

# 超音速蒸気ジェットインジェクタ可視化試験装置の製作

構造エネルギー工学専攻

阿 部

豊

## 1 超音速蒸気ジェットインジェクタ(蒸気インジェクタ)

蒸気インジェクタは、蒸気と水を駆動源とする静止型噴流ポンプであると共に、コンパクトで高性能な熱交換器でもある。蒸気インジェクタの概念図を図1に示す。蒸気インジェクタは主に水ノズル、蒸気ノズル、混合ノズル、スロート、ディフューザから成り立つ。蒸気インジェクタは、混合ノズルの中で水噴流表面と超音速蒸気との直接接触凝縮により起動する。蒸気噴流と水噴流表面とが直接接触凝縮することで、混合ノズル内が負圧になり蒸気吸引されて超音速流となり、その結果として水が加速される。その後スロート部において流路が絞られる事でさらに加速され、ディフューザ部において流路が拡大されることで、速度エネルギーが圧力エネルギーに変換され、水噴流を昇圧し、入口圧力よりも高い吐出圧力を得ることが出来る。

蒸気インジェクタは蒸気と水だけで駆動され、外部電源が不要であることから、実機に適用した際、安全性・信頼性が極めて高い受動安全機器となることが期待されている。

本研究は、経済産業省の委託を受けた(財)エネルギー技術総合研究所からの公募事業である「革新的実用原子力技術開発公募事業」の一課題に選定された「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」の一環として、蒸気インジェクタを大規模プラントなどの実用機器に適用してゆく上で必要不可欠となる技術課題を解決するために実施されたものである。研究主体は、東京電力(株)が受託し(株)東芝ならびに筑波大学はじめとする6つの大学が各課題を分担して担当した。

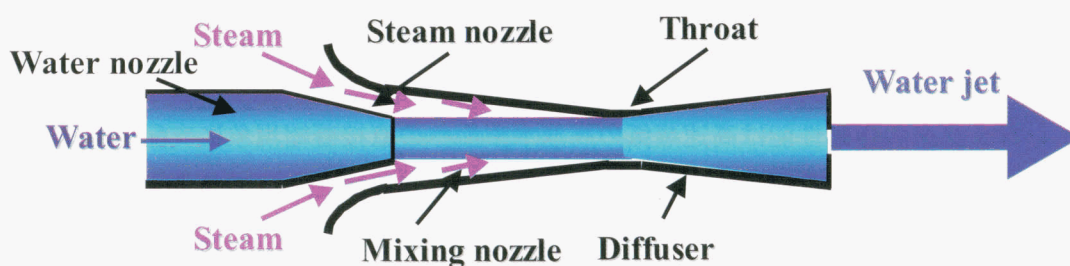


図1 蒸気インジェクタの概念図

## 2 研究の目的

蒸気インジェクタの作動性能は高速蒸気の高速度水噴流への直接凝縮現象に支配される。蒸気は混合部中に超音速蒸気流となって供給されると考えられており、これによって受ける大きなせん断力が原因で、水噴流内は乱流となり、その界面構造は極めて複雑なものになる。気液の直接接触凝縮において、界面構造は凝縮熱伝達に大きく影響を及ぼすものと考えられることから、蒸気インジェクタの作動特性ならびに熱輸送メカニズムを把握する上では、気液界面での流動構造を明らかにす

ることが極めて重要となっている。そのためには、乱流熱輸送が、噴流の助走区間や渦拡散係数に影響されることから、噴流内での速度および温度分布を調べることが必要である。また、実機に蒸気インジェクタを適用する際、蒸気中に空気のような不凝縮性ガスが含まれことが予想されている。蒸気中に不凝縮性ガスが混入した場合、凝縮熱伝達率が著しく劣化することがよく知られているが、蒸気インジェクタのように気液相対速度の極めて大きく強いせん断力の働く場において、凝縮に及ぼす不凝縮性ガスの影響についても明らかにする必要がある。これまで、これらの技術課題を明らかにするための詳細実験情報については、殆ど得られてきていなかったのが現状である。

