

# PRAを用いた深層防護の評価の可能性

原子力規制庁  
シビアアクシデント研究部門  
主任技術研究調査官  
濱口 義兼

# はじめに

- 深層防護とは、一般に、安全に対する脅威から人を守ることを目的として、ある目標を持った幾つかの障壁（防護レベル）を用意して、各々の障壁が独立して有効に機能することを求めるもの<sup>1</sup>。
- 深層防護は安全確保のための基本的な「概念」であり、その反映の方法は多様である。
- 原子炉施設の安全確保が適切であるか、確率論的リスク評価（PRA）を活用して、定量的に深層防護の評価を行おうとする取組が国際的に見られる。

1. 原子力規制委員会、「実用発電用原子炉に係る新規制基準の考え方について」平成28年6月29日策定、令和4年12月14日改訂

# はじめに

---

PRAを活用した深層防護の評価に関連する国際機関での動き:

経済協力開発機構(OECD)/原子力機関(NEA):

第24回 WGRISK 年次会合(2023年3月)において、各国で検討されているPRAを用いた深層防護の評価について議論した。

国際原子力機関(IAEA):

2025年3月に開催されたIAEAのテクニカルミーティング「IAEA Technical Meeting on Demonstration of Defence in Depth (DiD) Implementation Using Deterministic and Probabilistic Approaches for Nuclear Power Plants」において、深層防護を適切に評価することに関するTECDOCの作成について議論された。

# はじめに

- 深層防護を評価することは、国際的に求められつつある。
- 深層防護を評価することは、安全確保を様々な視点から検証できることであるため、以下のメリットなどが考えられる。
