

一桁上の安全性を目指す シンプルで理想的な原子力発電所 NPP-SI シリーズ



国立大学法人長岡技術科学大学 システム安全工学研究室
株式会社安全科学総合研究所

ご挨拶

世界は今、気候変動問題への対応とエネルギー安全保障の確保という二つの重要かつ困難な課題に直面しています。地球の平均気温の上昇を 1.5℃に抑えるためには世界全体で CO₂ 排出量正味ゼロを 2050 年初頭、2℃に抑える場合は 2070 年初頭に達成しなければならないと予測されています。また、2022 年にはロシアによるウクライナ侵略が行われ、世界のエネルギー情勢は激変しました。

日本政府は、2035 年度の温室効果ガス排出量を 2013 年度比 60%削減、2050 年までにカーボンニュートラルの実現という国際公約を掲げています。また、ロシアによるウクライナ侵略は、日本のエネルギー供給体制がぜい弱であり、エネルギー安全保障上の課題を抱えたものであることを改めて認識させました。

このような中で、日本は、脱炭素と安定供給を両立するために、発電段階で二酸化炭素を排出せず、海外情勢の影響を受けにくい再生可能エネルギーと原子力発電を中心にエネルギーを供給することが必要です。

原子力発電は東京電力福島第一原子力発電所事故後に施行された新規制基準をクリアして再稼働されたものは限定的です。廃炉になるものもあります。エネルギー供給において一定の役割を果たすためには、原子力発電所の新設が必要となります。

新設する原子力発電所については、先ず第一に、どこまで安全性を向上させるのか、安全システムをどうするのかを考えなければなりません。しかし、いわゆる「新規制基準」は既設炉を対象としたものであり、そのまま適用することはできません。

そこで、福島第一原子力発電所事故の収束対応、事故調査、新規制基準作成、再稼働審査での私の経験と多くの関係者との議論を基に、新設として「一桁上の安全性を目指すシンプルで理想的な原子力発電所」の概念設計を試みました。

今後、概念設計を基本設計に導くためには、多くの専門家の協力を得て開発を進めていく必要があります。

皆様のご理解とご協力を、よろしくお願いいたします。



国立大学法人長岡技術科学大学
大学院工学研究科 教授

株式会社安全科学総合研究所
代表取締役社長・研究所長

山形 浩史

CONTENTS

一桁上の安全性を目指します

シンプルで強固な深層防護

第Ⅳ層の信頼性強化

外部事象に対しては外殻防護

新設を促進するための新たな法整備

概念設計から基本設計へ

一桁上の安全性を目指します

これまでの安全目標・性能目標

旧原子力安全委員会では、規制として、どの程度の発生確率の低いリスクまで管理を求めるのかを定量的に明らかにしようとしてしました。このときの議論は、定性的には原子力発電所によって健康リスクを有意に増加させないということを安全目標にしました。それを定量的にいうと、急性死亡リスクも、がんによる死亡リスクも 10^{-6} /年を超えないということを目指にしました¹⁾。これらには放射性物質の拡散や確率的影響の効果も含まれているため、発電所の性能としては格納容器破損頻度を 10^{-5} /年、炉心損傷頻度を 10^{-4} /年という目標にしました²⁾。

福島第一原子力発電所事故の後に、実際に人が住んでいたところの環境が汚染されて避難後に戻ってこられなくなったということが起こりました。このため、原子力規制委員会では、環境への影響をできるだけ小さくとどめよう、すなわち、粒子状の放射性物質の放出量を少なくしようという考えに至りました。定量的には、事故時のセシウム 137 の放出量が 100TBq（福島第一原子力発電所事故時の放出量の概ね 100 分の 1）を超えるような事故の発生頻度は、 10^{-6} /炉年程度を超えないことを目標にしました³⁾。

安全は時代の価値観とともに変化する

国際的にも国内的にも「安全とは、現在の社会の価値観に基づいて、与えられた状況下で、受け入れられないリスクのレベルでないこと」と定義されています⁴⁾。したがって、安全は時代の価値観とともに変化します。旧原子力安全委員会が安全目標を議論していたのは 2003 年です。今から新設原子力発電所を設計、審査、建設を経て運転を開始するのは早くても 10 年後、そこから短くても 60 年運転するとすれば、2100 年頃まで運転されます。

2100 年頃に運転している原子力発電所が、その「100 年前に議論された目標で良い」と受け入れられるとは到底思えません。より高い安全性が求められるでしょう。

一桁上の安全性を目指す

2100 年頃の人々の価値観を予測することは困難です。過去の傾向としては、他分野ですが交通の安全性への要求が高まり対策が実施され、人口当たり交通事故死亡者数が 1970 年のピークから 50 年間で約 7 分の 1 になった例があります。

新設原子力発電所の安全性は、設計段階で現行の一桁上の安全性を目指します。運転開始後、さらにこれを上回る安全性が求められるようになれば、バックフィットにより対応します。

