北海道電力・泊発電所における改良技術

(北海道電力㈱) 安井 嘉 彰, (三菱重工業㈱) 北村 哲 男

泊発電所は、北海道電力㈱初の原子力発電所として1984年8月に1,2号機同時着工し、現在1号機は本年(1989年)6月の営業運転開始を目前に控え最終調整試験中である。また2号機は1991年6月営業運転開始を目指し順調に建設工事を進めている。本発電所は、三菱重工業㈱を主契約者として建設を進めてきたが、このプラントは先行PWRの設計、建設および運転の経験に基づく改善ならびに先端技術の導入など多くの最新技術を取り入れて、安全性の向上、信頼性・稼働率の向上、被曝低減化等をさらに進めたプラントである。本稿では、プラントの設計ならびに建設面などにおける主要な改良技術を紹介する。

I. ま え が き

我が国の商業原子力発電プラントは、1988年末現在運転中35基、総発電量約2,800万kW台の規模になっており、このうち加圧水型原子力発電プラント(PWR)は16基が運転中で、泊発電所1,2号機はそれぞれPWRの17,18基目となる。

我が国における軽水炉は米国からの導入で出発したが、その初期段階においては幾つかの初期トラブルに遭遇し、対応策の検討、対応技術の開発等のため稼働率が低迷するといった苦難を経験した。このような経験を基に、電力およびメーカーは設計の改良、新技術の開発等による自主技術の確立を図ると共に国産化を推進してきた。また、原子力発電所の運転・保守面でもその重要性を十分に認識し、安全の確保ならびに信頼性の向上に一層努めてきた。

この活動が1975年度から通産省の指導の下に開始された軽水炉改良標準化活動により体系化されたことにより一層推進され、各種改良・改善の具体策が打ち出され逐次採用されるにつれ、稼働率は著しく向上し、今や我が国の軽水炉は安全性、信頼性、運転保守性とも世界に誇れる原子力発電プラントとなっている。

泊発電所は、このような改良技術や先端技術を積極的に採り入れた最新のPWRプラントであり、また建設工事においても工法の改善や厳しいサイト条件を配慮して工夫をほどこしており、本稿ではこれら泊発電所の改良・改善技術を紹介する。

II. 泊発電所の特徴と主要仕様

泊発電所1,2号機は、電気出力579MWe、炉心熱出力1,650MWtの軽水減速軽水冷却加圧水型原子力発電プラントであり、我が国のPWRとしては17,18番目であるが、同容量の2ループプラントとしては7,8番目に建設されるものである。国内のPWRプラントを改良技術の変遷により区分すると、泊発電所は国産自主技術によって改良開発を行なった最新のPWRに属している。

泊発電所においては、タービン効率の向上を図った高効率44in.低圧最終翼の採用、蒸気発生器の耐食性向上のための材料、構造等の改良、マン・マシン・インターフェイスを改善するための人間工学等を適用した改良型中央制御盤の採用等、PWRとして最新の改良技術を取り入れているが、さらに先行PWRにはない特徴として、

- (1) 50Hz地域に建設される最初のPWR
- (2) 先行2ループプラントに比べ電気出力の向上
- (3) 掘削土量の削減等サイト条件の対応を考慮し、我が国で初めてのタービン建屋を原子炉に向けて垂直にした、いわゆるI型配置の採用

等がある。

プラントの主要仕様を第1表に、プラント全景を写真1に示す。

Features of Improved Technology in Tomari Nuclear Power Station; Hokkaido Electric Power Co.: Yoshiaki YASUI, Tetsuo KITAMURA.
(1989年 2月28日 受理)

