



JAEA-Review

2013-011

GIF/PRPPWG/2009/02

**核拡散抵抗性及び核物質防護評価：
仮想的ナトリウム冷却高速炉システム全体の
ケーススタディ最終報告書（仮訳）**

PR&PP Evaluation: ESRF Full System Case Study
Final Report (Tentative Translation)

相楽 洋 川久保 陽子 井上 尚子

Hiroshi SAGARA, Yoko KAWAKUBO and Naoko INOUE

核物質管理科学技術推進部

Department of Science and Technology for Nuclear Material Management

January 2014

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/documents/PRPP_CSReport_and_Appendices_2009_10-29.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 “PR&PP Evaluation: ESFR Full System Case Study Final Report” 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/documents/PRPP_CSReport_and_Appendices_2009_10-29.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, 2014

© OECD/NEA for GIF, 2014

核拡散抵抗性及び核物質防護評価：
仮想的ナトリウム冷却高速炉システム全体のケーススタディ
最終報告書
(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
相楽 洋^{※1}、川久保 陽子、井上 尚子

(2013年3月21日受理)

第IV世代原子力システム(Gen IV)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(PRPP WG)は、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PR&PP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。「核拡散抵抗性及び核物質防護評価：仮想的ナトリウム冷却高速炉システム全体のケーススタディ最終報告書」は2009年10月に作成され、仮想的ナトリウム冷却高速炉(ESFR)の事例研究をまとめ、原子力システムのPR&PP評価手法開発の補助として用いられたものである。

本報告書は9つの主要システム要素からなる仮想的な原子力エネルギーシステムであるESFRのPR&PP評価のケーススタディがまとめられており、PR&PP評価手法の原子力システムへの適用の実際的経験を設計者に提供するものである。十分なPR&PP特性を備えた将来の原子力燃料サイクルシステムの開発は我が国において極めて重大なタスクであり、その有効性を国内外に示し説明していくことが必要とされるであろう。このため、本報告書は、わが国の将来の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も用語の和訳に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/documents/PRPP_CSReport_and_Appendices_2009_10-29.pdf

**PR&PP Evaluation: ESFR Full System Case Study
Final Report
(Tentative Translation)**

Hiroshi SAGARA^{※1}, Yoko KAWAKUBO and Naoko INOUE

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

(Received March 21, 2013)

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 PR & PP 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). The present report, published in Oct. 2009, was used as a supporting study for development of the evaluation methodology for proliferation resistance and physical protection of GEN IV nuclear energy systems.

The present report is summarizing the case study of the PR&PP evaluation of Example Sodium Fast Reactor (ESFR), a hypothetical nuclear energy system consisting of nine main system elements, and it provides for designers the practical experience of applying the PR&PP evaluation methodology to a nuclear energy system. The development of the future nuclear fuel cycle system with sufficient PR&PP features is a crucial task in Japan, and the demonstration and explanation about its effectiveness to the domestic and international society will be required. With the usefulness the present report for such purposes, 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 was performed as closely as possible to the original, and special attention was paid to the technical term translation for consistency. Terms difficult to be translated appropriately into Japanese was written with the original English wording. 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 report.

1 http://www.gen-4.org/Technology/horizontal/documents/PRPP_CSReport_and_Appendices_2009_10-29.pdf

Keywords: Proliferation Resistance, GIF PR&PP WG

※1 Senior Post-Doctoral Fellow

目次

要約	1
1. はじめに	5
1.1 目的	5
1.2 範囲	6
1.3 評価のアプローチ	6
2. 仮想的ナトリウム冷却高速炉の説明	10
2.1 システム要素の特定	10
2.2 リファレンスサイトの説明	11
2.3 設計バリエーション	13
3. 仮想的ナトリウム冷却高速炉に対する保障措置アプローチの概説	15
4. 仮想的ナトリウム冷却高速炉に対する核物質防護アプローチの概説	19
4.1 盗取ターゲットに対する核物質防護アプローチ	19
5. 検討された脅威	22
5.1 申告施設からの核物質の秘密裏取得	24
5.2 秘密施設における核物質の秘密裏生産	24
5.3 ブレイクアウトした上での申告物質及び施設の公然不正使用	24
5.4 核物質又は情報の盗取	25
5.5 原子力施設又は輸送における放射性物質・放射線発生装置等に対する妨害 破壊行為	25
6. 代表的パスウェイの特定と解析	26
6.1 転用	26
6.2 不正使用	32
6.3 ブレイクアウト	41
6.4 核分裂性物質の盗取	46
7. 評価手法の改善のために得られた教訓	52
7.1 パスウェイ解析から得られた教訓	52
7.2 核拡散抵抗性評価の教訓	53
7.3 核物質防護評価の教訓	54
7.4 今後の研究分野	54

TABLE OF CONTENTS

Executive Summary	1
1. Introduction	5
1.1 Objectives	5
1.2 Scope	6
1.3 Approach for Evaluation	6
2. Example Sodium Fast Reactor Description	10
2.1 System Element Identification	10
2.2 Baseline Site Description	11
2.3 Design Variation	13
3. Overview of the Example Sodium Fast Reactor Safeguard Approach	15
4. Overview of the Example Sodium Fast Reactor Physical Protection Approach	19
4.1 Physical Protection Approach for Theft Targets	19
5. Threads Considered	22
5.1 Concealed Acquisition of Material from a Declared Facility	24
5.2 Concealed Production of Material in a Clandestine Facility	24
5.3 Breakout and Overt Misuse of Declared Materials and Facilities	24
5.4 Theft of Nuclear Materials or Information	25
5.5 Radiological Sabotage of Nuclear Facilities or Transport	25
6. Representative Pathway Identification and Analysis	26
6.1 Diversion	26
6.2 Misuse	32
6.3 Breakout	41
6.4 Theft of Material	46
7. Lessons Learned for Methodology Improvement	52
7.1 Lessons from Pathway Analysis	52
7.2 Proliferation Resistance Assessment Lessons	53
7.3 Physical Protection Assessment Lessons	54
7.4 Areas for Further Study	54

図一覧

図 1.1 : PR&PP 評価手法の枠組み[1.2]	7
図 2.1 : ESFR 原子力システム要素の図解	11
図 2.2 : 仮想的ナトリウム冷却高速炉のサイト図	12
図 2.3 : サイトの全体平面図例	13
図 3.1 : ESFR 保障措置アプローチの概観	16
図 6.1 : 該当するシステム要素（青色表示）及び可能性のある関連の不正使用ターゲット （緑色表示）	32
図 6.2 : パスウェイ特定における秘密裏のプルトニウム生産	33
図 6.3 : ブレイクアウト戦略の定性的図示	43
図 6.4 : TRU/ウラン生成物（プロセスセル内）の盗取の敵対者シーケンスダイアグラム	47
図 6.5 : 盗取阻止確率－対抗部隊時間 150 秒（オプション A）の場合	49
図 6.6 : 盗取阻止確率－対抗部隊時間 300 秒（オプション B）の場合	49
図 6.7 : 盗取阻止確率－対抗部隊時間 600 秒（オプション C）の場合	50

表一覧

表 5.1 : 想定したホスト国（拡散者）の能力及び目標	23
表 6.1 : 転用ターゲットの説明	27
表 6.2 : 初期の転用パスウェイ解析	28
表 6.3 : 代表的転用パスウェイに関する指標評価	30
表 6.4 : 不正使用パスウェイセグメントの指標評価のための質問	36
表 6.5 : 基準設計と設計バリエーション 0 に関する核拡散抵抗性評価項目	38
表 6.6 : 設計バリエーション 1 に関する核拡散抵抗性評価項目	40
表 6.7 : 拡散時間指標で判定されるターゲット魅力度のブレイクアウト戦略への依存度	44
表 6.8 : ブレイクアウトに利する要因とそれに対する指標	45
表 6.9 : 盗取パスウェイに沿う各ステップの定性的解析	48

List of Figures

Figure 1.1 : Framework of the PR&PP Methodology	7
Figure 2.1 : Diagram of the ESFR Nuclear System Elements	11
Figure 2.2 : Site View for the Example Sodium-Cooled Fast Reactor	12
Figure 2.3 : Possible Overall Site Plan.....	13
Figure 3.1 : Overview of ESFR Safeguards Approach	16
Figure 6.1 : Relevant System Elements and Related Possible Misuse Targets	32
Figure 6.2 : Covert plutonium Production in Pathway Identification	33
Figure 6.3 : Qualitative Depiction of Breakout Strategies	43
Figure 6.4 : Adversary Sequence Diagram for Theft of TRU/Uranium Production.....	47
Figure 6.5 : Probability of Interruption of Theft When Response Force Time is 150 s	49
Figure 6.6 : Probability of Interruption of Theft When Response Force Time is 300 s	49
Figure 6.7 : Probability of Interruption of Theft When Response Force Time is 600 s	50

List of Tables

Table 5.1 : Assumed Host State Capabilities and Objectives	23
Table 6.1 : Diversion Target Description.....	27
Table 6.2 : Initial Diversion Pathways Analysis.....	28
Table 6.3 : Measures Estimation for Representative Diversion Pathways.....	30
Table 6.4 : Questions Supporting the Measures Estimation for the Misuse Pathway Segments..	36
Table 6.5 : Proliferation Resistance Qualifiers Related to the Baseline Design and Design Variation 0.....	38
Table 6.6 : Proliferation Resistance Qualifiers Related to Design Variation 1	40
Table 6.7 : Dependence on Breakout Strategy of Target Attractiveness as Determined by the Proliferation Time Measure	44
Table 6.8 : Factors Benefiting Breakout and Measures That Address These	45
Table 6.9 : Qualitative Analysis of Each Step along the Theft Pathway.....	48

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参加者

メンバー

Robert Bari	Co-chair	米国 ブルックヘブン国立研究所 (BNL)
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)
Dennis Bley		米国 Buttonwood Consulting, Inc
Giacomo Cojazzi		欧州評議会共同研究センター (EC/JRC, Ispra)
Philippe Delaune		フランス原子力庁 (CEA)
Sunil Felix		フランス原子力庁 (CEA)
Eckhard Haas		国際原子力機関 (IAEA)
James Hassberger		米国 ローレンスリバーモア国立研究所 (LLNL)
井上 尚子		日本原子力研究開発機構 (JAEA)
Thomas Killeen		国際原子力機関 (IAEA)
Jung Won Lee		韓国原子力研究所 (KAERI)
Franca Padoani		欧州原子力共同体 (EURATOM)
Joseph Pilat		米国 ロスアラモス国立研究所 (LANL)
千崎 雅生		日本原子力研究開発機構 (JAEA)
Jeremy Whitlock		カナダ原子力公社 (AECL)
Wan-Ki Yoon		韓国核不拡散核物質管理院 (KINAC)
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		
Rob Versluis	Liaison	米国 エネルギー省原子力エネルギー局(DOE-NE)
Hussein Khalil	Liaison	米国 アルゴンヌ国立研究所 (ANL)
Jill Zubarev	Liaison	米国 エネルギー省国家核安全保障局 (DOE/NNSA)
Trond Bjornard		米国 アイダホ国立研究所 (INL)
Brian Boyer		米国 ロスアラモス国立研究所 (LANL)
Burrus Carnahan	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)
Jor-Shan Choi		東京大学
Virginia Cleary		米国 サンディア国立研究所 (SNL)
Doug Huyck	Observer	米国 原子力規制委員会(NRC)
John Murphy	Liaison	米国 エネルギー省国家核安全保障庁 (DOE/NNSA)
Eric Pujol		国際原子力機関 (IAEA)

Guido Renda		欧州評議会共同研究センター (EC/JRC/ISPRA)
Joseph Rivers	Observer	米国 原子力規制委員会(NRC)
Gary Rochau		米国 サンディア国立研究所 (SNL)
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)
Edward Wonder	Liaison	米国 エネルギー省国家核安全保障庁 (NNSA)
Myung Seung Yang		韓国原子力研究所 (KAERI)
Meng Yue		米国 ブルックヘブン国立研究所 (BNL)

要約

第IV世代国際フォーラム（GIF）では将来の原子力システムの主要なゴールとして核拡散抵抗性及び核物質防護（PR&PP）を重視しており、PR&PP作業部会（WG）は本評価手法を開発した。評価の枠組みは、将来の原子力システムが直面し得る脅威範囲に焦点を当て、一連の指標と尺度に加え、尺度そのものの評価技法を提案し、それらを用いてシステムの応答を評価するものである。この評価手法の開発に当たり、WGは概念、評価枠組み及び共通用語について国際的なコンセンサスを得た。GIFは現行バージョンのPR&PP評価手法（改訂5版、2006年11月30日付）の公開を承認した¹。本評価手法は付録により追加情報が補足されている。

PRPP WGは、仮想的ナトリウム冷却高速炉（ESFR）の事例研究を基に本評価手法を開発した。ESFRは中規模のナトリウム冷却高速炉4基とこれに並置される使用済燃料の乾式貯蔵施設及び乾式再処理施設とからなる仮想の原子力システムである。この研究により実際の事例に本評価手法は適用可能であることが示されたが、そのレビューにおいて、専門家聴取をPR&PP解析で定常的に取り込む等、更なる開発が必要であることが指摘された。PR&PP評価手法の更なる高度化のためには、プロセス適用の実際の経験の蓄積、更なる手法開発と結果の提示に対するニーズの明確化、及び本評価手法の有効性と有用性の確認のために、原子炉／核燃料サイクル全体をより包括的に評価することが必要とされた。特に、PRPP WGがGIFの上位組織から要請されたのは、本評価手法の適用により設計者が実際の手引きを得ることができ、設計オプションを比較できることを実証することであった。もう一つの要請は、作業量とリソース（資源）に応じた様々なレベルでPR&PPの枠組みを適用できることを実証することであった。これらの理由から、PRPP WGは2ヶ年のケーススタディを実施した。本報告書はそのケーススタディと2ヶ年の終わりに得られた教訓について記述するものである。

ケーススタディの主要目的は、カリフォルニア州バークレーで2007年2月28日から3月1日まで開催されたPRPP WGの会合で設定され、その後計画立案に関するテレビ会議を通して更新された。本ケーススタディの具体的な目的は次の通りである。

1. GIFのPR&PP評価手法を第IV世代の原子炉／核燃料サイクルシステム全体に適用する。
2. 様々な設計オプションを比較することにより、本評価手法が特に設計者や意思決定者のために有意義な結果をもたらすことができることを実証する。
3. 本評価手法の将来のユーザーのためにPR&PP評価の事例を提供する。

設計オプションの比較は本評価手法の重要な目的であることから、ケーススタディの原子炉／核燃料サイクルシステムの選定には特に注意が払われた。既にESFRとその関連の核燃料サイクル施設（FCF）が明確化されていたため、WGはこれをケーススタディの基準設計として選定した。ケーススタディは施設レベルのPR&PP課題に焦点を当てているが、更に解析を進めることで、国家のシステム構築レベルに関してもPR&PPの展望を得ることが期待される。

解析を容易にするため、ケーススタディの脅威空間は大きく次の4つのカテゴリーに分

¹（訳者注）その後、Rev.6報告書が公開されている。

けられた。

1. 秘密裏の物質転用
2. 秘密裏の施設不正使用
3. ブレイクアウトした上での公然の転用又は不正使用
4. 兵器利用可能物質の盗取又は施設システム要素への妨害破壊行為

最初の3つの脅威カテゴリーでは主体はホスト国²である。4番目の脅威カテゴリーでは主体は非国家主体である。本PR&PP評価手法においては、ホスト国の（PR）脅威と非ホスト国の（PP）脅威は常に明確に区別される。PR及びPP両方の脅威カテゴリーについては、主体の目的と能力も明確に定義された。

それぞれの脅威カテゴリーについて検討する4つのサブグループが設置され、定性的評価によってターゲットを特定するとともに脅威に続くパスウェイを各々評価した。一般論として、本評価手法の枠組みは、与えられた核燃料サイクルに対するセキュリティチャレンジの明確化を必要とし、それに対するシステム応答を精査し、結果を明示するものである。なお、時間と資源の制約範囲内で実施される本解析は包括的で最終的なものではないことに留意されたい。実は、各サブグループに独立してそれぞれの脅威シナリオに取り組ませた動機として、様々なユーザーがどのように本評価手法の実施に取り組むかを確かめるという側面もあった。当然のことながら、各脅威サブグループが採った枠組みは一様ではなく、それぞれの選択・視点を反映したものだ。これはケーススタディにおけるこの側面での妥当な結果であり、本評価手法及びその使用法の標準化をより一層推進する必要があることを浮き彫りにしている。

ESFR 原子力システムの基準設計はアクチニド燃焼モードでの運転を想定し、外部からのアクチニド供給を要する。ESFRは以下の主要なシステム要素で構成される。

- ・ 軽水炉（LWR）使用済燃料貯蔵区域
- ・ 並置された核燃料サイクル施設
- ・ ESFR 使用済燃料及び新燃料貯蔵セル
- ・ サービス建屋（燃料集合体の一時貯蔵／洗浄区域と各原子炉への移送トンネルを含む）
- ・ 4基の同タイプのナトリウム冷却高速炉（SFR）と原子炉容器内貯蔵バスケット
- ・ 廃棄物貯蔵区域
- ・ LWR 使用済燃料キャスク受入・一時貯蔵区域
- ・ 余剰ウラン貯蔵区域
- ・ ウラン容器貯留区域

本ケーススタディでは、ホスト国の脅威に対する保障措置の関連事項と、非ホスト国の脅威に対するPPシステムを評価した。

ESFRの設計者からのインプットを基に、PRPP WGはケーススタディで検討の対象となり得る設計オプションリストを作成した。これには以下のものが含まれる。

- ・ アクチニド供給用 LWR 使用済燃料の遠隔地再処理 対 オンサイト再処理
- ・ ESFR 使用済燃料の遠隔地再処理 対 オンサイト再処理

²（訳者注）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。

- ・ 増殖炉 対 自給炉 対 燃焼炉の転換比 (CR)
- ・ 低燃焼度核燃料物質の混合 対 非混合
- ・ 起動フェーズオプション (初期装荷燃料生成オプション)
- ・ 様々な物理的配置オプション
- ・ 様々な受動的出入管理オプション

ケーススタディの1年目は、超ウラン元素(TRU)転換比 $CR=0.64$ の原子炉4基 (800MWth) から成る ESFR 基準設計の評価に注力した。2年目は、PR&PP 評価手法が CR の変化の影響を検出できるかどうか、できるとすればどの程度効果的にできるかを調査した。このため、種々の TRU 転換比 (0.73、0.22、1.00、1.12) に対する一連の設計バリエーションが定義された。

本ケーススタディは、PR&PP 評価手法を追跡可能な形で適用するための実際的アプローチを例示しており、PR パスウェイの定性的レベルでの評価と PP パスウェイの定性・定量的レベルでの評価において信頼でき説明可能な結果の導出が期待される。

ケーススタディから得られた基本的な教訓は以下のものである。

- ・ 各 PR&PP 評価は、想定される脅威の絞込みと、ターゲットやシステム要素等の特定を可能にする定性的解析から開始すべきである。
- ・ 定性的解析の詳細な手引きが手法に含まれるべきである。
- ・ システム設計、保障措置及び核物質防護措置に関して適切な技術専門知識を利用することが PR&PP 評価にとって不可欠である。
- ・ 専門家聴取を利用することで、結果の説明可能性及び追跡可能性と解析の整合性を確保することができる。
- ・ 定性的解析により、初期設計段階でも、貴重な結果が得られる。
- ・ 本評価手法とその使用法のより一層の標準化が必要である。

潜在的な転用パスウェイを完全に特定することが評価の重要なゴールである。ターゲット及び潜在的パスウェイが脅威毎に系統的に特定され、潜在的な拡散ホスト国のターゲット物質転用戦略のもっともらしいシナリオも系統的に見つけられる。一連の転用パスウェイセグメントが設定され、PR 指標、すなわち本 PR&PP 評価手法で各パスウェイについて定義される代表的な(high level)PR 評価項目 (技術的困難性、拡散時間、拡散コスト、物質のタイプ、検知確率及び検知リソースの効率) を評価(推定)することができる。

転用脅威のパスウェイ解析はまた、規制当局、政府高官、システム設計者などの利害関係者に様々な有益情報を提供する。この情報には、当該物質が潜在的拡散者にとって兵器計画利用にどの程度魅力的であるか、当該物質に物理的に接近して取り出すのがどの程度困難であるか、さらにはもっともらしい全ての転用パスウェイを内在的特性と外在的措置の組み合わせで包括するように施設の設計・運転ができるかどうか、といった情報が含まれる。

不正使用脅威のパスウェイ解析では、兵器利用可能物質を製造する潜在的に複雑なプロセスの組み合わせの検討が必要である (言い換えれば、これは単一の設備に対する単一の行為ではなく、むしろ様々な資産やシステム要素の統合的な不正使用である)。核拡散戦略を考えると、一部の指標が他の指標を支配する可能性があり、またある指標において幾つかのセグメントがパスウェイ全体の総合評価を支配することがある。