<参考文献>

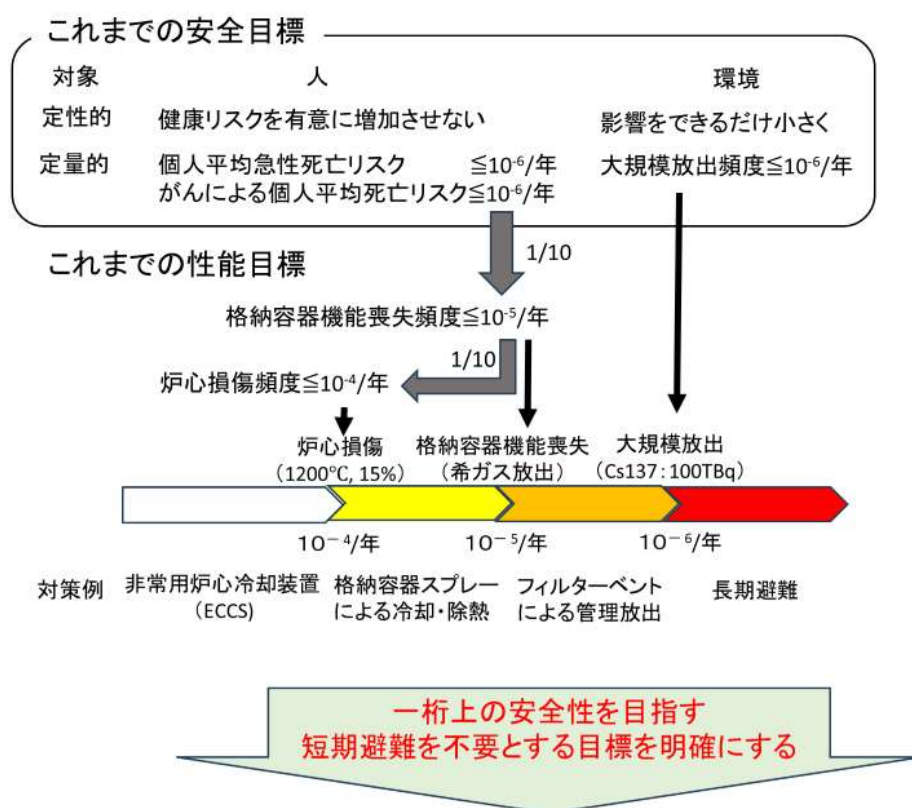
- 1) 原子力安全委員会安全目標専門部会, 安全目標に関する調査審議状況の中間とりまとめ, 2003.
- 2) 原子力安全委員会安全目標専門部会, 発電用軽水型原子炉施設の性能目標について, 2006.
- 3) 原子力規制庁, 安全目標に関し前回委員会(平成 25 年 4 月 3 日)までに議論された主な事項, 2013.
- 4) ISO/IEC, Guide 51:2014 Safety aspects: Guidelines for their inclusion in standards, 2014.

避難が不要となる目標を追加する

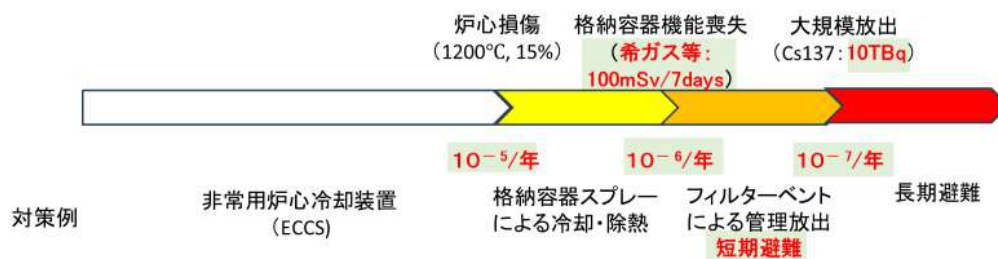
これまでの安全目標・性能目標は規制する側の目標であり、健康リスクや環境への影響を考えていました。一方、住民・国民にとっては日常生活への影響も大きな問題となります。「避難はしたくない」「なぜ原子力発電所のせいで私たちが避難しないといけないのか」という意見はもっともです。

短期避難が不要となる目標を追加します。具体的は、格納容器閉じ込め機能喪失の基準に非居住区域境界において事故後 1 週間 100mSv 以下を追加します。

また、長期避難が不要となる目標として、現行のセシウム 137 の放出量 100TBq を 10TBq にします。



新設原発の性能目標

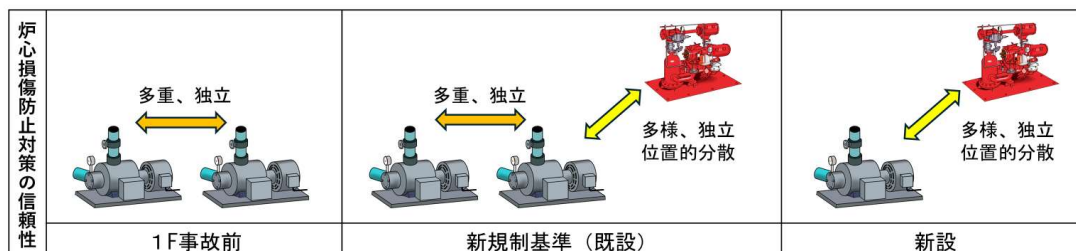


シンプルで強固な深層防護

これまで（既設原子力発電所）の深層防護

福島第一原子力発電所事故前の深層防護では、炉心損傷を防止するための対策（第Ⅲ層）において、共通要因故障対策が不十分でした。また、炉心損傷後の格納容器破損防止対策（第Ⅳ層）は、規制上要求されず、自主的対策は不十分でした。このため、津波という共通要因によりほぼ全ての電源設備が浸水し機能喪失し、炉心の損傷・溶融に至りました。さらに格納容器が破損し、大量の放射性物質が環境に放出されました。

新規規制基準（既設）では、炉心損傷を防止するための対策（第Ⅲ層）において、共通要因故障対策を強化するために、既設設備に対して多様性、独立性、位置的分散を図った追加設備が要求されました。ここで、既設設備が複数であっても、共通要因故障対策が不十分なため、全て同時に故障するとみなしています。言い換えれば、一つの設備しかなく、その設備が機能喪失するとみなしています。さらに、炉心損傷後の格納容器破損防止対策（第Ⅳ層）として、多様性、独立性、位置的分散を図った追加設備が要求されました。ただし、格納容器破損防止が目標とする短期的避難（第Ⅴ層）を不要とする定量的基準が示されていません。長期的避難を不要とする基準としては、セシウム 137 の放出量を 100TBq としています。