写真1 プラント全景

第1表 泊発電所1,2号機の主要仕様

プラント全般	
原子炉形式	加圧水型
熱出力	1,650 MWt
発電端電気出力	579 MWe
格納容器型式	鋼製円筒型
原子炉設備	
燃料集合体型式	14×14型
燃料集合体数量	121体
制御棒クラスタ数量	29体
冷却回路数	2 ループ
1次冷却材全流量	約 30×10^3 t/h
主蒸気運転圧力	59 kg/cm ² ・abs
原子炉容器型式	縦置円筒型
蒸気発生器型式	51 F 型
1次冷却材ポンプ型式	100 D 型
タービン発電設備	
タービン型式	TC 4 F-44 型
発電機容量	650 MVA
タービン流入蒸気量	約 3,285 t/h
タービン制御	EH ガバナ
タービンバイパス	70%

Ⅲ. 設計面での改良技術

1. プラント出力向上

泊発電所1,2号機は先行の九州電力姶良発電所1,2号機や、四国電力伊方発電所1,2号機と原子炉出力は同じ設計であるが、それらに比べ低温の冷却水の利用が可能で高真空度が得られ易いことからタービン型式、復水器真空度の選定に際しては、以下の技術を採用することによって最適化を図り、高性能かつ高耐力のプラントとなっている。さらに抽気段数の増加、空気抽出器形式変更等によりプラントの性能の一

層の向上を図っている。

(1) 高効率44 in. 低圧最終翼^①の採用

低圧タービン最終翼には、従来火力の50 Hz向44 in. 最終翼を3次元フローパターン設計、高性能翼形の採用、湿分除去装置の改良等の最新の技術によって改善し、効率向上、信頼性向上を図ったものを採用している。

(2) スーパーサイズ形2段再熱式湿分分離加熱器の採用

従来の2ループプラントでは、主蒸気のみによる再熱方式であったが、泊発電所では高圧タービン途中からの抽気も利用した2段再熱方式を採用して効率の向上を図っている。また、本体をタービンの左右に1基ずつ置く、いわゆるスーパーサイズ形を採用し合理化を図っている。

第1図に、スーパーサイズ形2段再熱式湿分分離加熱器の構造図を示す。

第1図 スーパーサイズ形2段再熱式湿分分離加熱器の構造図

2. 稼働率・信頼性向上対策

(1) 燃料棒の湾曲軽減対策⁽²⁾

従来の2ループプラントでは、14×14型7グリッドの燃料集合体を使用していたが、泊発電所では、熱膨張による燃料棒の湾曲量を一層低減するためにグリッド数を8に増し、スパン長を減少させた燃料集合体を採用している。8グリッド燃料集合体では、さらに湾曲軽減対策として、グリッド拘束力を低減させるためのグリッドスプリング形状の改良、ボトムオフ構造の採用、被覆管の偏肉規制等も採り入れて、燃料の信頼性を一層高めている。第2図に、14×14型8グリッド燃料集合体の構造を示す。

第2図 14×14型燃料集合体の構造図

(2) 新型炉内構造物の採用

炉内構造物については、上部炉心支持板を従来の平板型からインパーテッドトップハット型に変更して構造強度の改善を図り、またバッフル・ジェット対策としてバッフル内の冷却材の流れ方向を下向きから上向きにする、いわゆるアップフロー方式を採用し、さらに従来の円筒型熱遮蔽体をやめ中性子の周方向照射分布を考慮して最適な位置に熱遮蔽体を設置する分割型熱遮蔽体の採用等先行2ループプラントに比べていくつかの改良技術を採用している。

第3図に、原子炉容器内の構造図を示す。

(3) 改良型蒸気発生器⁽³⁾の採用

蒸気発生器は、PWRプラントの最も重要な機器の1つであり、その信頼性向上のためにこれまで数多くの

改良・改善が図られてきた。泊発電所では、第4図に示すようなこれらの改良・改善を全面的に採り入れた改良型蒸気発生器を採用しているが、その主要な改良点を以下に示す。

- (1) 伝熱管の材料であるインコネル600合金に特殊熱処理を施すことにより、応力腐食割れに対する信頼性を向上
- (2) 伝熱管支持板の管穴形状の改善と材質を炭素鋼から耐食性の優れたフェライト系ステンレス鋼に変更することにより、デントリングおよび応力腐食割れ発生環境を除去
- (3) 2次側熱流動の改善策として、流量分配板を設置すると共に、循環比を増加させる等により管板上のスラッジ堆積を防止し、また応力腐食割れに対する信頼性を向上
- (4) 管板部の伝熱管拡張法の改善策として、全厚拡張すると共に、その拡張法を液圧拡張とローラ拡張を組み合わせることで、残留応力を低減