ブレイクアウト脅威のパスウェイ解析から、ブレイクアウトは転用及び不正使用脅威の

範囲に入る *変種戦略*であり、その意図や攻撃性、究極的には拡散国家が想定する拡散時間に応じて、様々な形態を取り得ることが分かった。また、PR 指標は、戦略に応じたブレイクアウト脅威の範囲内で異なる方法で評価され得る。なお、グローバルな対応と外交政策に関連する幾つかの追加要因がブレイクアウト脅威特性に関連すると明示されたが、これらの要因は本 PR&PP 評価手法には含まれていない。

盗取及び妨害破壊行為のパスウェイ解析については、解析ツールの実質的な基盤が既に存在する。本ケーススタディでは、これらのツールが PR&PP 評価手法の枠内で使用できることを確認した。

盗取及び妨害破壊行為のパスウェイ解析では、複数のターゲットとパスウェイが存在することが分かった。最も魅力的な盗取ターゲット物質が幾つかのターゲット区域に所在することが見受けられた。具体的には ESFR の場合、最も魅力的なターゲット物質がある最も魅力的な盗取ターゲット区域は、LWR 使用済燃料キャスク一時貯蔵区域、LWR 使用済燃料貯蔵区域、サービス建屋内一時貯蔵／洗浄区域、FCF 空気雰囲気ホットセル、それと FCF 不活性雰囲気ホットセルであった。

本ケーススタディにより、幾つかの追加的な洞察が得られた。サブグループが指摘しているように、特に評価プロセスにおいて解析者は、例えば扉や門が PP の敵対者に引き起こし得る遅延時間等のシステム設計の詳細に係る仮定を頻繁に取り入れなければならない。スタディの進捗とともに、サブグループは、こうした仮定を文書化すればシステムの機能要件や概念設計段階での設計基礎文書の基本情報となる可能性を認識するようになった。こうした仮定を設計基礎情報として文書化すれば、初期概念設計評価で企図された PR&PP 特性と整合した確かな施設の詳細設計が可能となるだろう（あるいは、仮定が詳細設計に具現化できない場合には、初期の PR&PP 評価は適宜見直されなければならない）。

したがって本 PR&PP 評価手法は、詳細なシステム設計の設計基礎を生み出すために、原子力システムの概念設計段階で適用できる強力なツールとなる可能性を秘めている。今後の研究では、更にこのアプローチを修練し、第 IV 世代原子力システムの設計指針としての有用性を実証することに努めていく。

1. はじめに

第 IV 世代原子力システム (NES) は核拡散抵抗性及び核物質防護 (PR&PP) のゴールを強調している [1.1]。PR&PP 作業部会(WG)は、第 IV 世代 NES の PR&PP 評価に適用できる評価手法を開発した。評価の枠組みは、一式の指標 (すなわち、各パスウェイについて PR&PP 手法により定義された代表的な PR 評価項目で技術的困難性、拡散時間、拡散コスト、物質タイプ、検知確率及び検知リソースの効率からなる)、指標に対する尺度、及び尺度そのものの評価技法からなる。本評価手法の開発にあたり、WG は概念、枠組み及び共通用語について国際的なコンセンサスを得た。第 IV 世代国際フォーラム (GIF) の PR&PP 評価手法の現行リリース版は、2006 年 11 月 30 日付の改訂 5 版である。これは公開することが GIF の上位組織によって承認された、コンセンサス文書である [1.2、1.3]。

PRPP WG は一連の研究を基に本評価手法を開発した。初期開発研究 (2004 年) に続いて、仮想的ナトリウム冷却高速炉 (ESFR) による実証研究 (2005 年～2006 年) が行われた。ESFR は仮想の NES であり、中規模 (800MWth、～300MWe) のナトリウム冷却高速炉 (SFR) 4 基とこれに並置される乾式燃料貯蔵施設及び乾式再処理施設とからなる [1.4]。ESFR は、第 IV 世代ロードマッププロジェクトで策定された分類方式によれば、L2 型のプール型原子炉である [1.1]。

開発スタディは、ある特定脅威に対する PR&PP の大まかなパスウェイ解析であり、保障措置アプローチの詳細な想定をすることなしに ESFR NES 全体が検討されてきた。PRPP WG は、本実証スタディのために、ESFR システムの定義を改訂し保障措置システムの記述を含めることとした。WG はまた、システムの範囲を再定義し、ESFR システム要素の一つである並置された乾式再処理核燃料サイクル施設 (FCF) の一部分又は“一断片 (スライス)”の PR 側面に限定することとした。このように対象を絞り込むことで、WG は定量的手法の使用を実証した [1.5～1.7]。

これらの事前スタディにより、本評価手法は実際的な事例に適用可能であることが示された。しかし、そのレビューにおいて、専門家聴取を PR&PP 解析に定常的に用いる等、更なる高度化が必要であることが指摘された。PR&PP 評価手法の更なる高度化のためには、プロセス適用の実際的経験の蓄積、更なる手法開発と結果の提示に対するニーズの明確化、及び本評価手法の有効性と有用性の確認のために、原子炉/核燃料サイクル全体により包括的な評価が必要とされた。特に、PRPP WG に対する GIF 上位組織からの要請は、本評価手法の適用により設計者が実際的な手引きを得ることができることを実証することであった。もうひとつの要請は、PR&PP の枠組みが、作業量とリソースに応じた様々なレベルで適用できることを実証することであった。これらの理由から、PRPP WG は 2 ヶ年のケーススタディを実施した。本報告書はそのケーススタディと 2 ヶ年の研究の終わりに得られた教訓について記述する。

1.1 目的

ケーススタディの主要な目的は、カリフォルニア州バークレーで 2007 年 2 月 28 日から 3 月 1 日まで開催された PRPP WG の会合で設定され、その後の計画立案に関するテレビ会議を通して更新された。ケーススタディの具体的な目的は次の通りである。

1. GIF の PR&PP 評価手法を第 IV 世代の原子炉/核燃料サイクルシステム全体に適用する。
2. 様々な設計オプションを比較することにより、本評価手法が特に設計者や意思決定

者のために有意義な結果を生成できることを実証する。

3. 本評価手法の将来のユーザーのために PR&PP 評価の事例を提供する。
 - a. (日本やフランスで計画されているような) 他の研究への移行を円滑にする。
 - b. 他の現在進行中の共同の取り組み (例えば、国際原子力機関の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) を促進する。

設計オプションの比較は本評価手法の重要な目的であることから、ケーススタディの原子炉/核燃料サイクルシステムの選定には特に注意が払われた。ESFR とその関連 FCF が明確化されていたため、WG はこれをケーススタディの基準設計として選定した。

1.2 範囲

ケーススタディの範囲は、リファレンスシステム設計と比較のための代替設計バリエーション (第 2 章)、保障措置アプローチ (第 3 章) と PP アプローチ (第 4 章) の検討、それと具体的脅威空間 (第 5 章) の検討である。設計者からのインプットを得て、WG は検討のために次の設計オプションリストを作成した。

- ・ アクチニド補給用軽水炉(LWR)使用済燃料の遠隔地再処理対オンサイト再処理
- ・ ESFR 使用済燃料の遠隔地再処理対オンサイト再処理
- ・ 増殖炉対自給炉対燃焼炉の転換比 (CR)
- ・ 低燃焼度核燃料物質の混合対非混合
- ・ 起動フェーズオプション (初期装荷燃料生成オプション)
- ・ 様々な物理的配置オプション
- ・ 様々な受動的出入管理オプション

ケーススタディの 1 年目は、アクチニド燃焼モードで稼働する超ウラン元素 (TRU) CR が 0.64 の 800MWth ナトリウム冷却高速炉 4 基から成る ESFR の基準設計の評価に注力した。2 年目は、PR&PP 評価手法が TRU CR の変化による影響を検出できるかどうか、できるとすればどの程度効果的に検出できるかを調査した。このため、種々の TRU CR (0.73、0.22、1.00、1.12) に対する一連の設計バリエーションが定義された。

1.3 評価のアプローチ

解析を容易にするため、ケーススタディの脅威空間は大きく次の 4 つのカテゴリに分けられた。

1. 秘密裏の物質転用
2. 秘密裏の施設不正使用
3. ブレイクアウトした上での公然の転用又は不正使用
4. 兵器利用可能物質の盗取又は施設システム要素への妨害破壊行為

それぞれの脅威カテゴリに対するシステム応答について検討する 4 つのサブグループが各々設置され、定性的評価によってターゲットを特定するとともに、脅威に続くパスウェイを評価した。各サブグループはそれぞれの評価プロセスにおいて、会合やテレビ会議を開催し、専門的判断を実施した。

各サブグループは PR&PP 評価手法において策定された図 1.1 に示す枠組みに沿って評価を実施した[1.2]。一般論として、本評価手法の枠組みでは、所与の核燃料サイクルに対するセキュリティチャレンジの明確化を必要とし、それに対するシステム応答を精査し、

結果を明示するものである。なお、時間とリソースの制約範囲内で実施される本解析は包括的で最終的なものではないことに留意されたい。実は、各サブグループに対して独立にそれぞれの脅威シナリオに取り組ませた動機として、様々なユーザーがどのように本評価手法の実施に取り組むかを確かめるといった側面もあった。当然のことながら、それぞれの脅威サブグループが採った取組みは一樣ではなく、それぞれの選択・視点を反映したものであった。

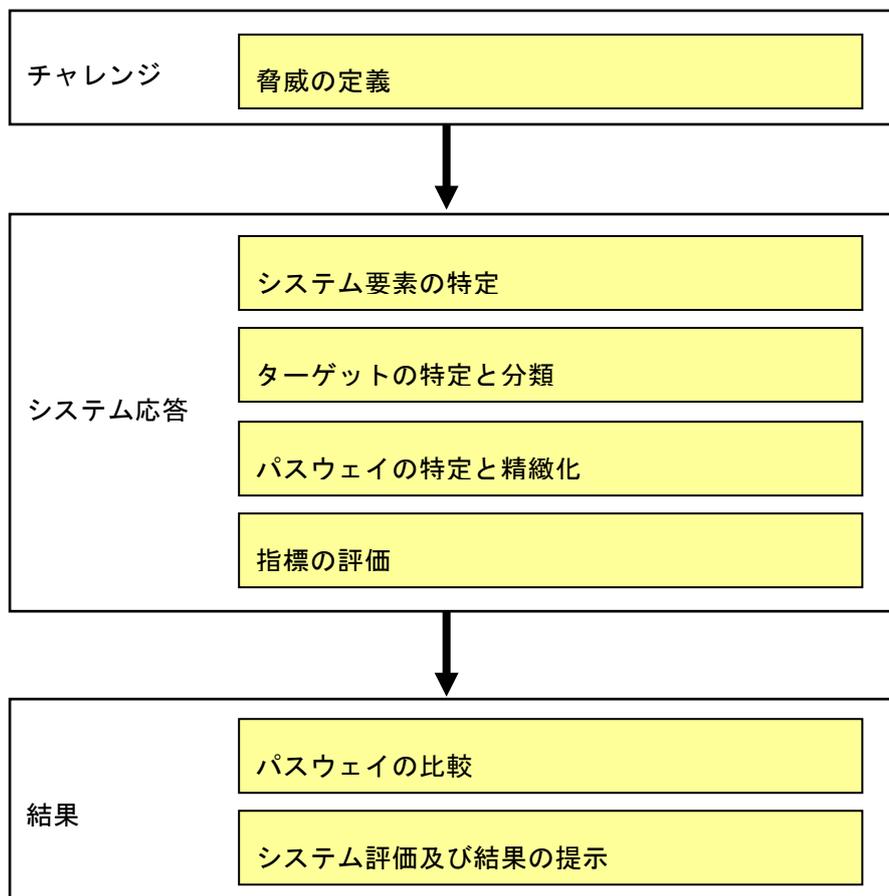


図 1.1 : PR&PP 評価手法の枠組み[1.2]

本評価手法は、システム防護上の内在的・外在的特徴を明らかにする。前者はシステム固有の特性又は物理的設計パラメータを含み、後者は国際保障措置や外部バリアなどの制度的側面をカバーする。

それぞれホスト国と非ホスト国の脅威に係る PR 及び PP の強度を比較するために、別々の指標が PR&PP アプローチの下に策定された。

PR に関する指標は次の通りである。

- ・ 拡散の技術的困難性(TD)－核拡散に対する多重バリア³を突破するために、技術の

³ 「バリア」とは内在的バリア（例えば技術的困難性）及び外在的バリア（例えば保障措置）をいうが、兵器化上の困難は含まれない。

高度化や核物質取扱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)*—既存又は新設の施設使用も含め、核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。
- ・ *拡散時間(PT)*—核拡散に対する多重障壁を突破するためにかかる最小時間（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合計時間）。
- ・ *核分裂性物質のタイプ(MT)*—当該核物質の特性が、核爆発装置の有用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)*—核拡散のセグメント又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 に関する指標は次の通りである。

- ・ *敵の成功確率(PAS)*—敵対者がパスウェイに抽出される行為を成功裏に完了し、結果を生む確率。
- ・ *結果(C)*—パスウェイに抽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(PPR)*—バックグラウンドスクリーニング(身元審査)、検知、妨害及び無効化等の PP を提供するのに要する人、能力及びコスト、並びに脅威の高度化及び能力の変化に対して必要となるリソースの変動。

これらの指標について評価することにより、システム設計者はシステムの PR&PP 性能を向上するような設計オプションを特定できる。

REFERENCES

- [1.1] U.S. Department of Energy Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum. 2002. A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems. GIF002-00, U.S. Department of Energy & Generation IV International Forum, Washington, D.C.
- [1.2] PR&PP Expert Group. 2006. Evaluation Methodology for Proliferation Resistance and Physical Protection of Generation IV Nuclear Energy Systems, Revision 5. GIF/PRPPWG/2006/005, Generation IV International Forum,. Available at: <http://www.gen-4.org/Technology/horizontal>
- [1.3] PR&PP Expert Group, 2006. Addendum to the Evaluation Methodology for Proliferation Resistance and Physical Protection of Generation IV Nuclear Energy Systems, GIF/PRPPWG/2006/005-A. Generation IV International Forum, Available at: <http://www.gen-4.org/Technology/horizontal/PRPPEM.pdf>
- [1.4] PR&PP Expert Group. 2005. PR&PP Evaluation Methodology Development Study, Insights Report. ANL-AFCI-140, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois.
- [1.5] Argonne National Laboratory. 2006. ESRF Pyroprocessing Facility Description and Preliminary Safeguards Approach for PR&PP Demonstration Study. U.S. Department of Energy & Generation IV International Forum, Washington, D.C.
- [1.6] PR&PP Expert Group. 2007. PR&PP Evaluation Methodology Demonstration Study Interim Report. Submitted to U.S. Department of Energy & Generation IV International Forum by Brookhaven National Laboratory, Upton, New York. January 31, 2007. BNL-PRPP-2006-001R1.
- [1.7] PR&PP Working Group Members & Other Contributors. 2008. "GIF Evaluation Methodology for Proliferation Resistance and Physical Protection of Generation IV Nuclear Energy Systems: Overview and Perspectives", ESARDA Bulletin No. 39, Special Issue on Proliferation Resistance, October 2008, pp. 55-68.

2. 仮想的ナトリウム冷却高速炉の説明

核燃料サイクルの全ての要素や配置上の考慮が十分なされた第 IV 世代システムの概念設計はまだ策定されていない。比較的成熟していると思われる第 IV 世代原子炉技術（ナトリウム冷却高速炉）についても、本評価手法の実施を検証するためにすぐ使える概念は存在しない。

このため、WG は、発電プラント、燃料施設を含む仮想の第 IV 世代 ESFR システムと配置シナリオを作成した。WG が使用したのは第 IV 世代ロードマップに提出されたアイデアのひとつ（AFR-300）[2.1]である。システムの燃料サイクル施設（FCF）には乾式（非湿式）のリサイクル技術（乾式再処理⁴）を選定した。ケーススタディでは、FCF と 4 基の原子炉ユニットを並置するもっともらしい要素配置を想定している。

以下では ESFR NES⁵について概説する。詳細は付録 A に記載する。原子炉技術及び核燃料サイクル技術はそれぞれ参考文献[2.2、2.3]で論じられている。システムの境界は ESFR サイトの境界と一致する。サイト境界内の施設、物質及びプロセスは ESFR システムの内部であり、その他は全て外部である。

2.1 システム要素の特定

システム要素という用語は、特定された原子力システムの内部にあって転用／取得かつ／又は処理が行われる可能性のある施設⁶の集合として定義される。ESFR は次のシステム要素を含む。

1. LWR 使用済燃料貯蔵施設
2. 並置された核燃料サイクル施設
3. ESFR 使用済燃料及び新燃料貯蔵セル
4. サービス建屋（燃料集合体の一時貯蔵／洗浄区域と各原子炉への移送トンネルを含む）
5. 4 基の同タイプのナトリウム冷却高速炉 SFR（各々が原子炉容器内貯蔵バスケットを有する）
6. 廃棄物貯蔵施設
7. LWR 使用済燃料キャスク受入・貯蔵区域
8. 余剰ウラン貯蔵区域
9. ウラン容器貯蔵区域

これらは ESFR システム内の施設（場所）であり、核拡散又は盗取かつ／又は妨害破壊行為に対して魅力的となり得る核物質又はプロセスが存在している。ESFR のモデルとされた原子力施設に関する現行の文献には、LWR 使用済燃料キャスク受入・貯蔵区域、LWR

⁴ 乾式再処理はアルゴンヌ国立研究所（ANL）とアイダホ国立研究所（INL）の両方で開発が行われてきた。歴史的には、フローシートの開発と実験室規模の試験は ANL-East（現 ANL）で行われ、スケールアップと工学規模の実証は ANL-West（現 INL の一部）で行われた。

⁵ ESFR の記述には、PR&PP 作業部会の一員ではない ANL 及び ANL-W のエンジニアである C.Grandy、T.Fanning、M.Golf 及び R.Kudlak によって提供された資料が含まれる。

⁶ 国際原子力機関（IAEA）の追加議定書によれば、施設とは、“(i) 原子炉、臨界実験施設、転換工場、加工工場、再処理工場、同位体分離工場又は独立の貯蔵施設、あるいは (ii) 1 実効キログラムを超える量の核物質が通常使用される場所”をいう[2.4]。上記本文中に与えた施設の黙示的定義は IAEA の定義と両立し得る。

使用済燃料貯蔵施設、廃棄物貯蔵施設は明示的には記載がない。完全を期すため、これらを ESFR システムの内部要素として含むこととした。

図 2.1 は上記の全てのシステム要素を含む ESFR 原子力システムを示す。

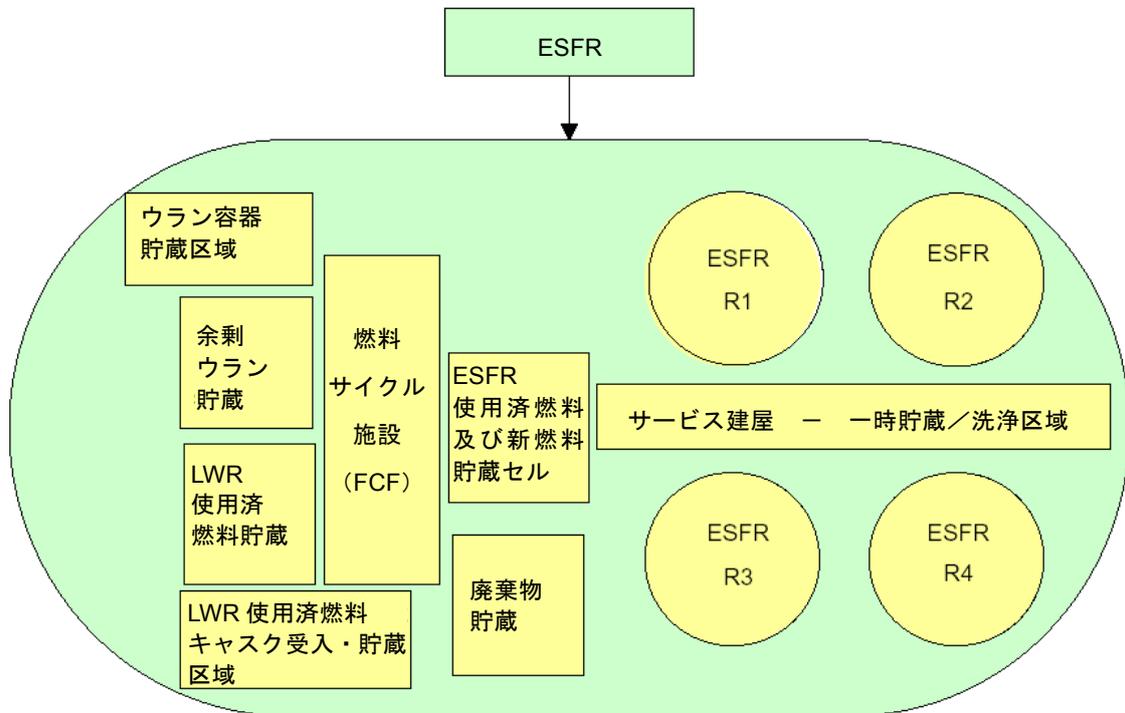


図 2.1 : ESFR 原子力システム要素の図解

2.2 リファレンスサイトの説明

乾式再処理技術は運転特性上少量のスループットに向いており、ケーススタディの ESFR 設計で想定されているように、核燃料サイクル施設を発電プラントと並置することが可能である。ESFR サイトは、4 基のナトリウム冷却高速炉発電プラント（それぞれ公称 300MWe）と FCF で構成される。

