改良型沸騰水型軽水炉インターナルポンプの
厚肉スリーブノズルの開発*高橋 志郎^{*1} 田中 賢彰^{*2}, 松村 清一^{*2}
梅森 広成^{*2}, 椎名 孝次^{*1}, 坂下 彰浩^{*3}
山下 理道^{*4}, 近藤 隆久^{*5}

Development of ABWR Internal Pump with Thicker Sleeve Nozzle

Shirou TAKAHASHI^{*6}, Masaaki TANAKA, Seiichi MATSUMURA,
Kosei UMEMORI, Kouji SHIINA, Akihiro SAKASHITA,
Norimichi YAMASHITA and Takahisa KONDO^{*6} Hitachi, Ltd. Power & Industrial Systems R & D Laboratory,
7-2-1 Omika-cho, Hitachi-shi, Ibaraki, 319-1221 Japan

The larger diameter nozzle with the thicker sleeve for the reactor internal pump (RIP) in the advanced boiling water reactor (ABWR) has been studied. The appropriate nozzle diameter was investigated through experiments and calculations, taking hydraulic performance and flow characteristics into consideration. The large diameter nozzle of 492 mm did not affect the hydraulic performance or the flow characteristics in the ABWR significantly, compared with the current nozzle (445 mm). Increase of hydraulic losses for the 492 mm nozzle was within 1 meter (2.5%) of the head from that for the 445 mm nozzle. As this variation was within the allowable level of the current RIP, the RIP with the nozzle diameter of 492 mm can be used in the next ABWR. Moreover, the flow pattern of the 492 mm nozzle in the RPV was almost the same as that of the 445 mm nozzle.

Key Words: Advanced Boiling Water Reactor, Reactor Internal Pump, Reactor Pressure Vessel, RIP Nozzle

1. 緒 論

改良型沸騰水型軽水炉(Advanced Boiling Water Reactor: 以下 ABWR と略す)では, 炉内の冷却材を循環するため, 図1の原子炉内蔵型再循環ポンプ(Reactor Internal Pump: インターナルポンプ, 以下 RIP と略す)が採用され, 従来の BWR プラントの PLR ポンプ(Primary Loop Recirculation Pump)に比較して原子炉再循環系のコンパクト化が実現した。PIP は水中モータを有する単段の斜流ポンプであり, 原子炉圧力容器(Reactor Pressure Vessel: 以下 RPV と略す)の下鏡においてノズルに支持され, 10 台設置されている。表1に RIP 1 台当たりのポンプ水力性能に関する設計仕様を示す。

硬質岩盤上に設置された高地震帯プラントでは, 耐震性能を向上するため, RIP ノズルスリーブ径の厚肉

化が期待され, それに伴い, ノズル外径が増加する。一方, 電源合理化のため, シャフトに回転慣性を与え, RIP の電源喪失時における炉心流量の急減を抑制した慣性増加型 RIP が開発された⁽¹⁾⁽²⁾。慣性増加型 RIP はフライホイールの設置により質量が増加するため, 厚肉スリーブノズルが必要となる。しかし, ノズルは RIP インペラおよびディフューザの下流すぐの位置にあるため, 過度のノズル外径増加はポンプ水力性能を変化させるとともに, ポンプ下流の流動形態を変え, 炉内流動に影響を及ぼすと考えられる。

その対応として, 図2の研究フローに示す手順で厚肉スリーブノズルの開発を実施した。まず, ノズル周りの形状を概略模擬した 1/5 縮小ダミーディフューザ試験装置により, 圧力損失増加量に及ぼすノズル外径の影響を検討し, 図3に示す適切なノズル外径 492 mm(現状ノズル外径 445 mm)を決定した。次に, RIP 水力および炉内流動特性に及ぼすノズル外径の影響は, 炉内構造物およびノズル周りの流路形状に関連すると考えられる。そのため, 原子炉下部プレナム内の構造物を模擬した 1/5 縮小 2 台 RIP セクタ試験装置を用いて, RIP 水力および炉内流動特性に及ぼすノズル外径 492 mm の影響を検討した。そして, 高温・高圧の実規模試験において, 外径 492 mm の厚肉

* 原稿受付 2002 年 10 月 15 日。

^{*1} 正員, (株)日立製作所電力・電機開発研究所(☎ 319-1221 日立市大みか町 7-2-1)。^{*2} (株)日立製作所原子力事業部(☎ 317-8511 日立市幸町 3-1-1)。^{*3} 正員, 東京電力(株)(☎ 100-0011 東京都千代田区内幸町 1-1-3)。^{*4} 東京電力(株)。^{*5} 東芝(☎ 235-8523 横浜市磯子区新杉田 8)。

