

153万kW級改良型PWRの特徴

Feature of 1530 MW Advanced PWR

原子力事業本部 饗 場 洋 一^{*1} 栗 原 幹 雄^{*2}
山 本 一 巳^{*3} 関 一 哉^{*4}

改良型PWRの開発は、第3次改良標準化計画の一環で昭和57年から開始され、PWR電力5社（北海道、関西、四国、九州、日本原子力発電）と三菱重工、ウェスチングハウス社の7社による国際共同開発体制の下で実施され、昭和62年3月に一たん終了した。改良型PWRはこの開発成果を基に、これまでの運転経験で培った改良技術及び最新技術を取入れるとともに、プラント性能、運転性、信頼性の一層の向上並びに大容量化等による経済性の更なる向上を図ったプラントであり、三菱における社内の試験のほか、PWR電力5社で実施した各種の試験により、設計の妥当性、実証性を確認している。改良型PWRは、日本原子力発電(株)が建設を予定している敦賀3、4号機に採用が予定されており、現在建設計画中のプラントとしては、電気出力153万kWで世界最大出力を達成している。

The development of the Advanced PWR (APWR) was started from 1984 as a nuclear power source for future energy demand in Japan by five Japanese PWR utilities (Hokkaido, Kansai, Shikoku, Kyushu, Japan Atomic Power), Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. and Westinghouse Electric Company. This development plan has once finished in 1989. Afterwards, APWR has been brushed up by the lots of operating experience and latest technology. APWR will be the largest plant with an electric power of about 1530 MW. The first APWR is planned to be built at Tsuruga No.3 and No.4 by Japan Atomic Power Co.

1. はじめに

改良型PWRは、21世紀のエネルギーを担うプラントとして開発した世界最大級のプラントである。電気出力は既存の120万kW級PWRから炉心の大容量化でウラン装荷量を約30%増加させるとともに、一次冷却材ポンプ、蒸気発生器及びタービン等を高性能化・大型化することで約153万kWへの大出力化を達成した。

また、経済性、安全性、信頼性、運転保守性について徹底的な改善を図った、高性能・高信頼性の最新鋭プラントである。

本報では、この改良型PWRの設計の特徴につき紹介する。

2. 改良型PWRの概要

改良型PWRは表1に示すコンセプトの下に開発を行った。以下にその概要を述べる。

2.1 経済性の向上

(1) 大出力・大容量化

ユニット当りの出力・容量増加のスケールメリットで発電単価当りの建設費低減を図ることができる。改良型PWRでは、原子炉容器出口温度を先行プラントで実績のある325°Cに維持し、炉心の大型化、炉心冷却材流量の増加により大出力・大容

表1 改良型PWRの設計のねらいと特徴
Design feature of APWR

大出力・大容量化	燃料257体炉心、高性能大容量設備開発	⇒ 約153万kW達成
建設費の低減	総合的な施策展開(物量低減、設計標準化、QA/QC合理化、調達合理化、建築施工合理化)	⇒ コンパクト配置、系統設備簡素化(更なる低減活動展開中)
ウラン資源節約	中性子反射体・ジルカロイグリッド燃料採用	⇒ ウラン資源8%節約
プラント稼働率の向上	炉心運用性向上、定検作業の高速化	⇒ 長サイクル運転、定検短縮(将来的には24箇月サイクル運転、定検は20日台目標)
	ECSS4系列化、高性能蓄圧タンク採用 事故時再循環切換え不要化	⇒ 炉心損傷確率1けた低減
	中性子反射体を設置した改良型炉内構造物	⇒ ボルト/ねじ個数を大幅削減 原子炉容器照射量を1/3に低減
	70F-1型蒸気発生器	⇒ 耐食性、流体力学振動に対する裕度及び湿分離性能向上
	100A型一次冷却材ポンプ	⇒ シール特性向上
	新型中央制御盤、デジタル式制御保護装置採用	⇒ ヒューマンエラー防止、保守作業容易化
作業線量低減	線源強度の低減、保守作業自動化/ロボット化	⇒ 作業線量0.2(人・Sv)/(炉・年)以下
放射性廃棄物量の低減	発生量低減、減容処理技術の改良	⇒ 最新4ループより大幅に低減

