

革新軽水炉 SRZ[®]-1200 における 世界最高水準の安全性を目指した基本設計

Basic Design of SRZ-1200 Advanced Light Water Reactor for the World's Highest Level of Safety



川田 直輝^{*1}
Naoki Kawata

荻野 隆史^{*2}
Takafumi Ogino

桐田 晃^{*3}
Akira Kirita

谷川 義行^{*4}
Yoshiyuki Tanigawa

森 健太郎^{*4}
Kentaro Mori

高橋 康文^{*4}
Yasufumi Takahashi

SRZ-1200 は、福島第一原子力発電所事故を反映した国内新規規制基準に適合しつつ、世界最高水準の安全性を有する革新軽水炉である。原子力発電所で重大な事故が起こる確率、格納容器の機能不全が起こる確率を示す炉心損傷頻度と格納容器機能喪失頻度は、国が示した目標の 1/10 とし、これを実現するために、安全設計上想定する事故に対して、炉心の著しい損傷を防止するための設備である設計基準対象施設の多重性・多様性の強化や区画分離の徹底による設備の同時機能喪失防止等を安全設計方針として定めている。本報では、設計基準対象施設のうち重要度の特に高い安全機能を有する系統(以下、安全系設備)の 3 系列化による多重性の強化、重大事故等対処設備の恒設化による安全性向上や専用の熔融炉心対応設備など、SRZ-1200 の世界最高水準の安全性を実現するプラント基本設計について具体例とともに紹介する。

1. はじめに

三菱重工業株式会社(以下、当社)が開発する革新軽水炉 SRZ-1200 は、世界最高水準の安全性を実現するため、海外の新設プラントに劣らない性能目標を定めている。福島第一原子力発電所事故(以下、福一事故)を受け、自然災害に対する耐力の向上や炉心冷却・放射性物質閉じ込め機能の強化を基本コンセプトとしている。

SRZ-1200 の安全設計方針を構成する重要な要素として深層防護設計の考え方がある。具体的には、原子力発電所において必要となる“止める”, “冷やす”, “閉じ込める”の各機能について、あるレベルで求められる安全機能が機能しないことが他のレベルに影響を与えないよう、安全系設備及び重大事故等対処設備の多重性・多様性を強化して各深層防護レベルの独立性を確保する方針としている。

SRZ-1200 のプラント基本設計は、この安全設計方針に基づいて検討を進めており、安全設計上想定する事故に対して、炉心の著しい損傷を防止するための設備である安全系設備については 3 系列化による多重性の強化等を図った。さらに、福一事故のように炉心の熔融が生じた場合においても、熔融炉心の冷却、閉じ込めが確実に実施できるよう、重大事故等対処設備を恒設化して安全性向上を図り、熔融炉心冷却設備を採用して熔融炉心冷却をより確かなものとしている。

*1 原子力セグメント プラント設計部 次長

*3 原子力セグメント プラント設計部 主席技師

*2 原子力セグメント プラント設計部 主席プロジェクト統括

*4 原子力セグメント プラント設計部

2. SRZ-1200 の安全設計方針

SRZ-1200 は、福一事故を受け、世界最高水準の安全性を有するプラントとして、炉心損傷頻度 (Core Damage Frequency, 以下 CDF) と格納容器機能喪失頻度 (Containment Failure Frequency, 以下 CFF) は国が示した目標の $1/10$ としている (CDF: 10^{-5} /炉年, CFF: 10^{-6} /炉年)。また、自然現象に対する耐力 (耐震性、津波耐性等) の向上、動的設備と静的設備を適切に組み合わせ、事故初期の迅速な対応と速やかな事故収束の実現、多重化された安全系設備の区画分離を図り、同時機能喪失を防止すること等を基本コンセプトとしている。

世界最高水準の安全性を実現するための安全設計方針として、最も上位に位置づけられる方針は深層防護の概念である。具体的には、異常の発生防止対策 (深層防護レベル 1)、運転時の異常な過渡変化への対策 (深層防護レベル 2)、設計基準事象対策 (深層防護レベル 3) を講じる。設計を超える状態 (設計拡張状態) に対しても、炉心損傷の防止対策 (深層防護レベル 4a) と格納容器破損の防止対策 (深層防護レベル 4b)、さらには航空機衝突対策及びその他テロ対策を講じる。