筑波大学で行った研究では、これまで得られてきていなかったこのような詳細実験情報を得るために、蒸気インジェクタ内の超音速で流動する熱輸送現象を調べるための実験装置を設計製作するとともに新たな計測機器の開発を行って、蒸気インジェクタの作動特性ならびに熱伝達機構を実験的に解明することを目的とした。また、不凝縮性ガスが混入した実験を可能とすることで、不凝縮性ガスの混入が蒸気インジェクタ不作動特性に及ぼす影響を評価検証することとした。

実験の実施に当たっては、株東芝より透明可視化供試体の提供を受けるとともに、筑波大学工作部門の協力を得て試験装置全体の設計製作ならびに計測機器の開発を行った。

今回目指した実験のための装置の主要な仕様は以下の通りであった。

- ① 流動状況が可視観測可能な透明テスト部を有すること。
- ② 最大1 MPaまでの加熱蒸気の凝縮に耐えることができること。
- ③ 軸方向圧力分布の計測ができること。
- ④ 半径方向の温度ならびに速度の計測が可能であること。
- ⑤ これらの計測システムが蒸気インジェクタ内部の流動に影響を与えないこと。
- ⑥ 供給蒸気に所定の不凝縮性ガスを混入可能であること。

### 3 実験装置

#### 3.1 可視化試験体

蒸気インジェクタの作動性能は高速蒸気の高速水噴流への直接凝縮現象に支配される。蒸気インジェクタの蒸気噴流は最適な形状と作動条件においては超音速流となっており、大気圧近傍で作動する蒸気インジェクタにおいては気液の平均速度差は500m/sを超え、マッハ2程度となる。これによって受ける大きなせん断力によって水噴流の界面は波立って擾乱波やリップルなど複雑な形状を有し、波頭からは液滴も発生していると考えられる。こうした水噴流の界面構造は凝縮熱伝達に大きく影響を及ぼすものと考えられる。そこで、内部の噴流を可視化し、内部の噴流の温度・速度分布を計測することのできる蒸気インジェクタ試験体を設計・製作することとした。本試験では蒸気を使用するため、耐熱性が重要であるが、通常の透明アクリルは熱変形温度が100℃以下であるため大気圧近傍の蒸気に対しても使用できない。そこで、130℃と耐熱性が高い透明ポリカーボネート製とすることとした。ポリカーボネートの代表的な物性値を表1に示す。ポリカーボネートの透光性は、アクリルに比べると小さいものの、可視光(400nm~800nm)の領域で透光性85%以

上であり、レーザー光（Ar-ionレーザー波長；532nm）による計測も可能である。試験体はレーザーによる可視化も考慮し可視観測がしやすいように、試験体外面は平面の角型とし、内部を蒸気インジェクタの形状に円筒状に切削した。混合ノズル部からディフューザ部までを全てポリカーボネートで製作し、内部の切削加工が可能な限り一体で製作したため、広範囲な流れが観察できるようになっている。混合ノズルのスロート径は、水噴流が閉塞されることなくディフューザにスムーズに排出させる必要があることから、蒸気インジェクタの作動特性に大きく影響する。そこで、径を変えた複数のスロート部用部品を用意して交換可能とし、最適な形状を選択できるようにした。

水ノズルはステンレスで製作した。位置を上下にスライドできるようにし、ノズル位置の調整によって外面と混合ノズルとの間の蒸気ノズルスロート面積を変えることで、蒸気流量条件を変えられるようにした。蒸気は、水ノズルの側面に設けた左右2本の配管から供給され、水ノズルの周囲から環状に蒸気インジェクタ内部に流入する。水ノズル出口径は、約6.4mmとした。なお、試験体の全長はおよそ500mmである。蒸気インジェクタの圧力分布を得るため、混合ノズル部に3点、スロート部に1点、ディフューザ部に2点の圧力計測孔を設けた。また、試験体内の半径方向温度分布ならびに半径方向速度分布を計測するためのセンサー挿入孔を混合ノズル部の3点設けた。圧力計測と温度/速度分布計測位置は45°ずらすことによって、それぞれの計測が干渉せず行えるようにした。