  - 相対的に施設の脆弱点を示すことができ、脆弱点に対して合理的で効果的な対処設備を検討することで、継続的な安全性の向上に資する。
  - 新しいルール策定の検討における材料になり得る。



深層防護の評価の方法は？

# はじめに

- 今回の検討では、防護レベルをIAEA TECDOC-1791のアプローチ2のものを用いた。  
深層防護、原子炉施設の設備、PRAの関係は下表。

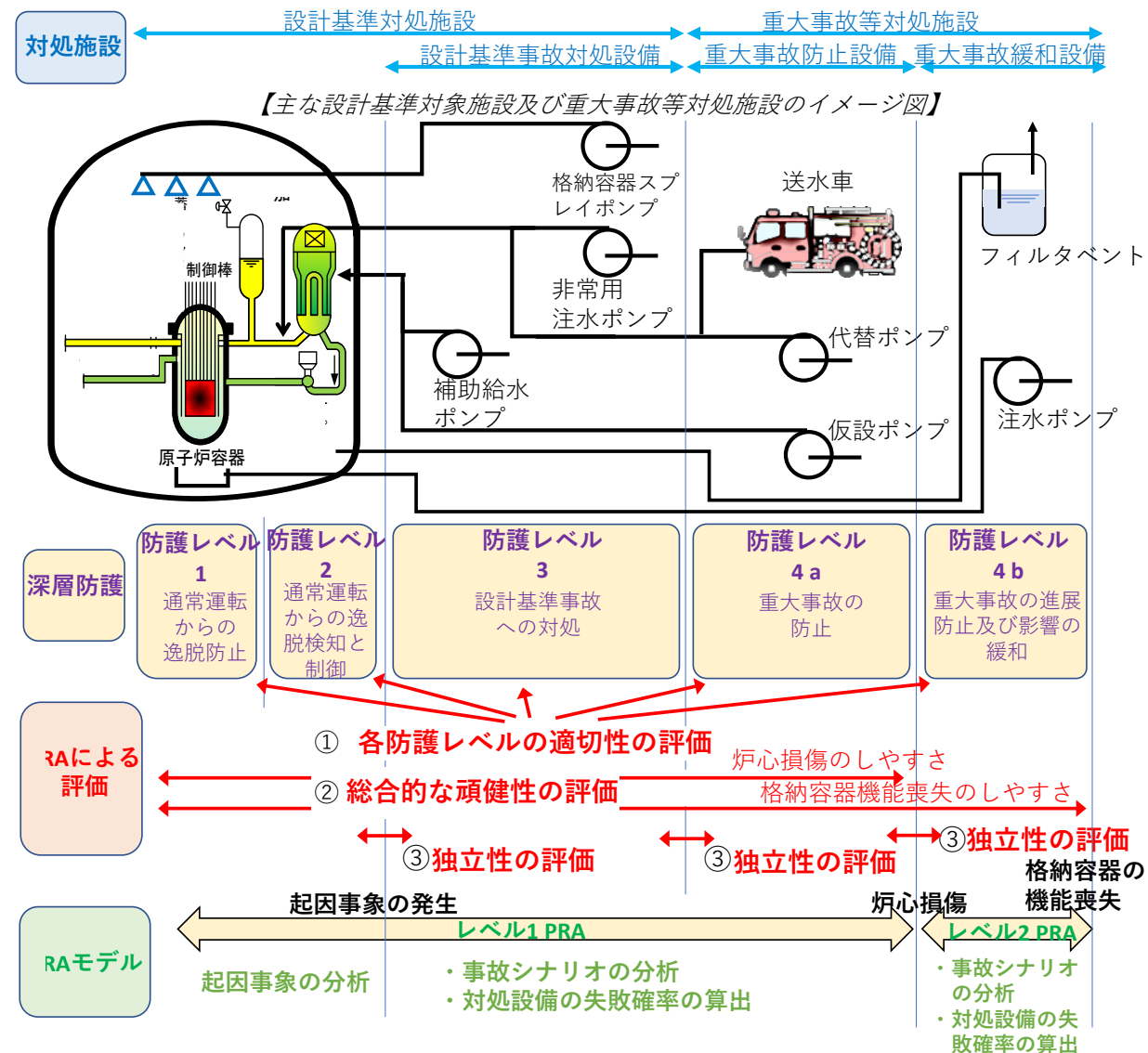
深層防護	防護レベル 1	防護レベル 2	防護レベル 3	防護レベル 4a	防護レベル 4b	防護レベル 5
	通常運転からの逸脱防止	通常運転からの逸脱検知と制御	設計基準事故への対処	重大事故の防止	重大事故の進展防止及び影響の緩和	公衆を守るための緊急時対応
深層防護に対応する原子炉施設の設備	設計基準対処施設			重大事故等対処施設		防護レベル5は、今回の検討からは外している。
			設計基準事故対処設備	重大事故防止設備	重大事故緩和設備	
PRAでの評価	レベル1PRA : 起因事象の分析		レベル1PRA : 緩和系統の信頼性の評価		レベル2PRA : 放射性物質の放出の評価	レベル3PRA: 放射線被ばくの評価
	機器トラブルの分析	事故の分析	設計基準事故対処設備の故障確率	重大事故防止設備の故障確率	<ul style="list-style-type: none"> <li>・格納容器内で発生する現象</li> <li>・重大事故緩和設備の故障確率</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・放射性物質の大気拡散</li> <li>・種々の経路による放射線被ばく</li> </ul>

