高性能蒸気インジェクタによる 革新的簡素化原子力発電プラントの技術開発*

(数値流動解析と可視化計測)

大 森 修 一^{*1}, 奈良林 直^{*2}, 岡 本 孝 司^{*3}
岩城 智香子^{*4}, 森 治 嗣^{*5}

Development of Technologies on Innovative-Simplified Nuclear Power Plant using High-Efficiency Steam Injector (Numerical Flow Analysis and Visualization Study)

Shuichi OHMORI^{*6}, Tadashi NARABAYASHI, Koji OKAMOTO,
Chikako IWAKI and Michitsugu MORI

^{*6} The Tokyo Electric Power Company, Incorporated, Research & Development Center,
4-1 Egasaki-cho, Tsurumi-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 230-8510 Japan

A steam injector (SI) is a simple, compact and passive pump and also acts as a high-performance direct-contact compact heater. This provides SI to apply as a direct-contact feed-water heater that heats up feed-water by using extracted steam from the turbine. To develop high performance compact feed-water heater, it is necessary to quantify the characteristics between physical properties of the flow field. We carried out the analysis and visualization study. The analysis was conducted by using CFD code embedded separate two-phase flow models and confirmed that the steam has a high-performance direct-contact heater that was suitable for compact feed-water heater. To visualize the water jet behavior inside the SI, we used the Dynamic PIV system. The Dynamic PIV system consists of the high-speed camera and lasers. In this study, 384×180 pixel resolution with 30 000 fps camera is used to visualize the flow. For the illumination CW green laser with 300 mW is applied. To view inside the SI, relay lens system is set at the SI wall. Very high speed water jet during the starting up of SI had been clearly visualized with 30 000 fps. The wave velocity on the water jet had been analyzed using PIV technique. The instability of the water jet is also detected.

Key Words: Innovative simplified BWR, Nuclear Power Plant, Steam Injector (SI), Multi-stage Steam Injector, Feed-water Heater, Condensation, Gas-Liquid Two-Phase Flow, Two-Phase Flow Analysis, Particle Image Velocimetry (PIV)

1. 緒 言

原子力発電プラント (NPP) は環境問題やエネルギーセキュリティ等多くのメリットを有する一方で、近年は建設コストの増大や新鋭火力発電プラントの発電コスト低減化、さらに欧米で検討が進む第 4 世代の次世代炉ではシビアアクシデント対策を設計に反映させる要求があり、バックエンドを含めた総合コストでその魅力が失われつつある。NPP の発電コストを押し上げている主要因には、プラントの複雑さや部品点数の膨大さから来る高い建設コストと長い建設工期、定

検時の点検機器の膨大さ、交換部品の多さによるマンパワーの増大が挙げられる。一部のプラントでは給水加熱器の劣化に伴う大掛かりな交換工事も実施されている。更に、シビアアクシデント対策を設計に反映すると建屋ボリュームの増大などにより建設コスト増につながる懸念がある。

蒸気インジェクタ (Steam Injector: SI) は蒸気と水で作動する噴流ポンプであり、動力用電源が不要で、可動部を有しないシンプルな構造の機器である^{(1)~(6)}。SI の単純化沸騰水型原子炉 (SBWR) への適用について米国 GE 社で検討された⁽⁷⁾ が、充分な解析予測ができなかったため、実証試験が中断された。イタリアの SIET 社でも炉心注水系への適用を目指して開発試験を行った⁽³⁾ (4)。著者らは、BWR プラントへの SI の適用化に向けた共同研究を行い、従来の SI の性能と適用範囲を超えて高性能化し、広範囲な運転領域に適用

* 原稿受付 2007 年 10 月 19 日。

^{*1} 正員, 東京電力(株)技術開発研究所 (☎ 230-8510 横浜市鶴見区江ヶ崎町 4-1)。

^{*2} 正員, フェロー, (株)東芝 (☎ 235-8523 横浜市磯子区新杉田町 8) [現: 北海道大学 (☎ 060-8628 札幌市北区北 13 条西 8)]。