サイトにはまた、使用済燃料集合体を洗浄して FCF に移送するための使用済燃料一時貯蔵区域を収容したサービス建屋が含まれる。新燃料（リサイクル燃料）も FCF から各原子炉にサービス建屋経由で移送される。FCF の前面には、使用済燃料及び新燃料貯蔵区域が設けられ、施設の定常運転と、本区域－各原子炉間の移送を継続するに十分な貯蔵スペースが設けられている。

図 2.2 にサイトレイアウト図を示す。セキュリティ関連建屋やゲート、フェンス等の詳細が作成されておらず、PRPP WG は仮定を行っている。補助建屋の配置も作成されていない。ESFR 原子力システムサイトの全体平面図例を図 2.3 に示す。ただし、図 2.2 と図 2.3 は上記で特定されたシステム要素を全て含んでいるわけではないことに注意されたい。

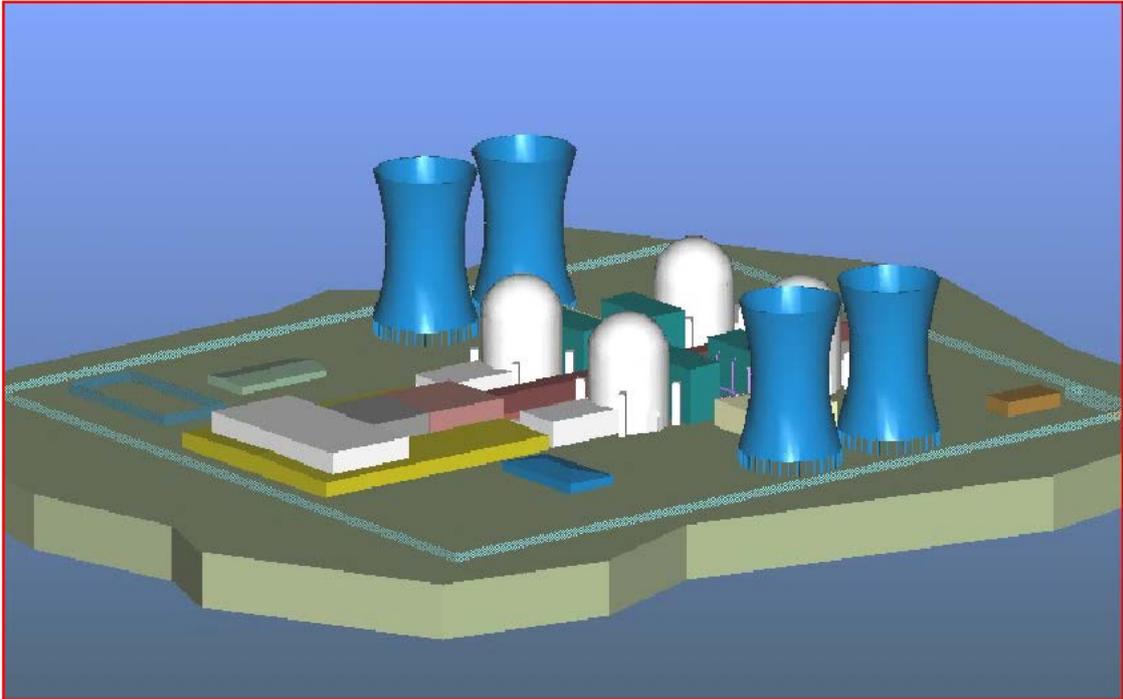


図 2.2 : 仮想的ナトリウム冷却高速炉のサイト図

ESFR システムの基準設計について、WG は各原子炉がアクチニド燃焼モードで運転することを想定した。これは第 IV 世代プログラムにおける高速スペクトル炉の初期展開として、アクチニドマネジメントが戦略課題と想定されているためである。したがって、各原子炉は自給モードの運転ではなく、補給のために外部アクチニド源を必要とする。リサイクル燃料はサイト内の FCF で加工されると想定されるので、施設に対し外部アクチニド源からの供給が必要である。基準 ESFR システムについての想定では、外部アクチニド源は LWR 使用済燃料集合体の形で提供される。この想定により LWR 使用済燃料を再処理する外部 FCF を考慮する必要がなくなる。LWR 酸化物燃料はサイト内 FCF で処理されるが、電解精製装置での処理に先立ち、酸化物燃料を金属に還元する前工程段階が必要である。

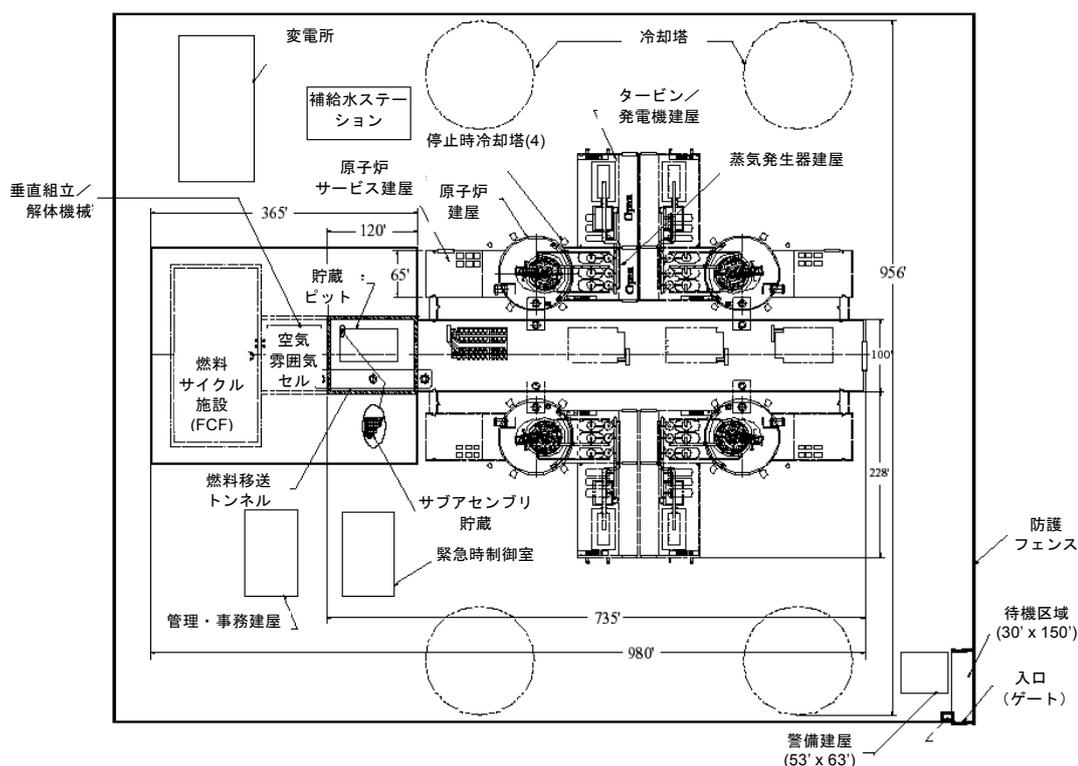


図 2.3 : サイトの全体平面図例

2.3 設計バリエーション

ケーススタディの初年度に検討した基準 ESRF システムは、アクチニド燃焼モードで稼働する出力 800MWth の SFR4 基で構成され、TRU CR は 0.64 とした。ANL の研究者等は、出力 1000MWth の ESRF について大小の CR を得るため、設計感度解析を実施した[2.5]。PRPP WG はこれらの研究データをケーススタディの設計バリエーションに用いた。したがって、設計バリエーションでは次の 4 つのケースを検討した。

- 設計バリエーション 0 (DV0) : TRU CR=0.73
- 設計バリエーション 1 (DV1) : TRU CR=0.22
- 設計バリエーション 2 (DV2) : TRU CR=1.00
- 設計バリエーション 3 (DV3) : TRU CR=1.12

DV0 はアクチニド燃焼炉で、基準 ESRF システム (TRU CR=0.64) 相当であるが炉心はそれよりも大きい。DV1 はアクチニド高燃焼炉心のケースを検討する。DV2 は親物質を伴うブランケット燃料集合体のない平衡炉心のケースであり、DV3 は径方向と内部に親物質を伴うブランケット燃料集合体を装荷した増殖炉のケースである。各設計バリエーションの詳細は付録 A の図表に示されている。

REFERENCES

- [2.1] U.S. Department of Energy Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum. 2002. A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems. GIF002-00, U.S. Department of Energy & Generation IV International Forum, Washington, D.C.
- [2.2] J. Roglans-Ribas, C. Grandy, A. Brunsvold, D. Wade, and R.W. King. 2003. "Design of the Advanced Fast Reactor System." 2003 Int. Congress on Advanced NPPs (ICAPP '03), Cordoba, Spain, May 4-7, 2003.
- [2.3] J. Laidler, J. Battles, W. Miller, J. Ackerman, and E. Carls. 1997. "Development of Pyroprocessing Technology." Progress in Nuclear Energy, 31,1-2, pp.131-140.
- [2.4] International Atomic Energy Agency (IAEA). 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.
- [2.5] T. K. Kim and W. S. Yang. 2007. Design Sensitivity Studies of 1000 MWt Reference ABR Core Concepts to Achieve Low and High Conversion Ratios. ANL-AFCI-200, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois.

3. 仮想的ナトリウム冷却高速炉に対する保障措置アプローチの概説

包括的保障措置協定 [3.1]⁷の下にある国家の場合、ESFR 保障措置アプローチは既存の保障措置クライテリア [3.2] に基づいて設計することが可能であろう。様々な施設タイプに対する一般的保障措置クライテリアが存在しており、ESFR については、第一近似として、様々な施設タイプの集まりと見なすことができる。本ケーススタディで考慮した保障措置アプローチでは、既存の保障措置クライテリアの幾つかを出発点として使用する⁸。パスウェイ解析がターゲットの特定の転用や不正使用について実施される場合には、保障措置タイプとそれらの検知能力に関する仮定を記録した上でこれらの情報を使用し、詳細設計に対する機能要件を定める。

ESFR NES の場合、物質の防護、管理及び計量は物質収支区域 (MBA) の範囲内で処理されることになる。ESFR システムのため以下の MBA が定義された (図 3.1 参照)。

- XE01～XE04 は ESFR 1～4 を収容する。したがって、炉心 1～4 とそれに関連する原子炉容器内貯蔵バスケットを含む。
- XE05 はサービス建屋内の ESFR 区域を含む。これには洗浄ステーション及び関連の区域が含まれる。
- XE06 は ESFR 新燃料集合体と ESFR 使用済燃料集合体の両方を貯蔵するために使用されるセルとピットを含む。
- XE07 は ESFR FCF を含む。この MBA は最終的には今後の研究のために小さい複数の MBA に分割されることになるが、サイトのこの部分は以前のデモスタディ時に幅広く調査されているので、本ケーススタディでは核燃料サイクル施設を単一の MBA をもつブラックボックスとして扱った。
- XE08 は余剰ウラン貯蔵施設を含み、FCF から回収された余剰ウランは払い出し時までここに保管される。
- XE09 は LWR 使用済燃料貯蔵を含む。これはプールと仮定される。
- XE10 は LWR 使用済燃料貯蔵プール外の LWR 使用済燃料容器／キャスク貯蔵区域を含む。

廃棄物は保障措置下ないと仮定されるので、MBA は廃棄物貯蔵と関連付けされていないことに注意されたい。したがって、廃棄物貯蔵は図 3.1 には示されていない。なお、図 3.1 には枢要測定点 (KMP) が示され、これは在庫測定点 (赤色表示) とフロー測定点 (黄色表示) に分割される。測定と検知器のタイプも示されている。

各 MBA では、核物質の計量、封じ込め・監視 (C&S)、それと設計情報の検認が実施される。ESFR NES の場合、ほとんどの核物質は接近困難区域 (例えば、液体ナトリウム中に浸漬された炉内か不活性雰囲気等の建屋内)において遠隔で操作される。加えて、ESFR の (再加工された) 新燃料集合体の放射能レベルは遠隔操作や遮蔽されたキャスクでの輸送が必要なほど十分に高い。遠隔操作を用いるほぼ全ての在庫区域では検認のための実地の接近は不可能であり、モニタリングシステムは、これらの区域における物質のタイプ及び量を全てのシステム運転モード下で監視／記録された物質のフローから特定できるように設計されなければならない。

⁷ 第 IV 世代 NES は統合保障措置が実施されている国で展開されることになっているが、本ケーススタディでは従来型の保障措置アプローチを考慮した。

⁸ この論述には ESFR FCF に対する保障措置アプローチは含まれない。FCF に対する予備的保障措置アプローチは [3.3、3.4] に記載されている。

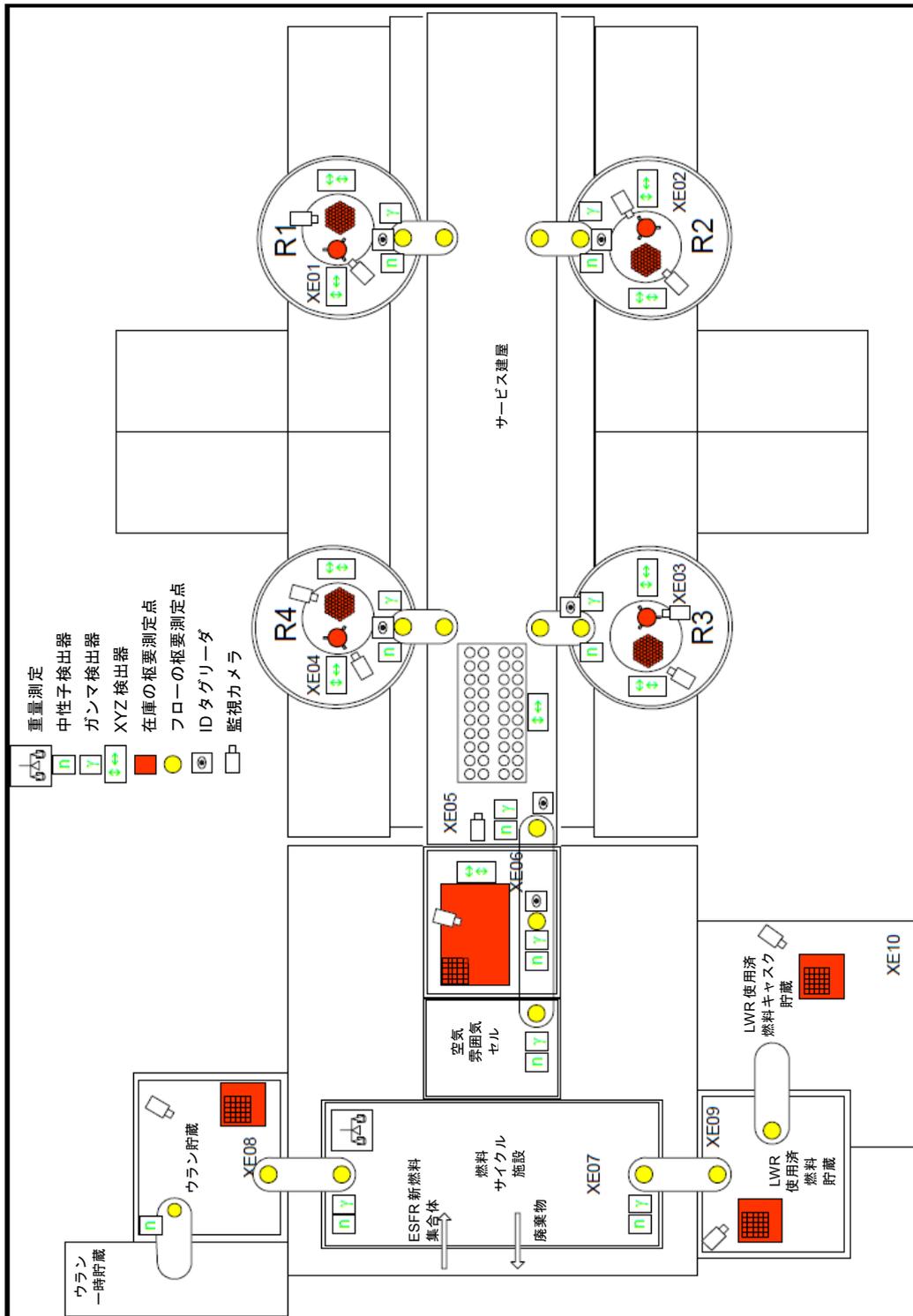


図 3.1 : ESFR 保障措置アプローチの概観

ナトリウム冷却高速炉に対する現在の保障措置慣行を踏まえて、以下の在庫検認活動が仮定された。

- 通常接近性区域には、一つの C/S(封じ込め/監視)システムが必要である。
 - LWR 使用済燃料集合体⁹に関して：
 - ・ C/S システムの評価
 - ・ 員数勘定
 - ESFR 新燃料集合体¹⁰に関して：
 - ・ C/S システムの評価
 - ・ 員数勘定
 - ・ シリアルナンバー識別による検認
 - ・ 10%の検知確率での大量欠損の非破壊分析（NDA）（大量欠損の定義は、参考文献 [3.2] を参照にこと）
 - ESFR 使用済燃料集合体に関して：
 - ・ C/S システムの評価
 - ・ 移送キャスクの員数勘定
- 低接近性区域には2つの異なる独立したモニタリングシステムを持つ二重 C/S システムが必要であり、予測される活動はこの二重 C/S システムの評価である。在庫は区域に搬入されたアイテムと区域から搬出されたアイテムの差によって算出される。
- 低接近性区域に出入りする物質及び設備については、移送に関する施設者の申告を確認する措置が講じられなければならない。こうした移送を検知・監視する様々な方法が利用可能であり、多重で多様な検知能力が提供されている。輸送中の物質は高い検知確率で大量欠損がないか検認される。この検認にはダミー燃料要素、新燃料要素及び使用済燃料要素を区別できる測定が含まれる。保守目的の設備の移送は、未申告物質が存在しないことを確認する査察を受ける。異常及び事故条件においては、知識の連続性を保存するため、移送設備を遮断し受動的に“ロックダウン”する方法が有益である。

こうした措置は、全ての通常運転モードに対して、またある程度の発生確率を伴う異常過渡変化に対して効果的に働かなければならない。異常な過渡変化の特定は、施設の安全解析で特定・解析で特定される過渡変化と一致しなければならない。

査察活動及び査察頻度に関して、WG は以下の仮定を行った。

- ・ 中間在庫検認については、3 ヶ月毎の査察を見込み、活動には帳簿検認、C/S システム検認及び員数勘定を含む¹¹。
- ・ 実在庫検認については、1 年毎の査察を見込み、上記の活動を伴う。
- ・ 設計情報検認については、1 年毎の査察を見込み、未申告の設計変更がないかチェックする。

⁹ LWR 使用済燃料集合体は通常の接近性区域に保持される唯一の集合体であり、他の全ての燃料集合体は接近困難な区域に保持される。

¹⁰ ESFR 新燃料及び使用済燃料集合体は通常の接近性区域に貯蔵されることは想定されていない。唯一貯蔵の可能性があるのは洗浄／一時貯蔵容器である。通常ルーチン運転時にこの容器内に貯蔵されることはないが、ESFR の炉心再構成時の使用済み燃料貯蔵ピット間での核物質移送のために、限られた数の収容箇所が設計されている。(訳者注: 詳細は付録 A.2.2.に記載)

¹¹ 一般に、統合保障措置アプローチでは、中間在庫検認のための査察の一部は無通告かつランダムである。

付録 B に ESFR 保障措置アプローチに関する追加情報を記す。

REFERENCES

- [3.1] IAEA, 1972, INFCIRC/153 (Corrected). The Structure and Content of Agreements between the Agency and States Required in Connection with the Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons, 1972. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- [3.2] IAEA, 2002, IAEA Safeguards Glossary 2001 Edition, International Nuclear Verification Series No. 3. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- [3.3] PR&PP Expert Group. 2007. PR&PP Evaluation Methodology Demonstration Study Interim Report. Submitted to the U.S. Department of Energy & Generation IV International Forum by Brookhaven National Laboratory, Upton, New York. January 31, 2007. BNL-PRPP-2006-001R1.
- [3.4] PR&PP Working Group Members & Other Contributors. 2008. “GIF Evaluation Methodology for Proliferation Resistance and Physical Protection of Generation IV Nuclear Energy Systems: Overview and Perspectives”, ESARDA Bulletin No. 39, Special Issue on Proliferation Resistance, October 2008, pp. 55-68.