表1 ポリカーボネートの物性値

機械的性質	比重 [g/cc]	1.2
	引張強度 [kgf/cm <sup>2</sup> ]	600~670
	引張弾性率 [kgf/cm <sup>2</sup> ]	25000
	曲げ強度 [kgf/cm <sup>2</sup> ]	960
	曲げ弾性率 [kgf/cm <sup>2</sup> ]	30000
	圧縮強度 [kgf/cm <sup>2</sup> ]	780
熱的性質	熱伝導率 [cal/cm <sup>2</sup> °C]	0.0005
	熱変型温度 [°C]	130
	熱膨張係数 [cm/cm <sup>2</sup> °C]	0.00007
	比熱 [cal/kg <sup>2</sup> °C]	0.36
工学的性質	光透過率 [%]	85
	屈折率	1.59

### 3.2 実験装置ループ図

今回設計した可視化試験装置のループ図を図2に示す。実験装置は主に、テスト部である可視化蒸気インジェクタ試験体、蒸気インジェクタに水を供給する為の供給タンク、蒸気インジェクタに蒸気を供給する為のボイラ、蒸気中に不凝縮性ガスである空気を供給する為のコンプレッサーから成り立っている。蒸気インジェクタの供給水は、水タンクからポンプを介してテスト部内に供給される。供給蒸気はボイラで発生させるが、最高使用圧力は1.0MPaであるため、減圧弁を介して大気圧近傍まで減圧させる。こうして減圧させた蒸気は蒸気流量計を介してテスト部に供給される。また不凝縮性ガスである空気はコンプレッサーより流量計を介して、蒸気・空気混合器に供給され、混合器で蒸気と混合された後、テスト部に供給される。

