)

(a)+(b)合計値	毒性のクラス分け
6	低
7	中
8	高
9	高高
10	超高

表3 影響カテゴリによる危険物のクラス分け (IAEA, 1996, Table IV(a))

検査番号	危険物の種類	危険物の記述	活動内容	数量 (t)											
				0.2-1	1-5	5-10	10-50	50-200	200-1000	1000-5000	5000-10000	>10000			
1	可燃性液体	蒸発圧力 >0.3 bar at 20°C	タンクピット貯蔵	-	-	-	-	-	-	-	A I	B I	B I	C I	
2 <sup>a</sup>			パイプライン	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3			その他	-	-	-	A I	B I	C I	C I	D I	D I	D I	D I	D I
4		蒸発圧力 =0.3 bar at 20°C	タンクピット貯蔵	-	-	-	-	-	-	-	-	B I	C I	C I	D I
5a			パイプライン	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6			その他	-	-	-	B II	C II	D II	E II	E II	E II	E II	E II	E II
7	可燃性ガス	加圧により液化	鉄道、道路、陸置	-	A I	B I	C I	D I	E I	E I	E I	E I	E I	E I	
8 <sup>a</sup>			パイプライン	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
9			その他	-	B II	C III	C III	D III	E III	E III	E III	E III	E III	E III	
10		冷却により液化	タンクピット貯蔵	-	-	-	-	-	-	-	-	B I	C I	C I	
11			その他	-	-	-	B II	C II	D II	E II	E II	E II	E II	E II	
12 <sup>a</sup>			パイプライン	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
13	爆発物	圧力下で可燃	シリンダー貯蔵 (25-100kg)	-	-	C III	C II	C I	C I	C I	C I	X	X	X	
14			未荷造り貨物	A I	B I	B I	C I	C I	C I	D I	D I	D I	X	X	
15			容器詰め	B III	B III	C III	C I	C I	C I	D I	D I	D I	X	X	
16		低い毒性	タンクピット貯蔵	-	-	-	-	-	-	-	A II	A II	B II	C III	
17			その他	-	-	-	A III	A II	B II	C II	C II	C II	C II	C II	
18			タンクピット貯蔵	-	-	-	A III	B III	D III	E III	F III	F III	F III	F III	
19	中程度毒性	鉄道・道路	水路	-	A II	C III	D III	E III	F III	G III	X	X	X		
20			その他	-	B II	D III	E III	F III	G III	X	X	X	X		
21			タンクピット貯蔵	-	B II	C III	D III	E III	F III	G III	X	X	X		
22	毒性液体	高度毒性	タンクピット貯蔵	-	-	A II	B III	C III	E III	E III	F III	G III	G III		
23			鉄道・道路	B II	C II	D III	E III	X	X	X	X	X	X		
24			水路	C II	D II	E III	F III	G III	G III	G III	X	X	X		
25		高・高度毒性	高・高度毒性	その他	B II	C II	D III	E III	F III	F III	F III	G III	G III		
26				タンクピット貯蔵	A II	B I	C III	E III	F III	F III	F III	G III	H III	H III	
27				鉄道・道路	C II	D III	E III	F III	X	X	X	X	X	X	
28	毒ガス	加圧で液化	水路	D III	E III	F III	G III	H III	H III	H III	X	X	X		
29			その他	C III	D III	E III	F III	G III	H III	H III	H III	X	X		
30			毒低	A II	B II	C II	C III	C II	D III	D III	D III	D III	E III		
31			毒中	B II	C II	C II	D III	E III	F III	F III	F III	G III	H III		
32			毒高	C II	D III	E III	F III	F III	G III	G III	G III	X	X		
33			毒高高	D III	E III	F III	G III	G III	H III	H III	H III	X	X		
34	毒超高	E III	F III	G III	H III	H III	X	X	X	X	X				

35	冷却で液化	毒低 毒中 毒高 毒高高 毒超 毒中高	*水上活動の場合は 35~39の代わりに 30~34を用いること。	-	-	-	-	-	A II	A II	B II	B II	C II	D III		
36				A II	B II	C II	D III	E III	F III	G III	H III					
37				B II	C II	D III	E III	F III	G III	H III						
38				D III	E III	F III	G III	H III								
39				E III	F III	G III	H III									
40 <sup>a</sup>																
41 <sup>a</sup>																
42 <sup>a</sup>																
43																
44																
	毒性の燃焼生成物	高毒性														

“a” パイプラインに関するカテゴリは表4 参照のこと。  
 “X” このような危険物と分量の組み合わせは実際上有り得ない。

表 4 影響カテゴリによる危険物（プラント外の地中パイプライン内）のクラス分け  
(IAEA, 1996, Table IV(b))