*1 原子力技術センター軽水炉プラント技術部長

*3 原子力技術センター軽水炉プラント技術部

*2 原子力技術センター軽水炉プラント技術部

*4 原子力技術センター原子炉・安全技術部

プロジェクト主査

表2 改良型PWRの基本仕様
Basic specifications of APWR

項目	最新4ループ	改良型PWR
電気出力	118.0万kW	約153万kW
炉心熱出力	341.1万kW	445.1万kW
燃料集合体	17×17 193体	改良型17×17 257体
平均線出力密度	17.9kW/m	17.6kW/m
熱設計流量	20100(m ³ /h)/ループ	25800(m ³ /h)/ループ
原子炉容器出口温度	325℃	325℃
制御棒体数	53体	69～85体
蒸気発生器(伝熱面積)	52F型(4870m ²)	70F-1型(6500m ²)
一次冷却材ポンプ	93A-1型(6000HP)	100A型(8000HP)
タービン	TC6F44	TC6F54
計測制御設計	アナログ/ディジタル 改良型制御盤	総合ディジタル /CRTオペレーション

量を実現した。

電気出力は、総合的な経済性を考慮し、約153万kWとしている。表2に最新4ループとの基本仕様の比較を示す。

(2) 建設費の低減

改良型PWRでは、すでに運転中のプラントに対して実施してきた建設費低減活動を更に展開し、一層の低減を図るため、安全性・信頼性の向上とともに簡素化・標準化をねらって、プラントトータルとして総合的に建設費低減を進めている。

プラント設備については、物量低減、設計標準化、QA/QC合理化、調達合理化の活動を推進しており、建設・施工の分野についても施工の合理化、工法の合理化、工期短縮を検討している。

現在も活動推進中であるが、配置合理化による建屋体積削減、蒸気発生器、高圧タービン等、主要機器のコンパクト化、系統設備の簡素化、品質管理要求の適正化等で着実な進展をみており、さらに競争力強化のための検討を展開中である。

(3) ウラン資源の節約

炉心周辺部に金属製ブロックの中性子反射体を設置し、炉心領域から漏出する中子線を低減するとともに、燃料集合体のグリッドをジルカロイ製とすることにより中子線の吸収率の低減を図った。これにより、既設プラント比で約8%ウラン資源が節約できる。

(4) プラント稼働率の向上

改良型PWRでは機器の信頼性向上、長寿命化を図るとともに長サイクル化への対応も考慮して炉心を大型化している。15箇月以上の運転にも対応でき、将来的には24箇月運転も実施可能である。

定期検査期間の短縮については蒸気発生器伝熱管検査の高速化、燃料取扱い装置の高速化、多機能化等で35日定検の検討をほぼ終了しており、今後20日台を目指すこととしている。

2.2 安全性強化

非常用炉心冷却系を最新4ループから以下のとおり設計改良し、システムの簡素化による信頼性向上、事故時の運転員負担軽減及び炉心損傷確率の1けた低減を図った。

- ① システム構成を4系列化し、分岐管、連絡管を削除
- ② 高性能蓄圧タンクを採用し、低圧注入機能をパッシブ化
- ③ 格納容器内に燃料取替用水ピットを設置し、再循環切換を不要化