新設原子力発電所の深層防護

炉心損傷を防止するための対策（第Ⅲ層）では、共通要因故障対策として、多様性、独立性、位置的分散を図った 2 系統の設備が必要条件です（上図）。さらに一桁上の安全性を目指すために、ランダム故障対策として、これら 2 系統に対して多重性又は多様性、独立性を図った系統を追加します（右図）。

炉心の損傷・溶融後に格納容器破損を防止する、すなわち短期的避難を不要とするための対策（第Ⅳ層）では、ランダム故障および共通要因故障対策として、多様性、独立性、位置的分散を図った 2 系統の設備が必要です。さらに、第Ⅳ層の対策は第Ⅲ層の対策に対してできる限りの独立性を持たせます（層間独立性）。

短期的避難の実施後に長期的避難を防止するための対策（第Ⅴ層）では、放射性物質を除去しながら水蒸気などを環境に放出し格納容器を減圧します。動機器の多重性を持った 1 系統の設備が必要です。さらに、第Ⅴ層の対策は第Ⅳ層に対してできる限りの層間独立性をもたせます。

層間の独立性による性能目標の達成

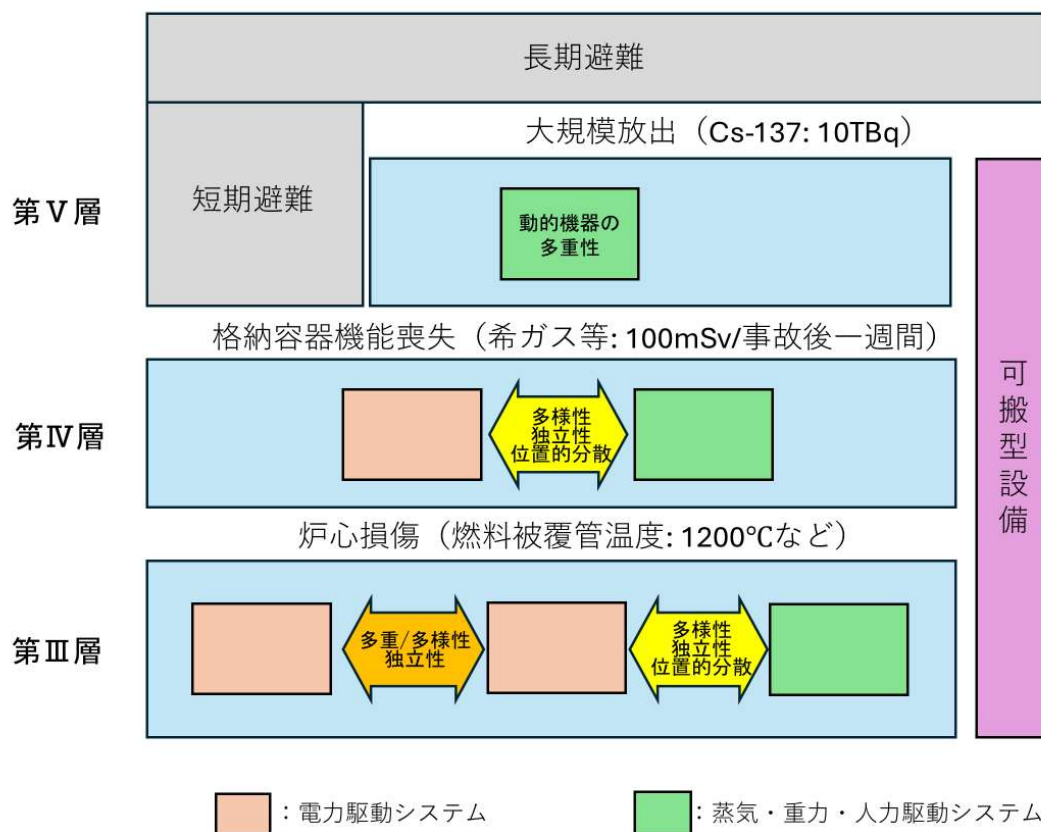
炉心損傷頻度を極めて低くすることで、格納容器破損頻度や大規模放出頻度の性能目標を達成することは、深層防護を脆弱なものとしします。各層は独立して防護性能を高めるべきです。第Ⅳ層および第Ⅴ層の各々の対策の失敗確率を概ね 100 分の 1 以下に抑えることにより性能目標の達成を目指します。

常設設備を中心に、バックアップとして可搬型を配備

第Ⅲ層から第Ⅴ層までの対策は、常設設備にて対応することにより、性能目標を達成することが可能と思われます。ただし、どのような想定外があるかは分からないため、原子炉圧力容器、格納容器下部及びフィルターベントへの注水を行う可搬型注水設備を配備します。

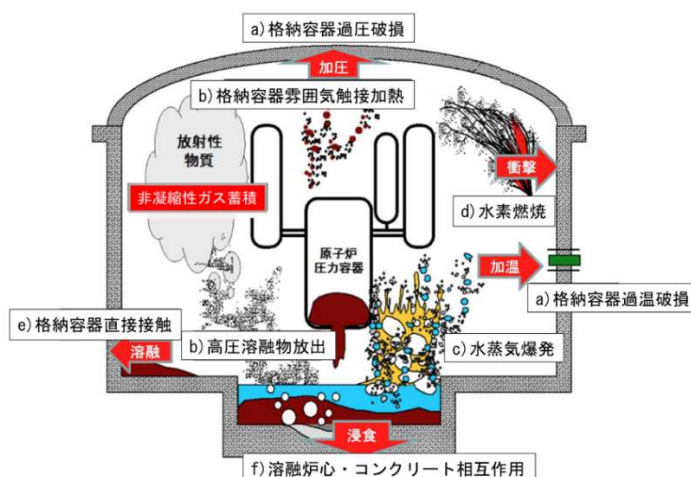
電力が不要な安全系統で一週間

各層の対策のうち一系統は、電力が不要な系統としします。駆動源は圧力容器からの蒸気または重力とし、弁は人力による操作を可能としします。これにより、少なくとも一週間は電力がない状態で対策を実行します。