4. 仮想的ナトリウム冷却高速炉に対する核物質防護アプローチの概説

核物質や情報の盗取には、高度な窃盗団、テロリスト、ならず者国家のエージェントといった非宿主国の主体による行為が関与する。電気化学的処理、さらには一部の湿式抽出プロセスなどの高度な技術を要するシステムに関する情報は機微であり、このような情報へのアクセスは盗取を防止するための管理が必要である。原子力施設はまた、核物質や設備への接近を制限し、核物質の盗取や設備への妨害破壊行為を防止する PP システムを有する。核物質、情報、及び設備の盗取に対するバリアとしては、物質自身（質量、体積及び放射線レベル）、エンコーディング（情報暗号化）及び設備（脆弱性）の内在的特性、物質／情報／設備の保管及び取扱場所（貯蔵庫、ホットセル、移送キャスク、設備室及びその他の管理された場所）の内在的特性、それと PP システムの設計に関連するものによって敵対者を検知し遅延させ無力化するとともにインサイダーの行為の影響を制御できる外在的措置（警報、動作センサ、武装保安部隊、出入管理システム、施錠及び封印）がある。

以下に掲げる 3 つの主要な戦略により、核物質の盗取又は放射性物質・放射線発生装置等に対する妨害破壊行為のリスクが低減される。

1. ローカルな脅威に対応するプラントサイト、物質の盗取を防止する物質の内在バリア、妨害破壊行為を防止する設備の内在的特性に対して、グローバルに一律なレベルの PP を（内在的特性と外在的措置を介して）実現する。
2. 設計を最適化して盗取／妨害破壊行為を阻止する物質の内在的バリアを増大させるとともに、低コストで同等の防護水準が達成されるように PP システム技術を向上させる。
3. 適切な PP を適用するリソースが将来見込めなくなる恐れのある分散化した場所での核物質の超長期間貯蔵を防止するため、使用済燃料の返還等、長期リスクが低減するようにグローバルなシステム構造を変更する。

本章で記述する ESFR PP アプローチで取り組むのは最初の 2 つの主要戦略だけである。付録 C に ESFR の核物質防護アプローチに関する追加情報を記述した。

4.1 盗取ターゲットに対する核物質防護アプローチ

本 ESFR ケーススタディは盗取ターゲットに焦点を当てた。本節では、PP 解析で想定された具体的な設計上の特徴について記述する。妨害破壊行為のターゲットも解析の初期段階で検討された。その結果は付録 D.4 に記載されている。

4.1.1 使用済燃料キャスク一時貯蔵区域

LWR 使用済燃料キャスク一時貯蔵区域は敵対者が最も接近しやすいが、そこに存在するのは最も魅力のない物質である。しかし、放射性物質・放射線発生装置等に対する妨害破壊行為も脅威であることから、このキャスク一時貯蔵区域は防護されなければならない。

検知には様々なタイプのセンサや目視観察が含まれるだろう。一時貯蔵区域（あるいは、詳細な物理的配置によっては ESFR 施設全体）は、PIDAS¹²、すなわち許可された職員だけの出入りを厳格にする出入管理を備えたフェンスと検知システムで囲まれる。このシス

¹² Perimeter Intrusion Detection and Assessment System （周辺侵入検知評価システム）

テムには三次元空間の要素も含まれる。つまり、敵対者が接近する場合、検知装置及び潜在的にはバリケードが地上及び地下を鉛直に移動する必要がある。車両での接近が最も可能な区域は重厚な鋼製フェンスで囲まれるだろう。出入地点の路上にはコンクリート又は鋼製の昇降可能なバリケードが設けられる。加えて、キャスク自体も、完全に密閉され厳重保管されると、核物質への接近に対するバリアとなる。

4.1.2 使用済燃料貯蔵区域及びサービス建屋内一時貯蔵／洗浄区域

ESFR 使用済燃料貯蔵区域及び一時貯蔵／洗浄区域は二番目に魅力度の大きい物質ターゲットを含む。ここでキャスクから取り出される集合体は、敵対者にとってより接近しやすい。

これらの区域はPIDAS 対象である。追加の検知装置を使用済燃料貯蔵区域及び一時貯蔵区域への出入扉及び設備ポートに設けることができる。部屋の中を観察するカメラとセンサが設けられる。集合体クレーンは不使用时にロックされるか使用不能となるように設計される。車両及び設備の点検開口部で集合体を取り出すのに十分な大きさがあるものには、金庫状(vault-type)の扉が設けられる。施設の壁及び屋根は強化される。平坦屋根に対して傾斜屋根が使用されるか、もしくは屋上に航空機の接近を防止するバリアが設けられる。

4.1.3 核燃料サイクル施設 (FCF)

FCF は使用済燃料の再処理と新燃料の加工が行われる大型のホットセル施設である。空気雰囲気ホットセルと不活性雰囲気ホットセルがある。金属製品鑄塊と新燃料要素は核分裂生成物が大部分除去されるため、最も魅力度の大きい盗取ターゲットとなる。

FCF は次のような多重の PP 特性を含んでいる。

- ・ 荷役設備（クレーン、ホイスト）は不使用时に使用不能となるかロックされる設計である。
- ・ マニピュレータ装置は取り外しの難しい留め具で取り付けられる。マニピュレータはペア構成で分割して製作が可能であり、盗取にはセル壁の開口サイズが小さすぎて利用できないようにする。不使用时にはロックが可能であり、使用時にはアクセスコントロールが可能である。
- ・ 設備点検口は可能な限り最小のサイズにされる。ただし、少なくとも1つはセル内装置の受け入れに十分な大きさでなければならない。その大きい設備点検口はクレーンによる可動式ハッチで閉じられるか、金庫状の扉を備える。
- ・ 全ての大きな点検口に検知センサが設置される。
- ・ 油入窓が使用される。これはセル壁に比べて貫通耐性が小さいので、遅延時間を増すために強化されなければならない。
- ・ ホットセルの壁、床及び天井は、通常、遮蔽目的の厚い鉄筋コンクリートである。建設時には、その金庫状の効果を高め、壁、床及び天井を強化するために比較的小さい間隔で追加的な補強がなされる。
- ・ 検知センサがセル周囲の区域内、セル内、さらには壁内に設置される。
- ・ 換気及び HEPA¹³フィルタを用いた空気清浄システムのうちコンクリート内に入っていない部分が強化される。換気開口部のサイズを小さくするか、アクセス防止のバリアを設置する。アクセスバリアには検知器が追加される。

¹³ High Efficiency Particulate Air

REFERENCES

- [4.1] International Atomic Energy Agency (IAEA). 1999. The Physical Protection of Nuclear Materials and Nuclear Facilities. INFCIRC/225/Rev. 4 (Corrected), IAEA, Vienna.
- [4.2] International Atomic Energy Agency (IAEA). 1980. The Convention on the Physical Protection of Nuclear Material. INFCIRC/274/Rev.1, IAEA, Vienna.

5. 検討された脅威

脅威の定義は PR&PP 評価手法の基本的かつ中心的要素であることから、WG は、ESFR に対する全 PR&PP 脅威空間の比較的大きな部分がカバーされるよう、代表的脅威を選択し、本ケーススタディで解析を行った（第 6 章）。本章では、PR&PP 脅威空間についてレビューするとともに、代表的脅威の定義を選択する上での基礎について論じる。

脅威は主体のタイプ、能力、目的及び戦略によって分類することができる [5.1]。詳細な脅威空間の定義では、これらの各要素を明確にして考慮しなければならない。

PR&PP 脅威空間は、特定の脅威の防御に使用される一般的なアプローチとツールに基づいて分割すると分かりやすい。例えば、専門家コミュニティは、PP 措置によって管理される盗取及び妨害破壊行為の脅威と、主体が施設及び物質を物理的に管理しているホスト国である場合の転用及び不正使用の脅威は別個に扱われるべきであるとする、大きなコンセンサスを有している。敵対者も防御者も、2 つのケース、すなわちホスト国の場合と非国家的主体の場合では劇的に異なり、これはそれらの能力、戦略、行為についても同様である。したがって、本ケーススタディは、代表的な PP 脅威と PR 脅威の両方を扱う。

PR 脅威の場合、ホスト国の核拡散に対する防御に使用される重要なツールの一部は制度的な措置であり、これには (1) 保障措置を申告施設及び核物質に適用する IAEA の能力、(2) 秘密の製造施設で使用されるおそれのあるデュアルユース設備の移転を検知・管理できる輸出管理体制、それと (3) 各国が核不拡散条約 (NPT) の枠内に留まるためのインセンティブを創出する国際的な二国間及び多国間安全保障体制やその他の措置がある。この 3 つのツールは、PR 脅威空間に関して下記の 3 つの代表的なカテゴリーを作成する基礎となる。

1. 申告施設からの秘密裏の核物質取得
2. 秘密施設での秘密裏の核物質生産
3. ブレイクアウトした上での申告物質及び施設の公然不正使用

本ケーススタディでは、3 つの代表的 PR 脅威を第 1 と第 3 のカテゴリーから取り出し、本報告書の 6.1 節、6.2 節及び 6.3 節で検討した。この 3 つのカテゴリーの場合、ホスト国（拡散者）の想定目標は少なくとも 1 個の核兵器を組み立てるために必要な、少なくとも 1 有意量 (SQ) のプルトニウムを入手することである。ホスト国の想定能力は典型的な先進工業国のそれである。ホスト国の 3 つの異なる戦略を想定し、6.1 節（核物質の秘密裏転用）、6.2 節（施設の秘密裏不正使用）、6.3 節（ブレイクアウトした上での施設からの公然転用及び施設の公然不正使用）で別々に検討する。表 5.1 にホスト国の想定脅威についてまとめる。

表 5.1：想定したホスト国（拡散者）の能力及び目標

特性	説明
能力	
技術的スキル	高度であり、全ての関連科学技術分野に強力なノウハウを有する
リソース	全く制限がないほど十分に豊富
ウラン及びトリウム資源	存在しない
産業能力	先進工業国
原子力技術力	先進的ナトリウム冷却高速炉の運転により電力を生産しており、次世代バックエンドソリューションを有する
目標	
核兵器装置（NWD）の数	1
NWD の技術的達成度（収率及び信頼性 ¹⁴ ）	任意の収率；信頼性＞50%
備蓄能力	短期備蓄（約 10 年）に十分
供給可能性	最新の多機能ジェット戦闘機に相当
生産速度	該当せず。1 個の装置だけを計画

PP 脅威の定義は 2 つの要素から成る。すなわち、主体に関する記述（タイプ、目的及び能力）と主体の戦略に関する記述である。脅威空間は主体と戦略の適切な範囲の組み合わせを考慮して定義される。PP 脅威の場合、最も単純で大きな区分は、敵対者の目的が物質又は情報を持ち出すことである場合の盗取と、敵対者の目的が損害又は放射性物質・放射線放出を引き起こすことである場合の妨害破壊行為（又はテロ）に分けられる。

本研究では、代表的な脅威である核物質の盗取（6.4 節）と原子力施設システム要素への妨害破壊行為（付録 D.4）が検討された。我々は次のような具体的な盗取の脅威を定義している。

主体のタイプ：軍事訓練を受けた攻撃部隊

主体の能力：

- ・ **知識**—プラントの配置及び PP 基本設計の知識、ターゲット機会を把握するのに十分なプラントプロセスの知識
- ・ **スキル**—バリアを突破する攻撃装置の設計能力、攻撃兵器の使用訓練
- ・ **兵器及びツール**—攻撃兵器、特殊爆発物、武装車両
- ・ **主体の人数**—アウトサイダー 12 人とインサイダー 1 人
- ・ **献身**—軍事目標優先

目標—ISQ の核兵器物質を入手するのに十分な量のアイテムを ESFR 施設から盗取すること

戦略—核物質貯蔵区域を目指した ESFR 施設に対する急襲攻撃

ケーススタディの一義的なゴールは PR&PP 評価手法がどの程度施設設計者にとって価値あるものになり得るかを示すことであるので、施設固有の設計への影響に焦点を当てるとともに、異なる設計オプションがどのように当該のパスウェイ、結果及び関連指標に影響

¹⁴ 所期収率の達成は物質の性質よりも敵対者の能力に大きく左右されると思われる。信頼性は核分裂性物質の自発核分裂によって引き起こされる早期爆発の確率に関連づけられる。

するか検討する。

以下の節では代表的な脅威カテゴリーについてそれぞれより詳細に論じる。

5.1 申告施設からの核物質の秘密裏取得

ケーススタディでは2つの秘密裏取得の脅威を考慮する。申告施設からの秘密裏取得は、IAEA に申告されていて IAEA の保障措置下にある施設からの核物質の転用（6.1 節）か、その施設での核物質の未申告生産（6.2 節）のいずれかを含む。未申告活動を通して成功裏に転用又は生産される核物質は、一般に、秘密施設において金属転換され核爆発装置に加工されると想定される。その処理が化学分離と金属への還元だけの場合には、ホスト国は通例それに必要な、小規模、低処理能力の秘密化学分離施設を建設する能力が十分あると想定される。そのような小規模施設の検知は困難となり得るが、NPT 追加議定書[5.2]の締約国に対しては、IAEA は未申告活動を検知するために追加的手段を有している。

逆に、濃縮を必要とする物質（例えば、低濃縮ウラン [LEU]）については、小規模、低処理能力の秘密濃縮施設を建設できる国家は、LEU 転用の検知リスクを冒すよりも、未申告の天然ウラン濃縮を選択可能だろう。

NPT の下にある非核兵器国における申告施設からの核物質の秘密裏取得リスクを最小化する最も重要な戦略は、IAEA 保障措置モニタリングを効果的に適用することである。IAEA 保障措置の目的は、有意量の核物質が平和的な原子力活動から転用されることを適時に検知すること、及び早期検知のリスクによってそうした転用を抑止することである。設計情報検認、核物質計量及び C/S の組み合わせを使用する効果的な保障措置モニタリングの実施は、主として施設のタイプ及び施設の設計によって確保される。物質の計量及び C/S の有効性と効率を向上させる研究開発が保障措置の検知能力を向上する上で重要な役割を果たすことになる。さらに、物質の計量、管理及び C/S を促進する建屋の設計も PP、安全性及び信頼性において利益をもたらす。

5.2 秘密施設における核物質の秘密裏生産

秘密施設における核物質の秘密裏生産は、秘密施設におけるウランの濃縮か、秘密原子炉でのウラン照射とそれに続く秘密再処理施設でのプルトニウム分離のいずれかを伴う。この脅威については本 ESFR ケーススタディでは検討されなかった。これらの拡散パスウェイは申告されている原子力インフラの直接的な不正使用を含まないが、申告されている計画の存在によって、秘密施設のための設備や技術の取得は助長されるかもしれない。これとは逆に、当該国が包括的保障措置協定（NPT に関連して要求される協定）の議定書に署名して発効させる場合、更には当該国が原子力エネルギー生成の経済規模に見合った透明性を確保して原子力インフラを運転し、追加議定書に基づく義務を満たすことに前向きである場合には、秘密施設の検知確率は増加する。

5.3 ブレイクアウトした上での申告物質及び施設の公然不正使用

ブレイクアウトは、公然と申告施設から物質を持ち出すか、申告施設を不正使用する行為を伴う。ブレイクアウトの脅威は本ケーススタディで解析されている（6.3 節）。ブレイクアウトは必然的に IAEA 保障措置の終了を伴うため、この行為は保障措置によって検知されない。原理上、民生用原子力インフラを保有するいずれの非核兵器国もブレイクアウトする能力を理論上有している。一般に、ブレイクアウトを選択する国は核爆発装置の迅速な取得を重視していると予測される。したがって、ブレイクアウトの観点から最も機微

な物質及び施設は、最も迅速で技術的に失敗することなく取得を可能にするものである。

5.4 核物質又は情報の盗取

核物質又は情報の盗取は非宿主国の主体による行為を含む。この主体は犯罪集団やテロ集団、あるいはならず者国家のエージェントであり、インサイダーから支援されることがある。盗取の二番目の潜在的ターゲットは、濃縮用遠心分離器等の技術的に困難なシステムに関する情報である。この種の情報は機微であり、それへの接近は出入管理を通して制限されなければならない。本ケーススタディは物質盗取脅威の解析を含んでいる（6.4節）。原子力施設はまた、核物質への接近を制限しその盗取を防止する PP システムを有する。内在的特性と外在的措置の両方が物質の防護には必要である。なぜなら、外在的 PP 措置がないと、全ての物質はテロ集団による盗取に対して脆弱になるからである。物質の防護、管理及び計量に係る PP システムの設計は、国際保障措置の効果的实施、安全性及び信頼性に係る設計と大きく重複するものである。

5.5 原子力施設又は輸送における放射性物質・放射線発生装置等に対する妨害破壊行為

放射性物質・放射線発生装置等に対する妨害破壊行為はインサイダーから支援される 1 人以上のテロリストによる行為を含む。本ケーススタディでは放射性物質・放射線発生装置等に対する妨害破壊行為の脅威に関する以前の解析 [5.3] を簡潔にまとめている（6.4節）。放射性物質・放射線発生装置等に対する妨害破壊行為に抵抗する施設及び輸送システムの設計は安全設計と密接に関係している。原子力施設はターゲットとなる設備群への接近を制限する PP システムを有しているが、それが無力化されると結果的に放射性物質・放射線放出を招く可能性がある。

REFERENCES

- [5.1] PR&PP Expert Group. 2006. Evaluation Methodology for Proliferation Resistance and Physical Protection of Generation IV Nuclear Energy Systems. GIF/PRPPWG/2006/005, U.S. Department of Energy & Generation IV International Forum, Washington, D.C.
- [5.2] International Atomic Energy Agency (IAEA). 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.
- [5.3] PR&PP Expert Group. 2005. PR&PP Evaluation Methodology Development Study, Insights Report. ANL-AFCI-140, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois.

6. 代表的パスウェイの特定と解析

本ケーススタディは、ESFR に対する全 PR&PP 脅威空間の比較的大きな部分がカバーされるように選定された次の 4 組の代表的パスウェイを特定し解析している。

- ・ 物質の秘密裏の転用
- ・ 施設の秘密裏の不正使用
- ・ ブレイクアウトした上での物質転用及び施設の公然不正使用
- ・ 核物質の盗取及び原子力システム要素への妨害破壊行為

以下の各節は、ターゲット特定の結果と検討された脅威戦略をまとめるとともに、検討されたものの中から選択されたパスウェイの解析について論じ、その上で今後の研究への洞察を提供する。付録 D に各脅威空間に関する詳細な結果を与えてある。

6.1 転用

転用解析は、元來定性的で粗い(high-level)ものであるが、適用範囲の全てを網羅するよう試みた。ESFR の設計や運転特性、ターゲットの性質、それに保障措置に関する更なる詳細作成に伴い、新たなもしくは修正されたパスウェイセグメントが特定されていくだろう。

6.1.1 転用ターゲットの特定

ESFR に関する転用ターゲットの特定は、図 2.1 に示すように、ESFR を解析のためのシステム要素に分割することから始まる。NES のうち幾つかの要素は本ケーススタディの範囲を超えている。特に、ウランの採鉱・分離施設及び ESFR の“フェンス内”部分への供給に必要な LWR 燃料ソースは本研究では解析されない。また、回収ウランも検討範囲外である。図 3.1 は、ESFR に提案される保障措置の MBA 及び枢要測定点 (KMP) を示す。

システム要素のレビューにより各 MBA におけるターゲットを探る。本ケーススタディのターゲット解析では各システム要素における様々なタイプの核物質、場所及び配置を検討している。4 基の原子炉内（例えば、原子炉容器内貯蔵バスケットは原子炉運転中に(可能性は低いものの)接近可能^{*})、サービス建屋内、ESFR 新燃料及び使用済燃料貯蔵セル内に転用ターゲットが特定されたが、SFR 燃料のサブアセンブリ¹⁵の秘密裏転用については確たるパスウェイは特定されなかった。全ての核物質はサブアセンブリ内に含まれており、秘密裏に転用するには、先ず FCF の中を、次いで余剰ウランシステム要素、LWR 使用済燃料システム要素又は廃棄物を通過して外に移動させなければならない。サブアセンブリ全体の転用は既存の保障措置システムで容易に検知されると想定されるので、サブアセンブリ転用の確たる物理的パスウェイは存在しないことが分かった。この重要な仮定は、保障措置システムの実施にとって重要であり、従って詳細設計の設計基礎に関する 1 つの機能要件が導かれる。表 6.1 に示すように、このターゲット解析で 7 つの明確なターゲットが特定された。

¹⁵ 歴史的に、ナトリウム冷却高速炉の燃料集合体は“サブアセンブリ”と呼ばれてきた。

*訳者注 Appendix B、p. B-10、1.20 に In-vessel storage basket への接近性について以下の記載:”The nuclear material contained inside this MBA(ESFR fresh and spent fuel) is considered to have a **low accessibility** when inside the primary tank, and normal when outside the primary tank.”。本検討では、低接近性ではあるものの、接近可能として運転中の原子炉容器内貯蔵バスケットのパスウェイ解析がなされている。

表 6.1：転用ターゲットの説明

ターゲットID	ターゲットの説明	ターゲット物質の性質
T1	LWR 燃料集合体のキャスク	照射済 U-235 及び TRU (酸化物)
T2	LWR 燃料集合体	照射済 U-235 及び TRU (酸化物)
T3	電解精製プロセスからの TRU 金属	TRU 金属 (プルトニウム 80%)
T4	電解精製クリーンアウトプロセスからの TRU 金属を含有する廃棄物	TRU 金属 (プルトニウム 80%)
T5	ESFR 新燃料サブアセンブリ	ジルコニウムとの U-TRU 合金燃料
T6	ESFR 使用済燃料サブアセンブリ	ジルコニウムとの照射済 U-TRU 合金燃料
T7	回収されたウラン金属	回収ウラン

