

## 二次元ディフューザによる希薄超音速気流の回収に関する研究

生井, 武文  
九州大学大学院総合理工学研究科動力機械工学専攻

赤崎, 正則  
九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

益田, 光治  
九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

矢野, 栄宣  
九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

他

<https://doi.org/10.15017/17571>

---

出版情報 : 九州大学大学院総合理工学報告. 5 (1), pp.33-40, 1983-06-30. 九州大学大学院総合理工学研究科  
バージョン :  
権利関係 :

## 二次元ディフューザによる希薄超音速気流 の回収に関する研究

生井武文\*・赤崎正則\*\*・益田光治\*\*

矢野栄宣\*\*・小嶋新三\*\*\*

(昭和58年3月31日 受理)

### Characteristics of Two-dimensional Diffusers in Rarefied Supersonic Streams

Takefumi IKUI, Masanori AKAZAKI, Mitsuharu MASUDA,  
Hidenobu YANO and Arazo KOJIMA

Plasma heating by the injection of fast neutral beams is thought to be one of the most promising ways for a fusion reaction. However, high power neutral beam injectors require large vacuum pumping systems for displacing gases used to neutralize fast ions in the neutralizer cell. In order to solve this problem, authors have proposed the gas jet cell in which ions are neutralized by the high density portion of the supersonic jet. For this gas jet cell being practical, it is necessary to develop supersonic diffusers by which at least 90% of the gases issuing into the cell as a supersonic jet should be recovered. Present paper describes the experimental results on the performances of supersonic diffusers in low density environments. By using the low density wind tunnel, the effect of diffuser shapes on the mass flow recovery rate and the structures of flow fields in the diffusers are clarified. It has also been shown that, by choosing proper diffuser shapes, the requirement of 90% mass recovery rate could be fulfilled.

#### 1. 序 論

核融合炉を実現するためには、トーラスなどに閉じ込められたプラズマを十分高温に加熱する必要があるが、この加熱法として高速の中性ビームをプラズマに入射し、プラズマ粒子との衝突を介して中性粒子の運動エネルギーを熱エネルギーに変換して温度を上昇させる中性ビーム入射装置が現在最も有力視されている<sup>1)</sup>。高エネルギー中性ビームは、イオン源で得られた高速イオンビームを中性化セル中に入射し、荷電交換させて得られるが<sup>2)</sup>、荷電交換効率を上げるためには中性化セル部の気体密度を高くとる必要がある。一方、トーラス部では高い真空度が要求されるために、トーラス部と中性化セルの間に大容量の真空排気装置を設置し

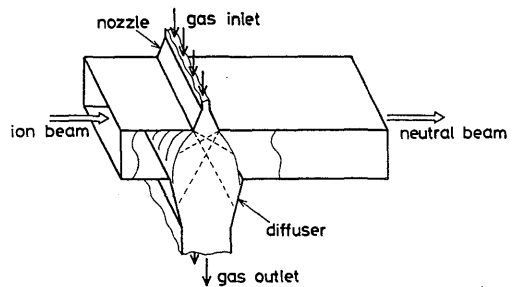


Fig. 1 Concept of the gas jet neutralizer

て中性化セル部の気体を排気しなければならない。この真空排気系の容量を低下させる事を目的とし、さきに著者らは Fig. 1 に示す気体噴流セルを提案した<sup>3)</sup>。このセルでは、超音速噴流としてセル部に噴出した噴流中央の高密度部分でイオンビームを中性化する。一方、噴出した気体はディフューザにより回収されるので、セル出口に設置される真空排気系の容量を軽減で

