

総合講演・報告 2 「社会と共存する魅力的な軽水炉の展望」調査専門委員会

社会と共存する魅力的な軽水炉が有すべき特性

Essential characteristics for challenging light water reactors in conformity with social needs and preference

*山本 章夫¹, *成川 隆文², *堺 紀夫³¹名古屋大学, ²原子力機構, ³東芝

1. 検討の背景と目的

1-1. 検討の背景と目的

平成 26 年 12 月に設立された「社会と共存する魅力的な軽水炉の展望」調査専門委員会は、東京電力福島第一原子力発電所事故（以下、1F 事故）、並びに 2015 年に策定されたエネルギー基本計画及び軽水炉安全技術・人材ロードマップ等を踏まえ、エネルギー政策の基本視点である 3E+S（エネルギー安定供給、経済性、環境適合性+安全性）と調和する軽水炉の在り方（軽水炉が備えるべき社会的受容性及び技術的特性）に関する調査・研究を実施し、軽水炉の設計を基本に立ち返って考え、さらに若年世代あるいは他学術・技術分野の研究者・技術者や学生が挑戦に値する魅力的な展望を描くことを目的としている。

本セッションでは、本委員会の概要に加え、これまでに検討してきた社会的受容性とそれから展開される基本要件、及び技術的論点と検討経緯について報告する。

1-2. 検討の前提条件

(1) 本委員会の役割

今までの軽水炉は技術シーズや事業者のニーズを起点にフォアキャストで技術開発がなされてきたため、成熟された技術だといわれる一方、局所最適に陥っている可能性があると考えられる。また、社会と共存する軽水炉の開発にあたっては、社会受容性を付加価値として考えるのではなく、具体的な開発の初期から社会の多様な声を直接聞くこと（Upstream engagement）が重要であると考えられる。従って、既存技術や安全性向上策の延長としての議論ではなく、若い人に魅力のある研究分野の創出を念頭に、バックキャストの視点で魅力的な軽水炉像を描くことを本委員会の役割とした。

(2) 本委員会の議論の境界条件

本委員会の目的は社会と共存する魅力的な軽水炉プラントの在り方や技術要件の整理であり、それを達成するための設計及び仕様検討は議論の対象としないこととした。

(3) 軽水炉を対象とする理由

本委員会では、次の理由により、軽水炉を検討対象とした。

- 軽水炉は商用利用されてきた実績から、技術及び法制度の成熟度、並びに一般の認知度の点で優位であること。
- 2030 年までに 20～22%の電源構成を満たすこと、及び高速炉の導入が 2050 年代以降であること等の国の政策との整合性の観点から軽水炉が現実的な選択肢であること。
- 次世代炉の開発において 1F 事故の教訓を反映し、事故の当事国である我が国が安全性向上対策、防災対応をリードしていくことが重要であること。

*Akio Yamamoto¹, Takafumi Narukawa² and Norio Sakai³¹Nagoya Univ., ²JAEA, ³Toshiba

- ・ 固有の安全性を有すること、産業基盤が整っていること等の面で、技術的優位性があること。

(4) 対象とする炉概念

第3世代炉プラス（GenIII⁺）の次に導入される軽水炉として、GenIII⁺⁺相当の炉概念とした。

(5) 議論の対象とする時間軸の設定

導入スケジュールなどの時間軸は明示的に議論の対象としていない。

(6) 魅力的な軽水炉像の提案の仕方（アウトプットのあり方）

社会と共存する軽水炉の提案においては、結論の提示・説明ではなく、各ステークホルダーとの協働により共に作り上げるという意識が重要であることから、発電用軽水炉に係る様々なステークホルダーとの意見交換を行うこととした。また、当委員会のアウトプットは今後の議論の入力情報になると考えられるため、ある論点について複数の意見がある場合、それぞれの立場からの議論を提示することとした。

2. 社会的受容性とそれから展開される基本要件

2-1. 検討方針

本委員会では、「社会と共存する」軽水炉に求められる技術的特性を、社会のニーズを起点に、バックキャストの視点で検討することとした。この検討方針を踏まえ、社会学者、立地地域及び産業界等関係者、並びに原子力技術者との議論を通して、軽水炉が有すべき社会的受容性を検討している。

