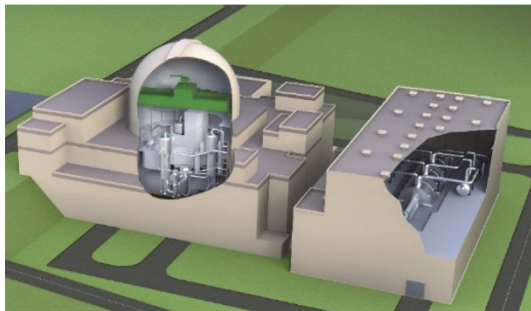


革新軽水炉 SRZ[®]-1200 の開発状況

Development Status of Mitsubishi Advanced Light Water Reactor “SRZ-1200”



西谷 順一*¹
Junichi Nishitani

西尾 浩紀*²
Hiroki Nishio

黒川 史郎*³
Shiro Kurokawa

畔川 和樹*⁴
Kazuki Azekawa

百瀬 祐二*⁴
Yuji Momose

三菱重工業株式会社では、福島第一原子力発電所事故以降の新設原子力発電プラント向けに革新軽水炉 SRZ-1200 の開発を進めている。この SRZ-1200 は、福島第一原子力発電所事故の教訓を踏まえた安全対策を設計段階から取り入れ、かつ、熔融炉心冷却設備等の各種新技術を導入することで、極めて高い安全性を合理的に達成させた革新軽水炉である。SRZ-1200 は基本設計を概ね完了しており、技術の検証及び詳細設計に向けて準備を進めている段階である。なお、個別技術の開発、設計進捗は別論文で紹介する。

1. はじめに

原子力発電は、大規模・安定的に電力を供給可能なカーボンフリー電源として、脱炭素社会の実現の観点で重要なエネルギー源である。また、原子力発電プラントは、そのシステムの複雑さ及び規模の大きさ故に計画～建設まで 10 年以上を要する長期の巨大プロジェクトである。このため、エネルギーミックスの観点で現段階における日本政府の方針である原子力発電比率 20～22%を将来にわたって維持するためには、出来る限り早期に新設の原子力発電プラントが必要な状況である。

三菱重工業株式会社(以下、当社)は、国内において 24 基に及ぶ PWR(加圧水型軽水炉: Pressurized Water Reactor)プラントの建設を担い、福島第一原子力発電所事故(以下、福一事故)以降においても安全性向上対策工事などに継続的に携わってきており、PWR プラントの建設に対して世界でも有数の経験、知見を有している。これらの経験、知見を活かして国内電力 4 社(関西電力株式会社、北海道電力株式会社、四国電力株式会社、九州電力株式会社: 以下、電力 4 社)と共同で革新軽水炉 SRZ-1200 の基本設計を進めており、さらに各種検証試験を実施することで設計の完成度を高めるとともに、プラント建設に向けて必要な製造・調達面での活動を進めている。

2. SRZ-1200 の開発コンセプト

SRZ-1200 は、福一事故を経験した我が国における新設の原子力発電プラントとして、安全性を最優先としつつ、将来の社会情勢やエネルギー情勢に適合したプラントを目指して開発を進めている。SRZ-1200 では、これらを考慮しつつ、(1) 超安全(Supreme Safety) (2) 地球に優しく(Zero carbon & Sustainability), (3) 大規模な電気を安全供給(Resilient light water Reactor)を開発コンセプトとしている。これらの頭文字及び電気出力 1200MWを組み合わせる SRZ-1200 と命名している⁽¹⁾。

*1 原子力セグメント SRZ 推進室 室長

*2 原子力セグメント SRZ 推進室 次長

*3 原子力セグメント SRZ 推進室 新設炉プロジェクトグループ グループ長

*4 原子力セグメント SRZ 推進室 新設炉プロジェクトグループ 首席技師

3. SRZ-1200 のプラント仕様と特徴

上記の開発コンセプトを踏まえ、SRZ-1200 は、豊富な運転実績を有する PWR プラントの技術をベースに、福一事故の教訓を踏まえた安全対策を設計の段階から取り入れ、さらに新技術を導入した原子炉として開発しており、これらの設計を合理的に統合することによって高い安全性を実現したプラントである。

