

# BWR(沸騰水型原子炉)用ジェットポンプとその性能について

三重大学大学院 工学研究科 システム工学専攻 教授 社河内 敏彦

Prof. Toshihiko Shakouchi  
Division of Systems Engineering  
Graduate School of Engineering  
Mie University



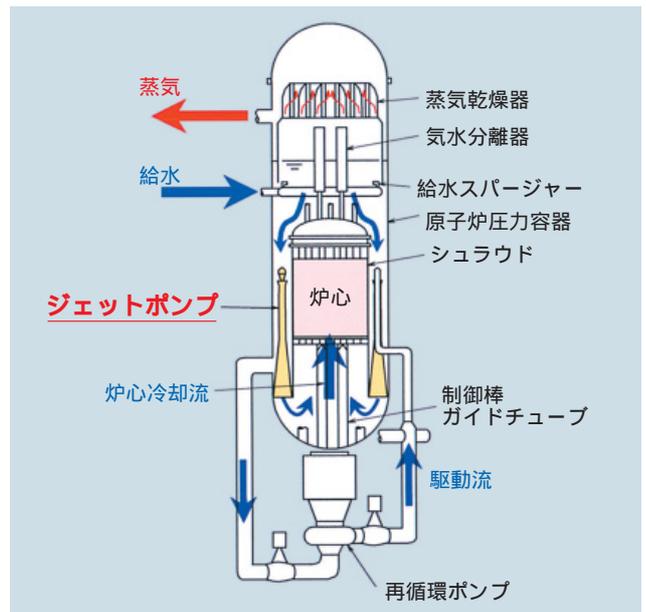
## はじめに

近年、石油、石炭、天然ガスなどの化石燃料価格の高騰や枯渇問題、また、それらの燃焼によって生じるCO<sub>2</sub>に関連する環境問題、などが早急に解決されるべき問題として大きな関心を呼んでいる。化石燃料に限って言えば、石油、石炭、天然ガス、オイルサンド、等があり数世紀に亘って使用可能であろう。しかし、CO<sub>2</sub>問題は残ったままであり、また、数世紀もある意味では遠からず過ぎ去り、人類は環境・エネルギー問題で危機的状況に直面することになると考えられる(その際、再生可能エネルギーだけではその人口と生活レベルを維持できないであろう)。このようなことを考えると、CO<sub>2</sub>問題に殆ど関係しない原子力エネルギーの使用は極めて有用である。しかし、その際、トラブルを起こさない、あるいは起こしても大事にいたらないより安全な原子炉、原子力発電システムの開発が重要になる。

ところで、最近、既存の原子炉の増出力あるいは長寿命化などが求められている(国外では、実施されている)が、その際、既設の諸設備の更新に合せ、性能の優れた機器の選択、使用は必然である。私共では、数年間に亘って中部電力(株)と(株)東芝の3者で沸騰水型原子炉(BWR: Boiling Water Reactor)で使用されているジェットポンプの性能改善について共同研究を実施してきた。本稿では、その成果の一部<sup>(1)</sup>をBWRの概説とともに紹介する。

## ジェットポンプについて

ジェットポンプはノズルから高速で吐出される噴流、駆動流体(炉内の冷却材の一部が再循環ループによって炉外の遠心ポンプに導かれ加圧される)が周囲の流体を巻き込みそれらを一緒に輸送するポンプで、その構造は可動部が無く極めて簡単である(第1、2図参照)。これらの特徴から、沸騰水型原子炉(BWR: Boiling Water Reactor)では、ジェットポンプが原子炉压力容器内の高温高圧力(約270℃、70MPa)下で炉心の冷却に必要



第1図 沸騰水型原子炉の概略図

な冷却材の再循環流を得るためのポンプとして使用されてきた。このようにBWRでは、ジェットポンプは炉心に冷却材を供給するための機器として、また、原子力発電の出力を制御するシステムの一部として重要である。

近年、ジェットポンプの代わりにインターナルポンプを使用した改良型の沸騰水型原子炉(浜岡4、5号機)が運転されているが、国内外のBWRの

原子力発電所ではジェットポンプを使用するものが大多数である。ところで、一般に、ジェットポンプの効率は35~45%と低く、その駆動流体を再循環する炉外の遠心ポンプは発電電力の約1~1.5%を消費する。また、ジェットポンプのノズル・スロート部は保守・点検に際しその構造上、比較的容易に交換可能である。このようなことから、私共ではジェットポンプのノズル・スロート



第2図 ジェットポンプ

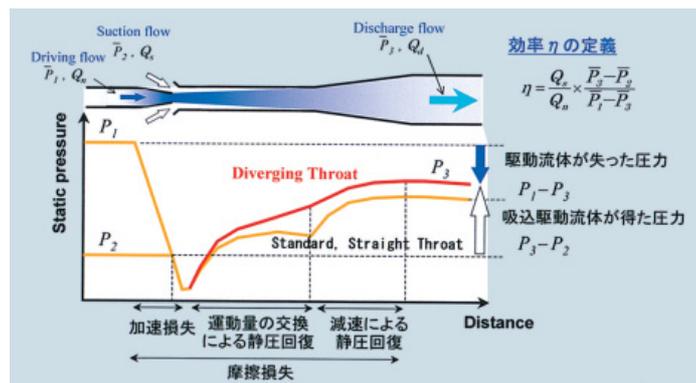
部の形状を工夫しその性能を改善・向上させることを試み理論的、実験的、数値的解析を行った。実験装置(ジェットポンプ)は、浜岡2、3号機の1/5スケールモデル(ノズルは直径  $D_n=17.14\text{mm}$  の円形で、スロートは内径  $D_t=35.0\text{mm}$ 、長さ  $L_t=429.1\text{mm}$  の直管部と、長さ  $L_u=99.9\text{mm}$ 、拡がり角度  $=6^\circ$  のディフューザからなる標準スロートで構成されている)を使用した。ノズルレイノルズ数は  $Re=4.8 \times 10^5$  である。また、スロートとして拡大スロート(Diverging Throat、内径  $D_t=35.0\text{mm}$ 、長さ  $L_t=117\text{mm}$  の直管部と、長さ  $L_u=412\text{mm}$ 、拡がり角度  $=1^\circ$  と極めて緩やかな拡大部から構成されている)も用意した。