2-2. 軽水炉が有すべき社会的受容性

社会学者、立地地域及び産業界等関係者、並びに原子力技術者の各ステークホルダーとの議論を通して抽出された軽水炉が有すべき社会的受容性を表1に示す。軽水炉が有すべき社会受容性は、安全性、環境適合性、経済性、エネルギーセキュリティ、核拡散抵抗性、基準適合性、リスク負担の公平性、及び運転性の8つの価値判断基準のグループに分類された。

2-3. 社会的受容性から展開される基本要件

2-2.において提示された軽水炉が有すべき社会受容性から展開される基本要件を、安全性、環境適合性、経済性、エネルギーセキュリティ、核拡散抵抗性、基準適合性、リスク負担の公平性、及び運転性の8つの価値判断基準の各グループについて、以下の通り整理した。

(1) 安全性

- ・ 長期の避難を要する広範囲の土地汚染の可能性の実質的排除及び避難を含むサイト外対応を考慮したプラント設計により、個人のQOL（quality of life）を低下させない水準にリスクが抑制されていること。

(2) 環境適合性

- ・ プラントのライフサイクルを考慮した設計がなされていること、気候変動リスクの低減に貢献できること。

(3) 経済性

- ・ 他電源と比肩するコスト優位性を有していること。

(4) エネルギーセキュリティ

- ・ 低コストかつ安定的な電力の大量供給が可能なこと。

(5) 核拡散抵抗性

- ・ テロ対策、及び余剰Puの保障措置上のアドバンテージを有していること。

(6) 基準適合性

- ・ 設計改善や設備の追加が容易に可能なこと、また、計画立案から運転開始までの期間が短いこと。

(7) リスク負担の公平性

- ・ リスクの引き受け手とメリットの享受者の公平性が確保されていること。

(8) 運転性

- ・ 定期検査及び計画外停止からの復帰リードタイムが短いこと。また、通常運転時の環境負荷及び定検時等の作業員被ばく量が低減されていること。

3. 技術的論点と検討経緯

3-1. 対象とした技術的論点

前節にあげた、各ステークホルダーからの視点における軽水炉が備えるべき社会的受容性の基本要件をふまえ、軽水炉がどのような技術的特性を備えるべきかについて、下記の論点ごとに委員会内にサブチームを編成し、検討を行っている。

- (1) 安全原則、安全目標、性能目標：現在の安全原則はそのまま適用可能か。どのような安全目標、性能目標を考えるべきか。
- (2) Practically Eliminated (PE)、Evacuation Free (EF) の解釈と考え方：PE, EF はどのように解釈し、適用すべきか。
- (3) 深層防護：どのような深層防護の実装になるべきか。
- (4) 物理障壁：物理障壁が有する役割や信頼性はどのように考えるべきか。
- (5) Active/Passive 系の機器の最適化：Active 系、Passive 系の機器はどのように組み合わせられるべきか。
- (6) ライフサイクルを通じた統合設計：メンテナンス、継続的改善、廃棄物最小化など、ライフサイクルを通じた統合設計はどのようにあるべきか。
- (7) 多数基・集中立地の考え方：多数基・集中立地のメリットとデメリット、あるべき姿とはどのようなものか。
- (8) 経済性・エネルギー安全保障：経済性・エネルギー安全保障の観点ではどのような特徴が必要か。
- (9) その他、必要な技術開発分野について

3-2. 各技術的特性に対する検討状況

これまでに開催した委員会においては、(1)「安全原則、安全目標、性能目標」～(5)「Active/Passive 系の機器の最適化」の 5 つの論点について、サブチームの検討結果に基づき議論した。これまでのところ、以下のような意見が出されている。残りの論点についても、委員会にて今後議論し、各論点において魅力的な軽水炉が備えるべき特性をとりまとめる予定である。

(1) 安全原則、安全目標、性能目標

- ・ 安全原則は安全を達成するための基本的理念、安全目標はどの程度の安全を目指すのかという要求を具体化したものであり、原子力の社会的受容性を獲得するためには、安全原則を社会に見える形で明文化するとともに、安全目標は、社会的な議論を経て、政治、行政によって決定されたものであることが望ましい。また、安全目標は放射線に由来する健康影響だけでなく、社会的な影響に対するものも定められるべきである。
- ・ 性能目標は原子力施設が安全目標に適合していることを判断する目安であり、事業者、プラントによって異なる目標を設定することがありうる。規制側において、既設炉と新設炉で異なる目標を設定している国があるが、わが国でも同様の考え方を採用すべきかどうかについては、立地地域の公平性の観点から慎重な検討を要する。個別の目標を定めるとしても、原子炉ごとか、使用済み燃料プールを含めたサイトレベルでの目標を定めるかという検討が必要となる。