さらに泊発電所では、蒸気発生器の信頼性をより一層高めるため、以下のような水質・環境面での改良・改善技術を採用している。

- (1) 蒸気発生器2次側給水の水質管理技術の改善策⁽⁴⁾⁽⁵⁾として、復水脱塩装置出口水のNa/Clのモル比管理による遊離アルカリの濃縮防止
- (2) 高ヒドラジンの運転等による蒸気発生器内水の還元雰囲気強化
- (3) 建設初期段階から清浄度管理の強化により蒸気発生器への不純物持込みを極力抑制
- (4) 100D型1次冷却材ポンプの採用

本プラントでは第5図に示す国産初の100D型1次冷却材ポンプを採用している。100D型は、50Hz用1次冷却材ポンプとして国内で初めて開発されたものであり、従来の60Hz用1次冷却材ポンプに比べ回転数が1,200rpmから1,500rpmに大きくなるため、軸長を短くして軸の剛性を高めている。さらに100D型は、最新の60Hz用1次冷却材ポンプの93A-1型と同様に軸シールをカートリッジ化し、保守・取扱面での改善が加えられ、一段と信頼性の高いものになっている。

(5) 応力腐食割れ(SCC)防止対策の強化

近年、原子炉冷却系の機器配管の応力腐食割れ対策がますます重要になって来ているため、泊発電所では原子炉冷却材圧力バウンダリーおよびこれと同等の圧力・温度範囲の耐圧部材には、より耐食性の優れた316系オーステナイトステンレス鋼を採用し、これ以外の

第3図 原子炉容器内の構造図

範囲の1次系接液部には炭素含有量を規制した、SCC感受性の低いステンレス鋼を採用することによりSCC防止対策の強化を図っている。

(6) タービン設備の改良

低圧タービンロータの一体化、タービン電気油圧式調速制御装置および電気式保安装置の採用、一体形蒸気室の採用、全チタン復水器の採用等多くの改良・改善技術を取り入れ信頼性の向上を図っている。

以下に、その主な改良技術について紹介する。

(1) 低圧タービンロータの一体化⁽⁶⁾

原子力タービンで重大な経年劣化の1つに低圧タービン乾湿交番域における応力腐食割れ(SCC)がある。蒸気発生器からの蒸気は、精度の高い給水管理により高純度であるが、乾き域から湿り域に移行す

る領域では蒸気中の微量不純分が濃縮し、応力腐食割れ発生環境となる。そのため泊発電所では、SCC発生の可能性のある上流側円板の焼ばめ構造の除去、作用応力の低減、軸材の延性および靱性を上げ耐SCC性の向上を図った一体形タービンロータを採用している。一体形ロータと従来の焼ばめ形ロータの比較を第6図に示す。

(2) 全チタン復水器の採用

海水漏入防止、復水器性能確保のため復水器の冷却管材料としてアルミニウム黄銅管に替え耐食性に優れたチタン管を採用している。

3. 安全性・運転操作性の向上

泊発電所の計画段階に米国 TMI 発電所 2 号機で発生した事故を契機として、原子力発電所の安全性確保

の面で、計測・制御・監視システムと運転員の役割分担がいかに重要であるかが再認識され、人間工学の原子力への応用が積極的に検討・適用されるようになった。泊発電所では、先行プラントにおいて検討された設計をベースにTMI事故を教訓とし、プラントシステムと運転員との接点、すなわちマン・マシン・インターフェイスを改善するために、人間工学的配慮や近年急速に進歩している計算機技術を積極的に採り入れて中央制御盤を改良すると共に、計装制御設備も最新の技術進歩を導入して改良を行っており、プラントの安全性、信頼性を一段と高めている。