3.1 プラント基本仕様

SRZ-1200 のプラントの基本仕様について、既設 PWR との対比を含め表 1 に示す。国内の原子力発電プラントは、スケールメリットによる経済性追求の観点で順次出力が大型化してきた経緯があり、改良型 PWR においては 160 万 kW 級の電気出力を計画していた。一方で、大型炉は停止時に大きな代替電源を必要とするデメリットもある。このため、スケールメリットによる経済性向上と電力系統上の運用性を考慮し、中型の 120 万 kW 級を SRZ-1200 の電気出力とした。この出力を達成するために、大型炉向けに開発された蒸気発生器や 1 次冷却材ポンプ等の主要機器の技術を適用し、1 ループ当たりの流量を増加させている。

表1 SRZ-1200 プラント基本仕様

| 項目 | SRZ-1200 | 既設 PWR |
|-------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 電気出力(Gross) | ～ 1210 MWe | 1180 MWe |
| 炉心熱出力 | 3411 MWt | 3411 MWt |
| 1 次冷却材ループ数 | 3 ループ | 4 ループ |
| 燃料集合体 | 193 体 | 193 体 |
| 1 次冷却材流量 | 25 100 m ³ /h/loop | 20 100 m ³ /h/loop |

また、SRZ-1200 では、再生可能エネルギーとの共存の観点で、日間の電力負荷変動に対応するための日間負荷追従能力を火力発電所並みに向上させる。また、電力系統の短時間での負荷変動に追従することで、電力系統の周波数を安定させる周波数制御能力も向上させる(図 1)。さらに、再生可能エネルギーの不安定性などに起因して電力系統の擾乱が生じた際に、原子炉の停止に至らないよう、外部電源がなくても原子力発電プラント単独での運転継続が可能なように所内単独運転性能を向上させる。

SRZ-1200 の負荷追従性能を表 2 に示す。

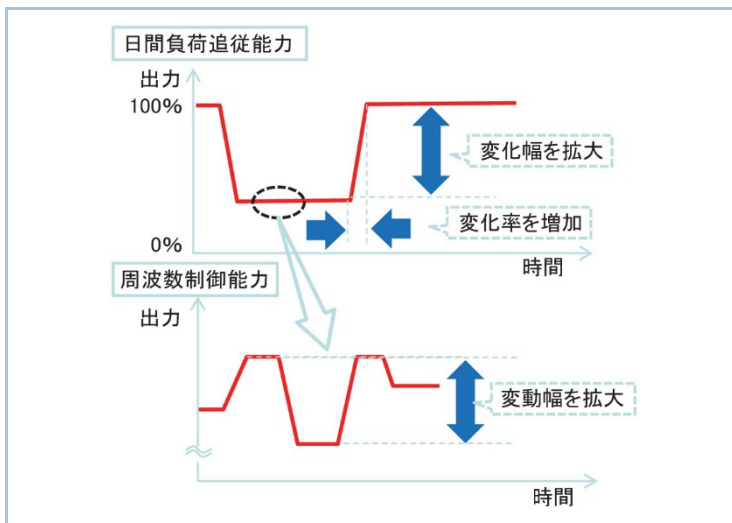


図1 プラントの運転性能(日間負荷追従能力と周波数制御能力)

表2 SRZ-1200 の負荷追従性能

| 項目 | 仕様 |
|-----------|---------------|
| 負荷変率 | 3%/min |
| 負荷変化幅 | 30%–100% |
| 周波数調整運転範囲 | ±5% |
| 所内単独運転 | 原子炉出力を急減させて対応 |