- 具体的性能目標としては、従来、炉心損傷頻度（CDF）や格納容器機能喪失頻度（CFF）等が用いられてきたが、これらの目標以外に指標は必要ないか、数値をどの程度低くすべきか、条件付確率等、性能目標間の関係を明確にして目標を定めるべきか、について議論があった。

(2) Practically Eliminated（PE）、Evacuation Free（EF）の解釈と考え方

- 第4世代原子炉におけるもともとの考え方では、PEはシビアアクシデント（SA）を起こさないための設計要求であり、EFは格納容器に対する要求に対応する。一方、炉心損傷、格納容器破損、放射性物質大量放出等のうち、何がPEの対象になるべきかについては、設計の考え方に依存するとの指摘がある。また、PEの達成はプラント設計のみで対応すべきものか、アクシデントマネジメント（AM）を含めて考えるべきかについても議論がある。
- 一般向けの安全目標と、設計者、専門家向けである性能目標とのギャップを埋める定性的な目標としてPE、EFという概念は有効と考えられる。ただし、PE、EFを達成すれば、SAをスクリーンアウトできる、サイト外対応が不要となるという認識を社会に与える可能性があるという指摘もあった。
- 物理的に起こりえないこと、あるいは極めて高い信頼性を以って排除できることがPEの定性的目標である一方、PEを満足する定量的指標（スペック）として、CDFやCFF等の確率を採用する考え方がある。これについては、評価の不確かさの扱い方、生起確率×影響度の低減方法の妥当性（例えば、1F事故のような事象に対し、生起確率だけを下げればPEを達成したといえるかどうか）について、意見が分かれている。

(3) 深層防護

- 深層防護レベルの実装例として、表2に示す7つのレベルからなる素案に基づき議論した。安全目標における議論を踏まえると、深層防護においては公衆の有意な被ばくの回避、社会的リスクの最小化を性能要求に加えることが必要と考えられる。
- このうち、「ハザードの最小化」については、どこまでハザードを低減すべきか、その基準が明確でないとの指摘がある。また、原子力の社会的リスクについては、原子力以外の他の社会的リスクとの比較をどのように行っていくかについて掘り下げが必要である。
- 社会に受け入れられる軽水炉を設計する観点から、立地選定からプラント設計まで一貫した深層防護の実装が必要との意見と、軽水炉が目指すべき姿として、立地フリーの炉であるべきではとの意見があった。

(4) 物理障壁

- 「放射性物質閉じ込めのための物理障壁」と「外的事象の荷重の効果を緩和するための物理障壁」という観点で分類を行う必要があるのではとの指摘がある。例えば隔離距離は外的事象の影響緩和には大きな効果があると考えられる。従来、前者を想定している「障壁（バリア）」の概念を拡張した場合に、どのような定義ができるかを整理すべきである。
- 物理障壁が強固になりすぎると弊害があるとの指摘がある。例えば、1F事故における水素爆発とブローアウトパネルの関係が挙げられる。原子炉隔離も、強化されすぎると外部からのアクセス、注水、ベント等に影響する可能性がある。状況に応じた障壁の役割を検討すべきである。

(5) Active/Passive系の機器の最適化

- Passive系機器は、機器の簡素化による経済性、メンテナンス性向上のメリットがある一方、Active系のように実機スケールにおけるサーベランスによって信頼性データを取得することが難しく、事故時の動作における不確かさが大きいとの指摘がある。

- 一方、社会的受容性の観点からは、1F 事故の教訓から、外部動力を必要としない **Passive** 系の導入が安心感を与える側面があることに留意すべきである。
- 除熱すべき自らの崩壊熱を冷却系の駆動力とするような、自律的なプラントコンセプトが、グレースピリオドを確保する観点から重要と考えられる。

