世界初の AP1000 向け中国三門，海陽発電所 1250MW 級原子力タービンプロジェクトの完遂

Completion of the Nuclear Turbine Project for Sanmen and Haiyang Nuclear Power Station in China which are Combined with World-First AP1000 Reactor

鷺森 啓[*1] Hiromu Sagimori
中面 末光[*2] Suemitsu Nakatsura
山本 耕一郎[*3] Koichirou Yamamoto

三菱重工業(株)及び三菱パワー(株)(以下，当社)は中国三門原子力発電所 1,2 号機及び海陽原子力発電所 1，2 号機において，世界初の AP1000 炉商用機向け原子力タービン発電設備を4基納入した。本プロジェクトは機器供給と中国タービンメーカへの技術移転からなり，当社は2次系タービンプラントの蒸気タービンと熱交換器設計及び主要機器の供給を行った。蒸気タービンは 54 インチインテグラルシュラウド翼を最終翼に採用し，高圧タービンの調速段廃止や，低圧排気室の改良など，性能向上を図った先端技術を採用した。両プラントとも燃料装荷後ノートラブルかつ4～5か月という超短期間での試運転で早期に商業運転が開始できたことで，当社の技術力と性能・品質・信頼性に対して高い評価を得た。

1. はじめに

中国では経済発展による電力需要の増加と地球温暖化防止策として積極的に原子力発電所の新規建設を推進しており，当社はハルビン電気集団とコンソーシアムを組み，2007 年9月以降 AP1000 炉向け原子力タービン発電設備4基を受注した。本プロジェクトでは原子力タービンプラントの設計・製作技術をハルビン電気集団へ移転しながら，お客様への機器供給と建設及び試運転支援を行い，2018 年から 2019 年にかけて4基の商業運転を開始した。本報では，本プロジェクトで納めた蒸気タービンやプラント設備の概要，建設工程並びに試運転結果等を紹介する。

2. プロジェクト概要

三門 1，2 号機，海陽 1，2 号機のプラント仕様概要と位置を表1，図1に示す。

表1 プラント仕様概要

発電所 / 項 目	三門 1,2 号	海陽 1,2 号
お客様	三門核電有限公司	山東核電有限公司
原子炉	AP1000	AP1000
熱出力	3415 MWth	3415 MWth
電気出力	1251MWe	1253MWe
契 約	2007 年9月	2008 年2月

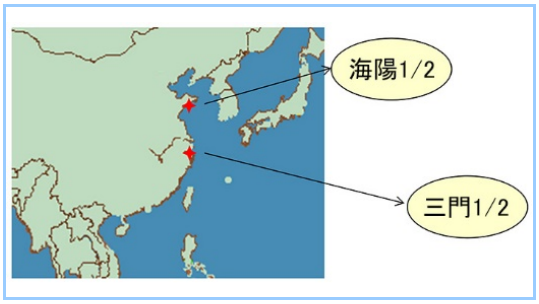

図1 発電所位置

*1 三菱パワー(株) 蒸気タービン技術総括部 蒸気タービン計画部グループ長 技術士(機械部門)
*2 三菱パワー(株) プロジェクト総括部 高砂原子力部 主席プロジェクト統括(PM)
*3 三菱パワー(株) プロジェクト総括部 高砂プラント技術部 主幹技師 技術士(機械部門)

三門原子力発電所は上海の南方にある浙江省の三門県に位置し，6基の発電所が建設できるように整地されている。一方，海陽原子力発電所は，青島の東方にある山東省海陽市に位置し，8基の発電所が建設できるように整地されている。両発電所とも，その敷地に最初の2基（合計4基）を建設するプロジェクトであり，コンソーシアムパートナーであるハルビン各社と機器の製作を分担した。当社は2次系タービンプラントの蒸気タービンと熱交換器の設計と主要機器及び部品の製作を担った。プロジェクトの主要体制を図2に示す。

