



JAEA-Review

2011-024

GIF/PRPPWG/2006/005

「GEN IV 原子力システムの核拡散抵抗性及び
核物質防護評価手法 Rev.5」
—GIF PRPP ワーキンググループ報告書—
(仮訳)

Introduction to the Revision 5 of Evaluation Methodology for Proliferation Resistance
and Physical Protection of Generation IV Nuclear Energy Systems

川久保 陽子 井上 尚子 千崎 雅生

Yoko KAWAKUBO, Naoko INOUE and Masao SENZAKI

核物質管理科学技術推進部

Department of Science and Technology for Nuclear Material Management

December 2011

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Review

本レポートは OECD/NEA から以下のホームページで提供される第 4 世代原子力システム国際フォーラム (GIF) のレポートを、OECD/NEA の了解のもとに日本語に翻訳したものです。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。原文(英語)は以下の OECD/NEA ホームページから発信されています。

<http://www.gen-4.org/Technology/horizontal/PRPPEM.pdf>

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 Japanese translation of the report entitled “Evaluation Methodology for Proliferation Resistance and Physical Protection of Generation IV Nuclear Energy Systems Rev.5” prepared by the Generation IV International Forum (GIF) is produced with its permission. The original report issued by the OECD/NEA is available at <http://www.gen-4.org/Technology/horizontal/PRPPEM.pdf>. Inquiries about availability of this translation 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, Email: ird-support@jaea.go.jp

This Japanese translation is not an official OECD/NEA or GIF translation; hence, the latter do not guarantee its accuracy and accept no responsibility for any consequences of its interpretation or use.

© Japan Atomic Energy Agency, 2011

© OECD/NEA for GIF, 2011

「GEN IV 原子力システムの核拡散抵抗性及び核物質防護評価手法 Rev.5」
－GIF PRPP ワーキンググループ報告書－
(仮訳)

日本原子力研究開発機構 核物質管理科学技術推進部

川久保 陽子、井上 尚子、千崎 雅生*

(2011年5月11日受理)

第四世代原子力システム核拡散抵抗性及び核物質防護評価手法ワーキンググループは GIF PRPP WG と呼ばれ、同国際フォーラム(GIF)下のクロスカット研究グループとして 2002年12月に設立された。本グループは GIF で検討されている原子力エネルギーシステムの核拡散抵抗性と核物質防護について評価する手法を開発することを目的とし、現在は米国の国立研究所を中心に、カナダ、フランス、韓国、日本、国際原子力機関(IAEA)、欧州連合(EU)からのメンバーで構成されている。「GEN IV 原子力システムの核拡散抵抗性及び核物質防護評価手法」Revision 5 報告書は「Rev.5 報告書」とも呼ばれ、本 WG で開発された評価手法の重要な枠組みが記載されている。Rev.5 報告書はコンセンサスベースの議論により作成され、2006年11月に OECD-NEA より発行された。

本活動は PR&PP 文化の確立に寄与しているという点でも評価されており、国際的な将来システムの核拡散抵抗性の議論に大きな影響を及ぼしている。わが国においても次世代核燃料サイクルを開発する上で、拡散抵抗性を十分に有しているシステムを設計・開発していくのは勿論のこと、それを国内外に適確に説明し、理解を得ていくことが必須である。このため、この Rev.5 報告書は、わが国の次世代核燃料サイクルの開発や関連研究の進展に有用であると考え、OECD-NEA の同意を得て翻訳し、日本語版として刊行することにした。

原著(英語)は OECD-NEA のウェブサイト*1 から入手可能である。

本報告書では、原著の内容にできるだけ忠実に紹介しながら、ただし、用語の和訳は慎重を期したつもりである。しかし、適切な和訳が難しい場合は原語を併記した。本報告書が GIF PR&PP の評価手法と最近の核拡散抵抗性についての国際的な議論の状況について理解の一助となれば幸いである。本報告書の刊行に同意をいただいた OECD-NEA、GIF PRPP WG 共同議長に感謝の意を表す。

*1 <http://www.gen-4.org/Technology/horizontal/proliferation.htm>

Introduction to the Revision 5 of Evaluation Methodology for Proliferation Resistance and Physical Protection of Generation IV Nuclear Energy Systems

Yoko KAWAKUBO, Naoko INOUE and Masao SENZAKI*

Department of Science and Technology for Nuclear Material Management
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received May 11, 2011)

The Generation IV (GEN IV) International Forum (GIF) Proliferation Resistance and Physical Protection Working Group (PRPP WG) was established in December, 2002, as one of the crosscut groups under GIF, in order to develop a methodology for evaluating Proliferation Resistance & Physical Protection of potential GEN IV options. The group currently consists of the experts from the U.S. national laboratories and universities, from Canada, France, Republic of Korea (ROK), Japan, the International Atomic Energy Agency (IAEA), and European Union (EU). Revision 5 of the “Evaluation Methodology for Proliferation Resistance and Physical Protection of Generation IV Nuclear Energy Systems” is also known as the Rev. 5 report. The Rev. 5 report provides an important evaluation framework that was developed with consensus-based discussions, and published by the OECD-NEA in November, 2006.

The activities of PRPP WG has contributed to establish PR&PP culture, in addition, they have affected the discussion on the proliferation resistance of the future nuclear fuel cycle. Japan has to develop the future nuclear cycle system with sufficient proliferation resistance and physical protection features and demonstrate and explain about its effective NESs to the domestic and international society. For these reasons, and recognizing the usefulness of the Revision-5 Report, it was translated and published here as a Japanese-language edition with the concurrence of the OECD-NEA. The original report in English language can be downloaded at the OECD-NEA website.*¹

The translation sticks as closely as possible to the original, and that of technical terms were carefully done. If a term cannot be translated appropriately into Japanese, the original English wording is also put down. Safeguards terms were translated with reference to “IAEA Safeguards Glossary 2001 Edition” (Japanese), Published by the Nuclear Material Control Center Japan (NMCC). The authors are grateful to the GIF PRPP WG Co-chairs, and the OECD-NEA for their assistance in publishing the Japanese version of the Rev.5 report.

*1 <http://www.gen-4.org/Technology/horizontal/proliferation.htm>

Key words: Proliferation Resistance, GIFPR&PP

*Scientific Consultant (Integrated Support Center for Nuclear Nonproliferation and Nuclear Security)

目次

一般免責条項	1
核拡散抵抗性及び核物質防護評価手法ワーキンググループ	3
要旨	5
要約	6
1. 序論	11
1.1 報告書概要	11
1.2 背景	12
1.3 過去の活動のレビューと並行して実施されている取組み	13
1.3.1 拡散抵抗性に関するこれまでの取組み	13
1.3.2 核物質防護に関するこれまでの取組み	15
1.3.3 GIF と並行して行われている国際的取組み	16
1.4 評価手法のアプローチ	16
1.4.1 チャレンジの定義	17
1.4.2 システム応答	18
1.4.3 結果	21
1.5 手法の実施	21
1.5.1 プロセス管理／作業の定義	22
1.5.2 作業の実施	24
1.5.3 作業の報告	24
2. 評価手法	26
2.1 チャレンジ	26
2.1.1 ホスト国の脅威の定義(PR)	26
2.1.2 非ホスト国の脅威の定義(PP)	28
2.2 システム応答	29
2.2.1 システム要素の特定	29
2.2.2 ターゲットの特定	30
2.2.3 ターゲットの分類	35
2.2.4 パスウェイ特定及び精緻化	41
2.2.5 指標の評価	46
2.3 結果	58
2.3.1 パスウェイ比較	58
2.3.2 システム評価及び結果の表示	61
3. 総括及び結論	65
参考文献	66
付録1 用語解説	70
付録2 略語表	74

CONTENTS

DISCLAIMER 1

Proliferation Resistance and Physical Protection Evaluation Methodology Expert Group..... 3

ABSTRACT 5

EXECUTIVE SUMMARY..... 6

1. INTRODUCTION..... 11

1.1 Overview of the Report11

1.2 Context12

1.3 Review of Previous Work and Concurrent Activities13

 1.3.1 Previous Work on Proliferation Resistance13

 1.3.2 Previous Work on Physical Protection15

 1.3.3 Concurrent Related International Activities16

1.4 Evaluation Methodology Approach16

 1.4.1 Definition of Challenges17

 1.4.2 System Response18

 1.4.3 Outcomes21

1.5 Implementation of the Methodology21

 1.5.1 Managing the Process/Defining the Work.....22

 1.5.2 Performing the Work24

 1.5.3 Reporting the Work24

2 EVALUATION METHODOLOGY26

2.1 Challenges.....26

 2.1.1 Host-State Threat Definition (PR).....26

 2.1.2 Non-Host State Threat Definition (PP).....28

2.2 System Response29

 2.2.1 System Element Identification.....29

 2.2.2 Target Identification30

2.2.3 Target Categorization35

2.2.4 Pathway Identification and Refinement.....41

2.2.5 Estimation of Measures46

2.3 Outcomes58

2.3.1 Pathway Comparison58

2.3.2 System Assessment and Presentation of Results61

3 SUMMARY AND CONCLUSIONS 65

REFERENCES..... 66

Appendix 1GLOSSARY 70

Appendix 1 LIST OF ACRONYMS..... 74

図リスト

- 図 ES.1 : PR&PP 評価手法の基本的枠組み
- 図 ES.2 : PR&PP 評価手法の詳細枠組み
- 図 1.1 : PR&PP 評価手法の主要なステップ
- 図 1.2 : システム応答のステップ
- 図 1.3 : PR&PP 評価プロセスにおける主要なステップ
- 図 2.1 : PR&PP のためのパスウェイ解析の主要なステップ
- 図 2.2 : パスウェイの精緻化
- 図 2.3 : 4つのパスウェイのための表 2.12 のデータを用いた bin 値の比較

表リスト

- 表 2.1 : PR&PP 脅威の要素
- 表 2.2 : エリアアクセス性カテゴリー例
- 表 2.3 : 核爆発装置に使用可能な核物質の PP のための DOE 保障措置カテゴリー I ~IV
- 表 2.4 : 装置機能の脆弱性カテゴリー
- 表 2.5 : PR 指標のための定量的尺度及びスケール
- 表 2.6 : 拡散の技術的困難性(TD)指標の特性の概要
- 表 2.7 : 拡散コスト(PC)指標の特性の概要
- 表 2.8 : 拡散時間(PT)指標の特性の概要
- 表 2.9 : 核分裂性物質タイプ(MT)指標の特性
- 表 2.10 : 検知確率(DP)指標の特性
- 表 2.11 : 検知リソース効率(DE)指標の特性の概要
- 表 2.12 : ビン値を用いた PR パスウェイ指標の比較
- 表 2.13 : ビン値を用いた PP パスウェイ指標の比較

List of Figures

Figure ES.1: Basic Framework for the PR&PP Evaluation Methodology

Figure ES.2: Detailed Framework for the PR&PP Evaluation Methodology

Figure 1.1: PR&PP Main Methodology Steps

Figure 1.2: System Response Steps

Figure 1.3: Steps in the PR&PP Evaluation Process

Figure 2.1: Major Stages of Pathway Analysis for PR and PP

Figure 2.2: Refinement of Pathways

Figure 2.3: Comparison of Binned Measure Values for Four Pathways Using Data from Table 2.12

List of Tables

Table 2.1: Summary of the PR&PP Threat Dimensions

Table 2.2: Example Area Accessibility Categories

Table 2.3: DOE Safeguards Categories I to IV for Physical Protection of Nuclear Materials Which Can Be Used in a Nuclear Explosive Device

Table 2.4: Example Equipment Function Fragility Categories

Table 2.5: Example Quantitative Metrics and Scales for PR Measures

Table 2.6: Summary of Characteristics for the Proliferation Technical Difficulty (TD) Measure

Table 2.7: Summary of Characteristics for the Proliferation Cost (PC) Measure

Table 2.8: Summary of Characteristics for the Proliferation Time (PT) Measure

Table 2.9: Summary of Characteristics for the Fissile Material Type (MT) Measure

Table 2.10: Summary of Characteristics for the Detection Probability (DP) Measure

Table 2.11: Summary of Characteristics for the Detection Resource Efficiency (DE) Measure

Table 2.12: Comparison of PR Pathway Measures Using Binned Values

Table 2.13: Comparison of PP Pathway Measures Using Binned Values

This is a blank page.

一般免責条項

本報告書は、GEN IV 国際フォーラム(GIF)の核拡散抵抗性及び核物質防護評価手法ワーキンググループ(GIF PRPP WG)によって作成されたものである。GIF も、そのいずれのメンバーも、また GIF メンバー国の政府機関またはその従事者も、公表されたいかなる情報、機器、成果、プロセスの精度、完全性あるいは有用性に関して、いかなる保証も言及もせず、またそれらに対する法的義務や責任を負うものではない。また、本報告書の使用は私的な権利を侵害しないと声明しない。本報告書において、商品名、商標、製造者名、その他を用いて、特定の製品名、プロセス、サービスを記述している場合も、必ずしも、GIF またはそのいずれのメンバーも、あるいは GIF メンバー国の政府機関またはその従事者も、それらに対して支持、推薦、好意を与える、あるいは意味するものではない。ここで表明された著者らの見解や意見は、必ずしも、GIF またはそのメンバー、あるいは GIF メンバー国政府のいかなる機関の見解等を述べ、反映するものではない。

DISCLAIMER

This report was prepared by the Proliferation Resistance and Physical Protection Evaluation Methodology Expert Group of the Generation IV International Forum (GIF). Neither GIF nor any of its members, nor any GIF member's national government agency or employee thereof, makes any warranty, express or implied, or assumes any legal liability or responsibility for the accuracy, completeness or usefulness of any information, apparatus, product, or process disclosed, or represents that its use would not infringe privately owned rights. References herein to any specific commercial product, process or service by trade name, trademark, manufacturer, or otherwise, DOEs not necessarily constitute or imply its endorsement, recommendation, or favoring by GIF or its members, or any agency of a GIF member's national government. The views and opinions of authors expressed therein do not necessarily state or reflect those of GIF or its members, or any agency of a GIF member's national government.

This is a blank page.

核拡散抵抗性及び核物質防護評価手法ワーキンググループ

メンバー

Robert Bari	Co-chair	米国 ブルックヘブン国立研究所(BNL)
Richard Nishimura	Co-chair	カナダ原子力公社(AECL)
Per Peterson	Co-chair	米国 カリフォルニア大学バークレー校
Ike Therios	Technical Director	米国 アルゴンヌ国立研究所(ANL)
Evelyne Bertel	Secretary	経済協力開発機構原子力エネルギー機関(OECD/NEA)
Trond Bjornard		米国 アイダホ国立研究所(INL)
Dennis Bley		米国 Buttonwood Consulting, Inc
Roger Brunt		英国 民間原子力セキュリティ室(OCNS)
Jean Cazalet		フランス原子力庁(CEA)
Jor-Shan Choi		米国 ローレンス・リバモア国立研究所(LLNL)
Giacomo Cojazzi		欧州評議会共同研究センター(EC/JRC, Ispra)
Philippe Delaune		フランス原子力委員会(CEA)
Michael Ehinger		米国 オークリッジ国立研究所(ORNL)
Michael Golay		米国 マサチューセッツ工科大学(MIT)
Eckhard Haas		国際原子力機関(IAEA)
Joseph Pilat		米国 ロスアラモス国立研究所(LANL)
Eric Pujol		国際原子力機関(IAEA)
Gary Rochau		米国 サンディア国立研究所(SNL)
千崎 雅生		(独)日本原子力研究開発機構(JAEA)
Neil Tuley		英国貿易産業省(DTI)
Myung Seung Yang		韓国原子力研究所(KAERI)
Michael Zentner		米国 パシフィック・ノースウェスト国立研究所(PNNL)

その他の協力者

Burus Camahan	Observer	米国 国務省(DOS)
Lap-Yan Cheng		米国 ブルックヘブン国立研究所(BNL)
Hussein Khalil	Liaison	米国 アルゴンヌ国立研究所(ANL)
John Murphy	Liaison	米国 エネルギー省国家核安全保障庁(DOE/NNSA)
Guido Renda		欧州評議会共同研究センター(EC/JRC/ISPRA)
Filippo Sevini		欧州評議会共同研究センター(EC/JRC/ISPRA)
Rob Versluis	Liaison	米国 エネルギー省エネルギー科学技術局(DOE-NE)
Jeremy Whitlock		カナダ原子力公社(AECL)
Edward Wonder	Liaison	米国 エネルギー省国家核安全保障庁(NNSA)
David York		米国 サンディア国立研究所(SNL)
Meng Yue		米国 ブルックヘブン国立研究所(BNL)

過去のグループメンバー及び協力者

Michael Buckland-Smith		英国民間原子力セキュリティ室(OCNS)
David Beck		米国 サンディア国立研究所(SNL)
Kory Budlong-Sylvester		米国 ロスアラモス国立研究所(LANL)
Scott DeMuth		米国 ロスアラモス国立研究所(LANL)
Ragnar Dworschak		カナダ原子力公社(AECL)
Jean-Claude Gauthier		フランス原子力庁(CEA)
James Hassberger		米国 ローレンス・リバモア国立研究所(LLNL)
Glenn Hawkins		英国貿易産業省(DTI)
John Herczeg	Liaison	米国 エネルギー省核エネルギー科学技術局(DOE-NE)
堀 啓一郎		日本 核燃料サイクル開発機構(JNC)
Ed Jones		米国 ローレンス・リバモア国立研究所(LLNL)
Daryl Kalenchuk		カナダ原子力公社(AECL)
倉上 順一		日本 核燃料サイクル開発機構(JNC)
Pierre Legoux		国際原子力機関(IAEA)
Tracia Love		米国 サンディア国立研究所(SNL)
Steve Mladineo		米国 パシフィック・ノースウェスト国立研究所(PNNL)
Michael Modro		米国 アイダホ国立研究所(INL)
Keun-Bae Oh		韓国原子力研究所(KAERI)
Ioannis Papazoglou		米国 ブルックヘブン国立研究所(BNL)
Jon Phillips	Liaison	米国 エネルギー省国家核安全保障庁(DOE/NNSA)
Andre Poucet		欧州評議会共同研究センター(EC/JRC/ISPRA)
John Reynolds		英国民間原子力セキュリティ室(OCNS)
Jordi Roglans	Technical Director	米国 アルゴンヌ国立研究所(ANL)
Thomas Shea		国際原子力機関(IAEA)
Steven Stein	Observer	米国 原子力規制委員会(NRC)
David Tregunno		カナダ原子力公社(AECL)

要 旨

本報告書は第四世代 (GEN IV) 原子力システム (NESs) の拡散抵抗性及び核物質防護 (PR&PP) の評価手法を示すものである。ある NES 設計に対して、本手法は一連のチャレンジを定義し、これらのチャレンジに対するシステム応答を解析してその結果を評価する。NES に対するチャレンジは、潜在的な拡散行為者 (拡散を意図する国家または非国家主体の敵対者) によって引き起こされる脅威である。GEN IV システムが有する技術的及び制度的特性は、システム応答を評価し、拡散脅威に対するシステムの拡散抵抗性、妨害破壊行為及びテロの脅威に対する堅牢性を明らかにするために用いられる。システム応答の結果は、拡散抵抗性 (PR) については 6 つの指標 (measures)、核物質防護 (PP) については 3 つの指標によって表現される。この手法は、システム設計の最も初期の段階でも評価が可能で、かつ、設計が進むにつれて評価がより詳細かつ代表性が高くなるように作られている。結果には不確実性が伴うが、不確実性はすべての段階において評価に組み込まれている。評価結果は 3 つのタイプのユーザー、すなわち、システム設計者、政策決定者、及び外部の利害関係者が使用することを想定している。政策決定者は選択肢の中から選択をするためのハイレベル(代表的な)指標に関心があるであろう。一方、システム設計者はその NES の PR&PP 性能を改善するような、設計上の選択肢に直接関連する指標により関心を持つであろう。

要 約

第四世代(GEN IV)原子力システム(NESs)の技術目標は、四つの目標分野の一つである核拡散抵抗性と核物質防護(PR&PP)を、持続可能性、安全性及び信頼性、経済性とともにも重要視している。

GEN IV 原子力システムは、兵器使用可能物質の転用や盗取を企図する者にとって非常に非魅力的で、最も望ましくないルートであり、また、テロ行為に対して強化された核物質防護を提供することをより確実なものとする。

核拡散抵抗性は、核兵器または他の核爆発装置の獲得を目的とした、ホスト国¹による、未申告の核物質の生産や転用及び技術の不正使用を妨げる NES の特性である。

核物質防護 (堅牢性) は、敵対する非国家主体や非ホスト国による、核爆発装置あるいは放射能拡散兵器(RDDs)に適した物質の盗取及び施設や輸送の妨害破壊行為を妨げる NES の特性である。

GEN IV のロードマップは、NESs を PR&PP の観点から評価するための評価手法を開発するよう勧告した。これに呼応して、GEN IV 国際フォーラム(GIF)は 2002 年 12 月に手法開発のための専門家グループを設置した。本報告書はその PR&PP 評価手法を示すものである。

図 ES.1 は評価手法の最も基本的なアプローチを図解したものである。あるシステムに対して、解析者は一連の**チャレンジ(脅威シナリオ)**を定義し、これらのチャレンジに対する**システム応答**を解析し、その**結果**を評価する。NES に対するチャレンジは潜在的な拡散国家や敵対する非国家主体による脅威である。GEN IV システムの技術的及び制度的な特性により、システムの応答を評価し、拡散の脅威に対するシステムの**拡散抵抗性**と、妨害破壊行為及びテロの脅威に対するシステムの**堅牢性**を評価する。システム応答の結果は、PR&PP の**指標(measures)**で表され、評価される。

評価手法を使用する際には、システムの内在的及び外在的な防護特性を含めて少なくとも NES の概念設計または詳細設計が完了していることを前提とする。内在的特性はシステムの物理的・工学的な側面を含み、外在的措置は保障措置のような制度的側面を含む。PR&PP 評価の主眼は内在的特性と外在的措置の相互作用を明らかにし、その相互作用を研究して最適な設計に導くことにある。



図 ES.1 PR&PP 評価手法の基本的枠組み

¹ホスト国とは自国内に原子力システムを所有する国を意味する。

PR&PP 評価手法は NES の燃料サイクル全体にも、またその一部に対しても適用できる。この手法はシステム設計の進行と共に、より詳細に、より代表性の高い評価が可能となる進歩的なアプローチとして作られている。核拡散抵抗性と核物質防護の堅牢性を GEN IV の NESs の設計に系統的に組み込むために、プロセス系統図が開発される設計の最初期に、持続可能性、安全性及び信頼性と経済性や他の技術目標と共に PR&PP の観点から評価が実施されるべきである。

この手法は、設計者、政策決定者、外部の利害関係者に対し、基本プロセスの選定(例えば、リサイクルプロセスや燃料のタイプ)から、装置や機構の詳細配置や、施設の実証試験まで、初期の有用なフィードバックを与えることになる。

図 ES2 に、本評価手法の概要を詳細に示す。最初のステップは脅威の定義である。PR、PP とも、脅威の定義においてシステムが直面する可能性のあるチャレンジが描出され、これには(拡散の)行為者とその戦略が含まれる。PR については、行為者は NES のホスト国であり、脅威の定義には拡散の目的とホスト国の能力・戦略の両方が含まれる。PP の脅威では、行為者は敵対する非国家主体または非ホスト国である。PP 上の拡散行為者の特性は、目的(盗取か妨害破壊行為か)や行為者の能力及び戦略によって決まる。

標準脅威セット (RTS: a standard Reference Threat Set) を定義することで、異なる評価間の比較が容易になる。これは、行為者、能力、及び戦略の範囲をカバーする形で定義される。標準脅威セットは、核燃料サイクル施設の設計と開発のプロセスを通じて進展し、最終的には規制措置が基づくべき設計基準脅威(DBTs)となる。

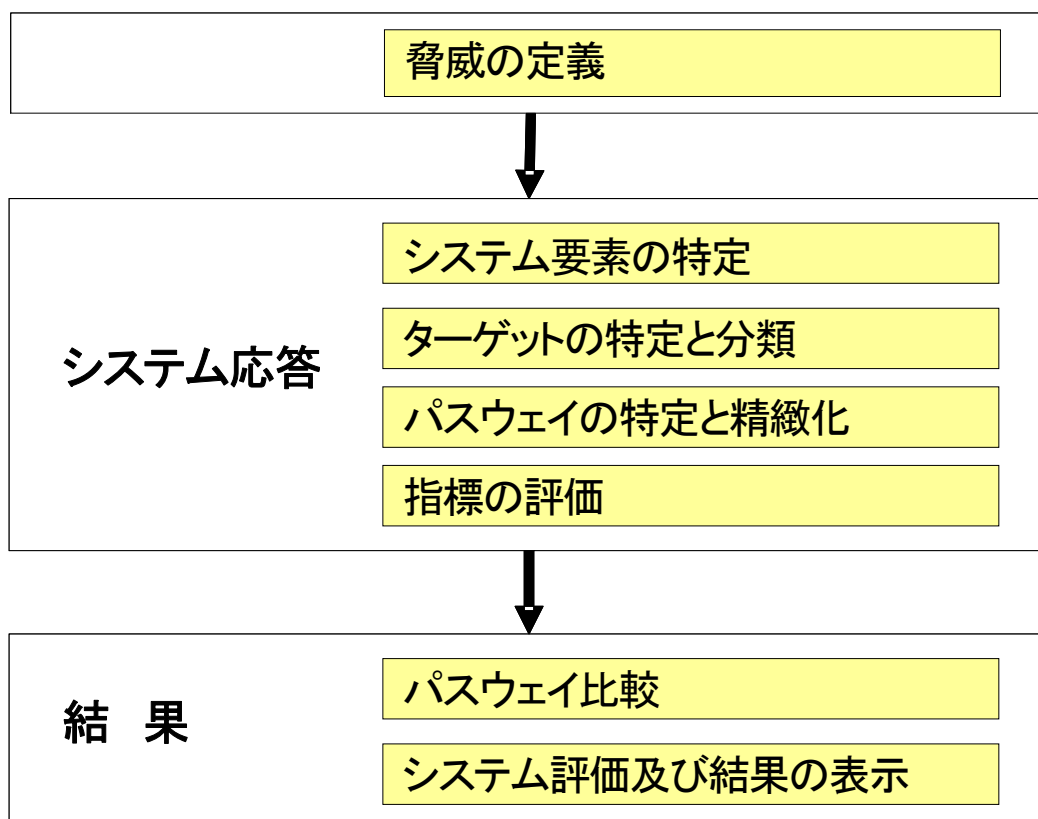


図 ES.2PR&PP 評価手法の詳細枠組み

PRに関する脅威は以下を含む。

- ・ 申告核物質の秘密の転用
- ・ 申告施設の秘密の不正使用
- ・ 施設の公然不正使用または申告核物質の公然転用
- ・ 秘密の専用施設

PPに関する脅威は以下を含む。

- ・ 放射性物質・放射線発生装置等に対する妨害破壊行為
- ・ 核物質の盗取
- ・ 情報の盗取

本評価手法は、ある脅威が実際に起こるまたは起こらない確率については評価しない。したがって、どの潜在的脅威を含めるかという選択は PR&PP 評価の始めに、できれば評価スポンサーと共同して組織されるピアレビューグループからの情報をもって行うことが望ましい。そして、ある脅威に対するシステム応答の不確実性は、実際にシステムが脅威によってチャレンジを受ける確率とは独立して評価される。換言すれば、PR&PP 評価はチャレンジが実際に起こることを前提としている。

