

AESJ-SC-TR005 (ANX):2013



甲第  
267  
号証

原子力安全の基本的考え方について  
第I編 別冊  
深層防護の考え方

標準委員会 技術レポート

2014年5月

一般社団法人 日本原子力学会  
標準委員会

## 第 I 編別冊「深層防護の考え方」の発刊にあたって

平成 23 年 9 月から日本原子力学会標準委員会の傘下に原子力安全検討会、原子力安全分科会を設け「原子力安全の基本的考え方について」を検討してきた。標準委員会は標準の制改定をその任務としているが、標準委員会発足当時、「安全原則（基本理念）も整備されるべき」との活動方針を明示してきた。また、標準の策定の検討は、原子力安全の意味や目的などを常に念頭に置いて行うべきと考えて活動している。そこで、これを明文化し、活動の拠り所とすべきと考え、「原子力安全の基本的考え方について 第 I 編 原子力安全の目的と基本原則」を平成 25 年 6 月に発行した。

このたびは、その議論中において特に重要であり、共通の認識が必要であるとして「深層防護の考え方」を取り出してとりまとめ、別冊として発刊するものである。福島第一原子力発電所事故の教訓としても、深層防護の適用は重要なものとして扱われている。しかし、深層防護は基本概念であり、その解釈と適用は諸外国においても議論を継続しているところである。そこで我が国の関係者が原子力発電所の安全確保・向上に資するために、深層防護に関して共通の基本認識を記載したものが必要と考え、IAEA、NRC などの文献をまとめ、適用に際しての論点についても検討した。これを国内の関係者に広く共有し、深層防護の概念の適用に際して、関係者が拠り所とできるように、ワークショップなどを開催する予定である。

なお、引き続き、「原子力安全の基本的考え方について」は、第 II 編「原子力安全確保のための基本的な技術要件」の策定を進めており、さらに関係学協会とも協働して規格・標準体系について検討を進めていく予定である。

平成 26 年 3 月

一般社団法人 日本原子力学会

標準委員会

委員長 宮野 廣

原子力安全検討会

主査 田中 知

## 深層防護とは何か

福島第一原子力発電所事故では、設計想定外の大きな津波により複数プラントの建屋設置エリア全域にわたって海水が浸水し、多くの安全上重要な設備が機能を喪失したため、炉心損傷事故（シビアアクシデント）が発生し、放射性物質が大量に周辺に放出されて多くの住民の方の長期間の避難が余儀なくされ、現在もその状態が続いている。

この事故の最大の背景要因として、IAEA 閣僚級会合報告書や NRC の NITF 報告書等の多くの報告書において、深層防護の実践に不足があったとして、なぜ深層防護が原子炉の安全確保に有効に働かなかったのかについて多くの頁を割いて体系的に考察している。そして、新しく策定された我が国の規制基準の根幹にもリスクと深層防護の概念が導入されている。しかし、深層防護の概念は論理的で簡明である一方、その適用性が広く多様であるが故に、多重に層を設けることだけに注目してしまうなど、深層防護の正しい理解が不足している局面が見られる。また、深層防護は基本概念であるので、それだけでは安全性の向上の「万能薬」ではない。適用し、それを如何に改善していくか、に着目しなければならない。

そもそも、深層防護とは、人と環境を守るという原子力の安全確保の目的を達成するための方策を構築する考え方を定める基本概念であり、安全対策の妥当性を社会に説明し、信任いただくものである。具体的には、ハザード（原子力施設の場合には放射性物質）と防護すべき対象である人と環境の間に複数の層を置くことにより、特定のハザードが防護すべき対象にとって顕在リスクとならないように、すなわち、特定のハザードがもたらすリスクを許容できるレベルまで低減しようとするものにつながるものである。

深層防護の具体化を考える上でポイントとなる点は、①深層防護の目的（防護の対象）、②深層防護で防ぐハザード（放射性物質）、③望ましくない状態を決定、である。望ましくない状態の定義により、例えば、望ましくない状態を原子炉の状態の観点とするのか、公衆と環境への影響の観点とするのか、規制に使うために設計基準の観点にするのか、等によって複数の層の定め方は多様である。従って、層の数がいくつかというのは本質の問題ではなく、ハザードの質と規模、防護に係る不確かさ或いは知見の程度に応じて、深層防護を適切に実装することが重要である。