深層防護レベル 2～3 に対応する安全系設備は、原則、多重性又は多様性及び独立性を備える設計とするとともに、当該系統を構成する機器の単一故障が生じた場合であって、外部電源が利用できない場合においても、その系統の安全機能を達成できる設計とする。

従来は、2 系列 (トレン) の設備を設置し、1 系列の故障 (単一故障) が発生した場合においても機能を維持できるようにしていたものを、SRZ-1200 では 3 系列 (トレン) に増強し、多重性の強化を図った。各安全系設備の系列は、完全に分離された区画に別々に配置し、各区画は他の区画から物理的に壁・床等で分離されることで、火災などの内部事象が 1 つの区画から他の区画へ波及しないように設計する。

深層防護レベル 4a, 4b に対応する重大事故等対処設備は、安全系設備と共通要因によって同時にその機能が損なわれるおそれがないよう、可能な限り多様性及び独立性を有し、位置的分散を考慮して適切な措置を講じる。福一事故のように炉心の溶融が生じた場合においても、溶融炉心の冷却、閉じ込めが確実に実施できるよう、専用の設備を設置する。

また、自然災害時に必要な機能を維持できるよう、想定する地震・津波に対しては、高耐震や堅牢な建屋とすること、敷地レベルを津波高さ以上 (ドライサイト) とすること等により耐性を強化する。

3. SRZ-1200 のプラント基本設計

SRZ-1200 のプラント基本設計は、上述の安全設計方針に基づいて検討を進めている。

ここでは、安全系設備のうち安全注入系統、原子炉格納容器スプレイ系統、サポート系統、および重大事故等対処設備を例に系統設計の概要を紹介する。また、配置設計の概要についても紹介する。