^{*3} 正員, 東京大学大学院新領域創成科学研究科 (☎ 277-8563 柏市柏の葉 5-1-5)。

^{*4} 正員, (株)東芝電力システム社 (☎ 235-8523 横浜市磯子区新杉田町 8)。

^{*5} 正員, フェロー, 東京電力(株)技術開発研究所。

E-mail: ohmori.shuichi@tepcoco.jp

でき、かつ過去に例のない多段・並列運転を可能とした「高性能 SI」技術の開発を進めてきた^{(8)~(16)}。さらに、この「高性能 SI」技術をベースに、給水加熱器、非常用炉心冷却系 (ECCS) を SI で代替し、設備の大幅な簡素化・物量削減を図ると共に、事故時の炉心冠水維持によりシビアアクシデントに至らない固有の高い安全性を持つ (シビアアクシデントフリー化概念) BWR を目指し、「高性能 SI による革新的簡素化原子力発電プラント」の技術開発を行っている^{(17)~(24)}。SI を用いたこれらの各種システムについてその成立性を検討すると共に、SI 本体の設計のため、SI の特性と作動限界を実験と解析で検討している。本報では、分離二相流モデルを組み込んだ汎用流動解析コードによる SI 内部の流動解析と、粒子画像流速測定法 (PIV 法) による可視化計測で得られた水噴流速度および直接凝縮の界面挙動について考察した。

2. 蒸気インジェクタ (SI) の作動原理と特徴

SI は蒸気の超音速噴流で給水を駆動する可動部のない静止型噴流 (ジェット) ポンプで、供給蒸気圧力より高い吐出圧を得るものである⁽¹⁾。古くは蒸気機関車のボイラーへの給水ポンプとして用いられてきたものは中心蒸気噴流タイプであった^{(1)~(4)}が、水噴流が環状の蒸気の超音速噴流に取り囲まれて壁面から離れて加速される図 1 の中心水噴流タイプのものが開発された^{(5)~(6)}。従来に比べてはるかに高い吐出圧が得られることが特徴である。軸中心に配した水ノズルから常温水を噴射し、水ノズル外側と混合ノズル入口とで形成される環状の蒸気ノズルに蒸気を供給すると、混合ノズル内で蒸気は超音速流となり、水噴流を加速

し、スロートに高速水流を作る。スロート以降では蒸気の凝縮は終わり水の単相流となり、ディフューザーで減速され、ベルヌーイの定理により昇圧される⁽¹³⁾。図 2 に示す通り、可視化窓からレーザードップラー流速計 (LDV) を用いて混合ノズル内の蒸気流速を計測した結果、超音速噴流であることを確認した^{(14)~(15)}。SI は噴流ポンプとしての作用のほか直接接触式熱交換器としても作動するため、タービンからの抽気蒸気を用いて給水を加熱する、高効率の直接接触型給水加熱器として作動させることが可能である。コンパクトな機器のため大幅な簡素化と物量削減効果が期待でき、かつ構造がシンプルであるため信頼性が高く、プラントの簡素化・合理化に大きく寄与すると考えられる。

Fig. 1 Principle of a steam injector⁽⁹⁾

Fig. 2 A water jet in a visualized steam injector⁽¹⁴⁾

Fig. 3 Basic concept of an innovative-simplified nuclear power plant⁽¹⁸⁾

3. 革新的簡素化原子力発電プラントの概要

高性能 SI を適用した革新的簡素化 NPP は、図 3 の概念図に示す通り、簡素化給水加熱系、静的炉心注水系、静的格納容器冷却系から構成される^{(17) ~ (20)}。

簡素化給水加熱系 (SI-FWH) は、直接接触式熱交換器としての SI の機能を生かしたシステムで、ABWR (改良型沸騰水型原子炉) プラントを対象にシステム検討を行った。

