

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-545

450 kW アーク加熱風洞の特性(I)

アーク加熱装置の特性

松 崎 貴 至 ・ 平 林 則 明 ・ 渡 辺 光 則
伊 藤 哲 一 ・ 高 野 晃 ・ 高 塚 均

1985年6月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

450kW アーク加熱風洞の特性(I)

アーク加熱装置の特性

松崎貴至** 平林則明** 渡辺光則**
伊藤哲一*** 高野晃*** 高塚均***

1. まえがき

アーク加熱風洞は高減速または低減速の回収体への空力加熱と熱防御法を研究するための装置である。当所と宇宙開発事業団との共同研究「回収技術の研究」のために、常用450kWの電力で作動するアーク加熱風洞付加設備が作られた。本設備の設置の経過その他の詳細は共同研究成果報告書^{1),2)}に記載されている。現在、このアーク加熱風洞付加設備は前記の共同研究のプログラムに従ってアプレータや耐熱タイル等の熱防御特性の研究に運用されている。それらの成果の一部は共同研究成果報告書³⁾として刊行されている。

本付加設備の工事は58年3月迄で終了し、その試運転の結果については本付加設備の完成図書(NASDA-PSPC-7169~7171)に記載されている。それ故本設備の特性はそれにより概略を知ることができる。しかしながら、本格的に運用される前により詳細な特性を知ることが、今後の共同研究のプログラムを進める上で必須である。そこで前記の共同研究の一環として、熱防御特性の試験研究が本格化する前に、本設備の特性試験が行われた。特性試験の目的は、アーク加熱風洞が所期の性能を満足することを確認すること、エンタルピや圧力について作動範囲を確定すること、前述の熱防御特性の試験に資すること等である。なおさきに報告した特性予測⁴⁾との比較も部分的におこなり。

この種の風洞の特性は、アーク加熱装置に関連したエンタルピ、圧力、温度、効率等が、特性に寄与するパラメータである入力電力、一次ガス流量、一

次ガスの種類等によりどのように変化するかを、これらのパラメータを可能な限り広範囲に変化させて測定することにより調べることができる。測定室に発生させた高エンタルピ気流の特性についても十分な調査が必要であるが、本報告では主としてアーク加熱装置の特性の試験結果について述べる。測定室に発生させた高エンタルピ気流の特性については、まだ十分な試験データが得られていないので別の機会に報告する。

まず本付加設備の概略とアーク加熱装置の特性試験の方法について第3章で述べる。試験結果の詳細については第4章で述べる。これらの試験においてはさきに開発したアーク加熱風洞用データ処理ソフトウェア⁵⁾を全面的に活用することにより、風洞の運転状況の監視やデータの処理、および処理データの作図等を効果的に行うことができた。なお特性試験結果の概略は、共同研究成果報告書³⁾にも報告されているが、本報は、その後に行われた試験データも含め、より詳細かつ広範囲にわたる結果を補完するものである。

2. 記号

C_p	；水の比熱	4.186 J/g・℃
D^*	；ノズルスロートの直径	mm ϕ
DT	；全冷却水温度上昇	℃
DT_n	；プレナム室・ノズル冷却水温度上昇	℃
G	；両電極間隔	cm
GAS	；作動ガス	
h	；全エンタルピ	MJ/kg
h_b	；コラム・電極エンタルピ	MJ/kg
I	；アーク電流	A
\dot{m}	；ガス流量	g/s
\dot{m}_w	；全冷却水流量	kg/s

* 昭和60年4月25日受付
** 空気力学第一部
*** 宇宙開発事業団

\dot{m}_{wn}	； プレナム室・ノズル冷却水流量	kg/s
P	； 入力電力	kW
$pack$	； 電極間隔固定長 ($1\ pack \approx 18\ cm$)	
P_0	； プレナム室圧力	MPa
P_w	； 冷却水圧力	MPa
V	； アーク電圧	V
η	； 全効率	%
η_b	； コラム・電極効率	%
ξ	； 全損失量	kW
ξ_c	； コラム・電極損失	%
ξ_{lnp}	； プレナム室・ノズル損失量	kW
ξ_{np}	； プレナム室・ノズル損失	%

3. 試験装置及び試験方法

450kWアーク加熱風洞付加設備のブロック図を図1に、アーク加熱器と風洞本体測定室の写真を図2に示す。本設備の主要構成はアーク加熱装置と風洞本体でありこの種の風洞としては我が国最大のものである。

アーク加熱装置の作動ガスは、高圧ガスボンベからガス集合装置に導かれ、流量制御弁を通してアーク加熱器に流入する。アーク加熱器は、直流電源により供給される電流制御されたアーク放電により作動ガスの加熱を行う。加熱された作動ガスは、プレナム室、ノズルを通り、測定室で極超高速の高エンタルピ流となる。以後ガスは、拡散筒、冷却器、真空槽などを経て、排気装置により連続的に排出される。常用通風時間は約30分である。

アーク加熱装置の要目を表1に示す。現在作動ガスは、アーク加熱器の上流部から流入する一次ガス

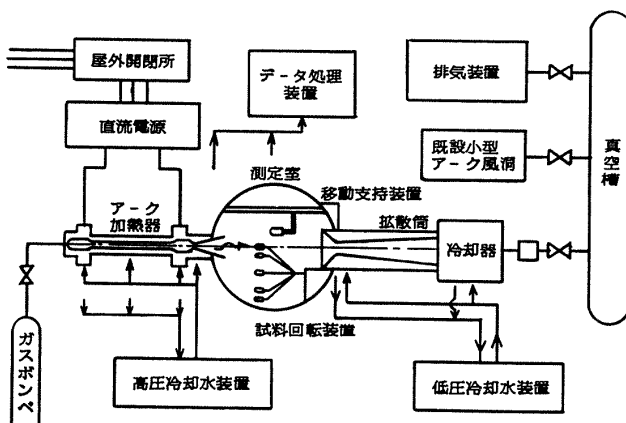


図1 アーク加熱風洞ブロック図

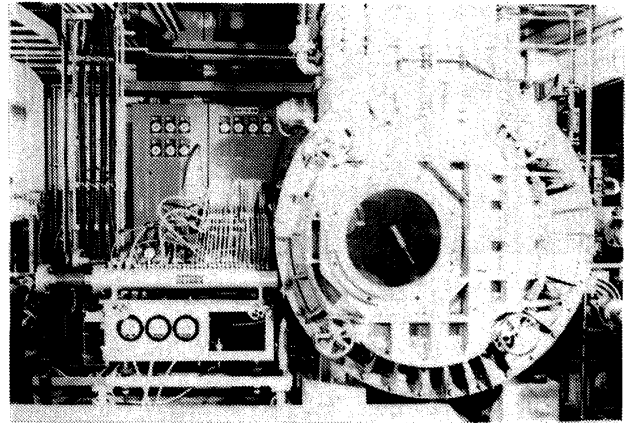


図2 アーク加熱器と風洞本体測定室

として空気及び窒素が用いられている。またアーク加熱器の下流部またはプレナム室から流入する二次ガスとして酸素、二酸化炭素、アルゴン、ヘリウムなどが使用できる。

アーク加熱器の構造を図3に示す。アーク加熱器は陰極、陽極、安定化コイル、コラムモジュールなどから構成され、気流の下流部にはプレナム室及びノズルが取付けられる縮流安定化方式の構造であり、各部は、高圧冷却水装置の高純度高抵抗率の純水で強制的に冷却される。アーク加熱器は、個別に水冷及び絶縁された厚さ9.5mm、内径25.4mmの無酸素銅のコラムセグメントを16枚組合せたコラムモジュールを1パックとし、1～3パックに電極間隔を調節することができる。図2の写真では電極間隔が2パックに組立てられている。アーク加熱器の電極の写真を図4に示す。電極の陰極及び陽極は、円管円錐状の無酸素銅製で、安定化コイルの磁場によりアークの足を回転させ、アーク放電による電極の損耗の防止とアークの安定化を図っている。この図に示すような陰極の著しい損耗は、アークの足が陰極に停留しやすいためである。このようなV溝を形成する損耗は、作動条件を長時間固定した場合に発生する傾向がある。

アーク加熱器の電源は、垂下電圧－電流特性をもった直流アーク電源である。電流の制御は、可飽和リアクトルを用いて一次側で行い、二次側は、出力電流37.5～500A、定格負荷電圧500V、無負荷電圧875Vの整流器回路を4個保有している。

これらの回路を直列、並列、直並列のいずれかに接続し、アーク加熱器の負荷に適合させて、電圧ま

表1 アーク加熱装置の要目

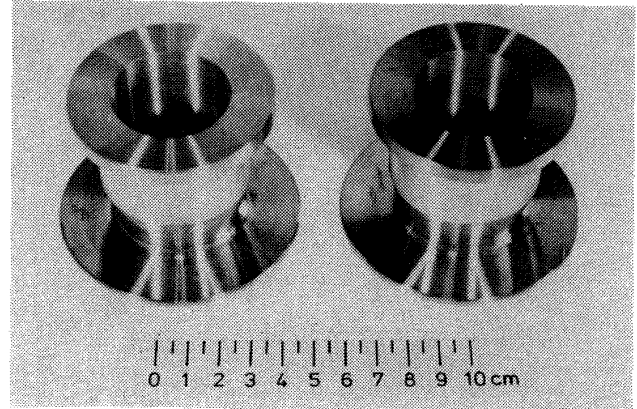
アーク加熱器	縮流安定型
入力電力	約450kW(連続定格)
作動ガス	空気, 窒素
最大ガス流量	6 g/s
最大プレナム圧力	1.01 MPa
最大エンタルピー	33 MJ/kg
ノズル	円錐型
スロート直径	4, 5 mm ϕ
出口直径	180 mm ϕ
設計マッハ数	12
直流電源	可飽和リアクトル制御方式
入力	交流 3,300V, 最大1,500kVA(力率 \approx 0.86)
出力定格	直流 2,000V, 375Aにおいて750kW 直流 1,000V, 750Aにおいて750kW 直流 500V, 1,500Aにおいて750kW

たは電流範囲を選択し、直列接続では最大電圧を、並列接続では最大電流を、直並列接続ではその中間をとることができる。アーク加熱器電極に磁場を加えるために、定格負荷電圧40VDC、最大電流600Aの直流安定化電源を用いている。

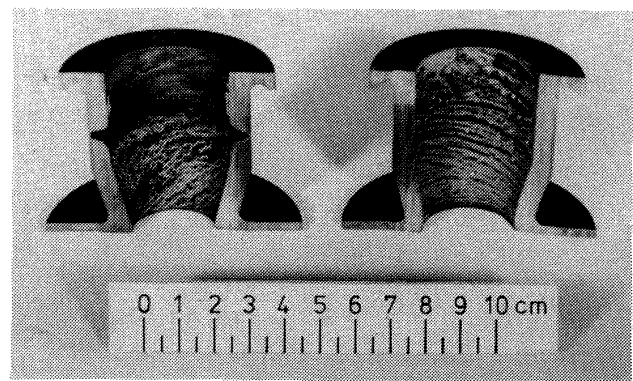
アーク加熱器は電気絶縁破壊特性が良いアルゴンガスで起動された後、作動ガスに切換え運転を行う。起動は両電極間に約1,000Vの直流電圧を加えることにより行われる。もし起動しない場合には、高周波起動装置により起動セグメントと陰極との間に高電圧高周波を重畳して起動を行う。

作動ガスは、ガスの均一加熱を行うためガス導入孔の4個のオリフィスから、アーク加熱器の中心に螺旋状に回転するように導入される。アーク加熱器に供給される作動ガスの空気と窒素は、温度、圧力、差圧が検出され、各々変換器を経て制御盤上のガス

流量計算器により実用単位で表示される。用いたガス流量計算器は、TEJAS製のMODEL-790である。



(a) 使用前



(b) 使用後

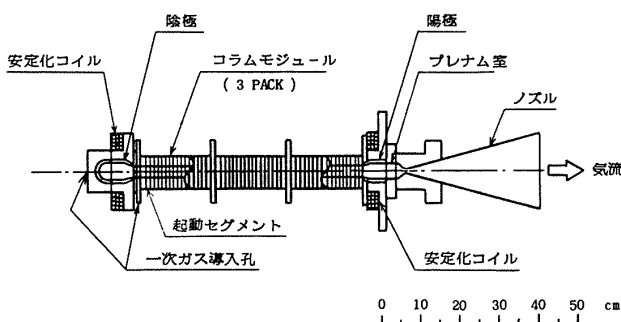
図4 アーク加熱器の電極
(左側が陰極, 右側が陽極)

図3 アーク加熱器構造図

測定は、ガス流量、アーク電圧、アーク電流、冷却水温度差、冷却水流量、冷却水圧力、ブレンラム室・ノズル冷却水温度差、ブレンラム室圧力など3分間計測し、これらのうち定常状態に達した約2分間のデータを演算処理し、アーク加熱器を評価するため、エンタルピ h 及び h_b 、効率 η 及び η_b などの算出を行った。これらのデータ取得処理⁵⁾は、データ処理装置を使用した。

データから全エンタルピ h を求めるには、アーク加熱器への入力電力 P から全損失量 ξ を差引いて求めた。アーク加熱器のコラム・電極エンタルピ h_b は、全損失量 ξ からブレンラム室とノズルでの熱損失量 ξ_{lnp} を差引いた損失量を、入力電力 P から差引いて求めた。