次に重要なのは、深層防護を用いて実効的に安全性向上を図る際にリスク評価、リスク管理を徹底することである。深層防護を用いて全体を俯瞰してバランスよく信頼性を強化し、真に質の高いロバストな原子力安全を確保するには、設計段階はもとより運転段階においても、最新知見や研究成果、事故の教訓等を活かすことにより、深層防護の適用になお残る不確かさへの対応が不十分ではないのかを絶えず問いかけ、継続的に改善する姿勢が大事である。そういった改善の効果を分析し把握し、安全目標に照らして効果的かつ効率的な改善を着実に進めていくことが重要である。

本書では、深層防護についての理解と深い洞察を持って、原子力関係者が安全確保対策に取り組んでいただけるように、日本原子力学会が刊行している「原子力安全の基本的考え方について 第 I 編 原子力安全の目的と基本原則」(AESJ-SC-TR005)の別冊として、深層防護の考え方に関する共通的な認識と、それらに関する論点を纏めた。とり纏めにあたっては、原子力安全検討会 原子力安全分科会の深層防護ワーキンググループにおいて検討・整理が行われ、同分科会及び検討会において審議された。本書が基となって、原子力関係者の間のみならず社会との対話により深層防護の考え方に関して共通の認識が形成されるとともに、それぞれの分野への適用において活発な議論のもとに適切な実装がなされ、それらに関する活発な情報共有や意見交換が行われること、それによる安全確保に対する信頼が得られることを望んでいる。

平成 25 年 12 月  
原子力安全分科会  
主査 山口 彰

目 次  
(第 I 編 別 冊 深層防護の考え方)

1. はじめに .....	1
2. 深層防護の考え方とは何か .....	2
2.1 深層防護の概念 .....	2
2.2 原子力安全のための深層防護 .....	2
2.3 防護レベルの設定の考え方 .....	4
3. 深層防護の概念の具体的な適用と論点 .....	7
3.1 深層防護の概念の適用と関連事項の整理 .....	7
3.1.1 防護レベルの設定に関する適用とこれまでの認識 .....	7
3.1.2 各防護レベルの信頼性に関する適用とこれまでの認識 .....	9
3.1.3 関連事項の整理 .....	12
3.1.4 論点とする項目のまとめ .....	13
3.2 深層防護の概念の理解のための論点 .....	13
3.2.1 設計要求範囲と設計評価に関する整理 .....	13
3.2.2 Design Extension Conditions (DEC) の持つ意義とは何か .....	16
3.2.3 各防護レベルの有効性が独立であることの一考察 .....	20
3.2.4 設計基準を超える外的ハザードに対する取組み .....	21
3.2.5 深層防護の有効性評価 .....	22
3.2.6 原子力安全規制の中で深層防護をどのように考えるか .....	23
4. まとめ .....	27
5. 解説 .....	28
参考文献 .....	33
付録 1. 分科会, 検討会, 標準委員会 委員名簿 .....	35
付録 2. 会合と報告会等の実績 .....	38
添付資料 各機関における深層防護の防護レベルの分け方 .....	40
あとがき .....	73

## 解 説

解説 1：深層防護の考え方について .....	28
解説 2：深層防護の概念を効果的に適用するための前提条件 .....	28
解説 3：深層防護と多重障壁の関係 .....	29
解説 4：設計における外的事象への深層防護の適用 .....	30
解説 5：リスク評価と深層防護の関係 .....	31
解説 6：ストレステストの意義 .....	31

## 1. はじめに

本書は、日本原子力学会にて刊行している「原子力安全の基本的考え方について 第Ⅰ編 原子力安全の目的と基本原則」(AESJ-SC-TR005)の別冊として、深層防護の考え方について共通認識と論点をまとめたものである。

### (1) 本書の目的

「原子力安全の基本的考え方について：第Ⅰ編 原子力安全の目的と基本原則」(AESJ-SC-TR005)では、基本原則を大きく3カテゴリ(「責任とマネジメント」、「人及び環境の防護」、「放射線リスク源の閉じ込め」)に分類しており、「深層防護の考え方」は、「放射線リスク源の閉じ込め」を実現し、原子力の安全を確保するための重要な概念である。

国内外において、これまでに深層防護の観点から様々な安全設計の方針が記述されてきた。それらはいずれも深層防護の概念に対して概ね一致した考え方によっている。しかしながら、福島第一事故が深層防護に対する取組みの不足に起因するものであることを踏まえ、今後、原子力安全を向上させていく上で、深層防護について原子力関係者が共通の認識を持って議論し、深層防護の概念を深化させていくことが、二度とこのような事故を起こさないようにするために極めて重要なことと考える。

本書では、

- ・そもそも原子力安全における深層防護とは何かということを共有化すること
- ・これまでの原子力安全への深層防護の具体的な適用を調査するとともに、必ずしも体系的に整理できてはいないものの原子力の安全確保に関する様々な事項と深層防護との関連に係る論点について整理することで原子力関係者間で論点が共有・認識され、深層防護の概念の適用が原子力の安全確保をより効果的なものにしていくための手段となる足掛かりとなること