6.1.2 転用パスウェイ解析

転用解析は次のステップで進められる。

- ・ あらゆる潜在的ターゲットを調べる。
- ・ ターゲットの物質タイプを評価する。
- ・ 物質の持ち出しに使用され得る物理的メカニズムを特定する。
- ・ 持ち出しに対する物理的バリア及び設計によるバリアを特定する。
- ・ 物質の持ち出しに使用され得る物理的メカニズムを検知する保障措置制度及び保障措置アプローチを特定する。
- ・ 保障措置を無効にする方法を仮定する。
- ・ 各ターゲット持ち出しの定性的パスウェイをレイアウトする。
- ・ 各転用パスウェイに関して指標の大まかな定性的評価を実施する。

このプロセスの最初の結果は表 6.2 に示す転用パスウェイセグメントのリストである。PR&PP 評価手法に記述されているように、核兵器の拡散には次の 3 つの段階がある。

取得(Acquisition)→処理(Processing)→加工(Fabrication)

解析の最初のステップでは第 1 段階の取得についてのみ調べる。本節の焦点は、どのようにしたらターゲットをその通常位置から持ち出すことができるかである。

表 6.2 : 初期の転用パスウェイ解析 (1/2)

ターゲット ID	ターゲットの説明	転用地点	潜在的戦略	拡散者の行為 (助力者)	パスウェイ ID	パスウェイの記述
T1	LWR 燃料集合体キャスク	XE-10-1	3. 一括転用	大型トラックとトレーラでキャスクを移動する。カメラを機能喪失させる又は使用不能にする。在庫測定記録を不正操作する。	T1-XE-10-1	LWR 使用済燃料集合体キャスクは LWR キャスク一時貯蔵区域内にある。カメラを不正操作する。拡散者はキャスクを搬出し、秘密の処理施設に運搬する。枢要測定点 (KMP) を不正管理する。
		XE-09-1 XE-10-1	3. 一括転用	空のキャスクではなく集合体が装荷されたキャスクを送り返す。大型トラックとトレーラでキャスクを移動する。カメラの機能を喪失させる又は使用不能にする。在庫測定記録を不正操作する。	T1-XE-09-1	空のキャスクではなく LWR 使用済燃料を満載したキャスクを送り返す。カメラを不正操作する。拡散者はキャスクを搬出し秘密の処理施設に運搬する。KMP 及び移送測定点 (TMP) を不正管理する。
T2	LWR 燃料集合体	XE-09-1 XE-10-1	1. 少量分割転用	キャスクに挿入されている燃料集合体。大型トラックとトレーラでキャスクを移動する。在庫測定記録を不正操作する。	T2-XE-09-1a	LWR 使用済燃料施設の空のキャスクに集合体を一部再装荷して送り返す。カメラを不正操作する必要はないかもしれない。拡散者はキャスクを搬出し、秘密の処理施設に運搬する。KMP 及び移送測定点 (TMP) を不正管理する。
		XE-10-1	1. 少量分割転用	キャスクに残されている燃料集合体。大型トラックとトレーラでキャスクを移動する。在庫測定記録を不正操作する。	T2-XE-10-2	LWR 使用済燃料施設のキャスクから燃料集合体が完全には取り出されていない。カメラを不正操作する必要はないかもしれない。拡散者はキャスクを持ち出し秘密の処理施設に運搬する。KMP 及び移送測定点 (TMP) を不正管理する。
	LWR 燃料集合体	XE-09-1	1. 少量分割転用	特殊なコンテナで燃料集合体を隠蔽・移動する。カメラを機能喪失させる又は使用不能にする。在庫測定記録を不正操作する。	T2-XE-09-1b	XE-07 用の燃料集合体を拡散者自身の輸送コンテナに入れて XE09 から持ち出す。カメラを不正操作する。拡散者はコンテナを搬出し、秘密の処理施設に運搬する。枢要測定点 (KMP) を不正管理する。

表 6.2 : 初期の転用パスウェイ解析(2/2)

ターゲット ID	ターゲットの説明	転用地点	潜在的戦略	拡散者の行為 (助力者)	パスウェイ ID	パスウェイの記述
T3	電解精製プロセスからの TRU 金属	XE-07-01	1. 少量分割転用 (一括か?)	TRU 金属を金属廃棄物容器に入れる。中性子/ガンマ検知器 (これらが存在する場合) を機能喪失させる又は使用不能にする。カメラ、物質記録計を機能喪失させる。	T3-XE-07-1	拡散者は TRU 物質を廃棄物容器に入れ、廃棄物ゲートを通して外部に搬出する。中性子/ガンマ検知器 (これらが存在する場合) と監視カメラを不正操作する。物質記録を不正操作する。
		XE-07-02	1. 少量分割転用 (一括か?)	TRU 金属を燃料集合体部材容器に入れる。中性子/ガンマ検知器 (これらが存在する場合) を機能喪失させる又は使用不能にする。カメラ、物質記録計を機能喪失させる。	T3-XE-07-02	拡散者は TRU 物質を新しい燃料集合体部材容器に入れ、集合体部材ゲートを通して外部に搬出する。中性子/ガンマ検知器 (これらが存在する場合) 及び監視カメラを不正操作する。物質記録 (監査等) を不正操作する。
		XE-07-03 XE-08-01	1. 少量分割転用 (一括か?)	TRU 金属を回収ウラン容器に入れる。金属を XE08 MBA に移動した後で MBA から搬出する。中性子/ガンマ検知器 (これらが存在する場合) を機能喪失させる又は使用不能にする。カメラ、物質記録計を機能喪失させる。	T3-XE-07-03	拡散者は TRU 物質を回収ウラン容器に入れ、回収ウランゲート通って外部に搬出する。XE07/08 間の移送経路にある中性子/ガンマ検知器 (これらが存在する場合) 及び監視カメラを不正操作する。金属を後で MBA-8 から持ち出す。物質記録 (監査等) を不正操作する。移送最終時に中性子検知器を不正操作する。
T4	電解精製プロセスからの TRU 金属を含む廃棄物	XE-07-01	1. 少量分割転用 (一括か?) 4. 少量分割不正使用及び転用の組み合わせ	拡散者は廃棄物容器を受け取り、設定・管理されている廃棄物貯蔵場所に送らない。	T4-XE-07-1	拡散者は TRU を廃棄物容器から収集し、秘密の施設に搬出する。不正使用の可能性: 電解精製装置を改造して廃棄物の TRU 含有量を増大させるかもしれない (不正使用シナリオ)。
T5	ESFR 新燃料サブアセンブリ	秘密裏転用発生の信憑性なし				
T6	ESFR 使用済燃料サブアセンブリ	秘密裏転用発生の信憑性なし				
T7	回収ウラン	XE-80-01	少量分割転用	拡散者は回収ウランを処理するために秘密の濃縮施設に輸送する。	T7-XE-08-1	拡散者は秘密の濃縮施設を建設し、回収ウランを施設に輸送して濃縮する。不正使用の可能性: 拡散者は電解精製装置を操作し、規定のものより“クリーンな”ウランを生産するかもしれない。

この解析の最終ステップは、表 6.3 に 2 つの代表的転用パスウェイについて示すように、パスウェイに関する PR 指標（1.2 節で定義）を評価することである。

表 6.3 : 代表的転用パスウェイに関する指標評価

	T3-XE-07-02			T3-XE-07-03		
	評価値	取得	処理	評価値	取得	処理
			拡散者は TRU 物質を新しい燃料集合体部材容器に入れ、集合体部材ゲートを通してこれを外部に搬出する。中性子/ガンマ検知器（これらが存在する場合）及び監視カメラを不正操作する。物質記録（監査等）を不正操作する。			拡散者は TRU 物質を回収ウラン容器に入れ、回収ウランゲート通って外部に搬出する。XE07/08 間の移送部において中性子/ガンマ検知器（これらが存在する場合）及び監視カメラを不正操作する。金属を後で MBA-8 から持ち出す。物質記録（監査等）を不正操作する。最終移動中に中性子検知器を不正操作する。
核拡散の技術的困難性	低い	新しい燃料集合体容器内の TRU 金属	大半の処理は行われており、仕上げ用の化学処理能力のあるホットセルを要する。	低い	回収ウラン容器内の TRU 金属	大半の処理は行われており、仕上げ用の化学処理能力のあるホットセルを要する。
拡散コスト	非常に低い	特殊な設備をほとんどあるいは全く必要としないが、何らかの中性子線遮蔽が使用されるかもしれない。	TRU 処理のために非常に小規模の施設を要する。	非常に低い	特殊な設備をほとんどあるいは全く必要としないが、何らかの中性子線遮蔽が使用されるかもしれない。	TRU 処理のために非常に小規模の施設を要する。
拡散時間	中程度	取り出される TRU の量及び燃料集合体容器に入れられる頻度に依存。	秘密の再処理施設建設には多くの時間を要しないかもしれない。	中程度	取り出される TRU の量及び燃料集合体容器に入れられる頻度に依存。	再処理施設建設には多くの時間を要しないかもしれない。
検知確率	中程度	集合体容器内の TRU は検知されずに移送できるかもしれない。	処理施設の検知確率は考慮されない。	高い	回収ウラン容器内の TRU は検知されずに移送できるかもしれないが、2 つの MBA を通過しなければならない。	処理施設の検知確率は考慮されない。
核分裂性物質のタイプ	中程度	TRU は既に処理されクリーンアップされている。	兵器に利用可能であるが最適ではない。	中程度	TRU は既に処理されクリーンアップされている。	兵器に利用可能であるが最適ではない。
検知ソースの効率	高い	これは複数炉施設の一部であり、大規模な保障措置を有するであろう。	これは国際的なインテリジェンス・コミュニティのコストに関係するものであり判定するのは難しい。	高い	これは複数炉施設の一部であり、大規模な保障措置を有するであろう。	これは国際的なインテリジェンス・コミュニティのコストに関係するものであり判定するのは難しい。

この結果により、ターゲットのタイプ、転用が開始されるシステム要素（転用は 2 つ以上の区域で行われうることに注意）、及び固有のパスウェイ番号が特定される。

6.1.3 転用に対する設計バリエーションの評価

原子炉の設計及び運転バリエーションの影響を評価するため、WG は、2.3 節及び付録 A の表 A.3 に詳細に示されているように一連の高速炉設計バリエーションを設定した。これらのバリエーションでは、とりわけ下記を変化させた。

- ・ 照射サイクル継続時間
- ・ 集合体数（炉心／ブランケット）
- ・ バッチ数（炉心／内部／半径方向）
- ・ 滞留時間、日数（炉心／内部／半径方向）
- ・ 集合体当たりのピン数（炉心／内部／半径方向）
- ・ 集合体当たりの構造ピン数
- ・ 平均 TRU 富化度、%
- ・ 核分裂性物質／TRU 転換比

表 6.2 で特定された大まかなパスウェイについて、これらのバリエーションが転用に及ぼす影響を判別するため、レビューを行った。不正使用シナリオは様々な形で影響を受ける可能性があるが、転用パスウェイに大きな変化は特定できなかった¹⁶。ただし、転用される TRU の同位体組成にはある程度の変化の可能性がある。特に、増殖炉の構成では兵器級プルトニウムが径方向ブランケットに含まれる。ただし、ブランケットはドライバー燃料と一緒に再処理されることが仮定されるので、FCF において電解精製以降に兵器級プルトニウムの転用ターゲットは存在しない。解体及びせん断システムに関して、兵器級プルトニウムターゲットの転用可能性が不正使用に関する節（6.2 節）で解析されており、ここでは触れない。

6.1.4 転用解析から得られた今後の研究に対する洞察

この解析は大まかな定性的レベルで実施されているが、より詳細な解析をすれば、より大きな検知回避の機会あるいは持ち出しの新たな物理的メカニズムを示す具体的なパスウェイセグメントを特定できる可能性がある。

指標は、各パスウェイセグメント（すなわち取得及び処理）について決定されるべきであり、特定の評価値を得るためにひとまとめにすべきではない。あるパスウェイに沿って指標を集計すると、拡散戦略全体に影響する具体的な脆弱さへの重要な洞察が覆い隠されることがあることに注意されたい。例えば、様々なパスウェイの取得フェーズにおいて、拡散コスト、技術的困難性及び拡散時間の差違は、処理フェーズにおける関連評価値によって目立たなくなることが多い。

保障措置に関する追加的な設計、配置及び運用データは、指標の解析及び評価を可能にし、仮定数の減少に役立つだろう。例えば、保守や修理の実施慣行はターゲット物質への接近に影響を及ぼし得るので、これらの慣行に関するより詳細な情報が貴重であろう。

¹⁶ 既に述べたように、まるまる 1 体のサブアセンブリの秘密裏転用については確たるパスウェイがないことが特定されている。

6.2 不正使用

不正使用の脅威は、ESFR NES の基準設計と 2 つの設計バリエーション (DV0 及び DV1) の 3 つの異なるシナリオの下で解析された。不正使用は起こり得る複数のパスウェイに対応し得ることから、代表的なパスウェイを詳細な解析のために選定した。本評価手法により、設計バリエーションによるシステムパフォーマンスの相異を特定できることが証明され、また保障措置取り決めの改善で全体的な PR が向上すると思われる区域が特定された。

6.2.1 不正使用ターゲットの特定

NES を不正使用して兵器に利用可能な核分裂性物質を入手するのは複雑なプロセスを伴い、一般には単一の設備に対する単一の行為ではなくシステムの様々な資産の統合的利用を含む。ESFR NES は核燃料サイクルを一つのサイトに並置 (co-location) する。それゆえ、可能性のある核拡散ターゲットには、照射ターゲットの加工から核分裂性物質回収のための炉心照射までの幅がある。図 6.1 に主要な ESFR システム要素 (青色表示) 及び関連の不正使用ターゲット (緑色表示) を示す。

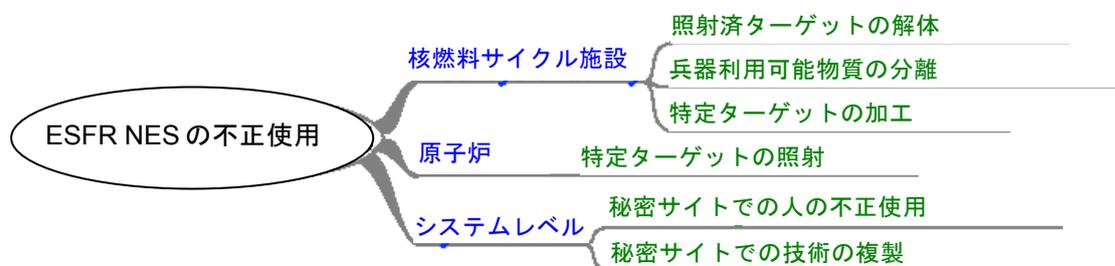


図 6.1 : 該当するシステム要素 (青色表示) 及び可能性のある関連の不正使用ターゲット (緑色表示)

ESFR NES の可能性ある全てのシステム要素とターゲットについて、本ケーススタディで使用された定性的スクリーニング¹⁷⁾の結論では、炉心での特定ターゲット¹⁸⁾の秘密裏照射の解析が本ケーススタディの目的及び ESFR NES の特性を最も良く反映している。

6.2.2 不正使用パスウェイ解析

この解析はプルトニウムの秘密裏生産に焦点を当てており、考慮された代表的なパスウェイは ESFR 炉心でのウランターゲットの秘密裏照射 (取得段階) とそれに続く秘密の再処理施設でのプルトニウム回収 (処理段階) である。このパスウェイでは、拡散者は 1) ウラン原料を取得し、2) ウランピンを加工し、3) ターゲットを組立て、4) ターゲットを原子炉で照射し、5) ターゲットを分解し、そして 6) プルトニウムを分離することが必要である。これらの各活動はさらに多くの要素活動に分割され、様々な方法で実施されるだろうが、拡散者の主要な決定を捉えるにはこの 6 つの主要な活動を考慮すれば十分である。図 6.2 は、この 6 つの活動を第 1 階層に示し、併せてこれらの活動を実施する多くの選択

¹⁷⁾ システム内の該当ターゲットを特定しスクリーニングする 2 つの適切なアプローチは、ハザード操作性 (HAZOP) 技法の適合に拠るか、あるいはエキスパート・ジャッジメント技法を正式に利用するものである。

¹⁸⁾ 「特定ターゲット」とは、未申告核分裂性物質を生産する目的で、例えば、照射後に未申告 Pu-239 を生産するために、通常の燃料ピンを U-238 ピンで、あるいは炉心のサブアセンブリ全体を U-238 だけを含む「ブランケット」のサブアセンブリで置き換える目的で、密かに炉心に持ち込まれる親物質をいう。

肢を第2階層、第3階層にそれぞれ緑色、赤色で表示している¹⁹。

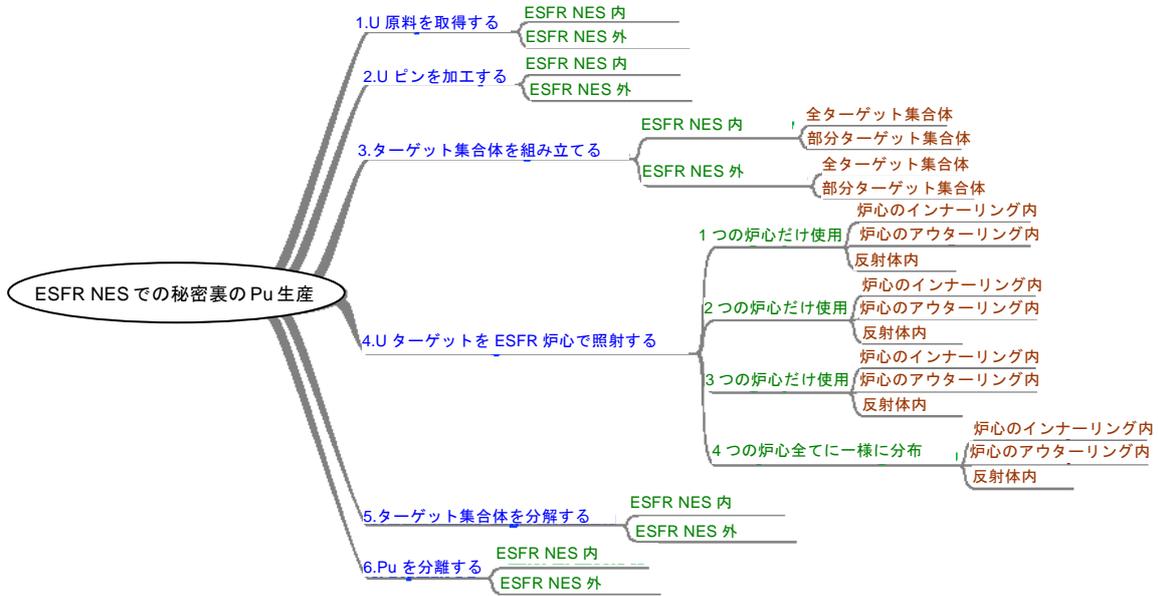


図 6.2 : パスウェイ特定における秘密裏のプルトニウム生産

これらの選択肢のありとあらゆる組み合わせから 5184 もの異なるパスウェイが生じる。これは定性的タイプとはいえ詳細な解析には余りにも多すぎるパスウェイ数である。少なくとも原理的には、これら全てのパスウェイを機械的に生成してから何らかの基準を用いてランク付けを行い、その後の解析のために減じられるパスウェイ数を特定することは可能である。最善のランク付け基準はパスウェイの不検知確率であろう。なぜなら、各パスウェイの全体的な不検知確率は算出が可能であり、様々なセグメントの全てにおいて合理的に推定できれば単純にそれらの不検知確率の積となるからである。

また、潜在的パスウェイについては、図 6.2 の第2及び第3階層に示されている可能性のある選択肢を考慮して定性的にスクリーニングすることができる。不正使用の脅威を解析した WG は、この定性的スクリーニングのオプションを採用し、その上で（拡散者の観点から）実行可能で且つ（本 PR&PP 評価手法の観点から）十分にチャレンジングであると思われる1つの代表的パスウェイを選定した。このパスウェイを選定するために次のような仮定が行われた。

- a) 施設内の全ての移送／移動は、通常運転の影響を最小化するために且つ検知の可能性を最小化するために、標準の手順及び日程に従う。照射期間は12ヶ月とする。
- b) 拡散者は ESFR への核物質の搬入及び照射後の物質の搬出のために既存の開口部（例えば保守用出入口）を使用する。
- c) ウランピンは、保障措置区域で実施される活動を最小化するために且つ検知の可能性を最小化するために、ESFR サイト外で加工される。