これらの項目は、次式で定義される。

$$P = \frac{VI}{1,000} \quad [\text{kW}]$$

$$\xi = 4.186 \times C_p \times \dot{m}_w \times DT \quad [\text{kW}]$$

$$h = \frac{P - \xi}{\dot{m}} \quad [\text{MJ/kg}]$$

$$\eta = \left(1 - \frac{\xi}{P}\right) \times 100 \quad [\%]$$

$$\xi_{lnp} = 4.186 \times C_p \times \dot{m}_{wn} \times DT_n \quad [\text{kW}]$$

$$h_b = \frac{P - (\xi - \xi_{lnb})}{\dot{m}} \quad [\text{MJ/kg}]$$

$$\eta_b = \left(1 - \frac{\xi - \xi_{lnb}}{P}\right) \times 100 \quad [\%]$$

但し、ブレンラム室・ノズル冷却水流量 \dot{m}_{wn} と全冷却水流量 \dot{m}_w との関係は、 $A = \frac{\dot{m}_{wn}}{\dot{m}_w}$ とすると、

$$A = 0.259 + 8.160 \times 10^{-4} \frac{P_w}{0.0981} \quad (1 \text{ pack})$$

$$= 0.222 + 1.514 \times 10^{-4} \frac{P_w}{0.0981} \quad (2 \text{ pack})$$

$$= 0.184 + 4.783 \times 10^{-4} \frac{P_w}{0.0981} \quad (3 \text{ pack})$$

である。但し P_w は、冷却水圧力(MPa)である。

特性試験は、エンタルピへの影響を避けるために、アーク加熱器への冷却水流量及び圧力の値は、それ

ぞれ常に13.3 kg/s 及び1.86 MPa に、冷却水導電率は、33 $\mu\text{S/cm}$ 以下に、アークの足を回転させるための、コイル安定化電流は、一定値400 Aに保持して行った。

4. 試験結果と考察

特性試験の測定は、アーク電流、ガス流量、電極間隔及びノズルスロート直径の4つのパラメータを、作動ガスが空気、窒素の場合について、それぞれ下記に記す値で行った。

作動ガス	空気, 窒素
ノズルスロート直径	4 mm ϕ (空気のみ), 5 mm ϕ
電極間隔	1, 2, 3 pack (1 pack \approx 18 cm)
ガス流量	2, 3, 4, 5, 6 g/s
アーク電流	200, 300, 400, 500, 600 A

特性試験の1 RUNでは、一定ガス流量において、アーク電流を200~600 Aの範囲で変化させて測定を行い、次にガス流量を変化させ、これらを数回繰返し表2に示すように行った。

以上のパラメータによる特性試験結果をデータ処理装置により図形化処理し、図5~図17に示す。これらの一覧表を表3に示す。但し、データ上の線は目視により描いたものである。図5~14の図番上の添字 a , b , c は電極間隔がそれぞれ1, 2, 3パックを示す。(1), (2), (3)の添字の(1)は、作動ガスが空気、 D^* が4 mm ϕ を、(2)は作動ガスが空気、 D^* が5 mm ϕ を、(3)は、作動ガスが窒素、 D^* が5 mm ϕ を示す。

4-1. 電流-電圧特性

図5-(1)~(3)は、電極間隔及びガス流量をパラメータとした電流-電圧特性を示す。同一ガス流量においては、アーク電流の増加に伴いアーク電圧は減少する。小電流においてこの傾向は著しいが、大電流では定電圧性を示す。同一ノズルスロートでは、作動ガスが窒素の方が空気よりもアーク電圧が高いことが示されるが、ガス流量が減少するとこの傾向は、はっきりしなくなる。一定電流において、アーク電圧は電極間隔及びガス流量の増加に伴い増大す

表2 特性試験のパラメータ

作 動 ガ ス	空 気						窒 素		
ノズルスロート直径	4			5			5		
パ ッ ク 数	1	2	3	1	2	3	1	2	3
$\dot{m} = 2 \text{ g/s}$	#82	#91	#102	#74	#81	#93	#76	#78	#97
$\dot{m} = 3 \text{ g/s}$	#82	#88	#102	#73	#81	#93	#76	#78	#97
$\dot{m} = 4 \text{ g/s}$	#83	#88	#103	#73	#81	#95	#77	#78	#98
$\dot{m} = 5 \text{ g/s}$	#83	#89	#103	#74	#80	#95	#77	#79	#99
$\dot{m} = 6 \text{ g/s}$	#83	#90	#104	#75	#80	#94	#77	#79	#100

: 実験番号 (RUN)

る。しかし電流の小さいところでは、あまり明瞭でない。これにより、同一電流において入力電力を増大させるためには、電極間隔を長くするか、ガス流量を多くすれば良いことが分る。

4-2. 入力電力-熱損失特性

入力電力-コラム・電極損失特性、入力電力-ブレンナム室・ノズル損失特性をそれぞれ図6-(1)~(3)、図7-(1)~3に示す。この結果から、入力電力の増加に伴いコラム・電極損失は顕著に増大し、ブレンナム室・ノズル損失は減少することが分る。同一入力電力では、ガス流量の増加に伴いコラム・電極損失は減少し、ブレンナム室・ノズル損失は増大している。コラム・電極損失は主として熱放射により、ブレンナム室・ノズル損失は熱伝導によるものと思われる。コラム電極損失は電極間隔を長くすると、アーク加熱器内壁面積が増大するため熱放射は増加し損失は増大する。コラム・電極損失、ブレンナム室・ノズル損失は、それぞれ入力電力の約50~90%、3~10%である。

4-3. 入力電力-効率特性

入力電力-全効率特性、入力電力-コラム・電極効率特性をそれぞれ図8-(1)~(3)、図9-(1)~(3)に示す。アーク加熱器の効率は、入力電力の増加に伴い顕著に減少する。これは入力電力の増加によりアーク加熱器内壁への熱放射が上昇し、熱損失が増大するためと考えられる。同一入力電力に対する効率は、ガス流量の増加により増大する。またノズルスロート直径を大きくした方が効率が良いことが示される。

4-4. 入力電力-エンタルピ特性

入力電力-全エンタルピ特性、入力電力-コラム・電極特性をそれぞれ図10-(1)~(3)、図11-(1)~(3)に示す。同一ガス流量においては、入力電力の増加に伴いエンタルピは著しく増大する。ガス流量が少ないほどエンタルピの増加の割合が大きい。電極間隔は長いほど電力を入力することが出来るが、3パックでは入力電力の増加分以上に熱損失量が増大するためエンタルピは他のパックに比べ小さな値を示す。同一作動ガスでは、ノズルスロート直径が大きいほど入力電力の増加に伴い、エンタルピの増加の割合が大きくなることが示される。作動ガス窒素は空気よりエンタルピが高いことが示される。これは電流-電圧特性において窒素の方が放電電圧が高いことと、入力電力-効率特性において窒素の方が効率が良いことによるものと思われる。

いずれの場合でも最大エンタルピは、ガス流量2 g/s、電極間隔2パックで得られていることが示される。

全エンタルピとコラム・電極エンタルピは、後者の方がブレンナム室・ノズル熱損失分を取除いた量だけエンタルピは大きな値を示している。しかし入力電力-コラム・電極効率特性が示したように、入力電力の増加に伴い効率は減少するためコラム・電極エンタルピの増加の割合は鈍くなる。

4-5. 入力電力-ブレンナム室圧力特性

図12-(1)~(3)に入力電力-ブレンナム室圧力特性を示す。同一ガス流量では、ブレンナム室圧力は入力電力の増加に伴い増大するが、入力電力が大きな値

ではプレナム室圧力は飽和していく傾向を示す。プレナム室圧力は、電極間隔の長さ及び作動ガスの種類によってあまり差異はみられないが、ノズルスロート直径の減少及びガス流量の増加に対しては、顕著に増大している。

4-6. ガス流量-エンタルピ特性

ガス流量-全エンタルピ特性を図13-(1)~(3)に示す。同一ガス流量では、アーク電流の増加に対するエンタルピの増大は顕著である。同一電流においては、ガス流量の増加に伴いエンタルピは、減少する。

これらの結果から、耐熱防御材などの加熱試験の際、加熱条件であるエンタルピの調整は、ガス流量を変化させるよりも、アーク電流を調節した方が効果的に行えることが示される。

4-7. ガス流量-プレナム室圧力特性

図14-(1)~(3)は、ガス流量-プレナム室圧力特性を示す。同一電流では、プレナム室圧力は供給されたガス流量にほぼ比例して増加している。同一ガス流量ではアーク電流の増加に伴うプレナム室圧力増加の割合は小さい。ノズルスロート直径4mm ϕ と5mm ϕ とでは、プレナム室圧力は前者の方が約50%程大きな値を示している。このことは、大きな模型の加熱試験を行う場合、ノズルから発生させた極超高速の気流をブレイクさせないため、プレナム室圧力を大きくする必要があり、ノズルスロート直径は小さい方が有用であることを示している。

4-8. 電極間隔-諸特性

図15-(1)~(3)に、特性試験において代表的な試験結果である、アーク電流500A及びガス流量6g/sの場合の電極間隔-諸特性を示す。同一電流では、電極間隔の増加に対し、アーク電圧は直線的に増大する。これに伴い入力電力も増大する。しかし、全効率、コラム・電極効率は顕著に減少する。電極間隔の増加により入力電力が増大しても、全エンタルピ及びコラム・電極エンタルピは、必ずしも増大しない。これは、電極間隔を増加すると、アーク加熱器内壁への熱損失が増大し、入力電力と熱損失が

競合しているためである。プレナム室圧力は電極間隔の長さには、あまり影響されないことが示されている。

4-9. 入力電力-入力電力配分

縮流安定型450kWアーク加熱器へ入力した電力が熱量としてどのように配分されているかを調べた。ノズルスロート直径5mm ϕ 、作動ガスが空気、電極間隔2バック及びアーク電流600Aの場合の入力電力-入力電力配分の関係を図16に示す。

作動ガスへの入力電力配分は、入力電力が小さいほど、大きいことが示されている。また入力電力の大部分は、コラム電極の熱損失で占められていることがわかる。常用連続定格450kWの本加熱器の構造からみると、効率を向上させるためには、コラム内径を小さくし、コラム内壁への熱損失を減少させるのが有効であろう。

4-10. プレナム室圧力-エンタルピ

作動ガスが空気、電極間隔が1~3バック、ガス流量が2~6g/sでの試験結果を、ガス流量 \dot{m} と有効電力 ηP をパラメータとしたプレナム室圧力と全エンタルピの関係について図17-(1),(2)に示す。試験結果と二点鎖線で示す計算値は、ガス流量が増加するに伴い若干の差があるが、良く一致していることが分る。

これらの特性試験において、次のような作動範囲が確定した。

作動ガスが空気、ノズルスロート直径が5mm ϕ の場合、全エンタルピは約10~20MJ/kg、プレナム室圧力は約0.2~0.8MPaである。ノズルスロート直径が4mm ϕ の場合、全エンタルピは約9~18MJ/kg、プレナム室圧力は、0.3~1.2MPaである。

次に作動ガスが窒素では、ノズルスロート直径が5mm ϕ の場合、全エンタルピは約10~25MJ/kg、プレナム室圧力は、約0.2~0.8MPaである。

5. まとめ

450kWアーク加熱装置の特性試験を行い、次のことが明らかとなった。

(1) 本特性試験において最大全エンタルピは、

空気の場合約20MJ/kg、窒素の場合約25MJ/kgが得られ、所期の性能が確認された。

(2) 本アーク加熱装置は、作動ガスが空気または窒素の場合も安定に作動することが確かめられ、これにより広い範囲の極超音速領域での熱空気力学環境のシミュレーションを行うことが可能となった。

(3) 耐熱材などの加熱条件であるエンタルピの設定のための電極間隔の長さの選択は、高エンタルピの場合は2バックに、中低エンタルピの場合は1バックに組立てて行うことにより通常の試験条件をカバーできる。

(4) 直流電源接続方法によるアーク加熱器への効果は、直列接続の場合、中小電流において非常にアーク放電の安定性が良いが、大電流では、アークの足による陰極の急速な焼損により、陰極の損耗が著しい。並列接続の場合は、無効電力が多くなり屋外開閉所の過電流装置が働き連続したアーク放電は行えなかった。直並列接続の場合では、アーク電流及びアーク電圧が若干ばらつく傾向があるが、高エンタルピを得ることができる。

(5) 電極の寿命は、入力電力の増加に逆比例し、特性試験においては約3時間、実験回数は約5～6RUNであった。また電極の寿命を長くする方法としては、陰極のアークの足による溝の形成の進行を遅くすれば良い。このため安定化コイルによりアークの足を回転させると同時に、気流方向の移動も行うことが望ましい。

(6) 電極の損耗により生ずるスラグは、作動ガスとして空気を使用する場合は酸化銅が、窒素のときは純銅が主成分である。このスラグは、プレナム室圧力を検出する測定孔の目づまり、またノズルより測定室内に発生させた高エンタルピ流へのContaminationなどの悪影響を及ぼす。このスラグの発生の度合は、アーク電流が大きな値及び入力電力が大のとき著しい、これは大電流によるアークの足付近のガスが高温になるため電極の焼損が激しいためと思われる。このため冷却水流量の増大すると共に安定化電流を増加し磁場を強くして、アークの移動速度を増し、電極内面全体をアークが広がるようにすればスラグを減少させることができると考えられる。これは今後、気流の特性試験において行う予定

