安全性・信頼性・経済性を追求した欧州向けAPWR（EU-APWR）

EU-APWR Realizing Safety, Reliability and Economic Efficiency

鈴木　成光 Shigemitsu Suzuki
神田　誠 Makoto Kanda
清水　俊介 Shunsuke Shimizu
田中　和昌 Kazumasa Tanaka
寺田　誠二 Seiji Terada
川原　博人 Hiroto Kawahara

1. はじめに

EU-APWR の基本的な設計コンセプトは，国内で開発済の APWR をベースとした米国向け 170 万 kW 級プラント US-APWR を踏襲しており，US-APWR の優れた特徴である電気出力 170 万 kW の大容量とそれによる経済性や，高性能蓄圧タンクを含む4系統の安全系やデジタル計装・制御設備などによる高い安全性や信頼性をベースとしている．一方で，欧州対応として 50Hz 化や国際電気規格 IEC 適用に加え，欧州各国電力会社のさらなる安全性に関する要求をまとめた European Utility Requirement（EUR）や各国独自の規制も考慮に入れながら開発を進めている．表1には，APWR と EU-APWR の特徴をまとめて示す．

表1　主要仕様比較

	APWR	EU-APWR
炉心熱出力　(MWt)	4 451	4 451
電気出力　(MWe)	1 538	1 700 級
炉　心	12 ft 燃料 257 体	14 ft 燃料 257 体
安全系	電気系　2 系統 機械系　4 系統	電気系　4 系統 機械系　4 系統
蓄圧タンク	高性能蓄圧タンク×4	高性能蓄圧タンク×4
燃料取替用水ピット	格納容器内設置	格納容器内設置
安全系非常用電源	ディーゼル発電機	ガスタービン発電機
低圧タービン最終翼長	54 in	74 in 級

2. プラントの概要

EU-APWR の一次系は，4 451MWt の熱出力と 170 万 kW 級の電気出力を有する4ループ加圧水型軽水炉（PWR）である．炉心には，14ft の有効長を有する 257 体の燃料集合体が装荷される．燃料集合体の周囲にはステンレス鋼製の中性子反射体が設置され，構造の簡素化による信頼性向上を図るとともに，中性子の有効利用による燃料サイクルコストの低減と原子炉容器の照射量の低減を図っている．図1に，既設 PWR，APWR 及び EU-APWR の炉心サイズを比較して示す．EU-APWR と APWR は，既設 PWR に比べて非常に大きな熱出力を有している．EU-APWR では，原子炉容器のサイズを変更することなく 14 フィート燃料を適用することによりウラン装荷量増加と低出力密度化を図り，現行の U-235 濃縮度制限5wt%や燃料棒燃焼度制限 62GWd/t の範囲内で 24 ヶ月の長サイクル運転を可能とし発電コストを低減するとともに，大きな設計余裕を確保し安全性の向上を図っている．

二次系の低圧タービンには，74 インチ級の超長翼を適用することにより，タービン効率の向上を図っている．また，計装及び制御(I&C)システムは，安全系と非安全系ともにフルデジタル化を行い，多重性，深層防護と多様性，自己診断性とオンラインメンテナンス性を考慮した設計となっている．図2には中央制御室の写真を示す．

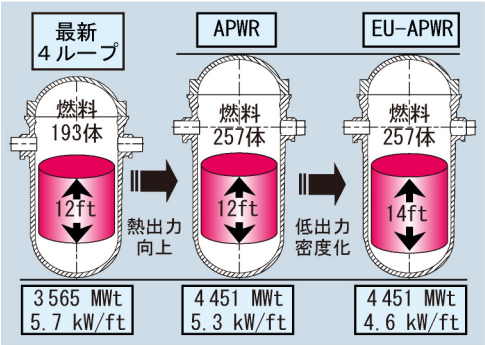

図1 原子炉設計の改良
(炉心熱出力の向上と低出力密度化)