どの程度詳細に脅威を定義できるか、あるいは定義すべきかは、利用可能な NES の設計情報の詳細さに依存している。詳細情報に限りのある概念設計の初期段階では、比較的定型化されたものであっても、合理的な脅威が選択されなければならない。逆に、実際に建設する時点まで設計が進めば、詳細かつ具体的に潜在的脅威を特徴づけることが可能になる。

評価に必要な程度に十分脅威が詳細化したら、次に解析者は 4 つの要素から成るシステム応答を評価する。

- 1. システム要素の特定** NES を解析しやすいレベルまで小さい要素またはサブシステムに分解する。これらの要素は、所与の NES を構成する(システム工学上の)施設や施設の一部、施設の集合、あるいは輸送システムであり、これらの要素の中で取得(転用)や処理、あるいは盗取・妨害破壊行為が発生しうる。
- 2. ターゲットの特定及び分類** ある脅威シナリオ(脅威の定義の段階で特定された戦略)において、各要素に存在する核物質、装置及びプロセスが果たす役割の観点から NES を分析することにより、ターゲットが特定される。PR のターゲットは、転用や不正使用の脅威から守るべき核物質、装置及びプロセスである。PP のターゲットは盗取や妨害破壊行為の脅威から守るべき、核物質、装置または情報である。さらなる解析のために、ターゲットは代表的なセットあるいは境界セットに分類(カテゴリー化)される。
- 3. パスウェイの特定と精緻化** パスウェイは、行為者が目的を達成するまでの、一連の潜在的事象及び行為である。個々のターゲットに対して、それぞれのパスウェイは系統的な「セグメント」に分割され、ハイレベル(ごく簡単な、粗いレベル)で解析される。その上で、セグメントはパスウェイ全体に連結され、詳細に解析される。パスウェイの適切な選択はシナリオ自体、設計情報の状態、利用可能な情報の質とその利用可能性、及び解析者の優先傾向に依存するであろう。

4. 指標の評価 システム応答の結果は PR&PP 指標で表現される。指標はパスウェイの代表的な(ハイレベルな)特性であり、拡散行為者の決定や行為に影響を与える。従って、これらの指標は拡散行為者のとりうる行動及びその結果の評価に用いられる。指標ごとに各パスウェイセグメントの結果がパスウェイの比較及びシステムの評価に適した形で集約される。そうすることにより、さらなる評価や意思決定のために重要なパスウェイが特定され、浮き彫りになる。

PR の指標は、

- ・ **拡散の技術的困難性(TD)**
拡散に対する多重障壁を突破するために、技術の高度化及び核物質取扱い能力が必要であることにより生じる固有の困難性。
- ・ **拡散コスト(PC)**
拡散に対する多重障壁を突破するために必要とされる経済的・人的投資(既存あるいは新設の施設使用を含む)。
- ・ **拡散時間(PT)**
拡散に対する多重障壁を突破するためにかかる最小の時間(すなわち、ホスト国がプロジェクトを遂行するのにかかる想定する時間の合計)。
- ・ **核分裂性物質のタイプ(MT)**
当該核物質の特性が、核爆発装置の有効性にどの程度影響するかの度合いに基づく、核物質の分類。
- ・ **検知確率(DP)**
拡散のセグメントあるいはパスウェイを検知する累積確率。
- ・ **検知リソースの効率(DE)**
NES に国際保障措置を適用するための、人、装置及び資金の利用効率。

PP の指標は、

- ・ **敵の成功確率**
敵対者がパスウェイに描出される行為を成功裏に完了し、結果を生む確率。
- ・ **結果**
パスウェイに描出される敵対者の行為が成功裏に完了することによる影響。
- ・ **核物質防護リソース**
バックグラウンドスクリーニング(身元調査)、検知、妨害及び無効化等の核物質防護を提供するのに要する、人、能力及びコスト。また、脅威の能力の変化に対するこれらのリソース感度。

これらの指標について評価することによって、システム設計者はシステムの PR&PP 性能を改善するような設計オプションを特定できる。例えば設計者は、運転者の頻繁な介入を必要とするアクティブな安全系装置を減らしたり削除したりすることができる。

PR&PP 評価の最終ステップは、解析で得られた知見を統合し、結果を説明することである。評価結果は、数値的及び言語的に記述され、最良の推定が含まれる。この推定は、不確かさの偏差を考慮し、不確かさの適切な表現が含まれるべきである。

この情報は3種類のユーザーを想定している。すなわち、システム設計者、政策決定者及び外部の利害関係者である。したがって、システム応答の解析の結果は、様々な詳細さレベルで簡単に表現できないといけない。政策決定者と外部の利害関係者は代表的な指標により関心を持つであろうし、一方、システム設計者はシステム設計の最適化に直接関連する指標や尺度に関心を持つであろう。

1. 序 論

第四世代(GEN IV)原子力システム(NESs) (DOE 2002a)の技術目標は、四つの目標分野の一つである核拡散抵抗性と核物質防護(PR&PP)を、持続可能性、安全性及び信頼性、経済性ととも重要視している。

このように PR&PP の目標が強く認識されているということは、将来システムの評価と開発を導く適切な評価手法の必要性が重視されているということである。PR&PP 目標の PR の部分は、GEN IV の NESs が核物質の転用や未申告の生産に最も望ましくないことを強く確約することに重点を置いている。PP 部分の目標は GEN IV の NESs が盗取や妨害破壊行為に対して堅牢であると保証することである。

評価手法グループは GEN IV ロードマップ (DOE 2002b) において PR&PP 評価手法を開発したが、この取り組みはその深さにおいて限界があった。4 つ全ての目標分野において、利用できるシステム情報が不完全であることは評価の不確実性につながったが、PR&PP 評価においてはとりわけ顕著であった。これは、核拡散抵抗性またはセキュリティ上の脅威に対する原子力施設の堅牢性を包括的に表現できるような、一般的に受け入れられた指標あるいは性能指数(figure of merit)が存在しなかったことによる。この結果、最終スクリーニング評価に用いられたクライテリアや尺度は、PR&PP 分野においては、ハイレベル(概要的なレベル)なシステム性能を示すにとどまった。GEN IV ロードマップは、NESs の PR&PP を評価するために改良された評価手法を開発すること、及び PR&PP 評価は設計の最初期の段階に実施すべきと勧告した。本報告書は 2002 年 12 月に第四世代国際フォーラム(GIF)に招集された PR&PP 専門家グループによって開発された手法を記すものである。

1.1 報告書概要

本報告書は複数分野の読み手を想定している。要約と第 1 章は、政策決定者、GIF の広範なメンバー、外部の利害関係者のためのものである。13 節では過去の作業をレビューしており、これも本報告書に示される評価手法のより専門的理解を望む技術専門家や政策決定者にとって参考になるであろう。14 節は評価手法の概要を記している。15 節では、本評価手法を手順に沿って運用する際に踏むこととなる評価のステップを垣間見ることができる。

第 2 章は評価を実施する解析者に向けて、評価手法を詳細に記述している。PR&PP 評価プロセスは、特定のガイドラインを採用しており、これに従って脅威空間を定義し(2.1 節)、特定のシステム要素の評価と脅威の定義を行い(2.2 節)、システム設計者や政策決定者が使用しやすい形で結果を比較、表示する(2.3 節)こととしている。

本報告書は、用語解説や略語表と共に文献リストも含んでいる。さらに、別冊の付録では本報告書の技術的補足を記している。"Addendum to the Evaluation Methodology for Proliferation Resistance and Physical Protection of Generation IV Nuclear Energy Systems"(GEN IV 原子力システムの核拡散抵抗性及び核物質防護評価手法の付録)と題する付録は、本報告書の内容の根拠を示すいくつかの技術的附属書を含んでいる²。別冊の附属書 A

²<http://www.gen-4.org/Technology/horizontal/TechAddndm.pdf>

は過去の PR 評価に用いられた尺度をまとめており、附属書 B は過去の PP 堅牢性評価についてレビューしている。附属書 C は脅威空間の定義について、より詳細な議論を展開している。付録 D は以下の 4 つのパートで構成される。

- ・ D1 : 「保障措置適用性 (Safeguardability) の評価」に関連する。保障措置適用性は、システムに対して効果的(かつ効率的)に国際保障措置を適用する、そのしやすさの程度として定義される。
- ・ D2 : 解析者がシステムの仮想的保障措置アプローチを設計する方法と、これに対するシステム応答の推測方法を議論している。
- ・ D3 : 国際原子力機関(IAEA)の検知目標をまとめている。
- ・ D4 : 核分裂性物質の質と魅力度について議論している。

付録 E は PR&PP に適用可能なシステム解析技術をまとめている。

1.2 背景

本報告書に記す評価手法は GEN IV NESs の PR&PP を包括的に網羅している。PR&PP 専門家グループは評価手法が対象とする範囲を、定義された GEN IV PR&PP 目標に基づいて設定した。GEN IV ロードマップ (DOE 2002b) は将来の NESs に対する PR&PP 目標を以下のように定義した。

GEN IV 原子力システムは、兵器使用可能物質の転用や盗取を企図する者にとって非常に非魅力的で、最も望ましくないルートであり、また、テロ行為に対して強化された核物質防護を提供することをより確実なものとする。

PR&PP を明確に定義することは、評価手法の対象範囲を決めるために重要である。PR&PP 専門家グループが採用した PR の定義は、2002 年にイタリアのコモで IAEA によって開催された国際ワークショップ (IAEA2002b) において確立された定義と一致している。

採用された定義は以下のものがある。

- ・ **核拡散抵抗性** は、核兵器または他の核爆発装置の獲得を企図するホスト国による、核物質の転用または未申告生産、及び技術の不正使用を妨げる NES の特性である。
- ・ **核物質防護 (堅牢性)** は、非国家主体や他の敵対する非ホスト国による、核爆発装置または放射能拡散兵器 (RDDs) に適した物質の盗取、及び施設や輸送への妨害破壊行為を妨げる NES の特性である。

GEN IV NESs の PR&PP 技術目標は、PR&PP の定義とあわせると以下のようなになる。

GEN IV NES は、核兵器あるいは他の核爆発装置製造を目的とした、システムからの核物質の転用と NES 及び NES 技術の不正使用を妨げることによって、拡散を企図する者にとって最も望ましくないルートであるべきである。GEN IV NESs は、核爆発物または RDDs に適した物質の盗取と、施設や輸送に対する妨害破壊行為に対して強化された防護を提供すべきである。

PR&PP 評価手法は、以下の脅威のカテゴリーについて GEN IV NESs を評価する手段を提供するものである。

核拡散抵抗性—ホスト国が下記の方法により核兵器を獲得することに対する抵抗性

- 申告された工程や在庫からの核物質の秘密の転用
- 申告された工程や在庫からの核物質の公然転用
- 申告された施設内の秘密の核物質生産や処理
- 申告された施設内の公然の核物質生産や処理
- 秘密裏施設内における申告設備の複製による秘密の核物質生産または処理

核物質防護(堅牢性)

- 施設または輸送からの核兵器使用可能物質の盗取
- 拡散兵器(RDD あるいは「汚い爆弾(ダーティー・ボム)」)に使用するための、施設または輸送からの有害放射性物質の盗取
- 放射性物質を放出し、公衆に被害を与え、施設を損傷し、または運転を阻害することを目的として行われる原子力施設や輸送中の妨害破壊行為

1.3 過去の活動のレビューと並行して実施されている取組み

これまで、PR 及び PP の堅牢性を評価するために非常に多くの活動が行われてきた。この二つの課題は従来別個に研究されてきた。核拡散は一般的に国際的な関心事とみなされ、これまでに行われた広範な PR 評価にかかる研究は現在広く利用できる。一方、PP は国家の安全保障や主権問題と見なされて、大部分の作業は管理下に置かれている、あるいは機密扱いされている。それでもなお、本報告書で議論されているような評価手法の枠組みに類似した系統的な解析評価は、PR よりも PP においてより成熟している。

GEN IV 技術ロードマップ(DOE 2002b)の期間中、評価手法グループにより開発された評価手法は、公開されて以降計画的に改良が加えられてきた。こうした取組みの 1 例は、米国 DOE/NNSA から公刊された「核不拡散評価の実施のためのガイドライン(Guideline for the Performance of Nonproliferation Assessments)」(Denning et al. 2002, NPAM 2003)の検討であり、現状の PR&PP 評価手法の基礎となっている。より詳細な背景情報は附属書 A(過去の PR 評価に用いられた尺度の概説)と附属書 B(過去の PP 評価のレビュー)に記される。以下の節にこれらの取組みの概要を記述する。

1.3.1 拡散抵抗性に関するこれまでの取組み

PR の検討は、IAEA の国際核燃料サイクル評価(INFCE)や、DOE の核不拡散代替システム評価計画(NASAP)により、1970 年代に開始された。NASAP も INFCE も、拡散リスクを評価する包括的な手法を開発するより、拡散リスクを最小化する核燃料サイクルの開発にポジティブな方向性を見出すことに焦点が当てられた。これらの取組みの結論は、兵器製造能力の獲得を決定した国家に直面してはいかなる技術的対策も拡散を免れないであろうというものであった。(INFCE1980、NASAP1980、Office of Technology Assessment 1977)

PR の研究は、個々の施設と核燃料サイクル全体の評価を含む広い範囲を対象としてきた。Krakowski (2001)、NAPAM (2003)、Cojazzi & Renda (2005)^{*1}による文献に、過去の取組みの包括的レビュー及びPRの試評価が示されている。

過去に行われた PR 評価は決定論的解析あるいはリスク解析アプローチのいずれかに基づいていた。評価の機運は主に二つのフェーズで起こった。INFCE と NASAP に続き、1970 年代後半から 1980 年代にかけて初期の評価手法開発が実施された。現在の PR 評価に対する関心の高さは、米国国立科学アカデミー (NAS) のプルトニウム廃棄研究 (NAS1995) が実施された 1990 年代半ばに PR に対する関心が復活したことの延長線上にある。

Papazoglou et al.(1978)は核保有能力と目的が異なるホスト国による拡散を評価するために、多元属性効用 (MAU) 解析を適用した。これは、初期の最も重要な解析の一つであった。この取組みに続いて、Heising (1979)、Silvennoinen & Vira (1981) 及び Ahmed & Hussein (1982) は代替的拡散パスウェイのランク付けに MAU アプローチを適用した。Krakowsky (1999) は評価にダイナミックかつ地政学的な考察を加えることを企図して、より新しい MAU 解析の適用を実施した。Ko et al. (2000) は核燃料サイクルの PR を定量化するための新しい知見を提供するために、PR と電気抵抗との類似性を引用している。

1996 年には、拡散に対する障壁の評価に基づく別の決定論的解析が、核拡散脆弱性レッドチーム (Proliferation Vulnerability Red Team) によって提示された (Hinton et al. 1996)。DOE 原子力研究諮問委員会 (NERAC) の「グローバル民生原子力システムの拡散抵抗性強化のための技術的機会に関するタスクフォース」(TOPS)でも、これに似たアプローチが採用された。TOPS タスクフォースは PR に関する一連の定性的な属性 (障壁) を策定したが、これらの属性に基づいた定量的評価あるいは相対評価は行わなかった。(Taylor et al. 2000)

一方、核物質の転用に関する初期の確率論的評価は 1980 年代末に発表されたが、脅威や脆弱性の系統的な確率論的評価は 1990 年代後半まで表舞台にでることはなく、系統的な確率論的リスク解析アプローチは今世紀に入るまで提案されなかった。Cojazzi & Renda (2005)は Hill (1998)によって開発された保障措置ロジックツリーを推敲しつつ、フォールトツリーが所与の核燃料サイクルに存在するすべての獲得パスウェイを特定し、各獲得パスウェイにおける非検知確率を定量化しようとして、その可能性について調査を行った。(Cojazzi, Renda, & Contini 2004)^{*2}。附属書 E は PR 分野で適用可能なシステム解析手法の概要を示す。

^{*1}2003 年にローレンス・リバモア研究所の ED Jones は、核拡散抵抗性の評価手法レビューのドラフト (UCRL-ID-153928-DR) の中で、PR 評価においてはコンセンサスが得られた手法は存在せず、むしろ、過去の評価は解析目標が様々に異なっていたために、各々異なる拡散寄与要因に焦点をあて、異なる解析方法を適用してきた、と結論した。

^{*2}サンディア国立研究所の Rochau らは、脅威、防護障壁、資産、緩和障壁及び結果に基づく確率論的リスク解析アプローチを説明した。このアプローチはリスク情報に基づく拡散解析 (Risk-Informed Proliferation Analysis, RIPA) と呼ばれ、最小の PR を持つパスウェイを特定する。

近年、先進核燃料サイクルイニシアティブ(AFCI)のブルーリボンパネルは、既存の軽水炉を含む、多様な代替燃料サイクル(PUREX, MOX, PUREX, DUPIC 及び不活性マトリックス燃料)の PR を調査した (Baron et al. 2004)。これらの評価は Charton により開発された MAU 解析手法に依拠している。(この手法の概要は Baron らによる附属書 C に記述されている。)

これらの活動と並行して、国際保障措置の実効性の評価に相補的な努力がなされた。保障措置の性能と検知確率の評価は、PR 評価手法の構成要素である。保障措置の性能評価に関するレビューは数多く行われたが、その大部分は内部報告のレベルに留まっている。保障措置の評価手法に関するレビュー (Cojazzi & Renda 2004) が、近年 EC 共同研究センター(JRC)で実施された。

13.2 核物質防護に関するこれまでの取り組み

PR と異なり、PP は原子力業界に特有のものではない。防護されるべき資産、攻撃が成功した場合の結果や、攻撃を検知し、遅延させ、それに応答するための手段は異なるかもしれないが、防護の対象が NES、石油化学インフラ施設、水処理工場、金融センターまたは軍事サイトの何れであろうと、妨害破壊行為や盗取に対する施設の防護には同じ基本原理が適用される。したがって、PP の評価手法の初期開発は原子力業界より先行している。おそらくこれまで認識されていなかったが、シナリオ解析は防衛計画のために何世紀にもわたって用いられてきた。最新の解析技術の到来で、PP の評価は構造化され、形式化されてきた。

PP の系統的解析の基本は確率論的リスク評価の原則に依拠しており、PR の解析よりも成熟している。PP 解析では一般的にフォールトツリー構造を用いて脅威を定義し、システム応答を評価し、システムの脆弱性を特定し、リスクに優先順位をつける。PR の場合と同様に、データの多くは主観的に得られる。したがって、ときに解析は定性的であり、客観的解析というよりは、むしろ個人的見解を反映する。しかしこうした解析により、脅威とリスクの総合的な概要が得られ、代替施設設計や脅威に対するシステム応答の比較に尺度を用いることが可能となった。この解析は、技術的に中立な立場から、評価の対象となるシステムの性能要件を特定する枠組みをもたらした(Garcia 2001, IAEA1999, IAEA 2002a)。

これまで評価の際には、PP システムを内在的特性と制度的枠組みの組み合わせとしてとらえてきた。内在的特性と制度的枠組みは以下を目的として設計される。

- ・核物質、放射性物質、施設及び輸送システムに対するアクセスの最小化及び管理
- ・想定される攻撃に対するプラントシステムの脆弱性の最小化
- ・想定される脅威への十分な応答

現在、仮想脅威による施設への潜在的な影響について評価する際には、設計基礎脅威(DBT)を前提としている。DBT は、施設に対する潜在的チャレンジの特性を提供すると考えられている。この DBT を前提とするアプローチが用いられてきたのは、現実味のある脅威を定義し、それらの脅威の尤度について信頼性の高い推定を行うことが困難であるという理由による。

DBT 概念は米国 DOE と米国原子力規制委員会(NRC)に提供するために、1970 年代にサンディア国立研究所(SNL)で開発された。SNL はドイツ、英国、フランス及び IAEA の代表者と協力して、1999 年以来 DBT の策定と DBT の使用に関する多数のワークショップを主導してきた。2000 年 10 月には、これらの

国々の代表者が IAEA の下に参集し、DBT の開発と使用のための国際標準モデルを作成した(Blankenship 2002)。

脅威を評価・管理するために確立された方法論は、敵対者に対する抑止、検知、遅延及び応答の概念に基づく。これらの概念の更なる論考は本報告書の附属書 B に示す。

2001 年 9 月 11 日以降、安全性やテロ対策にシステム解析や確率論的リスク評価(PRA)を適用する、より広い取組みが多く提案されてきた。(一例として、Ganic et al 2004 参照)

1.3.3 GIF と並行して行われている国際的取組み

革新的原子炉及び燃料サイクルに関する国際プロジェクト(INPRO)は GEN IV と並行して実施されている IAEA 主導のイニシアチブである。INPRO は NES の全体論的な評価手法を開発している。INPRO の評価手法 (IAEA 2004)は、基本原則、ユーザー要求、及び評価指標と許容限度からなる評価基準(クライテリア)の階層的構造に基づいている。指標を対応する許容限度と比較することで、クライテリア及びユーザー要求を満たすだけの能力が NES に備わっているか否を判断するものである。INPRO の評価は幾つかの異なる分野にまたがる。すなわち、経済性、環境、廃棄物管理、安全性、インフラ、及び核拡散抵抗性である。実施マニュアルは新しい分野である核物質防護を含め、すべての分野で開発中である。GIFPR&PP と INPRO の評価手法は、その実施方法は異なるが、目的を共有している。その目的とは、21 世紀の NES が持続可能で、安全で、信頼性が高いこと、そして核拡散リスクを最小化し、かつ盗取と妨害破壊行為に対する堅牢性を最大化しながら、経済競争性を達成することである。両アプローチの開発は、INPRO 及び GIF の両方の取組みへ参加している者によって GIF-INPRO 間の情報交換と連携が促進されることにより、更なる効果があげられている。

1.4 評価手法のアプローチ

専門家グループによって開発された評価手法の基本的なアプローチは、一連の脅威あるいはチャレンジの定義、これらのチャレンジに対するシステム応答の評価、指標を用いた結果の表示から構成される。

PR&PP 評価手法は進歩的アプローチであるため、GEN IV NESs に対して広く適用することができる。PR&PP 評価は、開発中のシステムから、設計の完了したシステム、及び運転中のシステムまで適用可能である。評価の範囲と複雑さは、利用可能な設計情報の詳細さ及びそれによって定義される脅威の詳細さに見合っていないなければならない。場合によって、特に PP については、システムを解析する際に機微情報 (Sensitive Information) が使用されたり、評価によって機微情報を発生させたりすることがある (下記のボックス参照)。本評価手法アプローチの各要素で実施する主なステップを図 1.1 に示し、次節で議論する。

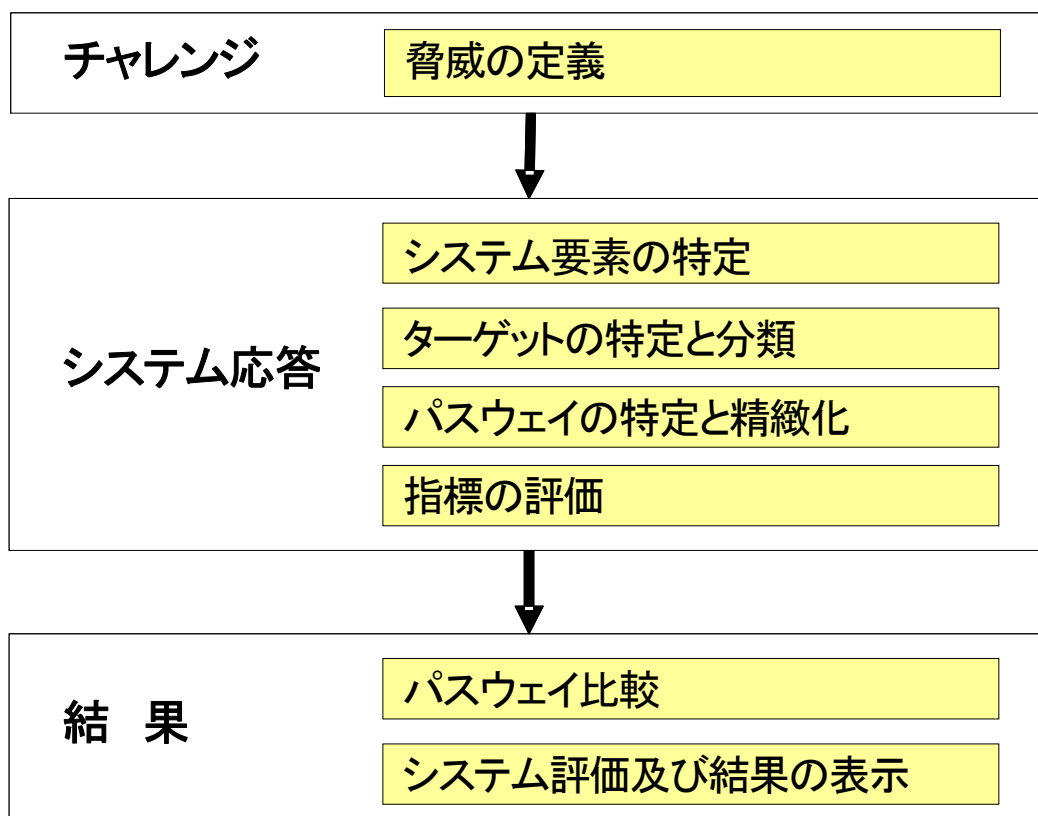


図 1.1 PR&PP の評価手法の主要なステップ

1.4.1 チャレンジの定義

PR&PP 評価の最初のステップはチャレンジ、すなわち、評価範囲の中で検討すべき脅威の定義である。包括的に検討するために、一連の**標準脅威セット (RTS)** と呼ばれる潜在的な脅威の全ての組み合わせが認識され、評価されなければならない。脅威空間の一部(サブセット)が当該ケーススタディの対象になるのであれば、そのサブセットは明確に定義されなければならない。脅威は年月を経るうち進化する。したがって、システム中の施設や核物質がそれらの全ライフサイクル中で被る可能性のある多様な脅威に関して、合理的な仮定に基づいたシステム設計がなされなければならない。脅威の定義の詳細さは、設計及び配置に関する利用可能な情報の詳細さに対して適切でなければならない。