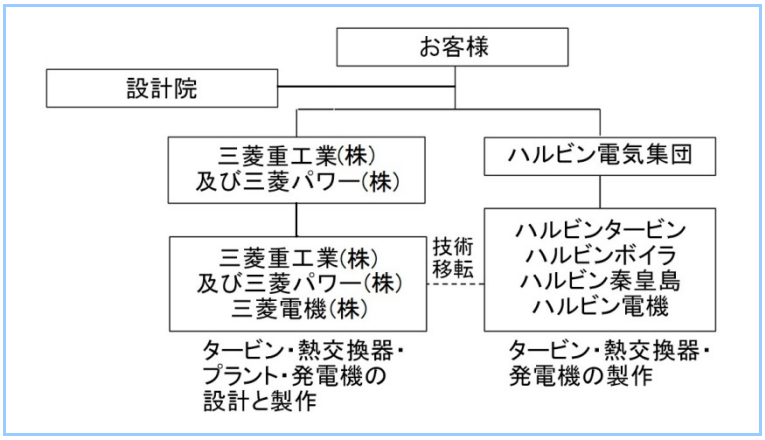

図2　プロジェクト主要体制

3. 蒸気タービン

蒸気タービンは，高圧タービン1車室，低圧タービン3車室から構成され，当社がすべてのタービン機器の設計と回転部を中心とした機器製作を担当した。国内 PWR（加圧水型軽水炉：Pressurized Water Reactor）の泊3号機をベースとしながらも，1次系熱出力に合わせて低圧車室数を3車室化し，高圧タービンの調速段廃止や低圧排気室の改良などで性能（出力）向上を図った先進技術を採用した。断面図及び外観を図3～5に示す。当社の製作範囲はロータ及び動静翼等の回転部，主要弁である。

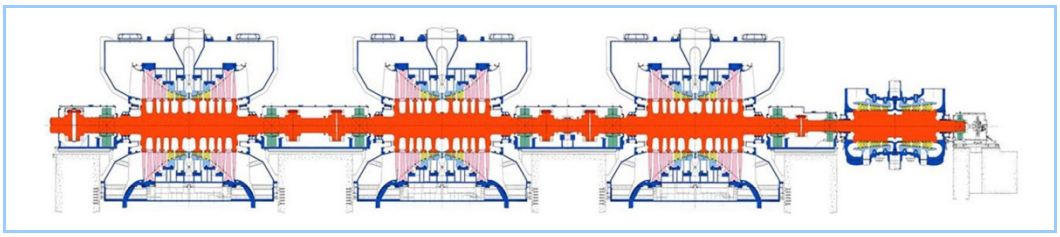

図3　蒸気タービン断面図

図4　三門1号機 蒸気タービン外観

図5　海陽1号機 蒸気タービン・発電機外観

3.1 高圧タービン

高圧タービンは主蒸気入口管4本が車室中央部に接続する複流設計で，各流は調速段のない全反動翼 10 段からなる。給水加熱器段数の増加に伴い高圧タービン翼列内から圧力の異なる2段の抽気をとる構成とした。車室は泊3号機をベースに大型化し，高圧2段抽気に対応した構造とした。ロータは中心孔のない一体ロータを適用した。

3.2 低圧タービン

低圧タービンは3車室からなり，いずれも複流設計で各流は 54 インチインテグラルシュラウド翼（Integral Shroud Blade，以下 ISB）を含む反動段 10 段から構成されている。54 インチ ISB は当社で開発した高効率・高信頼性最終翼であり[(1)]，2006 年の実機初適用[(2)]以降9機 10 年以上の実績のある信頼性の実証された設計である。排気室は排気損失低減のため大型化の改良を行い，性能向上を図った。ロータは応力腐食割れの発生しない全一体ロータを採用し高い信頼性を実現した。低圧タービンを図6に示す。

軸受はすべて基礎から直接支持する構造としてロータ支持剛性を上げ，軸系振動特性を向上させるとともに，グランド環は軸受箱から支持し内部車室も基礎から直接支持する構造として真空荷重によるクリアランス変化を解消し，静止部と回転部との接触を回避する構造とした。

図6 低圧タービンロータ

4. プラントシステム

タービンプラントは2段再熱7段再生サイクルで構成され，当社が基本設計を担当した。国内 PWR で実績のある系統/設備構成をベースとしながら，高圧給水加熱器を2段化して性能向上を図り，給水ポンプ予備機を削除してコストダウンに取り組むなどの先進技術を採用した。（概略系統構成は図7を参照）タービン建屋は，原子炉建屋に対してI型に配置され，地上3階，地下2階の鉄骨建屋（三門）*である。AP1000 炉では非安全系1次系機器がタービン建屋内に配置されているが，縦約 117m，横約 50mと同クラスのタービン建屋としては非常にコンパクトな建屋サイズを達成した。