表 1 軽水炉が備えるべき社会的受容性に関する各ステークホルダーの意見

価値判断基準	社会学者の視点	立地地域の視点	産業界の視点	原子力技術者の視点
安全性	・長期の避難を要する広範囲の土地汚染の可能性の実質的排除 ・ハザードの縮小 ・パッシブセーフティ	・サイト特性を踏まえたプラント設計 ・避難対策の具体化 ・既設炉を上回る信頼性 ・二重格納容器、コアキャッチャー等の設置 ・プラント情報の可視化(リスクモニタやプラント監視機能の整備)	・安全性は開発のドライバーではなく必要(前提)条件	・他の社会リスクと比肩し得るリスク水準 ・個々人の QOL を低下させない
環境適合性	・SF(HLW)及び LLW(運転廃棄物、廃炉廃棄物)の処分時の優位性 ・気候変動リスクの低減	・プラントのライフサイクルを考慮し廃棄物発生量とその処理を考慮したプラント設計		・バックエンドを考慮したプラント設計 ・直接処分オリエンティッドフェュエル ・SA 後の廃止措置や汚染水対策を想定した SSC の設計
経済性	・他電源と比肩するコスト優位性 ・将来的な国内人口減少による経済縮小を考慮したエネルギーシステム	・立地地域の地場産業の活性化及び雇用創出	・他電源と比肩するコスト優位性	・ユーザが採用可能な経済性 ・運転メンテナンスの観点でコスト最適化
エネルギーセキュリティ				・低コストかつ安定的な電力の大量供給
核拡散抵抗性	・Pu 在庫問題への配慮の観点から、保障措置上のアドバンテージ ・テロ対策等セキュリティ上の配慮	・テロ対策		・余剰 Pu の燃料利用
基準適合性(許認可制)		・新規制基準を所与とし最適化された設計	・将来の基準変更を考慮し、設計改善や設備の追加が容易に可能な概念 ・設計認証制度、標準設計等による計画立案から運転開始までの期間の短縮	
リスク負担の公平性	・大規模集中電源がもたらす地域間公平論への応答			・リスクの引き受け手とメリットの享受者の公平性の確保
運転性	・冷温停止までの時間と手順の短縮 ・通常運転時の環境負荷の軽減 ・定検・その他整備時の作業員の被ばく量低減を考慮した設計		・Conventional な要素も含むインフラが未熟な新興国における運転も考慮した設計 ・定期検査の短縮、計画外停止からの復帰リードタイムの短縮	
(安心・信頼性・説明性)*	・明快な技術及びロジックの採用 ・安心や信頼の獲得につながる設計(例えばパッシブセーフティ)		・事業者が信頼されていること。	・明快な緊急時対応等、社会に理解されやすいプラント設計 ・国民に分かりやすいリスク指標の使用 ・他分野のリスク説明の取組との整合

*社会と共存する魅力的な軽水炉の在り方を考える上で評価軸となる定量化できる指標を考えることが重要との観点から、当該項目はこの他の項目を満足することによって実現するものと位置付ける。

表 2 深層防護の実装例

防護レベル		1	2	3	4	5	6	7
性能要求		ハザードの最小化	事故の発生の防止	炉心冷却可能形状の維持	放射性物質の原子炉容器内への閉じ込め	放射性物質の格納容器内への閉じ込め	社会的リスクの最小化	公衆の有意な被ばくの回避
防止策	設計	・外的事象由来のリスクの低い立地の選定	異常発生の防止	DBAの防止	重大事故の防止	原子炉容器破損の防止	格納容器破損の防止	放射性物質の早期大規模放出(非管理放出)の回避
	管理							
	運転			DBAの防止	重大事故の防止	原子炉容器破損の防止	格納容器破損の防止	放射性物質の早期大規模放出(非管理放出)の回避
	防災							
緩和策	設計	安全余裕を含む適正な設計	異常の段階で検知・収束	工学的安全施設による事故の収束	原子炉容器内において事故を収束	格納容器内において事故を収束	放射性物質の管理放出	・人間の生活圏からの離隔 ・サイト外対応の実効性を高めるための設計対応
	管理							
	運転			工学的安全施設による事故の収束	原子炉容器内において事故を収束	格納容器内において事故を収束	放射性物質の管理放出	サイト外対応の実効性を高めるためのサイト内措置
	防災							サイト外対応
性能目標		・ハザードの年超過確率 ・安全余裕(ストレステストによる評価等)	SSCsの信頼度目標	炉心の冷却可能形状喪失頻度	・原子炉容器破損頻度 ・重大事故の発生を所与とした時の原子炉容器破損確率(DCC対応の信頼度目標)	格納容器破損頻度	・放射性物質の管理放出機能喪失頻度 ・重大事故の発生を所与とした時の放射性物質の管理放出機能喪失確率	放射性物質の非管理放出に至るまでの時間余裕の目標値