(1) 改良型中央制御盤⁷⁾の採用

中央制御盤は操作性・監視性をより良くするため、以下のような制御盤の構成・配列の改善と共に、最新の計算機技術・CRT技術を積極的に採用している。

中央制御盤の外観を写真2に示す。

- (1) 監視・操作の重要度・緊急度、操作頻度等を考慮して、主盤、原子炉補助盤、タービン発電機補助盤に分割し、監視性・操作性の向上を図った。
- (2) 運転員の誤操作、誤判断を防止するため、警報窓・操作器等をその機能、重要度に応じカラーコーティングすると共に、システムのイメージを把握し易くするためにシステムのフローに沿ってスイッチ、計器類を配列する、いわゆる器具配列のミミック化、グループ化を実施した。
- (3) プラントの主要パラメータは、CRTと在来計装のおおののメリットを活かした表示形態とし、CRT・計算機技術を活用して情報の整理、集約化、事象判別の容易化を図った。またCRTについては、輝度値の向上、表示ガラス面の無反射処理を行なった改良型を採用した。

(2) 計装制御設備の改良

計装制御設備については、測定精度、信頼性、操作性および保守性の向上等を図るため、以下のような改良を行なっている。

(1) 計装のデジタル化

従来アナログ式であった炉内核計測装置、放射線監視装置を、マイクロコンピュータを利用したデジタル式システムに変更することにより、システムとしての性能を向上させると共に検出精度の向上、計測範囲の拡大を図り、さらにマイクロコンピュータ化することにより運転操作の自動化が可能となっている。また、制御棒位置指示装置についてもソリッドステート回路をベースとしたデジタル式を導入し、検出精度の向上を図っている。

第4図 蒸気発生器の構造図

(2) 原子炉保護系ロジックラックのソリッドステート化

従来電磁リレー方式を使用していた原子炉安全保護装置の論理回路をソリッドステート式とすることにより設備のコンパクト化ができ、またパルスによる自動試験が可能となり試験性能の向上を図っている。また、ソリッドステート化に伴い多重伝送技術を情報伝送回路に導入することが可能となっている。

第5図 1次冷却材ポンプの構造図

第6図 低圧タービンロータの一体形と焼ばめ形との比較

(3) 原子炉保護系計器ラックの

アナログ計器のカード化

原子炉制御保護装置のアナログ計器のコントローラ部は、従来半導体ボックス式であったが、これを

改良型プリントカード式のものとし、信頼性の向上を図ると共にオンラインでのカード交換あるいは調整操作を容易化することにより保守・点検性を向上させている。また、カード式とすることにより自動試験装置の導入も可能となっている。

(4) 原子炉安全保護系の4チャンネル化

ロジック回路の整合化、プラント運転性能の向上を図るため、安全保護系に4チャンネル化を採用し、2 out of 4 ロジックで統一した設計とした。

(5) バイパス管理方式の採用

安全保護系を4チャンネル化したことにより、1チャンネルを手動でバイパス状態にして運転することが可能となったため、手動でのバイパス管理方式を採用した。本方式の採用により、安全保護系の試

写真 2 中央制御盤

験時または保守時においては、当該チャンネルをバイパスすることにより、他の1チャンネルに単一故障が生じたとしてもプラントの誤トリップが防止でき、稼働率の向上を図ることができる。

4. 被曝低減対策

被曝低減は原子力発電所の大きな課題の1つであり、これまでその対策のために多くの改良・改善技術の開発がなされてきた。泊発電所で採用している主な被曝低減対策としては次のような改良技術がある。

- (1) 原子力容器の炉心領域胴部を一体鍛造材とすることにより、溶接線を減らし供用期間中検査

第7図 原子炉容器蓋一体化構造物

作業を軽減

- (2) 第7図に示す原子炉容器蓋一体化構造物の採用により原子炉容器蓋開放・復旧作業を容易にし、また期間を短縮
- (3) 1次冷却系構成機器のステンレス鋼材、インコネル材のCo含有量を低減することにより線源強度を低減
- (4) 使用済燃料ピット浄化系の容量を増加することにより燃料棒被覆管表面からの溶出クラッドの除去を強化
- (5) 温態機能試験時の水質改善によりクラッド発生を抑制