### ジェットポンプの性能、効率

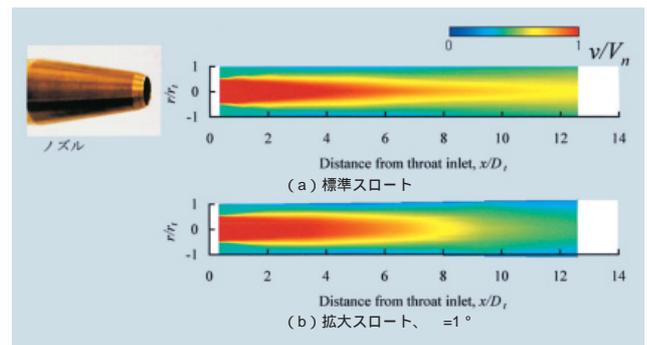
ジェットポンプの効率は、第3図に示すようにノズル部、吸い込み部、及びディフューザ部の圧力と流量をそれぞれ  $P_1, Q_n, P_2, Q_s$  及び  $P_3, Q_q$  とすると、 $\eta = (Q_s/Q_n) \times (P_3 - P_2)/(P_1 - P_3)$  で与えられる。その効率を向上させるには種々のことが考えられるが、例えば、駆動流体が持つエネルギーを被駆動流体に効果的に伝えること、及びスロート部での摩擦損失を増加させないこと、などにある。ここでは、従来、使用されている直管のスロート部に僅かにテーパをつけ拡大させたときの影響について述べる。

第4図に、スロート内の軸方向への速度分布  $v/V_n$  ( $V_n$ : ノズル出口平均流速)を示す。1本ノズルから噴出された高速の駆動流がスロート入口( $x/D_t=0$ )近傍の周りの被駆動流を巻き込みそれらが下流に向かって混合していく。その際、拡大スロートの方が速やかに混合するのが分かる。また、別に実施したスロート内の速度分布の測定結果からスロート後半の壁面での速度勾配は拡大スロートの方が小さく壁面摩擦力が小さくなるのが知れた。

第3図には、また、ジェットポンプの軸方向への圧力分布を、圧力損失が生起する事由とともに示した。拡大スロートでは被駆動流体が得たエネルギーが標準スロートに比べて大きく、ポンプ効率が向上することが推測される。

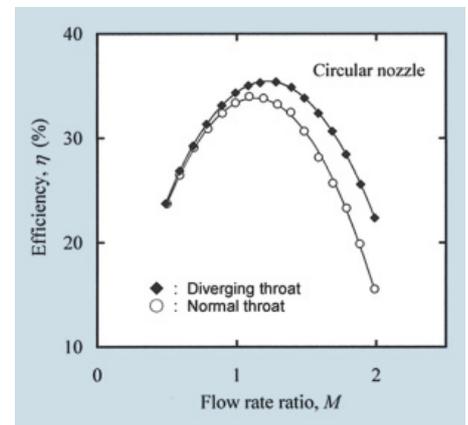


第3図 ジェットポンプの圧力分布、効率



第4図 スロート内の速度分布(スロート形状の影響)

第5図に、ジェットポンプの効率を示す。図中、横軸のMは流量比( $=Q_s/Q_n$ )である。拡大スロートの最大効率は  $m=35.5\%$  (at  $M=1.23$ ) で標準スロートより約2%改善・向上される。このように、スロートに極めて緩やかなテーパを付した拡大管にすると駆動流と被駆動流の混合が促進される、壁面での速度勾配が減少する、などにより流動損失が低減されポンプ効率が向上する。



第5図 ジェットポンプの効率

### あとがき

本稿では、紙面の都合上、沸騰水型原子炉の簡単な概要とその種々の機器の性能向上の例としてジェットポンプを取り上げその一部について述べた。原子力発電に使用されている種々の機器やシステムの性能改善、及び安全性の一層の向上については、地道な努力が続けられている。

#### 【参考文献】

- (1) 山崎之崇、ジェットポンプの効率向上に関する研究、博士論文(工学、三重大学、2006-3)

社河内 敏彦(しゃこうち としひこ)氏 略歴

三重大学大学院工学研究科システム工学専攻教授。工学博士(名古屋大学)。1971年 愛媛大学大学院工学研究科修了後、三重大学工学部助手、助教授、教授を経て、2001年より現職。1992~1993年エアランゲン大学(ドイツ)客員研究員。専門は、流体工学。日本機械学会フェロー(2004年~)、流体工学、環境工学部門委員(1995~1998年)、日本混相流学会理事、評議員(1997~2001年)、編集委員長(2000、2001年)、副会長(2003~2004年)、論文審査委員長(2006年~)、香港政府大学資助委員会外部評価委員(1995年~)、米国機械学会流体工学部門 CGIT 委員(1999年~)、日本混相流学会賞論文賞(1999年)、日本機械学会流体工学部門賞(2006年)など