# PRAを用いた深層防護の評価の全体像

- PRAを用いた深層防護の評価には様々な切り口や手法が考えられるが、原子炉施設の設備や国際的な深層防護の防護レベルの関係性は右図のようなものが考えられる。

## 深層防護の評価の主な項目：

- ① 各防護レベルの適切性の評価
- ② 深層防護の総合的な頑健性の評価
- ③ 防護レベル間の独立性の評価

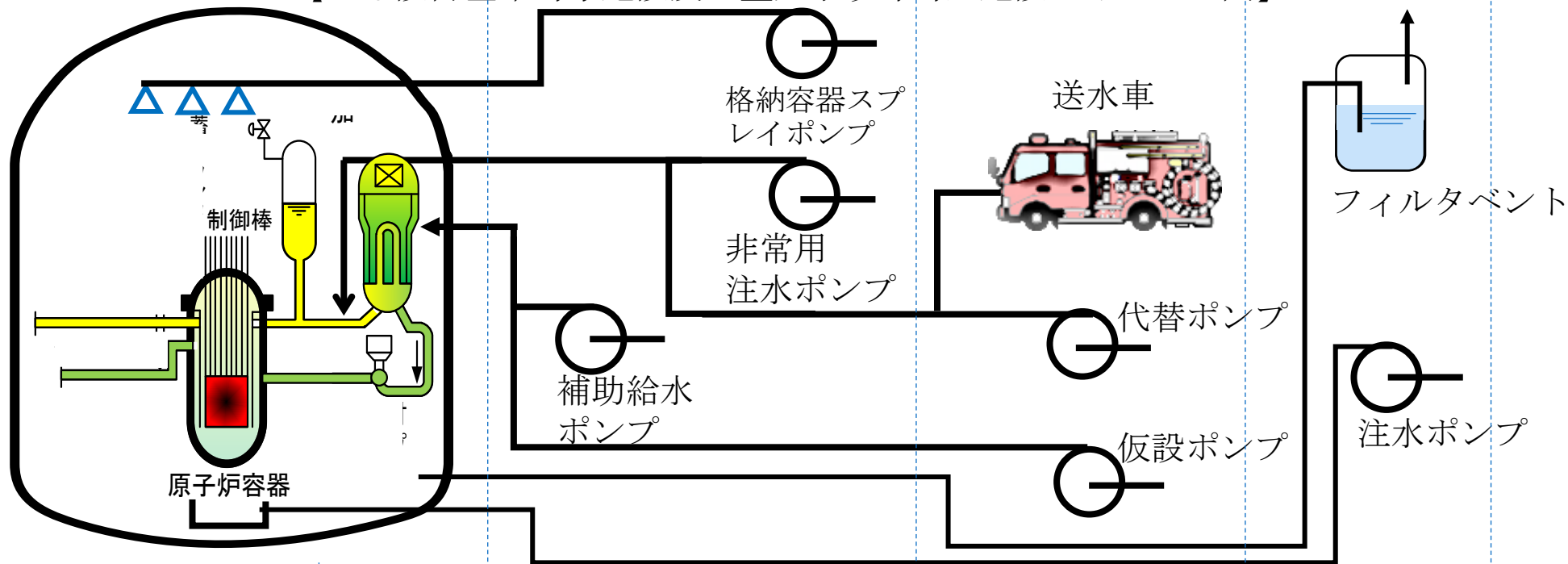


# 設備と深層防護との関係図

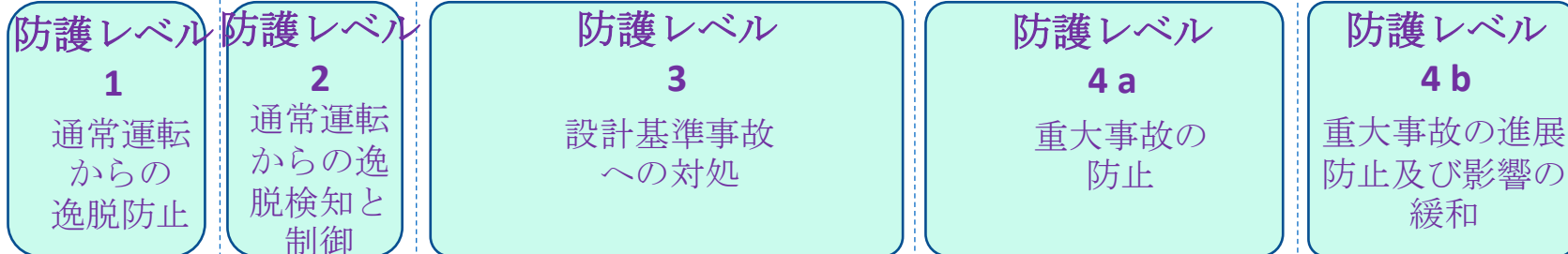
対処施設



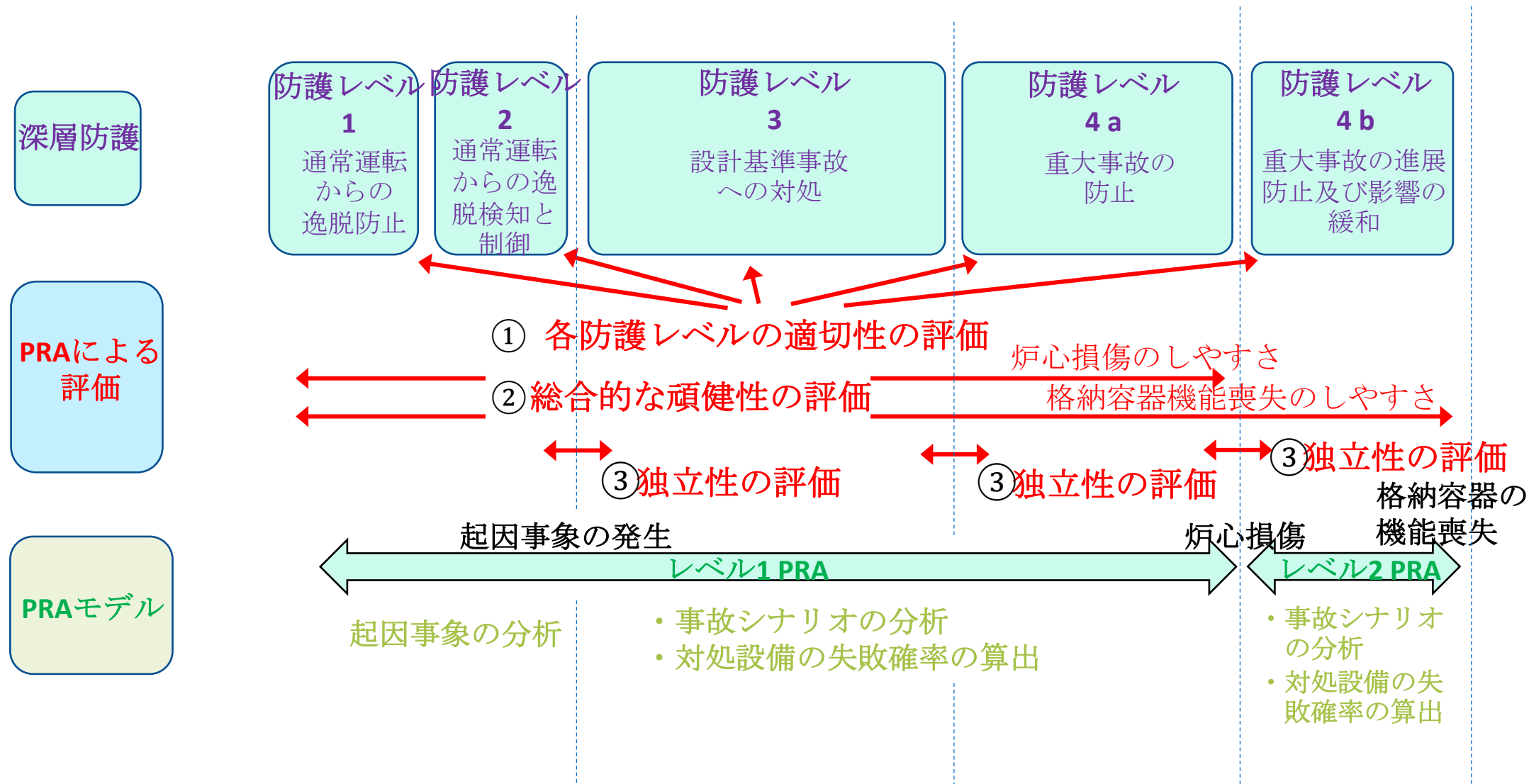
【主な設計基準対象施設及び重大事故等対処施設のイメージ図】



深層防護



# 深層防護とPRAとの関係図



# PRAを用いた深層防護の評価の全体像

## ① 各防護レベルの適切性の評価

機器故障確率から各対処設備の失敗確率を算出することで、各防護レベルの失敗確率を算出する。