である。

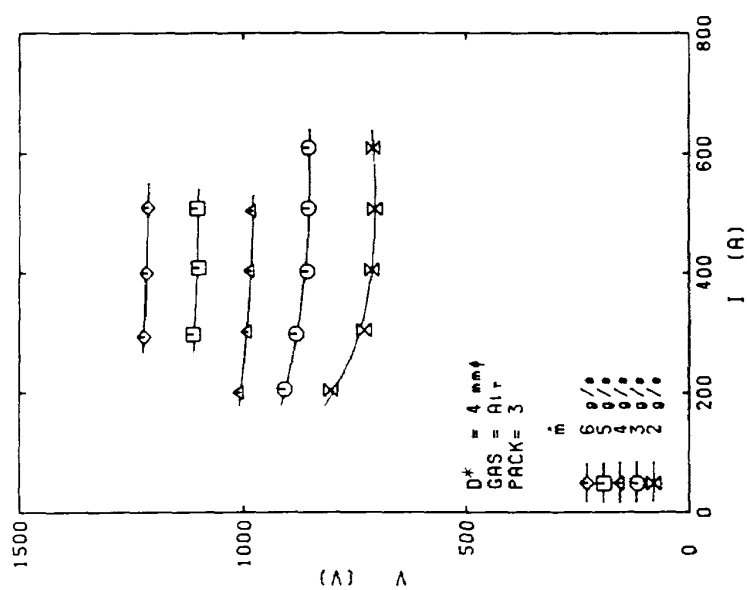
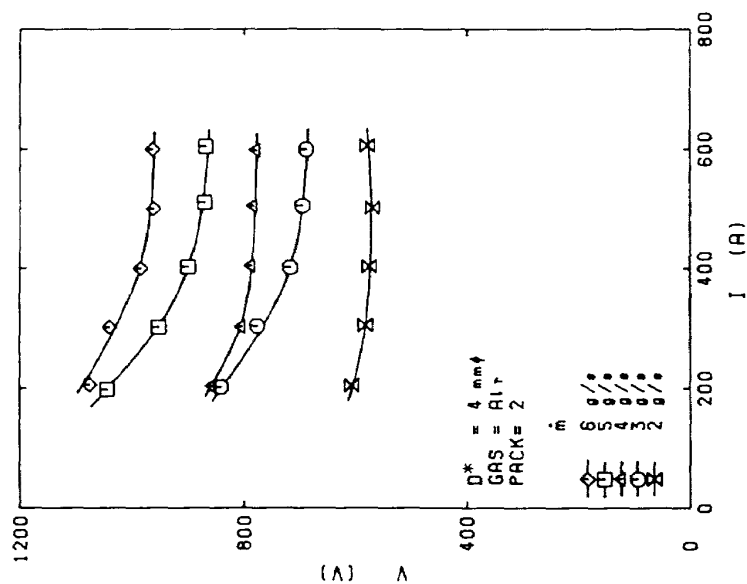
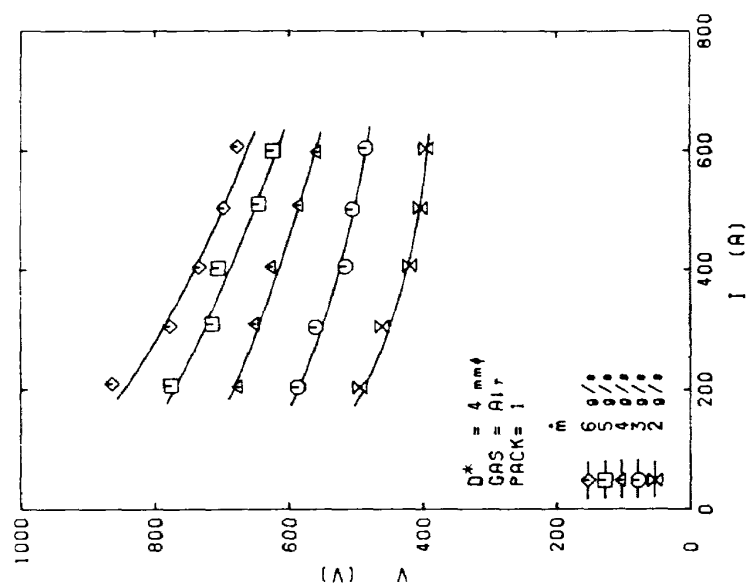
最後に、本研究の遂行にあたって、空気力学第一部松崎利一室長および野村茂昭室長に御指導をいただき、ここに深く感謝の意を表します。

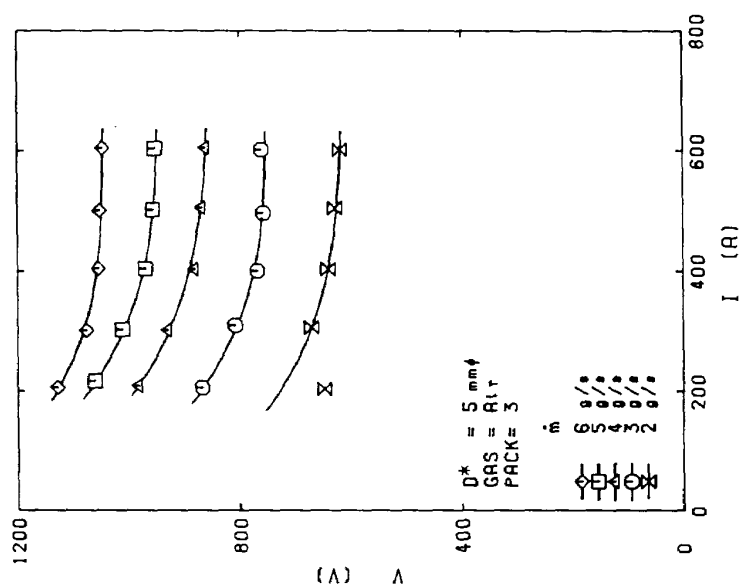
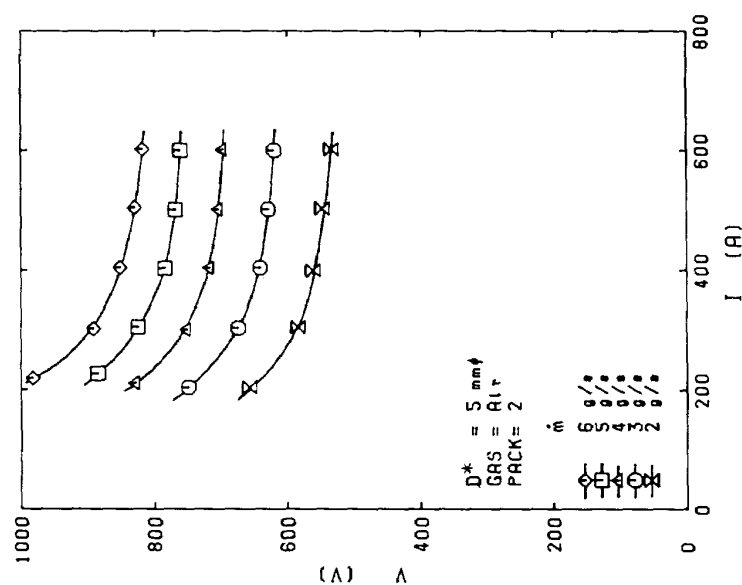
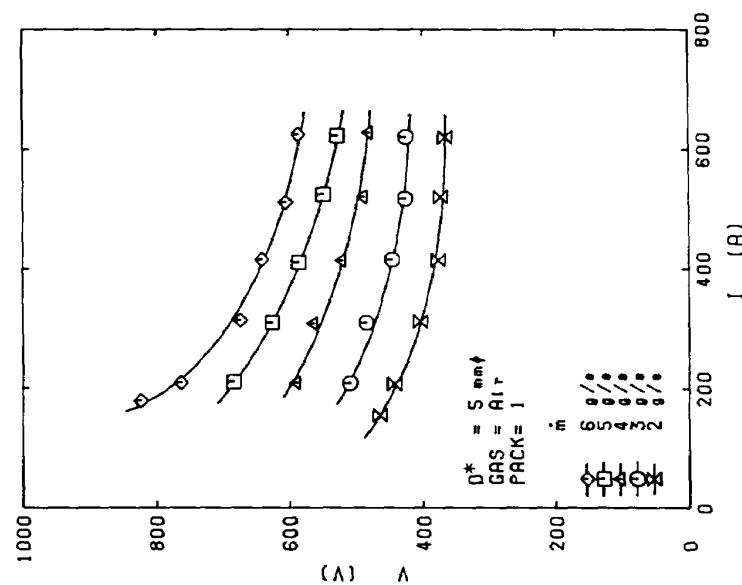
参 考 文 献

- (1) 航空宇宙技術研究所・宇宙開発事業団，共同研究成果報告書，回収技術の研究，昭和56年3月
- (2) 航空宇宙技術研究所・宇宙開発事業団，共同研究成果報告書，回収技術の研究，昭和57年6月
- (3) 航空宇宙技術研究所・宇宙開発事業団，共同研究成果報告書，回収技術の研究，昭和59年6月
- (4) 松崎利一・平林則明，“アーク加熱風洞の特性予測” 航技研資料 TM-540 1985年1月
- (5) 松崎貴至，“アーク加熱風洞データ処理ソフトウェアの開発” 航技研資料 TM-536 1984年7月
- (6) T. Foster User's Manual of 450 kW Arc Plasma Generator, Vol. 1 (1982), Acurex Co.

表 3 特性試験結果一覧

作 動 ガ ス	空						気			望			素
ノズルスロート直径	4			5			5			5			
pack	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
$I-V$	$\boxtimes 5-(1)a$	$\boxtimes 5-(1)b$	$\boxtimes 5-(1)c$	$\boxtimes 5-(2)a$	$\boxtimes 5-(2)b$	$\boxtimes 5-(2)c$	$\boxtimes 5-(3)a$	$\boxtimes 5-(3)b$	$\boxtimes 5-(3)c$	$\boxtimes 5-(3)a$	$\boxtimes 5-(3)b$	$\boxtimes 5-(3)c$	$\boxtimes 5-(3)c$
$P-\xi_c$	$\boxtimes 6-(1)a$	$\boxtimes 6-(1)b$	$\boxtimes 6-(1)c$	$\boxtimes 6-(2)a$	$\boxtimes 6-(2)b$	$\boxtimes 6-(2)c$	$\boxtimes 6-(3)a$	$\boxtimes 6-(3)b$	$\boxtimes 6-(3)c$	$\boxtimes 6-(3)a$	$\boxtimes 6-(3)b$	$\boxtimes 6-(3)c$	$\boxtimes 6-(3)c$
$P-\xi_{nb}$	$\boxtimes 7-(1)a$	$\boxtimes 7-(1)b$	$\boxtimes 7-(1)c$	$\boxtimes 7-(2)a$	$\boxtimes 7-(2)b$	$\boxtimes 7-(2)c$	$\boxtimes 7-(3)a$	$\boxtimes 7-(3)b$	$\boxtimes 7-(3)c$	$\boxtimes 7-(3)a$	$\boxtimes 7-(3)b$	$\boxtimes 7-(3)c$	$\boxtimes 7-(3)c$
$P-\eta$	$\boxtimes 8-(1)a$	$\boxtimes 8-(1)b$	$\boxtimes 8-(1)c$	$\boxtimes 8-(2)a$	$\boxtimes 8-(2)b$	$\boxtimes 8-(2)c$	$\boxtimes 8-(3)a$	$\boxtimes 8-(3)b$	$\boxtimes 8-(3)c$	$\boxtimes 8-(3)a$	$\boxtimes 8-(3)b$	$\boxtimes 8-(3)c$	$\boxtimes 8-(3)c$
$P-\eta_b$	$\boxtimes 9-(1)a$	$\boxtimes 9-(1)b$	$\boxtimes 9-(1)c$	$\boxtimes 9-(2)a$	$\boxtimes 9-(2)b$	$\boxtimes 9-(2)c$	$\boxtimes 9-(3)a$	$\boxtimes 9-(3)b$	$\boxtimes 9-(3)c$	$\boxtimes 9-(3)a$	$\boxtimes 9-(3)b$	$\boxtimes 9-(3)c$	$\boxtimes 9-(3)c$
$P-h$	$\boxtimes 10-(1)a$	$\boxtimes 10-(1)b$	$\boxtimes 10-(1)c$	$\boxtimes 10-(2)a$	$\boxtimes 10-(2)b$	$\boxtimes 10-(2)c$	$\boxtimes 10-(3)a$	$\boxtimes 10-(3)b$	$\boxtimes 10-(3)c$	$\boxtimes 10-(3)a$	$\boxtimes 10-(3)b$	$\boxtimes 10-(3)c$	$\boxtimes 10-(3)c$
$P-h_b$	$\boxtimes 11-(1)a$	$\boxtimes 11-(1)b$	$\boxtimes 11-(1)c$	$\boxtimes 11-(2)a$	$\boxtimes 11-(2)b$	$\boxtimes 11-(2)c$	$\boxtimes 11-(3)a$	$\boxtimes 11-(3)b$	$\boxtimes 11-(3)c$	$\boxtimes 11-(3)a$	$\boxtimes 11-(3)b$	$\boxtimes 11-(3)c$	$\boxtimes 11-(3)c$
$P-P_o$	$\boxtimes 12-(1)a$	$\boxtimes 12-(1)b$	$\boxtimes 12-(1)c$	$\boxtimes 12-(2)a$	$\boxtimes 12-(2)b$	$\boxtimes 12-(2)c$	$\boxtimes 12-(3)a$	$\boxtimes 12-(3)b$	$\boxtimes 12-(3)c$	$\boxtimes 12-(3)a$	$\boxtimes 12-(3)b$	$\boxtimes 12-(3)c$	$\boxtimes 12-(3)c$
$\dot{m}-h$	$\boxtimes 13-(1)a$	$\boxtimes 13-(1)b$	$\boxtimes 13-(1)c$	$\boxtimes 13-(2)a$	$\boxtimes 13-(2)b$	$\boxtimes 13-(2)c$	$\boxtimes 13-(3)a$	$\boxtimes 13-(3)b$	$\boxtimes 13-(3)c$	$\boxtimes 13-(3)a$	$\boxtimes 13-(3)b$	$\boxtimes 13-(3)c$	$\boxtimes 13-(3)c$
$\dot{m}-P_o$	$\boxtimes 14-(1)a$	$\boxtimes 14-(1)b$	$\boxtimes 14-(1)c$	$\boxtimes 14-(2)a$	$\boxtimes 14-(2)b$	$\boxtimes 14-(2)c$	$\boxtimes 14-(3)a$	$\boxtimes 14-(3)b$	$\boxtimes 14-(3)c$	$\boxtimes 14-(3)a$	$\boxtimes 14-(3)b$	$\boxtimes 14-(3)c$	$\boxtimes 14-(3)c$
$G-V, P, \eta, \eta_b, h, h_b, P_o$	$\boxtimes 15-(1)$			$\boxtimes 15-(2)$			$\boxtimes 15-(3)$			$\boxtimes 15-(3)$			
P -入力の配分				$\boxtimes 16$									
P_o-h	$\boxtimes 17-(1)$			$\boxtimes 17-(2)$									