\* 動力機械工学専攻

\*\* エネルギー変換工学専攻

\*\*\* エネルギー変換工学専攻修士課程

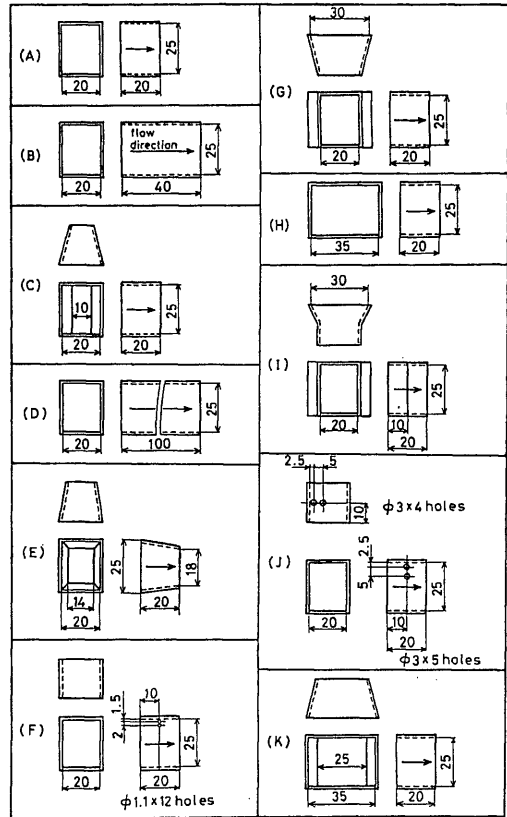
きると考えられる。噴流による高エネルギーイオンビームの中性化は十分可能であることが実験的に確かめられているが<sup>2)</sup>、このシステムが効率よく動作するためには噴出した気体の回収率が良く、さらに圧力回復率の高い二次元ディフューザを開発する必要がある。

超音速希薄噴流で用いられるディフューザの性能についてはこれまでにいくつかの報告があるが<sup>3)~5)</sup>、いずれも超音速風洞の動作特性や、気体力学レーザーなどに関連するもので、圧力回復率のみに着目しており、噴流の気体回収を考慮した研究はない。そこで本研究では、低密度風洞を用い、11種類の形状の異なる二次元超音速ディフューザの特性を実験的に調査した。その結果、ディフューザ形状が気体回収率と圧力回復率に及ぼす影響をはじめ、ディフューザ内部における衝撃波や境界層の詳細な構造を明らかにすることができたので報告する。

## 2. 実験装置

本研究では低密度風洞を用いた実験的研究を行った。この風洞は連続非回流式の超音速風洞で、作動気体には窒素を用いた。本風洞の動作特性や風洞で得られる流れ場の詳細な構造などについては、すでに文献2)及び6)で述べたので本報告では省略する。

ディフューザにより超音速流の気体を回収する場合、ディフューザの形状が気体回収率に大きく影響すると考えられる。そこで、本研究では Fig. 2 の A~K に示す、形状の異なる 11 種類のディフューザを製作し実験を行った。また、気体回収率の測定には Fig. 3 に示す装置を用いた。ノズルより噴出した気体はディフューザに流入し減速された後、タンク内部でよどみ点状態となる。その後、気体はオリフィスを通して風洞内に流出するが、その際、オリフィス前後の圧力比を測定する事によりディフューザで回収された気体の流量を求めた。なお、本実験では直径  $d$  が 20 mm と 30 mm の検定した 2 種類のオリフィスを用いた。また、ディフューザ内部の流れ場は静圧管と全圧管により測定された。圧力測定には検定したピラニ真空計を用いた。なお、実験結果の解析に用いた座標系を Fig. 4 に示す。実験に用いたノズルは出口面の  $x$  方向幅 5.2 mm,  $y$  方向幅 15 mm で<sup>2)</sup>  $y=7.5$  mm が流れの中央の面に対応する。



The flow direction is indicated by an arrow.

Fig. 2 Supersonic diffusers

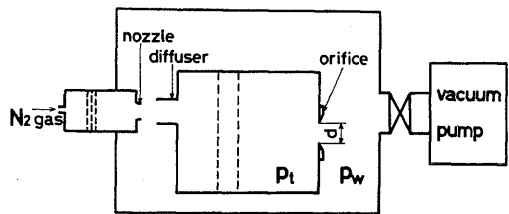


Fig. 3 Apparatus for measuring the mass recovery rate

## 3. 実験結果と考察

Fig. 5 は Fig. 2 に示した各形状のディフューザの実験結果で、横軸はノズル出口よりディフューザ入口までの距離  $z_{dif}$ 、縦軸はディフューザによる気体回収率  $\eta$  を示す。 $\eta$  はディフューザで回収された質量流量  $\dot{m}_{dif}$  と気流の全質量流量  $\dot{m}$  の比  $\eta = \dot{m}_{dif} / \dot{m}$  として定義される。同図は回収流量の測定に直径 20 mm