E-mail: shirou_takahashi@pis.hitachi.co.jp

Table 1 Specifications of RIP (111% core flow rate)

Capacity [m ³ /h]	7700
Total Head [m]	40

Fig. 1 ABWR internal pump

1/5-Scale Dummy Diffuser Test • Selection of appropriate nozzle (Diameter: 492mm)
1/5-Scale Two RIPs Test (Similar vessel shape to lower plenum in ABWR) • Verification of vessel shape
Full-Scale Pump Test • Verification of size, fluid temperature and pressure
Actual RIP in ABWR

Fig. 2 Study flow of thicker sleeve nozzle

Fig. 3 Reactor internal pump and RIP nozzle

スリーブノズルにおける RIP の水力性能を検証した。また、流動解析により炉内流動特性に及ぼすノズル外径 492 mm の影響を評価した。

2. おもな記号

- D : ノズル外径 m
 dP : 差圧 m
 H : 全揚程 m
 K : 圧力損失係数 s²/m⁵
 N : 回転速度 rpm
 P : 圧力 Pa
 Q : 流量 m³/h, m³/s
 T : 温度 °C
 u : 無次元流速
 x : 無次元水平方向距離
 y : 無次元高さ方向距離
 ΔdP : 圧力損失増加量 m
 θ : テーパー角 °

3. 研究方法

3・1 試験方法 図 4 に 1/5 縮小ダミーディフューザ試験装置を示す。試験容器内には、1/5 縮小 RIP ディフューザの翼のない流路を模擬したダミーディフューザおよびノズルを設置し、ノズル外径を変更して、試験容器前後の 2 点間の差圧 dP を測定して圧力損失の変化量を評価した。試験に用いた 1/5 縮小ノズルは

Fig. 4 Dummy diffuser test apparatus

(a) Horizontal cross section

(b) Vertical cross section

Fig. 5 1/5-scale two RIPs test apparatus

アクリル製のノズルキャップを取り替え、ノズル外径 ($D=420\sim550$ mm: 実物サイズ相当) およびテーパ角 ($\theta=25\sim63^\circ$) を変更した。なお、試験における差圧に

Fig. 6 Location of measuring points

Fig. 7 Loop of ABWR RIP test center

対する機器の精度は実機換算で約 0.15 m, 流量は約 20 m³/h, 回転数は 1 rpm である。

図 5 に 1/5 縮小 2 台 RIP セクタ試験装置を示す。試験容器内に実物と相似な 1/5 縮小モデル RIP (比速度も一致) を 2 台設置し、インペラ、ディフューザ、ノズル等を模擬した。本報告では、ポンプ相似則⁽³⁾により実物スケールおよび実物 RIP の定格回転速度をもとに、モデルポンプ性能を実物性能にすべて換算して表示している。また、試験容器は原子炉圧力容器下部の 1/5 縮小セクタモデルであり、制御棒駆動機構 (CRD) ハウジング、制御棒案内管、原子炉圧力容器下鏡およびシュラウド等を模擬している。図 6 に示す差圧測定孔およびピトー管設置位置においてポンプ差圧 dP および流速分布を測定した。

図 7 に高温・高圧の実規模試験装置の試験ループを示す。試験装置内の水は実機と同等の温度 $T=279^\circ\text{C}$,

圧力 $P=7.4$ MPa に昇温, 昇圧され, ベンチュリー流量計, 熱電対および圧力伝送器により, ループの体積流量 Q 温度 T および圧力 P を測定した。また, RIP 前後の差圧 dP (揚程) を差圧伝送器により測定し, RIP の水力性能を評価した。差圧測定孔および流量計の位置は JIS 規格⁽⁴⁾⁽⁵⁾ に従って決定した。図 7 に示すように, 試験容器は原子炉圧力容器の 36° セクタモデルであり, ノズルおよびノズル周りの形状は実機を模擬している。

3・2 解析方法 使用した解析コードは STAR-CD⁽⁶⁾ であり, 図 8 に示すメッシュを作成した。RPI 1

Fig. 8 Computational grids

台セクタの実機解析では約 2 000 000, 2 台セクタの試験解析では約 4 000 000 のメッシュ数を使用した。RIP のインペラ形状は図 8(a) に示すように羽根形状の曲率等を実物の形状に合せるように詳細にモデル化し, インペラ部分は回転座標系で計算した。入口は一樣流入, 出口は自由流出とした。対流項の差分スキームは一次風上差分および QUICK を使用し, 乱流モデルは標準 $k-\epsilon$ モデルを用いた。