図 5-(1) a 電流 I - 電圧 V 特性図 5-(1) b 電流 I - 電圧 V 特性図 5-(1) c 電流 I - 電圧 V 特性

図5-(2) c 電流 I - 電圧 V 特性図5-(2) b 電流 I - 電圧 V 特性図5-(2) a 電流 I - 電圧 V 特性

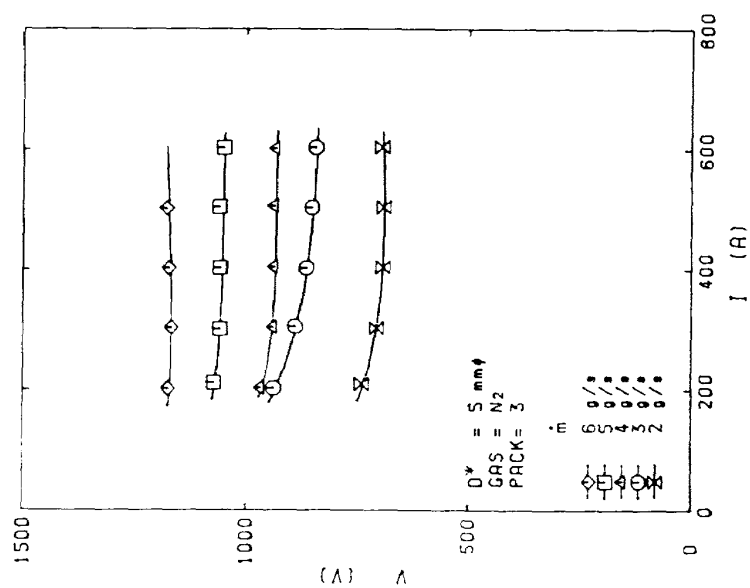


図 5-(3) a 電流 I - 電圧 V 特性

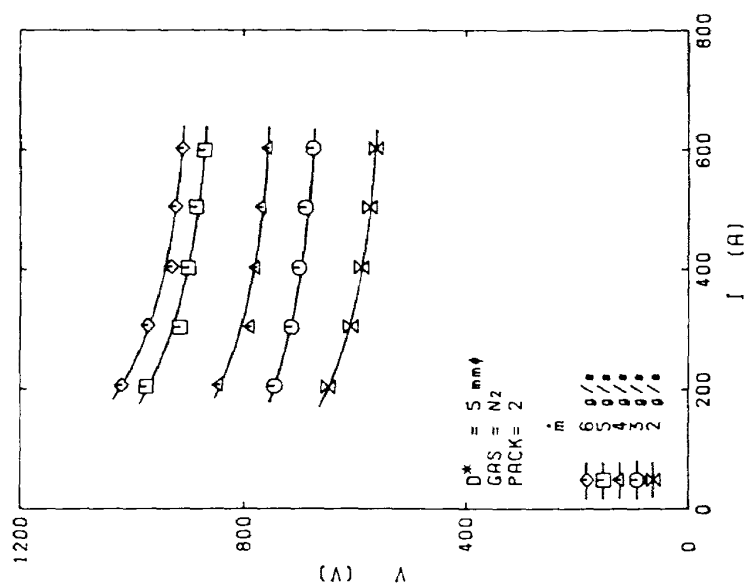


図 5-(3) b 電流 I - 電圧 V 特性

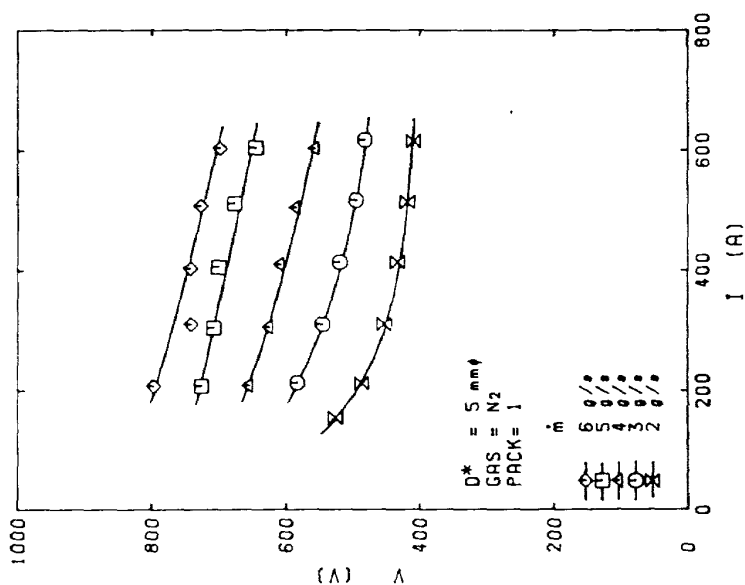


図 5-(3) c 電流 I - 電圧 V 特性

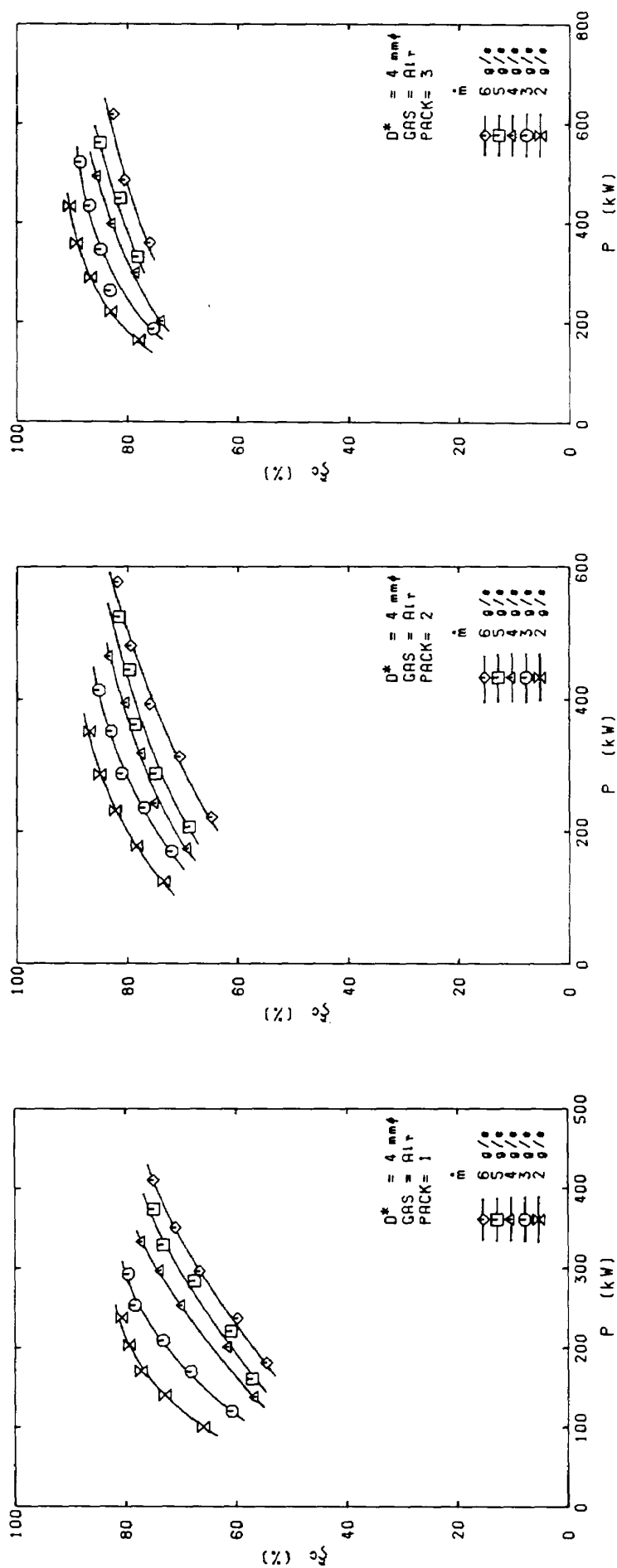


図6-1(1) a 入力電力 P —コラム
・電極損失 ξ_c 特性

図6-1(1) b 入力電力 P —コラム
・電極損失 ξ_c 特性

図6-1(1) c 入力電力 P —コラム
・電極損失 ξ_c 特性

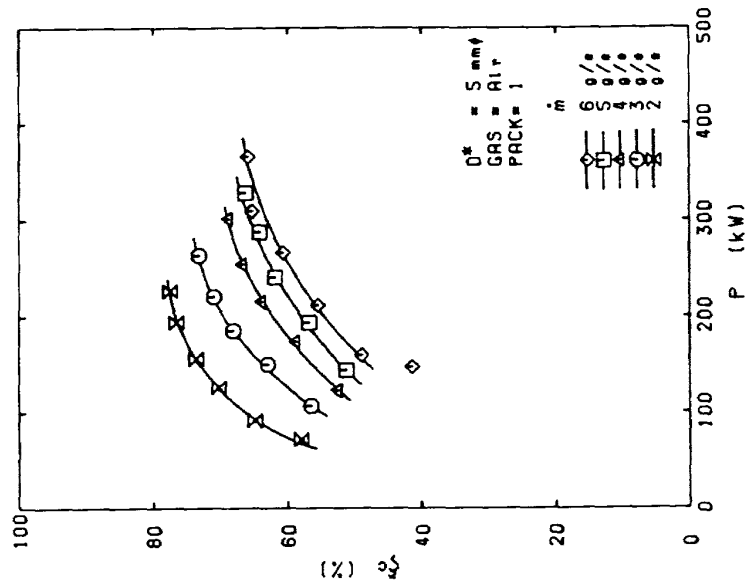


図 6-(2) a 入力電力 P - コラム
・電極損失 ξ_c 特性

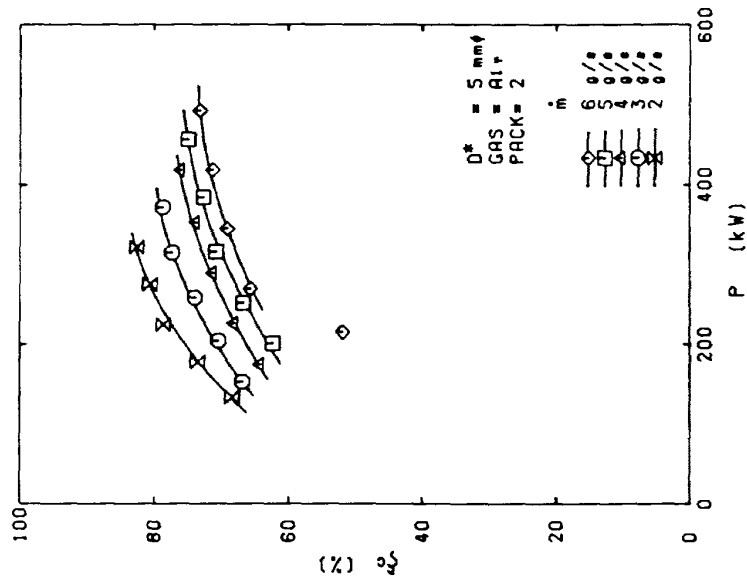