これらの失敗確率の計算結果を基に、各防護レベル及び各防護レベルを構成する対処設備の弱点を浮き彫りにし、プラントの設計、規制要求等の改善点を見出す。

## ② 深層防護の総合的な頑健性の評価

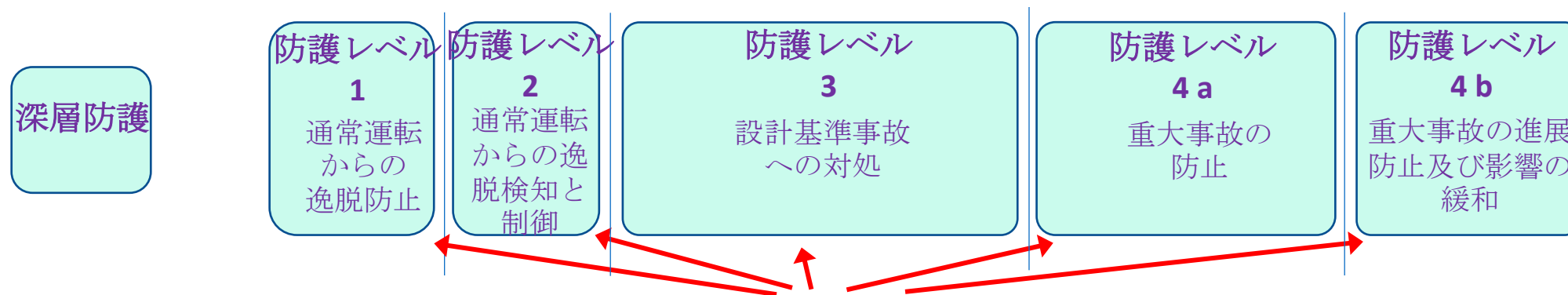
PRAから得られる炉心損傷のしやすさ(防護レベル1～4aに対応)、格納容器の機能喪失のしやすさ(防護レベル1～4bに対応)等を計算する。事故シナリオ毎の炉心損傷のしやすさ等を比較することで、深層防護の総合的な頑健性を評価し、またその弱点を浮き彫りにし、プラントの設計、規制要求等の改善点を見出す。

## ③ 防護レベル間の独立性の評価

前段の防護レベルにおける機器の故障及びその故障原因による、後段の機器の故障や機器の持つ機能劣化への影響の有無を確認する。また、仮に影響があった場合の影響度を確認する。