4. 試験結果および検討

4・1 ノズル外径増加による圧力損失増加量の検討

式(1)に示すように, 測定値であるポンプ差圧 dP は全揚程 H から流路圧力損失 $K \cdot Q^2$ を差引いて表される。そのため, ノズル外径 D が増加するとノズル部(流路)の圧力損失 $K \cdot Q^2$ が増加し, RIP の $Q-dP$ 曲線が変化する可能性がある。ただし, K は有次元の圧力損失係数である。

$$dP = H - K \cdot Q^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

厚肉スリーブノズルを実機に適用する場合, この dP の低下を考慮しても, 炉心へ十分な冷却材を供給できることを検証する必要がある。最初に, ダミーディフューザ試験装置により, 圧力損失増加への影響が小さい厚肉スリーブノズルの外径を決定した。図 9 にその結果を示す。ABWR 再循環系全体の圧力損失は 38.7 m であり, 全揚程の仕様 40 m に対して 1.3 m の設計余裕がある。30%の余裕を見込んで, 圧力損失増加量 ΔdP が 1 m 以下となるノズル外径を決定した。図示のように, データのばらつき等(標準偏差 $\sigma = 0.025$ m)を考慮してもノズル外径 492 mm では, ΔdP は 1 m 以下となる。よって, 以下では, 暫定的なノズル外径 492 mm に対する検討を実施した。

Fig. 9 Increase of pressure losses

4・2 1/5 縮小試験および流動解析による厚肉スリーブ RIP のポンプ水力および炉内流動特性に関する検討

1/5 縮小 RIP 2 台セクタ試験装置により、外径 492 mm の厚肉スリーブノズルによる RIP の揚程低下量 ΔdP を測定した。図 10 に各ノズル外径に対する Q - dP 特性の測定結果を示す。図示のように、 D の増加とともに dP が低下している。これは、 D の増加により、ノズル周りの流れが増速、偏向し、圧力損失が増加するからである。 Q - dP 曲線を三次式で近似して、 ΔdP を定格流量において算出すると、ノズル外径 492 mm の場合では、 ΔdP は 0.94 m と小さく、ノズル外径増加による圧力損失の増加を 1 m 以内に抑制できる。

次に、RIP 出口の流動状態に及ぼすノズル外径 492 mm の影響を 1/5 縮小試験装置の流動解析および 5 孔ピトー管による流速測定により検討した。ノズル外径 445, 492 mm および 550 mm 設置時におけるノズル周りの流動解析結果を図 11 に示す。492 mm における RIP 出口の流れは圧力容器下鏡に沿って流れており、445 mm の場合の流動形態と大きく相違しない。一方、550 mm では RIP の吐出し流がノズルに干渉して、上側に膨らんだ流れになる。

レグ開口部出口の流速分布は下部炉内構造物に流体力として作用するため、 D の増加による流速分布の変化は小さいほうが望ましい。定格点流量における 445, 492, 500 mm のレグ開口部中央出口における高さ方向の流速分布を図 12(a) に示す。横軸の流速 u はレグ開口部の平均流速で、縦軸の距離 y はレグ開口部上端から容器下鏡までの距離で無次元化した。なお、平均流速はノズル径 D に依存しない。492 mm の流速分布は 445 mm の場合とほぼ同様であり、下部ほど u

Fig. 10 Q - dP curves (1/5-scale test)

(a) 445 mm

(b) 492 mm

(c) 550 mm

Fig. 11 Velocity vectors around nozzle (1/5-scale calculation)

Fig. 12 Velocity distributions (1/5-scale calculation)

Fig. 13 Velocity distributions (1/5-scale test)

が大きくなる。しかし、550 mm では、レグ開口部上部に高流速部が存在している。これは、 D の増大により、RIP 出口の流れがノズルテーパ部で偏向し、レグ

Fig. 14 Actual head-capacity curve of actual RIP

開口部上部に流れ込むからと考える。また、図 12(b) の水平方向においても 492 mm の流速分布は 445 mm の場合と同様であり、比較的一様な分布を示す。

また、レグ開口部中央出口下流 [図 5(a) のピトー管設置位置] における流速分布の試験結果を図 13 に示す。試験結果は解析とほぼ同様の傾向を示した。すなわち、解析結果により D の増加による流動特性の変化を確認できる。