3.1 SRZ-1200 の系統設計

3.1.1 設計基準対象施設

SRZ-1200 では、独立した 3 系列構成の安全注入系統と原子炉格納容器スプレイ系統を備えている。図 1 に安全系設備の系統構成図を示す。

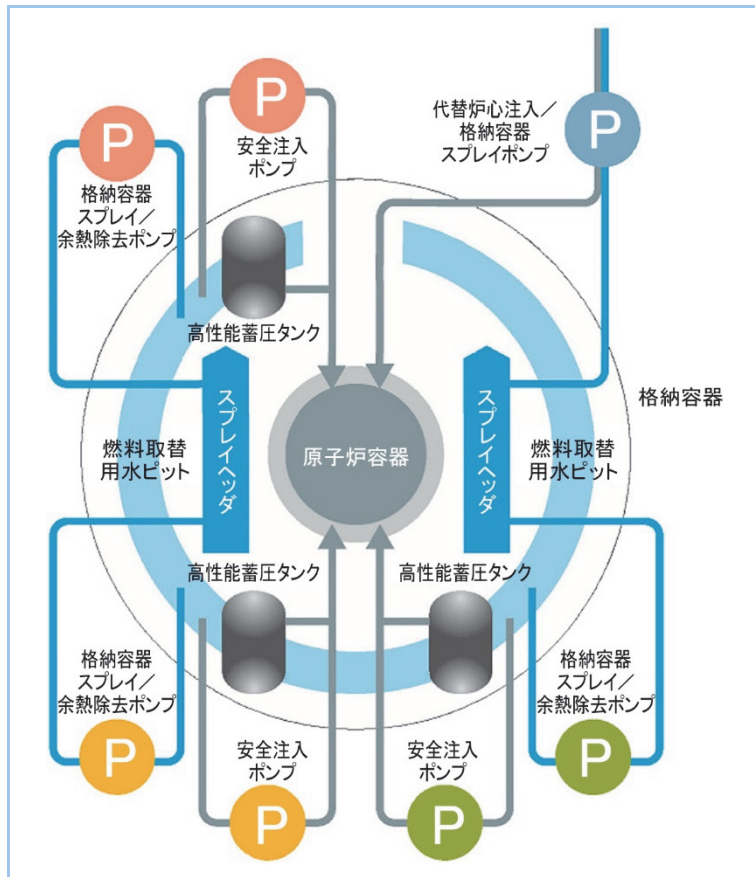


図1 3系列の安全系系統構成

(1) 安全注入系統

安全注入系統は、配管破断等による1次冷却材喪失事故に対して、原子炉に冷却水を供給するための系統である。

安全注入系統は、高压注入系、蓄圧注入系で構成される。また、事故後の冷却水源である燃料取替用水ピットは格納容器内に設置する。

高压注入系は独立した3系列からなり、各系列はそれぞれ安全注入ポンプ、配管および弁から構成される。安全注入ポンプは通常運転時には待機状態にあり、非常用炉心冷却設備作動信号が発せられると自動起動し、燃料取替用水ピットのほう酸水を炉心に注入する。原子炉容器に直接注入することにより、1次冷却材管の破断を想定しても、1系列の単一故障により1台のポンプが使用できなくとも残り2台の安全注入ポンプから炉心に冷却水を注入できる設計とした。

蓄圧注入系は、蓄圧タンク、配管及び弁類で構成される静的システムであり、各1次冷却材ループに1系列ずつ設置される。高性能蓄圧タンクを採用し、タンク内に設置したうず巻きダンパにより大流量から小流量への切替をタンク内水位の低下に応じて自動的に行う。これにより、従来プラントで必要だった低压注入ポンプの役割を蓄圧タンクに統合することが可能となり、低压注入ポンプの削減によりシステムを簡素化した。図2に高性能蓄圧タンク概念図を示す。

従来プラントでは、事故後長期にわたる再循環運転のために格納容器外に設置した燃料取替用水ピットから再循環サンプへの水源切替操作が必要であったが、燃料取替用水ピットは格納容器内に設置し、切替操作を不要とした。

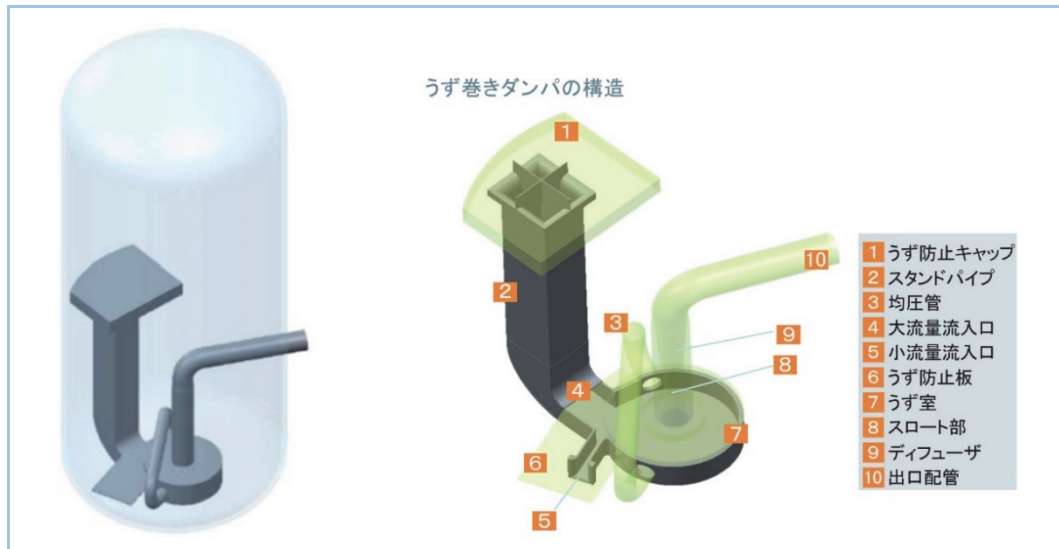


図2 高性能蓄圧タンク

(2) 原子炉格納容器スプレイ系統

原子炉格納容器スプレイ系統は、事故により上昇した原子炉格納容器内の圧力及び温度を下げるために、原子炉格納容器内にスプレイ水を供給するための系統である。

図1に示すとおり、原子炉格納容器スプレイ系統は3系列に分離されており、各系列はポンプ、冷却器、配管及び弁から構成される。高性能蓄圧タンクの採用により低压注入系の機能が蓄圧注入系の機能に統合されることから、系統設備簡略化のため、ポンプ及び冷却器は余熱除去系統と兼用する。

原子炉格納容器スプレイ作動信号が発せられると、ポンプが自動起動し、燃料取替用水ピットのほう酸水を冷却器で冷却して、格納容器内上部に設置されたスプレイリングのスプレイノズルから格納容器内に散布する。