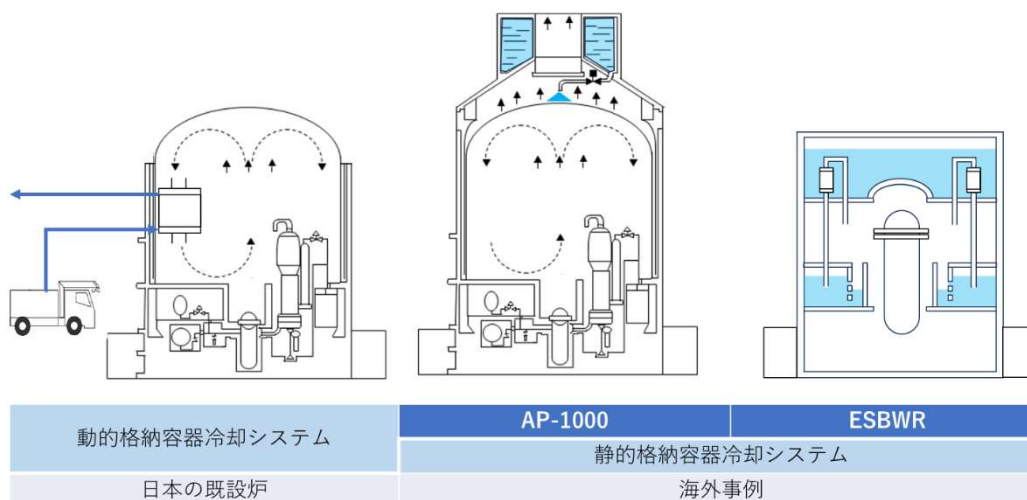


第Ⅳ層の信頼性強化

炉心の損傷・溶融後に格納容器にとっては、主に6つの格納容器破損モードが脅威となります。



a) 雰囲気気圧力・温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）に対しては、既に国内外で実用化している冷却システムを用います。日本の既設炉では可搬型の動的格納容器冷却システムが実用化されていますが、常設設備にします。これに対して多様性のあるシステムとして、海外で実用化されている静的格納容器冷却システムを採用します。なお、この格納容器破損モードへの対応には比較的時間余裕があり、想定外にも柔軟に対応できるよう従来の可搬型システムを残します。この際に、冷却システムは、第Ⅲ層で期待されている設備との独立性ができる限り確保されることが重要です。

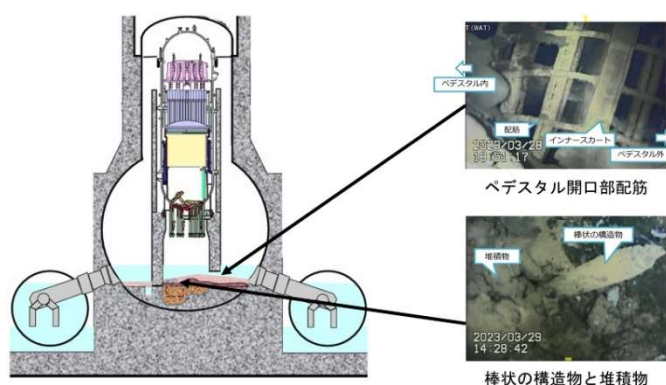


他方、短時間に事故が進展する格納容器破損モードに対しては、発生防止対策の信頼性強化が必要です。

溶融炉心の水没とコアキャッチャー

原子炉圧力容器から落下した溶融炉心は、炉内構造物などと混ざりどのように広がるか不確実性が大きいこと、輻射熱などによりコンクリートを損傷させることから、水没させることが基本です。

さらに、c) 原子炉圧力容器外の溶融燃料－冷却材相互作用（水蒸気爆発）、e) 格納容器直接接触（シェルアタック）、f) 溶融炉心・コンクリート相互作用に対しては、水蒸気爆発発生リスク抑制のために水深を浅くすることと、格納容器への直接接触と溶融炉心・コンクリート相互作用を防止することを両立させるため、ジルコニア（ ZrO_2 ）などによるコアキャッチャーを用います。



福島第一原子力発電所 1 号機格納容器内の状況
出典：東京電力「福島第一原子力発電所 1 号機原子炉格納容器内部調査ROW-A2調査実施状況について」 2023年