図 6-(2) b 入力電力 P - コラム
・電極損失 ξ_c 特性

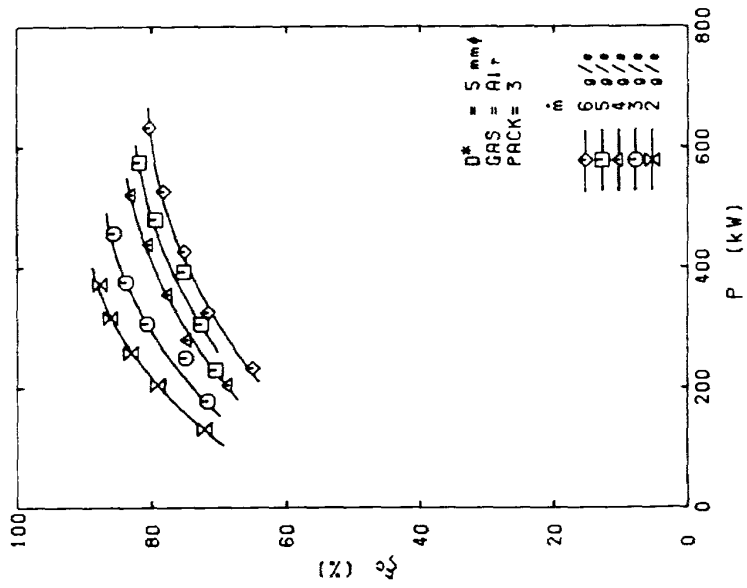


図 6-(2) c 入力電力 P - コラム
・電極損失 ξ_c 特性

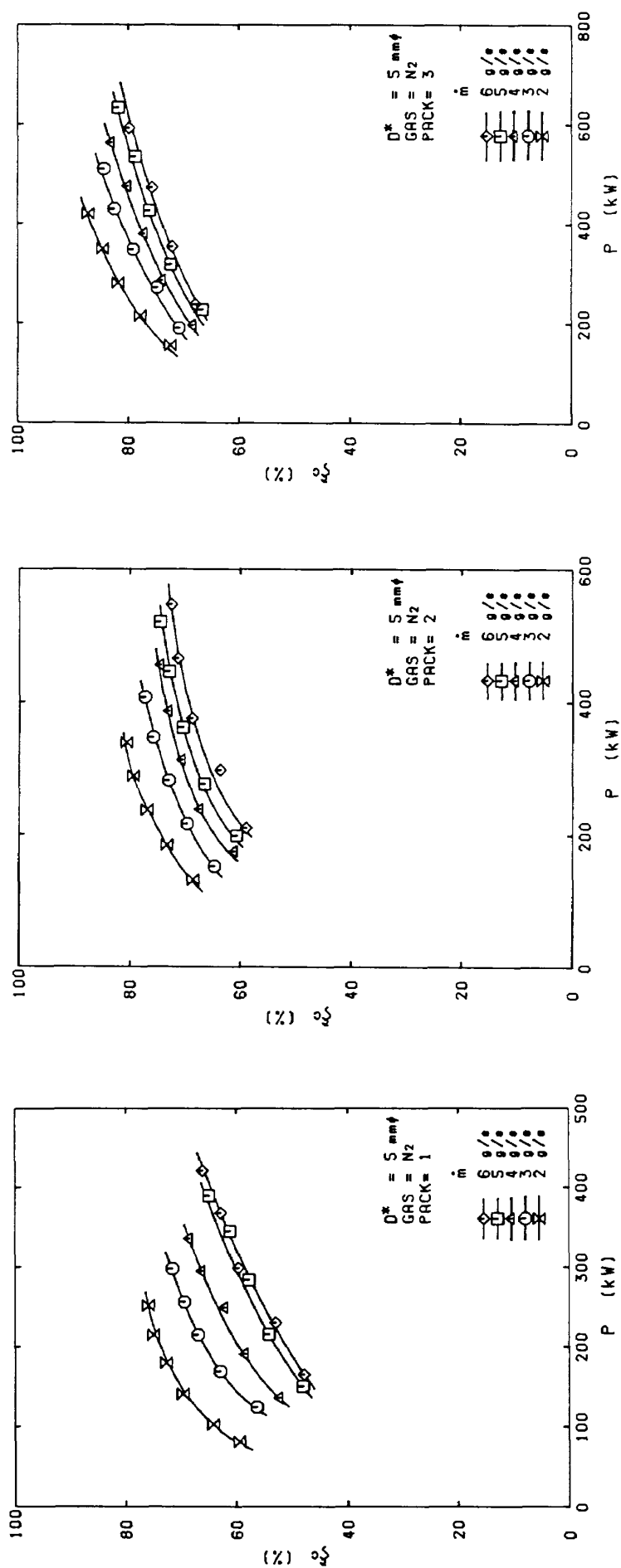


図 6-(3) a 入力電力 P -コラム
・電極損失 ξ_c 特性

図 6-(3) b 入力電力 P -コラム
・電極損失 ξ_c 特性

図 6-(3) c 入力電力 P -コラム
・電極損失 ξ_c 特性

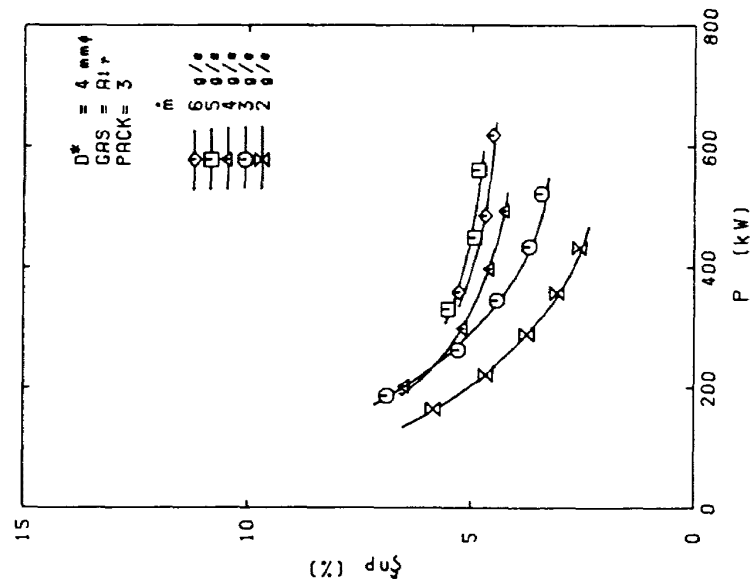


図7-(1) a 入力電力 P —プレナム室
・ノズル損失 ξ_{np} 特性

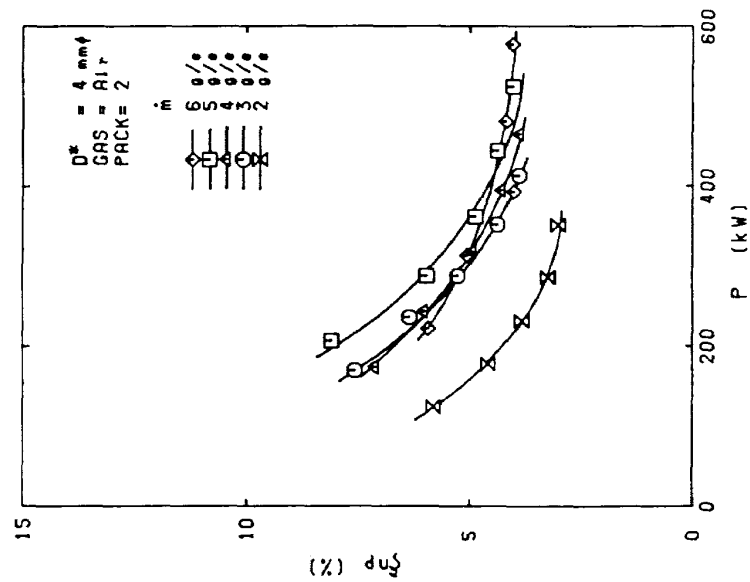


図7-(1) b 入力電力 P —プレナム室
・ノズル損失 ξ_{np} 特性

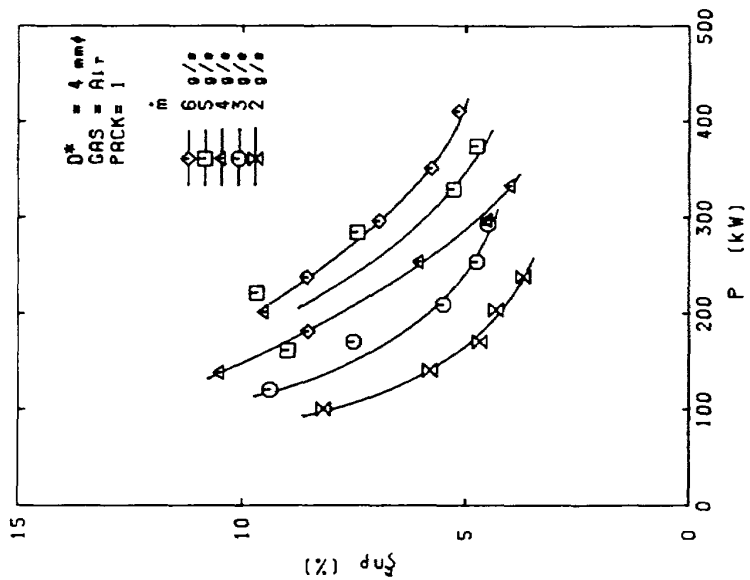


図7-(1) c 入力電力 P —プレナム室
・ノズル損失 ξ_{np} 特性

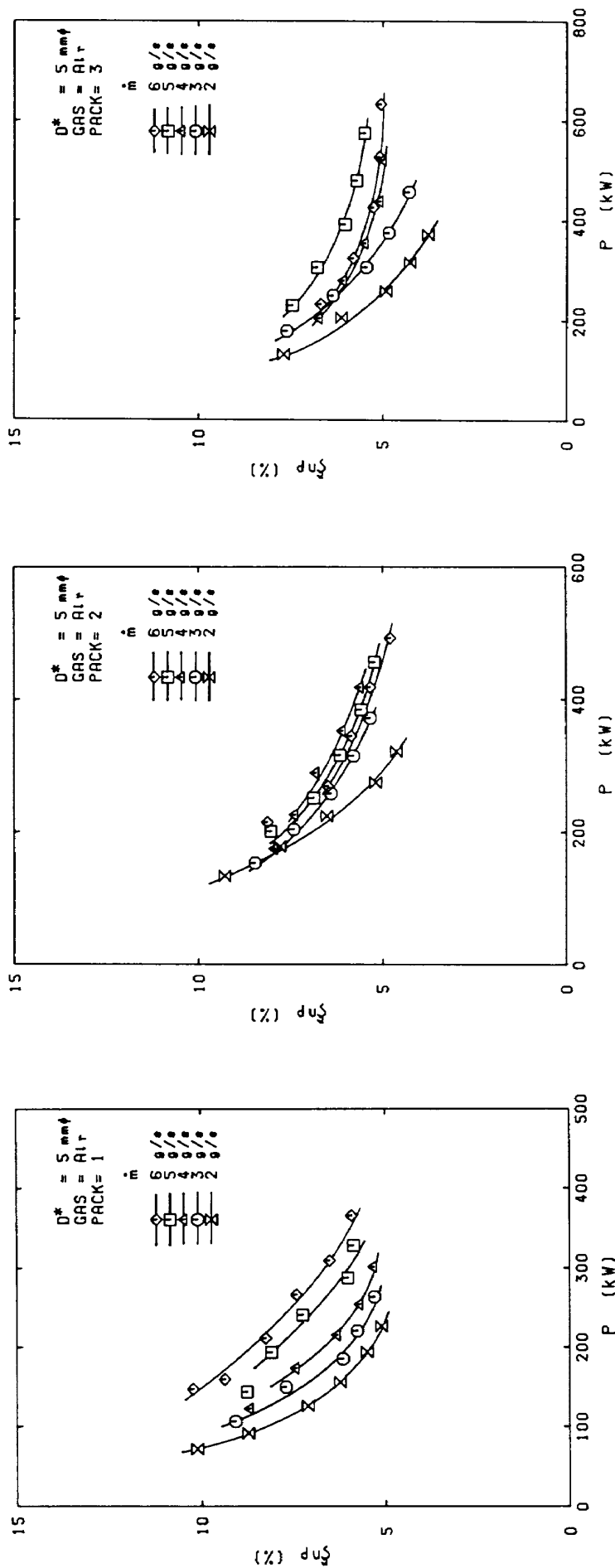
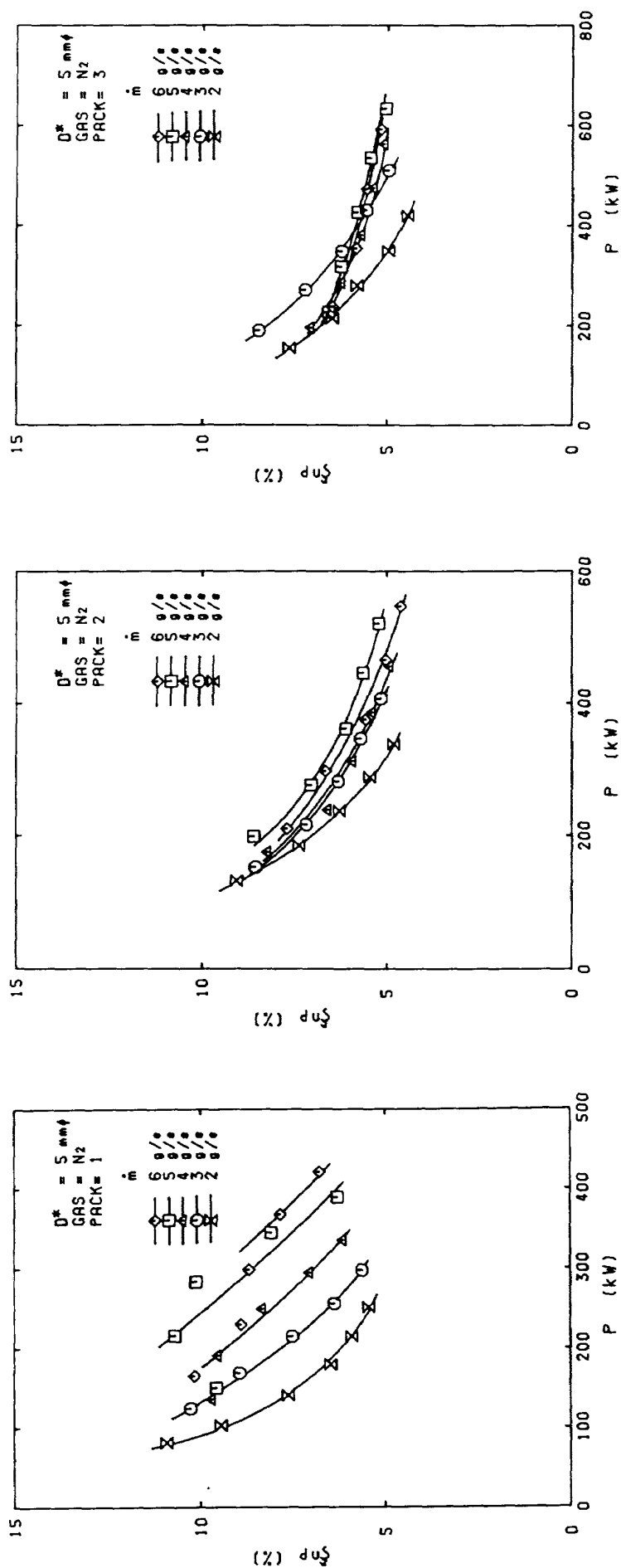