¹⁹イベントツリー（実際には全ての分枝が事象ではなく拡散者によって行われるべき選択を示しているのでディシジョンツリー）による表現は、選択肢間のつながりとそれらの依存関係を示すものである。ロジックツリー（このケースでは頂上事象が ESFR NES での Pu の秘密裏生産の成功であるので、サクセスツリー）による表現は、図 6.2 から、第1階層の全ての活動を AND 演算子で結びつけ、且つ、第2階層及び第3階層にそれぞれ緑色、赤色で示された可能性のある活動実施選択肢を OR 演算子で結びつけることにより簡単に導くことができる。相互排他性が考慮されるかもしれない。

- d) 物質は、炉心全体の中性子束レベルを変動させず安全上の問題や疑惑が起きないようにするため、炉心のアウトターリング内で照射される。
- e) ANL によって提供されたデータを踏まえると、1SQ の兵器級プルトニウムを 12 ヶ月の照射期間で入手するには 1400~3100 本のウランターゲットピンが必要である。保守的に低い方の値である 1400 本のピンをターゲットとする。放射線モニタの検知能力を最小化し、設計中性子束の外乱を避けるため、これらのピンは 10 体の集合体間に分布されると仮定された。
- f) ターゲット集合体は、同一炉心内における不審な移動数を最小化し且つ全ての原子炉の運転を同様に保つため、4 基の原子炉中に一様に分布される。

この結果として、代表的パスウェイは次のようになる。

1. ホスト国は外部から天然ウラン（または入手可能であれば劣化ウラン [DU]）を取得する。
2. ホスト国はターゲットウランピンを ESFR サイト外で準備する。
3. （ホスト国はターゲットピンを先ず ESFR サイト、それから FCF に持ち込む。）
4. ホスト国はウランターゲットピンと標準 ESFR 新燃料ピンで構成される ESFR の最終ターゲット燃料集合体を、FCF を使って組み立てる。
5. （ホスト国はターゲット集合体を FCF から原子炉容器内貯蔵バスケットへ移動する。）
6. （ホスト国は燃料交換時にターゲット集合体を原子炉 4 基の炉心アウトターリングに装荷する。）
7. ホスト国はターゲット集合体を炉心のアウトターリング内で 12 ヶ月間照射する。
8. （ホスト国は次の燃料交換時にターゲット集合体を炉心から原子炉容器内貯蔵バスケット内に取り出し、そこで燃料交換期間中冷却する。）
9. （ホスト国はターゲット集合体を原子炉容器内貯蔵バスケットから FCF へ移送する。）
10. ホスト国はターゲット集合体を分解してからターゲットピンを FCF で回収し、その後ターゲットピンを ESFR FCF から秘密の施設に輸送する。
11. ホスト国はプルトニウムをその秘密の施設で分離する。

セグメント 1、2、4、7、10 及び 11 は図 6.2 の第 1 階層に対応する。括弧内のセグメントは ESFR の通常活動（移送等）に対応する。

このパスウェイを解析するサブグループは、代表的パスウェイの PR 指標を評価するため、次のような定性的だが系統的で追跡可能なアプローチを採用した。

- ・ 各パスウェイセグメントに対する指標評価のための質問を作成する。
- ・ 各セグメントに対する PR 指標を本評価手法で提案される尺度²⁰に従い評価する。
- ・ 各セグメントに対する PR 評価項目を（定性的に、あるいは指標評価値を本評価手法で提案された区分(bin)に当てはめることにより）得る。
- ・ セグメント評価値を機械的に集計するのではなく、判断をしながらパスウェイ全体に対する各指標の評価値を集計する。

表 6.4 はサブグループが作成した質問の大半を示しているが、スペースの都合上、質問

²⁰ 指標を評価するひとつの方法は、専門家パネルを設置し、その判断を求め、その理論的根拠を文書化することである。

に対する回答は含まれていない。それらは付録 D の D2.5 節に報告されている。表 6.5 はリファレンスオプションのパスウェイセグメント全てに対する PR 評価項目を示す²¹。各セグメントを通して変わらないため、MT に関する質問（“処理ステップ終了時の MT は何か？”）と DE に関する質問（“セグメントをカバーするのにかかるコストはどれくらいか？”）は表 6.4 から省かれている。さらに、本評価手法のレポート改訂 5 版に従って、MT はパスウェイレベルで評価されるべきである。

ESFR 基準設計の定性解析は、1SQ の兵器級プルトニウムが 12 ヶ月の標準的照射期間内に秘密裏に生産される可能性があり得ることを浮き彫りにした。ただし、この企図には克服が難しい課題が伴う。TD を主導するのは特に FCF（セグメント 4 及び 10）において保障措置を破る難しさであり、また、PT を支配するのは標準的な運転日程で照射を行うかどうかの選択である。いずれの指標も、国際社会からの検知を最小化するあらゆる努力を払い、非公然戦略を選択することにより大きく影響を受ける。隠蔽手段はパスウェイの困難さのかなりの割合を占めるため、もし拡散者が NPT からの脱退を決定した場合には、PT は大きく短縮化され、また TD も影響を受けるであろう。考慮された保障措置アプローチのため、DP は、特にセグメント 4 及び 10 における FCF セグメントの DP 評価値の大きな不確実性によって支配される。これらの保障措置の適用はもっぱら監視カメラによって行われる。不確実性の源泉は必要な隠蔽行為（例えば、レンズ前面の不正変更）の有効性を評価することの難しさにある。考慮された保障措置アプローチでは、加工区域での組立段階の直後に、各集合体の n-γ線の測定が見込まれる。その“指紋”はその後、他の n-γ測定点で集合体を確認するリファレンスとして使用される。もし加工区域内のカメラが突破されると、指紋は既に改造された集合体で採られることになり、他の n-γ測定では集合体が純正品でないことを認識することはできないだろう。加えて、異なる集合体の指紋の“クロスチェック”は行われず、ある n-γ測定結果が他の測定点での測定結果の平均値から逸脱していることに気付く可能性が排除される。この事実はセグメント 5、6 及び 9 に割り当てられた検知確率が非常に低いことの原因を説明するものである。

この解析で明らかのように、想定された保障措置アプローチは、適用範囲及び堅牢性の観点から、特に、FCF 保守用出入口に対する管理を増強すること（セグメント 3）、放射線モニタを集合体加工区域に追加すること（セグメント 4）、様々な集合体について指紋の比較を予定すること（セグメント 5、6 及び 9）等の費用のかからない改造をすることで改善が可能であろう。

21 リファレンス ESFR 設計のミスユース脅威に関する解析の一部はすでに報告されている（G.G.M. Cojazzi, G. Renda, J-S. Choi, Applying the GIF PR&PP Methodology for a qualitative analysis of a misuse scenario in a notional Gen IV Example Sodium Fast Reactor, INMM-49th Annual Meeting, July 13-17, 2008, Nashville, Tennessee, USA）。この報告では、表 6.5 に対応する内容がわずかに異なる。表 6.5 において、PR 評価項目は参考文献[6.2]の区分を基準として導かれた。

表 6.4 : 不正使用パスイセグメントの指標評価のための質問 (1/2)

セグメント	TD	PT	PC	DP
1	a) 必要なウランを検知されることなく見つけるのはどの程度困難か? b) 輸送の困難さはどれくらいか?	a) 調達の手配にはどの程度時間がかかるか? b) 全ての所要物質の輸入にかかる時間はどれくらいか?	a) 物質のコストはどれくらいか? b) 輸送のコストはどれくらいか?	a) 追加議定書 (AP) は実施されているか? b) AP は効果的に執行できるか? c) AP 措置はセグメントを検知できるか? d) 輸出管理及び貿易解析は役に立つか? e) これらの措置が不法行為を検知する可能性はどれくらいか?
2	下記の困難さはどれくらいか? a) 秘密施設の建設 b) 人員訓練及び秘密施設の運転 c) 十分な品質での期待される製品の供給	下記にかかる時間はどれくらいか? a) 秘密施設の建設 b) 所要人員の訓練 c) 全てのピンの生産	所要インフラの設置コストはどれくらいか?	セグメント 1 と同じ
3	a) ピンを保守用ルート経由で持ち込む困難さはどれくらいか? b) その行為を隠蔽する困難さはどれくらいか?	所要のピンの移送にかかる時間はどれくらいか?	所要のピンの移送にかかるコストはどれくらいか?	a) どのような保障措置手法がこのセグメントに実施されているか? b) その手法が不法行為を検知する可能性はどれくらいか?
4	a) ダミー集合体を組み立てる困難さはどれくらいか? b) その行為を隠蔽する困難さはどれくらいか?	a) ダミー集合体の組立にかかる時間はどれくらいか? b) その行為の隠蔽にかかる時間はどれくらいか?	下記にかかるコストはどれくらいか? a) ダミー集合体の組立 b) その行為の隠蔽	a) どのような保障措置手法がこのセグメントに実施されているか? b) その手法が不法行為を検知する可能性はどれくらいか?
5	ダミー集合体を移送する困難さはどれくらいか?	それにかかる時間はどれくらいか?	それにかかるコストはどれくらいか?	セグメント 4 と同じ。
6	“仕様外”集合体を装荷する困難さはどれくらいか?	それにかかる時間はどれくらいか? 通常の操作と比較してそれにかかる時間はどれくらいか?	技術的困難の克服にかかるコストはどれくらいか?	セグメント 4 と同じ。
7	安全性及び運転性を損なうことなくダミー集合体を照射する困難さはどれくらいか?	それにかかる時間はどれくらいか?	a) 技術的困難の克服にかかるコストはどれくらいか? b) 電力生産の観点からそれにかかるコストはどれくらいか?	セグメント 4 と同じ。
8	a) “仕様外”集合体を引き抜く困難さはどれくらいか? b) その行為を隠蔽する困難さはどれくらいか?	それにかかる時間はどれくらいか? 通常の操作と比較してそれにかかる時間はどれくらいか?	技術的困難の克服にかかるコストはどれくらいか?	セグメント 4 と同じ。

表 6.4 : 不正使用パスウェイセグメントの指標評価のための質問(2/2)

セグメント	TD	PT	PC	DP
9	移送する困難さはどれくらいか？	それにかかる時間はどれくらいか？	それにかかるコストはどれくらいか？	セグメント 4 と同じ
10	下記の困難さはどれくらいか？ a) カメラの不正操作 b) ダミーピンの回収 c) ダミーピンの“元の”ピンとの置き換え d) 保守用チャネル経由で ESFR FCF からのダミーピンの搬出 e) 秘密施設へのダミーピンの輸送	TD について記述された行為の実施にかかる時間はどれくらいか？	それにかかるコストはどれくらいか？	a) どのような保障措置手法がこのセグメントをカバーしているか？ b) その手法が転用又は不正変更を検知する可能性はどれくらいか？
11	セグメント 2 と同じ	下記にかかる時間はどれくらいか？ a) 秘密施設の建設 b) 所要人員の訓練 c) 全てのピンの処理	所要インフラの設置コストはどれくらいか？	セグメント 1 と同じ

表 6.5 : 基準設計と設計バリエーション 0 に関する核拡散抵抗性評価項目

セグメント	TD	PT	PC	MT	DP	DE
1.ホスト国が天然ウラン（または入手可能な場合 DU）を取得する。	非常に低い ～低い	非常に低い ～中程度	非常に低い	該当せず	非常に低い	低い
2.ホスト国はダミーウランピンを ESFR サイト外で準備する。	非常に低い ～低い	低い	非常に低い	該当せず	非常に低い	低い
3.ホスト国はダミーピンを先ず ESFR サイトに、それから FCF の燃料集合体ステーションに持ち込む。	非常に低い	非常に低い ～低い	非常に低い	該当せず	非常に低い	非常に高い
4.ホスト国はウランターゲットピンと標準 ESFR 新燃料ピンで構成される ESFR ダミー新燃料集合体を組み立てる。	中程度	非常に低い	非常に低い	該当せず	低い～高い	非常に高い
5.ホスト国はダミー集合体を FCF から原子炉容器内貯蔵バスケットへ移送する。	非常に低い	低い	非常に低い	該当せず	非常に低い	中程度
6.ホスト国はダミー集合体を炉心の OUTER リングに装荷する（燃料交換時）。	非常に低い	非常に低い	非常に低い	該当せず	非常に低い	非常に高い
7.ホスト国はダミー集合体を 12 ヶ月間照射する。	非常に低い	低い	非常に低い	該当せず	非常に低い	非常に高い
8.ホスト国はダミー集合体を炉心から原子炉容器内貯蔵バスケット内に取り出し（次の燃料交換時）、そこに置いて冷却する。	非常に低い ～中程度	中程度	非常に低い	該当せず	低い～中程度	高い～非常に高い
9.ホスト国はダミー集合体を原子炉容器内貯蔵バスケットから FCF へ移送する。	非常に低い	中程度	非常に低い	該当せず	非常に低い	中程度
10.ホスト国はダミーピンを FCF で回収し、秘密施設に輸送する。	中程度	非常に低い	非常に低い	該当せず	低い～高い	高い～非常に高い
11.ホスト国はプルトニウムを秘密施設で回収する。	低い	非常に低い ～中程度	非常に低い	非常に低い (WG Pu) *	非常に低い ～低い	低い
総集計値	中程度	中程度	非常に低い	非常に低い (WG Pu) *	低い～高い	低い～高い

* WG Pu=兵器級プルトニウム

6.2.3 設計バリエーションの評価

不正使用について 2 つの設計バリエーションが考慮された。

設計バリエーション 0 : 最初の設計バリエーションは基準設計とほぼ同じであり、LWR 使用済燃料から得られる TRU を使用する燃焼炉心構成である（TRU 転換比は 0.64 に代わり 0.73）。炉心構成の相異点は、集合体の本数（180 体対 102 体；集合体当たりのピン数は同じ）、それらの組成（平均 TRU 富化度 22.1%対 24.9%；2 領域炉心に配置）、及びそれらの総滞留時間（1300 日対 930 日）である。サイクル長は同じである（12 ヶ月）。ANL の事前の計算によれば、U-238 ターゲット集合体から 1SQ の未申告プルトニウムを 12 ヶ月で生産するには、仮定にもよるが、全ターゲット集合体 6 体～14 体が必要である。

基準設計とこの設計バリエーションは非常に似ているので、本設計に対するパスウェイ解析も適用可能であり、また炉心設計のバリエーションが選択されたシナリオの指標評価値にどのように影響するか調べる価値がある。基準設計に対して行われた仮定は、1SQのプルトニウム生産に必要なターゲット集合体の本数が異なること（10体に代わり12体、それと50%をターゲットウランピンに改造）を除いてそのまま適用される。炉心形状と燃料交換計画が異なるため、DP指標は概ねこの設計バリエーションの影響を受けることが見込まれる。基準設計に対する詳細なパスウェイ評価により、本PR&PP評価手法が酷似した設計オプションを識別できるか、同背景の中で設計者の選択を如何にサポートできるかをテストできる。

このパスウェイ解析では、基準設計と同じ手順を使用し、表6.4の補助質問に対して同様の回答が得られた。質問に対する回答から小さい差違を指摘できるものの、全てのセグメントに対する最終的なPR評価項目は基準設計のそれと全く同じであった。このため、表6.5は基準設計及びDV0両方の解析に当てはまる。極めて小さな違いすら定性的解析で浮き彫りにできるという事実は、このアプローチが到達できる詳細さのレベルを示すものである。また、最終的なPR評価項目が全く同じである事は、区分(binning)プロセスにおける識別力の不十分さの結果としてではなく、差違はセグメントの全体的なPR判断を変えるほど重要ではないことの確認として見なされるべきである。

設計バリエーション1: このバリエーションは、高燃焼炉心構成で、TRU転換比は0.22である。この差異は燃料サイクル全体の実質的変更を意味し、サイクル長が短くなり（12ヶ月ではなく6.6ヶ月）、燃料組成が異なる（特に、2領域炉心に配置される平均TRU富化度は58.5%であり、DV0の場合の約22%とは異なる）。原料としてより多くのLWR使用済燃料が年当たり必要である。炉心内の集合体本数はDV0と同じ（ただし、集合体当たりのピン数は324本対271本と多い）であるが、総滞留時間はより長くなる（1445日）。この構成は3バッチ（基準設計）又は4バッチ（DV0）ではなく8バッチを使用することから、最終取出しまでの炉心内燃料操作作業回数は多くなる。

このケースは、本評価手法が大きな炉心構成変更によるPRへの影響評価に使用でき、政策決定レベルでの核燃料サイクルの戦略決定を支援できることを示している。

前のケースと同様、基準設計スタディのために選択されたパスウェイは、ごく軽微な違いを元の仮定に加えるだけでこのバリエーションに適用できる。例えば、照射サイクル長の違いである。

ANLの予備的な計算に基づくと、1SQのプルトニウムを6.6ヶ月の単一照射サイクルで生産するために22体～48体の等価全ターゲット集合体が照射されることが必要となる。その下限値及び集合体内の燃料ピンの半分だけがターゲットピンであると仮定すると、ホスト国は1SQのプルトニウムを6.6ヶ月の単一サイクルで取得するのに44体の改造ターゲット集合体を照射することが必要である。

DV1を基準設計及びDV0の解析と同じ手順で評価すると、セグメント7のPTの質問に対する回答は別として、ほぼ同様の回答がほとんどのセグメントの補助質問に対して得られた。表6.6に全てのセグメントに対する最終的なPR評価項目を示す²²。この結果から、

²² 不正使用脅威に対するESFR設計バリエーションについての解析部分はG. G. M. Cojazzo, J. Hassberger, G. Renda等による「概念的な第IV世代仮想的ナトリウム高速炉における不正使用シナリオの定性的評価に対するPR&PP評価手法の適用：設計バリエーション解析」として、”Proceeding of Global2009, Paris, France, September 6-11, 2009”に公開されている。表6.6は彼らの報告中の該当する表と少し異なっている。表6.6中中のPR評価値はRef. [6.2]の区分から得られた。

DV1 の場合も、全体的な PR 評価項目は基準設計のそれと酷似していることが明らかである。(より多くの集合体照射を要することから) より高い DP 評価値が期待されたものの、次の2つの理由のためにそうとはならなかった。すなわち、a) 2つの最も重要なセグメント (4 及び 10) における高い不確実性が結果を支配している、b) 仮定された保障措置アプローチがセグメント 5、6 及び 9 におけるダミー集合体の存在を特定することができない。この事実を基に、プラントの保障措置設計に対する特定の要件を作成すべきである。

表 6.6 : 設計バリエーション 1 に関する核拡散抵抗性評価項目

セグメント	TD	PT	PC	MT	DP	DE
1.ホスト国は天然ウラン (または入手可能な場合 DU) を取得する。	非常に低い ～低い	非常に低い ～中程度	非常に低い	該当せず	非常に低い	低い
2.ホスト国はダミーウランピンを ESFR サイト外で準備する。	非常に低い ～低い	低い	非常に低い	該当せず	非常に低い	低い
3.ホスト国はダミーピンを先ず ESFR サイトに、それから FCF の燃料集合体ステーションに持ち込む。	非常に低い	非常に低い ～低い	非常に低い	該当せず	非常に低い	非常に高い
4.ホスト国はウランターゲットピンと標準 ESFR 新燃料ピンで構成される ESFR ダミー新燃料集合体を組み立てる。	中程度	非常に低い	非常に低い	該当せず	低い～高い	非常に高い
5.ホスト国はダミー集合体を FCF から原子炉容器内貯蔵バスケットへ移送する。	非常に低い	低い	非常に低い	該当せず	非常に低い	中程度
6.ホスト国はダミー集合体を炉心のアウトリングに装荷する (燃料交換時)。	非常に低い	非常に低い	非常に低い	該当せず	非常に低い	非常に高い
7.ホスト国はダミー集合体を 6.6 ヶ月間照射する。	非常に低い	低い	非常に低い	該当せず	非常に低い	非常に高い
8.ホスト国はダミー集合体を炉心から原子炉容器内貯蔵バスケット内に取り出し (次の燃料交換時)、そこに置いて冷却する。	非常に低い ～中程度	中程度	非常に低い	該当せず	低い～中程度	高い～非常に高い
9.ホスト国はダミー集合体を容器内貯蔵バスケットから FCF へ移送する。	非常に低い	中程度	非常に低い	該当せず	非常に低い	中程度
10.ホスト国はダミーピンを FCF で回収し、その後秘密施設に輸送する。	中程度	非常に低い	非常に低い	該当せず	低い～高い	高い～非常に高い
11.ホスト国はプルトニウムをその秘密施設で回収する。	低い	非常に低い ～中程度	非常に低い	非常に低い (WG Pu) *	非常に低い ～低い	低い
総集計値	中程度	中程度	非常に低い	非常に低い (WG Pu) *	低い～高い	低い～高い

* WG Pu = 兵器級プルトニウム

セグメント 7(ホスト国はダミー集合体を 6.6 ヶ月間照射する)の PT 指標に関する PR 評価項目は基準設計及び DV0 と全く同じであり、本このケースにおいては、Rev.5 での評価手法で提案された区分(bin)はこの違いを十分には識別できなかった。特に、12 ヶ月から 6 ヶ月への照射期間変更は、対象セグメントにおける PR 評価項目の何らかの違いを生むべきである。DV0 及び DV1 の結果は、不正使用シナリオへの本評価手法の定性的適用が、