# ①各防護レベルの適切性の評価

- 各防護レベルの適切性を評価するための方法案として、例えば以下の2通りが考えられる。
  - a)条件付き確率の算出
  - b)対処設備の故障確率の算出



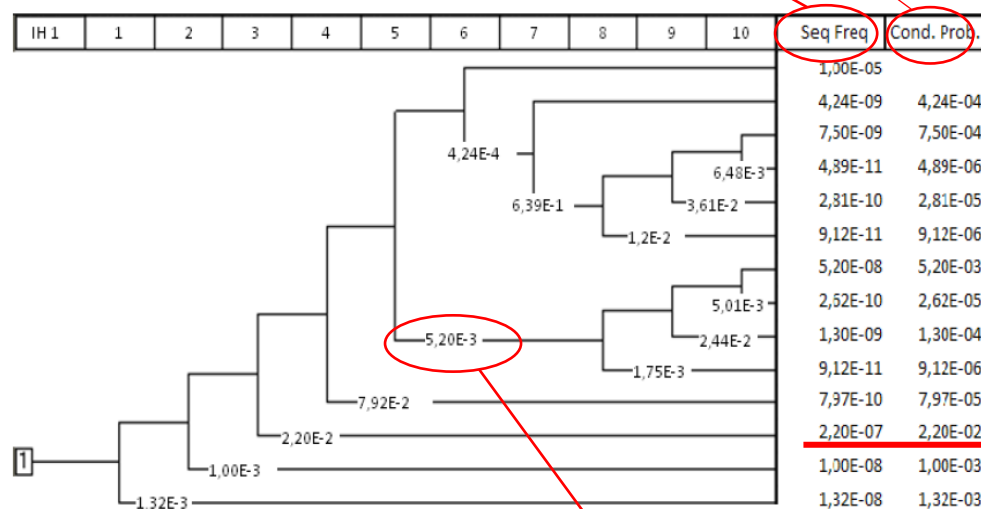
① 各防護レベルの適切性の評価

# ①各防護レベルの適切性の評価

## a) 条件付き確率の算出

起因事象が発生した条件下での炉心損傷確率や格納容器の機能喪失確率は、各対処設備の機能喪失のしやすさを計算している。各防護レベルを構成しているのは各対処設備であるため、条件付きの炉心損傷確率や格納容器の機能喪失確率は、各防護レベルの脆弱性を示していることになる。

各事故シーケンスにおける起因事象が発生した条件下での炉心損傷確率  
各事故シーケンスの頻度



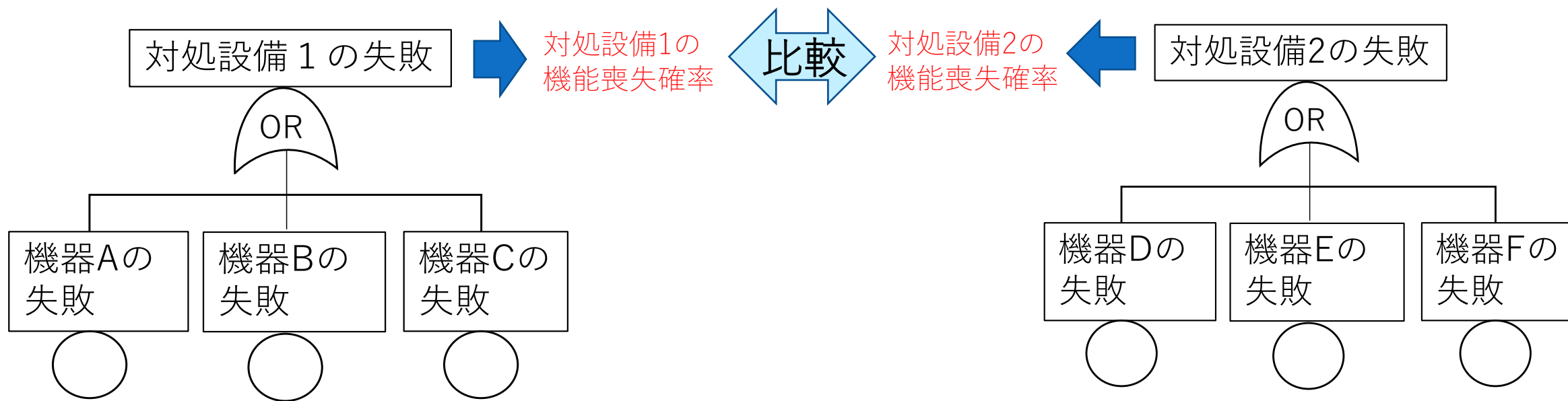
(Per Hellström, “DiD-PSA: Development of Framework for Evaluation of Defense-in-Depth with PSA, Swedish Radiation Safety Authority, 2015:04, January 2015.より抜粋し日本語加筆)