(3) サポート系統

安全注入系統や原子炉格納容器スプレイ系統の機能をサポートする補機冷却や室温維持を担うサポート系統も、独立した3系列からなる。

安全系の空調系統は、安全注入系統や原子炉格納容器スプレイ系統を含む安全系機器が健全に機能するための環境を維持するための系統である。

空調系統は、安全系機器の3系列構成に応じ、同様に3系列化して多重性の強化を図っており、各系列はファン、空調ユニット・冷却ユニット、ダクト及びダンパから構成される。また、従来プラントでは外気を用いた換気冷却方式を採用していた空調系統に対して、SRZ-1200では冷水等を用いた循環冷却方式を採用しており、区画分離で内部事象に対して強化しただけでなく、高濃度火山灰降灰の想定が必要となる火山などの外部事象に対しても強化した設計としている。

3.1.2 重大事故等対処設備

重大事故等対処設備は、恒設設備での対応を基本とし、専用の恒設ポンプによる代替炉心注入と代替格納容器スプレイが可能な設計とした。また、別の恒設ポンプを用いて格納容器再循環ユニットへ冷却水を供給することでも原子炉格納容器の冷却が可能な設計とした。

万一、炉心溶融が発生した場合にも、水蒸気爆発のリスクを低減させつつ、溶融炉心冷却をより確かなものにする溶融炉心冷却設備を採用する。拡散槽への冷却水供給は燃料取替用水ピットからの重力注水で行う。重力注水は溶融開放機構によりなされる。溶融開放機構は、溶融開放弁固定端、ワイヤー、溶融開放弁からなる。拡散槽内に設置された溶融開放弁固定端が溶融炉心と接触し溶損することにより溶融開放弁が開となり、重力注水がなされる。図3に拡散槽への重力注水の概念図を示す。

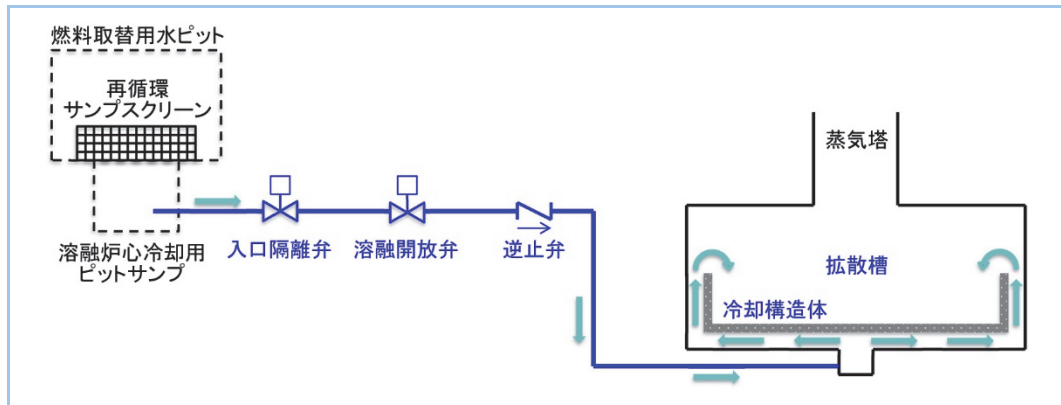


図3 拡散槽への重力注水

3.2 SRZ-1200 の配置設計

SRZ-1200 の配置設計は、国内の厳しい地震条件等のサイト対応で実績のある当社の設計をベースとしている。この厳しい地震条件にも耐えうる耐震性を実現するために、安全系設備及び重大事故等対処設備を配置する建屋（格納容器、燃料取扱建屋、安全系建屋）は一体の基礎版上に設置するとともに、大型かつ矩形の建屋を採用している。

各安全系及び重大事故等対処設備は、原則として、外部ハザードに配慮して建屋内に設置し、分離された区画に分散して配置することとしている。図4に区画分離の説明図を示す。