基本原理及び指標評価の小さな差異を特定できることを実証している。例えこうした差異が識別できたとしても、区分プロセスにより全てのセグメントは等しい結果を取り、この2つのバリエーションの全体的なPR評価項目は基準設計と同じであった。結果として、セグメント全体に実施された概念的な集計プロセスにより、パスウェイ全体に対するPR評価項目はDV0、DV1と同じであると判断された。

6.2.4 不正使用解析から得られた今後の研究に対する洞察

本解析は、本PR&PP評価手法の有用性及び堅牢性を実証するとともに、定性的アプローチが追跡可能で説明可能な信頼性ある結果をもたらし得ることを示している。不正使用戦略の解析は、核拡散パスウェイが1つ以上のターゲットを伴い、どれだけターゲットとパスウェイ両方の特定を複雑にするかを示している。本解析はまた、本評価手法の幾つかの側面に更なる検討の必要があることも示している。特に、一部の指標と尺度（とりわけMT及びDE）は手法の高度化が必要であり、一部の例示した尺度（とりわけPC及びDEの尺度）は若干の追加的検討が必要である。更に、rev.5の評価手法レポートで用いられた区分は、スタディ毎に特有の説明・仕立てを考慮しなければならない。ここについては、異なるスタディ間での比較を試みた場合にまた別の課題を生むかもしれないが、本評価手法レポートで提案された区分を普通に全てのPR解析に適合させることはできないだろう。

今回考慮した事例では、幾つかの指標が一部のセグメントで支配的と思われ、全体の評価値を支配しているかもしれない。この結果の意味については更なる調査を必要とする。

以下の追加的な作業がこのESFR事例について実施されるべきである。

- ・ DV0及びDV1の専門家による追加的解析。これらの解析により、手順の更なる試験、専門家の理論的解釈の妥当性確認及び比較、既存の提示尺度のテスト、更には様々な解析者によって実施される指標評価（及びその結果のPR評価項目）の比較が可能になる。
- ・ DV2の解析
- ・ DV3の解析

PRPP WGではTDとDPを核拡散成功の総合指数として組み合わせることの可能性を議論してきている。ここで得られた詳細パスウェイは、この論点について管理しながら検討を進めていくための基礎となるかもしれない。

6.3 ブレイクアウト

本ケーススタディで検討された第3のPR脅威戦略は、核分裂性物質を生産することを目的としたブレイクアウトした上での物質の転用且つ／又はESFRの不正使用である。なお、ブレイクアウトの脅威はこれまでPR&PP文献では“アブロゲーション(abrogation)”と呼ばれてきたが、国家は正式にアブロゲーションを戦略に盛り込むこともあれば盛り込まないこともあるので、このシナリオでは“ブレイクアウト”の方がより制限的でない用語であると判断された。

戦略として、ブレイクアウトはそれ自体としてではなく“戦略モディファイア(strategic modifier)”として存立するものである。究極のところ、成功する拡散国家はいずれも、核兵器を使用すること又はその保有を発表することを決定する場合／時、必ずブレイクアウトする。ブレイクアウトの特性が脅威の特性（ブレイクアウトの前後に拡散国家が利用でき

る時間と、兵器を使用可能にするための複雑さ)の大半を決定する。

不正使用と転用については 6.1 節と 6.2 節でターゲット及びパスウェイの特定も含めて明確に扱われているので、ブレイクアウトの興味深い側面はブレイクアウトから兵器準備完了までの時間を最小にするシナリオであろう。これは事実上 PT 指標の一部である（すなわち、“国際的管理が実質的に無効化した時点で、拡散国家が ESFR 技術を用いて兵器を準備できる最速の時間はどのようなものか？”という質問に答えることである）。それゆえ、ブレイクアウトシナリオ解析のゴールは、ブレイクアウト後における兵器準備完了までの最小時間を調べることによって秘密裏の不正使用／転用シナリオを補完することである。

6.3.1 ブレイクアウトターゲットの特定

ブレイクアウトシナリオはブレイクアウトから兵器準備完了までの最小時間を盛り込むことが想定されるため、以下に掲げるものの中から幾つかの潜在的ターゲットが候補として選択された。

- 転用ターゲット：
 - 備蓄 ESFR 新燃料－ESFR 施設でのプルトニウム分離
 - 備蓄されている ESFR 新燃料－秘密裏に整備されたプルトニウム・ウラン抽出 (PUREX) 施設でのプルトニウム分離
 - 備蓄 LWR 使用済燃料－ESFR 施設でのプルトニウム分離
 - 備蓄 LWR 使用済燃料－秘密裏に整備された PUREX 施設でのプルトニウム分離
- 不正使用ターゲット：
 - ESFR 燃料施設での未申告のターゲット照射及び分離
 - ESFR 燃料施設での ESFR 燃料の低燃焼度照射及び分離
 - ESFR 燃料施設での DU ターゲット (ESFR 増殖炉用) の低燃焼度照射及び分離
 - ESFR 施設での各種物質の照射及び秘密裏に整備された PUREX 施設での分離
 - 高純度プルトニウム TRU を抽出するための ESFR 燃料施設の不正使用

詳細な解析のために選択されたターゲットは次の通り。

1. 備蓄 ESFR 新燃料の転用－秘密裏に整備された PUREX 施設において（ピン全長かピンの低燃焼度端部だけのいずれかを使用する）使用済 LEU からのプルトニウム分離
2. 炉心で親物質を照射するための施設の不正使用
3. 貯蔵バスケット内で親物質を照射するための施設の不正使用
4. FCF において高純度プルトニウム TRU を抽出するための施設の不正使用

なお、拡散国家によって選択されるブレイクアウト戦略は、以下の説明及び図 6.3 の図示（あくまでも定性的）のように、かけられる時間と拡散活動の潜在的複雑さの両方に影響を及ぼすことになる。

- 即時・絶対型ブレイクアウト（拡散国家はブレイクアウトを決定し、直ちに決定に基づいて行動する）：時間は最小、拡散活動の複雑さは最小。
- 即時・臨機応変型ブレイクアウト（拡散国家は、明白なブレイクアウトを行わずに、“効果的に”ブレイクアウト行為を行う。）：時間は中程度、拡散活動の複雑さは中

程度。

- 遅延・任意型ブレイクアウト（拡散国家は、検知リスクを受容しながら、秘密裏に不正使用又は転用を行うが、検知された場合／時にブレイクアウトする意図をもっている）：時間は中程度、拡散活動の複雑さは中程度。
- 遅延・意図型ブレイクアウト（拡散国家は、ブレイクアウトした上で公然活動に切り替えるスケジュールを予め定め、それまでの間検知リスクを受容しながら、秘密裏に不正使用又は転用を行うー“銃装填”シナリオ）：時間は最大、拡散活動の複雑さは最大。

拡散国家によって選択されるブレイクアウトのタイプは、政治的要因（国家の外交政策、ブレイクアウト後における外国からの介入確率 [時期及び程度]、拡散国家のサプライチェーン対外依存度など）の影響を大きく受ける。これらの要因は、興味深いものではあるが、その複雑さの故に ESFR 技術のケーススタディから除外されなければならない。

ブレイクアウト戦略

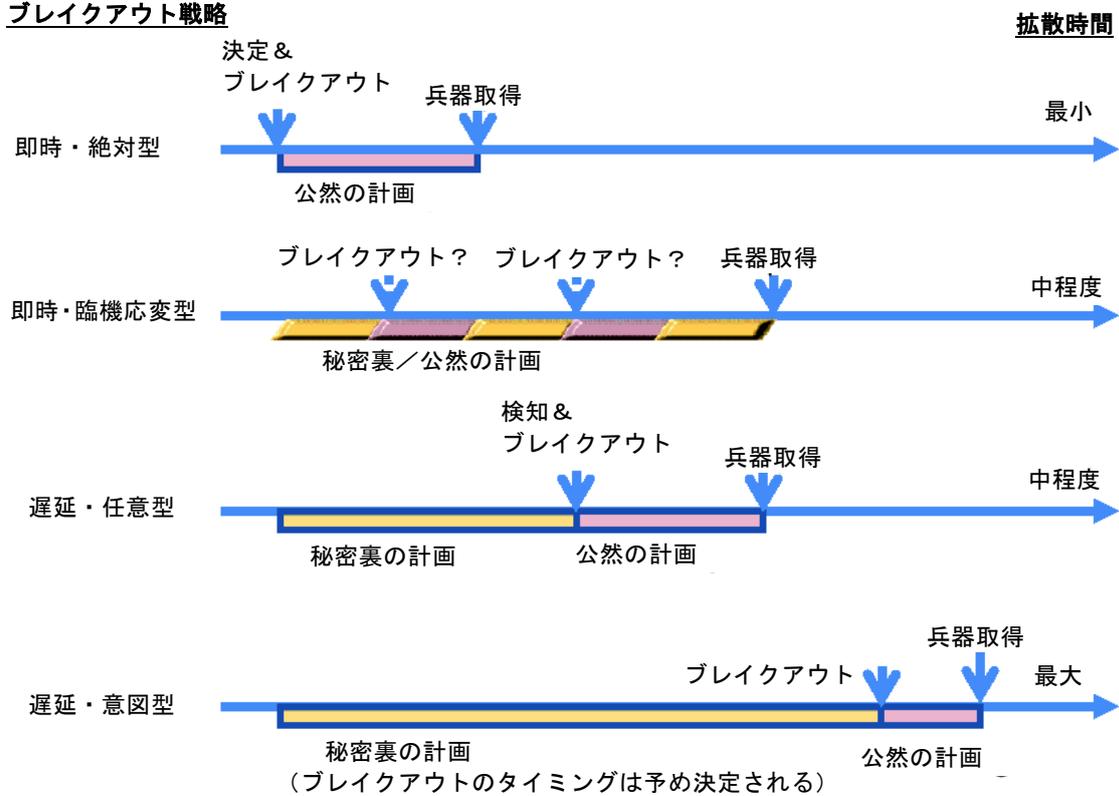


図 6.3 : ブレイクアウト戦略の定性的図示

6.3.2 ブレイクアウトパスウェイ解析

各候補ターゲットについて定性的パスウェイ解析を実施し、PT 指標によって決定される“ターゲット魅力度”について、特にそれがブレイクアウト後の期間に適用される際の相対的ランク付けを判定した。表 6.7 にこの予備的な解析結果を示す。

表 6.7：拡散時間指標で判定されるターゲット魅力度のブレイクアウト戦略への依存度

ターゲット ²	ブレイクアウト戦略 (拡散時間の短縮及びそれに伴う複雑さの低減)			
	遅延・意図型 ¹	遅延・任意型 ¹	即時・臨機応変型 ³	即時・絶対型
転用：ESFR 新燃料（全長ピン）からの TRU	中程度	中程度	高い	高い
転用：ESFR 新燃料（ピンの上部及び下部）からの TRU	高い	高い	高い	高い
不正使用：炉心でのターゲットの未申告照射からの TRU	高い	高い	中程度	非常に低い
不正使用：貯蔵バスケットでのターゲットの未申告照射からの TRU	高い	高い	低い	非常に低い
不正使用：高純度プルトニウム TRU 抽出のための FCF	高い	中程度	低い	非常に低い
設計バリエーション：増殖炉 転用：内部ブランケット	高い	中程度	低い	非常に低い
注： 1.検知された場合には、最速で継続するか TRU を直接 TRU 抽出から取り出すかを比較して最小時間パスウェイを選択する。 2.サイト外の秘密の場所に想定される PUREX 処理が必要である。 3.“受容可能”な国際的反応を想定して計画を続行する。 4.ブレイクアウトパスウェイは通常 1 を超える SQ をいくらかでも取得可能。				

6.3.3 ブレイクアウト解析から得られた今後の研究に対する洞察

ブレイクアウトの時点まで、保障措置、供給国グループの管理、各国家情報機関及び技術的手段がブレイクアウトの意図を検知する役割を果たす。DP 及び DE 指標は秘密裏の活動期間には重要であるが、ブレイクアウト後にはいかなる役割も果たさない。

直感的に、上記ブレイクアウト戦略のどれがブレイクアウト後の最小時間につながるのか、あるいはこの種の一般化を行うことができるのかは明らかではない。例えば、“遅延・意図型ブレイクアウト”は合計の拡散時間が最大となるが、ブレイクアウト時点で“銃が完全装填状態”にあるので、ブレイクアウトから兵器準備完了までの時間は最小となるかもしれない。他方、もし拡散国家の戦略がブレイクアウト後に兵器級物質の公然生産を含むなら、単純な最終製品を目的とした熟慮されていないブレイクアウトシナリオでも、ブレイクアウト後の期間が短くなり魅力度が増すことになり得る。とりわけ、MT 指標の評価値はこうしたことを考慮すると疑問視される。なぜなら、(例えば) 特定の政治的利益に基づく戦略は低級な兵器で満足することがあるからである。

ブレイクアウトパスウェイを評価する上での重要な問題は、検知に関して、それも拡散国家の検知リスク回避策がパスウェイ終点へと進むにつれどのように変化するかについて、拡散国家の戦略を明確化することである。このような“動的戦略”の考察には、また別レベルの複雑さが解析に付加される。

ブレイクアウト前の指標がブレイクアウト後の兵器準備完了までの時間（表 6.8 参照）に有意の影響を及ぼし得るか／どのように影響を及ぼし得るかを、少なくとも ESFR ケーススタディの文脈において、検討するのは有効であろう。また、濃縮のような代替取得戦略と比較することも面白いだろう。

最後に、ブレイクアウト戦略と転用及び不正使用脅威戦略は密接な結びつきがあり、ブレイクアウト脅威戦略の観点を除いたこれらの1つと並列的パスウェイ解析を実施することにより、脅威戦略の変化による指標への影響に対する洞察が得られる可能性がある。この可能性は特定の基準不正使用パスウェイ解析を用いて調査できる。

表 6.8 : ブレイクアウトに利する要因とそれに対する指標

段階	ブレイクアウトに利する要因	PR&PP 指標
ブレイクアウト前	転用/不正使用の検知確率が低い	<ul style="list-style-type: none"> • DP • DE
	ブレイクアウト後の公然活動の時間を短縮するような付随的秘密活動に対する監視が少ない	<ul style="list-style-type: none"> • DP (追加議定書) • DE • PT • TD (ブレイクアウト前の段階で技術開発に着手する必要性)
	所要の設備及び資材を入手するサプライチェーンに対する監視／干渉が少ない	<ul style="list-style-type: none"> • DP (追加議定書) • TD (設備輸入の必要性対国内開発) • PC
ブレイクアウト後	開発時間／開発速度	<ul style="list-style-type: none"> • TD • PT • MT
	利用可能な在庫及び物質のタイプ	<ul style="list-style-type: none"> • DP (ブレイクアウト前の段階における核物質在庫の蓄積に対して) • MT
	兵器化の技術	<ul style="list-style-type: none"> • TD • MT • DP (ブレイクアウト前の段階における所要技術の蓄積)
	兵器化の知識	<ul style="list-style-type: none"> • TD • MT • DP (ブレイクアウト前の段階における所要専門知識の蓄積に対して)
	外国の介入に対する物理的バリア	<ul style="list-style-type: none"> • 施設の透明性* • 施設の堅牢性*
	外国の介入に対する政治的バリア	<ul style="list-style-type: none"> • 対外関係 (介入の意思及び能力) * • 対応時間及び能力*

* これらの指標は PR&PP 評価手法に含まれていない。

6.4 核分裂性物質の盗取

ケーススタディで検討された第5章のPP脅威は、ISQの核兵器物質の入手に十分な量の核分裂性物質をESFRから盗取することを目的としている。追加的な盗取及び妨害破壊行為シナリオの研究は、付録D.4を参照されたい。

6.4.1 盗取ターゲットの特定

ESFRの幾つかの区域は核物質盗取のターゲットになり得る（[6.1]から転用）。ESFRの配置は図2.3に示されている。

プラント境界内において、下記のシステム要素は核物質の盗取のために接近可能あるいは持ち出し可能なターゲットを含む可能性がある。

- LWR使用済燃料キャスク一時貯蔵区域
- LWR使用済燃料貯蔵区域
- FCF
 - 空気雰囲気セル（ホットセル）
 - 不活性雰囲気ホットセル
- サービス建屋の一時貯蔵／洗浄区域

なお、原子炉自体はこの解析には含まれなかった。なぜなら、炉心内の燃料は、他の施設場所に比べて接近に非常に時間のかかる行為を要し、また遮蔽された車両なしにはいかなる距離も輸送できないからである。更に言えば、アイテム貯蔵区域が物質の可動性の故に比較的魅力度が大きいと考えられた。ターゲットの詳しい説明は、付録D.4を参照されたい。

6.4.2 盗取パスウェイ解析

一度ターゲットが特定されれば、それらのターゲットへのパスウェイは図6.4に示すように特定することができる。各パスウェイについて敵対者シーケンスダイアグラム(ASD²³)に基づいて概説する。全てのASDレビューは付録D.4を参照されたい。解析した事例は、あるプロセスセル内のTRU／ウラン生成物の盗取に関するASDである。この解析ではターゲットをサイト境界まで搬出する盗取だけを扱い、サイト境界を超える活動は扱っていない。

²³ Adversary Sequence Diagram

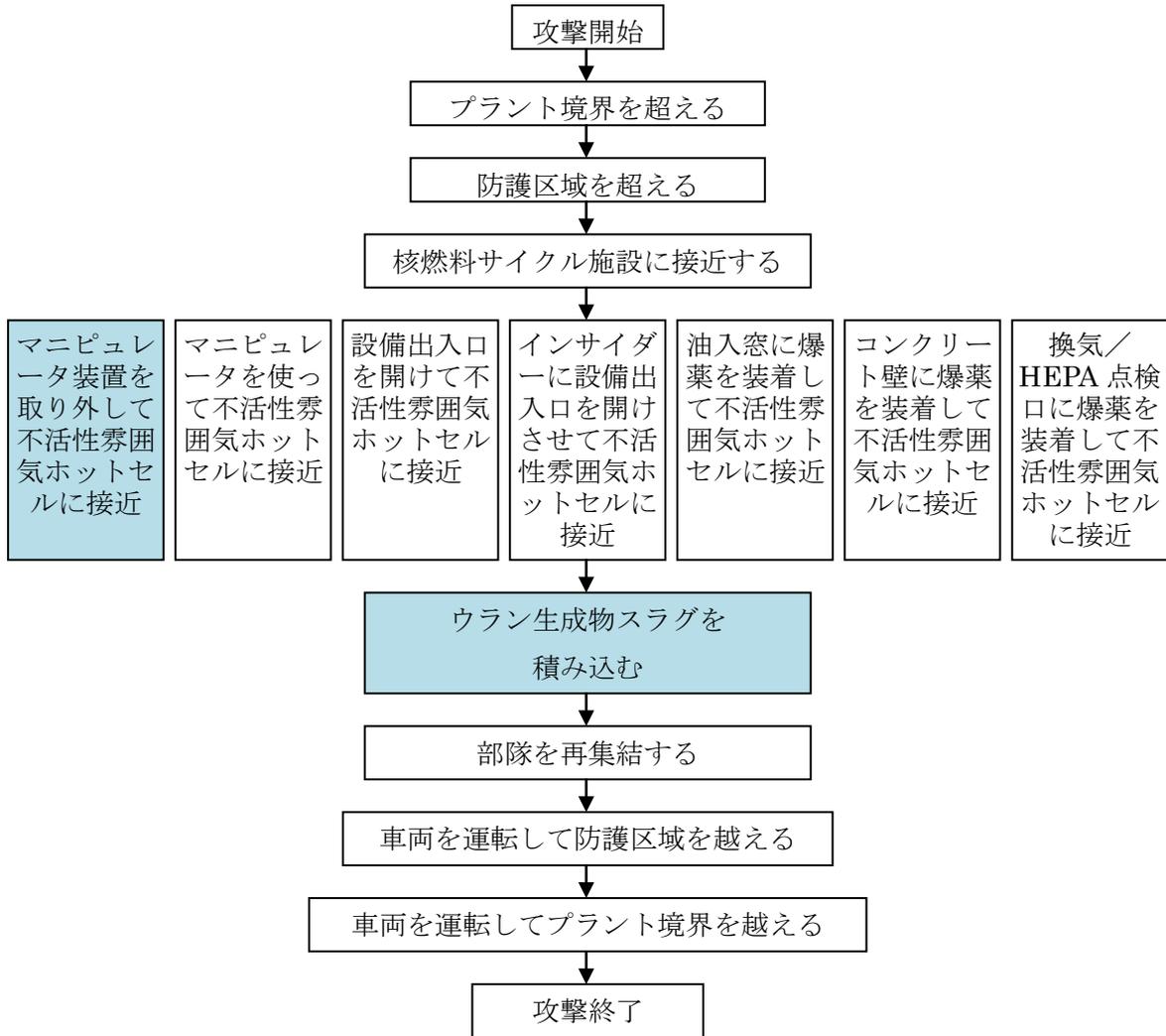


図 6.4 : TRU/ウラン生成物（プロセスセル内）の盗取の敵対者シーケンスダイアグラム(ASD)