3.2 安全系設備の設計方針

SRZ-1200 の安全系設備は、福一事故の教訓を踏まえた安全対策を反映するとともに、新技術の適用により世界最高水準の安全性を有する設計とする。性能目標としては、炉心損傷頻度／格納容器破損頻度を表3に示すように国が示した目標の1/10とし、世界最高水準の安全性を後述する設計方針に基づき達成する。

表3 SRZ-1200 の性能目標

| 項目 | SRZ-1200 | 国が示す目標 |
|--------------|--------------------------|--------------------------|
| 炉心損傷頻度(目標) | 1×10^{-5} /炉年未満 | 1×10^{-4} /炉年程度 |
| 格納容器破損頻度(目標) | 1×10^{-6} /炉年未満 | 1×10^{-5} /炉年程度 |

- ① 自然災害に対する耐力(耐震性、津波耐性など)の向上
 - ✓ 安全系設備が設置される建屋は、できる限り正方形に近い整った形状とし、低重心化及び岩盤への埋込み等を行うことで、地震時の建屋安定性を高める。
 - ✓ 設計基準となる津波高さに余裕を持った敷地高さとし、更に建屋を水密化することで津波に対する耐性を高める。
- ② 事故時の炉心冷却・放射性物質閉じ込め機能の強化
 - ✓ 従来プラントでは2系列(トレン)構成であったものをSRZ-1200ではさらに多重性を強化し、3系列(トレン)に増強した上で、各系列間の分離(区画分離)を強化することで複数設置する安全系設備が同時に機能喪失する可能性を低減し、安全性を向上させる。
 - ✓ SRZ-1200では、福一事故での経験を踏まえた新たな深層防護設計の考え方をプラント設計段階から取り入れ、事故の進展レベルに応じた対策設備を設置し、異なる深層防護レベル間での設備の独立性強化を図り、安全性を向上させる。
 - ✓ 高性能蓄圧タンク等の新たな静的(パッシブ)設備と従来プラントに備わっている動的(アクティブ)設備のベストミックスを採用することにより、炉心冷却事故初期の迅速な対応と速やかな事故収束を両立する。
 - ✓ 格納容器については、高強度鋼板を用いた鋼製格納容器と頑健な外部遮蔽壁による2重構造とすることにより、航空機衝突に対する頑健性と耐震性を両立し、放射性物質の閉じ込め能力を向上させる。
 - ✓ 万が一溶融炉心が格納容器内に放出されたとしても、溶融炉心冷却設備及び格納容器からの除熱設備により格納容器の破損を防止する。
 - ✓ さらに、万が一格納容器の除熱設備が動作しなかった場合においても、被ばく影響を考慮しつつ格納容器からのベントを行うことにより、格納容器を防護可能な設備を設置する。

4. SRZ-1200 の開発状況と主要設備の検証試験

4.1 SRZ-1200 の開発状況

SRZ-1200 は、2030年代半ばの運転開始をターゲットとして、2019年以降、電力4社と共同で立地(サイト)を特定しない標準設計を進めている。標準設計では、許認可で必要となるプラント設備の仕様を検討することとしており、現段階で概ね設計が完了し、サイトが決定すれば、詳細

設計へ進む準備ができています(図2)。

また、標準設計においては、システムエンジニアリングを適用して要求事項を明確化するとともに、図3に示すような図書体系を整備した上で、上下流インターフェイスの整流化を行っている。具体的には、プラントレベル、システムレベル、機器レベルの各レベルでプラントの性能目標を満たす要求事項を整理し、それに基づく設計仕様検討を行っており、現時点で主要な設計図書を整備済みである。