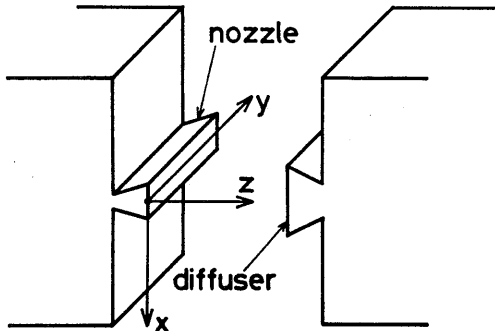


Fig. 4 Co-ordinate system

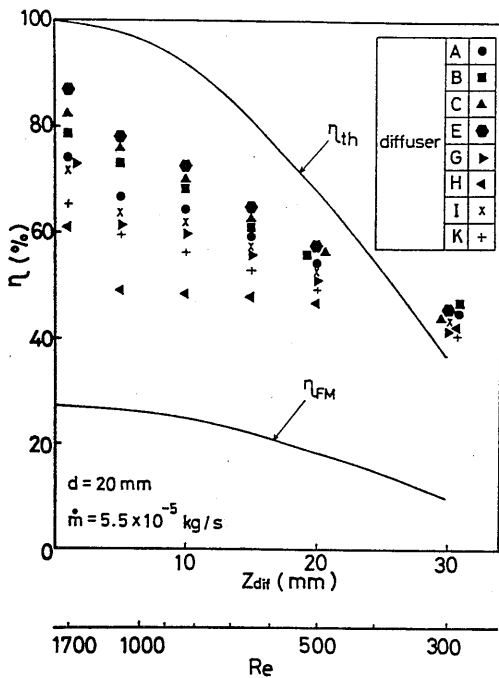


Fig. 5 Mass recovery rate by diffusers

のオリフィスを用いた場合を示す。図に示されるように、実験で得られた回収率は  $z_{dif}$  の増大と共に減少しているが、回収率はディフューザ形状の影響を強く受ける事が分かる。本実験で用いたディフューザのなかで最も良好な回収率を示したのは三次元先細形状を有する E 型であり、次に二次元先細形の C 型であった。直管形の A 型及び B 型も先細形につぐ回収率を示したが、長さの長い B 型が A 型と比較して  $\eta$  は高い。しかし、本実験ではディフューザ入口での入口幅に基づく主流のレイノルズ数  $Re$  が数百程度で低いた

め、B 型以上に長さを長くした場合、回収率は逆に低下する結果が得られた。亜音速形状を有する G 型と I 型はいずれも回収率が低い。また、入口幅を 35 mm とした H 型及び K 型は本実験では回収率が最も低かった。特に H 型は直管状であるが、この場合、自由噴流の幅がディフューザ入口幅に比較して小さく<sup>2)</sup>、噴流境界がディフューザ壁面に接していないと思われる。K 型は入口幅は H 型と同じであるが、先細形状であるためディフューザ出口付近で噴流が壁面と接触し、回収率が H 型と比較して良くなったと考えられる。なお、H 型では  $z_{dif} \sim 0.5$  mm において回収率が急激に上昇しているが、これはノズル壁とディフューザの間隔が小さくなるため、この間での流れがチョークする結果、流れ流量が減少したためと思われる。図の実線は実験により求めた噴流の流れ場<sup>2)</sup>の流量分布をディフューザ入口幅にわたって積分して得た回収率  $\eta_{th}$  で、ディフューザで回収可能な流量の上限を与える。 $z_{dif} \sim 30$  mm では噴流周辺のパレル衝撃波の部分が積分領域に含まれ積分精度がおちる事、及び噴流が三次元構造を有する事などのために、理論回収率は必ずしも理想的なディフューザの回収率とは一致しないが、図に示すように、この  $\eta_{th}$  は実験で得られた回収率が  $z_{dif}$  の増大と共に低下する傾向を良く説明している。 $z_{dif} = 30$  mm ではディフューザ形状が回収率に大きく影響する事はないようで、実験で得られた回収率は理論回収率に近い。後に述べるように、回収性能はディフューザ壁面に発達する境界層内部の流れ方向圧力勾配、すなわちディフューザ出口と入口の圧力比に大きく依存するが、 $z_{dif} = 30$  mm では理論回収率が低く、ディフューザに流入する流量が少ないためにディフューザ前後の静圧比は小さい。この事のため、ディフューザ形状による回収性能の差が小さくなったと思われる。なお、ディフューザの回収流量に基づくレイノルズ数  $Re_e$  は  $z_{dif} = 10$  mm で約 110、 $z_{dif} = 30$  mm で約 80 で大きな差はなく、 $z_{dif} = 10 \sim 30$  mm の領域ではレイノルズ数の回収率への影響は小さいと考えられる。また、図の  $\eta_{FM}$  は自由分子流を仮定した場合の理論回収率を示すが、実験結果は  $\eta_{FM}$  より十分大きくむしろ  $\eta_{th}$  に近い事より、ディフューザ内部は連続体的な流れ場であると考えられる。なお、流れ場の平均自由行程はほぼ 0.1 mm 程度であった。