2.3 信頼性の向上

(1) 改良型炉内構造物

炉内構造物については、中性子反射体の採用で部品点検の大

幅な削減を図るとともに、ねじ部及び溶接部を炉心領域から完全に排除した設計としている。

なお、中性子反射体の採用で原子炉容器の中性子照射は最新4ループの約1/3に低減している。

(2) 改良型蒸気発生器

腐食に強いインコネルTT690合金を伝熱管に採用するとともに、伝熱管の流動振動を確実に抑えるための9点支持改良振れ止め金具を採用している。

また、高性能小型気水分離器及び3/4インチ伝熱管の採用で大容量化に対応したコンパクトな設計としている。

(3) 改良型一次冷却材ポンプ

新型シールの採用でシール特性の向上、長寿命化を図るとともに、インペラ・ディフューザ形状の見直しで大容量・高効率を達成している。

2.4 運転操作性・保守性の向上

発電所の運転をより安全で容易なものとするため、中央制御盤は人間工学的な知見に基づき、機器の監視と操作がテレビ画面上で集中して行えるコンパクトなコンソールタイプとしている。また、制御保護装置はディジタル技術を用いて、制御性や信頼性並びに保守性を向上させた総合ディジタル化システムとしている。

2.5 環境との調和

改良型PWRは、これまでの豊富な運転経験を基に、環境との調和を目指し、よりクリーンな運転・保守の実現のため、最新の技術の適用による、放射性廃棄物量の低減など、より一層の改善を図っている。

(1) 作業線量の低減

一次冷却材中のケミカルシムに濃縮¹⁰Bを採用することで水質管理の適正化を図り、作業線量を低減するほか、燃料集合体ジルカロイグリッド及びステライト代替材の適用範囲拡大による線源発生抑制、放射線源除去のための浄化流量増加対策をとる。改良型PWRではこれらの対策のほか、保守作業の自動化/ロボット化により、0.2(人・Sv)/(炉・年)以下への被ばく線量の低減を図ることとしている。

(2) 放射性廃棄物量の低減

濃縮¹⁰Bの採用(一次冷却材中のほう酸濃度を従来の1/5に低減)によるほう酸廃液量低減、ドレン回収系の強化、樹脂溶離システムの適用等で発生量を抑制するとともに高性能セメント固化装置の適用等で廃棄物の減容を図る。改良型PWRではこれら対策を取り入れることで放射性廃棄物量を最新4ループより大幅に低減することとしている。

3. 主要設備設計

3.1 炉心・燃料

改良型PWRの炉心は、257体の改良型17×17燃料集合体の大容量炉心であり、燃料経済性向上のほか、以下の対策を採ることによってMOX炉心や高燃焼度炉心のような運転多様化ニーズに対し、フレキシビリティの高い設計とした。

- (1) 制御棒体数: MOX燃料の装荷規模に応じた制御棒体数を設定(増設すれば全炉心MOX装荷運用にも対応可)
- (2) 燃料プレナム長増加: MOX燃焼及び高燃焼度化燃料に対応する内圧増加抑制対策として燃料棒のプレナム長を増加
- (3) 燃料集合体: 現行の17×17をベースに以下の改良仕様を採用
 - ① 55GWd/tへの高燃焼度化に対し、耐食性の向上を図った改良被覆管の採用

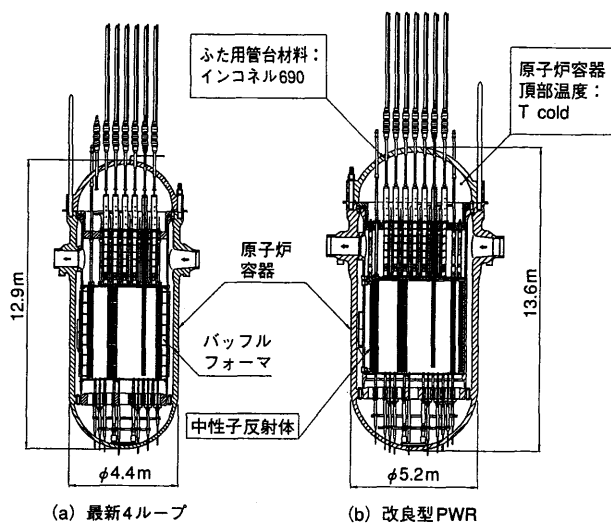


図1 原子炉構造物概念図 改良型PWRと最新4ループの原子炉構造の比較を示す。
Design feature of APWR reactor vessel and core internals