各分岐の失敗確率：各対策（系統）の失敗確率

# ①各防護レベルの適切性の評価

## b) 対処設備の故障確率の算出

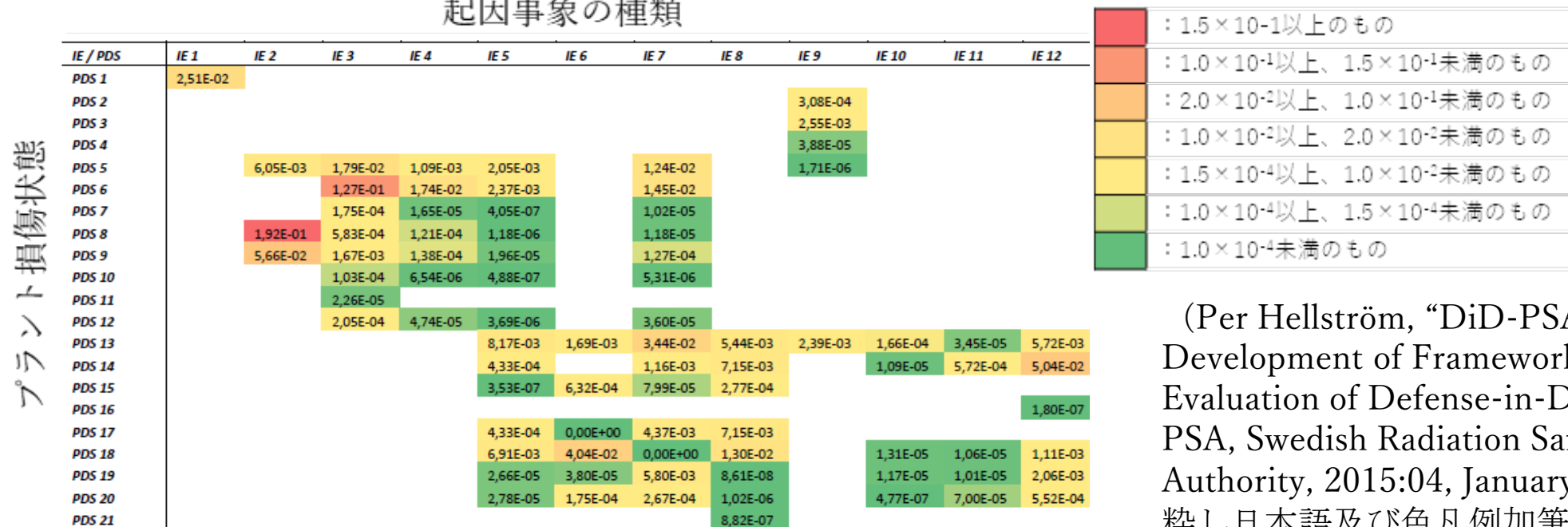
PRAモデルのフォールトツリーを用いて、各防護レベルを構成する対処設備が機能喪失する確率を計算する。対処設備毎に機能喪失する確率を比較することで、信頼性の高い設備及び信頼性の低い設備が特定できる。



# ①各防護レベルの適切性の評価

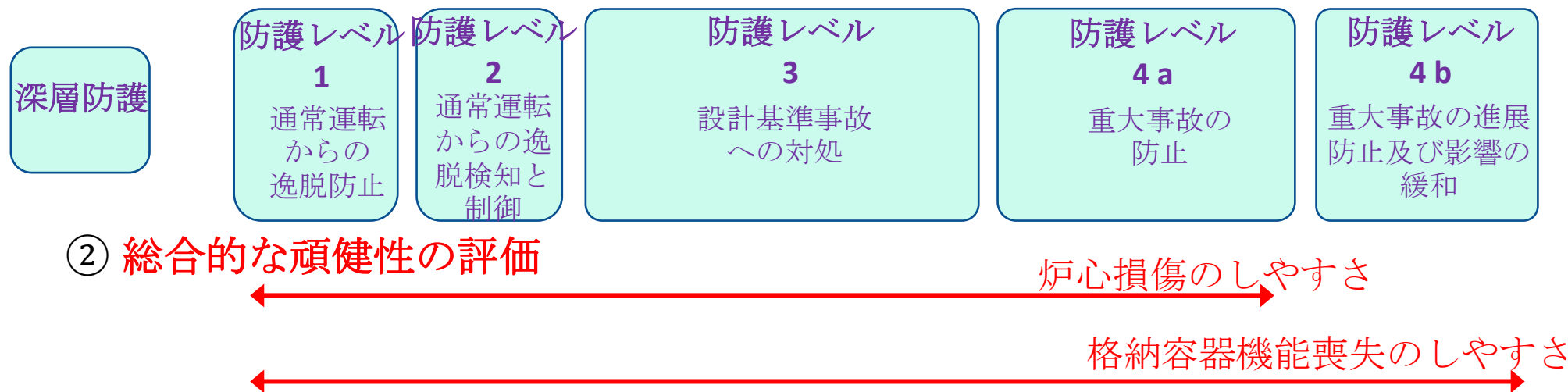
- 炉心損傷となるシナリオは多いため、防護レベルの適切性については、網羅的にかつ体系的に防護レベルの適切性(脆弱性)を評価する必要がある。