図4に示すように、SIを3段直列に接続し4段目にジェット脱気器を接続する構成の多段SIで、現行ABWRの低圧給水加熱器と同等の給水加熱性能を実現させるものである⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。ABWRのタービン給復水系統のうち低圧給水加熱器廻りを抜き出したものが図5である。図5(a)のように、3系列12基の低圧給水加熱器を、図5(b)に示す3系列6台の多段SIに置き換える。図6は現行ABWRの復水器上部にネックヒータとして設置された低圧給水加熱器であり、図7はこれを多段SIに置き換えた場合の3次元CAD図である。大型の給水加熱器を削除して小口径のSIに置き換えることにより、復水器の高さ、つまりタービン主機の据付高さ(すなわちタービン建屋の高さ)を3.5m低減できると共に、図8に示すように、当該機器の物量を体積、重量ともに約1/3に削減可能となる⁽¹⁷⁾。

Fig. 4 Multi-stage steam injector system ⁽¹²⁾

(a) Low-pressure feed-water heater system of the ABWR

(b) Steam injector feed-water heater system

Fig. 5 Replacement of LPHTR by Multi-stage SI system

Fig. 6 Necked low-pressure heaters in the turbine condenser ⁽⁹⁾

Fig. 7 Multi-stage SI in a upper part of a turbine condenser ⁽¹¹⁾

Fig. 8 Comparison of volume and weight for the feed-water heater system between ABWR and steam injector⁽¹⁷⁾

4. 流動解析による多段 SI 給水加熱器の性能向上

4・1 分離二相流モデル^{(14) (21)} 市販の汎用流動解析コード STAR-CD を使用し、ユーザーサブルーチンで分離二相流モデルを組み込み、SI 内の高速二相流現象の解析を行った。分離二相流モデルは、図 9 に示すように中心軸対称の円柱状水噴流（液相）の周りを蒸気（気相）が取り囲んでいる形状で、気液界面は気相に対しては凝縮に伴う流出境界、液相にとっては流入境界となる⁽¹⁴⁾。明確な気液界面が存在するため、気相および液相は単相流として取り扱うことができ、気相、液相のそれぞれに質量・運動量・エネルギーの基礎方程式を用いた⁽¹⁴⁾。K-ε の乱流モデルは流動解

析コードの制約から液相にのみ適用した。また、気液界面に対しては理想凝縮熱伝達率 (式(1))、質量輸送 (式(2))、エネルギー輸送 (式(3)) を考慮した⁽¹⁴⁾。

$$H_a = C_c \sqrt{2} h_{lg}^{3/2} / \{v_g(v_g - v_l)\} \{T_{sa}(T_{sa} - T_h)\}^{1/2} \quad (1)$$

$$\dot{m}_{gl} = H_a(T_s - T_h)A/h_{lg} \quad (2)$$

$$\text{div}(\rho_l \bar{U} l h_l - \Gamma h_l \text{grad} h_l) = \dot{m}_g h_g \quad (3)$$

気液界面の界面速度は式(4)のように界面をはさむ気相と液相の速度に気液の剪断応力の重みを付けて算出した⁽¹⁴⁾。

$$W_a = (\tau_g W_g + \tau_l W_l) / (\tau_g + \tau_l) \quad (4)$$

ここで、

$$\tau_g = (v_g + v_{gl}) / \Delta r_g \text{ and } \tau_l = (v_l + v_{gl}) / \Delta r_l \quad (5)$$

2 次元軸対称の円柱状のメッシュの半径を moving mesh の機能を用いて変化させ、気液界面における気相の流出境界の圧力分布と、液相の流入境界の圧力分布が一致する条件で収束解を得た⁽¹⁴⁾。STAR-CD には moving mesh 機能がないため、界面で圧力が一致するようにメッシュを調節する機能をユーザーサブルーチンで組み込んで使用した。メッシュのイメージを図 10 に示す。

Fig. 9 Conceptual diagram of separate two-phase flow model

Fig. 10 An image of mesh

4・2 簡素化給水加熱系用多段 SI の流動解析 簡素化給水加熱系では前述の図 4 に示すように SI を直列 3 段に接続し、4 段目にジェット脱気器を接続する。ジェット脱気器には第 3 段 SI の吐出温水がノズルから噴射され、液滴化して飽和温度まで加熱されると共に、蒸気との相対速度による液滴表面と内部との対流により高性能脱気される。第 4 段出口水は飽和温度になるので、第 4 段は現行 ABWR の給水加熱性能を超える。従って、簡素化給水加熱系の性能は、第 1 段から第 3