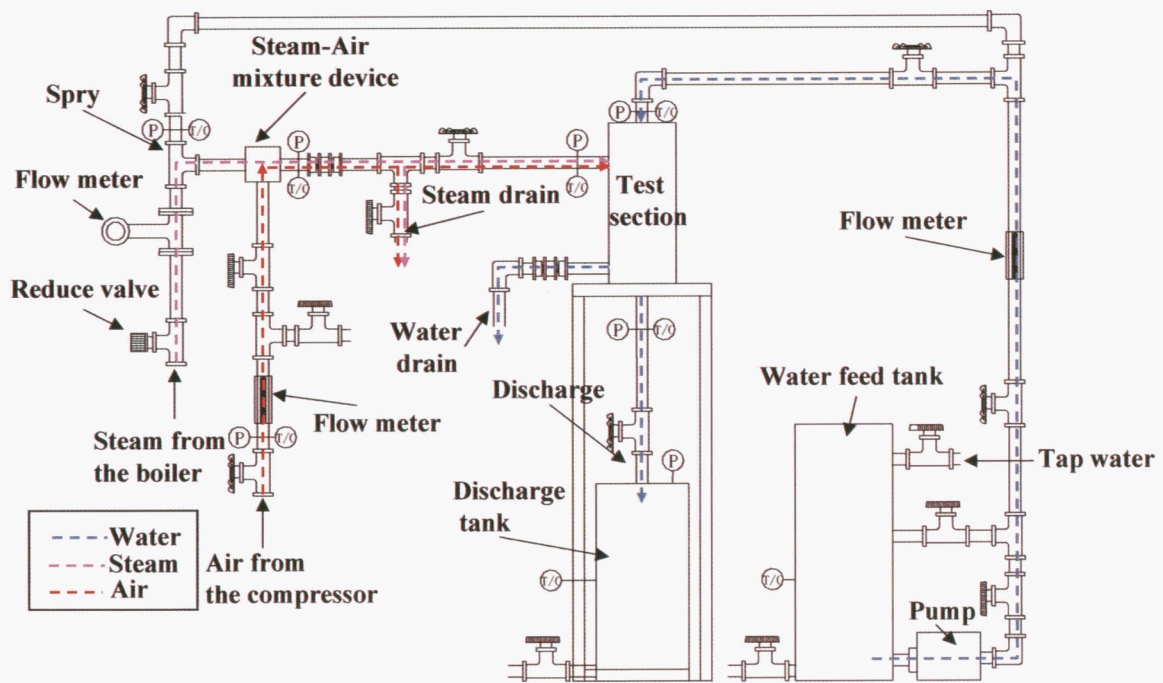


図2 可視化試験装置ループ配置

## 4 計測装置

### 4.1 トラバース装置

水ノズルの出口直径は6.4mmでありまた、水噴流中の熱輸送現象を詳細に調べる為にも、熱電対ならびにピトー管は、半径方向には精度良くまた、数百 $\mu\text{m}$ 程度ずつ移動させる必要がある。また、水噴流の速度は超音速蒸気のせん断力によって加速されており、ただ特殊熱電対ならびに特殊ピトー管を蒸気インジェクタ内部に挿入するだけでは、破損したり計測点がずれたりする可能性が考えられる。そこで本研究では100 $\mu\text{m}$ の精度で半径方向に移動することが出来かつ、特殊熱電対ならびに特殊ピトー管の両端に張力を掛ける事が可能であるトラバース装置を設計製作した。図3にトラバース装置の概要と画像を示す。特殊熱電対またはピトー管を図4に示すように設置し、固定した後、両端に、ある程度の張力を掛け、マイクロメータを使用し、半径方向に移動させることによって、蒸気インジェクタ内部の半径方向温度ならびに速度分布の計測を行う。また本研究では温度分布、速度分布共に半径方向に500 $\mu\text{m}$ の間隔で計測を行うこととした。

### 4.2 特殊ピトー管

蒸気インジェクタ内部の水噴流半径方向速度分布を計測する為、本研究では特殊ピトー管を設計製作した。特殊熱電対同様に水噴流内に挿入した時、乱れをなるべく抑える必要があるために、本研究では直径500 $\mu\text{m}$ のステンレス管を用いることとした。特殊ピトー管は、直径500 $\mu\text{m}$ のステンレス管中心部の壁面に直径100 $\mu\text{m}$ の穴を開け、ステンレス管の端の片方を閉じ、もう片方に圧力センサーを取り付ける事によって製作した。図5に本研究で製作した特殊ピトー管の概要図を示す。計測方法としては、ピトー管の中心部に設けられた穴より全圧を計測し、図5に示すように蒸気インジェクタの壁面に設けられた圧力孔より静圧を計測する。全圧と静圧の差圧をベルヌーイの式 (1)

$$P_t = P_\infty + \frac{\rho}{2} U_\infty^2 \quad \dots \dots \dots (1)$$

に代入することによって水噴流内の速度を算出した。ここで、 $P_t$ は全圧を、 $P_\infty$ は静圧を $U_\infty$ は速度を、 $\rho$ は密度である。

### 4.3 特殊熱電対

蒸気インジェクタ内部の水噴流内半径方向の温度計測には、噴流が非常に高速であるため、空間分解能と応答性の観点から、熱電対はできるだけ細くかつ高速噴流中でも破損しないものが必要となる。そこで、極細線の特殊熱電対を設計製作し、流れに挿入して両端に張力を加えることにより、噴流中の半径方向温度分布を計測することとした。

今回製作した特殊熱電対は、直径300 $\mu\text{m}$ のアルメルとクロメルの素線を突き合わせてスポット溶接することで製作した。この時、異なる素線が溶接された点が計測点になる。図6(a)に実際に製作した特殊熱電対の画像を、図6(b)に計測点を拡大した時の画像を示す。熱電対を挿入した時の水



噴流の乱れをより少なくする為にも、溶接点を出来るだけ小さくする必要があるが、図6(b)に示すように今回製作した熱電対では、計測点も素線とほぼ同じ厚さで溶接出来ていることが確認出来る。