流量計測用オリフィスの直径  $d$  を 30 mm とした

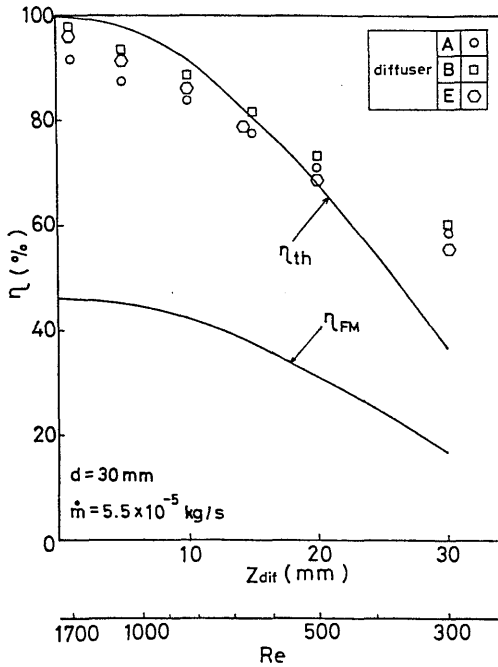


Fig. 6 Mass recovery rate by diffusers

場合の回収率を Fig. 6 に示す。  $d=30\text{ mm}$  では  $d=20\text{ mm}$  と比較してディフューザ出口の静圧が低くなりディフューザ出口と入口の静圧比が小さくなるため、  $z_{dif}=0.5\sim 30\text{ mm}$  の全領域にわたって形状の効果は小さく回収率も理論回収率に近い事が分かる。また、このノズル・ディフューザシステムを中性ビーム入射装置へ応用するためには  $z_{dif}\sim 10\text{ mm}$  で  $\eta\sim 90\%$  が必要と考えられるが、同図よりディフューザ背圧を下げる事によりこの回収率はほぼ達成可能と考えられる。なお、図には自由分子流の場合の  $\eta_{FM}$  も合せ示したが、Fig. 5 と比較して  $d$  が大きいため  $d=30\text{ mm}$  の場合の  $\eta_{FM}$  は  $d=20\text{ mm}$  の場合よりも小さい。

$d=20\text{ mm}$  と  $d=30\text{ mm}$  では回収率にかなりの差が見られたが、これはディフューザ入口部分における流れの状態に起因すると考えられる。Fig. 7 は  $z_{dif}=10\text{ mm}$  におけるディフューザ入口面の静圧  $p_s$  の分布を示す。ディフューザを流れに挿入した場合、  $d=20\text{ mm}$  では  $x\geq 4\text{ mm}$  で、また、  $d=30\text{ mm}$  では  $x\geq 6\text{ mm}$  において静圧が自由噴流の値より高くなり、流れが希薄であるために主流が超音速流であるにもかかわらずディフューザ壁面の影響が前線上縁にまで及

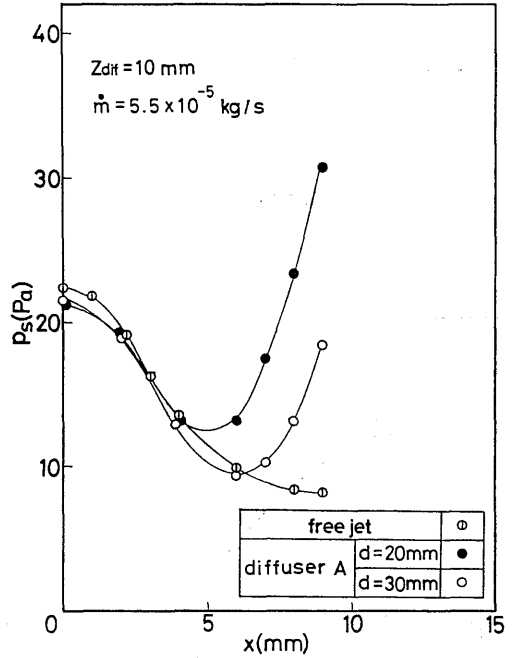


Fig. 7 Static pressure distributions at the diffuser inlet

んでいる事が分かる。これは壁面に発達する厚い境界層の亜音速部分を通じてディフューザ出口の高い静圧の影響が上流に及ぶためと考えられ、事実  $x\sim 9\text{ mm}$  における静圧上昇はディフューザ出口圧の高い  $d=20\text{ mm}$  の場合が  $d=30\text{ mm}$  と比較して大きくなった。しかし、ディフューザ出口静圧は  $d=20\text{ mm}$  で  $60\text{ Pa}$ 、  $d=30\text{ mm}$  で  $35\text{ Pa}$  であり、出口面における  $x\sim 9\text{ mm}$  の静圧よりは十分高い。