段までの多段 SI の加熱性能と、第 3 段 SI 吐出ノズルでの圧力がジェット脱気器に十分な噴射をできる吐出圧を有すかが判定基準となる。そこで流動解析は図 11 の 3 次元 CAD モデルに示すように、第 1 段から第 3 段までの多段 SI をモデル化した⁽²¹⁾。

第 1 段 SI の抽気蒸気圧力は 0.05MPa と低く、この極低圧の蒸気をできるだけ多く使って加熱することがプラントの熱効率上有利であるため、ノズル形状の改良を第 1 段 SI に重点を置いて実施した。第 1 段 SI のノズル形状改良は、ベルマウス部を軸方向に延長して水噴流の加熱長さを長くすると共に、混合ノズル内の蒸気流速を下げるために混合ノズル後半の内径を太くした。蒸気流速を下げることにより蒸気の動圧が下がり、蒸気の静圧とそれに伴う蒸気温度が上昇するため、給水加熱性能が向上すると予想した。

図 12 はノズル形状改良前の解析結果である。図 12(a) の温度分布に示す通り、第 1 段 SI 混合ノズル後半において、約 80℃ から約 70℃ への蒸気温度低下が存在する。これは、図 12(b) の軸方向速度分布に示す通り、混合ノズル後半において蒸気流速が上昇しているためと考えられる。

Fig. 11 3D-CAD of multi-stage steam injector's analysis model from 1st to 3rd stage⁽²¹⁾

(a) Temperature distribution⁽²¹⁾

(b) Axial-velocity distribution

Fig. 12 Axial-velocity and temperature distribution from the 1st to 3rd-stage steam injector: original case

図 13 は第 1 段ノズル形状改良後の解析結果を示す。図 13(a)に示すように、第 1 段 SI の混合ノズル内流速のピーク幅が低減し、図 13(b)の通り、第 1 段 SI の混合ノズル蒸気温度と給水温度が増加することが示された。第 1 段 SI の給水出口温度は 75°C まで上昇し、図 5(a)に示す現行 ABWR の低圧給水加熱器の第 1 段出口温度 75°C と給水加熱性能が互角となった⁽²¹⁾ ⁽²²⁾。つまり、第 1 段 SI の混合ノズル形状を改良することにより加熱性能が向上し、第 1 段 SI の加熱性能は現行 ABWR の低圧給水加熱器出口温度とほぼ互角になった。前述の通り第 4 段の加熱性能はジェット脱気器の方が高いため、第 1 段の性能が互角になることにより、多段 SI の給水加熱性能は現行 ABWR の低圧給水加熱器を凌駕することが期待できる。

なお、この分離二相流モデルによる解析手法の妥当性は実験結果と比較して確認されている⁽¹⁴⁾。

Fig. 13 Axial-velocity and temperature distribution from the 1st to 3rd-stage steam injector: improved mixing nozzle

5. PIV による可視化計測

5・1 可視化計測の目的 SI 内部の蒸気流の空間速度分布情報を得ることにより SI の基礎的特性を把握することを目的として、粒子画像流速測定法 (PIV)⁽²⁵⁾を用いて SI 内部の蒸気速度分布および液面速度分布計測を実施した。

5・2 SI 定常作動条件における可視化計測 1/3.5 縮尺モデル試験において、SI の定常作動条件における内部流動状況の可視化計測を実施した。

5・2・1 可視化光学系 SI 内部の任意断面を照明し画像を取得するため、レーザシート光による照明と、エンドスコープを用いて撮影を実施した。システム構成を図 14 に示す。可視化した流れ場は、エンドスコープ先端から約 2cm の距離における、2cm 程度の領域である。エンドスコープに取り付けられたカメラは、PIV 計測に用いられるダブルシャッターカメラである PCO SensiCAM (1280x1024 画素)とした。エンドスコープと直交する断面を、パルスレーザシートによって可視化する。レーザは New Wave Solo-PIV(532nm, 20mJ/pulse, 7ns)を用い、任意の時間間隔でダブルパルスを生じ得る。レーザ光を SI 内部に導入するため、計測箇所上部にはポリカーボネート製の窓を設けた⁽²³⁾。図 15 に計測対象である SI とレーザ導入窓およびエンドスコープの状況を示す。