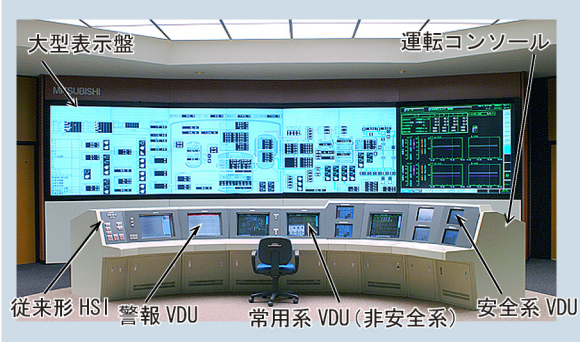

図2 中央制御室

3. 安全システムの特徴

3.1 4系統安全注入システム

図3に EU-APWR の非常用炉心冷却系の特徴を示す．EU-APWR の工学的安全設備の特徴は，従来プラントが必要な容量の設備を2系統設けた構成(100%容量×2)であったのに対し，これを4系統(50%容量×4)の構成とすることにより，単一故障とメンテナンスを考慮した場合にも，必要な安全機能を確保できることにある．また，これにより各系統の容量を減じて，機器の小型化を実現している．

3.2 蓄圧注入系採用による低圧注入系の廃止

事故時に炉心に冷却水を緊急注入するための蓄圧注入系は，US-APWR と同様の構成であり，高性能蓄圧タンク(図4)を各一次系ループに設置している．蓄圧注入系は，一次系の圧力が低下した場合にほう酸水を注入する機能を有し，APWR 用に新規に開発された高性能蓄圧タンクは，外部からの動力を使用せず(パッシブ)に作動するフローダンパーの働きにより，一次冷却材喪失事故(LOCA)の初期段階では，大流量のほう酸水を注入し，その後の段階では炉心の冷却維持に必要な少流量を注入する．この新しい蓄圧注入系は高圧注入系との組合せにより，現行炉にある低圧注入系を排除することを可能とした．

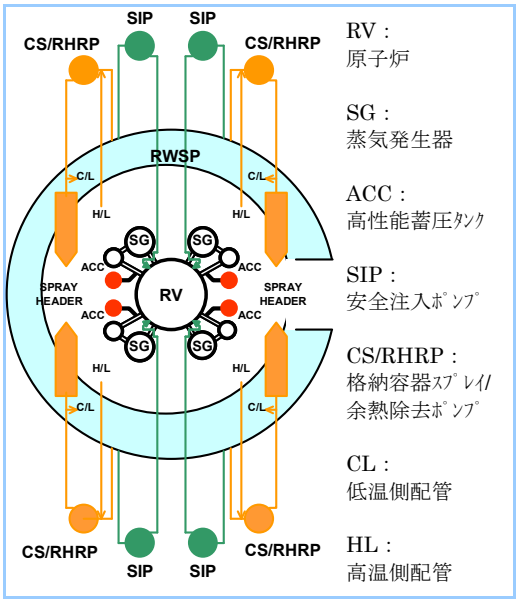

図3 EU-APWR の非常用炉心冷却系
(4系統の設備で構成)