Fig. 8 はディフューザ出口圧力とノズル背圧との比  $p_t/p_w$  と回収率の関係を示す。この回収率は噴流の質量流量を変化させて得た実験結果である。図に示されるように回収率は  $p_t/p_w$  に強く依存しており、超音速ディフューザ形状を有するC型及びE型が高い圧力比に耐えて回収率が最も良い事が分かる。これに対して、入口幅は同じでも亜音速ディフューザ形状のG型とI型は圧力比と共に  $\eta$  がかなり減少しており、さらに、入口幅の大きいH型やK型では噴流境界の幅との関係で圧力比に対する回収率の劣化は最も著しかった。

次に Fig. 9(a), (b) はA型とC型のディフューザ中央部  $x=0, y=7.5\text{ mm}$  における静圧  $p_s$  の分布で、横軸の  $z'$  はディフューザ入口より測った流れ方

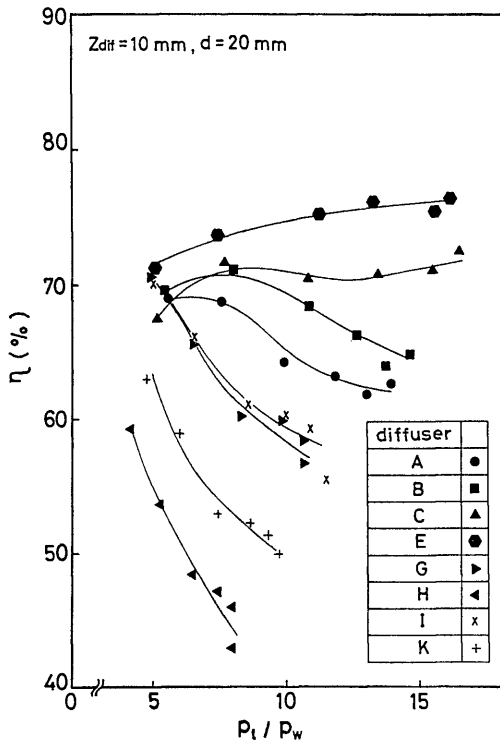
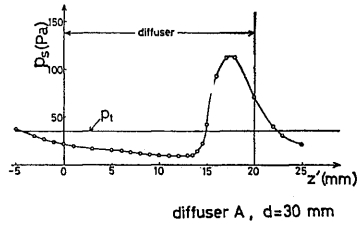
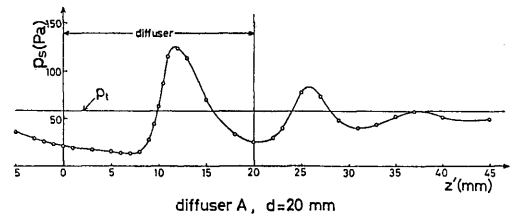
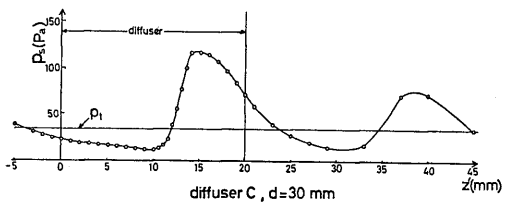
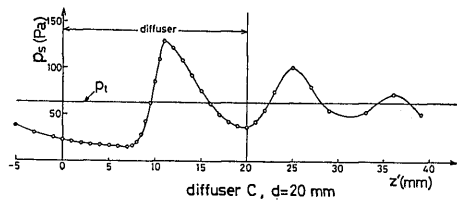