＊：海陽はコンクリート建屋構造となる。

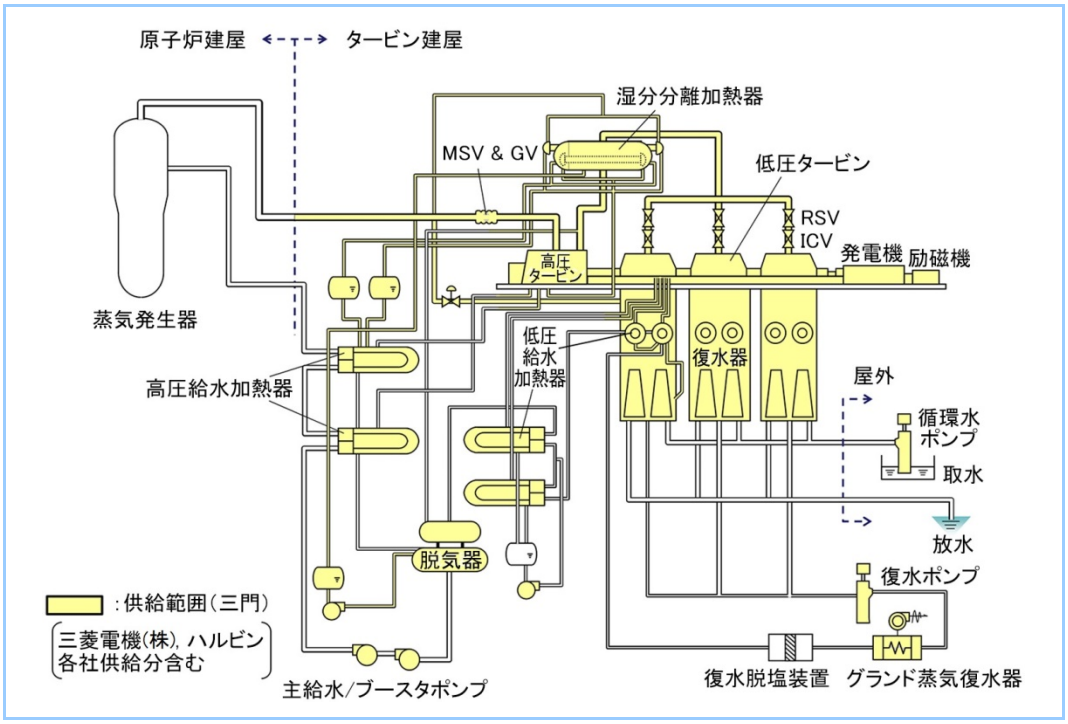

図7 タービンプラント概略系統

当社はタービンプラント性能に大きな影響を与える湿分分離加熱器(Moisture Separator and Reheater, 以下 MSR), 復水器, 給水加熱器, 脱気器の設計を行い, 製作はハルビン各社が担当した。タービンバイパス弁についても基本設計を当社が行い, ハルビンタービンが供給した。主給水ポンプ及びブースターポンプ, 循環水ポンプ, 復水ポンプ等の主要補機は当社が供給した。

MSR はタービン抽気及び主蒸気を加熱源とする2段再熱式で高性能シェブロンベーンを採用し, サイクル蒸気中の湿分を 99.5%以上分離できる性能を有している。MSR 鳥瞰図を図8に示す。復水器は, 海水冷却3胴式単圧復水器で, 冷却水系最適化検討結果に基づき冷却水流量, 冷却水温度上昇などの設計パラメータを設定した。チタン管及びチタンクラッド管板を使用して海水に対する耐食性を向上させるとともに, 管群配列を最適化させることにより, 復水器性能の向上を図っている。主給水ポンプは 33.4%容量×3台, 循環水ポンプ 50%容量×2台の構成であり, お客様にも高い信頼性を認められ予備機を設置していない。循環水ポンプは国内で実績のある可変翼式斜流ポンプを中国で初採用し, 翼開度制御によりポンプの軸動力を削減できる設計とした。