検索番号	危険物のタイプ	危険物の記述	直径 a (m)	カテゴリ
2	可燃性液体	摂氏 20 度での蒸発圧力 <0.3bar	>0.2	AI
5			0.2-0.4 >0.4	AI B II
8	可燃性ガス	加圧により液化	<0.1	CI
12			0.1-0.2 >0.2	DI EI
			圧力下で可燃	0.2-1 >1
40	有毒ガス	中程度の毒性	<0.1	EIII
41			0.1-0.2	FIII
		42	高度の毒性	<0.1
0.1-0.2				GIII
<0.02		DIII		
0.02-0.04 0.04-0.1		EIII FIII		

“a” 最大のパイプ直径

表 5 影響カテゴリー：影響の及ぶ最大距離と面積 (IAEA, 1996, Table V)

影響距離 (m) カテゴリ		影響面積 (ha) カテゴリ <sup>A</sup>		
		I	II	III
A	0-25	0.2	0.1	0.02
B	25-50	0.8	0.4	0.1
C	50-100	3	1.5	0.3
D	100-200	12	6	1
E	200-500	80	40	8
F	500-1,000	-	-	30
G	1,000-3,000	-	-	300
H	3,000-10,000	-	-	1,000

<sup>A</sup> 1 ha = 10<sup>4</sup> m<sup>2</sup>

註釈： A～H は影響距離カテゴリを表す。 I～IIIは影響面積カテゴリを表す。各影響距離カテゴリは対応する最大影響距離のとり値の幅によって定義される。各影響面積カテゴリは推定影響面積の値により定義される（図 1 参照）。

I 値： 爆発が同心円的にひろがるような場合の最大影響距離の円の面積。

II 値： 時間遅れで爆発する場合もあるような重たい可燃性ガスの雲、または大きなプールの蒸発によって生ずる雲の半円形の面積。

III 値： 楕円の約 10 分の 1 の面積（拡散によって細長く伸びた楕円形の雲の面積）。距離カテゴリと面積カテゴリの組み合わせで、各影響カテゴリが形成される。距離カテゴリの F、G、及び H が面積カテゴリの III にしか見られないのは、これらが大量な有毒ガスの拡散により細長く伸びた雲の長さであるからである（図 2 参照）。

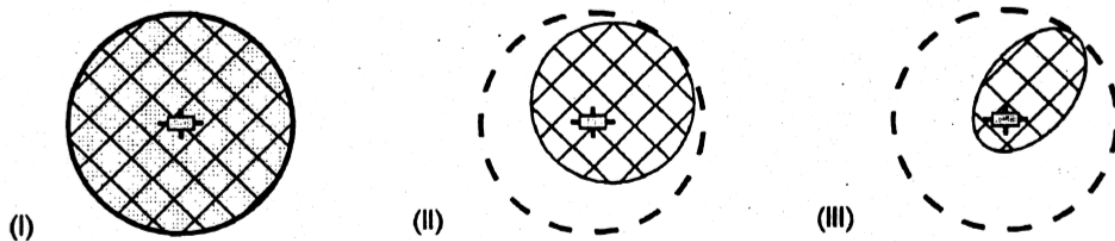


図1 影響面積カテゴリーの説明図 (IAEA, 1996, Fig. 2)

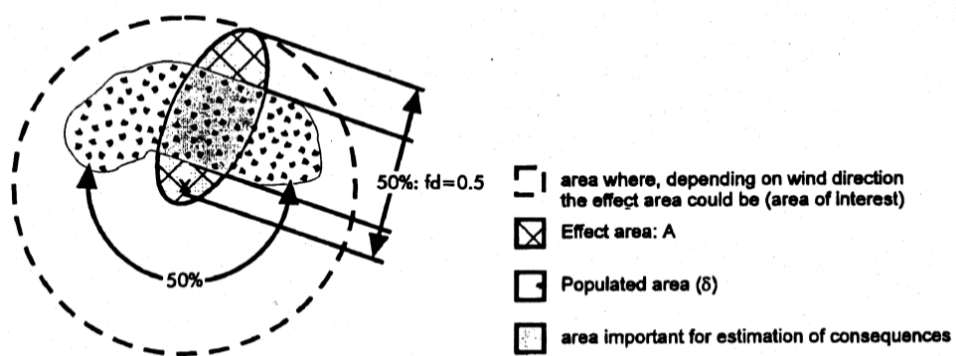


図2 面積カテゴリーIIIの説明図 (IAEA, 1996, Fig.3)

表6 通常産業活動をリスク評価の対象とするかどうかの目安（公衆からの離隔）  
(IAEA, 1996, Table III(a))