Fig. 8 Mass recovery rate as a function of the pressure ratio

向の距離である。いずれの場合においてもディフューザに流入した超音速噴流は衝撃波により大きく減速されており、その後、複雑な衝撃波系により膨張、圧縮をくり返しながら静圧が背圧  $p_t$  に近づく。図より、ディフューザ出口静圧  $p_t$  の高い  $d=20\text{ mm}$  の場合は、A型、C型共に衝撃波の位置が  $z'\sim 10\text{ mm}$  付近ではほぼ一致している。しかし、 $d=30\text{ mm}$  では  $p_t$  が低下するためA型では衝撃波位置が  $z'\sim 16\text{ mm}$  まで後退するが、C型では  $z'\sim 13\text{ mm}$  となり衝撃波の後退距離は小さい。A型は断面積変化のない直管形で、壁面に発達する境界層がディフューザ内部の流れ場に大きな影響を及ぼすため、背圧の変化による境界層形状の変化が直接流れ場を変える。これに対して、C型は先細形であるため内部流れは境界層形状よりも壁面形状に依存し、ディフューザ出口圧の変化による境界層厚さの変化の内部流れへの影響はA型と比較して小さいと考えられる。この事のために、超音速ディフューザ形状を有するC型及びE型が他のディフューザと比較して高い圧力比  $p_t/p_w$  においても回収率が低下



(a) type A diffuser



(b) type C diffuser

Fig. 9 Static pressure variations in diffusers

しなかったと思われる。

次にディフューザ側壁及び内部挿入物の効果について考察する。本実験の場合、ノズル出口の縦横比は 2.9 であるためノズルより噴出する噴流の三次元的な構造を考慮する必要がある。中性ビーム入射装置用中性化セルの空間利用上の制約を考慮するとノズルとディフューザの縦方向 ( $Y$  方向) 長さはほぼ等しい事が望ましく、ディフューザの縦方向長さはノズルの長さと比較してあまり長くはできない。そこで、噴流の  $Y$  方向の膨張を抑え回収率を改善するために Fig. 10 に示すようにディフューザの上下に側壁を付加した。

Fig. 11 はこの場合の回収率を示すが、側壁を付加する事により  $\eta$  は 20% 程度向上しており、噴流の三次

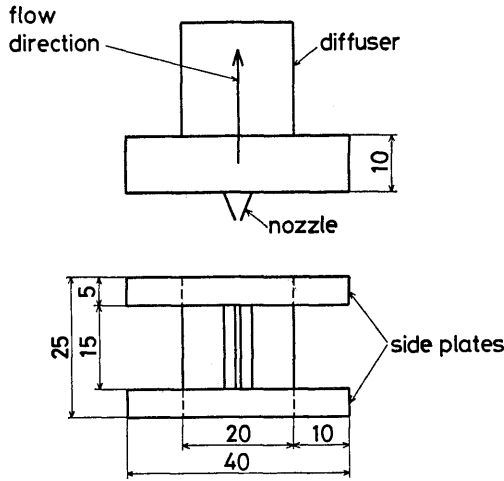


Fig. 10 Diffuser with side plates

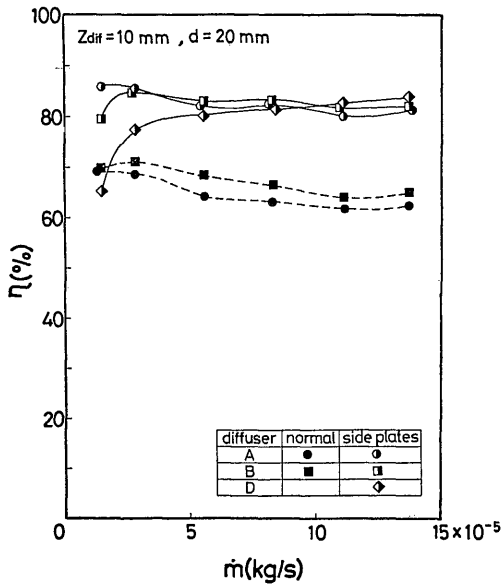
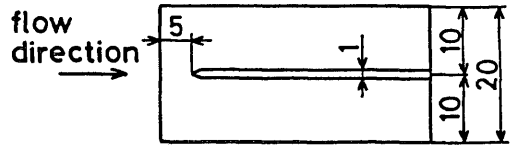


Fig. 11 Effect of side plates on the mass recovery rate

元構造が回収率に大きく影響する事が分かった。また、A型、B型、D型はいずれも直管形で長さのみが異なるが、 $\dot{m} \leq 10 \times 10^{-5} \text{ kg/s}$  のレイノルズ数が低い領域では摩擦の効果により長さの長いD型は他のA型、B型と比較して回収性能は劣るが、 $\dot{m}$ が増大しレイノルズ数が高くなると長さの長いディフューザほど回収率が良くなる様子が同図に良く示されている。