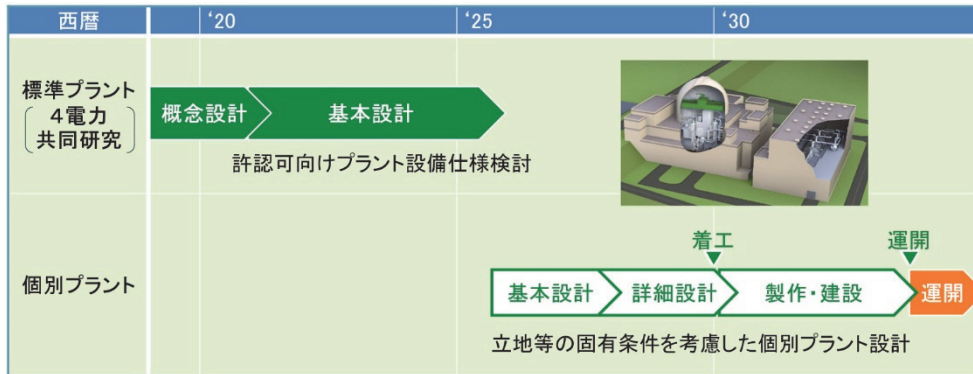


図2 SRZ-1200 開発工程

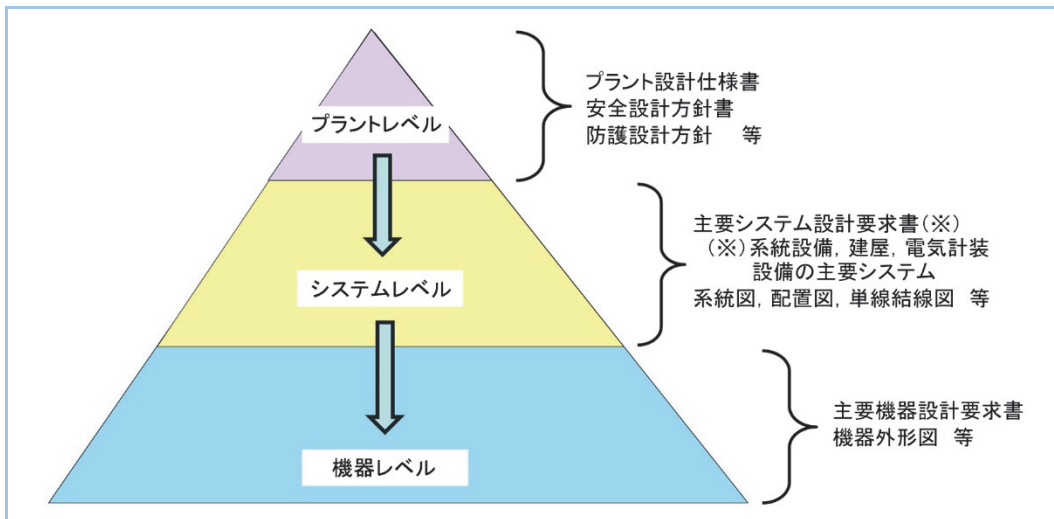


図3 SRZ-1200 標準設計の図書体系

4.2 主要設備の検証試験

SRZ-1200 は、安全性向上や経済性・運用性向上の観点で従来プラントからの改良技術や従来プラントで適用していない新技術を採用している。SRZ-1200 に適用する主要な改良技術や新技術及び検証状況について以下に示す。

(1) 原子炉容器

容器下部からの漏えいリスクの低減の観点から、従来プラントにある下部計装管台を廃止するとともに、事故時の安全裕度向上のために原子炉容器下部のプレナム部の容積を削減している。このため、1次冷却材流量が従来プラントより増加していることも相まって炉内の冷却材の流動が従来プラントと異なり得ることから、プラントの安全性及び安定運転を担保するため、炉内流動試験による検証を進めている。

(2) 上部挿入式炉内核計装

炉心の状態監視のための計装設備は、従来プラントでは原子炉容器下部から挿入していたが、SRZ-1200 では原子炉容器上部からの挿入方式に変更する。従来プラントと異なる炉内構造となるため、上記(1)に合わせて炉内流動試験を実施するとともに、実機プラントを想定した保守方法等の検証試験を進めている。

(3) 溶融炉心冷却設備

SRZ-1200 では、溶融炉心を確実に冷却するため、新技術として専用の溶融炉心冷却設備を設置する。本設備の適用性検討や基本設計は実施済みであり、現在は設備の実証性・許認可のためのデータ取得を目的とした検証試験を進めている。