産業活動		人口密集地からの離隔距離 (m)	
固定施設	可燃物 爆発物	一般	<1,000
		ガソリンスタンド	<50
		LPG スタンド	<100
		可燃物のパイプライン	<50
		シリンダー貯蔵 (25-100kg)	<100
	有毒物質	一般	<10,000
冷却施設		<100	
小売の為の農薬貯蔵庫		<50	
輸送活動	LPG 輸送	道路・鉄道	<200
		水路	<500
	ガソリン輸送	道路・鉄道	<50
		水路	<200
	原油輸送	道路・鉄道	<25
		水路	<100
	有毒物輸送	道路・鉄道	<3,000
		水路	<3,000

上記数値は、通常産業に存在する可能な最大量（有毒物の場合は最大の有毒性）に基づく距離。

表7 通常産業の輸送活動をリスク評価の対象とすべきかどうかの目安（交通量）  
(IAEA, 1996, Table III(b))

産業活動			交通量 (台/年)	
輸送	ガス輸送	道路	>50	
		鉄道	一般	>500
			入れ替え	>50
			ヤード	>500
		水路	>50	
		液体輸送	道路	>5,000
	鉄道		一般	>50
			入れ替え	>50
			ヤード	>20
	水路		>200	
	爆発物輸送		道路	>20
		鉄道	一般	>20
入れ替え			>50	
ヤード			>500	
水路		>50		



表 8 典型的人口密度の例 (IAEA, 1996, Table VI)

地域の特徴	人口密度 (人/ヘクタール)
農場、まばらな民家	5
個別の家屋が点在する地区	10
村、閑静な住宅地	20
住宅地	40
密集住宅地	80
繁華街、商店街、街の中心部	160

表 9 雲が広がる各パターン I、II および III の事故発生地点を中心とする円内で影響をうける人口に関する補正係数 ( $f_a$ ) (IAEA, 1996, Table VII)

影響範囲カテゴリ	円周内の人口分布 (%)				
	100%	50%	20%	10%	5%
I	1	0.5	0.2	0.1	0.05
II	1	1	0.4	0.2	0.1
III	1	1	1	1	1

表 10 事故対応作業による影響緩和係数( $f_m$ ) (IAEA, 1996, Table VIII)

危険物及び (検索番号)	係数
可燃物 (1-12)	1
爆発物 (14, 15)	0.1
有毒ガス (30-34, 37-39, 40-42)	1
可燃物 (1-12)	0.05
爆発物 (14, 15)	0.1
有毒ガス (30-34, 37-39, 40-42)	0.05

上記係数は

- 事故発生からその影響が現われるまでの間に何等かの対策を施すことが出来るかどうか、
- 影響を受ける住民が事故発生以降に防護、待避の可能性を基に作成されている。

### 2.1.2 一般産業の事故の確率計算の指針 (クラス分けの一助として)

IAEA のガイドライン (IAEA, (1996)) は、一般産業のリスクを事故の発生確率でクラス分けする考え方も示している。本節ではガイドラインの例示に従って、施設の事故と危険物輸送中の事故の発生確率に関する考え方と基礎情報を紹介する。

#### 2.1.2.1 施設事故

例えば、プロパンとブタンを保管する 40 kg のシリンダー1700 本の貯蔵所に防火壁とスプリンクラーが設置されており、最も近接する住宅地との距離は 10 m である場合を想定しよう。また、居住地域は半径 100 m の円周内の約 15 % の地域にあるとする。

表 1、表 2 及び表 3 によると、プロパンとブタンを貯蔵するピットのリスクレベルを導く検索番号は 13 である。プロパンとブタンの合計重量は  $0.04 \text{ t} \times 1700 = 68 \text{ t}$  であるから、表 3 から、この施設のカテゴリは CI となる。表 5 によると、カテゴリ CI は事故が及ぼす最大距離が 100 m で、影響を及ぼす面積が 3 ヘクタールであるとされる。ここで表 5 の註釈に示したように数値「I」は「爆発が同心円的にひろがる場合の影響を受ける円の面積」が 3 ヘクタールであることを意味する (図 1 参照)。