Fig. 14 Measurement apparatus configuration

Fig. 15 Visualized test apparatus

5・2・2 実験 1/3.5 縮尺モデル SI の作動圧力を約 0.8 気圧 (飽和温度約 80°C) とし、蒸気弁開度をパラメータとして実験を実施した。可視化用レーザはシート光学系を通して幅約 0.5mm、長さ 20mm のシート照明とし、水噴流軸を通る軸と平行な断面を照明する。

カメラはダブルシャッターモードで動作させ、フレームストロドリング法を用いて、レーザと同期し、2枚の画像間の時間間隔を $1\mu\text{s}$ となるようにして撮影を行った。1秒間に4組の画像が取得できる。撮影した位置は、図16の丸で示すようなSI内の気液界面部(水噴流の表面)である。

このようにして得られた画像の一例を図17に示す。水・蒸気の気液界面が激しく乱れていることが判る。界面において蒸気の凝縮が起こると共に、水側噴流が不安定化し、激しい波立ちが発生している。ミクロスケールで見ると安定な界面ではなく、熱伝達を促進している可能性が示唆される。液滴の離脱により、蒸気側には大きな液滴が観測され、ミストがあまりはっきりとは見えない。界面からの光の散乱が大きく、ミストからの散乱光がノイズに埋もれていると考えられる。図18に $1\mu\text{s}$ の時間間隔で撮影された2枚の画像から移動ベクトルを取得した例を示す。これは、液滴速度と、界面の波速度を表している⁽²³⁾。

Fig. 16 Capturing point of the steam injector inside

Fig. 17 Image of the steam injector inside at experiment I⁽²³⁾

Fig. 18 Displacement vector⁽²³⁾

5・3 SI 起動時の可視化計画 SIの作動において特に重要な起動時の過渡変動挙動を、毎秒3万コマの高速度カメラで1秒間にわたって可視化した。

5・3・1 可視化光学系 5・2節ではダブルシャッターカメラを計測に用いたが、SI起動時の計測では高速度カメラを用い、過渡変動現象を捉えることを試みた。高速度カメラは、高速度でかつ長時間記録が可能な、Photron FASTCAM-RSをエンドスコープに取り付けた。このカメラは 1024×1024 画素で毎秒3千コマを3秒間にわたって記録できる。画素数を小さくすればさらに高速な記録が可能となる。また、レーザは連続発振のViasho (532nm, 300mW)を用い流れ場を連続照明した⁽²⁴⁾。計測対象であるSIとレーザ導入窓、エンドスコープの状況は図14と同様である。

5・3・2 実験 1/3.5縮尺の2段式SIを対象として実験を行った。SIを起動する前後3秒間のデータをセンタートリガー、またはエンドトリガーで記録した。画像解像度は 384×192 画素とし、毎秒3万コマで3秒間記録した。画像の長手方向を噴流移動方向と垂直に取り、可能な限り広範囲のデータを取得した。しかしながら可視化できた範囲は、噴流中心をはさむ左右1cm程度(合計2cm程度)の領域である。噴流の太さは1cm程度であり十分可視化は可能である。後述の可視化画像は図19の四角のような位置であり、SI起動時の水噴流先端を狙って撮影した。

Fig. 19 Capturing point of the steam injector inside

図20～21に起動時に最初に液柱が撮影領域中央に到達した時点からの画像及び得られた速度ベクトル分布を示す。図中下側が上流側であり、下側から上側にジェットが流れている。起動時は速度が十分に発達していないため、毎秒3万コマ程度の低速でも計測が可能である。液体の塊が流れるとともに、液滴を随伴していることが良く見て取れる。速度ベクトルは、約20m/s程度で起動時には流れていることが確認できた。