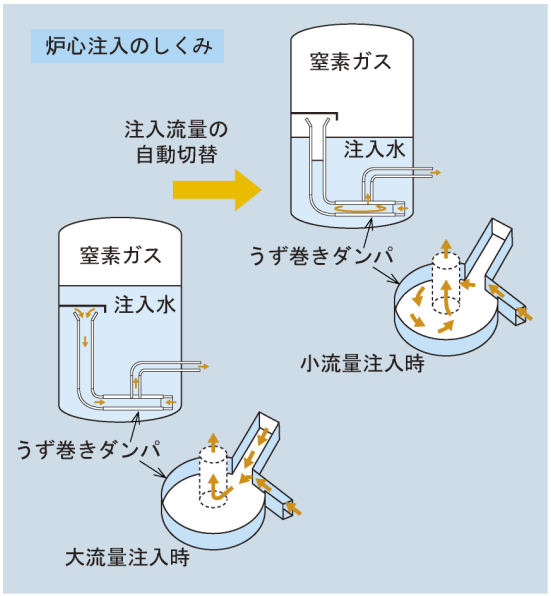

図4 高性能蓄圧タンク

3.3 安全系非常用電源とガスタービン発電機

安全関連の非常用電源系は，安全注入システムと同様に 50%×4系統のシステムから構成される．4系統のうち2系統の作動がプラントの安全停止に必要であり，これによりオンラインメンテナンスが可能となる．その非常用電源としては，ガスタービンを使用した発電機を適用している．ガスタービン発電機の起動時間は，従来のディーゼル発電機に比べて長いものの，高性能蓄圧タンクの採用により高圧注入系の起動時間に余裕があることから，合理的に成立するシステムである．ガスタービン発電機は，構造や補機システムが簡素であることからメンテナンスが容易であり，コストメリットも期待される．

3.4 燃料取替用水ピット（RWSP）配置

非常用炉心冷却設備の水源である RWSP は，格納容器の最下層部に設置しており，4つの再循環サンプがその底部に組み込まれる．これにより，従来設計の RWSP が格納容器外に設置されている場合に必要であった再循環サンプへの切り替え操作なしに，安全注入ポンプや余熱除去ポンプへほう酸水を継続的に供給でき，事故時の誤操作や機器故障などのリスクを排除することにより，より高い安全性を確保することができる．

4. 建屋設計の特徴

EU-APWR の建屋内の機器配置は，プラントの運用やメンテナンスを容易にして，また被曝を最小にすることを考慮して設計される．4系統化した系統の分離や隔離壁を含む対策により，火災や溢水，高エネルギー配管の破損事故などの事象を想定しても，安全関連のシステム機能は維持される．

また，一次系の主要機器を収納するプレストレスト・コンクリート製格納容器（PCCV）は，LOCA を含むすべての事故においても，漏洩や放射能の放出がないように設計され，LOCA 条件のもとでピーク圧力に耐えるように設計されている．図5に EU-APWR プラントの鳥瞰図を示す．安全関連の構造，システムおよびコンポーネント（SSC）は，プラントの安全性を損なうことなしに，地震を含む自然現象の影響のみならず航空機衝突にも耐え得るように設計されている．

さらに，安全上重要な耐震設計については，安全停止地震動（SSE）と運転基準地震動（OBE）に基づいている．EU-APWR 標準プラントの耐震設計用の安全停止地震動（SSE）の応答スペクトル（SDRS）は，見直しされた米国 RG1.60 で定義されるスペクトルに基づいている．図6に示すように EU-APWR の耐震設計用地震応答スペクトル（SDRS）は，欧州の原子力発電所サイト候補地に有効な EUR の設計基準地震動（DBE）を包絡している．

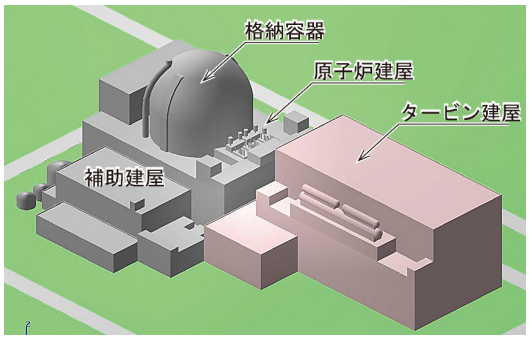

図5 EU-APWR 建屋全景

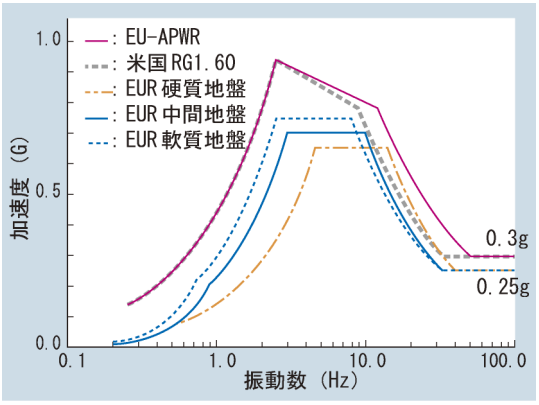

図6 耐震設計用地震応答スペクトル（SDRS）

5. EU-APWR の今後の方向性

5.1 シビアアクシデント対応

EU-APWR は，万一，シビアアクシデント（設計想定を超えた過酷事故）により炉心が損傷を受けた場合でも，周辺環境へ影響が及ぶことが無いような対策を施している．シビアアクシデント対