表 11 から検索番号 13 の危険物の平均事故  $N^*_{is}$  値が 4 と読み取れる。表 12 の荷積み・降ろし頻度別平均事故  $N^*_{is}$  値の補正係数 ( $n_1$ ) については、同表の註記に従い、このケースは適応されない。表 14 の可燃物に関する平均事故  $N^*_{is}$  値の補正係数 ( $n_p$ ) は、防火壁+1、スプリンクラー・システム+0.5、1700 本のシリンダー貯蔵-1 がそれぞれ与えられる。合計の補正係数は+0.5 となる。表 15 の組織的安全対策に関する平均事故  $N^*_{is}$  値の補正係数 ( $n_o$ ) については、この場合例えば、-0.5 を適用することにする。表 20 から、影響範囲の人口密集地への風向に関する平均事故  $N^*_{is}$  値の補正係数 ( $n_p$ ) (すなわち、居住区域に風向が向く確率) は、カテゴリ I の影響区域に対して円周内の 15 %が居住地区であることから、この場合 0 と読み取れる。したがって、このケースの平均事故  $N^*_{is}$  値は  $4+0.5-0.5=4$  となり、表 21 から同ケースの事故発生確率が  $10^{-4}$ /年と推定される。

表 11 固定施設の平均事故  $N^*_{is}$  値 (IAEA, 1996, Table IX)

危険物 (検索番号)	産業活動	
	貯蔵	処理施設
可燃性液体 (1-3)	8	7
可燃性液体 (4-6)	7	6
可燃性ガス (7)	6	5
可燃性ガス (9)	7	6
可燃性ガス (10, 11)	6	-
可燃性ガス (13)	4	-
爆発物 (14, 15)	7	6
有毒液体 (16-29)	5	4
有毒ガス (30-34)	6	5
有毒ガス (35-39)	6	-
有毒ガス (42)	5	4
燃焼生成物 (43-46)	3	-

表 12 荷積み・降ろし頻度別平均事故  $N^*_{is}$  値の補正係数 ( $n_1$ ) (IAEA, 1996, Table X (a))

荷積み・降ろし頻度 (回/年) <sup>a</sup>	補正係数
1-10	+0.5
10-50	0
50-200	-1
200-500	-1.5
500-2,000	-2

註記 a : パイプラインと検索番号 13 に示されるシリンダー貯蔵を除く全ての作業。  
事故の影響を計算する際、船、道路・鉄道、タンク・自動車、又はタンクローリー・自動車の荷積み、荷降ろし作業の量を考慮することが大切である。船の場合は、港湾施設での衝突の可能性を考慮することが必要である (表 13 参照)。

表 13 荷積み・降ろし頻度別平均事故  $N^*_{is}$  値の補正係数 ( $n_1$ ) (IAEA, 1996, Table X(b))

(I) 港湾内を通過する年間船舶数	
300-3,000	-3
3,000-30,000	-4
30,000-300,000	-5
(II) 荷積み・降ろし作業を行う年間船舶数	
30-300	-2
300-3,000	-3
3,000-30,000	-4
(III) 1回の荷積み・降ろし作業にかかる平均時間	
1時間	0
3時間	-0.5
10時間	-1

- ・ 荷積み・降ろし作業以外に、港湾施設内での船舶同士の衝突も、荷積み・降ろし用船舶へ損害を与えることが有り得る。
- ・ 事故の確率は  $10 + (I) + (II) + (III)$  により計算される。
- ・ 事故確率の計算は、平均的な荷積み・降ろし作業を行う船舶の平均的なタンクの中のひとつについて行う。

表 14 可燃物に関する平均事故  $N^*_{is}$  値の補正係数 ( $n_f$ ) (IAEA, 1996, Table XI)

危険物 (検索番号)	安全対策 (シリンダ数)	補正係数
可燃性ガス (7, 13)	スプリンクラー・システム	+0.5
可燃性ガス (10)	2重容器	+1
可燃性ガス (13)	防火壁	+1
	スプリンクラー・システム	+0.5
	5-50個の貯蔵中シリンダ	+1
	50-500個の貯蔵中シリンダ	0
	500個以上の貯蔵中シリンダ	-1

表 15 組織的安全対策に関する平均事故  $N^*_{is}$  値の補正係数 ( $n_o$ ) (IAEA, 1996, Table XII)

組織的安全対策の状況	補正係数
産業界において実践されている安全対策よりも上のレベル	+0.5
産業界において実践されている安全対策	0
産業界において実践されている安全対策以下のレベル	-0.5
産業界において実践されている安全対策に比べてお粗末なもの	-1
安全対策が存在しない場合	-1.5

組織的安全対策: 安全管理、施設年齢、保守管理、手順書類、安全カルチャー、訓練、緊急時対策等の幾つかの要素が含まれる。

### 2.1.2.2 危険物輸送中の事故

例えば、LPG を輸送する年間 4,000 台のタンクローリーと中レベルの毒性を持つガス（例えばアンモニア）を輸送する年間 200 台のタンクローリーが 1,200 m の距離の区間を走っており、この区間は道路片側が人口密集地で、信号や路線の区分などによる対策による交通の安全は充分施されていないとする。