なお、図20～21は起動から1.5msまでの画像を示し、図22には液柱到達後約400ms後の状況を示す。液柱

は常に安定に存在するのではなく、大きく乱れた界面をしている。

Fig. 20 Images and vectors on SI start-up (1/2)

Fig. 21 Images and vectors on SI start-up (2/2)

レーザが反射しカメラに記録された時点の情報を示しているため、界面の乱れが激しいことが良く見て取れ

る。液柱到達直後では、界面をはっきりとは見えず、焦点が合っていない位置に界面が散乱していると予想される。しかし、400ms の状況では短い波長の波が流れている様子が観測される。起動時には大きな変動とともに、凝縮と液柱の波の相互作用により、液柱は非常に不安定であることが判る。

Fig. 22 Images and vectors after 400ms

一方、これらのベクトル情報の時系列データから、画像中心部における軸方向速度の時系列データ（サンプリング周期 10kHz）を抽出し、図 23 に示す⁽²⁴⁾。液滴が流れてくると比較的高速な速度が計測されているが、一般的には、液柱の 20m/s 程度の速度が主流である。500ms にわたる時系列変化を図 23(b)に示す。このケースでは、液柱の速度はあまり変動が無いことが確認できる。最終的に定常状態に落ち着くと、液柱の速度は 40m/s 程度まで加速され、液滴は 200m/s 程度で流れることを 5・2 節の計測で確認している。

なお、図 24 には、同じ実験条件で、再度起動試験を実施した場合の速度変動データを示す。この条件においては、液柱の速度は乱れながら徐々に加速して上がっていくことが確認できる。その後、減少に転じているが、定常に達した場合には 40m/s となる。起動時の液柱の速度はほぼ安定しており、界面の大きな乱れや、

Fig. 23 Velocity fluctuation at the center of water jet (case1)

Fig. 24 Velocity fluctuation at the center of water jet (case2)

液滴が飛ぶことによって、速度変動が激しい。また、図 24 に見られるように、比較的低周波の速度変動も観測され、これらが起動の安定性に関与している可能性が高い。なお、いずれの条件でも SI は正常に起動できている。

5・4 可視化計測まとめ SI 内部の流れを微小スケールで可視化計測した。水・蒸気界面の激しい波立ちを可視化すると共に、液滴速度と波速を定量的に算出することができた。定常状態における乱れや巻き込みが熱伝達を促進していると予測される。

また、SI 起動時の流れを微小スケールで可視化計測した。液柱や液滴の速度変動を定量的に計測することができた。起動時には、液柱が乱れた状況で流れていることを確認するとともに、速度変動の傾向を定量的に捉えた。世界で初めて、SI の起動の瞬間を PIV で実測することができた。

6. 結 言

縮尺モデル試験と流動解析を併用した「高性能蒸気インジェクタによる革新的簡素化原子力発電プラントの技術開発」を進めている。大型の給水加熱器を削除し、小口径の蒸気インジェクタ (SI) に置き換えることにより、復水器の高さ、つまりタービン建屋の高さを 3.5m 低減でき、現在の低圧給水加熱器の物量を約 1/3 に削減できることが示された。

SI 本体については第 1 段の混合ノズル形状を改良することにより加熱性能が向上し、第 1 段の加熱性能は現行 ABWR の低圧給水加熱器出口温度とほぼ互角になり、3 段 SI+ジェット脱気器という構成の多段 SI トータルでは給水加熱性能が現行 ABWR をしのぐことが解析的に示された。

粒子画像流速測定法 (PIV) を用いて SI 内部の蒸気速度分布および液面の速度分布計測を実施した。1/3.5 縮尺モデル試験において、SI の定常作動条件における内部流動状況の可視化を実施し、作動状態における SI 内部の液柱や液滴の状態を明らかにした。さらに、1 μ 秒間隔で撮影された画像から PIV によって速度ベクトルを抽出し、定量データを得た。また、SI 起動時の過渡変動挙動を、毎秒 3 万コマの高速度カメラで 1 秒間にわたって可視化し、起動開始から準定常状態に至る液柱の挙動やその時系列変動情報を定量的な速度情報で明らかにした。