図 7-(2) a 入力電力 P —ブレンラム室
・ノズル損失 ξ_{np} 特性

図 7-(2) b 入力電力 P —ブレンラム室
・ノズル損失 ξ_{np} 特性

図 7-(2) c 入力電力 P —ブレンラム室
・ノズル損失 ξ_{np} 特性

図7-(3) a 入力電力 P - プレナム室
・ノズル損失 ξ_{np} 特性図7-(3) b 入力電力 P - プレナム室
・ノズル損失 ξ_{np} 特性図7-(3) c 入力電力 P - プレナム室
・ノズル損失 ξ_{np} 特性

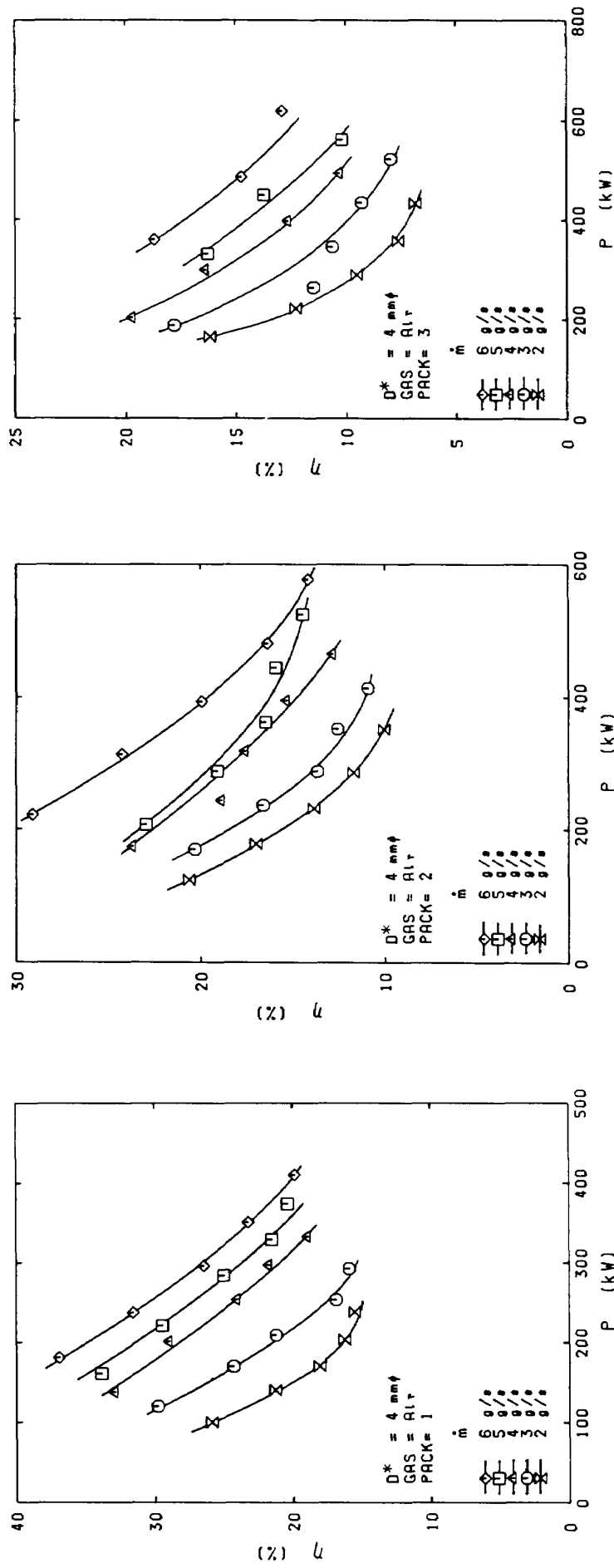


図 8-(1) c 入力電力 P - 全効率 η 特性

図 8-(1) b 入力電力 P - 全効率 η 特性

図 8-(1) a 入力電力 P - 全効率 η 特性

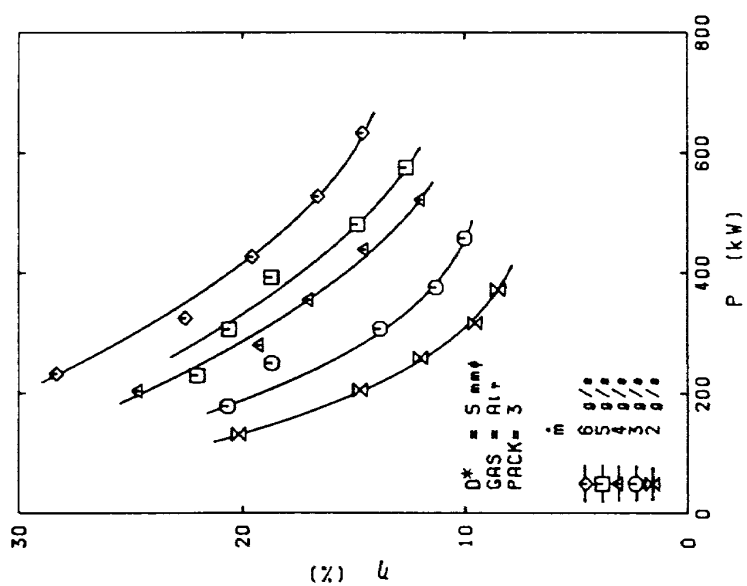


図 8-(2) a 入力電力 P - 全効率 η 特性

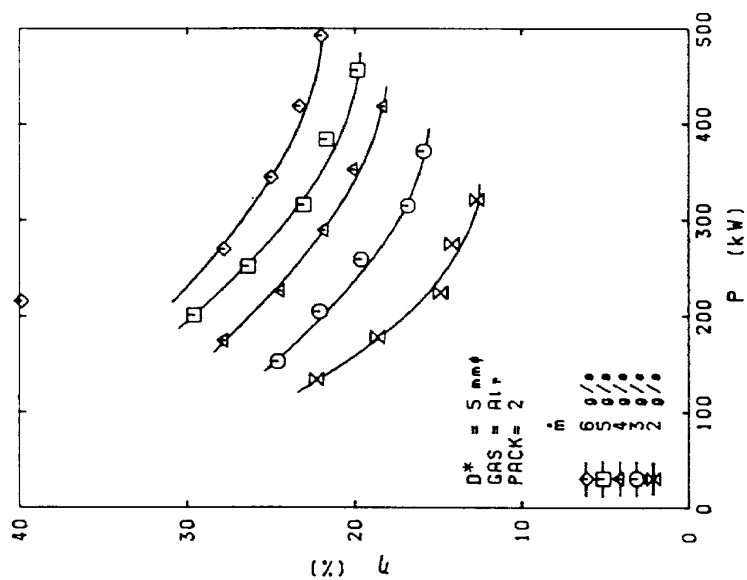


図 8-(2) b 入力電力 P - 全効率 η 特性

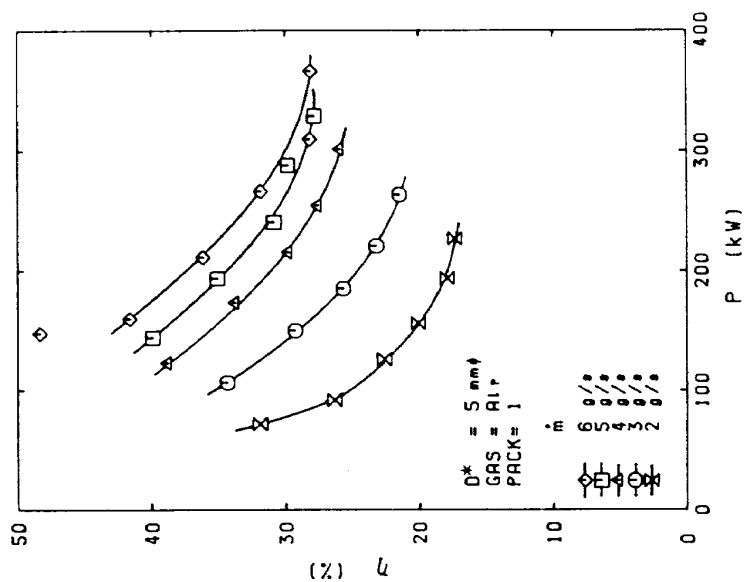


図 8-(2) c 入力電力 P - 全効率 η 特性

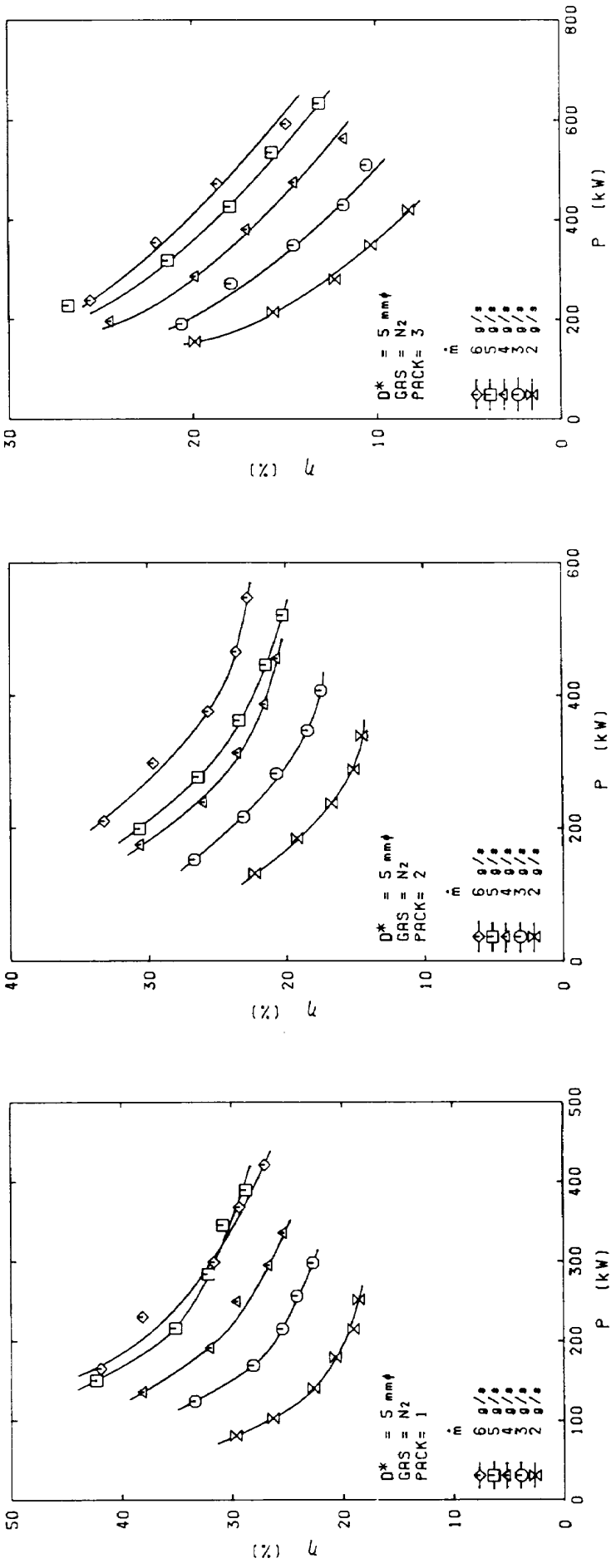


図8-(3) c 入力電力 P —全効率 η 特性