表 1、表 2 および表 3 によると、LPG は加圧により液化する可燃性ガスで、検索番号は 7 である。アンモニアは中レベルの毒性ガスで、検索番号は 31 である。LPG の 1 台のタンクローリーにより輸送可能な量は 10 t から 50 t であることを考慮すると、表 3 および表 5 から、この輸送中の事故の影響カテゴリーは CI（最大影響距離は 100 m で、影響区域面積は 3 ha）となる。また、アンモニアの 1 台のタンクローリーによる輸送可能な量も、5 t から 10 t であることから、表 3 および表 5 から、この輸送中の事故の影響カテゴリーは CII（最大影響距離は 100 m で、影響区域面積は 1.5 ha）となる。また数値「II」は「時間遅れで爆発する場合もあるような重たい可燃性ガスの雲、または可燃性液体の大きなプールの蒸発によって生ずる雲の半円の面積」が 1.5 ha であることを示す。

表 16 から、検索番号 7 の LPG 輸送の平均事故  $N^*_{ts}$  値及び検索番号 31 の毒性ガスの平均事故  $N^*_{ts}$  値は共に 9.5 と読み取れる。道路輸送における安全確保状況別の平均事故  $N^*_{ts}$  値の補正係数 ( $n_c$ ) は表 17 から LPG 輸送、アンモニア輸送の両方の場合共に -1 となる（信号や路線の区分などによる対策による交通の安全は充分施されていないとする上の想定に基づく）。また、交通量による補正係数 ( $n_{\delta}$ ) は表 19 から、LPG 輸送の場合は -3.5、アンモニア輸送については -2 となる。影響を受けるであろう範囲の人口密集地への風向に関する表 20 から、平均事故  $N^*_{ts}$  値の補正係数 ( $n_p$ ) は、LPG 輸送事故の場合にカテゴリ I の影響区域で 0 となり、アンモニア輸送事故の場合に道路の片側が人口密集地（50%）であることから、カテゴリ II の影響区域については +0.5 となる。

以上から、LPG 輸送事故の平均事故  $N^*_{ts}$  値は、 $9.5 - 1 - 3.5 = 5$  となり、表 21 から、このケースの事故発生確率は  $10^5$ /年となる。また、アンモニア輸送事故の平均事故  $N^*_{ts}$  値は、 $9.5 - 1 - 2 + 0.5 = 7$  となり、表 21 から、このケースの事故発生確率は  $10^7$ /年となる。

表 16 危険物輸送中の事故に関する平均事故 $N^*_{ts}$ 値 (IAEA, 1996, Table XV)

危険物 (検索番号)	輸送方法			
	道路	鉄道	水路	パイプライン
可燃性液体 (2)				6
可燃性液体 (5)				5
可燃性液体 (3, 6)	8.5	9.5	7.5	3
			9 <sup>a</sup>	
可燃性ガス (7)	9.5	10.5		
可燃性ガス (8)				6
可燃性ガス (9)			10	
可燃性ガス (11)			9	
可燃性ガス (12)				6
爆発物 (14)			8	
有毒液体 (19, 23, 27)	9	10		
有毒液体 (20, 24, 28)	7.5	8.5	6.5	
			8a	
有毒ガス (31, 32)	9.5	10.5	9	
有毒ガス (36, 37)			8	6
			7.5	
有毒ガス (40, 41, 42)			9a	5b

“a” : 二重船倉

“b” : 水に接触することにより腐食しやすい危険物の場合

表 17 道路、船舶及びパイプラインによる輸送システムの安全確保状況別の平均事故 $N^*_{ts}$ 値の補正係数 ( $n_c$ ) (IAEA, 1996, Table XVII (a))

	道路	船舶	パイプライン
安全 <sup>a</sup>	+1	+0.5	+1
平均 <sup>b</sup>	-	-	-
不安全 <sup>c</sup>	-1	-0.5	-1

“a” 例 :

- 1) 踏み切り、交叉点の無いルート、もしくは交通量の少ない、または全く無いルート
- 2) 運搬車専用レーンのある道路
- 3) 広く、真っ直ぐな水路
- 4) 最新の規制と特別な安全対策の講ぜられているパイプライン

” b” 安全、不安全のいずれの категорияにも属さない場合

“c” 例 :

- 1) 頻繁に事故が起こることによって知られているルート
- 2) 交通量の多い合流点のある道路、急な曲がりのある分岐点、信号の無い道路、滑りやすい舗装道路
- 3) カーブのある水路、交叉点のある水路、フェリー交通路になっている水路、荷物の積み替え投錨地のある水路、橋や水門などの障害物のある水路
- 4) パイプラインについて、古いもの、古い基準で作られたもの、設置地点が明らかでない埋設もの、および設置地点が明確に地図上に示されていないもの