- ② 燃料棒内、プレナム長増加で集集体全長を130mm増加
- ③ 中性子経済向上／作業線量低減のためジルカロイグリッド採用
- ④ 燃料棒入口部にフィルタを設置し、万一異物が混入しても除去できる構造

3.2 原子炉構造物

改良型PWRの原子炉容器は大容量炉心を収納するため、図1に示すとおり、内径を約5.2mと大型化した。ふた用管台は材料を熱処理したTT690合金を採用するとともに、頂部温度を低減し、耐応力腐食割れ性の向上を図っている。

炉内構造物については、中性子反射体の採用で下記3項目を改善したほか、大型化に対する炉内流動安定化も図っている。

- ① 中性子の有効利用によるウラン資源の節約
- ② ボルト／ねじ個数を約2000個から約50個に大幅低減
- ③ 原子炉容器への中性子照射量を最新4ループの約1/3に低減

3.3 蒸気発生器

改良型PWRの蒸気発生器は、炉心の大容量化に対応して最新の4ループの52F型から70F-1型にしている。図2に設計の概要を示す。伝熱管は先行プラントでも採用している耐食性に優れたTT690合金とし、伝熱管サイズは経済性、耐震設計等の面から、効率的でよりコンパクトな機器設計とするために現行のプラントで採用している7/8インチより小口径の3/4インチ管を採用している。Uベント部の振れ止め金具は、支持点数を最新4ループの6点から9点に増加した設計とし、大型化した70F-1型でも流体力学振動の発生を確実に防止できる設計としている。

気水分離器は小型高性能化、湿水分離器は従来の2段から高性能の1段タイプの設計とし、全体外形をコンパクトな設計とし、経済性向上を図っている。

給水リングは持ち上げ方式とすることで熱成層化を抑制し、給水管台の疲労裕度の向上を図っている。

3.4 一次冷却材ポンプ

改良型PWRの一次冷却材ポンプは、炉心の大容量化に伴い最新プラントの93A-1型より大容量の100A型を採用している。

図3に改良点の概要を示す。改良型PWR向けの100A型は、既に北海道電力(株)の泊1、2号機で50Hz用に開発した100D型をベースに、6000HPから8000HPに容量増加したものである

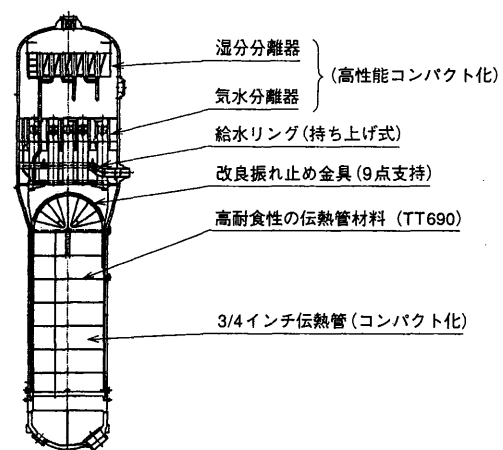


図2 70F-1型PWR蒸気発生器の概要 改良型PWR蒸気発生器設計上の改良ポイントを示す。
Design feature of 70F-1 type steam generator

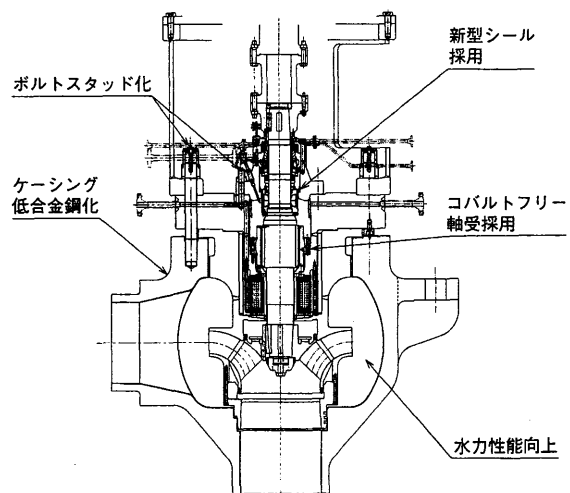


図3 100A型一次冷却材ポンプの概要 改良型PWR一次冷却材ポンプの改良ポイントを示す。
Design feature of 100A type reactor coolant pump