圧力容器急速減圧の多重化

高圧溶融物放出／格納容器雰囲気直接加熱発生リスクを抑制するために、原子炉圧力容器の急速減圧を行う逃がし弁を 2 系統とします。

水素の早期燃焼、火炎伝搬阻止

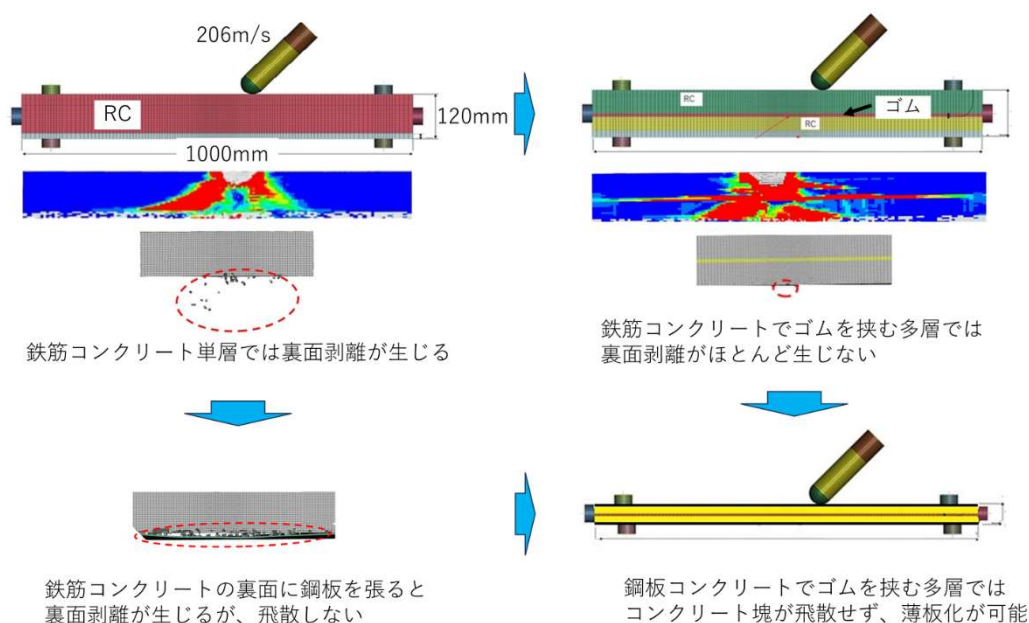
d) 水素燃焼に対しては、PWR ではイグナイタの設置、BWR では格納容器内の窒素充填が行われています。イグナイタでは火炎による周辺設備への悪影響、窒素充填ではベントによる窒素放出が懸念されます。このため、電気点火器をフレイムアレスターで覆い（例えば、目の細かい金網で火炎を伝播させない）、これを着火源として水素を強制燃焼させ、爆燃も爆轟も生じないレベルまで水素濃度を低減します。



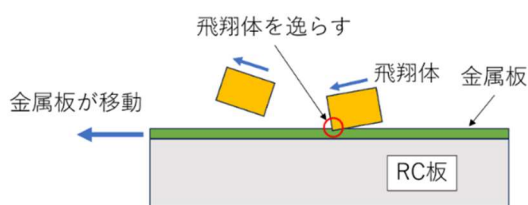
外部事象に対しては外殻防護

航空機衝突から格納容器を護る多層コンクリート構造壁

航空機衝突から安全システムを護るために、格納容器を多層コンクリート構造とします。または、多層コンクリート構造壁で覆います。多層コンクリート構造壁は、鋼板+コンクリート+柔構造材+コンクリート+鋼板からなります。コンクリートと柔構造材のサンドイッチ構造は、衝撃応力波を分散させ裏面剥離を大幅に抑制します。さらに、裏面剥離が発生したとしても、内側鋼板がコンクリート塊の飛散を防止します。



また、平らな天井部分にはスライディング機構を設け、航空機の運動エネルギーの水平成分を逸らすことにより、多層コンクリート構造壁への衝撃を緩和し、天井部分の軽量化を図ります。

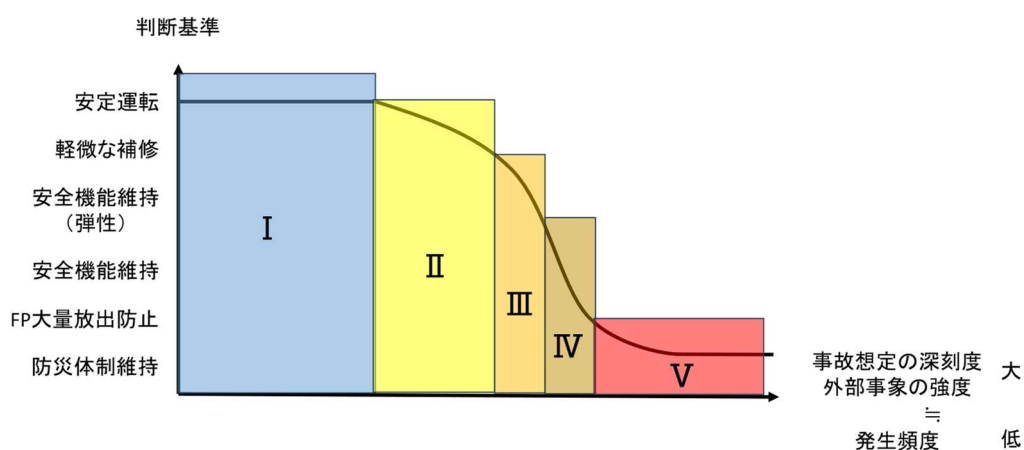


外部事象への外殻防護

津波、竜巻、森林火災などの自然現象、危険物の爆発などの外部人為事象に対しては、上記の多層コンクリート構造壁により安全システムを護ることができます。

強度≒頻度に応じた許容基準

事故想定 of 深刻度や外部事象の強度は、おおよそ発生頻度に言い換えられます。発生頻度が高い軽微なトラブルに対しては、安定運転が続けられる対策が必要です。少し頻度が高い異常に対しては軽微な補修で通常運転に戻れる対策が必要です。頻度は低いが事故となれば設備の安全機能が維持される必要があります。炉心が溶けるような重大事故では、安全機能の維持が必要ですが、再び使えるように弾性範囲に収める必要はありません。さらに厳しい状態では、放射性物質の大量放出を防止するため閉じ込め機能だけは維持しなければいけません。放射性物質の放出が始まった場合、設計の想定を超えた場合でも、防災体制を維持し可搬型設備（例：電源車や消防ポンプ車）などを活用して柔軟に対応することが求められます。