表 18 鉄道輸送システムの安全確保状況別の平均事故  $N^*_{ts}$  値の補正係数( $n_C$ )  
(IAEA, 1996, Table XVII(b))

		補正係数
標準の線路	標準	-
	混成列車	-1
産業用線路 <sup>a</sup>		-1
入れ替えヤード (もしくは操車場)	勾配のある場所での操車	-3
	蒸気機関車や自由走行車両のある場所での操車	-3
	蒸気機関車と一緒に編成される車両の操車	-2
	完全に編成された列車のみの操車場	-1
	悪状況において車両を通過させる場合 <sup>b</sup> 又は 悪状況において車両を入れ替える場合 <sup>c</sup>	-1

“a” 特に、施設等への引き込み線 “b” 漏洩が頻繁に起きる等

“c” 当該区域への入域が管理されていない場合、投棄された土壌がある場合、線路の設置状態が悪い場合、人手で作業が行われるなどの場合

表 19 交通量別の平均事故  $N^*_{ts}$  値の補正係数 ( $n_{t\delta}$ ) (IAEA, 1996, Table XVIII)

年間の車両・船舶の交通量	補正係数 ( $n_{t\delta}$ )
10-50	-1.5
50-200	-2
200-500	-2.5
500-2000	-3
2000-5000	-3.5
5000-20000	-4

表 20 雲が広がる各パターン I、II および III にて、事故発生地点の同心円内で影響を受ける人口に関する平均事故値の補正係数 ( $n_p$ ) (IAEA, Table XIII; XIX)

影響区域のカテゴリ	公衆の居住する部分の面積の割合 (%)				
	100%	50%	20%	10%	5%
I	0	0	0	0	0
II	0	+0.5	+0.5	+0.5	+0.5
III	0	+0.5	+0.5	+1	+1.5

表 21 平均事故  $N^*_{ts}$  値から事故発生確率 P (回/年) への換算表 (IAEA, 1996, Table XIV; XX)

N	P	N	P	N	P
0	$1 \times 10^0$	5	$1 \times 10^{-5}$	10	$1 \times 10^{-10}$
0.5	$3 \times 10^{-1}$	5.5	$3 \times 10^{-6}$	10.5	$3 \times 10^{-11}$
1	$1 \times 10^{-1}$	6	$1 \times 10^{-6}$	11	$1 \times 10^{-11}$
1.5	$3 \times 10^{-2}$	6.5	$3 \times 10^{-7}$	11.5	$3 \times 10^{-12}$
2	$1 \times 10^{-2}$	7	$1 \times 10^{-7}$	12	$1 \times 10^{-12}$
2.5	$3 \times 10^{-3}$	7.5	$3 \times 10^{-8}$	12.5	$3 \times 10^{-13}$
3	$1 \times 10^{-3}$	8	$1 \times 10^{-8}$	13	$1 \times 10^{-13}$
3.5	$3 \times 10^{-4}$	8.5	$3 \times 10^{-9}$	13.5	$3 \times 10^{-14}$
4	$1 \times 10^{-4}$	9	$1 \times 10^{-9}$	14	$1 \times 10^{-14}$
4.5	$3 \times 10^{-5}$	9.5	$3 \times 10^{-10}$	14.5	$3 \times 10^{-15}$

ここで、 $N = |\log_{10} P|$

### 2.1.3 事故・リスクのクラス分け

一般産業施設の事故並びに危険物の輸送中の事故の規模を、上に紹介したように推定死亡者数（2.1.1 節）並びに事故発生確率（2.1.2 節）によって表し、更にこれらを用いてリスクのクラス分けを行うことが出来る。例えば1事故当たりの死亡者の数を、0-25、26-50、51-100、101-250、251-500 および>500の6クラスに分類し、また、事故の発生確率を対数目盛りの桁毎に、 $10^{-3}$ から $10^{-10}$ までクラス分けすると、異なる事故を同一の表に整理することが出来る。

例えば、或るLPG貯蔵施設の事故による推定死亡者数が120人で、その事故発生確率が $3 \times 10^{-5}$ だったとしよう。また、或る危険物T1の道路輸送時の事故による推定死亡者数が6人で、その事故発生確率が $1 \times 10^{-5}$ 、危険物T2の道路輸送時の事故による推定死亡者数が50人で、その事故発生確率が $3 \times 10^{-6}$ 、危険物T3の道路輸送時の事故による推定死亡者数が4人で、その事故発生確率が $1 \times 10^{-4}$ 、危険物T4の道路輸送時の事故による推定死亡者数が45人で、その事故発生確率が $1 \times 10^{-6}$ だったとしよう。以上の異なるタイプの事故は、図3のようなマトリクス表に整理出来る。