世界初の AP1000 炉ということもあり, 原子炉側とのインターフェース条件の確認・調整に特に時間を費やした。特に蒸気タービン及びプラント機器の制御装置はお客様要求により1次系機器との同一制御装置が求められ, 当社タービンプラントと初の組合せとなった。蒸気タービン保護装置は多重化し信頼性の高い CPU2重化システムを4式設置し, 当社タービンプラントとして初採用のシステム構成であった。そのため, 当社のタービン制御保護機能が実装できているか検証するため制御装置メーカでの種々ロジック検証や組合せ試験検証, 発電所現地での制御装置確認試験を行い, 試運転段階でインターフェーストラブルもなく制御要求事項を満足させることができた。

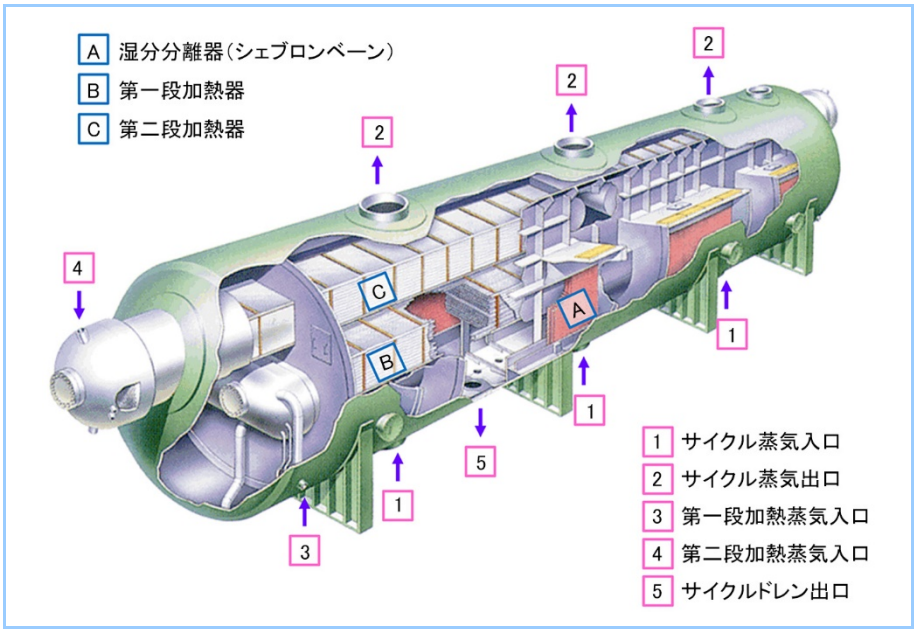

図8 MSR 鳥瞰図

5. 建設・試運転

5.1 建設・試運転工程

当社で製作した機器は，お客様との契約通り 2011 年から出荷を行い，現地工程に合わせて据付工事が行われた。建設途中で東日本大震災により福島第一原子力発電所事故が発生し，中国国内での原子炉安全確認等のため燃料装荷・初臨界まで時間を要したが，初臨界後は順調に試運転を進め商業運転を開始した。建設及び試運転はお客様との契約に基づき指導員を派遣し，現地工事の支援を行った。三門 1,2 号機の建設工程を図9に，試運転工程を図 10 に示す。

燃料装荷後の試運転期間は三門 1,2 号機では僅か4～5か月と短期間で，トラブルなく試運転を完了させることができた。並列後の試運転期間は僅か3か月程度ではあるが，各負荷ステージでの負荷遮断試験を初め，ブラックアウト試験，ヒータカット運転，復水器片肺運転，過速度トリップ試験，負荷変化試験等の各種試験はすべて実施している。これらの試験を含め短期間で試運転を終えることができたのは，お客様も含めた試験要領の作り込みと制御ロジックの確実な検証，長年の経験の上に成り立っている高品質な設計技術によるものであり，当社のタービンプラント設備の品質と信頼性を実証した。