事故想定 of 深刻度・外部事象の強度と判断基準の関係(イメージ)

フィルターベントは発生頻度が一桁低い地震動の考慮を目指す

外部事象のうち地震だけは外殻防護という考え方の適用が難しいです。免震構造も提案されていますが、大型格納容器を免震構造で建造することは現状では困難です。

断層調査などから定められた基準地震動に対して、第Ⅲ層の設備は安全機能維持および弾性範囲に留まること、第Ⅳ層の設備は安全機能維持が必要です。さらに、第Ⅴ層の設備、すなわち格納容器とフィルターベントは、放射性物質の放出量が基準を超えないよう破断を免れる設計とします。格納容器とフィルターベントに特化した破断を判断基準とするストレス・テストの手法開発が必要です。基準地震動より発生頻度が一桁低い地震動（場所にもよりますが、おおよそ基準地震動の1.5倍）に対して、破断を免れることができるのか今後確認します。

新設を促進するための新たな法整備

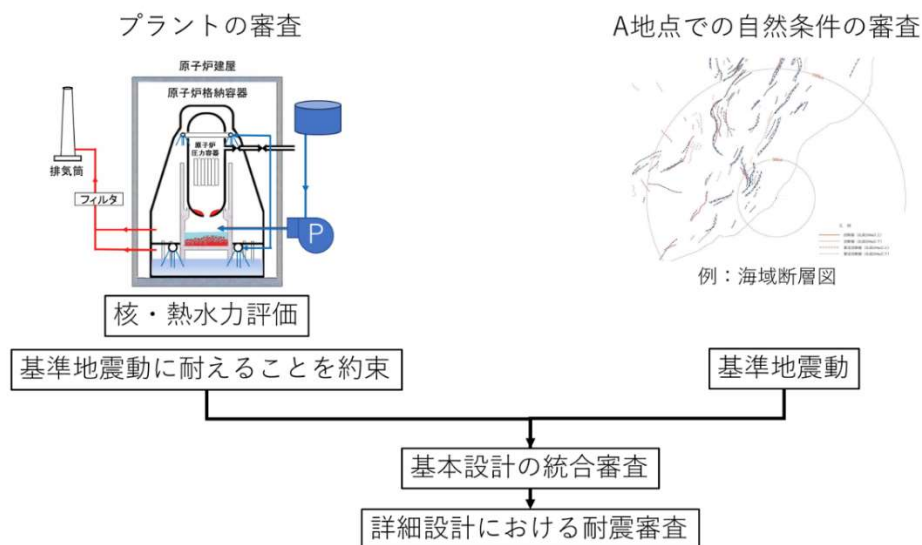
規制リスクの低減：地盤審査とプラント審査の分離

原子力発電所を新設するためには、原子力規制委員会の許可・認可・検査が必要となります。これらの審査は大きく分けて、地震・津波などの自然現象に係る部分と設備・操作手順などのプラントに係る部分とがあります。自然現象に係る部分は発電所毎に異なりますが、プラントに係る部分は同一基本設計とすることができます。プラントに係る部分は国内で同一基本設計とすることが経済的にも合理的です。

現在は、発電所毎に自然現象に係る部分の審査をおおよそ終了してから、プラントに係る部分の審査を始めるというふうにシーケンシャルに審査を行っています。これを、自然現象に係る部分とプラントに係る部分の審査を分けることによって、平行に行うことができ審査期間を大幅に短縮できます。さらに、国内で同一基本設計とすれば、プラントに係る部分の実質的な審査は初号機のみで、2番目からはほぼ審査が不要となります。

自然現象に係る部分については、既に基準地震動・基準津波の許可を得ている発電所敷地内または周辺に建設すれば、敷地内の追加調査は必要ですが、審査によって不許可になったり、審査が長期化するリスクは大幅に低減することができます。

プラントに係る部分については、現在の規則・技術基準は福島第一原子力発電所事故後に既設用として策定されたものですから、まず、新設用の規則・技術基準の策定が必要です。しかし、規制側としては具体的申請が見込めないと規則・技術基準策定に労力を割けない、事業者側としては規則・技術基準がなければ設計を具体化できないという両すくみ状態となります。このような状態は、新技術の導入を妨げる一因となり、好ましい状況ではありません。



産学規のコミュニケーション

安全性の向上に向けて、新技術の導入という観点で、産業界、規制側、大学等（産学規）が、透明性を確保した上で、コミュニケーションが適切に行われる必要があります。

産学規が共有すべきものとしては、原子力安全の基本理念・原理・原則、導入すべき新技術の方向性、科学的・技術的情報、技術の導入計画などです。これらの情報を踏まえて、産学規で検討するものは、新技術について安全上必要な条件の項目です。例えば、新燃料の構造設計ならば、燃料最高温度、燃料棒内圧、被覆管応力、歪などの項目です。

具体的な温度や圧力は、規制側と産業界で異なって当然であり、異なるべきです。規制側は必要最低限な基準、産業界は規制側の基準を上回る計画であるべきです。実験データや解析コードの妥当性を立証する責任は産業界にあります。大学等は、規制側とも産業界からも離れた第三者的立場で、意見を述べるのが望まれます。

このような科学的・技術的議論は、対等な立場で行う必要があります。規制側が高圧的な態度になったり、大学等が権威的な振る舞いをしてはいけません。ただ、対等な立場での議論を行うには基盤をそろえる必要があります。技術者倫理、原子力安全の基本理念・原理・原則について産学規が共通のものを作成し、その共通教育が必要です。