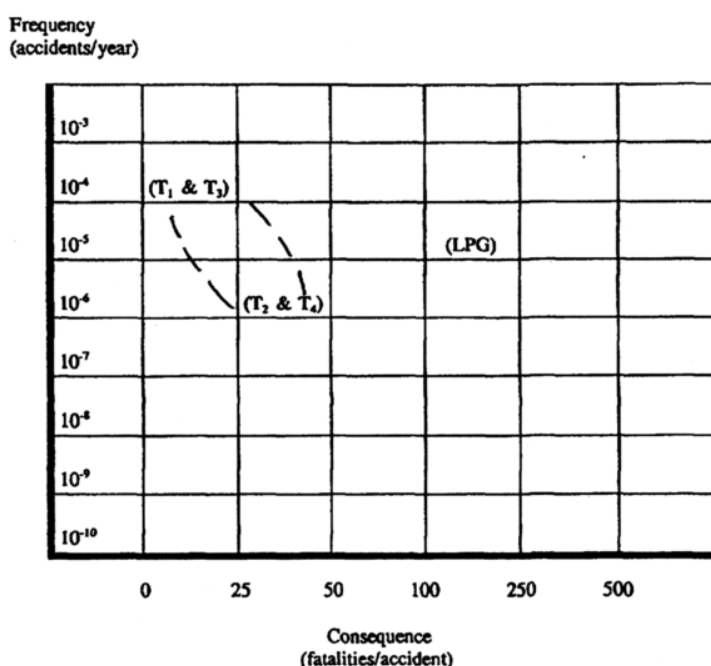


図3 事故リスクのクラス分けの為の事故の影響（死亡者数）と事故発生確率のマトリクス例 (IAEA, 1996, Fig. 9)

### 2.1.4 IAEAによる原子力事故の尺度

本章は原子力以外の一般産業の事故に関する事項を説明しているが、前節までに事故の規模、レベルのクラス分けについて紹介して来た関係で、ここで現在知られている原子力事故の規模のクラス分けの考え方との違いについて少々触れておく。

原子力事故の規模を測る尺度としては、IAEAのINES事故評価尺度が知られている（表22）。同尺度は原子力施設の事故・事象の重要度を迅速に一般公衆に知らしめることを目的として作られており、原子力の専門家が見ても、報道関係者や一般公衆が見ても理解できる言葉で書かれている。

加盟 60 ヶ国のどこかで原子力施設の事故が発生すると、当該国の関係官庁に置かれている INES 担当官が同尺度による評価値（0～7）を IAEA を通じて加盟各国へ連絡することになっている。

表 22 に示す様に、INES 事故評価尺度は 7 つのレベルを用いて、事故の規模を値付けする仕組みである。レベル 4 から 7 が「事故」、レベル 1 から 3 は「事象」と区別される。安全上、有意な影響のない出来事については、同尺度に満たないものとして、ゼロが当てられ、「逸脱」と区分される。また、安全と関係の無い出来事は「尺度外の出来事」と区分される。

表 22 の第 2 列目は、施設外放出がどう起きるかの観点でレベル分けを行う目安を示す。この観点こそが唯一公衆への影響を測る目安である為、INES 事故評価尺度による判定においても、特に注意が払われている。この列の最低線（レベル 3）は、年間の公衆の被ばく限度の約 10 分の 1 を与えるような放出を区分の目安としている。なお、その被ばく線量は、同時に天然の放射線から公衆が受ける年間被ばく線量の約 10 分の 1 に相当するものである点にも留意されたい。一方、この列の最高のレベルは、広範囲の環境と健康への影響をもたらす過酷事故を示すものである。

表 22 の第 3 列目は、施設内の影響の観点でレベル分けを行う目安を示す。このカテゴリーはレベル 2（従事者の汚染もしくは被ばく）からレベル 5（炉心もしくは放射能バリアの損傷）までを区分する目安を与える。

表 22 の第 4 列目は、原子力施設内、施設外への事故影響を防ぐ多重防護措置・施設に影響を及ぼすかどうかの観点（Defense in Depth を如何に侵害するか）でレベル分けを行う目安を示す。例えばこのカテゴリーの最大はレベル 3 であるが、これは施設外放出が起きる最小レベルに相当し、原子力施設の施設外放出を防ぐ多重防護システムの最後が破られる状況をひとつの目安にしていることを表す。表 23 に示す「INES 事故評価尺度による過去の事故の評価例」の中のスペインのバンデロス発電所事故は、この事故が施設外放出も炉心損傷も起きなかったものの、施設の安全系統に火災が影響を及ぼした点が注目され、レベル 3 と判定された例である。