さらに作業効率化のために改良した分解組立用工具や検査装置等を採用することにより、定検作業時等の被曝線量は大幅に低減される見通しである。

Ⅳ. 建設工事面での改良技術

泊発電所の建設工事においては、これまでのPWRの建設経験に基づく多くの改良工法⁽⁶⁾を採用すると共に、冬季の厳しい気象条件を配慮して種々の対策を施しており、先行プラントに比較してもより一層の能率化および合理化が図られている。

(1) 大型サイドクレーンの採用

原子炉格納容器の建設においては、冬季の気象条件の悪い期間を避けて短期間に効率よく工事を行うため、第8図に示すような超大型のクローラークレーンを採用し、建付鋼板を従来より一層大ブロック化すると共に、格納容器内部の鉄骨やボラークレーンの据付等

第8図 大型サイドクレーン

を格納容器工事と並行して行えるようにして工事の合理化を図った。その結果、格納容器の建設工期は約6.5ヵ月に短縮され、これまでのPWRプラントの最短期間となった。

(2) 先行鉄骨工法の採用

建設工事では、コンクリート工事に先行して鉄骨を組み上げ、床面にはデッキプレート敷いて、鉄筋組や型枠、コンクリート打ちの各工事を上・下階で、それぞれ並行して行う、いわゆる先行鉄骨工法を採用することにより、工期の短縮が可能となり、またデッキプレート床上で作業が行えるため、安全面でも改善を図ることができた。

(3) その他の改良・改善工法

建設工事面では前述のほか、冬季工事の能率化を

図るため建屋外周部プレキャスト版の採用や凍結防止対策として多くの工夫・改善を施しており、また工期の短縮化のために配管ユニット化の拡大、複合ユニット化の採用等設備の改善や機器、大口径配管等の先入品の拡大、区画別据付工法の採用等種々の改良工法を採り入れている。

V. あとがき

以上紹介したように、泊発電所は安全性・信頼性を向上させるための改良・改善を可能な限り採り入れた最新のPWRプラントであり、また経済性の面でも先行プラントの運転経験や最新の知見等に基づき、安全性・信頼性の確保を前提とした設計合理化を図ってきた。これらの改良・改善の成果は、試運転段階において十分満足できるものであることが確認されており、営業運転に入ってから安全で信頼のできるプラントとして優れた運転実績を上げること確信している。

さらに、安全性・信頼性の確保のためには、本稿で紹介した設備設計面での対策と併せて、運転管理面での充実が不可欠であり、これについても、要員の教育訓練を初めとして、運転・保守体制の確立に積極的に取り組んでおり、その成果をプラントの安全運転に生かしていきたいと考えている。

— 参考文献 —

- (1) 荒木良一郎, 他: 高性能反動翼の開発, 三菱重工技報, 17[2], 100(1980).
- (2) 近藤吉明, 他: PWR特集号・PWRの炉心及び燃料の改良・開発, 同上, 19[6], 652(1982).
- (3) 上田敏彦, 他: PWR特集号・PWR蒸気発生器の設計改良と研究開発, 同上, 19[6], 671(1982).
- (4) 土居将能, 他: PWR原子力発電プラントの二次系水質試験, 火力原子力発電, 30[3], 251(1979).
- (5) 岡本卓也, 他: PWR特集号・PWR水質管理技術の向上, 三菱重工技報, 19[6], 775(1979).
- (6) 角家義樹, 他: 原子力一体系低圧タービンロータ, 同上, 19[2], 103(1982).
- (7) 佐々木俊之, 他: PWR特集号・新形中央制御盤の開発, 同上, 19[6], 685(1982).
- (8) 南山英雄: 泊発電所の建設計画, 火力原子力発電, 37[4], 355(1986).