ディフューザ内部に分割板を挿入する事により圧力

inside plate 1



inside plates 2

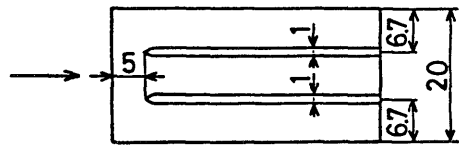


Fig. 12 Diffuser with inside plates

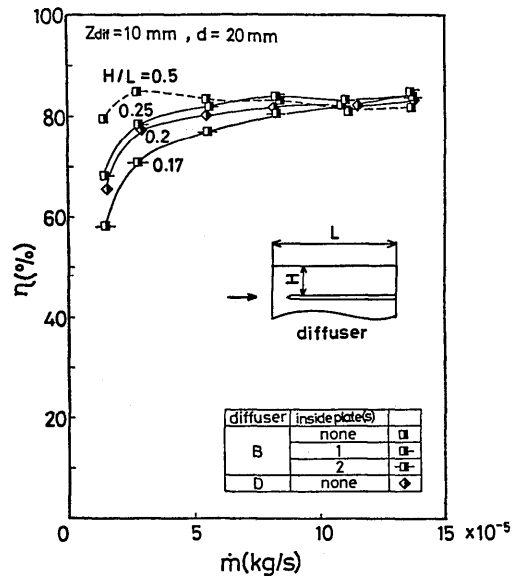


Fig. 13 Effect of inside plates on the mass recovery rate

回復率が向上することが報告されている<sup>3)</sup>。そこで、Fig. 12 に示すようにB型ディフューザ内部に分割板を入れて実験を行った。Fig. 13 はその結果であるが、質量流量  $\dot{m}$  が小さい領域では分割板の挿入により  $\eta$  は低下するが、 $\dot{m} \geq 10 \times 10^{-5} \text{ kg/s}$  では逆に分割板を入れたディフューザが入れない場合と比較して  $\eta$  がやや高くなった。図に示すようにディフューザ壁と分割板間の距離を  $H$ 、ディフューザ長さを  $L$  とした場

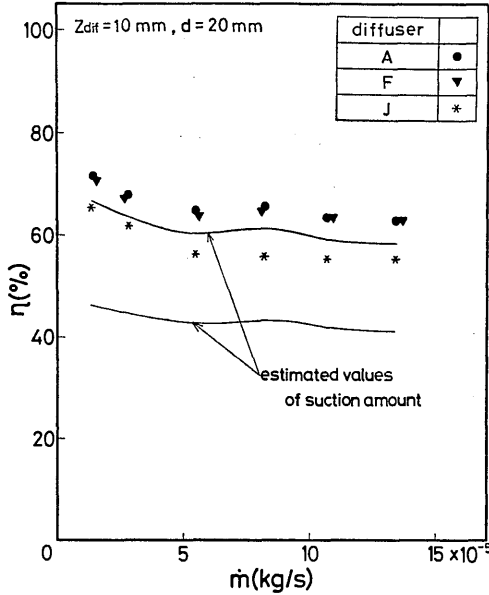


Fig. 14 Effect of boundary layer suction on the mass recovery rate

合、両者の比  $H/L$  は分割板 1 枚の時 0.25, 2 枚の時 0.17 となる。また、分割板を入れない場合、 $H$  としてディフューザ左右壁間の距離をとれば  $H/L$  は B 型で 0.5, D 型で 0.2 であるが、同図より、 $\eta$  の  $\dot{m}$  に対する変化の状態は  $H/L$  に大きく依存しており  $H/L$  の小さいディフューザほどレイノルズ数が低く粘性損失の大きい領域で  $\eta$  が低くなる事が分かる。

本実験のように噴流の密度が低い場合、ディフューザ壁面には厚い境界層が発達する。そこで、この境界層の影響を調べるために、壁面に孔をあけた F 型及び J 型ディフューザを用いて境界層吸込みを行った。Fig. 14 はその結果であるが、吸込み孔面積の小さい F 型は全く吸込みのない A 型とほぼ同じ回収率となり、また、吸込み孔面積の大きい J 型では回収率がかなり低下した。Fig. 7 から分かるように、境界層内部の静圧はほぼディフューザ出口静圧  $p_t$  に等しく、また、 $p_t$  と風洞壁圧  $p_w$  の比は 5 以上である。吸込み孔において流れはチョークしていると考え吸込み孔の流量係数を考慮して<sup>8)</sup> 吸込み量を評価し、F 型及び J 型ディフューザについて回収率を計算した。その結果が Fig. 14 の実線であるが、この値は実験値よりやや低くなる。この事から、境界層吸込みを行った場合、境界層が薄くなりディフューザ入口に流入する質量流