を目的としている。従って本書では、具体的な防護レベルの数や深層防護概念の原子力施設への具現化の提案を行うものではない。

### (2) 本書の構成

本書では、まず第2章において原子力安全における深層防護とはどういうものかについて論じ、各深層防護レベルを設定する際の考え方を提示することで、原子力安全における深層防護概念の考え方の共有化を図っている。

次に第3章では、論点とした事項について、3.1節にて論点を展開する上で必要となる共通の認識をまとめるとともに、3.2節にて具体的な論点の展開を行っている。

また、原子力施設への深層防護概念の適用とは直接は関係が無いものの、原子力安全の向上にとって必須である規制についても、深層防護の考え方をどう取り入れるべきかについて論じている。

## 2. 深層防護の考え方とは何か

### 2.1 深層防護の概念

「深層防護の考え方」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、ある目標をもったいくつかの障壁（以下「防護レベル」）を用意して、あるレベルの防護に失敗したら次のレベルで防護するという概念である。

この概念を適用して高い安全性を確保するためには、信頼性が高く、かつ共倒れしない防護レベルを、脅威に対して幾重にも準備しておく必要がある。すなわち、ある防護レベルがどんなに頑健であったとしても、単一の防護レベルに完全に頼ってはならず、一つの防護レベルが万一機能し損なっても次の防護レベルが機能するようにしなければならない。

こうした深層防護の概念は原子力に特有のものではないが<sup>1</sup>、原子力の利用においては、炉心に大量の放射性物質を内蔵している原子炉施設のように、人と環境に対して大きなリスク源が内在し、かつどのようにリスクが顕在化するかの不確かさも大きいという化学プラントや航空機などと同様の特徴があることから、不確かさに対処しつつ、リスクの顕在化を徹底的に防ぐために、深層防護の概念を適用することが有効と考えられている【解説1参照】。

なお、防護レベルの目標を達成するための手段（以下「防護策」）としては、物理的な障壁の他、例えば制御・管理や緊急時における対応手段といったものがある。

### 2.2 原子力安全のための深層防護

#### (1) 原子力安全の特徴

一般産業や社会的活動についても、我々の生活に影響を及ぼすリスクがあるという面では、原子力施設の場合と同じである。ただし、原子力施設は放射性物質を内蔵しているので、他の産業などが有するのと同種の危険があるだけでなく、放射線影響という原子力固有のハザードが存在する。さらに、万一、大量の放射性物質が放出される事故が発生した場合には、広範囲かつ長期間、人と環境に深刻な影響を及ぼすという特徴を持っている。特に、原子炉施設の場合は、福島第一原子力発電所事故のように、放射性物質が大量に放出されてしまうと、周辺住民の放射線影響を防ぐための避難や居住制限などの施策によって、生活への影響が出るなど社会的な影響が大きい。このような原子力固有の特徴を踏まえて、放射性物質の放出を抑制し、放射線影響の顕在化を徹底的に防ぐため、原子力安全を確保する取り組みが必要である。

このため、原子力安全の基本的な目的は、原子力の施設や活動に起因する放射線の有害な影響から人と環境を防護することであり、原子力施設の安全確保の目標は、人や環境に放射線の有害な影響を与えるような事故の可能性を確実にきわめて低いものとする

<sup>1</sup> 例えば、軍사용語では“縦深防御（じゅうしんぼうぎょ）”という。その意味は攻撃側の軍勢を停止させるのではなく、占領地を与えつつ時間を稼ぎ、遅延させることを目的とした戦略であり、対義語としては“水際作戦”がある（Wikipediaより）。

ことである。

## (2)原子力安全のための深層防護

原子力施設に限らず一般産業や社会的活動を含めて一般に、ある一つの対策が完璧に機能するのであれば、対策はそれだけで十分なはずである。一方、対策はある想定に基づいて考えられるため、その想定から抜け落ちる事項や人知が及ばない事項が存在することは否定できない。原子力施設の場合、人と環境を防護するにあたって、放射線や放射性物質が制御されずに環境中に放出される原因にも、それらが人と環境に影響を与えるまでの種々の現象にも、人知が及ばない振る舞いが存在しうる。すなわち、人と環境に影響を与えるまでの諸現象や対策やその対策の効果には不確かさが存在するため、一つの対策のみでは完璧な対策とはなり得ない（形あるものは必ず壊れるし、思うように動かない、対処できないこともある）。事前には充分と思われた対策でも思いがけない理由で失敗するかもしれないという不確かさの影響を考慮して、別の対策、次の防護レベルの対策と繰り返すことにより、人と環境に対する一連の防護策全体の実効性を高めることが必要となる。このように、一つの対策では防げないという不確かさを考慮して、放射線リスクから人と環境を護るための防護策全体の実効性（成功確率）を高めるために適用されるのが原子力安全のための深層防護の概念である。