本 PR&PP 評価手法を用いることで、ASD は定性的にも定量的にも解析することができる。本評価手法を実証する目的上、図 6.4 で特定されている敵対者のパスウェイは定性的に解析された。この特殊なパスウェイを選定したのは、ウラン/TRU スラグが電解プロセスを代表する物質であり、容易に運搬できる形態（固体金属スラグ）にあるからであり、且つ、TRU 濃度がダウブレンドされた燃料に比べて高い（換言すれば、盗取にとって比較的魅力的なターゲットである）からである。定量的な事例は付録 D.4 に記載してある。

成功するためには、敵対者は、サイトと PIDAS の境界を越え、FCF に接近してから不活性雰囲気ホットセルに接近し、ウラン/TRU スラグを収集し、その後にサイトから脱出しなければならない。敵対者の成功の結果は 1SQ 又はそれ以上の核分裂性物質の盗取である。

プラント設計を概念段階で解析する際には、プラントの正確な設計がまだ完了していないため定性的解析のほうが複雑さは小さい。また、対象となる区域や潜在的パスウェイやターゲットを特定するには、PP のニーズを解析してから PP 設計を策定する方が都合が良い。定量的解析を実施する際には、各システムに対する正確な答えは必ずしも既知ではない。したがって、高い、低い、中程度、全くないというランク付け方式が有益であろう。

これらの用語の一貫した定義を保つためには、許容値の範囲が各ランク付けについて定められるべきである。表 6.9 にこの定性的事例で使用された区分プロセスを示す。

表 6.9 : 盗取パスウェイに沿う各ステップの定性的解析

タスク	PD ¹	遅延	評価の記述
1.攻撃を開始する	低い	全くなし	軍事訓練を受けた部隊は戦略、戦術両面の奇襲を実施すると思われる。
2.プラント境界を越える	低い	全くなし	外側境界は一般に簡単なフェンス及び／又は車両バリアである。なお、敵対者は各種センサによってこの時点で検知される。
3.防護区域を越える	中程度	中程度	PIDAS 境界は一連のフェンス、車両バリア及びセンサである。訓練された集団は容易にここを越えることができるが必ず検知される。この時点で、防御部隊が敵対者に接近し交戦する。
4.FCF に接近する	高い	高い	センサが警報を発すると、建屋は施錠される。敵対者は（おそらく爆薬を使って）侵入しなければならない。インサイダーのタスクが建屋内であれば、インサイダーは施錠を破り扉を開けることができる。このステップは銃撃戦下で行われなければならない。建屋が強固な場合は、（銃撃戦下で）複数回の突破攻撃が必要である。
5. マニピュレータ装置を取り外して不活性ホットセルに接近する	高い	中程度	このステップはどれだけ時間をかけるかに非常に依存する。従って完了されることはありそうもない。
6.ウラン生成物スラグを積み込む	低い	低い	敵対者は自給式呼吸器を装備していなければならない。いかなる敵対者も燃料スラグを積み込んでいる間は防御部隊との交戦に加われない。敵対者は限定的な場所におり、防御部隊はその場所を既に知っている。ただし、セル内の敵対者は孤立していると思われる。
7.部隊を再集結する	該当せず ²	全くなし	再集結は銃撃戦下で、既知の出入地点（開けられた扉）を通して、且つ、既知の場所で（PIDAS 内で）行われなければならない。
8.車両を運転して防御区域を越える	該当せず	低い	この時点までに完全な防御部隊の対応（重火器及び装甲車両を含む）ができています。車両は脱出手段として役に立たなくするため激しい銃撃戦下に置かれる。下車した敵対者は銃撃戦下で PIDAS を越えなければならない。
9. 車両を運転してプラント境界を越える	該当せず	低い	防御部隊は敵対者に集中しているため、PIDAS からの脱出成功は突破であると想定される。したがって、引き続きプラント境界を越えるのは容易であろう。
10.攻撃を終了する	該当せず	全くなし	敵対者がいつ撤退するかを決定したときのみ。

1.核物質防護システムによる敵対者検知確率

2.検知確率はもはや適用されない。敵対者の場所は防御部隊に知られている。

定性的解析の次のステップは、対抗部隊の時間を決定することである。次の数値が使用された。

- オプション A : 150 秒
- オプション B : 300 秒
- オプション C : 600 秒

定性的解析の結果をモデル化するためにソフトウェア「Estimate of Adversary Sequence Interruption (EASI) v200」を使用した。警報信号が防御部隊に伝達される確率をいう警備通信確率は 1.0 と仮定し、標準偏差は全て平均値の 10% と推定した。解析には各レンジの平均値を用いた。表 6.9 に示したパスウェイの解析を各対抗部隊時間について図 6.5、図 6.6、図 6.7 に示す。

A	B	C	D	E	F	G	H	I
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								
26								
27								
28								
29								
30								
31								
32								

敵対者シーケンス阻止評価		警備通信確率	対抗時間 (平均)	標準偏差
		1	150	15

TRU/ウラン生成物スラグの盗取 パスウェイ5a						
タスク	記述	P(検知)	場所	平均	標準偏差	Rt
1	攻撃を開始する	0.5	M	30	3	6210
2	プラント境界を超える	0.5	M	30	3	6180
3	防護区域を超える	0.85	M	1200	120	6150
4	燃料サイクル施設に接近する	0.95	M	2700	270	4950
5	マニピュレータ装置を取り外して不活性ホットセルに接近する	0.95	M	1200	120	2250
6	TRU/ウラン生成物スラグを積み込む	0.5	M	330	33	1050
7	部隊を再集結する	0.1	M	30	3	720
8	防護区域を超える	0.1	M	330	33	690
9	プラント境界を超える	0.1	M	330	33	360
10	攻撃を終了する	0.1	M	30	3	30
11					0	0

6210	6210
阻止確率	1.00

図 6.5 : 盗取阻止確率－対抗部隊時間 150 秒 (オプション A) の場合

A	B	C	D	E	F	G	H	I
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								
26								
27								
28								
29								
30								
31								
32								

敵対者シーケンス阻止評価		警備通信確率	対抗時間 (平均)	標準偏差
		1	300	30

TRU/ウラン生成物スラグの盗取 パスウェイ5a						
タスク	記述	P(検知)	場所	平均	標準偏差	Rt
1	攻撃を開始する	0.5	M	30	3	6210
2	プラント境界を超える	0.5	M	30	3	6180
3	防護区域を超える	0.85	M	1200	120	6150
4	燃料サイクル施設に接近する	0.95	M	2700	270	4950
5	マニピュレータ装置を取り外して不活性ホットセルに接近する	0.95	M	1200	120	2250
6	TRU/ウラン生成物スラグを積み込む	0.5	M	330	33	1050
7	部隊を再集結する	0.1	M	30	3	720
8	防護区域を超える	0.1	M	330	33	690
9	プラント境界を超える	0.1	M	330	33	360
10	攻撃を終了する	0.1	M	30	3	30
11					0	0

6210	6210
阻止確率	1.00

図 6.6 : 盗取阻止確率－対抗部隊時間 300 秒 (オプション B) の場合

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1										
2	敵対者シーケンス阻止評価			警備通信確率		対抗時間 (平均)		標準偏差		
3				1		600		60		
4										
5										
6	TRU/ウラン生成物スラグの盗取 パスウェイ5a									
7										
8	タスク	記述	P(検知)	場所	平均	標準偏差	Rt			
9	1	攻撃を開始する	0.5	M	30	3	6210			
10	2	プラント境界を超える	0.5	M	30	3	6180			
11	3	防護区域を超える	0.85	M	1200	120	6150			
12	4	燃料サイクル施設に接近する	0.95	M	2700	270	4950			
13	5	マニピュレータ装置を取り外して不活性ホットセルに接近する	0.95	M	1200	120	2250			
14	6	TRU/ウラン生成物スラグを積み込む	0.5	M	330	33	1050			
15	7	部隊を再集結する	0.1	M	30	3	720			
16	8	防護区域を超える	0.1	M	330	33	690	重要検知点		
17	9	プラント境界を超える	0.1	M	330	33	360			
18	10	攻撃を終了する	0.1	M	30	3	30			
19	11					0	0			
31	6210									
32	阻止確率			1.00						

図 6.7 : 盗取阻止確率—対抗部隊時間 600 秒 (オプション C) の場合

盗取シナリオでは、防御部隊による敵対者の阻止は敵対者の失敗に等しい。阻止確率 1.00 は、敵対者が防御部隊によってパスウェイ途中で阻止されたこと、つまり撃破されたことを意味する。敵対者の成功確率は全てのオプションでゼロである。

6.4.3 盗取解析から得られた今後の研究に対する洞察

敵対者はいつ、どこで攻撃を開始するか決めているので、プラントの境界に到着しこれを越えることには十中八九成功する。この検知確率は低い。プラント境界及び／又は検知境界を押し広げれば、防御部隊の対抗時間が多くなり、その後のステップが成功する確率が低下するであろう。

敵対者は次に PIDAS 境界を越えなければならない。ここの検知確率はサイト境界を越えるときよりも大きい。加えて、PIDAS 境界は総じてサイト境界より堅牢であるので敵対者の遅延が大きくなる。さらに、PIDAS 境界を強化（すなわち、遠隔操作の兵器又は同等のものを追加）することにより、敵対者がこれを越えることに成功する確率を下げることができる。

FCF はホットセルを取り囲む強化されていない建屋と仮定している。この建屋を強化構造にすると、爆薬を用いた突破が必要になるため、敵対者の成功確率は劇的に低下する。このステップでの強化は敵対者の攻撃に対する最大の便益となる。というのは、敵対者は、依然施設外にあって防護の砲火にさらされながら、立ち止まって爆薬をセットしなければならないからである。この時点で、検知の可能性は極めて高くなり、遅延は極めて長くなる。

インサイダーは敵対者の全体的な成功確率を高めることができる最大の能力を有する。もしインサイダーが扉又はホットセル点検口を事前に開けるか、あるいは攻撃中にインターロックを解除することができれば、成功確率は著しく増大する。インサイダーの潜在的影響力を低下させる対策（警備員操作式解除機能、自動閉止扉、施設内警備員）が費用対効果が大きいであろう。

ホットセルがセキュアな部屋とするならば、それに次ぐ弱点は窓の存在とマンピュレータへの敵対者の接近である。これらの窓は操作員に作業区域の視野を与える十分な大きさでなければならない。このため、これらの窓は、取り外されると、人が容易に開口部を通り抜けるのに十分な大きさであるのが一般的である。防弾ガラスとシャッターとカバーを設ければ、敵対者が防御部隊によって無力化される前に窓を使用してホットセルへの接近に成功する確率を減じられる。マンピュレータによって、敵対者は、ホットセル内の物質に接近し、適切な手順を踏んで物質をホットセルから持ち出すことが可能である。マンピュレータを無許可の接近からロックアウトする機能は、敵対者の能力を無力化するであろう。

防御部隊の典型的対抗は圧倒的な火力（すなわち、数で勝る重兵器）をもって敵対者に集中することである。敵対者を遅らせるいっさいのバリアが敵対者の成功確率を低下させる。加えて、たとえホットセルに接近しウラン／TRU 燃料スラグの入手に成功したとしても、敵対者は、残っている全ての防御部隊との戦闘を突破して脱出しなければならない。脱出するには、既知のルートで既知の場所（すなわち、フェンス及びバリアの既存の穴）を通り抜けなければならない。この必要性は防御部隊に大きな利点を提供する。

全体的に見て、成功率が高い又は中程度と評価されるステップが若干あるものの、敵対者は成功するために全てのステップを連続したやり方で遂行しなければならないことから、ESFR 施設は敵対者の盗取成功確率が低いと思われる。もっとも、多くの時点でこの確率をさらに引き下げることが可能である。

REFERENCES

[6.1] PR&PP Expert Group. 2005. PR&PP Evaluation Methodology Development Study, Insights Report. ANL-AFCI-140, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois.

7. 評価手法の改善のために得られた教訓

ケーススタディを通じた適用は、PR&PP 評価手法を開発する上で、また設計者や政策／意思決定者に役に立つ情報を提供する評価手法の能力や使い勝手を試す上で助けとなった。実際、下記のように様々な ESFR スタディを通して教訓が得られた。

- 2004 年の初期開発研究からの教訓として、まず第 1 に本評価手法の形式が定められた。
- 2006 年の実証研究からの教訓として、PR&PP 評価を計画し管理するプロセスとパスウェイを特定する様々な解析技法を試すプロセスに取り組んだ。
- 今回のケーススタディからの教訓として、評価プロセスを改善し体系化するとともに、本評価手法のさらなる進展に向けた洞察が得られた。PR について、教訓から転用、不正使用及びブレイクアウトの各脅威間の関係が明確になった。

本ケーススタディから得られた根本的教訓として次のものが挙げられる。

- 各 PR&PP 評価は、想定される脅威の絞込み及びターゲット、システム要素等の特定を可能にする定性的解析から開始すべきである。
- 定性的解析のための詳細な手引きが手法に含まれるべきである。
- システム設計並びに保障措置及び核物質防護措置に関して適切な技術専門知識を利用することが PR&PP 評価にとって不可欠である。
- 専門家聴取により、結果についての説明責任及び追跡可能性と解析の整合性を確保することができる。
- 定性的解析は、予備設計段階であっても貴重な結果を提供する。
- 本評価手法及びその使用法のより一層の標準化が必要である。

なお、WG の指摘であるが、評価プロセス中に、解析者は、まだ初期設計段階で利用できないシステム要素の詳細について頻繁に仮定を導入しなければならない。例えば、扉やゲートが PP の敵対者にもたらし得る遅延時間がそうである。研究の進捗とともに、WG は、こうした仮定を文書化すると、システムの機能要件や概念設計段階での設計基礎文書の基礎となり得ることを認識した。こうした仮定を設計基礎情報として文書化すれば、施設の詳細設計によっては、初期概念設計評価で予測された PR&PP のパフォーマンスと合致する設計が保証されるだろう（あるいは、仮定が詳細設計に具現化できない場合には、初期の PR&PP 評価は適宜見直されなければならない）。

以下の各節では、パスウェイ解析、PP 設計及び PP 設計から得られた具体的な教訓と今後の研究分野について述べる。

7.1 パスウェイ解析から得られた教訓

潜在的転用パスウェイの完全なる特定が評価の重要なゴールである。ターゲット及び潜在的パスウェイが特定の脅威毎に系統的に特定され、潜在的な拡散宿主国のターゲット物質転用戦略のもっともらしいシナリオが系統的に見つけられる。一連の転用パスウェイセグメントが作成され、各パスウェイに関する PR 指標が評価される。本評価手法により異なる設計選択肢がどのように PR に影響を及ぼすかを比較し識別することができる。

転用脅威のパスウェイ解析はまた、規制当局、政府官僚及びシステム設計者を含む利害関係者に対して、様々な有益情報を提供する。こうした情報には、当該物質が兵器計画への使用のために潜在的拡散者にとってどれだけの魅力があるか、当該物質に物理的に接

近して持ち出すのがどれくらい困難であるか、もっともらしい全ての取得パスウェイが内在的特性と外在的措置の組み合わせによってカバーされるように施設の設計・運転ができるかどうか、といったことが含まれる。

不正使用脅威のパスウェイ解析では、兵器利用可能物質を生産するプロセスの潜在的に複雑な組み合わせを考慮することが必要である（すなわち、これは単一の設備に対する単一の行為ではなく、むしろ様々な資産やシステム要素の統合的な利用である）。ある拡散戦略が与えられた場合、一部の指標が他を支配する可能性があり、またある指標が、一部のセグメントにおいてパスウェイ全体に対する全体的評価を支配することがある。

ブレイクアウト脅威のパスウェイ解析から、ブレイクアウトは転用及び不正使用脅威の範囲に入る変種の戦略であり、その意図と攻撃性、究極的には拡散国家が想定する拡散時間に応じて、様々な形を取り得ることが分かった。さらに、様々なブレイクアウト戦略に適用された同一の PR 指標の評価では、拡散者の動機や優先事項が異なると異なる結果が生じ得る。なお、グローバルな対応や対外政策に関する幾つかの追加的要因がブレイクアウト脅威の特性に関連があると特定されたが、これらの要因は PR&PP 評価手法には組み込まれていない。

盗取及び妨害破壊行為脅威のパスウェイ解析から複数のターゲットとパスウェイが存在することが分かった。最も魅力的な盗取ターゲット物質が幾つかのターゲット区域に所在すると思われた。具体的には、ESFR の場合、最も魅力的なターゲット物質を有する最も魅力的な盗取ターゲット区域は、LWR 使用済燃料キャスク一時貯蔵区域、LWR 使用済燃料貯蔵区域、サービス建屋の一時貯蔵／洗浄区域、FCF 空気雰囲気ホットセル、それと FCF 不活性雰囲気ホットセルであることが分かった。

PR&PP 評価手法で指摘のごとく、盗取及び妨害破壊行為の解析には既に解析ツールの実質的な基礎が存在する（例えば、EASI）。本ケーススタディで、この種のツールを PR&PP 評価手法の枠内で使用できることが確認された。

7.2 核拡散抵抗性評価の教訓

体系化された定性的解析は、たとえ詳細な設計情報が大きく欠けていても、（例えば、文書化されて機能要件となる合理的な設計仮定を取り入れることによって）システム設計者に有益な情報を提供する、追跡と説明が可能な信頼できる結果をもたらすことができる。

追跡可能性は、指標評価と PR 判定がなされる証拠を明確に記録することを通して解析の成果の中に実現される。この記録により解析結果の徹底的なレビューを行い、成果の信頼性と責任性に対する信用を確立することができる。ブレイクアウト戦略は政治的圧力の進展につれて変化すると思われる。

とはいえ、あらゆる技術システム（NES）はソフトシステム（これを所有する国家、これを運営する施設者、これを検認する査察官など）の中に組み込まれており、後者もまた所与のコンテキスト（政治状況、危機対非危機シナリオ等）の中に置かれている。NES の全体的な PR はこうした階層の相互作用から生じるものであり、したがって PR は単なる工学的資産の内在的特性ではない。

WG は、このようなソフトシステムとコンテキスト（第 IV 世代システムはいまだ存在すらしていない状況）の範囲外で設計の評価を試みるに当たり、システムの試験を可能にする概念上の脅威空間を考案した（すなわち、システムを評価し最終的に他のオプション

との比較を可能にするソフトシステムとコンテキストである)。当然ながら、6つの指標の最終判断は解析対象のシナリオに関連づけられるので、別のコンテキストでは有効でないかもしれない。この意味では、いかなる真の内在的措置もシナリオを考慮に入れることなしに評価し最終的判断を下すことはできない。

いかなるソフトシステムとコンテキストであれ、拡散を目指す者は目標達成のためにシステムに技術的改造を行わなければならないという意味では、TD は内在的措置である。シナリオに依存するが、これらの改造は大なり小なり量（例えば、隠蔽か否か）と有効性（例えば、技術先進国か否か）の両面のものであろう。他方、DP は、もっぱら所与のコンテキストにおけるバリアであるため、外在的措置と考えられる。例えば、いっさいの査察が予見されない（又は許可されない）システムは査察を抑止力として頼ることはできない。

7.3 核物質防護評価の教訓

敵対者の封じ込めは盗取の防止には適切であるが、妨害破壊行為の防止にはターゲットへの敵対者の接近を阻む抑止戦略が必要である。ESFR 施設において盗取ターゲットと妨害破壊行為ターゲットが近接している場合、ESFR には抑止戦略が必要であろう。なぜなら、PP システムでは敵対者の意図（すなわち、盗取又は妨害破壊行為）を早期に判定できないからである。この判定には堅牢な周辺検知システム、それとホットセルの放射線遮蔽構造及び原子炉の受動的な安全システムによって確保される受動的バリアの効果的な使用が必要である。

7.4 今後の研究分野

本ケーススタディから、PR 手法は下記の点で改善が可能であろう。

- より広範囲のターゲット及びパスウェイに指標を適用することにより、それらの実際的な適用の更なる経験を積むことができる。
- 一部の尺度は適用が困難であった。
- MT 及び DE 指標の最良の活用法が不明である。例えば、MT はターゲット記述の一部として記載されるべきであり、また、DE はどちらかといえばパスウェイ特有というより施設特有である。
- 尺度、特に PC、DP 及び DE の尺度の的確な形式を更に検討する。

PP 手法は下記により改善が可能であろう。

- 大まかなパスウェイ評価の定性的手法と定性値の分類をより詳細に検討する。
- 対抗部隊の展開戦略を更に系統的に考察する（プラントの規模により配置が複雑になる）。
- 積極的なインサイダーの潜在的役割をもっと系統的に考察する。脅威の定義におけるこの要素の考察は本ケーススタディでは極めて少なかった。
- 施設における盗取及び妨害破壊行為のターゲット数が、敵対者のターゲット選定を予測し成功裏に敵対者を阻止する対抗部隊の能力にどのように影響を及ぼすかより詳細に検討する。

PR&PP 評価手法は、NES の概念設計段階に適用できる強力なツールとなる可能性を秘めている。今後のケーススタディでは、このアプローチについての更なるエクササイズに取り組み、第 IV 世代 NES の設計指針としての有用性を実証することに努めていく。

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	ウェーバ	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
光照射量	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大きさは同一である。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
電表面電荷	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	ジュール毎キログラム	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
バトン	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。
ベクレル	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 _e =(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