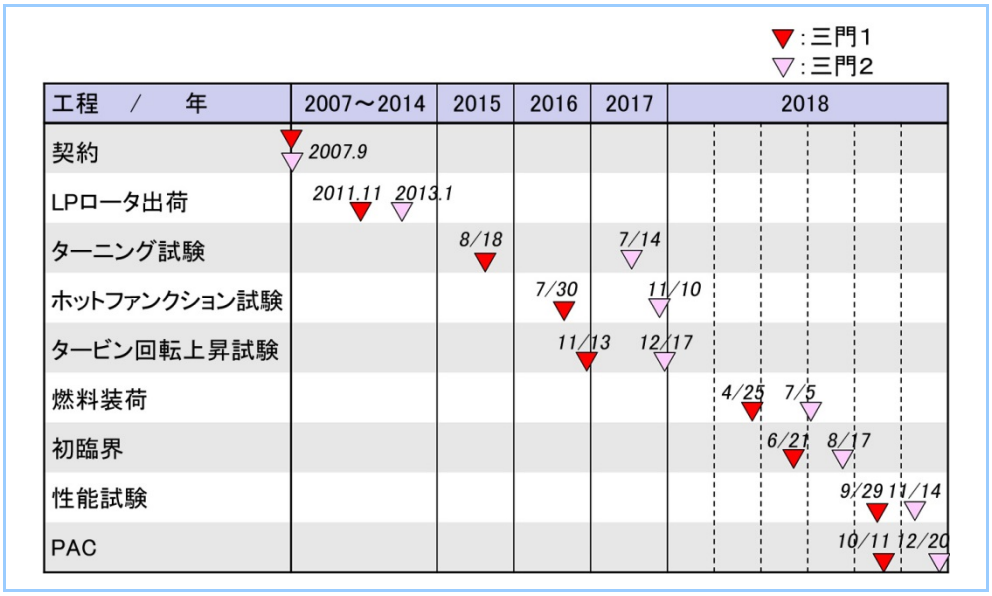

図9 プロジェクト工程(三門 1,2)

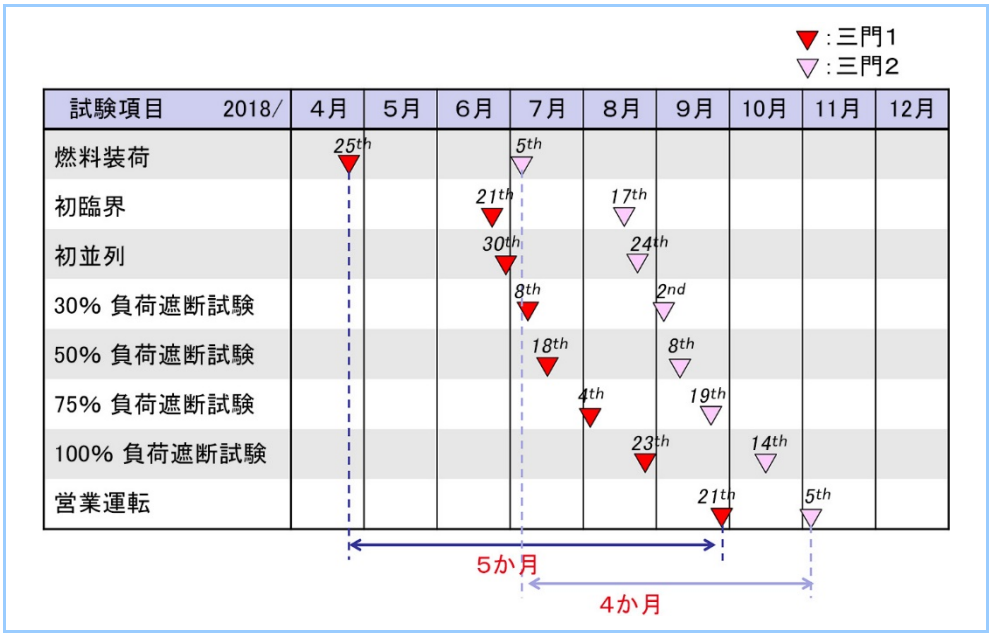

図 10 試運転工程(三門 1,2)

5.2 試運転結果

高圧，低圧蒸気タービンロータは当社にて製作しており，全4基ともロータバランスを実施することなく定格負荷運転まで到達した。定格負荷運転での軸振動値は保証値 100 μ mp-p に対して最大約 40 μ mp-p であり，良好な軸振動特性を示した。各ユニットの軸振動値を図 11 に示す。