が、インペラ形状の改良を行い、ポンプ効率の向上を図ることで熱設計流量25800(m³/h)/ループが可能な設計とした。

ケーシングは、一次冷却材管と同様、従来のステンレス鋼に替えて低合金鋼化とし、長寿命化及びUT検査性向上を図っている。

限定漏えい式の非接触タイプのNo.1シールは、リーク安定性に優れた一体型セラミックの新型シールを採用することで、シール差圧と封水戻り量の関係を示すP-Q特性の安定性向上を図った。また、従来は金属とセラミック部がOリングで分離されていたものを、簡素化構造とすることでOリングの数を減らし、かつ材料特性を改良したOリングの採用で、寿命を約5年から約7.5年に長寿命化できた。

また、ボルトのスタッド化、コバルトフリー軸受の採用により、定検時の作業性向上、被ばく線量低減も図った設計としている。

3.5 非常用炉心冷却設備

図4に最新4ループと改良型PWRの設備構成の比較を示す。非常用炉心冷却系は従来プラントでは100%×2系列の構成であるが、改良型PWRでは機械系を完全独立な4系列とし、分岐管、連絡管を削除することで系統構成を簡素化するとともに、多重性・独立性を強化している。

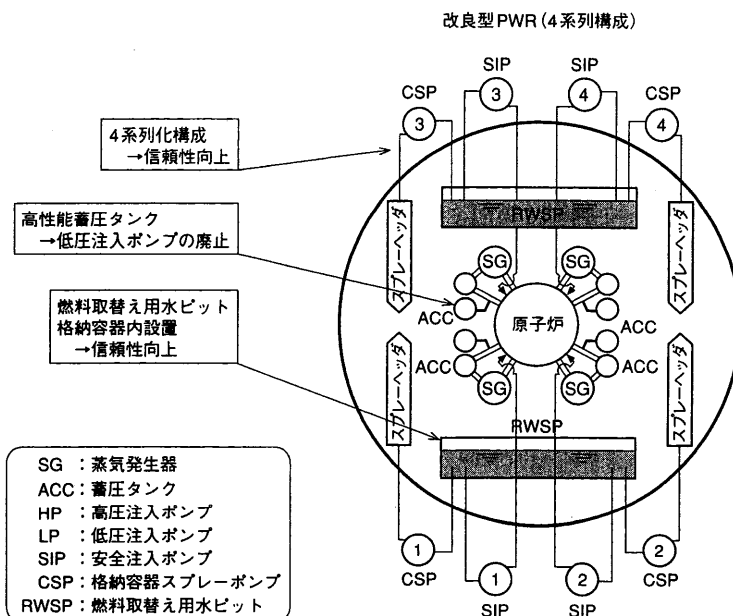
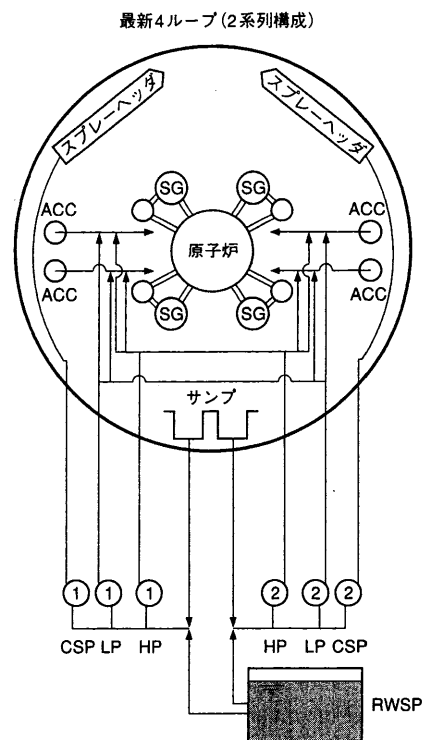