PR&PP 脅威の定義は拡散行為者と拡散行為者の戦略に関する情報を必要とする。ここでは、拡散行為者は以下の要素で定義される。

- ・タイプ (例：、ホスト国、非国家主体など)
- ・能力
- ・目的

ボックス 1.1 機微情報

GEN IV NESsのPR&PP評価のためには、詳細なパスウェイ記述に機微情報が含まれる可能性がある。例えば、IAEAはある施設の保障措置システムを設計するために仮定した隠匿戦略を「保障措置機密」として扱う。兵器研究所は、核爆発装置を製造する具体的アプローチに関する情報と、秘密の施設での核物質の処理に最適なアプローチに関する情報を、機微情報として扱っている。同様に国家規制当局は、現行の施設設計を突破してしまうような妨害破壊行為や盗取の脅威に関する具体的な情報(方法、困難性、施設の枢要区域へアクセスするための障壁突破に要する時間)及び、装置ターゲットのうち無効化されると放射性物質の放出を引き起こすものに関する一連の情報を特定機密情報として扱う。以上の理由により、機微情報を使用する、あるいは生み出すPR&PP評価は、機微情報を管理できる適切な機関によって実施されなければならない。

多くの場合、機微情報を使用する必要性や管理する必要性は PR&PP 評価を行う過程で減少しうる。特に粗いパスウェイの段階では、PR と PP のターゲットの特徴を表わすカテゴリーを用いればよい。第 2 章はこの目的のために 3 種類の表を示している。エリアアクセサビリティ(区域アクセス性)の表は、装置や核物質に対するアクセスの相対的な困難性によってエリアタイプをランク付け分類している。核物質の魅力の表は、核爆発物を処理・製造する相対的な困難性で核物質をランク付けしており、装置の脆弱性の表は、枢要機能を無効化する相対的な困難性により装置のタイプをランク付けしている。

ランク付けされた各カテゴリーは詳細情報を表に出さないため、指標に基づく結論は本質的に近似的なものである。それでも、多くの場合これらの結論は有用である。これらが有用でないことが判明した場合は、機微情報を適切に防護した上でより特化した研究を実施しなければならない。

1.4.2 システム応答

拡散、盗取及び妨害破壊行為の脅威に対する GEN IV NES の応答を評価するために、解析者は NES の技術的側面と制度的側面の両方の特性を検討する。このシステム応答はパスウェイ解析を用いて評価される。パスウェイは拡散行為者たちの拡散、盗取あるいは妨害破壊行為という目的を達成するまでの潜在的な事象のシーケンスとして定義される。

パスウェイ解析の前に、検討の対象となるシステムを定義し、その主要要素を特定することは重要である。システム要素を特定した後、個々の脅威について潜在的なターゲットを特定・分類し、これらのターゲットに対するパスウェイを特定する。このシステム応答を評価するのに用いられるステップを図 1.2 に示し、以下に議論する。

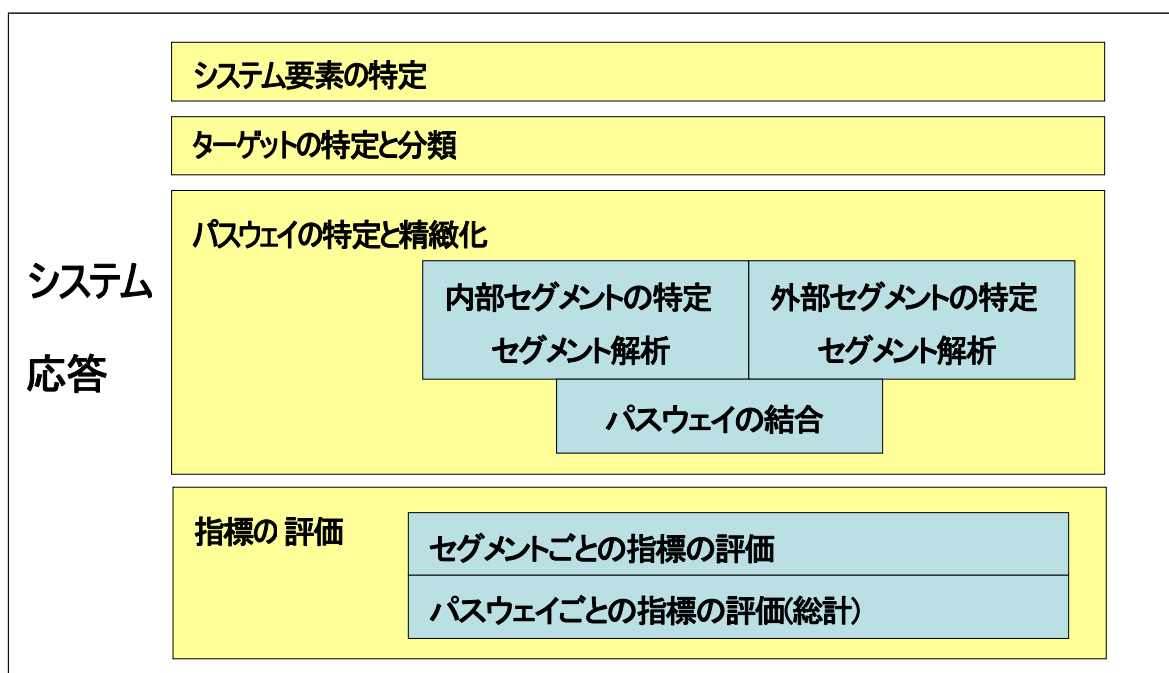


図 12 システム応答のステップ

システム要素の特定—評価の範囲を限定するシステムの境界は明確に定義されなければならない。その上で、解析者はシステム要素を特定しなければならない。システム要素という用語は、形式上 NES のサブシステムとして定義される。解析者の裁量でシステム要素は、施設(建物だけでなくシステム工学の意味での施設)、施設の一部、施設の集合、または、特定された NES 内の輸送を含むことができる。

ターゲットの特定及び分類—ターゲットは行為者と NES の間のインターフェースであり、パスウェイ定義の基礎である。ターゲットを明確かつ包括的に特定することは PR&PP 評価に不可欠である。ターゲットは核物質あるいは放射性物質に加え、プロセス、装置及び情報が含まれる。

パスウェイの特定と精緻化—パスウェイはターゲットの周囲に構築され、セグメントで構成される。PR パスウェイの粗い解析では、セグメントは NES で行われる拡散行為から構成される。完全な PR パスウェイは、NES からの核物質の獲得、兵器に直接利用できる形への処理、及び兵器の製造のためのすべての行為等からなる。これらの3つの一般的なセグメントは、それぞれ複数の細かいセグメントを含みうる。PP パスウェイも、核分裂性物質や放射性物質の盗取のための、一般的セグメントからなる。妨害破壊行為の一般的なセグメントは、ターゲット装置への接近、装置の破壊や無効化、これらの行為によって引き起こされ、放射性物質を放出する可能性のあるシステム応答等である。

信頼性の高い一連のパスウェイを作り出すためには、当該分野の専門家にとって理解しやすい系統的手法が用いられなければならない。解析者は確実に信憑性のあるパスウェイをすべて特定しなければならない。同時に、解析者は適切な裏付けや文書化の後に、信憑性がない、あるいは全体の NES 評価には寄与しないことが明らかなパスウェイを評価対象からはずさなければならない。

精緻化作業は漸進的に行われ、二つの方法がある。行為を表すセグメントをより小さな行為に分解すること、そして、より正確な指標の推定が容易となるよう、セグメントの特性も追加して明らかにすることである。

指標の評価(見積み)—システム応答の結果は、PR&PP に関する代表的な指標で表わされる。これらを以下に定義する。

拡散抵抗性

拡散の技術的困難性—拡散に対する多重障壁を突破するために、技術の高度化及び核物質取扱い能力が必要であることにより生じる固有の困難性。

拡散コスト— 拡散に対する多重障壁を突破するために必要とされる経済的・人的投資(既存あるいは新設の施設使用を含む)。

拡散時間— 拡散に対する多重障壁を突破するためにかかる最小の時間(すなわち、ホスト国がプロジェクトを遂行するのにかかる想定する時間の合計)。

核分裂性物質のタイプ—当該核物質の特性が、核爆発装置の有効性にどの程度影響するかの度合いに基づく、核物質の分類。

検知確率—拡散のセグメントあるいはパスウェイを検知する累積確率。

検知リソースの効率—NESに国際保障措置を適用するための、人、装置及び資金の利用効率。

これらの指標は、PR の評価(附属書 A 参照)で採用されたものと大半が類似している。さらに、これらは本質的には Papazoglou et al. (1978)によって採用された指標でもある。本報告書の附属書 D で、なぜこれらの指標が完全かつ冗長でないかについて、かなり入念かつ徹底的な議論を提供している。

核物質防護

敵の成功確率—敵対者がパスウェイに描出される行為を成功裏に完了し、結果を生む確率。

結果—スウェイに描出される敵対者の行為が成功裏に完了することによる影響。緩和措置の影響を含む。

核物質防護リソース—バックグラウンドスクリーニング(身元調査)、検知、妨害及び無効化等の核物質防護を提供するのに要する、人、能力及びコスト。また、脅威の能力の変化に対するこれらのリソース感度。

指標は定性的及び定量的手法によって評価することができ、その手法は文書化された工学的判断や公式の専門家からの聴取 (1998 年 Budnitz, 2001 年 Cojazzi ら、2004 年 Forester, 2002 年 Pilat, Budlong-Sylvester, & Stanbro, 1998 年 Siu ら、2003 年 Wreathall らにより、広範囲にわたる分野で成功裏に適用された) も含まれる。指標は (Markov チェーンやイベントツリーのように) 確率論的手法や二面シミュレーション法 (戦争ゲーム技術等、NPAM 2003 参照) を用いても評価できる。付録 E は多数の PR&PP 研究に関連するシステム解析技術をレビューしている。

指標評価に用いられる尺度は本報告書の第2章に記載する。

1.4.3 結果

脅威に対するシステム応答の結果をみるため、解析者はパスウェイを比較し、解析の結果得られた知見をまとめてシステムを判定し、結果を説明する。

パスウェイ比較—解析者はパスウェイの複数のセグメントを調査することにより、パスウェイ解析を実施する。一般に、指標はパスウェイの個々のセグメントごとに見積もられ、その後、パスウェイ全体の指標について最終結果を出すため集計される。異なるパスウェイの指標は統合集計することもできるが、一般に最も脆弱なパスウェイを特定するために指標を用いることに一層の価値がある。したがって、システム評価の目的は最も脆弱なパスウェイの特定とそれらに関する指標の特定である。

システム評価及び結果の提示—PR&PP 評価の最終ステップは、NES を判定するために、解析によって得られた知見を総合し、その結果を説明することである。評価結果は、記述者による最良の推定を含む。この推定は、結果の特徴を表し、また推定にかかる不確かさを適切に表現する。

1.5 手法の実施

ある特定の NES の PR&PP を評価するには、管理、組織、技術の各分野におけるスキルの混合が必要であり、これらは完全で、反論の余地がなく、分かりやすい評価を効果的に行うために統合されなければならない。このプロセスは下記 4 つの主要作業の下に編成される 9 つの特定タスク(ステップ)の下で実施される。

- ・M—プロセス管理
- ・D—作業の定義
- ・P—作業の実施
- ・R—作業の報告

ステップの各々は概ね上記タスクの一つと関連している。プロセスの 9 ステップは、**図 13** 及び以下文章中で詳細に説明する。管理に関するいくつかのレベルは複数のステップに関連している。例えば、報告に関しては最後の段階で全てを行うのではなく、作業の進捗に伴ってドラフト文書が作成されなければならないし、プロセスは繰り返され、時に並行して行われる。

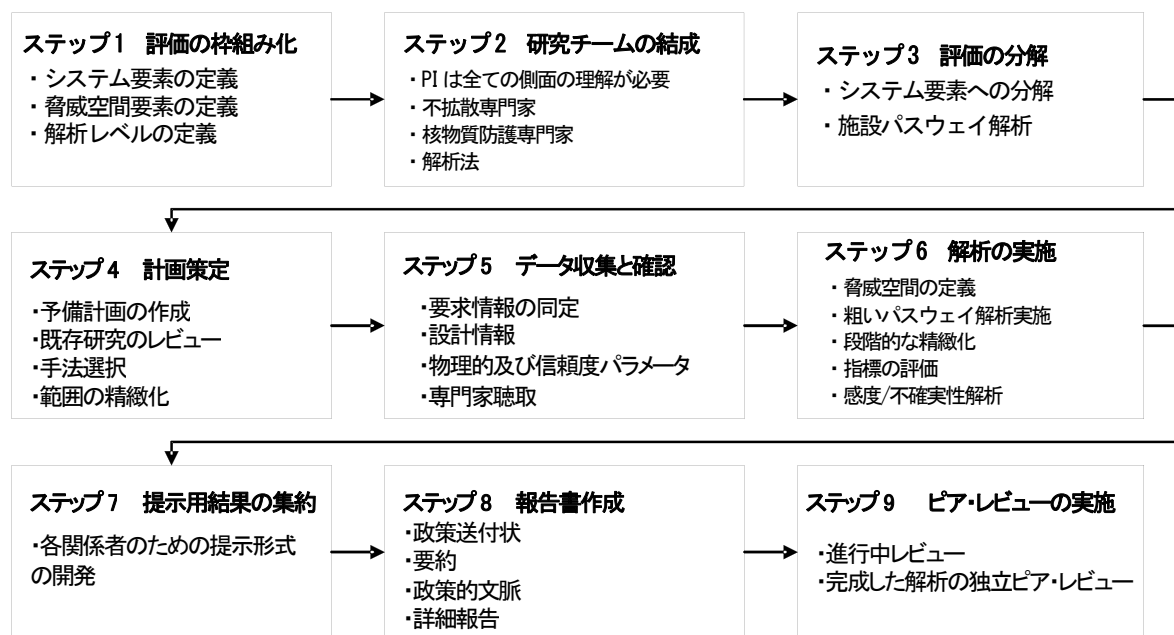


図 13 PR&PP 評価プロセスにおける主要なステップ

15.1 プロセス管理/作業の定義

(図 13 のプロセスステップ 1, 2, 4, 9)

評価結果の完全性と妥当性を高めるためには、課題の体系的な構造化、専門家解析チームの編成、確実なピアレビューが重要となる。このプロセスにおけるステップは図 13 に示すと同時に、下記に解説する。これらは評価手法の実施ガイド(評価プロセスのためのコンピュータを用いたツールであり、広範な用例とヘルプを有する)に詳細に示される。プロセスの各ステップは、最初に実施される順に数字が付けられているが、議論を容易にするために図 13 に示されるよう四つの主要作業にグループ化している。

ステップ 1. 評価の明確で簡潔な枠組化—D³³

PR&PP 評価を枠組化するプロセスでは、評価の範囲を決めるため、とりわけシステム要素 (施設、プロセス、物質) と、脅威の範囲及び定義を特定するために、解析者と評価スポンサーの間での緊密な相互関係が要求される。保障措置や他の国際管理の実施を含む制度的な背景も十分詳細に定義されなければならない。

このプロセスを経ることにより、スポンサーのニーズに応じ様々なレベルで解析することが可能となる。予備概念設計の段階から操業可能な段階へ向かうにつれて、PR&PP 解析は詳細化することが出来る

³³ PR&PP 評価プロセスの各ステップは、以下の四つの主な活動のひとつにリンクして色づけされている。

- ・ M—プロセス管理(緑)
- ・ D—作業の定義(青)
- ・ P—作業実施(黄)
- ・ R—作業報告(オレンジ)

し、詳細化されなければならない。タイムフレームもまた解析の深さに影響する。答えが数週間あるいは数ヶ月以内—そしてある種の問題のため潜在的により短い期間で要求されれば、粗くとも迅速な評価が必要とされうる。しかし、こうしたショートカットは、結果の不確実性の程度を増大させることになる。

ステップ2. 要求される専門性を提供する研究チームの結成—M

専門家チームは、客観的に判断を下し、コンセンサスに係る不確実性について十分に表現する技能を備えるとともに、専門家判断を導出する分野等、必要な全ての技術分野の専門家を含んでいなければならない。(Budnitz et al.1998、Cojazzi et al. 2001、Forester et al. 2004、Pilat, BudlongrSylvester&Stanbro 2002、Siu & Kelly 1998、Wreathall et al. 2003)このチームは以下のような専門家を含むべきである。

- ・評価範囲に PR が含まれれば、核不拡散及び／または保障措置
- ・評価範囲に PP が含まれれば、PP
- ・解析手法
- ・NES 設計のすべての関連事項
- ・システム設計及び運転

評価責任者(PI : Principal Investigator)は、すべての技術分野について、総括し全体管理ができるレベルで理解しなければならない。PI は、解析し、説明し、評価作業の完全性を正当化する説明ができなければならない。

ステップ4. アプローチと期待される結果を記述する計画の策定—M

主な解析作業を始める前に、評価計画は慎重に策定され、レビューされ、文書化されていなければならない。さらに、人的リソース、コスト、スケジュール、結果及び文書化の形式は明確に定義されていなければならない。マイルストーンは特にスポンサーに対する定期的な報告のために設定されなければならない。ピアレビューの実施と利用について詳細に計画することは品質を保証するために重要である。計画の策定や、情報収集や解析タスクの多くを実施する際に、NES の安全性評価、保障措置及びセキュリティに係る作業と協力することは、大きな利益をもたらさう。

ステップ9. ピアレビュー委員会—M

PR&PP 評価のプロダクトは意思決定の根拠となり、また広く公開されることが考えうるため、その品質保証の観点からピアレビューを実施すべきである。一般的に2種類のピアレビューが行われ、これらはプロジェクトに対して異なるタイプの支援を与えている。

- ・中間ピアレビュー／運営委員会
- ・解析完了後の独立ピアレビュー

中間ピアレビューは定期的に(四半期に1度程度)実施され、評価プロセスに関与する実施者と意思決定者で構成される専門家グループに対して、作業の進捗状況と知り得たすべての問題についてブリーフィングがなされる。独立ピアレビューは、評価に関与しなかった外部の独立専門家が完了したプロダクトのレビューを行うことで、プロダクトに客観性を持たせることが出来る。

1.5.2 作業の実施

(プロセスステップの3, 5, 6及び7)

実際に作業を実施する、主要な活動には四つのステップがある。ステップ3と5は解析のために必要な準備が行われ、一方、ステップ6では大半の解析が実施される。

ステップ3. 取扱い可能な要素への分解—M

このステップでは、パスウェイ解析のために、NES を扱いやすい数のシステム要素及び PR&PP 脅威に分解する。システム要素及び脅威は、まず定性的で粗いパスウェイ解析に用いられ、定量的な解析へ向けて段階的に精緻化されていく。このシステム要素及び脅威を特定する際には、専門家判断を用いてもよい。

ステップ5. インputデータの収集と確認—P

インputデータの量と情報源は解析の範囲に依存する。インputデータの妥当性は、データソースの独立レビュー、あるいは専門家判断の一貫性及び根拠の調査によって確認される。解析に用いられる情報やインputデータが機密もしくは機微な情報源から得られる限り、評価結果が機密になる可能性も含めて、解析者はその情報を適切に保護しなければならない。最も重要なことは設計者との密な連携である。設計者は PR&PP 評価チームの主要メンバーであるべきである。後に評価が稼働中の施設へ適用される時は、運転者チームが含まれるべきである。

ステップ6. 解析の実施—P

PR&PP のリスクと能力の実際の解析は、複数段階のプロセスから成り、評価手法の中のシステム応答及び結果の部分がそれに当たる。システム応答はパスウェイアプローチを用いてモデル化され、それによって PR&PP 評価に必要な具体的なタスクが特定される。ハイレベルでは、PR 評価、PP 評価とも、必要とされるタスクは全く同一であるが、詳細なレベルでは具体的な解析が PR と PP で異なる。これらの差異は第2章に記述されている。結果は明確に定義された指標一式の推定(estimation)の形で提示され、これも第2章に説明されている。

ステップ7. 提示用結果の集約

事例解析が何件か実施されるまでは、結果の統合は慎重に行わなければならない。本プロセスでは、解析者は既存の研究を参照、検討し、結果を統合するために現状において最適な解析ツールを適用し、設計者、政策決定者及び外部の利害関係者に表現するにあたって最適なフォームで結果を提示するべきである。

1.5.3 作業の報告

(プロセスステップ8)

ステップ8. 報告書作成—R

解析者は、ユーザーにとって容易に理解でき、適切な結論を導出できるような形で結果を提供しなければならない。報告書に機密または機微な情報が含まれている場合は、公開用のサマリーの作成が必要

であろう。2.3節では、特定の読者との最適なコミュニケーションのために、結果のフォームを適用する方法が記述されている。

2. 評価手法

PR&PP 手法の主な要素について、以下に詳述する。第 1 章に要約したように、これらの要素はチャレンジの定義、システム応答及びその結果と、結果の提示を含む。

2.1 チャレンジ

PR と PP を評価するに当たって、解析者は、誰に対して、また、どんな行為に対して NES が防護されるのかを最初に決めなければならない。評価結果はこの文脈でのみ適切に理解できるものとなる。したがって、評価の開始に当たって、どんな脅威を評価範囲に含めるか、評価のスポンサーの合意を得ることが重要である。包括的に定義するためには、標準脅威セット(RTS: Reference Threat Set)と呼ばれる潜在的な脅威の全ての組み合わせが、認識され評価されなければならない。最初に厳密に脅威を定義することで、全く想定しなかった脅威が後の評価で出現する可能性を回避することができる。標準脅威セットは原子力施設的设计・開発プロセスを通じて発展するべきであり、それは最終的には規制行為の基礎を成す設計基礎脅威(DBTs)を作成する上で参考になるだろう。

特定の PR&PP 脅威を定義するには、拡散行為者、拡散行為者の戦略、及び拡散行為者の目的に関する情報が必要である。表 2.1 は PR&PP 評価手法に用いるために開発された RTS の主な特徴をまとめている。表 2.1 の各々の要素は下記及び付録 C においてより詳細に記述されており、更に将来の PR 及び PP 脅威の評価や施設設計への取り込みの方法を示している。

2.1.1 ホスト国の脅威の定義(PR)

拡散は、ホスト国による核爆発装置の獲得と定義されている。以下の節では、この脅威空間における行為者、能力、目的及び戦略について記述する。非国家主体による獲得については、核物質防護システム(PPS)で対応するものとし、2.1.2 に記述している。拡散国(国家主体)による核物質の盗取は特殊なケースであるが、この脅威もまたホスト国の PPS で対処されるため、2.1.2 節に記述されている。

2.1.1.1 PR における行為者、能力及び目的

核兵器を獲得するというホスト国の動機は、その緊急性、求める兵器のタイプ及び量、充てられるリソース、及び受容可能なリスク(すべて時間と共に変化する)を等からなり、これらは PR 脅威の定義に影響するであろう。ホスト国の最終的な目的とは関係なく、一つ目の兵器の獲得は基本的なしきい値であり、よって、通常一つ目の兵器の獲得を解析の枢要な終了点として扱う。

PR に関しては、**拡散行為者**は非核兵器国であり、評価の対象となる施設と核物質が物理的に管理され、国際保障措置下にある、すなわち、核不拡散条約(NPT)(INFCIRC/140, IAEA1970)、NPT 内の非核兵器国(NNWS)のための保障措置協定(INFCIRC/153 修正, IAEA1972)、及び NPT の追加議定書(INFCIRC/540 修正, IAEA1998)に基づく保障措置を受けていると仮定される。

ホスト国全体の拡散能力は幾つかの主要分野での能力によって決まる。すなわち、一般的な技術的スキル/知識、一般的リソース(要員及び資金)、ウラン及びトリウム資源(特に自国領内かどうか)、一般工業能力、及び特定の原子力技術(例えば、核物理及び原子力工学の知識と、特に濃縮及び再処理等の原子力施設)等。国の能力を示す一般的な数値は様々な公開文献(IAEA2003を含む)に見出される。^{*4}

表 2.1 PR&PP 脅威の要素

	核拡散抵抗性	核物質防護
拡散行為者のタイプ	<ul style="list-style-type: none"> ・ホスト国 	<ul style="list-style-type: none"> ・外部脅威者 ・内部脅威者(インサイダー)を伴う外部脅威者 ・内部脅威者のみ ・上述+非ホスト国
行為者の能力	<ul style="list-style-type: none"> ・技術的スキル ・リソース(資金及び人員) ・ウラン及びトリウム資源 ・工業能力 ・原子力能力 	<ul style="list-style-type: none"> ・知識 ・スキル ・兵器及びツール ・行為者の数 ・献身性
目的 (核燃料サイクルに係する)	核兵器： <ul style="list-style-type: none"> ・数 ・信頼性 ・貯蔵能力 ・運搬能力 ・生産速度 	<ul style="list-style-type: none"> ・運転妨害 ・放射能放出 ・核爆発装置 ・放射能拡散兵器(RDD) ・情報盗取
戦略	<ul style="list-style-type: none"> ・秘密の転用 ・公然転用 ・秘密施設の不正使用 ・公然の施設不正使用 ・独立した秘密施設の使用 	<ul style="list-style-type: none"> ・様々な攻撃モード ・様々な戦術

核拡散を行うホスト国の民生用核燃料サイクルの不正使用の方法は、ホスト国が獲得を目指す最終的な核兵器の規模(大きさ、信頼性、貯蔵能力、到達能力及び生産配備速度)に影響される。例えば技術的要求に関しては、幾つかの属性(裸球状臨界量、熱発生率、自発中性子発生率及びガンマ線放出等)が、爆発物に使用する核物質の選択に影響する。

2.1.1.2 PR 戦略

拡散ホスト国は、以下のような特定の環境に依存して、異なる戦略を選択しうる。

^{*4} ホスト国の能力を NES の導入前に検討する場合、それは NES の導入に伴って大幅に変わり得る。例えば、再処理能力を持たない国が再処理施設を導入する場合、解析者にとって重要で考慮すべき重大な拡散パスウェイが新たに創出される可能性がある。一方で、これらの能力が本質的に変化しないケースもあるだろう。こうした理由により、PR 評価の仮定を明確に特定することが必要である。例えば、仮定された能力は新規の NES が導入される以前より国家が所有しているものか、または実際に導入された新規 NES を基に推定された能力か、等。これによって解析者が、新規 NES の導入がホスト国の能力に与える影響について考慮すること、また NES の導入前後の能力の差異を考慮するかどうかを検討することが可能となる。

- ・ 申告されたフロー及びインベントリからの秘密の転用
これは、一般的な組成の核物質を有する施設からの直接抜き取り戦略、またはデータを改ざんして検知を回避し、より魅力的な分裂性物質を生産するといった申告物質の転用戦略を含む。
- ・ 秘密の施設不正使用、未申告の核物質生産あるいは申告施設での処理
この戦略は、兵器用核物質の処理または製造を民生用原子力計画の中に隠すことを狙ったものである。動力炉でのウランの未申告照射がその一例である。
- ・ 申告核物質の公然転用及び／または未申告生産のための施設の不正使用
この場合は、ホスト国は検知には関知せず、その活動を隠そうとすることなく核物質や施設を核兵器計画のために利用することを追求する。
- ・ 専用の秘密施設のみを用いた製造
この戦略では、ホスト国は申告した燃料サイクルで扱う核物質やサービスを直接使うのではなく、専用の秘密施設(場合によっては申告施設の複製)を建設して兵器利用可能核物質を製造する。