概念設計から基本設計へ

これまで研究してきた概念設計を、基本設計レベル（設置許可申請書添付書類「発電用原子炉施設の安全設計に関する説明書」に相当）にまで、以下のステップとフィードバックを重ねながら開発を進めます。

1. 安全機能を実現する技術の選択

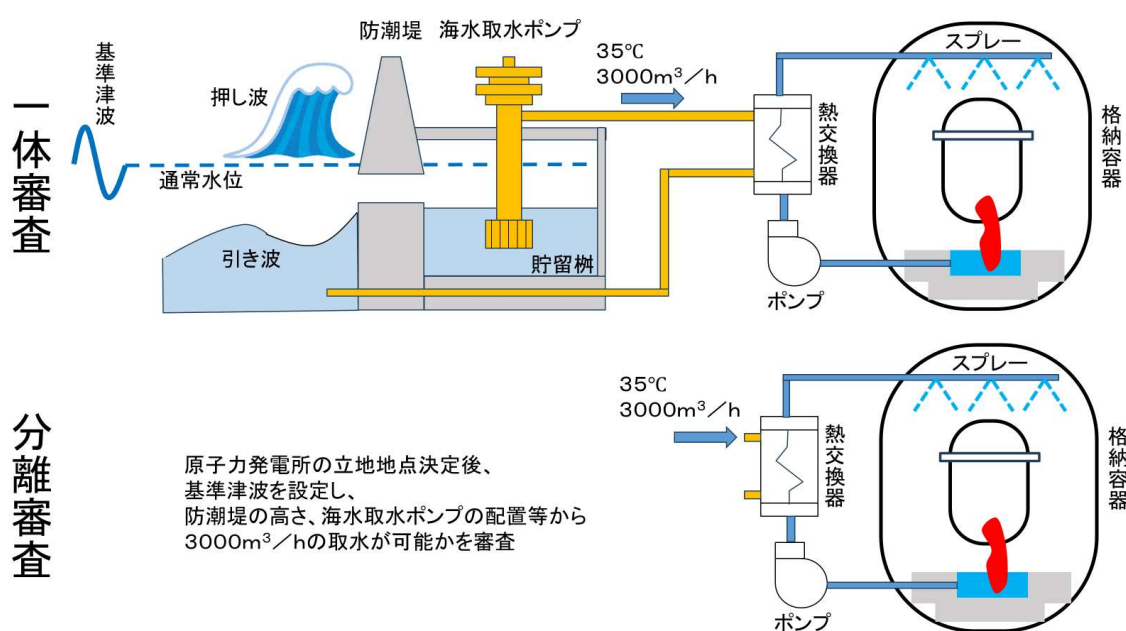
シンプルで理想的な原子力発電所には、新たに要素技術開発が必要なものは多くありません。国内で実用化されていない技術でも、海外では実績があるものもあります。これらの中から深層防護の第Ⅲ層～第Ⅴ層において必要な安全機能を実現する技術を選択します。

深層防護における第Ⅰ層と第Ⅱ層では、基本的には既存技術を採用し、一部デジタル化、高機能材料などの改良技術を採用します。

2. プラント設計とサイト条件の分離

プラントと自然条件の一体審査では、例えば、最終ヒートシンクは海水取水ポンプ、配管、熱交換器、海水排水路について、サイトの自然条件から海水の温度・水位の範囲を定めて必要な流量の海水を必要な時間にわたって取排水できるか確認します。津波の押し波で海水取水ポンプ没水しないか、引き波でも取水できるかを確認します。なお、耐震性は設工認段階です。

分離審査では、プラント側は海水の取水流量と温度のみを設定し安全評価に進みます。サイトが決定した後、設定した取水流量を確保するために、防潮堤、水密構造、引き波対策を審査します。



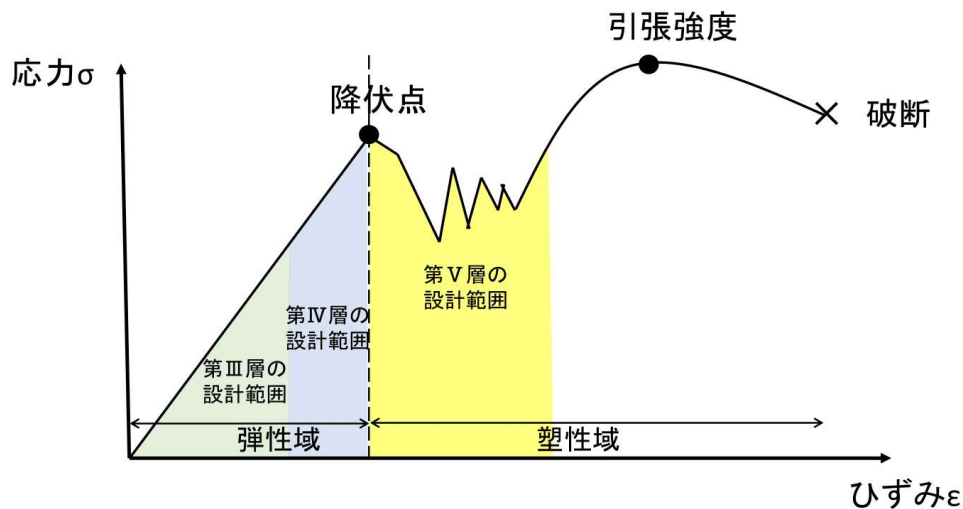
3. 性能目標を達成するためのフィードバック（確率論的リスク評価）

系統及び設備が選択された後に確率論的リスク評価を行います。性能目標を達成していなければ、「1. 安全機能を実現する技術の選択」に戻ります。

性能目標のみならず、層間のバランス、層内のバランスを見ていきます。性能目標を達成していても炉心損傷頻度が 10^{-7} /年なので、第Ⅲ層、第Ⅳ層の対策がなくとも大規模放出頻度が 10^{-7} /年となり性能目標を達成しているのはバランスが悪く深層防護の考え方が適用されていません。第Ⅳ層の対策による条件付格納容器破損確率が 1/10 未満、第Ⅴ層の対策による条件付大規模放出確率が 1/10 未満となることが望まれます。または、現象の不確かさから確率の不確かさが大きいと思われるなら、対策の作動失敗確率を 1/100 以下とします。第Ⅲ層の対策は、全炉心損傷頻度に対する起因事象別割合、事故シーケンス割合、FV 重要度などからバランスを良くするために技術の選択に戻ります。