INES 事故評価尺度には、その適応に幾つかの限界がある。例えば、研究炉や原子燃料取扱施設及び廃棄物貯蔵施設については、構造が発電施設と異なることから、たとえこれらが施設外放出を伴う事故を起したとしても、レベル 4 から 7 の値は適応出来ないという議論がある。また、同尺度は一般産業事故や他の原子力や放射線に関係の無い事故には適応出来ないという制限を付けている。同尺度においては、それらの事故は「尺度外」と評定される。例えば、タービンや発電機の事故においては、もしそれらが原子炉安全施設に影響したり、放射線障害を起したりしない限り、「尺度外」とクラス分けされる。また、火災事故などにおいても同様である。

1980 年代の中頃から 1996 年までの約 10 年間、UNEP、UNIDO および WHO と共同して、IAEA が実施した「エネルギーと他の高度化された産業システムからの健康と環境への影響評価及びマネージメントに関する国際機関共同プロジェクト」においても、一般産業の事故のリスクのレベルと原子力産業における事故のリスクレベルを比較する試みが存在した。本報告書の本文における調査は、この未検討の部分を検討し、原子力の事故と一般産業の事故を比較した例であるといえる。



表 22 INES 事故評価尺度の概念

	安全上の属性による判定の規準			
	施設外への影響	施設内での影響	Defense in Depth の低下	
レベル 7 過酷事故	大放出： 広範な環境と健康への影響			
レベル 6 重過酷事故	重大な放出： 多くの場合緊急時対策計画 の全面実施が必要			
レベル 5 施設外へ影響するリスクを 伴う事故	限定された放出： 多くの場合緊急時対策計画 の部分的実施が必要	・炉心／放射能バリアの過 酷な損傷		
レベル 4 重要な施設外へ影響するリ スク伴わない事故	小規模な放出： 規定されたレベル以内の公 衆被ばく	・炉心／放射能バリアの無 視し得ない損傷 ・従事者の致死線量被ばく		
レベル 3 重大事象	極めて少ない放出： 規定されたレベルを数分の 一下回る公衆被ばく	・汚染の過酷拡散 ・従事者の急性障害		・事故の一步手前 ・安全を保つべき重層構造 は最後のところまで破られ た。
レベル 2 事象		・無視出来ない汚染拡大 ・従事者の過剰被ばく		・安全機能の無視し得ない 欠損／失敗を伴う事象
レベル 1 異常			・運転規則に認められる範 囲を超えた異常	
レベル 0 逸脱	無し	安全	無視出来ない	
尺度外の出来事	安全性に関係なし			

表 23 INES 事故評価尺度による過去の事故の評価例

発生年	場所	概要	INES 尺度
1986	チェルノブイリ (ソ連)	原子力発電所の炉心崩壊により、 広範な環境と健康影響をもたらした。	7
1957	キュシュチュム (ソ連)	再処理工場からの過酷施設外放出 により、周辺住民の避難などの対 策がとられた。敷地外放出があっ た点で、レベル6と判定される。	6
1957	ウインズケール (英国)	ガス冷却グラファイト減速炉の損 傷により、放射能の環境への放出 が発生した。敷地外への影響があ った点で、レベル5と判定され る。	5
1979	スリーマイルアイランド (米国)	加圧水型軽水炉の炉心の過酷損傷 により、限られた量の放射能の外 部放出が発生した。敷地内への影 響があった点で、レベル5と判定 される。	5
1973	ウインズケール (英国)	再処理工場の処理過程における発熱 事故により施設内に放射能汚染が 発生した。	4
1980	サン・ローラン (フランス)	原子炉が一部損傷したが、外部放 出には至らなかった。	4
1983	ブエノスアイレス (アルゼンチン)	臨界実験装置の作業中の事故によ り作業員が死亡。	4
1999	東海村 (日本)	燃料加工施設での臨界事故によ り、作業員2名が死亡。周辺住民の 避難が行われた。	4
1989	バンデロス (スペイン)	発電所の炉心損傷に至らない事 故。環境への放出も無し。しか し、安全系に影響の及ぶ火災とい う点で、Defense in Depth を脅かし た点で、レベル3と判定される。	3

付録 参照文献

IAEA (1996), “Manual for the classification and prioritization of risks due to major accidents in process and related industries, Inter-Agency Programme on the Assessment and Management of Health and Environmental Risks form Energy and Other Complex Industrial Systems, IAEA-TECDOC-727 (Rev. 1).

This is a blank page.