2.1.2 非ホスト国の脅威の定義(PP)

PP 脅威空間(Threat Space)は、施設特性と利用可能な設計の詳細さによってその重要性は変化する。しかし、以下の節で特定される各脅威は、評価プロセスの一部としてレビューされるべきである。表 2.1 に示すように、PP 脅威の定義は二つの要素からなる。すなわち、行為者についての記述(タイプ、目的及び能力を含む)、及び行為者の戦略についての記述である。脅威空間は、適切な範囲での行為者と戦略の組み合わせを考慮して定義される。

2.1.2.1 PP 行為者、能力及び目的

PP 脅威空間を定義するために、三つのタイプの**行為者**が検討されなければならない。

- ・ 外部脅威者
- ・ 内部脅威者(インサイダー)と結託した外部脅威者
- ・ 内部脅威者単独

外部脅威者は武装したテロリストグループ、拡散国の関係者、支持グループ、組織的犯罪ギャング及び独立した個人を含みうる。内部脅威者は外部脅威者に好意的であり、同時に不満分子、反社会的、精神的に不安定、または買収された雇用者や契約スタッフも含みうる。

PP 評価は非ホスト国と非国家主体の脅威の混合体を考慮すべきである。混合体を考慮することで解析は複雑になるが、カテゴリー間の相乗作用を考慮する必要があるためである。行為者をどこまで詳細に定義するかは、評価の目的に合わせるべきである。数十年先の将来に運転が開始されるようなシステムの評価については、行為者のタイプの定義は定性的で定型化されたものを採用することとなるだろう。現在あるいは近い将来に運転が開始される場合については、行為者の定義は具体的で詳細になるであろう。

PP 脅威空間を定義するために検討しなければならない行為者の**能力**の5つのカテゴリー

- ・ 知識(内部脅威者が有する知識への外部脅威者によるアクセスを含む)

- ・スキル
- ・武器とツール(民生用、軍用、あるいは急造品)
- ・行為者の数
- ・コミットメントと献身性(自己犠牲までをリスク許容範囲とする)

PP脅威空間を定義するために検討しなければならない行為者の**目的**の5つのカテゴリー

- ・通常運転の妨害を意図する妨害破壊行為(サボタージュ)
- ・放射能放出を引き起こすことを意図する妨害破壊行為
- ・核爆発物製造のための盗取
- ・RDDs製造のための盗取
- ・技術情報の盗取

2.1.2.2 PP戦略

PP行為者の戦略は一連の戦術と攻撃の方法で定義できる。所与の脅威の戦略を定義する時には、単独または組み合わせて採用される5つの潜在的な**攻撃の方法**を検討するべきである。

- ・地上(公然及び隠密裏行動の混合、及び/または内部脅威者の助けを伴う)
- ・水上(多くのNESsが大水域のそばに位置している)
- ・遠隔(スタンドオフ)(軽対戦車兵器や携行式ロケット弾を用いた直接または陽動攻撃)
- ・航空機(航空機自体を兵器として使用、あるいは爆発物や人員の輸送のために使用)
- ・サイバー(警報、センサー、あるいは判定ソフトウェアのハッキング、または原子炉安全ソフトウェアの直接攻撃)

さらに、ある脅威に対する戦略を定義する時、3つのカテゴリーの戦術が単一または組み合わせて検討されるかもしれない。

- ・ステルス型(PPSの構成要素を回避または無力化する)
- ・虚偽(偽の身分証明書や許可の使用)
- ・公然の武力(完全な武装襲撃を企図する支持グループによる)

2.2 システム応答

システム応答評価の最初のステップは評価対象となるシステム要素を特定することである。システム要素を特定する方法を以下に記す。さらに、解析者はターゲットを特定、分類し、パスウェイを特定、精緻化し、評価指標について評価しなければならない。

2.2.1 システム要素の特定

システム要素の特定は、ターゲットに対するパスウェイを明らかにし、精緻化し、解析できるように、原子力システムを扱い易い数の要素にまで分解することを目的として行う。原子力システムは非常に広範かつ複雑で多数の施設とその運転が含まれる。さらに、GEN IVNESは、それだけで存在するのではなく、既存の燃料サイクルの基本設計概念の延長上に展開されるであろうし、既存の燃料サイクルとの相互

作用は非常に大きいであろう。したがって、PR&PP 評価では、評価対象外の他のシステム要素との境界や接点を明確に決めなければならない。

ここでいう原子力システムは一般的に施設、管理などから構成される。ホスト国のうち、原子炉のみを保有する国(以下原子炉国と呼ぶ)では、原子力システムは、原子炉、関連する新燃料及び使用済燃料の貯蔵庫及び場合によっては原子力研究施設から成る。燃料供給国、すなわち核燃料サイクル国では、これらに加えて燃料サイクルの1つの要素(例えば、濃縮施設)あるいは複数の要素も含みうる。

システム応答の評価は、システムを施設レベルまで個々の要素に分解することによって容易になる。しかしながら、解析の詳細さと目的によっては、解析者は施設を明確なプロセスや運転のレベルまで、さらに細かい要素に分解する必要がある。システム要素を定義するために、解析者は核物質や運転が行われる場所、それらへのアクセス性と特性、さらに、物質収支区域(MBAs)を定義し、枢要測定点(KMPs)を決定し、保障措置及び核物質防護を適用するために用いられる潜在的な手法を検討する。施設間の輸送は、核物質転用や盗取のポイントにもなる可能性があるため、重要な輸送リンクは別個の要素として、もしくは、システム要素の一部として特定されなければならない。

2.2.2 ターゲットの特定

PR のターゲットは転用される可能性のある核物質、未申告核物質を処理するために不正使用されうる装置及びプロセス、または、未申告施設で複製される可能性のある装置や技術である。PP ターゲットは盗取から防護されるべき核物質や情報、または妨害破壊行為から防護されるべき一連の装置である。ターゲット特定の第一のゴールは完全性、すなわち、すべての可能なターゲットとパスウェイが特定されたと保証することである。安全性解析を目的とした初期のハザード特定が実施されるのと同時期に(一般的には、システムプロセス、物質の在庫及びフローを決定するために最初のプロセスフロー図が作成される、概念設計の最初の段階に当たる)、初期のターゲット特定も行うことができる。事実、PR&PP 評価における様々な脅威カテゴリーについてターゲットを設定することは、安全性解析に用いられるハザード特定プロセスと多くの類似性を持っている(ボックス 2.1)。完全性を担保するために、設計が進捗し、システムプロセス、在庫、フロー(廃棄物のストリームを含む)の定義が徐々に詳細化されるのに伴い、安全上のハザード特定とともにターゲット特定も定期的にアップデートされなければならない。

ある脅威カテゴリーに関連する個々のターゲット及び一連のターゲットは少なくとも一つのパスウェイを持っている。パスウェイは、ターゲットの個々の属性や脅威の戦略あるいは脅威の目的に基づいて分類できる。システム要素中の潜在的なターゲットも脅威の目的と戦略に依存する。解析を必要とするパスウェイのタイプは脅威の定義によって決められる。

ボックス 2.1 安全性解析と PR&PP の間の共通性

GEN IV プログラムは、持続可能性、経済性、安全性・信頼性、及び拡散抵抗性・核物質防護という 4 つの主要なゴールを立てている。本 PR&PP 評価手法報告書では、PR&PP を評価するアプローチを確立するために用いられるプロセスが記述されている。同様のプロセスが安全性・信頼性の評価・比較でも用いられており、両分野(安全性・信頼性及び PR&PP)の解析が並行して実施されることが推奨される。

以下簡単な図は PR&PP 手法のアプローチを示している。

脅 威 ⇒ システム応答 ⇒ 結 果

事故解析プロセスも同様な方法で定義できる。

事故発生 ⇒ システム応答 ⇒ 影 響

これらのパラダイムが示すように、施設設計、開発及び建設の様々な段階で、二つのタイプの評価において、類似したシステム情報の収集、分析が必要となる。これらの分野で評価を並行して行うことで、相互に補完し、評価の結果と評価の実施が相互に関わり合い、影響し合うことになる。

PR&PP 評価において、初期のシステム要素やターゲット特定を実施する適切な時期は、事故解析プロセスの一部として施設ハザード評価(安全性評価)がなされる時である。ハザード評価は、

- ・含まれる物質の最大量を、その形態と存在しそうな場所を含めて推定する。
- ・有害物質に影響を与え、その放出を誘引しうる潜在的初期事象を特定する。
- ・事故シナリオにおいて有害物質の放出を防止するために役立つ構造、システムまたはシステム要素を記述する。
- ・事故シナリオにおいて有害物質の放出による影響を緩和するために役立つ構造、システムまたはシステム要素を特定する。

PP と PR の両方の評価プロセスについてターゲットの特定と分類を行うこの安全性評価プロセスには明らかな類似性がある。

PR 脅威に対する PR パスウェイは、表 2.1 を用い、戦略によって以下のハイレベルの脅威タイプに分類することができる。

- ・秘密の転用(物質ターゲット)
- ・公然転用(ブレイクアウト)(物質ターゲット)
- ・施設の秘密不正使用(プロセス/装置ターゲット)
- ・施設の公然不正使用(プロセス/装置ターゲット)
- ・秘密施設の使用(プロセス/装置ターゲット)

PP 脅威に対する PP パスウェイは、表 2.1 を用い、目的によって以下のハイレベルの脅威タイプに分類することができる。

- ・運転妨害
- ・放射能放出を引き起こす妨害破壊行為(プロセス/装置ターゲット)

- ・核爆発物のための盗取(物質ターゲット)
- ・RDDsのための盗取(物質ターゲット)
- ・情報の盗取(プロセス/装置ターゲット)

脅威の定義において、これらのハイレベル PR&PP 脅威を用いることにより、目的や戦略を具体的に想定することなく、ターゲット特定プロセスの構築や、核物質、プロセス及び装置ターゲットの特定を行うことができる。

核爆発装置獲得のための秘密あるいは公然の転用(PR)及び核爆発装置や RDDs のための盗取(PP)における、物質ターゲットの特定は比較的容易である。何故なら、システム要素中に受け入れる、存在する、そして払い出されるすべての物質を計量することで実施できるからである。フロー図は通常設計の最も初期の段階に作成されるので、物質収支やフローについての情報は通常容易に利用することができる。しかしながら、ターゲットを特定するプロセスにおいて、核分裂性物質や親物質を含むすべての物質が特定されなければならない。これには、濃度や他の属性に関係なくすべての廃棄物ストリームも含まれる。通常核分裂性物質や親物質の濃度が低い廃棄物のストリームに関しては、この特定作業は特に重要である。なぜなら、未申告あるいは不正に廃棄物ストリームへ物質を追加的に移動させた場合、それが転用や盗取のパスウェイとなりうるからである。

一方、より複雑なのは、秘密あるいは公然の未申告不正使用(PR)や、放射性物質・放射線発生装置等に対する妨害破壊行為、あるいは情報盗取(PP)のためのプロセス及び装置ターゲットの特定である。プロセスあるいは装置機能が単一で不正使用されたり(未申告の製造)、無力化されたりする(妨害破壊行為)ことは稀である。これらの行為はプロセスと装置機能の組み合わせが必要であり、敵対者はシステム要素の中に物質、装置及びツールを追加的に導入する可能性もある。したがって、ハイレベルの脅威のパスウェイタイプそれぞれについて、システム要素中のあらゆるプロセス及び装置の潜在的ターゲットを特定するために、系統的な解析が必要である。

秘密施設で使用するために複製あるいは移転されうるプロセスや装置ターゲットを特定するためには、当該施設で実施される可能性のあるプロセスを解析する必要がある。秘密施設を建設あるいは運転する際に技術的困難性が高い装置は、一般的に情報の盗取(PP、他国への移転目的)、あるいは複製または移転(PR)される可能性が最も高い。情報の盗取と施設・装置の複製の潜在的なターゲットを特定することによって、特定の部品や物質の輸入を監視し検知する輸出管理システムの設計に役立つ。このような輸出管理は秘密の製造施設を検知する効果的な方法であることが証明されている。

申告施設を用いた未申告生産のターゲットを特定するためには、申告施設のフローが変更される可能性、そのシステムへ未申告の物質や装置が追加される可能性、対象システムの一部の要素が対象外の未申告の秘密施設のプロセスに利用される可能性を考慮しなければならない。放射性物質の放出を伴う妨害破壊行為については、結果的に放出を引き起こす可能性のあるすべての装置の組合せについて、ターゲットの「カット」セットを特定しなければならない。

すべてのターゲットが特定されて初めて“成功セット(success sets)”を特定することが可能となる。“成功セット”とは、これを防護すれば全ての潜在的ターゲットについて敵対者の失敗という結果を導くような最小の装置機能セットのことである。未申告製造のシナリオでは、このような“成功セット”の特定は、システム要素における保障措置アプローチの設計に役立つ。妨害破壊行為シナリオでは、成功セットの特定はPPSの設計の助けになる。

2.2.2.1 PR ターゲットの特定

PRターゲットの特定は2つのステップで進む。各ステップは異なるタイプのターゲットについて検討する。

1. 秘密及び公然(ブレイクアウト)転用戦略：

- ・核物質の貯蔵量は、ターゲットになりうる在庫を特定するために逐一検討される。
- ・核物質のフローは、転用されうる核物質の移動を特定するために逐一検討される。

もし拡散国の戦略が長期間にわたる秘密裏転用を含むのであれば、少量の在庫量やフローも考慮しなければならない。それらが拡散国の目的達成に寄与するターゲットになる可能性があるからである。

2. 秘密及び公然(ブレイクアウト)の不正使用戦略では、以下のターゲットを特定するためにシステム要素が1つ1つ検討される。：

- ・定義された脅威の戦略と目的に合致し、かつ核物質の処理のために不正使用されうる、全ての申告された装置。ターゲットは、装置が備えている機能(例えば、照射、プルトニウム分離、濃縮)に基づいて特定される。その際、能力、技術的困難性、コストは考慮されない。この段階の評価では、施設が通常運転外にある場合も含まなければならない。どのように秘密の核物質がプロセスに挿入されプロダクトが抽出されるかの詳細は、ホールドアップ等の意図的でない事象も含めて、パスウェイセグメントの解析により検討される。
- ・脅威空間における戦略と目的に合致し、かつ、秘密施設内で拡散のために不正使用されうる技術(情報及び装置)。例えば、秘密施設内で複製(クローン)されうる装置、秘密施設を設計または建設する拡散国に役立つ情報、あるいは、秘密施設が放棄された、または破損したと申告した後でも使用可能な重要装置等。この段階では、システム要素によってもたらされる技術で、核兵器プログラムを目的としない限り拡散国が入手することが一般的に不可能な技術を特定するために、専門家判断が必要である。これらのターゲットは、拡散国への移転を目的とした盗取のターゲットともなりうることに注意すべきである。情報の盗取はPPのパスウェイ解析により検討されるが、それと同一の方法でターゲットを特定することができる。

ターゲットの特定とそれに続くセグメントを特定するために、拡散国の戦略を多様な側面から繰り返しレビューし、改訂する必要がある。

2.2.2.2 PP ターゲットの特定

PP 評価で対象となるターゲットは、核物質の盗取を目的とする場合の核物質ターゲットと妨害破壊行為や情報盗取を目的とする場合の装置ターゲットの二つに大別される。システムには共通した特性を持つ多数のターゲットが存在するため、詳細解析においては、ターゲットを系統的に分類し、ソートし、可能であればランク付けして、代表的なターゲットのサブセットを選択することが重要である。

フローシートは、通常設計プロセスの初期の段階に作成されるので、解析者が核物質の貯蔵やフローに関する情報を利用することは容易である。核爆発装置の獲得を目的とする PP の核物質ターゲットを特定するためには、上述の PR 転用ターゲットと同様のターゲット特定プロセスを適用することができる。RDDs 目的の核物質盗取シナリオでは、システム要素中のすべての放射性物質、例えば、低レベル及び高レベル廃棄物のストリームが検討されなければならない。RDD 物質ターゲットを包括的に特定するためには、核爆発目的のターゲット特定と同様の方法を用いることができる。

妨害破壊行為のための装置ターゲットの特定は、いっそう複雑で解析的なプロセスが必要である。放射性物質の放出を引き起こす妨害破壊行為を成功させるためには、敵対者は装置の部分的機能を多数無効化しなければならない。装置ターゲットセットは、施設の妨害破壊行為を成功させるために無効化されなければならない装置の最小セットとして定義される。1つの施設には複数の装置ターゲットセットが存在する場合が多い。各装置ターゲットセットの装置機能の複数性と多様性により、システムは冗長かつ多様なものとなる。

攻撃者のゴールが装置ターゲットセットの完全な無効化であれば、PPS のゴールは各装置ターゲットセットの少なくとも一つの要素を防護することである。そこで、成功セットは、装置機能の最小セットとして定義することができ、それは各装置ターゲットセットの少なくとも一つの要素を含む。

装置ターゲットセットの特定は、原子力施設の PPSs の設計の間に定常的に実施される。このアプローチは、確率論的安全性解析(PSA)で用いられる方法と同様である。PSA は、もし故障すれば放射性物質放出を起こしうる装置機能(カットセット)の組み合わせを特定することを目的とする。PSA 研究は放射性物質放出を伴う潜在的妨害破壊行為を特定するための起点となりうるが、二つの点で修正が必要である。一つは、妨害破壊行為の場合、多様性や冗長性を備えた要素において複数同時に故障が発生する確率が大幅に高まる可能性があることである。第二は、通常は高い信頼性を持つパッシブコンポーネント(壁、防火障壁、ドア、容器など)の破損確率も、増加しうることである。

妨害破壊行為のターゲット特定は三つのステップで行われる。：(1)無効化された場合に放射性核種の放出を引き起こしうる機能を持つ一連の装置に対する系統的な調査(完全な装置ターゲット一式)、(2)防護さ

れるべき各装置ターゲットのサブセットの選択(枢要装置の特定)、(3)枢要装置セットを有する枢要区域の定義(これらの装置のアクセス可能性を評価するためのアクセスパスの特定)

一連の装置ターゲットを特定する方法は、様々な解析的アプローチの中から解析者が選択できる。最初のスクリーニングにターゲット特定ツリーを用いた場合、トップレベル(もっとも代表的なレベル)ではハイレベルの主要な妨害破壊行為のターゲットを特定できるし、最底辺のノード(もっとも具体的なレベル)では無効化された場合にツリーの頂点に影響を及ぼす一連の装置ターゲットを特定することができる。

2.2.3 ターゲットの分類

脅威の目的と戦略のカテゴリーにかかわらず、系統的なターゲット特定をおこなった結果、多数のターゲットまたはターゲットセットが生じ、それらの多くは多分に類似性があることが予想される。したがって、脅威の目的と戦略の各カテゴリーについて、ターゲット属性に基づく分類方法を適用する。このターゲットの分類では、各ターゲットの共通する特徴にしたがって、これらを管理可能な数の「箱」(カテゴリー)にグループ化する。この分類作業を通してターゲットとパスウェイを統合し、代表的なターゲットとパスウェイを特定することによって、詳細検討の対象となるパスウェイの数を減らすことができる。

この分類には、脅威の目的と戦略及び当該パスウェイの主要セグメントに基づいて選択された属性を用いる。例えば公然の核物質転用の PR 脅威戦略では、物質ターゲットは、取得、処理及び製造のセグメントにおける重要な属性によって、物質ターゲットを分類することができる。同様に、放射性物質放出を伴う妨害破壊攻撃の PP 脅威戦略では、アクセス、不正利用、影響発生 of セグメントにおける重要な属性により、プロセス及び装置ターゲットを分類できる。

この分類アプローチによって、ターゲットを各カテゴリーにグループ分けすることができ、さらに各カテゴリーから、「代表的」なターゲットあるいは「境界」ターゲットを選択することができる。「代表的」とは、ある脅威の目的及び戦略において、ターゲットの防護のために共通の保障措置あるいは PPSs を適用することが可能で、このカテゴリーの中のいかなるターゲットについても概ね同じようなシステム応答及び結果が予測されることを意味する。「境界」とは、そのターゲットが様々なターゲットの中で最悪の結果になると予想されることを意味する。したがって、ターゲットを分類することによって、詳細なパスウェイ解析のために選択されるターゲットやパスウェイの数を、より扱い易い数にまで減少させることができる。これによって、既存の保障措置や PPS を利用することが可能か、あるいはこれらの設計を新たに開発する必要があるかを設計者が判断できるようになる。

個々の項目を属性に基づいてグループ分けする分類法を用いると、ターゲットの分類は本質的におよそそのものとなるであろう。もし、同一カテゴリーにグループ化された異なるターゲットやパスウェイについて、結果に非常に大きい差が生じることが分かれば、重要なターゲット属性が見逃されたことになる。よって、「完全な」分類法は存在しない。ターゲットの分類法は解析者が経験をつむにつれて進歩することが期待されるし、進歩しなくてはならない。したがって、解析者が既存の研究を参照し考察することが重要である。

ターゲット属性は物理的属性とロケーション属性の両方を含んでいる。ターゲット分類に用いられる物理的属性は設計プロセスにおいて比較的早く判明することが多い。物質ターゲットの分類に用いられる属性は、同位体組成、物理的形状、在庫量及び流量等、プロセスフローシートから決定できる固有の性質が含まれる。装置ターゲットに用いられる属性は、装置機能の基本的特性を含んでいる。

設計プロセスの後期に物理的な配置図が作られるが、これはターゲットのロケーション属性を定義するのに役立つであろう。例えば、物理的ロケーションは、PP ターゲットのアクセス性や PR ターゲットの保障措置適用性(safeguardability)に対して重要な影響を持つ。設計者は、ターゲット分類ツールが、実際に物理的配置の設計をする際に有用であることが分かるであろう。なぜなら分類ツールは、全体の脆弱性を低減するためにロケーション属性を選択する際に、よい指針となるからである。例えば、脆弱性の高い PP 装置ターゲットをアクセス性の低い場所に配置するなどの方法によって脆弱性は低減できる。

さらに、いくつかのターゲット属性は詳細設計時のみ、及び/または、それ以降の詳細な運転及び保守手順の進展にしたがって決定される。以下のような例がある。

- ・ 妨害破壊行為に対抗して装置機能を強健にするような設計上の特性
- ・ 未申告の親物質が照射目的で原子炉に挿入された場合、検出可能な兆候を発生させるような設計上の特性
- ・ 保守/運転活動を 2 人ルールで実施する運転手順

重要なターゲット属性が詳細設計後でなければ決定できない場合は、解析者は詳細設計と運転・保守の手順に関して、システム性能の目標を決める、あるいは、過去に開発された特定の保障措置や PPS の設計を参照することで、妥当な仮定を導入することができる。例えば、ある PP ターゲットが存在する場所に、ある区域アクセス性カテゴリーが割り当てられる場合、その区域カテゴリーはアクセス制限に係る性能目標を有する場合がある。同様に、保障措置評価によって、あるターゲットカテゴリーに対して適した保障措置システム設計が既に存在することが示されれば、この保障措置システム設計を開発中の新しいシステムの参考にすることができる。ターゲット分類の際に導入される性能目標は文書化されなければならない。その目標が達成されていることを確認するために、詳細設計の後に性能評価を実施しなければならない。既存の保障措置や PPS を参考にすることは、設計が適切に実現されていることを確認するために、追跡される必要がある。

2.2.3.1 PR ターゲットの分類

物質ターゲットについては、特定された各物質ターゲットの物理的属性とロケーション属性の組み合わせを検討することで分類を行う。ターゲットの分類において、全ての重要な属性が確実に特定され検討されるために、解析者は一従来の研究のレビューを含めた系統的なプロセスを採用すべきである。

2.2.3.2 PP ターゲットの分類とソート

PP ターゲットについては、ターゲット特定プロセスにおいて多数のターゲットが発生する。解析を容易にし、より多くの知見を得るため、ターゲットをその枢要属性、すなわち、物質ターゲットの場合はアクセス性と魅力度、装置ターゲットの場合はアクセス性と脆弱性によって分類することが有効である。この方法でソートすることにより、詳細パスウェイ解析を行う代表的ターゲットの選択が単純化され、解析者がシステムの PP 強度と脆弱性に関する重要な識見を得ることになる。

アクセス性は PP ターゲットの枢要属性の一つである。表 2.2 に PP ターゲットのソートに用いられる 7 つのアクセス性カテゴリーの例を示す。一般的に、PP におけるアクセス管理は高度に発展した概念である。原子力施設における核物質や枢要装置へのアクセスは、各区域に検知と遅延の要素が配備された、アクセス区域の多重セットによって管理される。米国及び国際文書に、多重のアクセス障壁管理による原子力施設内部へのアクセス管理に関する具体的要求事項及び勧告が記されている(10 CFR 73, US Code of Federal Regulations 2006, INFCIRC/274/Rev.1; 核物質防護条約, IAEA1980⁵⁵, INFCIRC/225/Rev.4 (Corrected), 核物質及び原子力施設の防護, IAEA1999⁵⁶)。この文書の分類法では、防護区域(タイプ 3 で表 2.2 よりも大きい)は境界線で囲まれる。さらに、防護区域は追加的なアクセス障壁(表 2.2 のタイプ 4, 5 及び 6)⁵⁷を持つ二次区域を含む場合がある。これらの二次区域は盗取から防護されるべき核物質を使用あるいは貯蔵している物質区域と、妨害破壊行為から守るべき機器を含む枢要区域の二つの基本タイプがある。

盗取については、敵対者は物質にアクセスし、施設から物質を持ち出し、目的を達成するためにその物質を不当に処理しなければならない。アクセス性(表 2.2)に加え、物質ターゲットは魅力度でソートされる。物質は PPS 設計が実施される間、魅力度⁵⁸及びカテゴリーレベルによって常にソートされる。DOE の段階的核物質防護⁵⁹プログラムにおいて特定された核物質のカテゴリーを表 2.3 に示す(DOE M 470.4-6, Nuclear Material Control and Accountability, 2005)。DOE システムでは 5 つの物質魅力度レベル(物理的形態、放射線レベル、化学組成及び同位体組成に基づき、A~E で表わされる)と、4 つの PP カテゴリー(物質存在量に基づき I~IV で表わされる)がある。この表は、US/DOE によって使用されており、核爆発物に利用される潜在的な盗取ターゲット物質に対する PP 上の要求事項を特定するために用いられている。DOE の核物質防護ランクでは、高照射の物質は最低の魅力度レベル(レベル E)に分類されており、これは濃縮度 20%以下の全ての組成のウランと同じレベルである。レベル E に当たる全ての物質は保障措置防護要求が

⁵⁵ この条約は核物質防護の分野で唯一国際的に法的拘束力がある。この条約は核物質に関連する犯罪の防止、検知及び処罰に関連する方策を確立した。

⁵⁶ IAEA は INFCIRC/225/Rev.4 で原子力施設や使用中、貯蔵中及び輸送中の核物質の PP 要求についての一連の拘束力のない勧告を提供している。