今回使用した特殊熱電対は市販の物ではなく、本研究で設計製作した熱電対である為に、電圧特性と精度を検証する必要がある。そこで、特殊熱電対と汎用K型熱電対を用いて、特殊熱電対の電圧特性と精度の検証を行った。実験手順としては、同じ容器の中に汎用K型熱電対と特殊熱電対を入れ、同時に計測を開始する。この時、特殊熱電対より出力された電圧が指す温度と汎用K型熱電対が示す温度は等しいはずである。熱電対から出力される電力は計測温度と比例関係にあることから、この実験を容器の温度を変えて数回行う事によって、特殊熱電対の電圧特性を検証することとした。

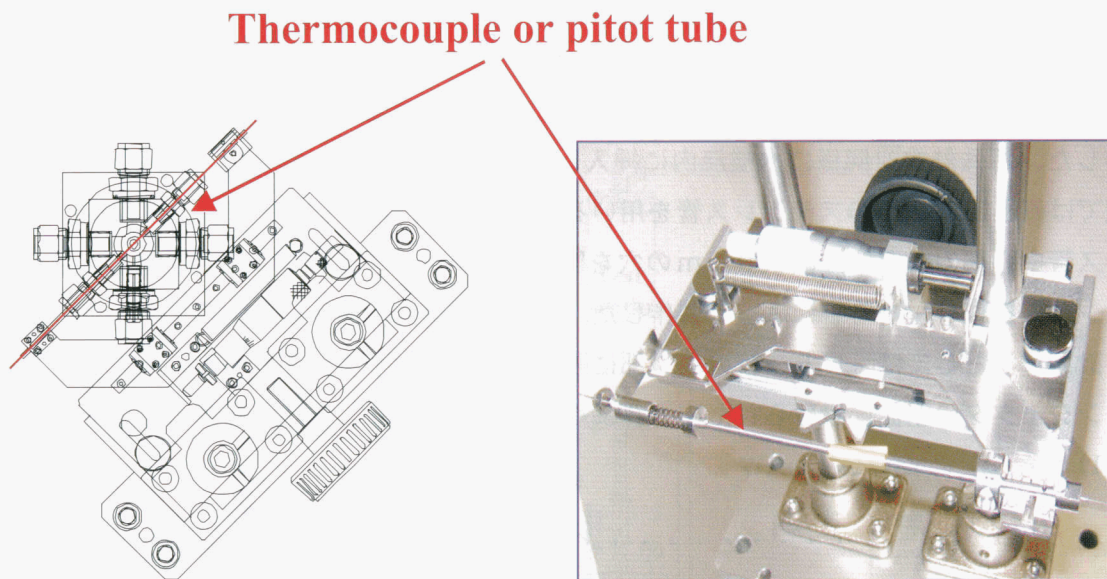


図3 トラバース装置の概要と画像

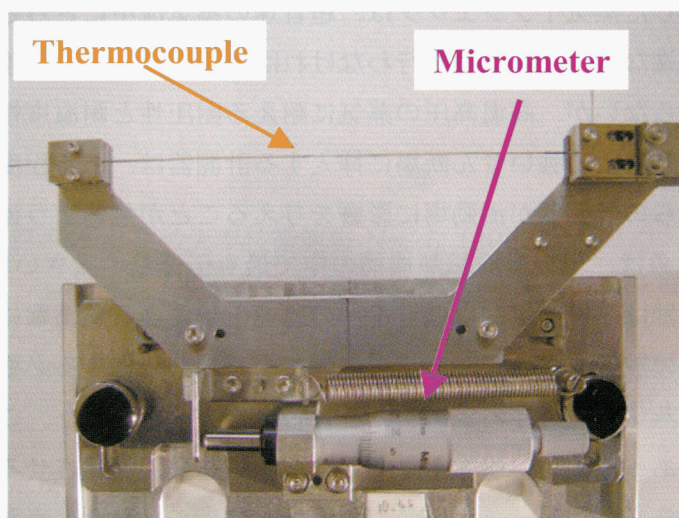


図4 トラバース装置へ計測器が装着された状態

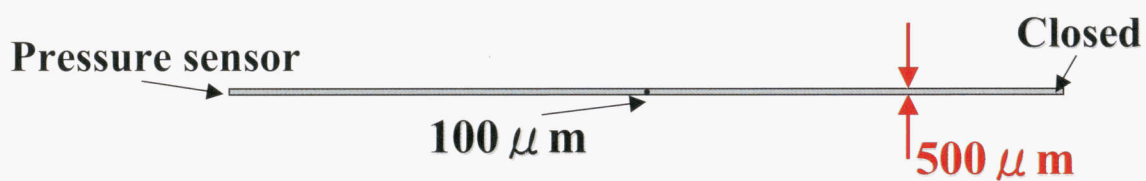
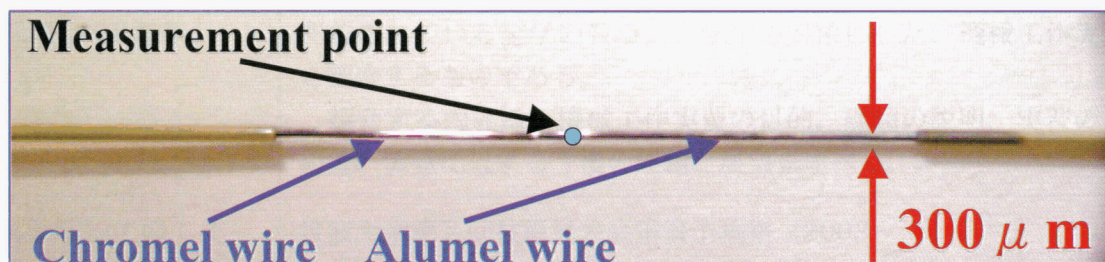
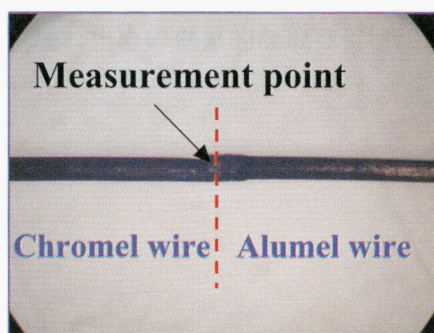


図5 特殊ピトー管概要図



(a)



(b)

図6 特殊熱電対