(4) 1次冷却材ポンプ

SRZ-1200 では、従来プラントを上回る1次冷却材流量を有するMA25S型1次冷却材ポンプを適用する。当社所有の1次冷却材ポンプルーブ工場試験設備を用い、実機プラントにおける高圧・高温の冷却材条件において検証試験を実施済みである。

(5) 高性能蓄圧タンク

SRZ-1200 では、従来プラントにある蓄圧注入系と低圧注入系をカバーする高性能蓄圧タンクを設置する。本設備は、内部に設置した渦巻ダンパ(静的機器)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機構を有している。当社にて実機プラント相当規模での検証試験を実施済みである。

なお、上述のとおり(1)~(3)については技術開発及び適用性検討は完了しており、検証試験を通してプラント建設に必要となる許認可データ、実機向けデータを取得し、プラントの完成度を高めていく計画である。図4に検証試験の計画を示す。

また、上記以外にも、SRZ-1200 では従来プラントから改良された機器を採用する場合には、設備毎に個別の検証試験を実施する計画である。

| 項目 | 内容 | '20 | '25 | '30 |
|----------|--|------------------------------|-----|-----|
| 炉内流動試験 | 原子炉容器内での冷却水の流動状況を確認し、プラントの安全・性能評価に必要なデータを取得・評価を行う。 | [Green arrow pointing right] | | |
| 溶融炉心冷却設備 | 溶融炉心の挙動及び冷却性能の確認を行い、許認可向けのデータ整備を行う | [Green arrow pointing right] | | |
| 炉内核計装 | 炉内核計装設備の計測性能・健全性・保守性の確認を行う | [Green arrow pointing right] | | |

図4 SRZ-1200の主要設備の検証計画

5. 製造設備及びサプライチェーン維持のための活動

原子力発電プラントの建設に向けては、福一事故を踏まえた新設計画の中断に伴い、設計だけでなく、製造・調達に関する準備を進めておく必要がある。

製造設備の維持については、SRZ-1200の機器製作に必要な三菱原子力特有の大型設備の重要部品の刷新、及び設備毎の保全ノウハウ蓄積による設備保全体制の強化を行っている。加えて、SRZ-1200の製作に向け、工作機械の主軸回転数高速化、センサを利用した設備状態監視による故障未然防止等の高機能化を実施し、原子力機器製造の競争力を維持・向上を図っている。

また、サプライチェーン維持に向けては、原子力特有の技術を有する約400社以上のビジネスパートナーと、SRZ-1200関連の進捗に関する情報交換や、調達品の品質確保に向けた協議、仕様合理化の検討など連携強化を推進している。また、調達先候補となり得るビジネスパートナーを拡大する活動も進めている。

6. まとめ

当社は、脱炭素社会の実現と電力安定供給のために、従来プラントに比べて安全性、信頼性を高め、かつ再生可能エネルギーとの共存が可能な社会的受容性の高い新たな原子炉としてSRZ-1200を開発している。電力4社との共同研究により基本設計を概ね完了させており、SRZ-1200で適用している新設計・新技術の検証試験を実施している段階にある。

今後、検証試験を着実に実施するとともに、製造・調達面でも準備を継続し、建設サイト決定後にはサイト固有での詳細設計を進めていく。

謝辞:

SRZ-1200 の基本設計推進にあたり、“次世代軽水炉 基本設計フェーズ 2”として、北海道電力株式会社、関西電力株式会社、四国電力株式会社、九州電力株式会社及び三菱重工業株式会社の共同研究として実施し、関係者の方々に多大なるご助言をいただきました。ここに記して謝意を表します。

SRZ®は日本における三菱重工業株式会社の登録商標です。

参考文献

- (1) 三菱重工業株式会社, https://www.mhi.com/jp/products/energy/innovative_next_generation_pwr.pdf