図8-(3) b 入力電力 P —全効率 η 特性

図8-(3) a 入力電力 P —全効率 η 特性

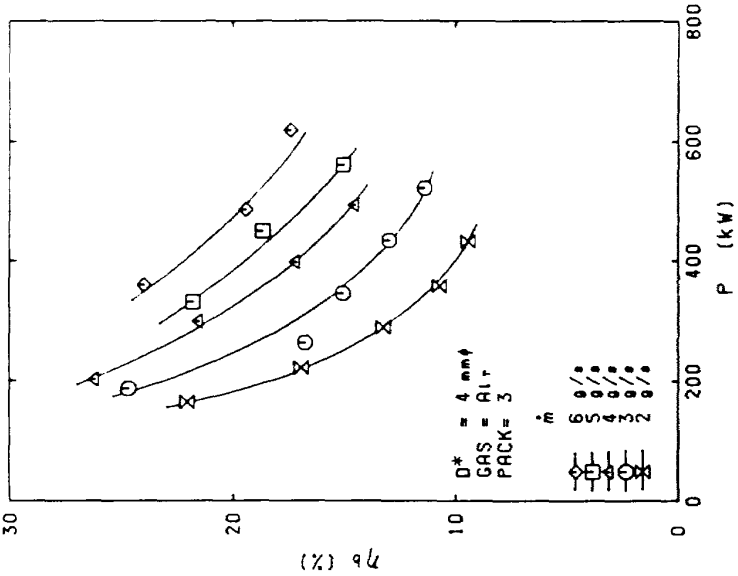


図9-(1) a 入力電力 P —コラム
• 電極効率 η_b 特性

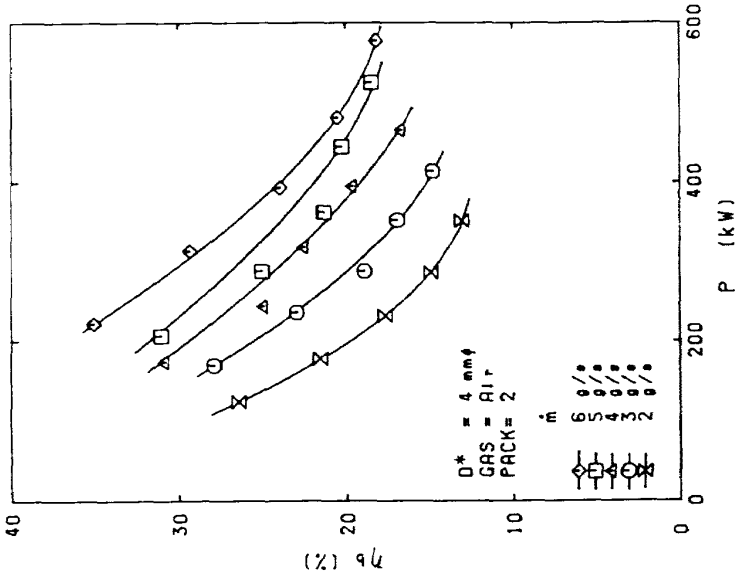


図9-(1) b 入力電力 P —コラム
• 電極効率 η_b 特性

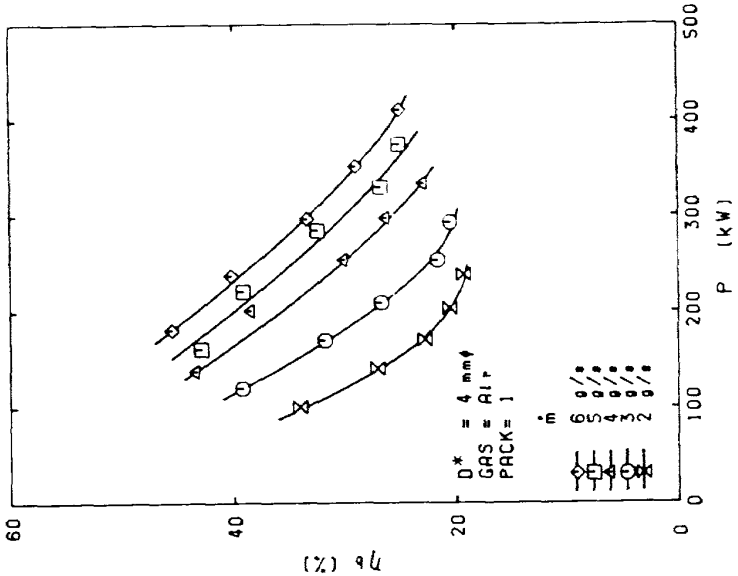


図9-(1) c 入力電力 P —コラム
• 電極効率 η_b 特性

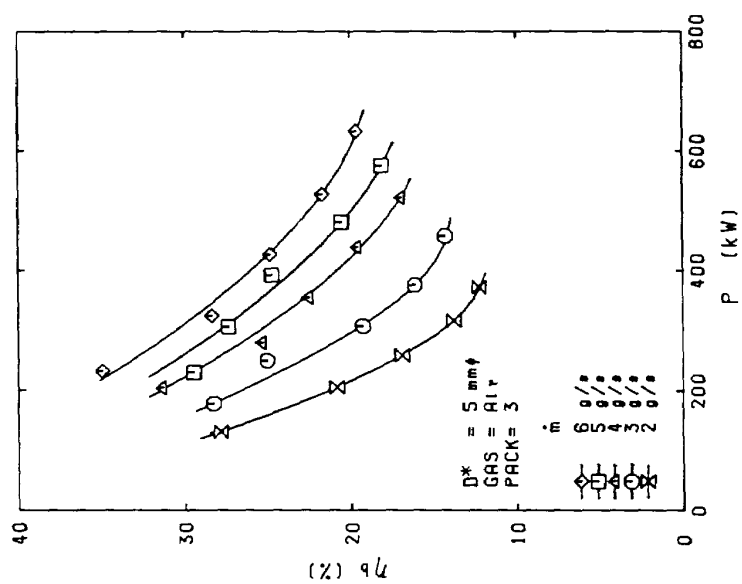


図 9-(2) c 入力電力 P —コラム
• 電極効率 η_b 特性

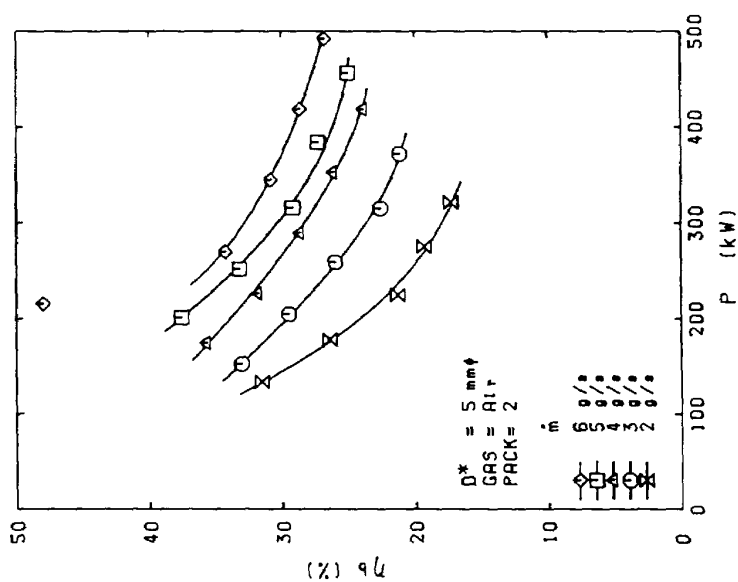


図 9-(2) b 入力電力 P —コラム
• 電極効率 η_b 特性

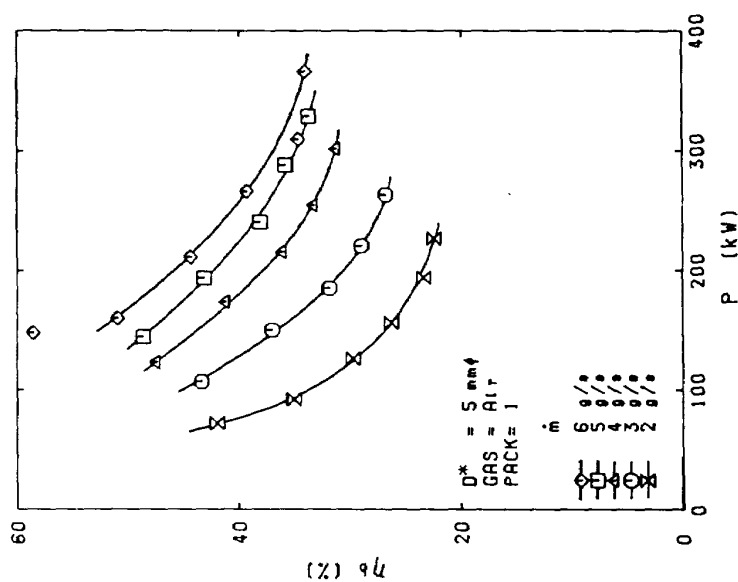


図 9-(2) a 入力電力 P —コラム
• 電極効率 η_b 特性

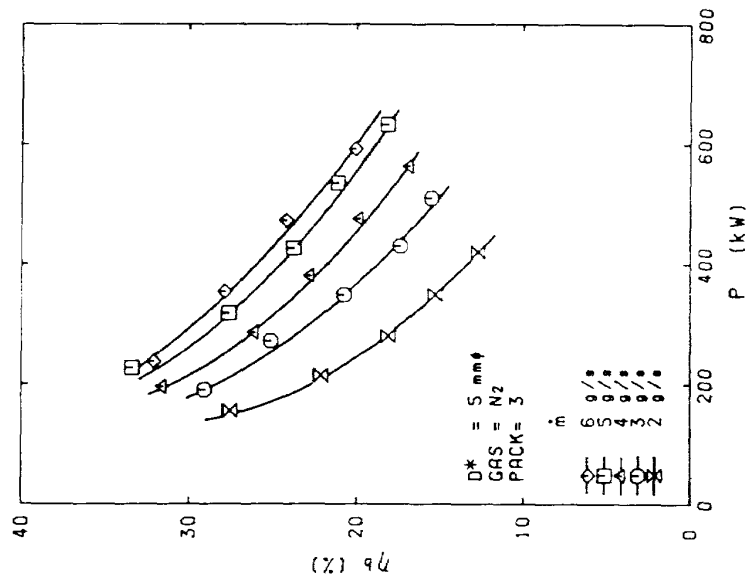


図9-(3) a 入力電力 P - コラム
• 電極効率 η_b 特性

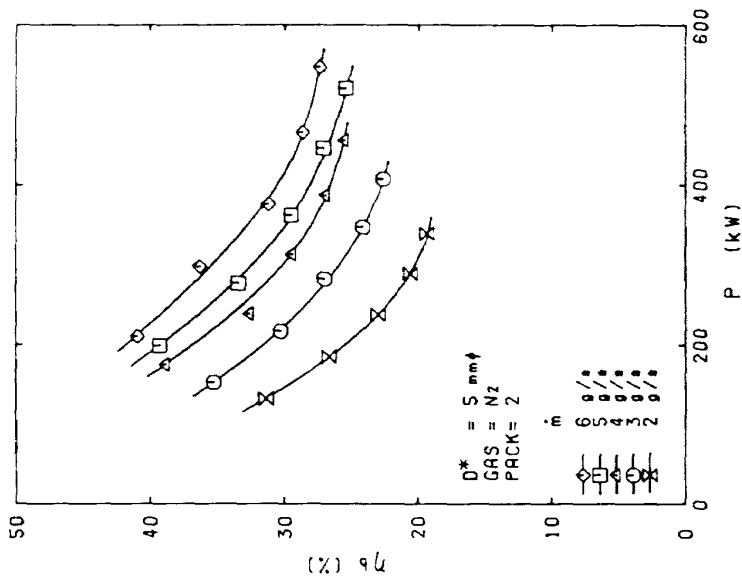


図9-(3) b 入力電力 P - コラム