4.3 実規模試験結果 次に、原子力プラントと同じ高温・高圧の実規模試験により、厚肉スリーブノズルを有する RIP の Q - dP 特性を測定し、 D の増加による実機の ΔdP を確認した。図 14 に回転速度 $N = 1490$ rpm における現状ノズルおよび厚肉スリーブノズルを設置した場合の Q - dP 特性試験結果を示す。ここでは、 N および Q の設定条件における試験容器前後の圧力差を測定し、水温を基に dP を換算した。また、 dP は RIP 吐出し側を高圧側とした。なお、445 mm および 492 mm の各試験では、同一のインペラおよびディフューザを使用しており、水力部の相違による影響はない。図示のように、 D が増加すると dP は減少し、定格流量 ($Q = 7700$ m³/h) における ΔdP は 0.95 m で約 1 m である。1/5 縮小試験による評価では、この圧力損失増加量 ΔdP が 1 m 以内になるように 492 mm を選定した。図 15 に実機 RIP の ΔdP を 1/5 縮小試験結果と比較して示す。 Q - dP 特性に及ぼす D の増加の影響は 1/5 縮小試験の結果とほぼ同等である。

以上より、492 mm のノズルにより、圧力損失が 1 m 増加するが、設計余裕の 1.3 m 以下である。再循環系全体の圧力損失は 39.7 m に増加するが、RIP 全

Fig. 15 Increase of pressure losses

Fig. 16 Velocity distributions in lower plenum

揚程の仕様 40 m を変更する必要はない。

4.4 実機解析結果 最後に、原子力プラントの炉内構造をモデル化し、279°Cの高温条件で、炉内流動特性に及ぼす厚肉スリーブノズルの影響を検討した。図16に実機の流動解析より得られたCRDハウジング付近(図中に記載)の炉中心方向流速分布を示す。縦軸の高さ y はレグ開口部上端からRPV下端までの長さで、横軸の流速 u はレグ開口部の平均流速で無次元化して表す。なお、平均流速はノズル径 D に依存しない。CRDおよびICMハウジング等の炉内構造物に作用する流体力によるモーメントを抑制する観点から、下部プレナム内のRIP出口流速分布はRPV下部

鏡板(下鏡)に沿った流れが望ましい。図示のように、445 mm および 492 mm では同様に下鏡に沿った流れであるが、550 mm になると高さ約 0.6 の位置にピークを有する流速分布に変化している。各ノズル(445, 492, 550 mm)の傾向は、図13に示す試験結果とほぼ同様であり、525 mm 以下の場合、現状ノズルと同様に下鏡に沿った流速分布であると考えられる。

5. 結 論

原子炉内蔵型再循環ポンプ(RIP)の水力性能および炉内流動特性に及ぼすRIPノズル径の影響を1/5縮小試験、実規模試験および流動解析により評価し、以下の結論を得た。

(1) 外径 492 mm の厚肉スリーブノズルを設置すると、現行ノズルに対して約 1 m の圧力損失増加が生じる。これは、現状 ABWR の設計余裕範囲内である。

(2) ノズル外径 525 mm 以下では、現状ノズルの流れと同様に原子炉压力容器の下鏡に沿った流れを維持でき、炉内流動特性に及ぼす厚肉スリーブノズル(外径 492 mm)の影響は小さい。

以上より、外径 492 mm の厚肉スリーブノズルを有するRIPはABWRに適用可能である。

謝 辞

本研究は国内BWR電力および製作会社の共同研究において実施したものであり、関係各位に謝意を表す。また、非常に有益なご指導をいただいた金沢大学の岡島厚教授および横浜国立大学の黒川淳一教授に深く感謝の意を表す。

文 献

- (1) Endo, R., Tanikawa, N. and Takehara, H., ほか2名, Further Improvement in ABWR (Part 2) Advanced Design of RIP System, *ICONE-7285* (1999).
- (2) Okamura, Y., Kawamura, S. and Takehara, H., ほか1名, Development of Inertia-Increased Reactor Internal Pump (RIP) and Large Size Nozzle, *ICONE-7291* (1999).
- (3) 例えば, Stepanoff, A. J., *Centrifugal and Axial Flow Pumps*, 2nd ed., (1967) New York, 26, John Wiley & Sons, Inc.
- (4) 日本工業規格, JIS B8301 5 (1990).
- (5) 日本工業規格, JIS B8302 11 (1990).
- (6) STAR-CD V3.0 Users-Manual, (1996), Computational Dynamics, London.