⁵⁷ 「二次区域」という用語は一般的なセキュリティシステムを記述するために、本報告書でのみ用いられている。この用語は IAEA や CFRs の文書には見られない。例えば、IAEA のアクセスエリアは、物質のカテゴリーに応じて変わる防護の要求とともに内部区域や貯蔵区域のような用語で記述されている。

⁵⁸ PR&PP における核物質タイプ(MT)の定義は魅力度の概念とは全く異なる。魅力度はシステム要素中のいかなるポイントでの物質の存在形態にも適用可能である。他方、PR&PP の物質タイプは兵器に利用可能な金属に処理された、最終的な物質に適用する。

最小であるカテゴリⅣに入れられる。一般的に、これらの核物質は本質的に取り扱いも施設からの持ち出しも困難であり、(すなわち、かさばる、及び/または、放射性である) 持ち出した後も兵器に使できるように処理するのは困難である。魅力度 A から D のレベルの物質で、その量がカテゴリレベルⅠからⅢの範囲内のものは、より核物質防護要求が厳しい。

表 22 エリアアクセス性カテゴリ一例

(下へ行くほどアクセスしにくい)

エリアカテゴリ	記述	例
(タイプ 1) 公衆区域	一般公衆区域	ビジターセンター
(タイプ 2) 制限区域	施設サイトのゲート内で、限定的なアクセス制限がかけられる区域	保管倉庫、駐車場及び訓練センター
(タイプ 3) 周辺防護区域	二重フェンスと他の侵入検知器で防護された区域；アクセスは審査された従業員と訪問者に限られ、入口では武器または爆発物の持込が検知される。	タービン建屋、保守棟、及び変圧器区域
(タイプ 4) 枢要区域 — 高頻度アクセス区域	枢要区域または核物質取扱区域 (例えば、周辺防護区域の中で許可されないアクセスを遅延する追加的な入口を持つ区域) 従業員による頻繁なアクセスがある	制御室、使用済燃料プール、MOX 燃料加工用グローブボックス及び頻繁な定期監視を要する機器を備えた区域
(タイプ 5) 枢要区域 — 中頻度アクセス管理区域	枢要区域または核物質取扱区域 中頻度アクセス。堅牢でアクティブな入口を有し、アクセスの間 PP が増強される。	金庫状のドアを備えた、原子炉制御系統及びバッテリーの格納区域；核物質貯蔵庫；原子炉運転中の原子炉一次系容器機構
(タイプ 6) 枢要区域 — 低頻度アクセス管理区域	枢要区域または核物質取扱区域 頻繁でないアクセス。堅牢でパッシブな入口を有し、アクセスの間 PP が増強される。	クレーン駆動ハッチの下のパッシブな崩壊熱除去装置設置空間、原子炉空隙、乾式キャスク貯蔵容器内部、ホットセル内部及び再処理施設の内部
(タイプ 7) 高度アクセス不能区域	通常運転時アクセス不可能区域 アクセスは非常に困難	埋立て原子炉サイロ空間周辺土壌、埋立て使用済燃料プール壁周辺土壌、及び閉鎖・埋め戻した地層処分場の内部

妨害破壊行為の場合、敵対者は最初に装置へアクセスして装置機能を無効化しなければならない。装置ターゲットは、アクセス性に加えて(表 22) 脆弱性(*fragility*)でソートされる。表 24 は装置の機能脆弱性のカテゴリの 3 例を示している。これは、装置機能を容易に緩和できない方法で無効化することの、相対的な困難度を示す。

アクセス性の低い区域内に設置できるタイプの装置もあれば、また無効化するのが困難か、または不能になっても簡単に修理できる装置機能もある。アクセス性が低いまたは脆弱性が低い装置(例えば、パッシブな安全機器は定常的な点検を要しない)は弾力的(*resilient*)と呼ぶことができる。一般的に弾力的な

装置は、敵対者が無効化することが困難であり、特に弾力的装置に冗長性かつ/または多様性がある場合は、より敵対者にとって困難なものとなる。

表 23 核爆発装置に使用可能な核物質の PP のための DOE 保障措置カテゴリ I ~IV
(DOE マニュアル 470. 4-6 の保障措置グレード表に基づく)

	魅力度 レベル	カテゴリ (量は kg 単位)							
		Pu または U-233 ^g				U-235 または Np-237			
		I	II	III	IV	I	II	III	IV
兵器 ^a	A	全量	NA	NA	NA	全量	NA	NA	NA
単離された 製品物質 ^b	B	≥2	0.4-2	0.2-0.4	<0.2	≥5	1-5	0.4-1	<0.4
高品質物質 ^c	C	≥6	2-6	0.4-2	<0.4	≥20	6-20	2-6	<2
低品質物質 ^d	D	NA	≥16	3-16	<3	NA	≥50	8-50	<8
他の全物質 ^e	E	報告すべき量 ^f であればカテゴリ IV							

注：NA 適用外

- ^a 組み立てられた兵器と実験装置(量に依らずカテゴリ I)
- ^b 兵器組み立て部品、ボタン、インゴット、再鋳造可能金属、及び直接転換可能物質
- ^c カーバイド、酸化物、溶液≥25g/L、硝酸塩、溶液、新燃料ピン及び集合体、合金及び混合物、≥50%濃縮の UF₄ または UF₆
- ^d 1-25g/L の溶液、大規模な再処理を要するプロセス残渣、中程度に照射された物質 (すなわち、1m での線量等量率が >0.15Sv/h を超え、1 Sv/h までのもの、1 Sv≡1 J/kg = 100 rem)、Pu-238 (廃棄物に含まれるものを除く)、及び ≥20%、<50% の濃縮 UF₄ または UF₆
- ^e 高照射されたもの(すなわち、1m での線量当量率が >1Sv/h、例えば、使用済燃料)、<1g/L の溶液及びすべての形態と量のウランで、<20% の U-235、もしくは <10% の U-233 を含むもの。
- ^f 報告すべき量が Pu-239 から Pu-242 まで ≥1g、及び濃縮ウラン、及び ≥0.1g の Pu-238。
- ^g U-233 の全量 = [含まれる U-233 + 含まれる U-235]

表 24 装置機能の脆弱性(Fragility)カテゴリ
(下へ行くほど脆弱性が低い)

装置機能カテゴリ	記述	例
(タイプ 1) 高脆弱性	装置機能は単純で、容易に利用可能なツールで迅速に無効化されうる。	電気回路盤、電力及び制御系配線、ポンプモーター、作動弁及びブレーカーの運転能力；可燃性物質の燃焼
(タイプ 1) 中脆弱性	装置機能は、容易に入手できるツールでは無効化に多少時間がかかる。爆薬のように通常許可されていないか、または工場で管理されているツールだと迅速に無効化されうる。	施錠されたキャビネット内の電子回路操作性；タンク、配管及び熱交換器のリーク健全性；機械によって作動する反応度制御機構の操作性
(タイプ 1) 低脆弱性	装置機能を無効化するには大量の爆薬、大型ミサイルまたは他の重量級ツール(クレーン等)を要する。	強化コンクリート壁や構造物の構造的完全性；内張り強化コンクリート構造全体のリーク健全性；液体、固体物質及び構造の熱慣性；及び負の炉心温度反応度係数

概念設計の段階や定性的解析のレベルでは、妨害破壊行為に対する各装置ターゲットセットの中のあらゆる装置を完全に特定することは不可能かもしれないし、あるいは必要ないかもしれない。すべてを特定するかわりに、解析者は各装置ターゲットセットが幾つかの弾力的装置を含むことを示すという選択肢をとるかもしれない。敵対者にとっては、ターゲットセットを破壊する困難さは、主としてこの弾力的な装置を破壊する困難さに依存し、また、装置ターゲットセット中の付加的な装置機能を壊す困難性に依存する。尚、敵対者はターゲットセットについて不確実な情報しか入手できないであろう。(装置ターゲットセットを完全に記述した情報は機微であり、防護されている。)

設計者の観点からは、潜在的な装置ターゲットセットを特定することで、そのシステム設計で確実に各装置ターゲットセットの中に弾力的な装置が導入されることを示すことは価値がある。加えて、装置ターゲットセットに冗長性と多様性を持たせることも有益であろう。(装置ターゲットセットは多数の異なる要素を有する、等)

妨害破壊行為が行われた後、攻撃の影響を減少させるために緩和措置がとられる。敵対者がその目的を達成するためには、彼らの装置ターゲットセットと攻撃戦略は、緩和措置をも無効にするものでなければならない。したがって、システム特性に緩和の機能を持たせることで、装置ターゲットセットに弾力性を与えることができる。例えば、非常に大きい熱慣性を持つ炉心は、崩壊熱による熱破損のため長い遅延を与えるであろう。

装置ターゲットセットとターゲットが特定・分類された後、続くターゲットパスウェイ解析を容易にするために、装置ターゲットのセットがソートされ、ランク付けされる。パスウェイ解析は、弾力的な装置の存在、装置の冗長性及び多様性、並びに装置ターゲットが無効化された場合にその影響を容易に緩和できるというシステム特性に基づいて行われる。

盗取についても同様に、ターゲットのアクセス性と魅力度に基づいてターゲットが分類され、ソート、ランク付けされる。

ターゲットの分類とソートによって、潜在的な強度と脆弱性が明らかになり明らかになり、PPの堅牢性に関する重要な知見を与える一方で、それはまた重要な限界も有している。何故なら、ここではシステム応答に重要な影響を与えうる、脅威の定義やシステム設計の詳細について考慮されないからである。さらに分類しただけでは、定性的な評価でない限り、PP指標を評価するのに不十分な情報しか提供しない。

したがって、粗いパスウェイレベルでは、パスウェイ解析もまた、当該システムのターゲットのうち代表的なサブセットについてのみ実施されるであろう。物質ターゲットに対するパスウェイ解析は、高いアクセス性及び/または魅力度を持つターゲットを含むべきであるし、妨害破壊行為のパスウェイ解析は、潜在的な装置ターゲットセットの中で最も弾力的な装置を含むべきである。

2.2.4 パスウェイ特定及び精緻化

パスウェイは目的を達成しようとする拡散国や敵対者の事象や行為の潜在的シーケンスである。図 2.1 は PR と PP 両方のパスウェイ解析の主なステップを描いており、両者の評価手法の間にはある強い類似性があることを示している。またこの図は、いかに中間結果が各ステップで容易に報告されうるかを提示している。(安全性評価の「事故起因者」を「脅威」に置き換え、放射線ソースタームが移動する段階を定義することにより、追加的な類似性を表すことができる。；ボックス2.1参照)

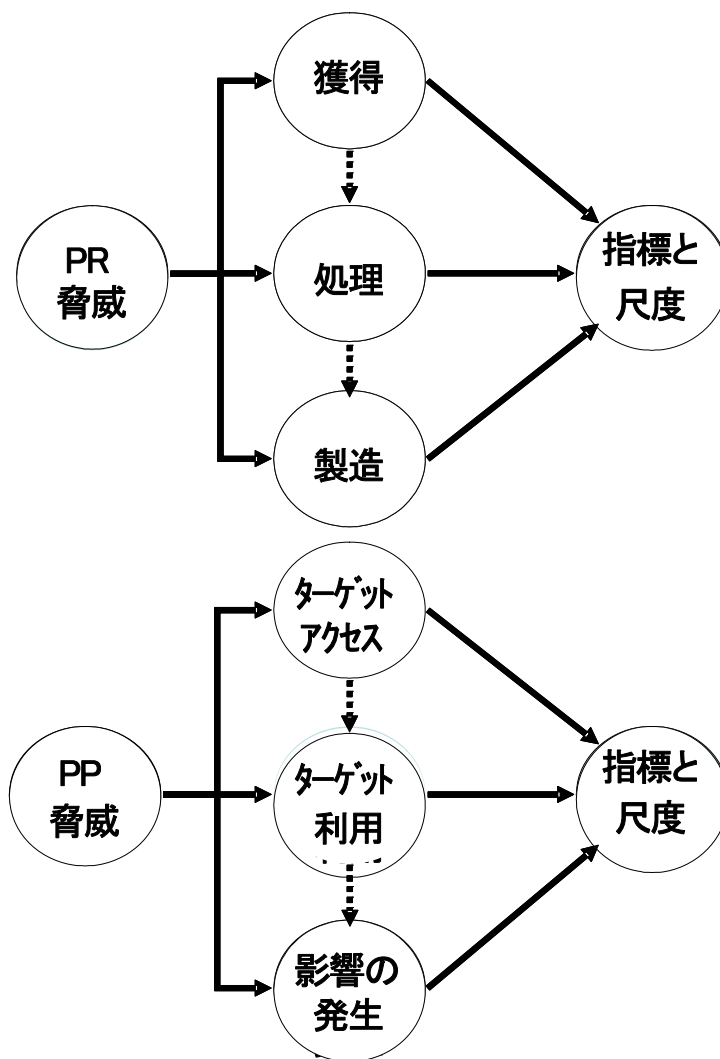


図 2.1 PR&PPのためのパスウェイ解析の主要なステップ

PR については、拡散国が核爆発装置を得ることを目的とした全てのパスウェイは、以下の三つの主要ステップに分けることができる。

獲得：いかなる形態の核物質であっても、核物質の獲得を目的とする活動は、核物質を獲得すると決めることから始まり、その核物質が使用可能な状態になるところで終わる。直接使用可能物質 (例えば、金属状の分離プルトニウム) が獲得できなければ更なる処理が兵器製造段階に入る前に必要となりうる。

処理：獲得段階で得た核物質を核兵器に直接使用可能にするための転換を実施する活動である。処理はターゲットの照射、プルトニウム分離、ウラン濃縮、及び酸化物還元もしくはフッ化物の金属への還元工程のような活動を含みうる。

製造：核爆発装置を製造し組み立てるための活動。製造は、核兵器に直接利用可能な核物質(金属プルトニウム等)を用いて、処理段階もしくは場合によっては獲得段階から(処理段階を経ずに)直接始まり、一つまたはそれ以上の核爆発装置を入手した時点で終了する。

PP についても同様に、敵対者が盗取ターゲットを盗む、または妨害破壊行為ターゲットを破壊するといった全てパスウェイが、三つの主要段階に分けられる。

ターゲットアクセス：ターゲットあるいは装置ターゲットセットにアクセスするために行う活動。ターゲットへのアクセスは、侵入検知システムを無効化する、核物質や装置にアクセスするため障壁を破る等の活動を含みうる。

ターゲット利用(exploitation)：施設または輸送システムから盗取ターゲットを持ち去るため、あるいは一連の装置ターゲットを破壊するために実行される活動。

結果(影響)の発生：ターゲット利用に続いて起こる事象のシーケンスで、放出、破損または破壊という結果をもたらす。

パスウェイはセグメントで構成される。セグメントはターゲットの周りに構築される。粗いパスウェイ解析では、セグメントは実行される行為を表す。完全な拡散パスウェイは獲得、処理及び製造を必要とし、完全な盗取または妨害破壊行為には、ターゲットアクセス、利用及び結果(影響)の発生を要する。そして、これらのステップの各々は一つまたはそれ以上のセグメントで構成される。

申告 NES の境界内で行われるセグメントは、内部セグメントと呼ばれ、他はすべて外部セグメントと称される。外部セグメントは未申告施設で実施されるプルトニウム抽出、ウラン濃縮、ターゲット製造等を表す。パスウェイは、最終結果に至る論理的な順番でセグメントどうしを関連付けることによって組み立てられる。

あらゆる PR セグメントにおいて保障措置システムは異常を検知し、一方、あらゆる PP セグメントにおいては PPS が不法行為を検知、遅延、緩和する。セグメントとパスウェイを組み立てる作業は、システム設計者が保障措置及び PP の専門家と交流することを促し、効果的な保障措置と PP 対策を導入する機会を与え、そしてこのシステムの保障措置と PP のアプローチを精緻化する。保障措置と PP アプローチは、保障措置及び PP のモニタリングシステムによる測定から構成される。モニタリングシステムはパスウェイセグメントにおいて実行される行為によって発生する異常を検知するが、他の原因でも作動する(誤警報)。保障措置と PP アプローチは、異常の検知後それが誤警報であったかどうかを判断するために警報受

信後にとられる行動を決めている。PP アプローチもまた、検知に続く敵対者の遅延と緩和に寄与する、固有のシステム設計の特性と PP 措置の戦略で構成される。

概念設計の段階では、設計が分かりやすい場合 (例えば密封された原子炉炉心の保障措置) や容易に利用できる場合 (既存のもの) を除いて、保障措置と PP アプローチの情報は利用できないことが多いであろう。保障措置または PP アプローチが決まる前であれば、パスウェイセグメントの検知確率や誤報率 (PP であれば遅延率及び緩和率) は、各パスウェイセグメントの性能目標として特定することができる。

包括的解析においては、多数のパスウェイが生まれることが予想される。どのようなアプローチでパスウェイを創出するかによって、この多数のパスウェイに対処するために後に用いられる手法も左右される。パスウェイ創出のための手法は、以下の条件を満たさなければならない。

- ・ 関係する専門家にとって、扱いやすく、自然で、理解しやすいものであること
- ・ 堅牢で、信頼性がある、代表的なパスウェイセットを創出すること。
- ・ すべての信頼性あるパスウェイが確実にカバーされ、明らかに信頼性のないパスウェイは、避けるかあるいは検討対象から外すこと。これらの検討外となったパスウェイは、代表的なターゲットとパスウェイに十分類似したものであり、それらを用いて対処できるか、あるいは、NES 全体の評価に寄与しない。

粗いパスウェイ解析では、最初はセグメントの数が限定されるかもしれない。パスウェイが限定される場合、場合によっては多数の潜在的パスウェイを手作業で作り出し、これらを分類し、その上で、指標評価の定性的解析を行う代表的なパスウェイセットを選ぶことができる。

こうした定性的なパスウェイの検討は、予備的な PR&PP 評価では有用であり、望ましくもある。一方解析者は、包括的解析の完全性を担保するために、パスウェイの創出において構造的な手法を必要とする。PR 評価も PP 評価も全ライフサイクルに渡って検討すべきである (例えば、設計、建設、許認可、運転、異常事象、事故、シャットダウン、及びデコミッションング)。非常に多数の類似したパスウェイが存在する可能性があるため、解析がしやすいように、代表的なパスウェイが特定されなければならない。

PR&PP 手法はパスウェイ解析に用いる解析手段のタイプを指示することはない。パスウェイ解析のためのアプローチは多様であり、イベントツリー、影響ダイアグラム、サクセスツリー及びダイナミック確率論的手法、とりわけマルコフチェーンや二面シミュレーション法等に基づいた方法が含まれる。これらの手法は、パスウェイセグメントの統合に直接働きかけ、促進する。

2.2.4.1 PR パスウェイの精緻化

あるターゲットに対するパスウェイを創出するための最初のステップは、そのターゲットと関連して拡散国が実行する行為を割り当てることにより、内部及び外部セグメントを構築することである。

内部セグメントは各ターゲットとそのロケーションをレビューすることによって特定できる。粗いパスウェイレベルでは、物質ターゲットに対する行為は転用である。プロセスターゲットに対する行為は不正使用であり、プロセスターゲットごとに不正使用するためにシステムへ導入される未申告物質が特定される。

外部セグメントは核爆発装置の獲得に至るパスウェイを完遂するために、敵対者が申告された NES 外の施設で行う行為を表す。外部セグメントの創出において解析者はある課題を負っている。それは、内部セグメントと NES 外の施設で行われる行為とを確実に一体化させる方法を創造的に探究するというものである。

また拡散国は、申告された装置やプロセスを未申告施設内で複製することを選ぶかもしれない。これにより、未申告施設の中に複製された装置やプロセスを、保障措置によって検知されることなく利用することができる。複製のパスウェイは魅力的でありうる。というのも、申告施設における活動は、未申告の装置や部品の獲得が輸出管理及び国の技術手段によって検知される可能性を低減させ、また未申告プロセスを成功裏に実施する技術的困難性も減少させることができるからである。

セグメントの精緻化は最初のセグメント特定の後に行う。粗いパスウェイレベルでは、1つのセグメントは PR 指標を見積もるために必要な、特性の最小セットを含む。精緻化によって、パスウェイの数が急速に増加するかもしれない。図 22 は、各段階(獲得、処理、製造)がそれぞれ1つのセグメントで構成される一般的な PR パスウェイと、精緻化が進むにつれて一つのセグメントが多数のセグメントに膨れ上がる様子を図示している。このようにセグメントとパスウェイの数が増加してしまうことは、解析上の課題である。

粗いパスウェイレベルにおいて、各セグメントを精緻化する際に考慮されるべき特性は、物質タイプ、行為が行われる場所、含まれる物質の量、及び当該セグメントで行われる行為を検知するために適用される可能性のある保障措置検知手段のおおよその種類及び有効性等である。続く精緻化の作業の間に、追加的な特性が考慮される。追加的な特性とは、転用が行われる間の施設運転モードや、物質特性、侵入方法、未申告の行為を検知するために適用される個々の保障措置機器及び手法、保障措置による異常検知の誤報頻度、及び拡散国の秘密戦略に関する追加的な詳細情報などである。この情報によって、パスウェイセグメントの系統的な解析が可能となり、パスウェイの結果の見積りの正確性が高まる。

パスウェイを構成する一連のセグメントを示すために、それを記述的に提示することは有益となりうる。グラフィックな表示も、パスウェイとそれを構成するセグメントを目で見える形で提示し、セグメントが結合してパスウェイを作り出す様々な経路を示すのに有用である。ネットワークダイアグラムとイベントツリーは、粗いパスウェイレベルで有用であり、お互いに代替的で等価なグラフィック表示法である。

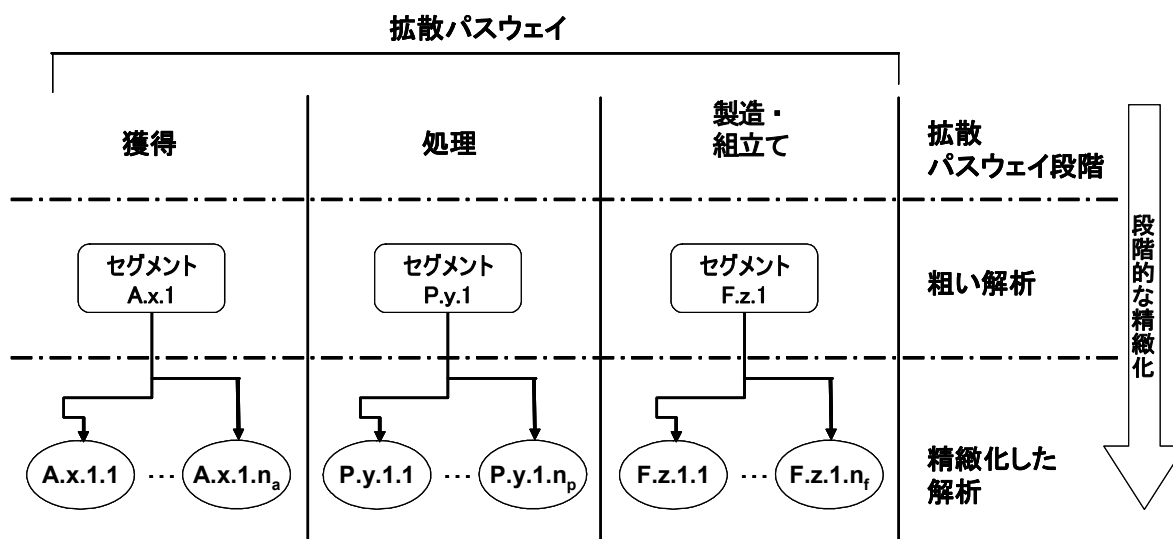


図 22 パスウェイの精緻化

(大部分の PR 評価では、製造段階を詳細に解析する必要はない。)

2.2.4.2 PPパスウェイの精緻化

PP脅威が定義され、代表的なPPターゲットが特定された後、ターゲットの攻撃に続いて起こりうる様々な事象のシーケンスを決めるために、シナリオ手法を用いることができる。これらの事象シーケンスは幾つかの異なる形で図示できる。それは、ロジックダイアグラム、イベントツリー、敵対者のシーケンスダイアグラム、あるいは、言葉での記述も可能である。このような事象シーケンスは、敵対者の視点から、彼らの目的を達成するために必要な行為及び事象の戦術マップとして、すべて図示されるべきである。連続的(シーケンシャルあるいはシリアル)な行為については、PRのパスウェイ図と同じタイプのロジック構造を用いることができる。しかし、妨害破壊行為の完遂という敵対者の目的の観点から、全ての装置ターゲットを検討しなければならない、そのためには、より複雑な描写ツールを用いて、並行して(パラレル)行われる行為も記述する必要があるかもしれない。一般的にパスウェイ全体のセグメント分割は解析の助けとなる。

一般的なPPパスウェイは、NESへの攻撃に寄与する複数のセグメントあるいは行為のサブセットで構成される。最初の段階では粗いパスウェイ図を用いて評価が行われる。この粗いパスウェイ図が判断(ジャッジメント)による定量化を行う際の基礎となる。設計がより詳細になるにつれて、パスウェイセグメントを通じてパスウェイが一層詳細化し、確率や指標を評価する際には、判断(ジャッジメント)に代わり工学的解析が行われるようになる。パスウェイモデルにおいて、最も効率的かつ効果的な解法を提供する解析ツールは、各パスウェイの詳細さによって異なるであろう。

例えば、施設の一部へアクセスする行為は、施設と個々の障壁を突破する正確な動きを詳述するパスウェイセグメントに分割することができる。このセグメント化は解析において繰り返し行われることがあ

る。例えば、あるタイプの入口は複数の異なるタイプのターゲットに対する障壁となるかもしれない。このような、入口を通して侵入することに代表されるセグメントは、全てのターゲットに対して繰り返し用いられることがある。

並行して(パラレル)起こるセグメントもあるが、一方で連続して(シリアル)起こるセグメントも必ずある。詳細なパスウェイは、定義された脅威の能力と矛盾のないよう組み立てられなければならない。例えば、並行して追求されるセグメントの数は、敵対者の数及び能力と整合がとれていなければならない。

2.2.5 指標の評価

パスウェイが特定され、解析された後、解析者は評価のための指標を決める。指標は PR 評価と PP 評価では異なる。

2.2.5.1 PR 指標

14.2 節で導入された PR の指標は二つのグループに分類できる。すなわち、主にシステムの内在的特性に起因するグループと、システムの内在的特性及びシステムに適用される外在的措置の組み合わせに起因するグループである。例えば、検知確率の指標は、核物質に対するアクセス性、核物質の痕跡の特異性、及び放射線痕跡の硬度のような内在的特性に影響される。しかしながら、これはまた、ホスト国が締結している国際保障措置協定のような外在的措置によっても影響を受ける。