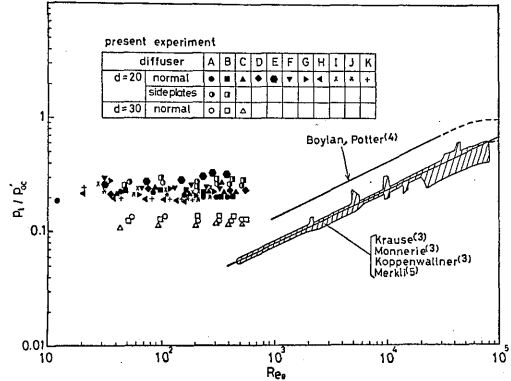


Fig. 15 Pressure recovery rate

量は増大するが、反面、吸込み孔から気体が流出する結果、実験で得られた  $\eta$  は吸込み孔がない場合より小さく、また、吸込みがある場合の計算値よりは高くなったと考えられる。

ディフューザによる圧力回復率の実験結果を Fig. 15 に示す。図の縦軸にはディフューザ出口静圧  $p_t$  とディフューザ入口における  $x=0, y=7.5 \text{ mm}$  の点の衝撃圧  $p'_{oc}$  の比をとり横軸にはレイノルズ数

$$Re_x = \frac{\dot{m}_{dif}}{\mu} \cdot \frac{d_h}{A_e}$$

をとった<sup>4)</sup>。ここで  $\dot{m}_{dif}$  はディフューザに流入した質量流量、 $\mu$  はディフューザ入口の粘性係数、 $d_h$  は水力直径、 $A_e$  はディフューザ入口面積である。同図にはこれまでに報告されたディフューザに関する実験結果もあわせ示した。Krause<sup>3)</sup>, Monnerie<sup>3)</sup>, Koppenwallner<sup>3)</sup>, Merkli<sup>3)</sup> らの実験結果は通常の超音速風洞に対するもので圧力比  $p_t/p'_{oc}$  として風洞のブレイクダウン直前の値を用いており、また、Boylan ら<sup>4)</sup> の結果は自由噴流をディフューザで回収した場合の測定値であるが、いずれも気流の質量流量は全て回収される。一方、本実験では  $\eta < 1$  でノズルから流出した気体の一部はディフューザで回収されず、特に噴流中央部と比較して全圧の低い周辺部混合領域の気体がディフューザに流入しないため、本実験の結果は他の報告と比較して圧力回復率が高くなった。 $d=20 \text{ mm}$  の場合の本実験結果は Fig. 15 に示されるように、回収率  $\eta$  が低い反面、低レイノルズ数領域においても高い圧力回復率を示した。また、 $d=30 \text{ mm}$  では  $\eta$  はほぼ理論限界  $\eta_{th}$  に近いが、この場合、本実験の結果が Boylan らの結果<sup>4)</sup> に近付く事が分か



る。いずれの場合においても、本研究のように質量流量を回収する事を目的としてディフューザを用いた場合、圧力回復率は通常の超音速風洞のディフューザの場合よりも高くなる。

#### 4. 結 論

核融合プラズマ加熱用中性ビーム入射装置の中性化セルでの使用を考慮して、希薄な超音速自由噴流の質量流量をディフューザにより回収するための実験的研究を行った。その結果、ディフューザ壁面形状、ディフューザ内部形状、境界層吸込みを行った場合、などについて気体回収率の挙動が明らかとなった。また、壁面形状を最適化する事により90%以上の回収率を達成できる見通しが得られた事から、本研究で用いたディフューザを使用できると考えられる。

#### References

- 1) Ehlers, K. W., ほか7名, LBL Rept. 4471 (1976).
- 2) 生井・ほか5名, 九大総理工研究科報告 4-2 (昭58), 147.
- 3) Krause, S., AIAA J., 19-1 (1981), 94.
- 4) Boylan, D. E. and Potter, J. L., 4th Hypervelocity Techniques Symp., AEDC, Tullahoma, Tenn. (1975).
- 5) Merkli, P. E., AIAA J., 14-2 (1976), 168.
- 6) Ikui, T. and Masuda, M., Mem. Faculty of Engi. Kyushu Univ., 33-2 (1973), 23.
- 7) Adamson, T. C. and Nicholls, J. A., J. Aero. Sci., 26-1 (1959), 16.
- 8) Milligan, M. W., AIAA J., 2-6 (1964), 1088.