## 5 結言と謝辞

本研究において対象とした蒸気インジェクタは、超音速の蒸気流中にさらされた水噴流界面での凝縮現象という極めて極端な状況での計測を行わなければならなかった。可視化を行うためには透明テスト部でなければならないが、高温高圧の蒸気に耐える耐圧性と耐温度性を持たせる必要があった。また、超音速の流れによる強いせん断場に挿入する計測器は、ある程度以上の強度有する必要があるが、同時にこれらの計測器が流動場に影響を与えることが無いよう極端に小型化する必要もあった。また、凝縮現象は、現存する伝熱機構の中で最も伝達量の大きい現象であることから、実験装置ならびに計測機器は高温蒸気から低温水への急速伝熱による熱衝撃にも耐えることが要求されたが、多数の計測器の設置すると同時に装置の耐熱衝撃性も確保する必要があった。また、非凝縮性ガスである空気を蒸気に混入するシステムを付帯する必要があった。これらの要素は、互いに相反するものが殆どであったため、研究上必要となる仕様を全て満足させることには、極めて大きな問題と課題を解決する必要があった。特に、本実験で目指した計測に当たっては、京藤助教授はじめとする工作部門の職員各位の御尽力・御努力によって、従来にない全く新しい機構を計測機器に導入することによって実験が可能となり、最終的に、これまで世界中でも得られていなかった貴重な結果を得ることができた。これらの結果は、工作部門の京藤助教授をはじめとする関係各位の多大なる御努力と御尽力の賜物である。ここに改めて深く感謝の意を表する次第である。