## (3)防護策の実効性を高めるための考え方

防護策全体の実効性を高めるために様々な対策がなされるが、この対策を多層とすることを基本的な考え方として、積極的な防護策を講じている（重要な戦略としている）。具体的な対策には、想定する事象に対して、複数の防護レベルでさまざまな手段を用意しておく、すなわち、設計基準事象という想定の中で対策することが基本であり、少なくとも TMI 事故までは、この設計基準事象を厳格に運用することで十分な安全性が確保できると考えられていた。一方、現実世界で発生する事故（特にシビアアクシデント）には、設計基準事象で想定したシナリオを逸脱する、多重故障やヒューマンエラー（特にコミッションエラー）、外部事象が関与する場合がある。すなわち、定められた設計基準事象に対して備えるのみでは高い安全を達成するには十分ではない（現実の事故には完全には備えることはできない）と考えるべきである。このことは、設計基準事象の想定の不完全さに伴う不確かさを示すものであり、不確かさに対する備えを用意する、つまり、不確かさに備えて対策を多層とすることで、防護策全体の効果（成功確率）を高めることができる。放射線影響が抑制され、リスクが低く維持されるようになるように、対策を多層とすることが必要である。ここで、リスクの低減効果を評価するためには、目指すべきリスクの抑制水準（安全目標）やこれを満たすための性能目標といった指標が必要である。



#### (4)原子力安全を確保するための普遍的な考え方

以上のように、我々が最善を尽くし万全を目指して設計したシステムであっても、なおかつ安全を損なう事象が発生しうる可能性は排除できないとして、そのような不確かさにも適切に対応できるように対策をとる考え方が「深層防護の考え方」である。つまり、「深層防護の考え方」は、不確かさに対する備えであり、原子力安全を確保する上で、想定外は存在するということを考慮して事前に対策しておくために不可欠な考え方である。具体的な対策は、それぞれの原子力施設により異なるものとなりうるが、「深層防護の考え方」は原子力安全を確保するための普遍的な考え方となっている<sup>2</sup>。

### 2.3 防護レベルの設定の考え方

「深層防護の考え方」に基づく対策を有効なものとするためには、防護レベルの設定について次のような考え方が大切である。

#### (1)各防護レベルの信頼性

それぞれのレベルで最善を尽くすことで、初めて全体としての効果が期待されるものであって、他のレベルに依存して対策を考えるものではない。例えば、あるレベルの対策が十分になされているのだから次のレベルでは甘くても良いとか、逆に、次のレベルでの対策があるからこのレベルは甘くても良いといった考え方をとってはならない。また、他のレベルに依存して対策を考えるものではない。さらに、あるレベルの対策に欠陥があるから、次のレベルの対策が必要とされるのだというように理解すべきではない。各レベルの十分な対策を前提にして、あえてその効果が十分でなかった場合に備えて対策を多層にするという考え方である。現実には事故が起きた場合には、あるレベルの取り組みが不十分であったことが事後に分析されるが、事前の計画としては、可能な限りの知見を駆使して対策をとっておくという考え方である。各防護レベルの防護策の信頼性を高めることは、高い安全性を実現するためには不可欠な取り組みである。

深層防護の考え方を各防護レベルで効果的に適用するためには、確固たる安全文化を前提とした上で、適切な保守性を考えること、及び品質保証を、全ての防護レベルにおける全ての方策に適用することが前提となる【解説 2 参照】。また、各防護レベルの信頼性は、単なる設備設計の対応だけでなく、適切な立地の選定、製造、建設、試運転、運転及び保全、体制（組織、人員、力量）等を含めた対応により高められるものである。そして、運転経験をフィードバックすることは、不確かさが表出した例に学び防護策を

<sup>2</sup> 「改訂 原子力安全の論理」（佐藤一男）では、「・・・多重防護と言う考え方は、私たちの身近なところにも存在している。例えば、健康管理の原則がそれである。・・・まず必要なことは、・・・病気にならないように普段から気を付けることで、・・・次には、病気になりかかった時にこれを早期に発見して早期に治療することで、・・・第三レベルでは、・・・病院などの医療施設を充実しておくことである。」としており、深層防護の考え方は、一般に安全や信頼性確保の考え方として存在する。原子力利用の場合は、その影響が大きいため「深層防護の考え方」という用語を象徴的に用いていると考える。