図4 非常用炉心冷却設備の改良設計概要
改良型PWRの非常用炉心冷却設備の改良ポイントを最新4ループとの比較で示す。
Design feature of improved ECCS

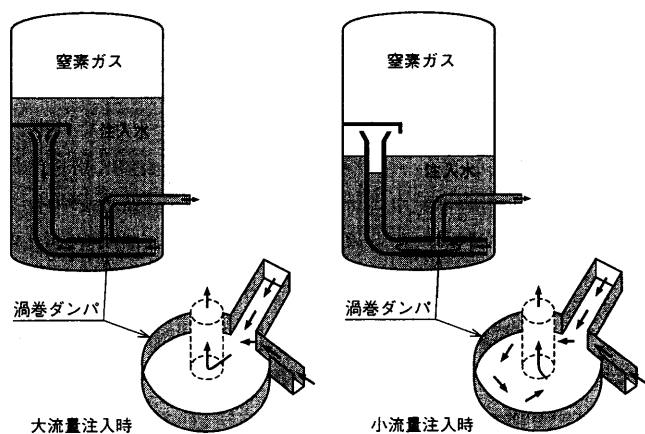


図5 高性能蓄圧タンク概念
高性能蓄圧タンクの仕組を示す。
Concept of advanced accumulator

また、事故時の炉心への安全注入の水源である燃料取替え用水ピットを格納容器内に設ける設計とし、事故時に炉心注入水の水源を燃料取替え用水ピットから格納容器サンプに切替える操作を不要とすることで、システムの信頼性、安全性を向上している。

さらに、改良型PWRでは従来の蓄圧タンクと低圧注入ポンプの機能を兼備えた高性能蓄圧タンクを採用している。図5に高性能蓄圧タンクの炉心注入の仕組を示す。高性能蓄圧タンクは、タンク内に設置した渦巻ダンパ（静的機器）で大流量から小流量への切換えをタンク内水位の低下に応じて自動的に行うもので、大流量が要求される本来の蓄圧注入機能に加え、より小流量の低圧注入機能もカバーすることで低圧注入ポンプが不要な設計としている。

以上の対策を採ることで安全性・信頼性の強化が図られ、炉心損傷確率は最新4ループに比べ約1けた低減している。

3.6 蒸気タービン

大出力・大容量化に対応し、高性能化・高効率化を図っている。低圧タービン最終翼長は最新4ループプラントでは44インチを採用しているが、タービン効率改善を図るため54インチ級翼に長大化するとともに完全三次元流れ設計翼の採用で約0.5%の効率向上を図っている。先行機での翼長増加時の経験を生かし、性能及び振動特性・応力等問題なく適用できる見通しを得ている。なお、低圧タービン用軸受は、従来より大型化を図る必要があるため、発電機用とともに、実物大モデル検証により、特性を把握し実機に適用する計画である。

高圧タービンは、出力増加により、タービン入口体積蒸気流量が従来機に比べ増加するが、タービン翼の体格を増した設計とすることにより先行機と同等の安全率を有することを確認している。

3.7 タービン発電機

タービン発電機は、先行プラントの設計思想を踏襲し電氣的及び機械的諸特性について一連の設計検討を行い、153万kW級発電機の主要な要素である回転子径、端子電圧、電流について設計検証を進め成立の見通しを得た。

大容量化に対応した構造変更は各種解析手法を駆使して設計を行っており、固定子巻線端部の電磁力増加に対しては、支持構造の強化を図る設計として、信頼性の向上を図ることとしている。

4. ま と め

改良型PWRは最新の技術を導入した、高性能・最新鋭のプラントである。また、電気出力153万kWは、現在建設計画中のプラントとしては世界最大級であり、立地効率の向上、大容量化によるスケールメリットで、今後、発電コストの低減、電力の安定供給への貢献が期待される。

なお、改良型PWRは、日本原子力発電(株)の敦賀3,4号機として建設計画中である。