## スウェーデンSSMの検討例(防護レベル3) 起回事象の種類



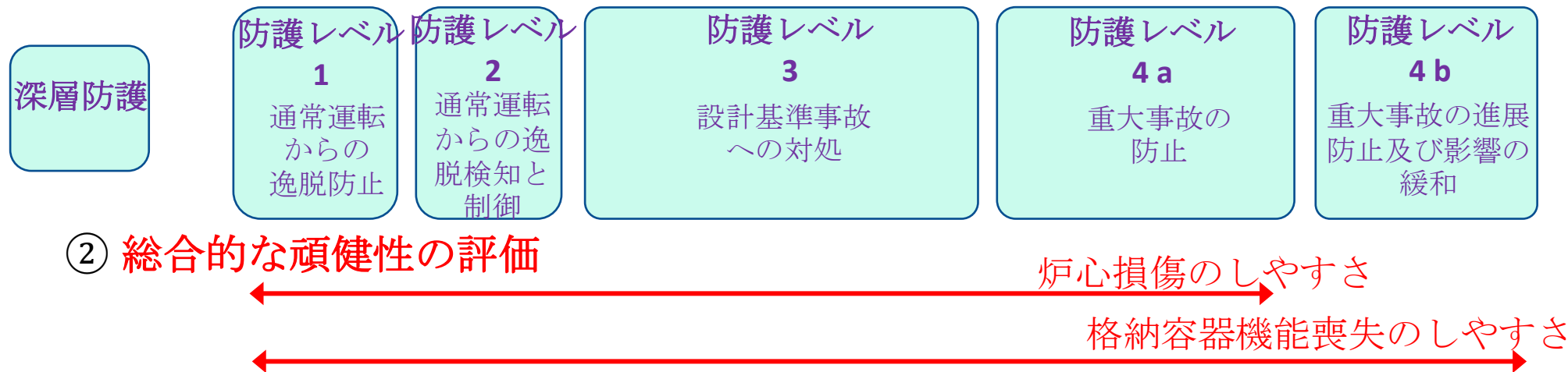
## ② 深層防護の総合的な頑健性の評価

- 深層防護の総合的な頑健性を評価する方法案として、PRAから得られる事故シナリオ全体もしくは事故シナリオ毎の炉心損傷頻度や格納容器の機能喪失頻度を算出する方法が考えられる。
- 起因事象が発生した条件下での事故シナリオの発生確率を求めることで、どれくらい炉心損傷に至りやすいかを確認することができる。



## ② 深層防護の総合的な頑健性の評価

### ● PRAから得られる炉心損傷頻度及び格納容器機能喪失頻度の例

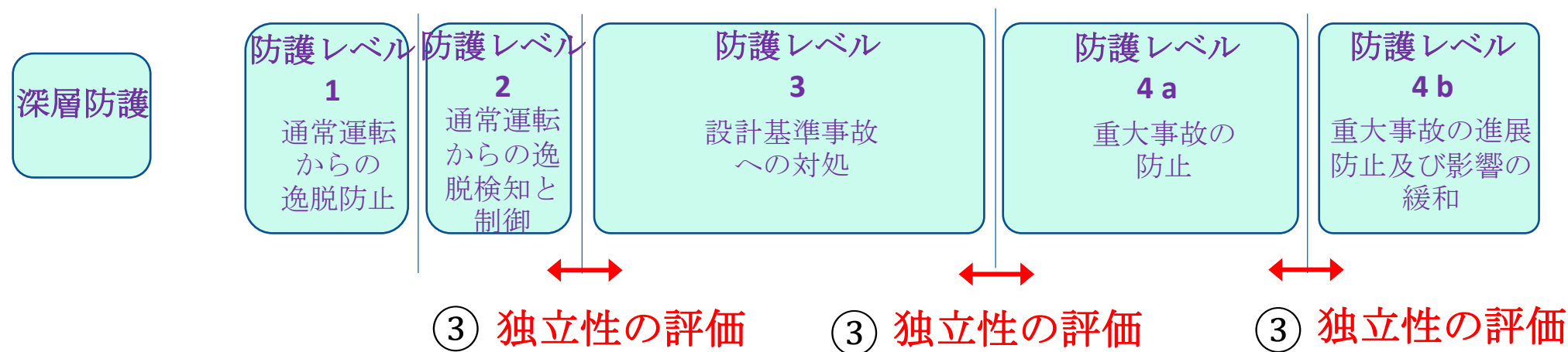


### 高浜3号の場合(第一回安全性向上評価書より)

重大事故対策を考慮しない場合の炉心損傷頻度	$1 \times 10^{-5}$ [/炉年]
重大事故対策を考慮した場合の炉心損傷頻度	$7 \times 10^{-7}$ [/炉年]
格納容器機能喪失頻度	$2 \times 10^{-7}$ [/炉年]