強固なものとしていく継続的改善活動の重要な取り組みである。このように、深層防護の考え方を効果的に適用し防護策の信頼性を高めるためには、設備（ハード面）と運用（ソフト面）の両面からの取り組みが必要であり、運転経験に学ぶ活動が重要となる。

## (2)各防護レベルの独立性

複数の防護レベルが全て機能しなかったときに、人或いは環境に対する有害な影響が引き起こされる。深層防護の考え方で不可欠な要素は、異なる防護レベルが、各々独立して有効に機能することである。そのため、ある防護レベルにおける設計、機能、対策等が、他の防護レベルのそれらにとって障害とならないようにしなければならない。ある防護レベルが他の防護レベルの機能失敗によって従属的に機能失敗することがないことを含め、各防護レベルが独立な効果を発揮するように設計を行うことが必要である。なお、防護レベルの設定の仕方によっては、独立な効果を発揮する具体的な対策が存在しなくなる場合もあり、深層防護の考え方が適切に適用できなくなる場合がある。また、各防護レベルの独立性を確保するためには、想定外がありうることを考慮して、全く異なる取り組み（例えば、設備や機器などのハードウェアだけに頼った対策だけではなく、マネジメントによる対策など）をとることも有効である。

## (3)防護レベルのバランス

一方、各防護レベルが各々独立して有効に機能することが必要であるが、これは各防護レベルが相互に無関係に考えられるべきということの意味するものではない。防護策全体の性能を高めるためには、各レベルが適切な厚みを持ち、各レベルの防護策がバランスよく講じられ、あるレベルの防護策に負担が集中しないことが重要である。

## (4)防護レベルでの不確かさへの対処

「深層防護の考え方」に基づく防護策が全体として有効に機能するためには、「効果が独立な防護レベルの設定」と「それぞれの防護レベルの信頼性」が必要な要素である。防護レベルの信頼性について、安全確保のための想定や具体的方法にはいずれも不確かさが含まれており、このため結果として、人と環境への放射線影響のリスクを完全にゼロとすることはできず、さらに、リスクを完全に把握して厳密に定量化することも不可能であるため、想定する条件に対して裕度を確保することによって、想定を超える条件に対しても頑健性が期待できるようにし、リスク並びにその不確かさに対処するという考え方がとられている。

## (5)その他の留意すべき事項

ところで、「深層防護」という言葉が、多重障壁や物理的障壁といった狭い意味で受け取られる場合や、直接ハードウェアをイメージした意味でとらえていると見られる場合、

物理的障壁の数と認識している場合が見られるが、「深層防護の考え方」とは、基本的な考え方であり、個別のハードウェアと直接的に対応するものではないことを強調したい。さらに、例えば「設計基準事象を深層防護の第三層」と表現するように、プラント状態と深層防護を関係づけるとらえ方も多く見られるが、これについても深層防護の考え方に基づいた対策の実現方法の一つである（一つにしか過ぎない）という理解が必要と考える。

防護策を具体化するためには、脅威となる事象やハザードを想定することが必要である。脅威となる事象やハザードは、その原子力施設への影響がそれぞれ異なるので、リスクの内容並びにリスクの不確かさに応じて、安全確保のために必要な防護レベルや個々の防護策は異なるものになりうる。

リスクの内容並びにリスクの不確かさについての認識は、運転経験や知見の蓄積とともに変化し、予測の不確かさも変化していく。知見の蓄積並びに洞察によって極力、排除する努力を継続することが必要である。リスクへの寄与が小さいことが明らかでない限り放置してはならず、リスクの定量化のための努力を継続するとともに、定量化が不完全な段階であっても合理的に実行可能な対策を検討することが必要である。合理的に実行可能な範囲は、技術の進展及び評価手法の進歩によって変化するものであって、このような変化を適切に取り込むことを含めて、継続的な改善が図られるべきである<sup>3</sup>。

防護レベルについては、これまでもいくつかの分け方が提案されているが、基本的には、①ある防護レベルの維持及び②ある防護レベルが突破されたときの影響の緩和（もしくは次のレベルの維持）といった段階的な防護レベルで整理することができる。施設の特性に加えてリスクの内容や程度など、施設に想定される脅威やその程度によって、防護レベルの分け方や内容を設定することが適切であり、それぞれの施設によって設定される防護レベルは異なるものとなりうる。

---

<sup>3</sup> このような取り組みについて、同様な考え方が米国においても NUREG-2150 で提唱されている。