記 号

- A : 流路面積 [m²]
C : 気液界面の剪断力係数

H	: 熱伝達率
h	: 比エンタルピー [kJ/kg]
m	: 質量流量 [kg/s]
r	: 円筒形状における半径方向座標 [m]
T	: 温度 [°C]
U, V, W	: 流速 [m/s]
v	: 比体積 [m³/kg]
Γ	: 蒸気発生率
ρ	: 密度 [kg/m³]
τ	: せん断応力 [MPa]
添字	
g	: 気相
i	: 気液界面
l	: 液相
sat	: 飽和

謝 辞

本研究は、経済産業省の革新的実用原子力技術開発費補助事業として実施した「高性能蒸気インジェクタによる革新的簡素化原子力発電プラントの技術開発」の一部である。

文 献

- (1) The Japan Society of Mechanical Engineers ed., *JSME Mechanical Engineer's Handbook, B. Applications, B5 Fluid Machinery*, (1991), p.B5-99, The Japan Society of Mechanical Engineers, (in Japanese).
- (2) Matsunaga, S., Studies on the Performances of the Steam Injectors with Different Diffuser Throat Diameter from each other in the Case of Changing its Nozzle Position, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol.21, No.112, (1955), pp.921-926, (in Japanese).
- (3) Cattadori, G., Galbiati, L., Mazzocchi, L. and Vanini, P., A Single-Stage High-Pressure Steam Injector for the ALWR, *Transaction of the American Nuclear Society*, Vol.69, (1993), pp.549-550.
- (4) Cattadori, G., Galbiati, L., Mazzocchi, L. and Vanini, P., A single-stage high pressure steam injector for next generation reactors: Test results and analysis, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 21, No.4, (1995), pp.591-606.
- (5) Nicodemus, C.D., Gas compression with hydrokinetic amplifier, *US Patent*, 4,673,335, (1987).
- (6) Bloomer, O.T., the Pressure Amplifier Condenser, *Technologist*, Vol.April, (1988).
- (7) Wilkins, D.R., Quirk, J.F. and McCandless, R.J., Status of advanced boiling water reactors, *Transaction of American Nuclear Society*, Vol.61, No.Suppl 1, (1990), pp.261-270.
- (8) Narabayashi, T., Iwaki, C., Kudo, Y., Mizumachi, W., Shioiri, A., Tanaka, T., Mori, M., Horie, A. and Machida, Y., Analytical Study on Large Scale Steam Injector to Next-Generation BWR, *Proceedings of the 3rd International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-3)*, (1994), pp.877-883.
- (9) Ohmori, S., Mori, M., Narabayashi, T., Nakamaru, M., Asanuma, Y., Yasuoka, M. and Kato, T., Development of Steam Injector Feedwater Heater System, *Proceedings of the 7th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-7)*, (1999-4), pp.233, ICONE-7371.
- (10) Narabayashi, T., Mori, M., Ohmori, S., Nakamaru, M., Asanuma, Y. and Yasuoka, M., Development of Steam Injector Feedwater Heater System, *Proceedings of the 8th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-8)*, (2000-4), ICONE-8582.
- (11) Ohmori, S., Narabayashi, T., Mori, M., Nakamaru, M., Asanuma, Y. and Kato T., Simplified Feedwater Heater System by Multi-Stage Steam Injectors, *Proceedings of 2nd Japan-Korea Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety (NTHAS2)*, (2000-10), pp.351-355.
- (12) Mori, M., Ohmori, S. and Narabayashi, T., Development of Simplified Steam Injector Feedwater Heater System -Large Scale Model Tests and Design Improvement by CFD-, *Proceedings of the 11th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-11)*, (2003), pp.312, ICONE11-36488.
- (13) Narabayashi, T., Nei, H., Ozaki, O., Shioiri, A. and Mizumachi, W., Study on High-Performance Steam Injector (1st Report, Development of Analytical Model for Characteristic Evaluation), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.62, No.597, (1996), pp.1833-1840, (in Japanese).
- (14) Narabayashi, T., Mizumachi, W. and Mori, M., Study on Two-Phase Flow Dynamics in Steam Injectors, *Nuclear Engineering and Design*, Vol.175 (1997), pp.147-156.
- (15) Iwaki, C., Narabayashi, T., Mori, M. and Ohmori, S., Study on High-Performance Steam Injector (2nd Report, Measurement of Jet Structure), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.69, No.684 (2003), pp.1814-1821, (in Japanese).
- (16) Narabayashi, T., Mori, M., Nakamaru, M. and Ohmori, S., Study on Two-Phase Flow Dynamics in Steam Injectors, II. High-Pressure tests using Scale-Models, *Nuclear Engineering and Design*, Vol.200 (2000), pp.261-271.
- (17) Mori, M., Narabayashi, T. and Ohmori, S., Research and Development Program of Innovative Simplified and Severe-Accident-Free BWR by High-Performance Steam Injector System, *Proceedings of the 2003 International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP'03)*, (2003), Paper 3294.
- (18) Ohmori, S., Goto, S., Mori, M. and Narabayashi, T., Development of Technologies on Innovative-Simplified Nuclear Power Plant using High-Efficiency Steam Injectors (1) Demonstration test of SI Core Coolant Passive Injection System, *Proceedings of the 13th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-13)*, (2005-5), pp.461, ICONE13-50650.
- (19) Goto, S., Ohmori, S. and Mori, M., Innovative-Simplified Nuclear Power Plant Efficiency Evaluation with High-Efficiency Steam Injector System, *Proceedings of the 2006 International Congress on Advances in Nuclear*