### ③ 防護レベル間の独立性の評価

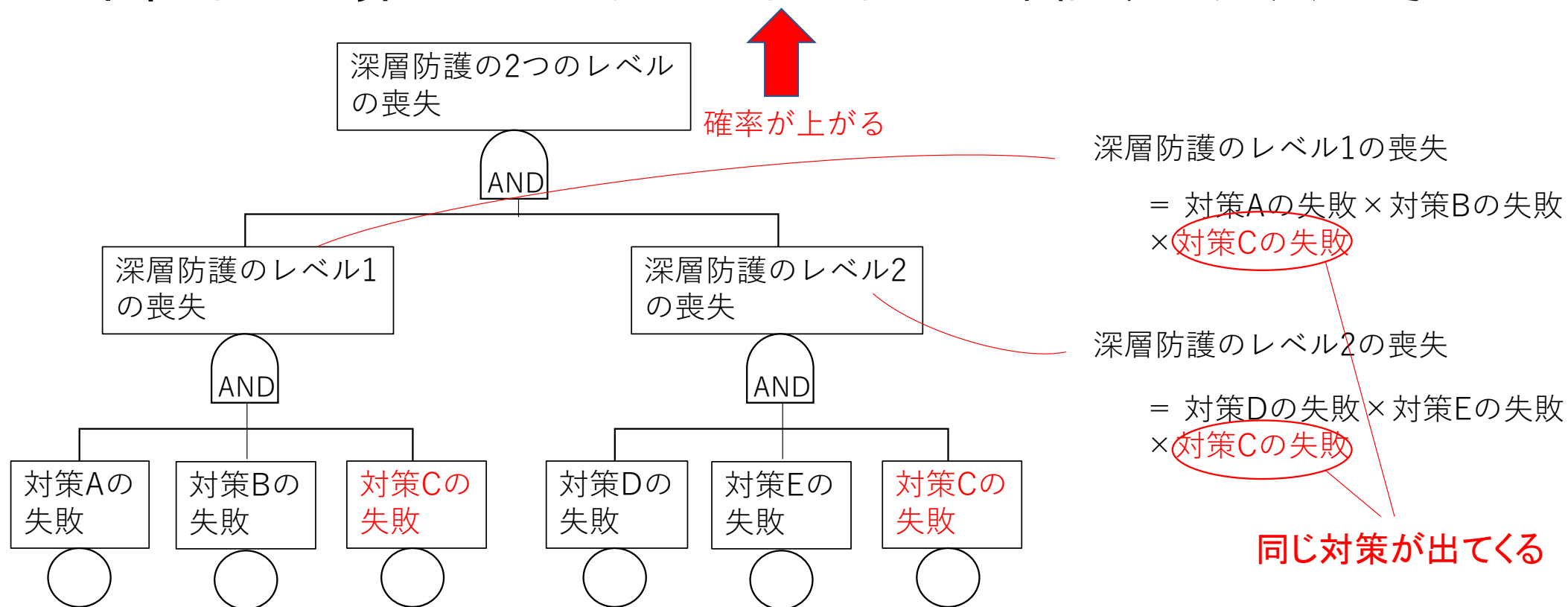
- 深層防護の独立性とは、合理的に実行可能な範囲で、前段の防護レベルにおける機器の故障及びその故障原因が、後段の機器の故障や機器の持つ機能劣化に影響しないことである<sup>1,2</sup>。



1. Andrea Wielenberg, et al., “The Link Between the Defense-in-Depth Concept and Extended PSA,” Technical Report ASAMPSA-E/WP30/D30.7, 2016
2. Western European Nuclear Regulators Association (WENRA), “Safety of New Designs, Study by Reactor Harmonization Working Group, RHWG,” March 2013.

### ③ 防護レベル間の独立性の評価

- 例えば、2つの深層防護の防護レベルを対象にしたフォールトツリーを用いて、2つの防護レベルが喪失する確率を計算する。この計算結果から、2つの防護レベルが喪失する確率が、各々の防護レベルの喪失する確率の単純なかけ算と比べて大きくならないか確認する方法が考えられる。



# まとめ

- PRAから得られる情報は、炉心損傷等の頻度に加え、系統の非信頼度（失敗確率）、事故シーケンス毎の発生頻度、機器の重要度等、多岐に亘る。  
このような情報を組み合わせることにより、これまで定性的にあるいは決定論的に評価してきた深層防護の頑健性、適切性及び独立性に対して、いろいろな角度から定量性をもって評価することが可能になる。
- PRAを用いた深層防護の評価については、評価手法の検討が必要な部分は残されているが、これまでのPRAに関する安全研究や規制活動の成果を活用し、また欧米諸国の取組を参照しつつ、有効な手法を検討することが重要であると考えられる。

ご清聴ありがとうございました