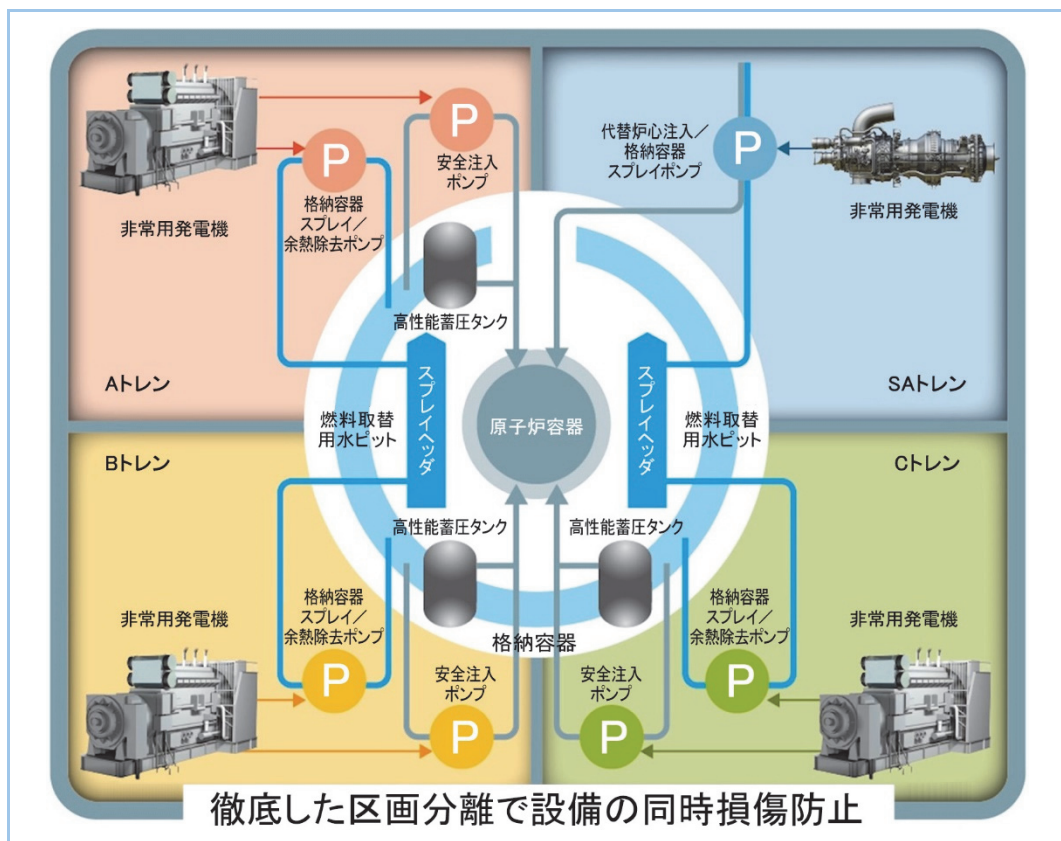


図4 区画分離の概念

以下に SRZ-1200 の配置設計における特徴について解説する。

- ・ 格納容器
閉じ込め機能を有する鋼製の格納容器の外側に頑健なコンクリート製の外部遮蔽を設けることで、外部ハザードへの耐性と遮蔽機能を強化し、様々な災害に耐えうる強固な格納容器を実現している。
- ・ 安全系建屋内の区画分離

多重化された安全系設備相互間及び安全系設備と重大事故等対処設備を頑健なコンクリート壁で分離することで、火災や溢水等の他区画への波及的影響を防止し、安全機能が同時に喪失することを防止する。

- ・ 安全系建屋内の分散配置

多重化された安全系設備相互間及び安全系設備と重大事故等対処設備に対し、それぞれを適切に分散して配置することで、火災や溢水等の際に複数の安全機能が同時に喪失することを防止する。

- ・ 建屋の頑健化

国内の厳しい地震に対して、建屋を頑健化して耐震性を確保するとともに、竜巻や大型航空機衝突等の外部ハザードに対して、安全系設備などの必要な機能を維持できるよう、頑健な建屋内に収納する。

4. まとめ

当社は、SRZ-1200のプラント基本設計を進めており、本報告では、SRZ-1200の安全設計方針ならびに、設計基準対象施設の安全注入系統、原子炉格納容器スプレイ系統、各種サポート系統及び重大事故等対処設備の系統設計の概要と、配置設計の概要について紹介した。

当社は、電力会社との共同研究によりプラントの基本設計を進めており、概ね完了に近づいているが、今後も、基本設計の推進と新技術に対する検証試験を着実に進めていく所存である。

SRZ®は日本における三菱重工業株式会社の登録商標です。