4. 核熱水力基準の達成確認（決定論的安全評価）

設備構成の決定後には、核、熱水力、強度などの観点から、評価を行います。基本的には、既存の解析コードが利用可能です。ただし、判断基準は同じ観点であっても、深層防護における層によって合理的に設定する必要があります。第Ⅲ層では、従来の基準（格納容器圧力では設計圧力）を適用します。第4層では安全機能が維持できる限界的なもの（格納容器では限界圧力）、第5層では終局的なもの（破断を回避する新たな設定が必要）となります。



**皆さんと一緒に、
新たな未来を創り出していきたいと思ひます
研究・開発のパートナーになりませんか**

論文

山形浩史, 国内原子力発電所の再稼働及び新設に対する意識調査—地域間での意識差及び住民意識を考慮した新設原子力発電所の性能目標の考察—, エネルギー・資源学会論文誌, 45(2), 76-84, 2024.

Hiroshi Yamagata, Public opinion on nuclear power plants in Japan, the United Kingdom, and the United States of America: A prescription for peculiar Japan, Energy Policy, 185, 113939, 2024.

山形浩史, 国内原子力発電所の再稼働及び新設に対する意識調査 —重要関心事項の抽出及びその解決による態度変化—, エネルギー・資源学会論文誌, 44(1), 55-62, 2023.

学会等発表

山形浩史, 日本、英国及び米国における 原子力発電所に対する世論調査, 日本原子力学会春の年会, 2024.

山形浩史, 原子力利用における”産学規+住民・国民”の関係性～新設原子力発電所の安全目標～, 第 53 回原子力安全に関する特別セミナー, 2024.

山形浩史, 国内新設原子力発電所の安全要件とその成立可能性に関する研究 その 2 : 国内新設原子力発電所の安全要件の提案, 日本原子力学会春の年会, 2023.

山形浩史, 安全性向上に向けて産業界及び規制側のあるべき姿, 第 52 回原子力安全に関する特別セミナー, 2023.

山形浩史, 国内新設原子力発電所の安全要件とその成立可能性に関する研究その 1 : 必要性和研究計画, 日本原子力学会春の年会, 2022.

辻村潤二, 奥田幸彦, 西田明美, 山形 浩史, 異種材料積層型 RC 複合構造についての耐衝撃性の解析的検討, 日本原子力学会春の年会, 2025.

高橋大輝, 山形浩史, 高速飛翔体に対する多層構造による防護設計の検討, 日本原子力学会春の年会, 2025.

著書

山形浩史「原子力安全の基本：設計・評価・管理の視点」朝倉書店, 2025.

山形浩史「原子力安全—安全規制とその科学的議論」佐藤靖編『EBPM の組織とプロセス：データ時代の科学と政策』東京大学出版会, 87-102 頁, 2024.

山形浩史「原子力開発利用：原子力発電所：国内新設の円滑化」エネルギー総合工学研究所編『カーボンニュートラル 2050 ビジョン』エネルギーフォーラム, 125-138 頁, 2024.

山形浩史の略歴

1987/4	通商産業省入省	2012/9	原子力規制庁国際課長（併）重大事故対策基準統括調整官
1998/7	OECD/NEA 行政官		
2001/1	経済産業省資源エネルギー庁電力・ガス事業部放射性廃棄物対策調査室長	2013/4	原子力規制庁安全規制管理官（BWR 担当、PWR 担当）
2002/7	経済産業省資源エネルギー庁総合政策課エネルギー情報企画室長	2016/12	長岡技術科学大学技術経営研究科システム安全専攻実務家教授（兼業）
2004/6	経済産業省大臣官房参事官（環境担当）	2017/1	原子力規制庁長官官房審議官
2006/8	IAEA 安全評価アドバイザー	2017/7	原子力規制庁長官官房緊急事態対策監
2009/7	経済産業省産業技術環境局産業技術政策課国際室長	2019/7	（併）新基準適合性審査チーム長（2021/6/30退職）
2010/7	経済産業省中国経済産業局資源エネルギー環境部長	2021/8	長岡技術科学大学工学研究科システム安全工学専攻教授（現在に至る）
2011/3	【東京電力福島第一原子力発電所事故】	2022/3	株式会社安全科学総合研究所を設立、代表取締役社長・研究所長に就任
2011/7	内閣官房内閣参事官		

連絡先

国立大学法人 長岡技術科学大学
大学院工学研究科 システム安全工学分野 教授

株式会社安全科学総合研究所
代表取締役社長・研究所長

〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1
E-mail: yamagata@vos.nagaokaut.ac.jp
HP: <http://safety-management.na.coocan.jp/>
Tel: 0258-47-9915, 9914(秘書 木村)

〒940-0052 新潟県長岡市神田町 1 丁目 2 - 9
Email: h.yamagata@spa.nifty.com
Tel: 0258-94-5768