主にシステムの内在的特性によって決まる PR 指標は以下のものが含まれる。

- ・ 拡散の技術的困難性 (TD)
- ・ 拡散コスト (PC)
- ・ 拡散時間 (PT)
- ・ 核分裂性物質のタイプ (MT)

システムの内在的特性及びシステムに適用される外在的措置で決まる PR 指標は以下の通りである。

- ・ 検知確率 (DP)
- ・ 検知リソースの効率 (DE)

指標の中で、MT はパスウェイ全体において評価されるが、他の指標はセグメントごとに評価される。DP 指標は保障措置アプローチについて十分な情報が利用できる段階になってから評価される。もし保障措置アプローチの情報が利用できなければ、DP 指標には相応の大きな不確実性が伴う。各指標のパスウェイ全体での評価値は、パスウェイ中の各セグメントの推定値の総計によって得られる。

指標値に影響する可能性のあるシステム属性が、確実にすべてパスウェイのモデル化の中で特定され、検討されるために、解析者は、系統的なプロセス (例えば、初期の研究をレビューし、付録 D.1 に論じられている「保障措置適用性 (Safeguardability)」解析を取り入れるなど) を採用する必要がある。定性的なパスウェイ解析では、セグメント指標は、専門家判断によって、セグメントの特性から直接見積ることが出

来る。ある特定のセグメントの特定の指標が、拡散の困難性を支配的に生み出していると認識できれば、定性的パスウェイ解析はさらに単純化される。例えば、ある脅威とパスウェイでは、核物質の転用に対して TD, PC, 及び PT 指標は DP と比べて障壁として弱い可能性があり、したがって DP の指標は非常に重要と判断される。より精緻化された解析では、指標値は、形式的な方法で集計を行うことを可能とするような、更に構造化された技術を用いて見積られる。

各パスウェイについて指標が見積られた後、転用または未申告生産のための「非常に非魅力的で最も望まれないルート」を提示するという GEN IV (DOE, 2002a) のゴールに照らして、パスウェイは比較され、ランク付け(23 節)されなければならない。したがって、パスウェイ比較を容易にするために、TD, PC, PT, MT 及び DP という指標 (measures) に対して、「非常に低い」から「非常に高い」までの言葉上の価値に関連づけるための定量的尺度 (Metrics) が適用される。これらは、拡散国が採用しそうな意思決定を暗示する。同様に DE 指標についても、一般的に IAEA が施設の保障措置に適用するリソースと比較した際の要求されるリソースの大きさを反映するために、定量的な尺度が適用される。解析者は、検討中の脅威に対するパスウェイを比較するのに適切な他の定量的尺度を選択してもよいし、出発点として、解析者は表 2.5 にある概略的で代表的な尺度を適用してもよい。

各 PR 指標と、各々に対応する尺度については以下に詳述する。

拡散の技術的困難性(TD) 指標

TD 指標は表 2.5 の示される尺度等を用いて評価される。技術的困難性は、困難さを生じさせ、その結果技術的問題により失敗を引き起こす可能性のあるパスウェイの内在的特性から生じる。この TD 指標について国家の能力を反映する尺度を用いて推定した場合、パスウェイの技術的問題に由来するリスクが高いためパスウェイの完遂にかかる時間とリソースが大幅に増大する、もしくはパスウェイの実施が失敗に終わる可能性があるとして拡散国が判断しうるパスウェイを識別するのに役立つ。

TD の評価は、パスウェイセグメントを完遂する際の内在的な困難性の発生源を特定するために専門家の判断を用いる。例えば、臨界の危険性、放射線、設計情報の不足、アクセス不能、あるいは、輸出管理の対象となっている装置または物質を加工、生産する能力の欠如などである。パスウェイを完遂するための TD の評価は、すべてのセグメントについて、その困難性の発生源の組み合わせを用いる。

表 2.5 PR 指標のための定量的尺度及びスケール

(定性的 PR ランク (非常に低い～非常に高い)、数値範囲及び中間値)

指標及び尺度	尺度スケール (中間値)	拡散抵抗性
<i>内在的特性によって決定される核拡散抵抗性の指標</i>		
拡散の技術的困難度 (TD) 尺度例：脅威者の能力を考慮した内在的な技術的困難性によりパスウェイが失敗する確率	0-5% (2%)	非常に低い
	5-25% (10%)	低い
	25-75% (50%)	中程度
	75-95% (90%)	高い
	95-100% (98%)	非常に高い
拡散コスト (PC) 尺度例：軍事能力に割かれる国家リソースの割合	0-5% (2%)	非常に低い
	5-25% (10%)	低い
	25-75% (50%)	中程度
	75-100% (90%)	高い
	>100% (>100%)	非常に高い
拡散時間 (PT) 尺度例：パスウェイを完遂するのにかかる全時間	0-3ヶ月 (2ヶ月)	非常に低い
	3ヶ月-1年 (8ヶ月)	低い
	1-10年 (5年)	中程度
	10-30年 (20年)	高い
	>30年 (>30年)	非常に高い
核分裂性物質タイプ (MT) 尺度例：無次元のランク分類 (HEU, WG-Pu, RG-Pu, DB-Pu, LEU) ; 核物質属性に基づく補間	HEU	非常に低い
	WG-Pu	低い
	RG-Pu	中程度
	DB-Pu	高い
	LEU	非常に高い
<i>外在的指標と内在的特性によって決定される核拡散抵抗性の指標</i>		
検知確率 (DP) 尺度例：累積検知確率	a	非常に低い
	b	低い
	c	中程度
	d	高い
	e	非常に高い
検知リソース効率 (DE) 尺度例：査察業務量(人・日当り、PDI) 当りの発電量(GWe・年) (または査察コスト\$)	<0.01 (0.005 GWy/PDI)	非常に低い
	0.01-0.04 (0.02 GWy/PDI)	低い
	0.04-0.1 (0.07 GWy/PDI)	中程度
	0.1-0.3 (0.2 GWy/PDI)	高い
	>0.3 (1.0 GWy/PDI)	非常に高い

注)HEU=高濃縮ウラン、ノミナルで 95%U-235 ; WG-Pu=兵器級プルトニウム、ノミナルで 94%核分裂性 Pu 同位体 ; RG-Pu=原子炉級プルトニウム、ノミナルで 70%核分裂性 Pu 同位体 ; DB-Pu=高燃焼度プルトニウム、ノミナルで 43%核分裂性 Pu 同位体 ; LEU=低濃縮ウラン、ノミナルで 5%U-235。

- a 劣化ウラン、天然ウラン及び低濃縮ウランに対する、IAEA の検知確率より顕著に低い累積検知確率と適時性目標。
- b 1年で50%(劣化ウラン、天然ウラン及び低濃縮ウランに対する IAEA の検知確率及び適時性目標に等しい)
- c 3ヶ月で20%、1年で50%(1 有意量の使用済燃料/照射済核物質に対する IAEA の検知確率及び適時性目標に等しい)
- d 1ヶ月で50%、1年で90%(これは1 有意量の HEU/分離 Pu に対する IAEA の検知確率及び適時性目標に等しい)

e HEU/分離Puに対するIAEAの検知確率及び適時性目標よりも顕著に大きい累積検知確率。

TD指標の尺度スケールはパスウェイが失敗に終わる確率を反映しており、そのため拡散国が利用可能なリソースと能力に依存する。したがって、例えばある国が運転中の商業的濃縮能力を有するまたは専門家の指導が得られる場合、当該国が秘密の遠心分離濃縮工場を建設し運転するための外部セグメントのTDは低くなるかもしれない。しかし、遠心分離機の周波数変換機のような特定の部品の製造のためのTDは、もしその国が国内にこれらの部品を作る商業的能力を持たないのであれば、TDは高いままかもしれない。原子力部品の大部分は、その製造において高いTDを有し、国際輸出管理と国の諜報機関により監視されている。DP指標の評価には、そのような装置の獲得を検知する輸出管理の潜在能力を含みうる。

確率的方法を使用することにより、パスウェイの各セグメントにおけるTD指標の集計は容易になる可能性がある。マルコフモデルに基づく例は、Yue, Cheng, Papazoglou, Aazam,& Bari (2005)に記されている。表2.6にTDの概要な特性を総括する。

表 2.6 拡散の技術的困難性(TD)指標の特性の概要

特性	記述
定義	セグメント固有の困難性
評価のために考慮されるべき代表的な属性	臨界の危険性 放射線レベル 公開情報の利用可能性 特別に輸出管理対象となっている部品または物質へのアクセス
尺度例	脅威者の能力を考慮した、固有の技術困難性からパスウェイが失敗する確率
セグメントからパスウェイまでの集計法	内包されるセグメントに基づいたパスウェイ失敗の確率の計算

拡散コスト (PC)指標

PC指標はドル単位で評価され、拡散国が軍事費として利用可能なリソースの総計から推定することができる。オーダーとしては、原子炉保有国で年間20億(約2,400億円)ドル、燃料サイクル国で年間200億(約2.4兆円)ドル程度であろう。表2.5はPCの値として「低い」(<10%)から「非常に高い」(>100%)までをスケールリングしている。この指標は、セグメントに関連する行為の完遂を妨害する多重の障壁を突破するのに必要な、経済的及び人的投資を表現している。

PC指標は、パスウェイ中の各セグメントについての指標値を合計することにより、パスウェイ全体について集計される。多くの場合、この指標は一つのセグメントが支配的になる。この指標は申告されたGEN IV NESの建設コストは含まないが、このセグメントを完遂するためにシステムに加えられる改造のコストは含むことに注意されたい。これらの改造は、保障措置検認活動を破ることを意図した改造とともに、プロセス改造のコストを含む。表2.7にPC指標における概要な特性をまとめる。

表 2.7 拡散コスト(PC)指標の特性の概要

特性	記述
定義	セグメントにかかるコストの総計
評価のために考慮されるべき代表的な属性	セグメントを完遂するのに最低限必要とされるインフラ整備にかかる最小コスト 民間インフラと人材の不正使用から発生するコスト
尺度例	軍事費に割かれる国のリソースの割合
セグメントからパスウェイまでの集計法	セグメント評価の合計。軍事費に割かれる国のリソースで標準化できる。

拡散時間 (PT) 指標

表 2.5 に示すように、PT は時間単位で見積もられ、「非常に低い」 (<3 ヶ月) から「非常に高い」 (>30 年) までを範囲とする。拡散時間は獲得と処理のセグメントにおける行為の完遂を妨害する多重の障壁を突破するために要する最小の時間である。一般的に PT は、拡散国が最初の検知可能な活動(例えば、核物質の転用や、申告施設の不正使用等の行為)を始めた時点から評価される。しかし、もし解析者が拡散国のパスウェイ間での優先順位に影響するほど重要であると判断すれば、解析者は拡散国が計画し始めた時点等、他の開始点を選ぶことも可能である。解析者は開始点を選ぶために用いた根拠を明記し、それを一貫して使うべきである。一般的に PT は、処理セグメントの最後までで評価され、兵器を製造する時間 (MT 指標の中に含まれる) を含まない。しかし、実際には、PT と比較して兵器製造時間は短い (2,3 週間) と予想できるので、この区別は重要でない。

例えば、使用済燃料の貯蔵施設からの突然の転用であれば、1 ヶ月未満しか要さないであろう。照射済みターゲットからのプルトニウムの抽出は、抽出施設が既に利用可能(秘密施設を使用する場合でも、申告施設を不正使用する場合でも)と仮定しても 3 ヶ月から 12 ヶ月が必要であろう。こうした推定をする際には、解析者は仮定を明確に述べなければならない。この仮定には、拡散国がそのセグメントに関して、行為を始める前にどんな準備を完了したかを含む。(例えば、当該セグメントにおける行為及び仮定された量の処理を開始する前に、拡散国は秘密のプルトニウム抽出施設を建設し運転する、といった仮定。)

1つのパスウェイに対して、PT 指標は、同時並行の活動も考慮した上で、連続的な活動にかかる時間を合計することにより集計される。並行あるいは連続で行われる活動は、各パスウェイの詳細さに依存する。表 2.8 に PT 指標の概要特性をまとめる。

表 2.8 拡散時間(PT)指標の特性の概要

特性	記述
定義	セグメントを完遂するのに要するトータルの時間
評価のために考慮されるべき代表的な属性	転用または生産の最大速度 貯蔵期間 必要な機器の改造の程度
尺度例	パスウェイを完遂するのに要するトータルの時間
セグメントからパスウェイまでの集計法	並行及び連続の活動にかかる時間適切な集計

核分裂物質のタイプ(MT)指標

MT 指標は、処理セグメントによって製造される核分裂性物質のタイプ—典型的には金属—をランク付けする。これは、核爆発物の製造に用いる際の有用性と、拡散国の相対的な優先傾向に基づく。このように、MT 指標はパスウェイでのみ評価され、セグメント単位では評価されない。しかし、224 節で定義された主要な各段階の終わりに MT を報告するにあたっては、MT 指標は重要なものである。例えば、中間結果として、設計者は獲得段階から発生しうる様々な MT について知りたいかもしれない。

核分裂性物質の特性に起因する、特定の設計上のトレードオフは、拡散国が目的を達成する上で重要な分野に影響を及ぼすであろう。すなわち、技術的性能 (例えば、収率の信頼性、最初の核実験の成功及び一連の核実験後の信頼ある性能の獲得の両方において)、核物質の貯蔵能力、運搬能力(*deliverability*)の分野等。

MT と兵器設計の関係に関する詳細な情報は機微であり、PR 手法では核物質タイプのおおよそのランク付け(表 2.5)を利用する。このランク付けは、拡散国が最初の 2, 3 個の兵器を獲得する企図での優先傾向に基づいた相対的な PR を反映するものであり、核爆発物の設計や製造の困難性が非常に低い (非常に低い PR ランク) 高濃縮ウラン (HEU) のような物質から、低濃縮ウラン (LEU) のように実際的な核爆発物の製造が本質的には不可能(非常に高い PR ランク)なものまである。基本的な範囲は以下の通りである。

- ・非常に低い PR—HEU
- ・低い PR—兵器級プルトニウム(WG-Pu)
- ・中程度の PR—原子炉級プルトニウム(RG-Pu)
- ・高い PR—高燃焼度プルトニウム(DB-Pu)
- ・非常に高い PR—LEU

HEU に対する PR ランクが非常に低いのは、主として自発中性子発生率がすべてのプルトニウム組成と比較して極端に低いことによる。この差は兵器設計を大幅に簡略化し、拡散国は最初の核実験あるいは核兵器の使用において信頼性のある性能を獲得できるという強い確信を持つことが出来る。

プルトニウムについては、原子炉運転や使用済燃料のリサイクルの条件によって、非常に広い範囲の同位体組成が発生する。異なるプルトニウム組成の魅力度を分類するための根拠は複雑であり、詳細に提示しようとする、情報は機微かつ機密になる。ここでは、プルトニウム組成の MT の PR ランク付けは使用済み燃料標準に関する米国国家研究会議における検討 (U.S. National Research Council on the spent-fuel standard) (National Research Council 2000) に基づく。

「全てのカテゴリーに属する拡散行為者が、最終的には合理的な程度に純粋なプルトニウム金属を獲得する能力を得ると仮定するならば、……このカテゴリーでの主要な内在的障壁は、プルトニウムの同位体組成がどの程度『兵器級』の範囲から逸脱しているかに関連する。……」

「・・・拡散国の場合、我々は『原子炉級プルトニウムからの兵器製造』という障壁を「中程度」の重要性とランク付けしている。そのような国は、可能であれば、同位体組成を『兵器級』から逸脱するための核兵器の設計、加工及び保守にかかる負担をおそらく避けたがるであろう。しかし拡散国はおそらく、その負担に対処し、当該国の当初の目的に対して十分な兵器性能を達成する能力も有しているであろう。」

プルトニウムがリサイクルされる場合、同位体組成を更に低品質化することが可能である。MT 指標については、このような低品質プルトニウムを DB-Pu としてリスト化しており、これは Pu-238 濃度が高く、熱発生率が高いものである。拡散国は、MT の PR ランクが比較的低い物質を獲得出来るパスウェイを特定するために、大きな労力を払うと予想される。したがって、DB-Pu には高い MIPR ランクが設定されている。付録 D4 は、拡散国が MT ランクの高い物質と低い物質の間で示すであろう優先傾向に関して、より詳細な議論を記載している。

たいていの場合、簡易的な MT ランク付けは、上記及び付録 D4 に記される MT の定性的議論との併用により、十分パスウェイを比較して行うことが出来るであろう。そうでない場合は、核兵器の設計や製造について専門家の追加的なアドバイスを求めるべきである。もし専門家のアドバイスが得られないならば、設計者と解析者は、拡散国の MT 指標に対する相対的重要度について、適度に保守的な仮定を適用すべきである。表 29 に MT 指標の概要な特性をまとめる。

表 29 核分裂性物質タイプ(MT)指標の特性の概要

特性	記述
定義	兵器製造用金属の特性
評価のために考慮されるべき代表的な属性	自発中性子発生率 熱発生率 ガンマ線量 裸球状臨界量
尺度例	無次元のランク分類(HEU, WG-Pu, RG-Pu, DB-Pu, LEU) ; 物質属性に基づく補間
セグメントからパスウェイまでの集計法	適用不能(NA)

検出確率(DP)指標

DP 指標は、パスウェイセグメントで記述される行為が検知される確率で表す。DP は、(1)パスウェイセグメントの実行で発生する異常を検知する測定、及び、(2)異常が、合法的で不慮の理由によるものではなく、実際のパスウェイセグメントの行為で発生したと査定するために実施される測定により得られる。DP は一般に累積確率関数として表現される。しかしながら、もし明確な保障措置アプローチの情報が利用できなければ、DP は非常に広い不確実性の帯として表現されるであろう。

さらに、種々の秘密戦略が DP に影響するかもしれない。秘密戦略による影響は、戦略を含むパスイ解析で決定されるのであって、秘密戦略の影響の仮定において任意の DP 不確実性を付与しているわけではない。

保障措置は継続的に発展する技術を含んでいる。多数のシステム属性が、保障措置を適用する際の最適なアプローチ及び高い DP を与える当該アプローチの有効性の両方に影響する。これらのシステム属性の系統的な検討は、「保障措置適用性(Safeguardability)」(付録 D.1) の評価として実施されている。これにより、設計者は、効果的な保障措置の適用を容易にする設計オプションを選択し、高い DP を付与する保障措置手法の最適な組み合わせを特定することが出来る。

内部核物質転用セグメントを検知するために、物質移動と(転用の)結果としての物質在庫量の変化を検知できるように複数の測定が組み合わされる。検知の不確実性は三つの要因によって起こる。(1)機器分析の不確実性、(2)故意でない核物質のホールドアップ、事業者の故意でない封印の破損、正当な、安全上のあるいはアクセス制限による査察の故意でない遅延のような、合理的な原因から来る測定異常の可能性、(3)実際の施設の構造・配置が保障措置システムの設計において仮定されたものと同一であることの不確実性、例えば、未申告の貫通箇所が存在したり、新たに施設に付加されたりしている場合等。

内部施設不正使用セグメントを検知するためには、不正使用を検知するための測定が、セグメントの行為が発生させる異常を検知できるように調整されなければならない。不正使用の検知における不確実性は、上述の内部核物質転用セグメントで列挙したものと同様の要因から発生する。

外部セグメントを検知するための方法は、商業衛星写真や環境サンプリングのようなツールの使用や、第三者機関から提供される様々なタイプの情報の利用を含む。第三者機関による情報とは、機微またはデュアルユースの装置及び技術の購入や移転を監視し検知する国の輸出管理プログラムからの情報、及びや国の技術的手段(National Technical Means)^{*10}で集められた情報等がある。外部セグメントにおいて、濃縮プラントにおける周波数変換装置のような装置を申告施設から転用する場合、申告施設の中の当該装置の在庫を監視することで検知できるであろう。現在 IAEA は秘密活動や秘密施設の検知目標を持たないが、保障措置データベース以外の情報、公開情報及び第三者機関を含む種々の情報源から得られる情報を利用している。

現代の統合保障措置では、異常が検知されるとそれに合わせて査察頻度等の保障措置検知リソースが徐々に増加する。これはより少ない検知リソースで、より高い検知の累積信頼性を提供するものである。同様にして、複数かつ多様な測定を行う保障措置アプローチを適用すれば、パスイセグメントで記述された行為が検知され、DP が向上する。

^{*10} IAEA は国の技術的手段へ直接のアクセスはしないが、IAEA 設置法第 8 条 a では、「各加盟国は、自国の判断により IAEA にとって有用と考える情報を提供するものとする」としている。

内部パスウェイセグメントでは、表 2.5 に示される DP の標準尺度スケールは、IAEA 保障措置クライテリアに含まれる適用可能な IAEA 保障措置検知目標 (Goal) との比較に基づいている。「中程度」の DP は、使用済燃料及び照射済み物質についての IAEA の保障措置検知目標と対応する。「高い」DP は HEU 及び分離プルトニウムについての IAEA 目標と対応し、「低い」DP は劣化ウラン、天然ウラン、LEU についての IAEA 目標と対応する。

外部パスウェイセグメントについては、そのセグメントが目視できる、熱を発する、あるいはその他の明らかな痕跡を発しなれば、DP は大きな不確実性を有する。もし検知不確実性が大きく、特に実際の DP が容易に評価できず、表 2.5 に記載されている尺度スケールでは提示できない場合は、外部セグメントを検知するために利用できる方法の定性的、一般的記述を意思決定者に提供することが有用かもしれない。表 2.10 に DP 指標の重要な特性をまとめる。

表 2.10 検知確率(DP)指標の特性

特性	記述
定義	パスウェイセグメントの検知の累積確率及び信頼性レベル
評価のために考慮されるべき代表的な属性	設計情報検認(DIV)に重要な属性 レイアウトの透明性 3D シナリオ復元モデルの使用可能性 運転中の装置に対して目視ができる可能性 施設文書及びデータの包括性 核物質計量に重要な属性 物質痕跡の特異性 放射線痕跡の硬度 パッシブ測定法の適用可能性 アイテム/バルク スループットデータ バッチ/連続プロセス 核物質の熱発生率 封じ込め監視(CS)に重要な属性 運転の慣習 自動化の程度 移動アイテムの標準化 目視監視の適用可能性 移動中アイテムの可能な移動ルートの数
尺度例	累積検知確率
セグメントからパスウェイまでの集計法	含まれるセグメントに基づくパスウェイ検知確率の計算 (例えば、パスウェイ検知の確率が $P(d)=1-P(nd)$ ここで、パスウェイの非検知確率は $P(nd)=\prod(1-P_i(d))$ また、検知事象は互いに独立であるという仮定の下で、 $P_i(d)$ は i 番目のセグメントの検知確率である。

検知リソース効率(DE)指標

DE 指標は、各パスウェイセグメントについて、検知手法を実施するのに要する人工数 [例えば、査察人・日(PDI)] またはコスト見積もりを合計して評価される。保障措置リソースは論理的な仮定 (例えば、1 つの機器が複数のセグメントの検知能力を有しているかもしれない) を用いて、1 つのパスウェイに含まれるすべてのセグメントについて合計される。時間やコストの見積もりは、必然的に、現在受け入れられている保障措置アプローチに基づくが、しかし、予測される保障措置アプローチ及び保障措置技術の変化 (例えば、リモートモニタリングの使用増加) は、ほとんどの原子力施設で数十年のライフサイクルの全期間にわたって起こりうるものとして、考慮されるべきである。DE 指標は、そのシステム要素によって支えられるエネルギー生産のような変数で正規化され、査察にかかる時間またはコスト当たりの正規化変数の比で表される (例えば、PDI あたりの GWy の単位で)。表 2.11 に DE 指標の重要な特性をまとめる。

表 2.11 検知リソース効率(DE)指標の特性の概要

特性	記述
定義	当該セグメントで保障措置を実施するにあたり、査察に要する時間またはコストの総計
評価のために考慮されるべき代表的な属性	表 2.10 参照
尺度例	査察人・日(PDI) (または査察費用 \$) で支えられる発電容量の GW (e) ・年 (または他の規格化変数)
セグメントからパスウェイまでの集計法	全査察時間または全保障措置コストの集計、支えられる原子力エネルギー生産 [GW(e)年] のような適切なスケールへの規格化

2.2.5.2 PP 指標

通常、PPS の設計は、目的に合致したシステム工学的プロセスの後に行われる。(Garcia 2001, IAEA 2002b, USArmy 2001)。三つの PP 指標——敵対者の成功確率 (PAS)、結果・影響 (C)、及び核物質防護リソース (PPR)——はパスウェイのソートと比較のための基礎になる。これらの 3 つの指標によりパスウェイリスク (敵対者の成功確率とその影響の積) が評価される。パスウェイで表現される拡散リスクを減らすための投資は PPR 指標を用いて評価される。また、リスクと投資のニーズは、必要不可欠なインフラから重要な人材・資産まで広く比較することが出来る。これにより、脆弱性の最大の源を特定し、削減するための投資を最適化することが可能になる。

シナリオ解析のレベルでは、一般的に以下の項目に関する詳細な情報が必要である。すなわち、多様な敵対者の能力に対抗する異なるタイプの障壁の有効性とそれらを与える遅延、装置の無効化の方法や核物質の取扱法、検知及び警報システムの詳細設計、及び PP 部隊の戦略等。これらの情報はすべて機微であり、したがって一般的にシナリオと PP パスウェイの両面解析は機微情報を管理できる能力を有する組織によって実施されなければならない。このような組織—国の規制機関、国立研究所、軍組織、及び幾つかの商業組織—は概して実質的な専門知識と、シナリオベースの両面解析を実施するための専門的

な解析ツール及び計算ツールを有している。一般的には概念設計及び施設設計の初期段階において、セキュリティの専門家を含めることは価値があり重要である。GEN IV の PP 評価は、シナリオ解析を実施する時には、解析の支援を得るために、これらの専門能力を持つ組織が関与しなければならない。この組織とシステム設計者の間のフィードバックは、施設及びシステムの全体的な PP 性能をさらに向上させる重要な寄与をもたらす。

PP 指標の評価は PR 指標の評価と多くの一般的な特性を共有している。ある場合には、粗いパスウェイ解析の記述は、各パスウェイにおける指標値を表現する際に用いることができる。複数のパスウェイセグメントをまたいだ指標の集計もまた PR に類似している。

PP 評価の三つの指標は以下の通りである。

敵対者の成功確率(Probability of Adversary Success, PAS) この指標は敵対者がパスウェイに記述された行為を成功裏に完了し、結果(影響)を生む確率を評価する。もしパスウェイを完遂するために必要な行為が敵対者のリソースと能力で実施可能な範囲であれば、敵対者の成功確率は、PPS が行為を検知し、敵対者を遅延させ、敵対者がその行為を完遂する前に無効化する能力の高さに依存する。通常 PAS 指標は設計及び PPSs の解析に用いられ、様々なツールによって、その指標が定量的に評価される。いくつかのパスウェイでは、PAS 指標は以下のような少数のセグメントにより決定される。それは、パッシブで安全性の高い原子炉の妨害破壊行為において、安全装置へアクセスすることの物理的困難性、あるいはプルトニウム盗取において、使用済燃料集合体を持ち出し、処理することの困難性等。