応は，US-APWR のシステムを踏襲しており，その基本概念は，原子炉キャビティを冷却水で満たし，溶融状態の燃料を原子炉キャビティ内に保つことである．標準設計の基本システムを図7に示す．これは，炉心損傷時の対策として，水素ガスを低濃度で処理する設備，損傷した炉心を冷却するために注水する設備，崩壊熱を除去するための設備の概念を表したものである．

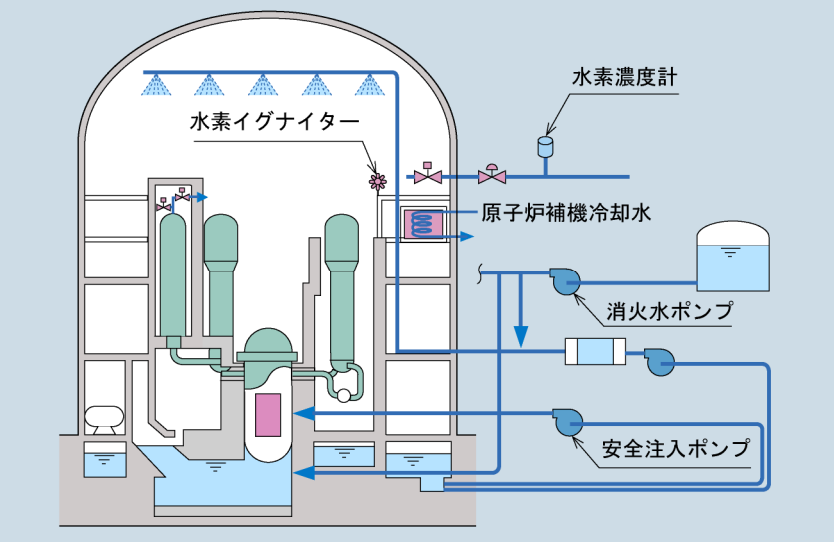

図7　EU-APWR 標準設計のシビアアクシデント対応システム

さらに，欧州ではチェルノブイリ事故の影響を直接経験していることもあり，シビアアクシデント対策や設計想定超事象など，より厳しい安全要求が EUR や各国規制で求められることも事実である．シビアアクシデント対応をより確実にするためには，信頼性の高い原子炉キャビティ冷却システムを有し，多様性，独立性を考慮した冷却水供給システムを構成する必要があり，要求に応じて設計対応できるようにしている．これらの設計を踏まえて計算された EU-APWR の炉心損傷頻度（CDF 値）は，EUR の要求事項（$<1\times10^{-5}$／炉年）を満足することを確認している．

5.2　今後の取組

EU-APWR は，安全性と経済性及び信頼性を，高いレベルでバランスさせた三菱標準炉である APWR シリーズの特徴を踏襲した設計に加え，欧州固有のより高い安全性を求めたニーズに応えるべく欧州市場にふさわしいプラントとして開発されたものである．今後は，現在の標準設計に基づき EUR に基づく評価を進めていくとともに，長期的には特定のサイト条件や国情によって必要な変更を加えていくことも必要となると考えられる．これらの EUR 評価プロセス及び各国電力会社との継続的な技術的意見交換等によって，標準設計の更なる改良に結びつく可能性もあり，より欧州市場にふさわしいプラントとして今後も売り込みを図っていく．

執筆者紹介

鈴木成光
原子力技術センター
原子力技術部
部長

神田　誠
原子力技術センター
原子力技術部
次長

清水俊介
原子力技術センター
原子力技術部
軽水炉計画課
課長

田中和昌
原子力技術センター
原子力技術部
軽水炉計画課
主席

寺田誠二
原子力技術センター
原子力技術部
軽水炉計画課
主席

川原博人
原子力技術センター
原子力技術部
軽水炉計画課
主席