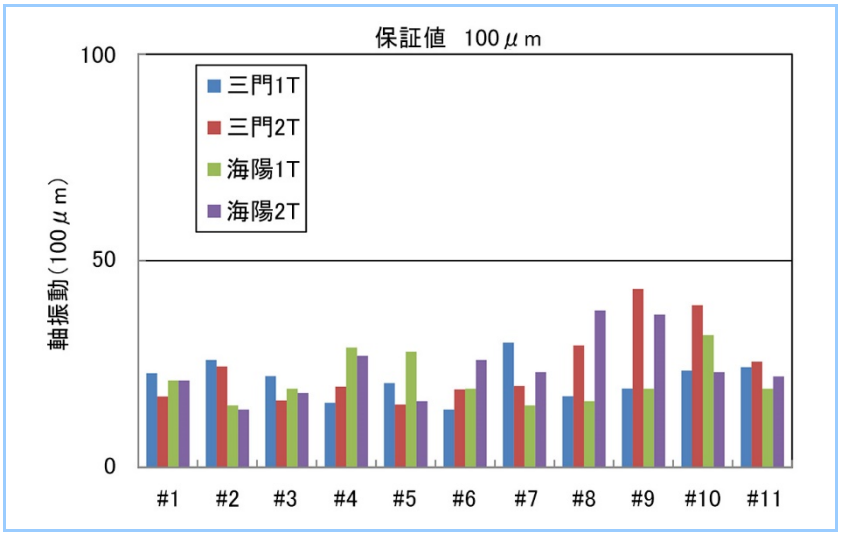

図 11 定格負荷運転時の軸振動値

図 12 に性能試験における電気出力(@定格真空)計測結果を示すが，いずれのユニットでも保証電気出力値に対して＋0.6%～＋0.9%(4基合計で約40MW)超過を達成した。これらは 54 インチ ISB や高圧タービンの調速段廃止，低圧排気室の改良などの先端技術と高品質な製作技術により達成することができた。

また，軸受振動，補機動力，機器騒音についても保証値を十分値満足しており，当社のタービンプラントの実力を実証した。

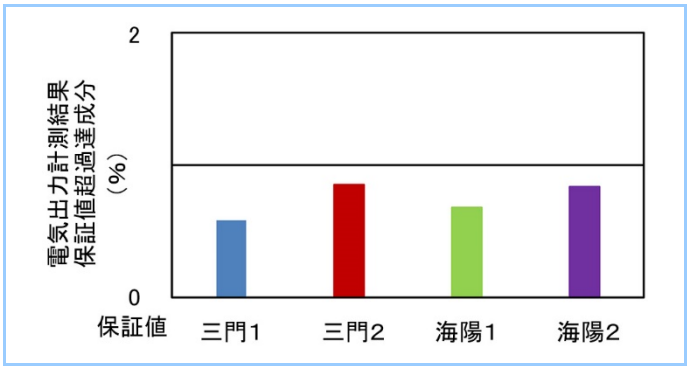

図 12 性能試験結果（電気出力）

6. まとめ

当社は，中国三門原子力発電所 1,2 号機及び海陽原子力発電所 1,2 号機において，世界初の AP1000 炉商用機向け原子力タービンプラントを4基（総出力 約 5000MWe）納入した。当社製蒸気タービンは燃料装荷後，4～5か月という短期間での試運転をノートラブルで終え，2018 年～2019 年にかけて商業運転を開始した。また，4基すべてにおいて性能，振動，騒音等の保証値を十分満足し，お客様の高い信頼と満足を得て引き渡しを完了した。

今後も中国やインドをはじめとした海外や国内において新規開発の 74 インチ最終翼を含めた当社の高品質・高信頼性・高性能タービンプラントにて原子力発電市場に貢献していく所存である。

参考文献

(1) 渡辺英一郎ほか，高効率・高信頼性タービン長大翼の開発，三菱重工技報 Vol.38 No.2 (2001) p.92～95
(2) 鷺森啓ほか，スロベニア クルスコ原子力発電所 54 インチ翼低圧タービン取替え工事超短工期にて完遂，三菱重工技報 Vol.43 No.4 (2006) p.37～40