影響(Consequences, C) 影響はパスウェイで記述される敵対者の意図する行為が成功裏に完了した結果として発生する効果と定義される。この指標は敵対者にとっての魅力度と被害の大きさの観点からのパスウェイの相対的重要度の両方を反映する。盗取の影響は盗取される物質の量と質で表現できる。付録 D4 は、核兵器用の核分裂性物質の性質を、非国家主体の脅威と関連づけながら議論している。妨害破壊行為の影響は、物理的数量、急性死亡率、晩発死亡率、単位面積あたりの物質質量、等で測ることができる。粗いパスウェイレベルでの妨害破壊行為の影響評価において最も意味のある観点は、放射性物質の放出は閉じ込められるか、プラントサイト内にとどめられるのか、それともオフサイトに放出されるのかである。

核物質防護リソース (Physical Protection Resources, PPR) この指標は敵対者を検知し、遅延させ、無効化する外在的措置—PPS—を講じるために投入されるリソースを反映する。この指標値が最も低い場合、すなわち非常に長い内在的遅延時間をもたらすシステム要素中では、この指標は警報システムにかかるコストやサイト外の警察対応を含む。これが最も高い場合、この指標は、大きな軍事保安部隊の維持や、検知、遅延及び応答システムに対する広範な投資を含む。PPR 指標は、所与の NES に相応のレベルの PP を提供するために要求される人材、能力、及びコスト (インフラ及び運転の両方) を定量化する。PR のための DE と同様に、あるパスウェイの PPR 指標は各パスウェイセグメントについて評価され、その後、適切に集計される。PPS の要素は複数のセグメントに対して応答することがあ

る。ターゲットの PPR は、そのターゲットに関連するすべてのパスウェイにかかるリソースを集計することで評価できる。同様に、システム要素に対する PPR は、そのシステム要素中のすべてのターゲットが必要とするリソースを集計することで評価できる。PPR 指標は生産されたエネルギー (TWh) の単位当たりのコストで表現できる。

PP の三つの指標は、国家が重要なインフラや重要資産の防護にかかる合理的な投資を算出する際に用いる指標と同じである。PP は国家が責任を負っており、したがって、国の政策の影響を受ける。その目標は、原子力と原子力以外の重要なインフラや資産について、同じレベルでリスクが制限されるように、リソースを最適に配分することである。PAS, C, 及び PPR の定量解析も、新しい原子力インフラに対する許認可や配置の決定を支援するために必要とされる。

国レベルでの意思決定では、発生確率が低く影響が大きい事象は、確率が高く影響が小さい事象より、大きい重み付けがなされるかもしれない。また、相乗的な投資がより有効な可能性もある。例えば、航空機のハイジャックを一層困難にするための投資は、原子力分野・原子力以外の分野両方の重要資産に対して攻撃の成功確率を小さくする。緊急時対応に対する投資は、多様なテロ攻撃と自然災害に対応する能力をもたらす。

GENIV プロジェクトに描かれているような新しい NESs の設計目標は、以下のようなものである。

- ・多種多様な脅威に対する NES 全体のリスク(PAS×C)を制限するために要求されるリソース (PPR) を減らす。
- ・システムにおける最大のリスク源(最大の脆弱性)に設計の注意を集中する。
- ・すべてのステークホルダーからの信頼と、敵対者への抑止効果を高めるために、PP システムの有効性に関する透明性を高める。

設計オプションは、所与のリスクレベルを達成するために必要なリソースの量に影響する。概念設計及び詳細設計段階での第一の目標は、この設計オプションの特定と選択である。

個々のパスウェイセグメントの解析は、各パスウェイセグメントの指標を評価するために行われる。個々の指標は全パスウェイに渡って集計される。このアプローチは、判断と仮定による影響が特定できるように、指標ごとに明確な尺度を必要とする。概念設計の段階でもセグメントレベルで尺度が評価される。なぜなら、不確実性源は、セグメントレベルにおいてより容易に特徴づけが出来るため、不確実性源の特定はパスウェイセグメントの精緻化作業を通じて行う方が簡単だからである。仮定を決め、設計者に有用な内在的特性を特定することもまた、セグメントレベルの方がより容易である。

「敵対者の行為シーケンスに対する妨害評価 (EAST)」のようなツールは、各セグメントに対する PPR 投資の有効性や、敵対者のパスウェイに対抗する PPS 全体の定量的評価手法として用いることができる。これらのツールについては付録 B に論じる。

2.3 結果

PR&PP 評価の目標は、パスウェイを比較することにより、拡散国や敵対者が最も追及しそうなパスウェイを特定して、政策決定者が保障措置や PP リソースへの投資における優先順位を付けるための根拠を提供することである。

パスウェイ比較のプロセスは、究極的には政策決定解析のプロセスである。したがって PR&PP 評価手法は、パスウェイ比較のために合理的な程度の慎重なアプローチを採用している。拡散国や敵対者の優先傾向が、脅威の定義において明確化されていない限り、システム評価の中でこの優先傾向に関する飛躍的な仮定を持ち込むことには慎重であるべきである。例えば、保障措置による検知を避けたいという拡散国の願望がどの程度強いかは、その優先傾向が脅威の定義において明確化されていない限り、解析者は仮定すべきでない。したがって、通常、解析者は所与の国家がどの程度 DP 指標に重点を置いているかを仮定することは出来ないが、その重み付けが定量化された場合はインプット情報として考慮することが出来る。

パスウェイ比較により、代表的かつ支配的なパスウェイを特定し、様々なシステム設計パラメータに対するパスウェイ結果の感度を詳しく調査することができる。この比較プロセスは、パスウェイ評価からの知見を得るためには重要で、最終的にはこの評価結果のサマリーに用いることが出来る代表的なパスウェイ結果を明らかにするために重要となる。このように、パスウェイの比較と評価結果の提示の両方で同じツールが用いられる。PR&PP の詳細な評価では、非常に多くのパスウェイ結果を比較しなければならない可能性があるが、一方で、通常結果の提示は、支配的なパスウェイの概要や様々なシステム設計パラメータに対するパスウェイ結果の感度に重点を置く。

2.3.1 パスウェイ比較

PR&PP 手法はパスウェイ指標を集計する際に重み付け関数を用いない。結果を 1 つの数値へ集約することはパスウェイ結果の比較を容易にするかもしれないが、その一方で、単純化した重み付け関数を用いると、拡散国や敵対者の優先傾向に関して、非常に強力かつ潜在的に不正確な仮定が必要となる。その提案として、PR&PP 手法はパスウェイ結果の対比較と群比較(Denning ら、2002, NPAM 2003)を用いて、パスウェイの特徴化と、適切であれば、ランク付けを行う。これにより、曖昧で好ましくないパスウェイが排除された後に残るパスウェイのセットから構成される、有効フロンティア上のパスウェイを特定することができる。

指標の値は二つの基本的な方法で提示される。すなわち、尺度のビン値³(例えば、非常に低い、低い、中程度、高い、非常に高い、というビン)、あるいは 0 から 1 までの連続的スケールの尺度値の二つである。連続スケールの場合には定性的記述に尺度値が割り当てられる。(VL=0-0.2、L=0.2-0.4、M=0.4-0.6、

³ 「ビン(瓶:bin)とは、公知のように、統計用語において「値にしたがって対象をグループ分けして一般化や比較を行うために値の範囲」を指す。

H=0.6-0.8、VH=0.8-1.0)。専門家判断に基づく定量的解析では、ビン値は最も実用的。なぜなら所与のビンあるいは複数のビンの範囲においてはその値は同様の起こりやすいものとして表現されているため、専門家判断による定性的解析では、ビン値の方が実用的かもしれない。なぜなら、そのビンあるいは複数のビンの範囲において、不確実性は同等に伴うものとして表わされるためである。定量的方法では、まずは点推定値として結果が出て、それから連続スケールの中で感度の考慮と不確実性解析が実施される。表 2.5 は提案された尺度とスケールを示している。ただし、本評価手法は特定の尺度を規定しておらず、代わりに特定の脅威と決定問題に対して解析者が適切な尺度を選べるということが重要である。

複数の指標を用いると結果が多面的になるため、解析者はパスウェイ比較がしやすく評価結果の提示にも便利で示唆的な表示メカニズムを用いるべきである。表を用いれば数値結果を直接提示できる。グラフィック表示[例えば、棒グラフまたはスパイダーグラフや風配図 (wind rose)]も有用で、結果全体を捉える場合は特に有用である。グラフィックや表形式での表示は以下のタイプの情報を比較し報告するために用いられる。

- ・ 所与の脅威とシステム要素に対する、代表的または支配的なパスウェイ/シナリオ
- ・ 各パスウェイ/シナリオの相対的なランク付け
- ・ 獲得、処理、及び製造・組立てにおけるパスウェイ/シナリオの影響の評価。または、妨害破壊行為、盗取、資産への損害、負傷者及び死者数、金銭的損失の観点からの影響評価。
- ・ 各パスウェイ及びパスウェイに伴う指標に影響するファクター(定性的に記述されることが多い)
- ・ 相対的重要度の指標
- ・ 種々の評価に伴う不確実性
- ・ 技術的知見のギャップ(パスウェイの終点や指標値における重大な不確実性の原因となる)

表 2.12 は PR のための 4 つの異なるパスウェイ結果を比較した単純な例を示す。表のセルの中には定性的記述情報、確率分布、分布の統計、あるいはこれらの組み合わせが記される。このタイプの表によって、政策決定者、外部の利害関係者、あるいはシステム設計者が、多数のオプションを比較することが可能となる。

図 2.3 は表 2.12 と同じ指標を棒グラフの形で提示している。棒グラフは不確実性情報を提示するのに便利である。表 2.13 は PP について同様な例を示している。この情報の提示法は非常にシンプルで、より複雑な結果も容易に図示することが出来る。スパイダーグラフや風配図等のグラフィック表示法も同様に利用することができる。特定の指標の結果に対しては、それに特化した表示法が有益かもしれない。

PR&PP 手法は特定の表示方法を指定しないで、解析者やピアレビューメンバーに表示方法の判断をゆだねる。パスウェイを比較し、結果を表示するツールは時間とともに進化するであろう。したがって、解析者には過去の研究に用いられた方法をレビューすることが推奨される。

表 2.12 ビン値を用いた PR パスウェイ指標の比較
(連続的尺度スケールからの数値を用いることが出来る)

パスウェイ	拡散技術 困難性	拡散コスト	拡散時間	核分裂性 物質タイプ	検知確率	検出リソース 効率
パスウェイ #1	L	VL	VL	VL	VL	L
パスウェイ #2	L	VL	L	VL	VL-L	L
パスウェイ #3	VL	L	H-VH	M	MH	L-H
パスウェイ #4	VL	L	L-M	L-M	H-VH	M-H

注) L: 低い、 V: 非常に、 M: 中程度、 H: 高い

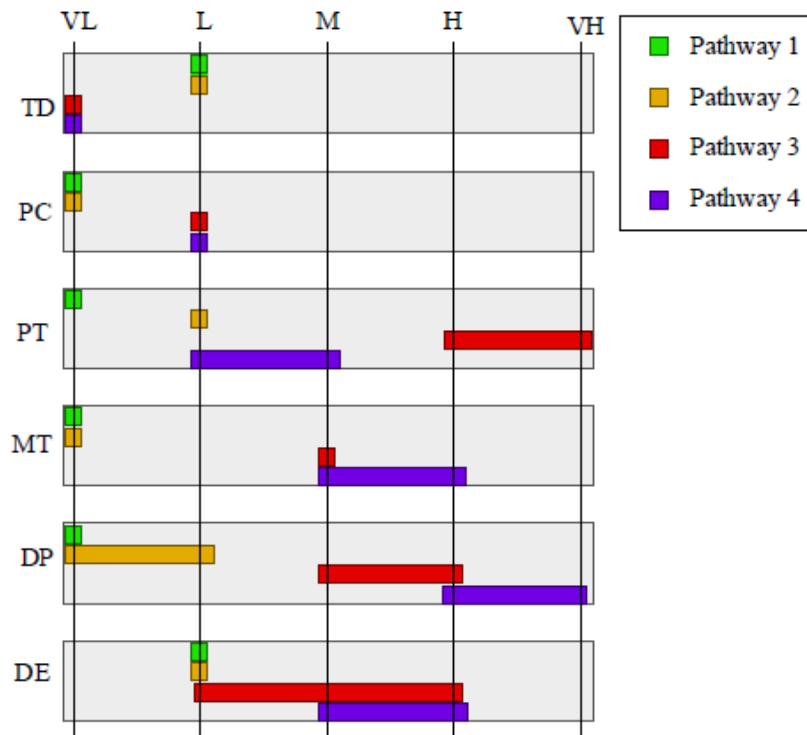


図 23 4つのパスウェイのための表 2.12 のデータを用いた bin 値の比較

表 2.13 ビン値を用いた PP パスウェイ指標の比較
(連続的尺度スケールからの数値も用いることができる)

パスウェイ	敵対者の成功確率	影響	核物質防護のリソース
パスウェイ #1	M	H	M
パスウェイ #2	L	M	H
パスウェイ #3	M	L	H
パスウェイ #4	L	L	VH

注) L: 低い、 V: 非常に、 M: 中程度、 H: 高い

2.3.2 システム評価及び結果の提示

システム評価ではパスウェイ比較の結果を用いて PR 及び PP についての知見と結論を得る。システム評価の結果の提示は、PR&PP 評価によって発生する情報の有効な利用の中核となり、以下の 3 タイプの基本ユーザーの意思決定を支援するものでなければならない。

1. システム設計者
2. 政策決定者
3. 外部の利害関係者

システム設計者の関心は、評価結果を設計プロセスへ反映できるよう、彼らが設計するシステムの PR&PP 脅威に対する応答を改善する具体的な設計オプションを明らかにすること、一般的には施設・ターゲット・パスウェイセグメントのレベルにある。政策決定者の関心は、システム中で支配的なパスウェイの代表的な指標にあると考えられる。提示される結果の詳細さと形式は、評価が計画された時点で決められるべきであり、評価のユーザーのニーズに合致していなければならない。

システム応答の評価は評価目的に応じた詳細レベルで提示すべきである。中間結果は最終結果への寄与因子に関する見解を得るのに役に立つであろう。例えば、解析者は核物質の獲得が製造・組立てにどう影響するか知りたいかもしれない。なぜならこの二つのステップ(獲得と製造・組立て)が全体の PR に影響するからである。結果の提示に際してはシステム設計者のために編集された詳細な結果と、政策に関わるユーザーに対する結果を表す代表的な指標の間の透明な関係を維持しなければならない。

評価結果もまた、22 節で論じられたアプローチを通じて、推定され、異なる形式で提示される。本評価手法は、初期段階では専門家判断に基づいた定性的及び定量的結果をもたらす。設計が熟し解析がより詳細になるにつれて、本手法はより定量的な結果をもたらす方向へ進展する。結果はその定量化のレベルには差があっても、理解を容易にするために同一のフォーマットで提供されるべきである。

評価結果を表現する際に最も重要なのは不確実性の寄与分である。不確実性を表現する際には、プロセス/事象に関する知識の欠如と本質的なランダム性の両方が示されなければならない。知識の欠如は、設計情報、手順及び政策(得られているこれらの情報は完全ではない)、または物理的挙動に関係するかもしれない。(本質的なランダム性は確率事象を参照する) 評価結果は、数値的及び言語的に記述され、最良の推定が含まれる。この推定は不確かさの偏差を考慮し、不確かさの適切な表現が含まれるべきである。

評価においては複数の脅威と複数の施設あるいはオプションに対して PR&PP の堅牢性を検討することがある。この場合、エンドユーザーにとって必要な枢要情報を全て保持しながらも、扱いやすい程度のセットに結果の重要なポイントがまとめられなければならない。評価結果を用いて解説したり、ピアレビューを実施したりするために、結果を報告する際には明確に定義された用語を用いることが重要である。

評価結果は検討対象となっている特定の脅威に対してのみ有効であることに留意されたい。本評価手法は、潜在的脅威の発生頻度は考慮していないし、代表的な指標に関する寄与因子を1つにまとめるための重み付けも採用していない。したがって最終結果は脅威ごとに提示される。よって、解析者は異なる脅威から得られる結果を、パスウェイを超えて最終結果に集計することはできない。同様なことが脅威に対しても言えるが、これらの実際の確率的定量化は本手法の範囲外である。

あるエンドユーザーが意思決定を行う際特定の指標が他の指標に優るかもしれない。1つの指標のサブセットに焦点を絞ることはパスウェイ比較を単純化し、ユーザーにとっての情報が過多になることを抑えることができる。よって、PR&PP 手法のユーザーは、特定の決定に関連するパラメータあるいは指標のサブセットだけを選ぶことができる。ただし、たとえ1つまたは2つの脅威にしかエンドユーザーの関心がないとしても、結果はPRに対しては6指標、PPに対しては3指標を用いて表現されるべきである。

評価結果は信頼できる方法で正確であることが慎重にチェックされてから報告されなければならない。評価の焦点を示すために、結果には PR 及び PP の堅牢性に最も顕著に寄与するシステムと制度的特性が明記されるべきである。システムと制度の様々な特性の相対的重要度、及びモデル化に必要な種々の仮定の相対的重要度についての知見は、不確実性解析と感度解析によって得られるかもしれない。これらの知見は、図表で提示される結論を適切に解釈するために考察する必要がある。また、これらの知見には評価結果における総体的な不確実性の程度に係る認識と、不確実性の大きさ及び効果の理解も含まれるべきである。結果の詳細さと表示のスタイルは、評価の目的に依存する。結果の章も、結果が目的にどう合致するかを示すことで、評価の動機と目的について伝えるべきである。

2.3.2.1 信頼性

評価結果を記す章では結果を信頼できるものとする PR&PP 評価の枢要な特性を強調するべきである。提示されるべき情報は以下を含む。

- 解析の範囲と目的の明確な定義
- 境界条件の定義
- 様々なシステム/精度の相互作用についての知見
- 施設運転モードとシナリオの間の関係についての知見
- パスウェイの完全性を確実にするための作業の結果

- ・解析に伴うすべてを既知とすることの限界と制約についての明確で簡潔な表示
- ・評価に用いられるすべての仮定の明確で簡潔な表示、特にクライテリアと特定のパスウェイの選択について
- ・評価の数値結果に大きく影響する枢要パラメータ
- ・異なるパラメータ値、またはモデル化において異なる仮定が採用された場合でも結果が否定されないことを保証するために行った作業(例：感度解析)
- ・技術的品质を保証するための作業

2.3.2.2 精度

結果の精度をチェックすることも重要である。このチェックを行うことにより、評価において、評価対象である GEN IV NES に関して説明が技術的に妥当であることが保証される。評価は独立のレビューを受けるものと仮定する。独立にレビューする者が結果を再現できるように、十分な判断材料が報告書や付録、及び文献引用の中に含まれるべきである。同様にして、詳細なレベルの結果は政策決定者がハイレベルの結果の根拠をトレースできるように与えられるべきである。数値結果はどの指標が顕著な寄与を行うかを決定者が区別するのに十分な正確さがありさえすればよい。

2.3.2.3 重要なパスウェイ

各々の重要なパスウェイが記述されるべきである。もし単一で最も重要なパスウェイがなければ、有効フロンティア上のパスウェイセットが提示されるべきである。有効フロンティア上にない劣ったパスウェイとして選択されたものも、潜在的な脆弱性に対し知見を与えるので提示してよい。有効フロンティアから離れたパスウェイも、システムの脆弱性を削減しうる設計の特性を図示するために提示されてよい。脅威空間の性質と突破された障壁のようなシステム破損が記述的に論じられるべきである。PR についてはどのポイントで核物質が獲得され、そして秘密裏かあるいは公然となされたという情報が言及されるべきである。各パスウェイで起こる主要な事象が記述されるべきである。

この手法では脅威をまたがった結果の集計をしないので、トップレベルの結果は一つの脅威あたりと考えるべきである。一つの所与の脅威に対してさえも、もし多重のパスウェイがあれば、エンドユーザーはそれらを同等に(拡散国の戦略の情報の欠如)考えたいとするであろう。パスウェイリスト(表またはグラフ)は各脅威に対して別々に作られ、そして各脅威に対する一連の対応オプションの比較に用いられる。

2.3.2.4 不確実性

解析結果における不確実性の程度は明確に伝えられなければならない。評価の初期の間は可能な時点で不確実性の概略値が見積もらなければならない。NPAM 報告(2003)は結果中の不確実性を表現する多数のアプローチを検討している。不確実性を提示する方法は不確実性解析のタイプに依存するかもしれない。モンテカルロ法を用いた非常に詳細な不確実性解析では、分布の 5%値、95%値、平均値及び中間値の提示が可能である。もっと一般的には、不確実性の範囲はその意味の厳密な説明無しに定性的に提示される。しかしながら、意味は明確であるべきである。

PR&PP 評価は不確実性を生む幾つかの要因に影響される。不確実性の説明においては、最初に仮定が定性的に記述されなければならない。パスウェイに寄与する脅威の記述、システムの特徴、制度的なファクターに関する不確実性は、記述され、提示されなければならない。代替的なパスウェイが発生するときはこれに伴う不確実性が記載されなければならない。付録 E は不確実性に関するより詳細な考察を提供している。

2.3.2.5 感度解析

解析の最終結果は解析仮定の感度が理解できるような方法で提示されなければならない。例えば、PP に関する脅威空間を記述する際に、ある妨害破壊行為の脅威が特定の目的を持つと仮定する。目的が異なる場合に結果に与える影響を知ることは興味深い。このため、評価対象の国とエネルギーシステムにとって、最も拡散抵抗性の低いパスウェイが提示されるべきである。同様の概念は PR 解析にも適用される。

他の感度解析の結果もまた、エンドユーザーの関心によって発生しうる。結果を用意する際に、解析者は各感度解析の与えられた条件と変動パラメータを明確に述べるよう注意すべきである。最終結果に顕著には影響しないような仮定、データ及びモデルもまた、調査して報告されなければならない。

2.3.2.6 結果の定性的考察：知見と結論

評価結果の技術的 (定量的) 提示に加えてこの取組みの主な結論が明確に記述されなければならない。解析者は他の結果、研究及び考えられる傾向を展望した情報をつけて、評価の 4-5 個の主な代表的な結果を述べるべきである。新しい知見は特に強調すべきである。不確実性を減らすために必要な情報のタイプについても考察されるべきである。最後に結果は GEN IV の NESs の目的という観点で考察されるべきである。

3. 総括及び結論

PR&PP 評価手法は、NESs のセキュリティに関する広範な疑問に答え、拡散、盗取、妨害破壊行為の脅威に対抗する能力を増強するためにシステムを最適化する枠組みを提供する。また、PR&PP 手法は GEN IV 技術に対するセキュリティ関連の目標である「核兵器使用物質を転用、盗取するにあたって、非常に非魅力的で最も望まれないルートであり、テロ行為に対して増強した核物質防護を提供する」という観点から NESs を評価するツールを提供する。

PR&PP 解析は、少なくとも定性的レベルでは、システム設計の初期段階、すなわち、最初の事故被害の特定や安全解析が行われ、最初のフロー図と物理的レイアウト図が開発される段階から実施されることを想定している。PR&PP 手法の構造が安全解析に強い類似性を持つため、本手法はセキュリティと安全性に関する初期検討を容易にする。

PR&PP 手法はシステムが直面する可能性のあるセキュリティ上のチャレンジを特定し、そのチャレンジに対するシステムの応答を評価し、そして結果を比較する、という系統的な解析を行う。結果は指標によって表現され、拡散国や敵対者が自身の目的を達成する戦略やパスウェイを選択する際に考慮するであろう一次情報が反映されている。より魅力的なパスウェイを提供する施設やシステムの特徴を理解することにより、設計者はこのパスウェイを系統的に、より非魅力的にする障壁を導入することができる。魅力度を軽減させることが不可能な場合、例えば、ウラン濃縮によって供給される拡散パスウェイの魅力度を減少させようとする場合、解析者は適切なセキュリティレベルを提供するために、特別の燃料供給保証や返還の枠組みのような制度的手段の要求を強調することもあるだろう。

PR&PP 手法は解析者に高度な柔軟性を提供する。これは評価結果が適切なピアレビューを受けることを前提としている。このため、PR&PP 評価の実施方法は時間の経過とともに PR&PP 評価の文献や事例が増大するにつれて進化することが予想される。ターゲットの特定、システム応答と不確実性の評価、パスウェイ結果の比較、そして結果の提示について、異なるツールが増えていくことが期待される。これにより対応可能な問題の範囲や PR&PP 研究から得られる知見の範囲も増大すると期待される。

参考文献

Ahmed, S., and A.A. Hussein. 1982. "Risk Assessment of Alternative Proliferation Routes." *Nuclear Technology* 56:507

Baron, P., C. Brown, B. Kaiser, B. Matthews, T. Mukaiyama, R. Omberg, L. Peddicord, M. Salvatores, and A. Waltar. 2004. An Evaluation of the proliferation Resistant Characteristics of Light Water Reactor Fuel with the Potential for Recycle in the United States, A. Waltar and R. Omberg, eds.

Available at: <http://www.ne.doe.gov/nerac/BlueRibbonCommFinRprtNov2004.pdf>

Blankenship, J. 2002. "International Standard for Design Basis Threat (DBT)" International Conference on Physical Protection, Strengthening Practices for Protecting Nuclear Material, Salzburg, Austria, Sept 8-13, 2002.

Budnitz, R.J., G. Apostolakis, D.M. Boore, L.S. Cluff, K. J. Coppersmith, C. A. Cornell, and P. A. Morris. 1998. "Use of Technical Expert Panels: Applications to Probabilistic Seismic Hazard Analysis." *Risk Analysis* 18(4):463-9.

Cojazzi, G. G. M., and G. Renda. 2004. *Safeguards Assessment Methodologies: Review and Perspective from a Systems Analysis Point of View*. EUR 21307, Joint Research Center of the European Commission, Brussels.

Cojazzi, G. G. M., and G. Renda. 2005. "Proliferation Resistance Characteristics for Civilian Nuclear Fuel Cycles Assessments." 27th ESARDA Annual Meeting Symposium on Safeguards and Nuclear Material Management, London, May 10–12, 2005.

Cojazzi, G. G. M., G. Renda, and S. Contini. 2004. "Qualitative and Quantitative Analysis of Safeguard Logic Trees." In *Probabilistic Safety Assessment and Management 2004*, C. Spitzer, U. Schmocker, and V. N. Dang, eds., p.1083. Springer, Cambridge, Massachusetts.

Cojazzi, G. G. M., D. Fogli, G. Grassini, P. De Gelder, D. Gryffroy, R. Bolado, E. Holfer, R. Virolanen, I. M. Core, A. Bassanelli, A. I. Puga, I. Papazoglou, O. Zuchuat, E. Cojazzi, J. Eyink, G. Guida, L. Pinola, U. Pulkkinen, K. Simola, D. Von Winterfeldt, and A. Valeri. 2001. "Benchmark Exercise on Expert Judgment Techniques in PSA Level 2." *Nuclear Engineering & Design* 209:pp. 211–221.

