

次世代 PWR 向け大型復水器の開発

1. はじめに

エネルギー資源の枯渇問題、地球温暖化問題の対策として、各国でさまざまな取り組みがなされている。たとえば古い石炭火力発電所を高効率ガスタービンコンバインドプラントにリプレースすることや、再生可能エネルギー（風力・太陽光）の利用拡大などが挙げられるが、原子力発電所の出力アップ、増設および稼働率向上も有効な打ち手と言える。

三菱重工業（株）が現在国内で納入している PWR（加圧水型軽水炉）の出力は、最大 118 万 kW 級であったが、今後建設が予定されている US-APWR（アメリカ向改良型加圧水型軽水炉）をはじめとした次世代炉は、170 万 kW 級の出力となる（図 1）。

2. 大型 PWR 向けタービン補機の開発

発電出力増加に伴い、発電機を回す蒸気タービンだけでなく、補機類も大型化される。代表的な補機として復水器が挙げられるが、復水器とは蒸気タービンで仕事を終えた蒸気を冷却水により凝縮させ、タービンの排気圧力をごく低圧（高真空度）まで下げる機器である。さらに、その復水を回収し蒸気発生器へ給水として供給する。一方、起動時や停止時に蒸気発生器からタービンへ向かう蒸気をバイパスさせるタービンバイパス蒸気や、非常用のドレンを回収する役割もあり、タービン建屋配置の最適化のため、低圧ヒータを復水器中間胴に配置している。

復水器は、多量の蒸気を凝縮させるため、多量の冷却水が必要とされるが、冷却水としては、海水、河川水、湖水ならびに冷却塔水がある。わが国の原発は海岸沿いに設置され、海水を冷却水として利用しているが、アメリカのように内陸部に原発が設置される場合、巨大な冷却塔が併設されているのが一般的である。

復水器はタービン建屋の中では最も巨大な設備であるが、たとえば US-APWR 向けの復水器の場合、高さ 26m、幅 10m、奥行き 18m となり、6 階建てのビルに相当するサイズである。

ここで、従来の PWR プラント向け復水器では中間胴に低圧ヒータ 2 本を設置する、2 ネックヒータタイプであったが、APWR 以降では、タービン建屋コンパクト化のため、復水器中

間胴に低圧ヒータを 4 本収納する、4 ネックヒータタイプの復水器を採用している。そのため、中間胴が長大化し、排気ロスが増加する可能性があるが、タービン性能を最大限に発揮させるため、復水器内の排気ロスを極力減らし、従来の 2 ネックヒータ並みに抑制する必要がある。また、アメリカ向けに限らず、各国の大型復水器で冷却水条件はさまざまであるが、その都度一から設計とならないように抽気管ルート、ヒータ配置については積極的にモジュール化、共通化を取り入れる必要がある。

そこで、三次元流動解析（Computational Fluid Dynamics：CFD）により、復水器内の抽気管配置、低圧ヒータの配置、管群配置の適正化を実施した。

3 三次元流動解析による設計検証

復水器内は前述のようにごく低圧となるので、蒸気の比容積が大きくなり中間胴内の蒸気流速は 200m/s を超える場合がある（マッハ数 0.5 以上）。したがって、圧縮性を考慮したシミュレーションを実施しなければならない。

また、冷却塔水プラントのように海水に比べ冷却水温度が高い場合、復水器内圧力が上昇し、タービン排気の旋回流（スワール）の広がり角度が大きくなる。したがって、フローパターンは低圧条件とは異なるが、近年計算機の性能が大幅に向上したことから、低圧タービン最終翼からの旋回流を模擬した解析が可能である。

解析モデルおよび解析結果の一例を図 2、3 に示す。管群部は、ポーラスメディアでモデル化し、凝縮性能に合った蒸気が吸収されるものとした。メッシュ数は約 400 万である。

解析コードには、Fluent ver. 6.3.26 汎用コードを用いた。また、乱流モデルには k-ε モデルを用い、流速分布および圧力分布の確認を行った。解析は、ロバスト性を考慮し、高圧条件（約 8kPa）と低圧条件（約 5kPa）で実施した。器内圧力の違いにより、中間胴入口近傍でフローパターンの差異があるものの、4 ネックヒータ復水器においては、下方のヒータが上方のヒータ真下のはくり域に設置してあり、高速蒸気流れの影響を受けないため、2 ネックヒータ復水器の中間胴と同程度の損失係数が得られた。すなわち、中

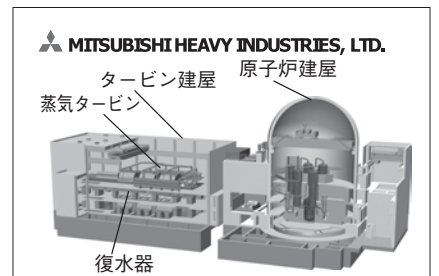


図 1 US-APWR 鳥瞰図

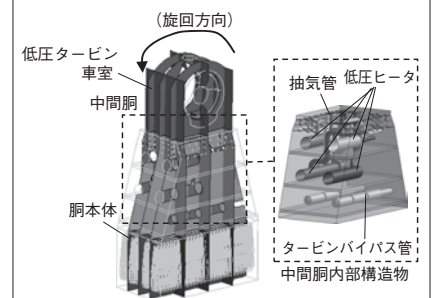


図 2 大型復水器解析モデル

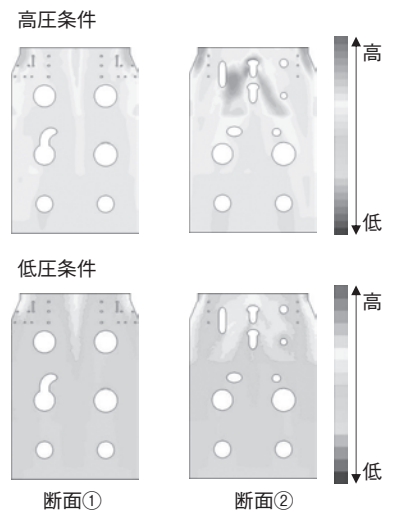


図 3 解析結果の一例（全圧分布）

間胴内部構造物の配置は適正であると確認できた。

4 おわりに

三次元流動シミュレーションによる、次世代 APWR 向け大型復水器の、ロバスト性を考慮した器内構造・配置適正化について紹介した。

(原稿受付 2011 年 12 月 13 日)

[藤田一作, 打道直孝 三菱重工業(株)]