- Power Plants (ICAPP'06)*, (2006-6), pp.1-6, Paper 6466.
- (20) Ohmori, S., Narabayashi, T., Mori, M., Iwaki, C., Asanuma, Y. and Goto, S., Development of Technologies on Innovative-Simplified Nuclear Power Plant using High-Efficiency Steam Injectors - System Outline and Endurance Test of Low-Pressure Steam Injectors -, *Journal of Power and Energy Systems*, Vol. 1, No. 1 Special Issue on 14th International Conference on Nuclear Engineering I, (2007), pp.99-110.
 - (21) Narabayashi, T., Mori, M., Asanuma, Y., Ohmori, S., Iwaki, C. and Goto, S., Development of Technologies on Innovative Simplified Nuclear Power Plant Using High-Efficiency Steam Injectors (Improvement of Multi-Stage Steam Injector for Feedwater Heaters Using Two-Phase Flow Analysis), *Proceedings of the Japanese Society for Multiphase Flow Annual Meeting 2005*, (2005-8), pp.371-374, (in Japanese).
 - (22) Narabayashi, T., Ohmori, S., Mori, M., Asanuma, Y. and Iwaki, C., Development of Multi-Stage Steam Injector for Feedwater Heaters in Simplified Nuclear Power Plant, *JSME International Journal, Series B*, Vol.49, No.2 (2006), pp.368-376.
 - (23) Okamoto, K., Sugii, Y., Ishikawa, M., Iida, M., Mori, M. and Ohmori, S., Development of Technologies on Innovative-Simplified Nuclear Power Plant using High-Efficiency Steam Injectors (10) Visualization Study on the flow inside the Steam Injector, *Proceedings of the 2004 Fall Meeting of the Atomic Energy Society of Japan*, (2004-9), pp.320, (in Japanese).
 - (24) Okamoto, K., Mori, M. and Ohmori, S., Development of Technologies on Innovative-Simplified Nuclear Power Plant using High-Efficiency Steam Injectors (26) Visualization Study on the start-up of the Steam Injector, *Proceedings of the 2006 Annual Meeting of the Atomic Energy Society of Japan*, (2006-3), pp.439, (in Japanese).
 - (25) Weitao, B., Sugii, Y., Okamoto, K. and Madarame, H., Time-resolved proper orthogonal decomposition of the near-field flow of a round jet measured by dynamic particle image velocimetry, *Measurement Science and Technology*, Vol.14, No.8, (2003), pp. L1-L5.