R. Denning, R., et al. 2002. "Guidelines for the Performance of Nonproliferation Assessments." *Transactions of the American Nuclear Society* 87: pp. 365–366.

DOE (U.S. Department of Energy), Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum. December 2002a. *A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems*. GIF002–00, DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum, Washington, D.C.

DOE (U.S. Department of Energy), Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum. December 2002b. *Generation IV Roadmap: Viability and Performance Evaluation Methodology Report*. GIF002–13, DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum, Washington, D.C.

DOE (U.S. Department of Energy), Manual DOE 470.4-6, *Nuclear Material Control and Accountability*, Approved August 26, 2005.

Forester, J., D. Bley, S. Cooper, E. Lois, N. Siu, A. Kolaczowski, and J. Wreathall. 2004. "Expert Elicitation Approach for Performing ATHEANA Quantification." *Reliability Engineering and System Safety* 83:207-220.

Garcia, M. L. 2001. *The Design and Evaluation of Physical Protection Systems*. Butterworth – Hinemann, Boston.

Garrick, B. J., J. E. Hall, M. Kilger, J. C. McDonald, T. O'Toole, P. S. Probst, E. R. Parker, R. Rosenthal, A. W. Trivelpiece, L. A. Van Arsdale, and E. L. Zebroski. 2004. "Confronting the Risks of Terrorism: Making the Right Decisions." *Reliability Engineering & System Safety* 86 (2): pp.119–176

Heising, C. D. 1979. *A Comparative Assessment of the LMFBR and Advanced Converter Fuel Cycles with Quantification of Relative Diversion Resistance*. Final Report, MIT-NE-238, Massachusetts Institute of Technology Energy Laboratory, Boston.

Hill, J. 1998. *Logic Trees and Integrated Safeguards*. ASAP – 9802, Australian Safeguards and Non-Proliferation Office, Barton, Australia

Hinton, J. P., et al. 1996. *Proliferation Vulnerability Red Team Report*. SAND 97 -8203, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico.

IAEA (International Atomic Energy Agency). 1970. *Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons*, INFCIRC/140, IAEA, Vienna.

IAEA (International Atomic Energy Agency). 1972. *The Structure and Content of Agreements Between the Agency and States Required in Connection with the Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons*, INFCIRC/153 (Corrected), IAEA, Vienna.

IAEA (International Atomic Energy Agency). 1980. *The Convention on the Physical Protection of Nuclear Material*, INFCIRC/274/Rev.1, IAEA, Vienna.

IAEA (International Atomic Energy Agency). 1998. *Model Protocol Additional to the Agreement(s) between State(s) and the International Atomic Energy Agency for the Application of Safeguards*, INFCIRC/540 (Corrected), IAEA, Vienna.

IAEA (International Atomic Energy Agency). 1999. *The Physical Protection of Nuclear Materials and Nuclear Facilities*. IAEA – INFCIRC/140, IAEA, Vienna.

IAEA (International Atomic Energy Agency). 2002a. *Handbook on the Physical Protection of Nuclear Materials and Facilities*. IAEA-TECDOC-1276, IAEA, Vienna.

IAEA (International Atomic Energy Agency). 2002b. *Proliferation Resistance Fundamentals for Future Nuclear Energy Systems*, IAEA Department of Safeguards, IAEA, Vienna.

IAEA (International Atomic Energy Agency). 2002c. *Safeguards Glossary, 2001 Edition*, International Nuclear Verification Series n. 3, IAEA, Vienna.

IAEA (International Atomic Energy Agency). 2003. *Country Nuclear Power Profiles Website*. Available at: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/cnpp2003/CNPP_Webpage/pages/countryprofiles.htm

IAEA (International Atomic Energy Agency). 2004. *Methodology for the Assessment of innovative nuclear reactors and fuel cycles*, IAEA-TECDOC-1434, IAEA, Vienna.

INFCE (International Nuclear Fuel Cycle Examination). 1980. *Report of the First Plenary Conference of the International Nuclear Fuel Cycle Examination (INFCE)*. International Atomic Energy Agency, Vienna.

Ko, W. I., et al. 2000. "Electrical Circuit Model for Quantifying the Proliferation Resistance of Nuclear Fuel Cycles." *Annals of Nuclear Energy* 27:1399.

Krakowski, R. A. 1999. *A Multi-attribute Utility Approach to Generating Proliferation Risk Metrics*. LA-UR-96-3620, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos New Mexico.

Krakowski, R. A. 2001. "Review of Approaches for Quantitative Assessment of the Risks of and Resistance to Nuclear Proliferation from the Civilian Nuclear Fuel Cycle." LA-UR-01-169, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico.

NAS (National Academy of Sciences) Committee on International Security and Arms Control, Panel on Reactor-Related Options. 1995. *Management and Disposition of Excess Plutonium: Reactor-Related Options*. National Academy Press, Washington, D.C.

NASAP (Nonproliferation Alternative Systems Assessment Program). 1980. *Nuclear Proliferation and Civilian Nuclear Power*; Report of the Nonproliferation Alternative Systems Assessment Program, Vols. I-IX. U.S. Department of Energy, Washington, D.C.

National Research Council, Office of International Affairs. 2000. *The Spent-Fuel Standard for Disposition of Excess Weapon Plutonium: Application to Current DOE Options*. National Academy Press, Washington, D.C. Available online at <http://www.nap.edu/books/0309073200/html/>

NPAM (Nonproliferation Assessment Methodology) Working Group. National Nuclear Security Administration (NA-241). 2003. *Guidelines for the Performance of Nonproliferation Assessments*. PNNL-14294, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington.

Office of Technology Assessment. 1977. *Nuclear Proliferation and Safeguards*. OTA –E -48, Office of Technology Assessment, Washington, D.C.

Papazoglou, I. A., E.P. Gyftopoulos, N.C. Rasmussen, M.M. Miller, and H. Raiffa. 1978. *A Methodology for the Assessment of the Proliferation Resistance of Nuclear Power Systems*. MIT – EL -78 -021, Massachusetts Institute of Technology Energy Laboratory, Boston.

Pillat, J. F., K. Budlong-Sylvester, and W. Stanbro. 2002. *Expert Elicitation and the Problem of Detecting Undeclared Activities: A Report on Three Illustrative Elicitations Undertaken in Support of The International Atomic Energy Agency*. LA –UR -02 -6875, ISPO -492, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico.

Silvennoinen, p., and J. Vira. 1981. “An Approach to Quantitative Assessment of Relative Proliferation Risks from Nuclear Fuel Cycles.” *Journal of Operations Research* 32:457.

Siu, N. O., and D. L. Kelly. 1998. “Bayesian Parameter Estimation in Probabilistic Risk Assessment.” *Reliability Engineering and Safety* 62:pp.89-116.

Taylor, J., et al. 2000. *The Technological Opportunities to Increase the Proliferation Resistance of Global Civilian Nuclear Power Systems*. Report by the Nuclear Energy Research Advisory Council of the U. S. Department of Energy, “TOPS” Task Force, Washington, D. C.

U. S. Government Printing Office via GPO Access, *Code of Federal Regulations*, 10 CFR 73 (2006). Title 10 – Energy, Chapter 1 – Nuclear Regulatory Commission (continued), Part 73: _ Physical Protection of Plants and materials.

Wreathall, J., E. Roth, D. Bley, J. and Multer. 2003. *Human Reliability Analysis in Support of Risk Assessment for Positive Train Control*. Report No. DOT/FRA/ORD–03/15, U. S. Department of Transportation, Washington, D. C.

Ue, M., L. Cheng, I. A. Papazoglou, M. A. Azam, and R. Bari. 2005. “Calculations of Proliferation Resistance for Generation III Nuclear Energy Systems” Global 2005, Japan, October 9-13 2005.

付録1 用語解説

獲得 (Acquisition)	PR パスウェイにおける代表的な段階の 1 つで、核物質の形態に依らず、その獲得のために取られる一連の行動。「獲得」は核物質の獲得を決めたところから始まり、核物質が利用可能になったところで終わる。
行為者 (Actor)	PR についての行為者は、原子力システムを有するホスト国である。PP についての行為者(または敵対者)は、個人、あるいは外部脅威者及び/または内部脅威者の組み合わせから構成されるグループである。そのグループは非ホスト国の支援を受けているかもしれない。行為者は彼らの目的と能力でさらに特徴付けられる。
敵対者の遅延(PP) Adversary delay	PP 上の行為者が内在的(intrinsic)な障壁を突破して枢要装置ターゲットセットにアクセスし、無効化する(妨害破壊行為)、あるいは物質を持ち出す(盗取)の必要とする時間。
解析 (Analysis)	本質的な特性または意味を明らかにするための詳細な検討; コンポーネントまたは重要な特性への分解。
評価(判定) (Assessment)	相当する価値に応じた分類; 状況または事象を判定または評価する行為。
障壁(Barrier)	拡散(PR)、妨害破壊行為あるいは核物質/情報の盗取(PP)を妨げる原子力システムの特性。
能力 (Capability)	パスウェイごとに固有の必要なステップを実行するために、行為者が利用することのできる要素。PR 行為者の能力は、一般的技術スキル/知識、一般リソース、ウラン資源、一般工業能力、及び特定の原子力能力の観点から特徴付けられる。PP 行為者の能力は、知識、スキル、兵器及びツール、敵対者の数、及び義務(commitment)と献身(dedication)で特徴付けられる。
影響(C) (Consequences)	パスウェイに記述される敵対者の行為が成功裏に完了したことによる影響をとらえる PP 指標。
影響発生 (Consequence generation)	PP パスウェイにおける段階の 1 つで、放射性物質の放出、破損または破壊の結果をもたらすターゲットの不正利用に続いて発生する一連の事象の検討を行う。
設計基準脅威 (Design-Basis Threat)	施設及び設計に対する潜在的なチャレンジの境界特性
検知確率(DP) (Detection Probability)	PR 指標の一つで、パスウェイやセグメントに記述される行為を検知する累積確率を表す。粗い解析レベルでは、これは評価指標というよりはむしろ性能目標である。 IAEA(1998)は検知確率を以下のように定義している。 「一定量の転用が発生した場合、IAEA 保障措置活動がそれを検知する確率。」
検知リソース効率(DE) (Detection Resource Efficiency)	PR 指標の一つで、原子力システムに対して国際保障措置を適用するのに要する、人員、装置及び資金を表す。検知リソース効率は粗い解析レベルでは定性的にのみ評価されるが、保障措置システム設計を踏まえた精緻な解析レベルでは定量的に評価することができる。
有効フロンティア (Efficient frontier)	異なるパスウェイセットで、ハイレベルの指標間の数値のトレードオフ無しにはその魅力度を差別化できないもの。(訳者注: 本来この用語は金融工学上の用語で、与えられた条件のもとで、リターン/リスクが最大化するような組み合わせを表す。)
装置ターゲット (Equipment target)	施設の妨害破壊あるいは盗取ターゲットへのアクセスを成功させるために無効化しなければならない最小の装置セット。
評価手法 (Evaluation Methodology)	PR 及び/または PP 上の堅牢性を評価するために、原子力システムもしくはシステム要素を分析する総合的なプロセス。
	外在的(制度的)—国家または他の機関によって拡散、妨害破壊行為または盗取

<p>外在的(制度的) [Extrinsic (Institutional)]</p>	<p>を妨げるためとられる行為に関係する形容詞。これらの行為は本質的に、制度的、法的または運転上のものである。</p> <p>「手段」(measures)という名詞はこの文脈ではよく用いられる。例えば、「核拡散抵抗性を増大させる外在的措置 (measures)」。これは、PR&PP での「指標」("Measures")とは異なり、混同すべきでない。この報告書の中では、「指標」("Measure")は比較の基礎や基準を意味する語として用いられる。この“measures”という用語の別の用法でもって、PR&PP では内在的、外在的措置を意味する。</p> <p>拡散に対抗する外在的措置の例は、国際法、条約、議定書、輸入／輸出協定及び国際保障措置と検証活動(使用されるすべての保障措置測定装置を含む)の適用である。</p>
<p>製造・組立て (Fabrication)</p>	<p>PR パスウェイにおける代表的な段階の 1 つで、核爆発装置を製造し組立てるために行われる活動を検討する。製造・組立ては処理段階もしくは直接の獲により、核爆発装置に即利用可能な核兵器利用物質(例：金属型のプルトニウム)を入手した時点から始まり、1 個以上の核爆発装置を得た時点で終わる。</p>
<p>施設 (Facility)</p>	<p>(i) 原子炉、臨界実験施設、転換工場、濃縮工場、加工工場、再処理工場、同位体分離工場、分離貯蔵施設；もしくは、(ii) 1 実効 kg 以上の核物質が習慣的に使用される全ての場所。</p>
<p>核分裂性物質タイプ(MT) (Fissile Material Type)</p>	<p>PR 指標の一つで、ある物質の特性が、当該物質が核爆発装置に用いられる際の有用性に与える影響の程度によってその物質を分類する。</p>
<p>第四世代原子力システム (Gen IV) (Generation IV nuclear energy system)</p>	<p>第四世代型の原子力発電所及びその関連燃料サイクルに必要な諸施設。</p>
<p>グレード別保障措置 (Graded Safeguards)</p>	<p>核物質のタイプ、量、物理的形態、化学組成、同位体組成の違いによって、異なる程度の核物質防護、計量管理を行うよう設計された国内保障措置システム。ただし、悪意のある行為と潜在的敵対者にとっての魅力度及び利便性のレベルに伴うリスクに相応するものとする。</p>
<p>内在的 (Intrinsic)</p>	<p>内在的—原子力システムまたはその構成要素が有する固有の性質または物理的設計上の特性に関係する形容詞。内在的的特性は変更するのが非常に困難あるいは不可能であることが多く、したがって非常に堅牢で望ましいものであり、この用語は PR と PP の双方で用いられる。</p> <p>核拡散抵抗性上の内在的的特性は拡散を防止し、核物質防護上の内在的的特性は妨害破壊行為や盗取を抑止する。核拡散抵抗性の内在的的特性によって、間接的な便益を生むことがある。例えば、内在的的特性によって、より費用対効果が高く、堅牢な外在的措置を適用することが可能となる等。</p> <p>PR の内在的的特性の一例は、高い熱発生率のようなもので、これは核物質を兵器に利用することを不可能とする。完全な地下に施設を設置することは、PP の内在的的特性の一例であろう。</p>
<p>指標 (Measures)</p>	<p>PR または PP の堅牢性を表現するために用いる数少ない、ハイレベルのパラメータ。この語(Measures)を使用する際には、頻繁に用いられる別の用法(例えば、保障「措置」(Safeguards Measures)等、核物質や施設の管理及び防護のための、一連の外在的な行為あるいは手順)と混同しないよう注意する必要がある。</p>
<p>尺度 (Metrics)</p>	<p>定性的あるいは定量的なスケールで、システム特性や指標の値を評価するために用いられる。</p>
	<p>行為者が望む終点(例：達成すべきゴール・目標)。例えば、拡散評価では、目的は特定の特性を備えた核爆発装置の数で表現される。PR 行為者にとっての</p>

目的 (Objectives)	目的は、核兵器の獲得に限られ、核兵器の数、核兵器の信頼性、核兵器の貯蔵能力、核兵器の運搬能力、及び核兵器の生産率でさらに特徴づけられる。PP 行為者にとっての目的は、運転の妨害、放射性物質の放出、核爆発物や放射能拡散兵器の獲得及び情報の盗取である。この用語を使用する際は、保障措置目的のそれと混同してはならない。後者は、IAEA によって設けられた、核物質転用の検知目標を示すために用いられる。
結果 (Outcomes)	PR&PP 評価の文脈においては、システム応答の結果。
パスウェイ解析 (Pathway analysis)	ある脅威セットについて、望ましくない結果(拡散、妨害破壊行為、盗取)を引き起こす可能性のある一連の事象の特定と、システム応答の評価。PR では、評価の範囲に応じて、パスウェイ解析の対象は全ての拡散段階(獲得、処理、加工)または一部のみと変わりうる。各拡散段階は 1 つ以上のセグメントで構成される。PP についても、パスウェイ解析は複数の拡散段階を含む(核分裂性物質の盗取目的)。
パスウェイ (Pathways)	敵対者が目的を達成するために行う一連の潜在的な事象/行為(PR については拡散、PP については盗取または妨害破壊行為)。1 つのパスウェイは複数のセグメントで構成される。
パスウェイセグメント (Pathway segment)	パスウェイにおける異なる部分。
核物質防護(PP)堅牢性 (Physical Protection Robustness)	非国家主体及び/または非宿主国による、核爆発物や放射能拡散兵器に適した物質の盗取や、施設及び輸送の妨害破壊行為を防げる原子力システムの特性。
核物質防護リソース (PPR) (Physical Protection Resources)	PP 指標の 1 つで、所与のレベルの核物質防護の堅牢性を与えるのに必要な、人員、能力、コスト(インフラと運用の双方に必要な)、及び脅威の高度化と能力の変化に対するこれらのリソースの感度を表す。
敵対者の成功確率(PAS) (Probability of Adversary Success)	PP 指標の 1 つで、敵対者がパスウェイに記述された行為を成功裏に完了して「影響(consequence)」を発生させる確率を表す。
処理 (Processing)	PP パスウェイにおける代表的な段階の 1 つで、獲得の段階で得られた核物質を核兵器に使用できる物質へ転換するために行われる一連の活動を検討する。
進歩的アプローチ (Progressive approach)	より詳細な情報が利用可能になるにつれ、より詳細でより代表性の高い評価が可能となる進歩的評価のアプローチ。
拡散抵抗性(PR) (Proliferation Resistance)	核兵器または他の核爆発装置の獲得を目指す宿主国が、核物質の転用または未申告の生産、あるいは技術の不正使用を行うことを防止する原子力システムの特性。
拡散コスト(PC) (Proliferation Cost)	PR 指標の 1 つで、拡散に対する多重の障壁を突破するために必要な経済的及び人的なリソースを表す。この指標はドル(\$)単位で推定され、(拡散国が軍事費として利用できるリソースの総計等を尺度として) 評価することも可能である。
拡散技術の困難性(TD) (Proliferation Technical Difficulty)	PR 指標の 1 つで、技術が本来的に内包する拡散行為に対する困難性を表す。この困難性は、拡散に対する多重障壁を突破するための、技術の高度化及び核物質取扱能力の必要性によって生じる。
拡散時間(PT) (Proliferation Time)	PR 指標の 1 つで、拡散に対する多重障壁を突破するための時間を表す。
標準脅威セット (Reference Threat Set)	全てのレベルの PR&PP 評価において、一貫して考慮され、評価の基礎となる、明確に定義された脅威の集合。標準脅威セットは核燃料サイクル施設的设计と開発のプロセスを通じて発展すべきである。施設が建設された後は、標準脅威セットは設計基準脅威(DBT)となる。

妨害破壊行為(サボタージュ) (Sabotage)	放射性物質の放出や運転の妨害を引き起こすことを意図する計画的な行為。
保障措置 (Safeguards)	保障措置協定下において、国の約束が履行されていることを検認するために、独立機関によって実施される活動。検証機関は、IAEA、ユーラトム、及びブラジルアルゼンチン核物質計量管理機関(ABACC)を含む。
保障措置適用性 (Safeguardability)	システムに効率的かつ効果的に国際保障措置を実施することの容易さ。「保障措置適用性」は原子力システム全体の性質であり、システムに含まれる核物質、プロセスの実施、施設設計に関する特性を元にターゲットについて+評価される。
戦略 (Strategy)	行為者が自身の目的を達成するための方法についての大まかな記述。
システム要素 (System elements)	評価に含まれる施設。PR におけるシステム要素は、定義された原子力システムにおける、転用/獲得、及び/または処理、及び/または製造・組立てが行われる施設の集合である。PP でのシステム要素は、原子力システム中で、核物質防護上の脅威ターゲットになるか、脅威ターゲットを含む可能性のある施設である。
システム応答 (System response)	PR の文脈では、原子力システムが拡散に対抗する抵抗性。PP の文脈では、原子力システムが盗取及び妨害破壊行為に対抗する堅牢性。
ターゲット(標的) (Target)	PR では、転用されうる核物質、未申告の核物質を処理するために不正使用されうる装置/プロセス、あるいは未申告施設で複製できる装置/プロセス。PP では、盗取や移転から防護されるべき核物質や情報、あるいは妨害破壊行為から防護されるべき装置。
ターゲットアクセス (Target access)	PP パスウェイにおける段階の 1 つで、ターゲットまたは装置ターゲットセットへのアクセスを得るための行為を検討する。
ターゲットの利用 (Target exploitation)	PP パスウェイにおける段階の 1 つで、施設や輸送システムから盗取ターゲットを持ち出すため、または装置ターゲットセットを破損するための行為を検討する。
技術準備レベル (Technology Readiness Level)	保障措置が十分に機能するために必要な、保障措置手法の開発状況。
盗取(Theft)	核物質、放射性物質、または情報の不法持ち出し。
脅威 (Threat)	
脅威空間 (Threat space)	潜在的脅威の完全なセット。
枢要区域 (Vital area)	原子力施設における、装置、システム、あるいは妨害破壊行為によって間接的・直接的に許容できない放射線影響あるいは運転妨害を引き起こしうる核物質/放射性物質が存在する区域。

付録2 略語表

10 CFR 73	米国連邦法	U.S. Code of Federal Regulations
ABACC	アルゼンチンブラジル核物質計量管理機関 Agencia Brasileña Argentina de Contabilidad y Control de Materiales Nucleares.	
C	影響	Consequences
CANDU	カナダ型ウラン重水炉	Canada Deuterium Uranium nuclear reactor
DB-Pu	高燃焼度プルトニウム	deep burn plutonium
DBT	設計基礎脅威	Design Basis Threat
DOE	米国エネルギー省	U.S. Department of Energy
DOS	米国国務省	U.S. Department of State
DP	検知確率	Detection Probability
DE	検知リソース効率	Detection Resource Efficiency
DUPLIC	PWR使用済燃料のCANDU炉での直接使用 Direct Use of spent PWR fuel in CANDU	
EASI	敵対者の行為シーケンスに対する妨害評価 Estimate of Adversary Sequence Interruption	
GEN4	第四世代	Generation IV
GIF	GEN IV 第四世代国際フォーラム	Generation IV International Forum
H	高い	High
HEU	高濃縮ウラン	High-enriched uranium
IAEA	国際原子力機関	International Atomic Energy Agency
INFCE	国際核燃料サイクル評価	International Nuclear Fuel Cycle Examination
INFCIRC	情報回覧文書(IAEA出版)	Information Circular (IAEA Publication)
L	低い	Low
LEU	低濃縮ウラン	Low-enriched uranium
LWR	軽水炉	Light Water Reactor
M	中程度	Medium
MAU	多元属性効用	Multi-attribute utility
MC&A	核物質管理及び計量管理	Material Control and Accounting
MOX	混合酸化物	Mixed Oxide
MQ	(核分裂性)物質の品質	(Fissile) Material Quality
NAS	米国国立科学アカデミー	National Academy of Sciences
NASAP	核不拡散代替システム評価計画 Nonproliferation Alternative Systems Assessment Program	
NERAC	エネルギー省原子力エネルギー研究諮問委員会 Nuclear Energy Research Advisory Council of the DOE	
NES	原子力システム	Nuclear energy system
NNSA	(米国)国家核安全保障庁	National Nuclear Security Administration
NNWS	非核兵器国	Non-Nuclear Weapon State
NPAM	核不拡散評価手法(作業部会) Non-Proliferation Assessment Methodology (Working Group)	
NPT	核不拡散条約	Non-Proliferation Treaty
NWS	核兵器国	Nuclear Weapon State
PC	拡散コスト	Proliferation Cost
PDI	査察人日(人工)	Person-Days of Inspection
PP	核物質防護(堅牢性)	Physical Protection (Robustness)
PPR	核物質防護リソース	Physical Protection Resources

PPS	核物質防護システム	Physical Protection System
PR	核拡散抵抗性	Proliferation Resistance
PRA	確率論的リスク解析	Probabilistic Risk Analysis
PR&PP	核拡散抵抗性及び核物質防護	Physical Protection and Proliferation Resistance
PAS	敵対者成功確率	Probability of Adversary Success
PSA	確率論的安全評価	Probabilistic Safety Assessment
PUREX	ピューレックス(プルトニウム・ウラン抽出回収)	Plutonium and Uranium Recovery by EXtraction
PT	拡散時間	Proliferation Time
PWR	加圧水型軽水炉	Pressurized Water Reactor
RDD	放射能拡散兵器	Radiation dispersal device
RG-Pu	原子炉級プルトニウム	Reactor-grade plutonium
RTS	標準脅威セット	Reference Threat Set
SNL	サンディア国立研究所	Sandia National Laboratories
SQ	(核物質の)有意量	Significant Quantity (of nuclear material)
TD	拡散の技術的困難性	Proliferation Technical Difficulty
TOPS	世界の民間原子力発電システムの核拡散抵抗性強化のための技術的な機会 Technological Opportunities to Increase the Proliferation Resistance of Global Civilian Nuclear Power Systems	
UREX	ウラン抽出回収	Uranium Recovery by EXtraction
WG-PU	兵器級プルトニウム	Weapons-grade plutonium

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立法メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光照射度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の間には1:1の関係がある。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV.2002.70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面積	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ = kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min = 60s
時	h	1 h = 60 min = 3600 s
日	d	1 d = 24 h = 86 400 s
度	°	1° = (π/180) rad
分	'	1' = (1/60)° = (π/10800) rad
秒	"	1" = (1/60)' = (π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha = 1 hm ² = 10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L = 1 dm ³ = 10 ³ cm ³ = 10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t = 10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV = 1.602 176 53(14) × 10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da = 1.660 538 86(28) × 10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u = 1 Da
天文単位	ua	1 ua = 1.495 978 706 91(6) × 10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar = 0.1 MPa = 100 kPa = 10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg = 133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å = 0.1 nm = 100 pm = 10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M = 1852 m
バイン	b	1 b = 100 fm ² = (10 ¹² cm) ² = 10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn = (1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エル	erg	1 erg = 10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn = 10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P = 1 dyn s cm ⁻² = 0.1 Pa s
ストークス	St	1 St = 1 cm ² s ⁻¹ = 10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb = 1 cd cm ⁻² = 10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph = 1 cd sr cm ⁻² = 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal = 1 cm s ⁻² = 10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx = 1 G cm ² = 10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G = 1 Mx cm ⁻² = 10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≡ (10 ³ /4π) A m ⁻¹

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「≡」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci = 3.7 × 10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58 × 10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad = 1 cGy = 10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem = 1 cSv = 10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ = 1 nT = 10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ = 1 fm = 10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 メートル系カラット = 200 mg = 2 × 10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal = 4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ = 1 μm = 10 ⁻⁶ m