• 電極効率 η_b 特性

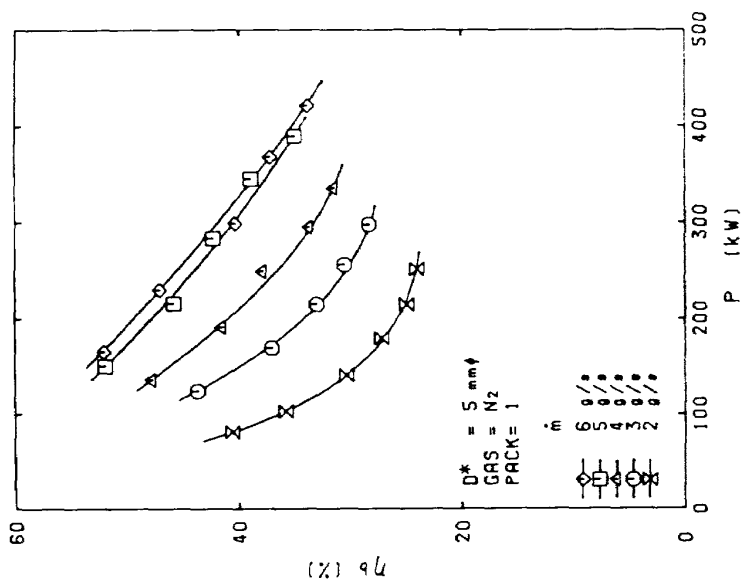


図9-(3) c 入力電力 P - コラム
• 電極効率 η_b 特性

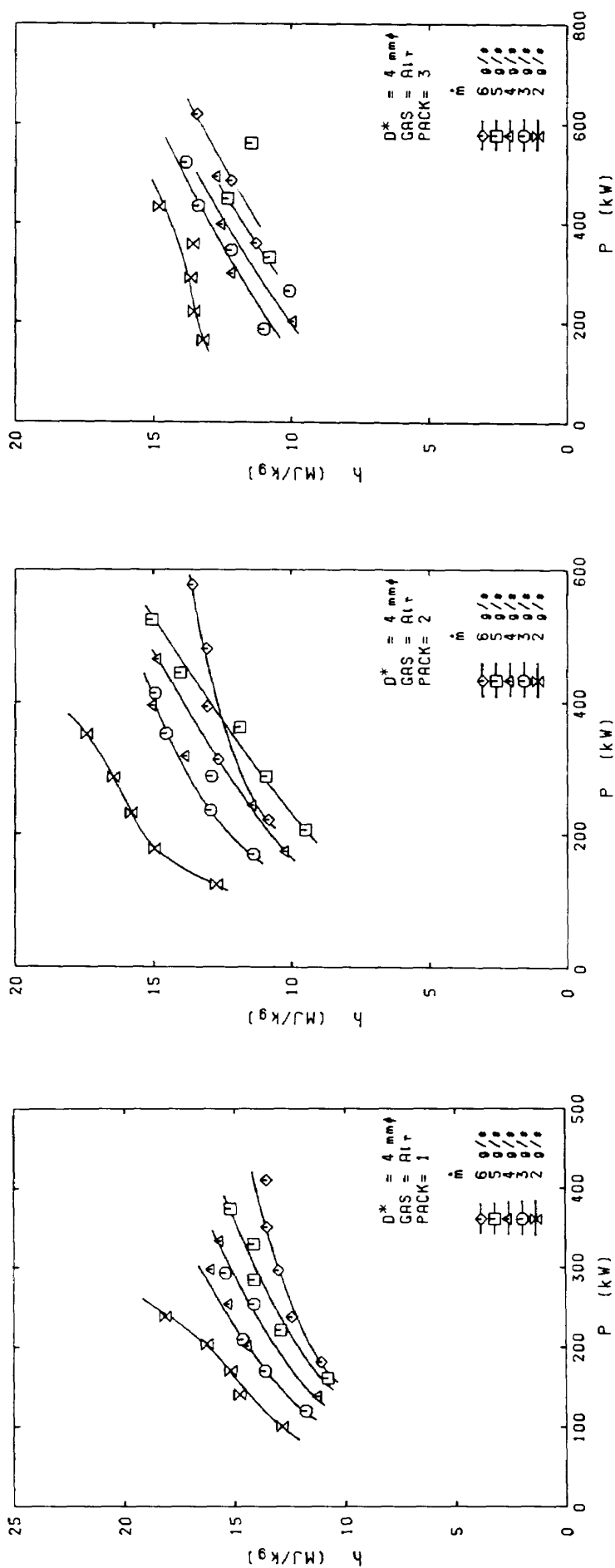


図10-(1) a 入力電力 P -全エンタ
ルビ h 特性

図10-(1) b 入力電力 P -全エンタ
ルビ h 特性

図10-(1) c 入力電力 P -全エンタ
ルビ h 特性

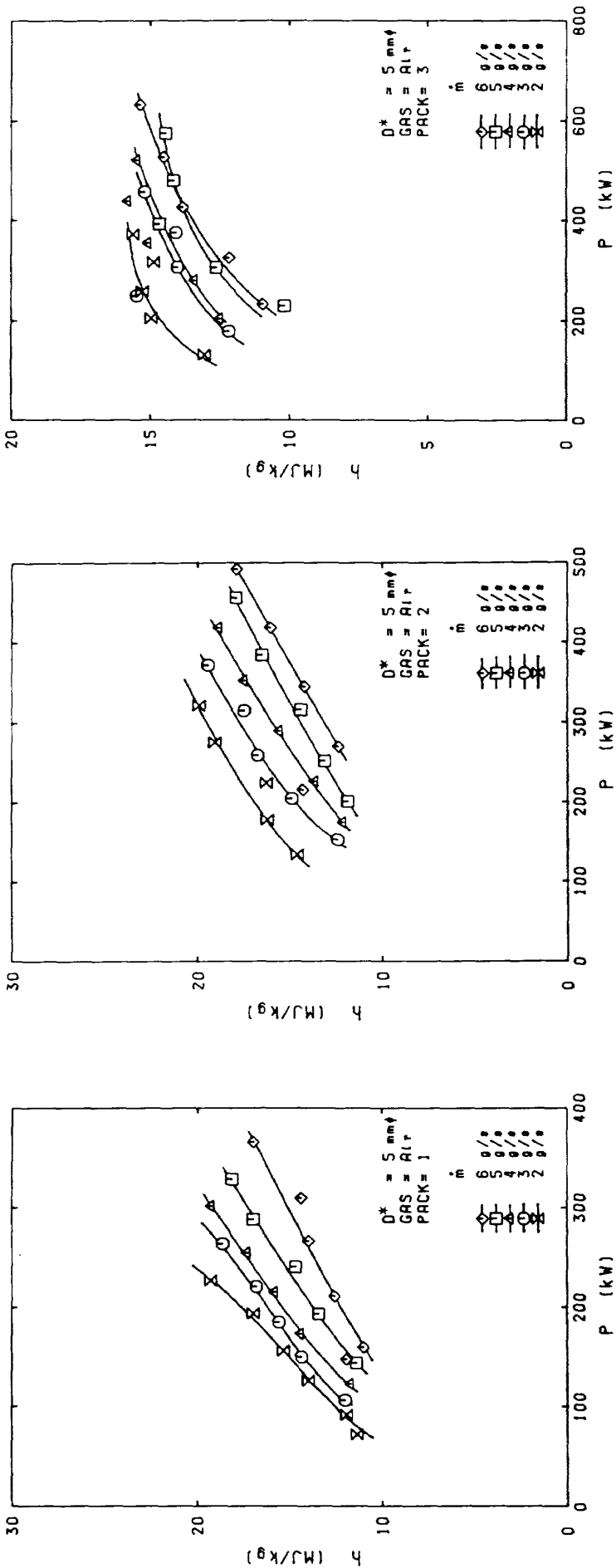


図10-(2) a 入力電力 P —全エンタ
ルピー特性

図10-(2) b 入力電力 P —全エンタ
ルピー特性

図10-(2) c 入力電力 P —全エンタ
ルピー特性

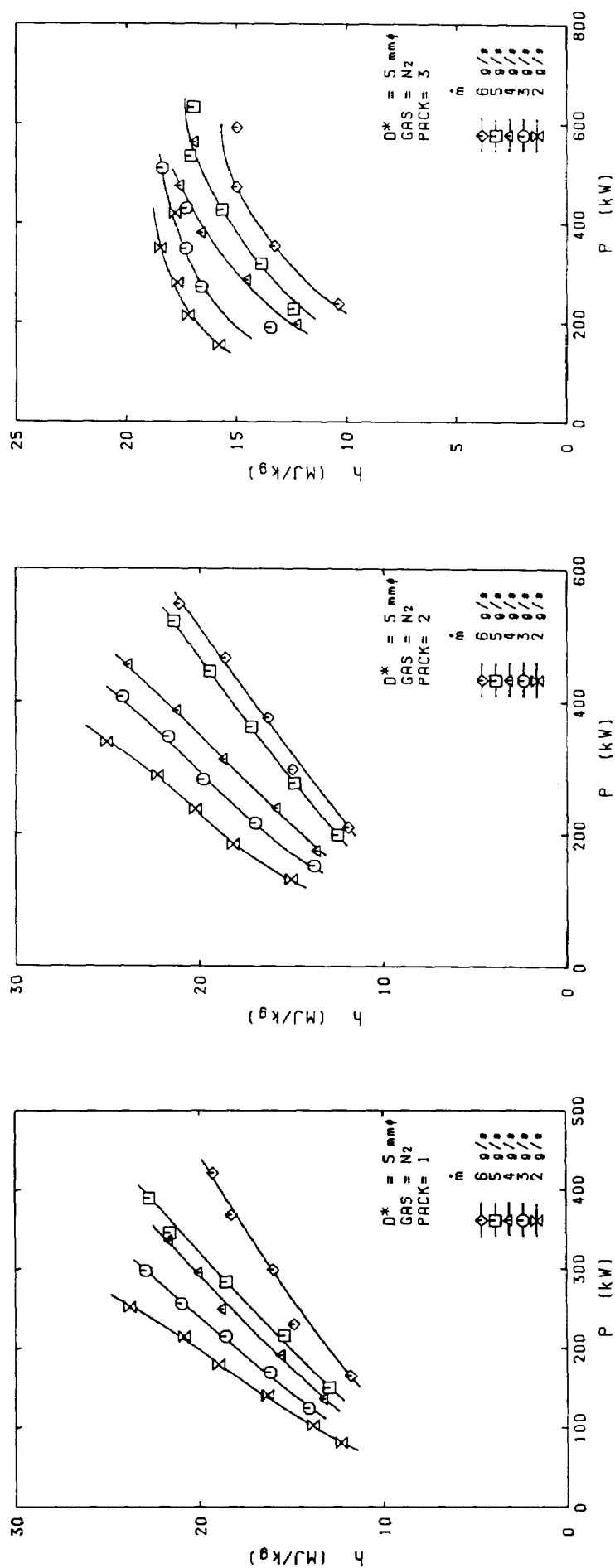


図 10-(3) a 入力電力 P -全エント
ルビン特性

図 10-(3) b 入力電力 P -全エント
ルビン特性

図 10-(3) c 入力電力 P -全エント
ルビン特性

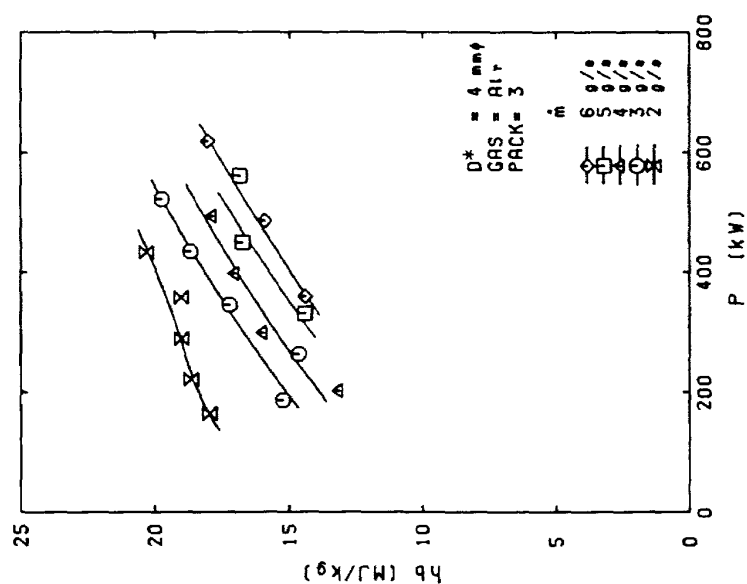


図11-(1) a 入力電力 P — h_b 特性
•電極エンタルピー h_b 特性

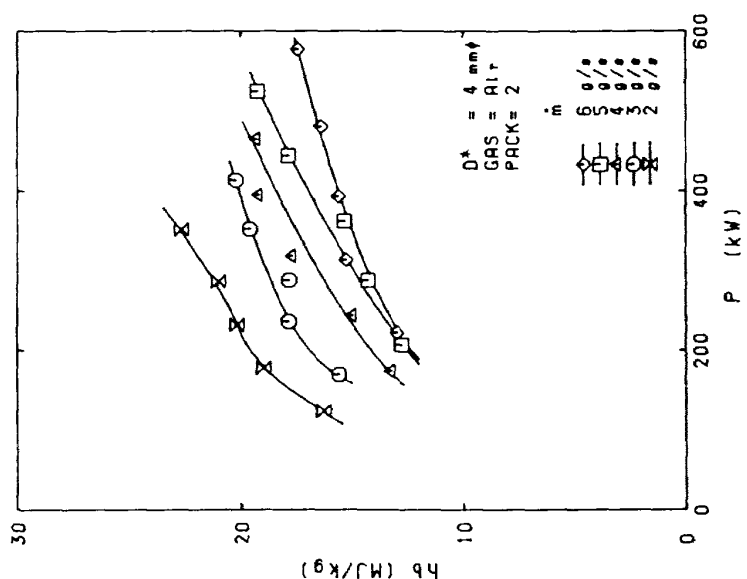


図11-(1) b 入力電力 P — h_b 特性
•電極エンタルピー h_b 特性

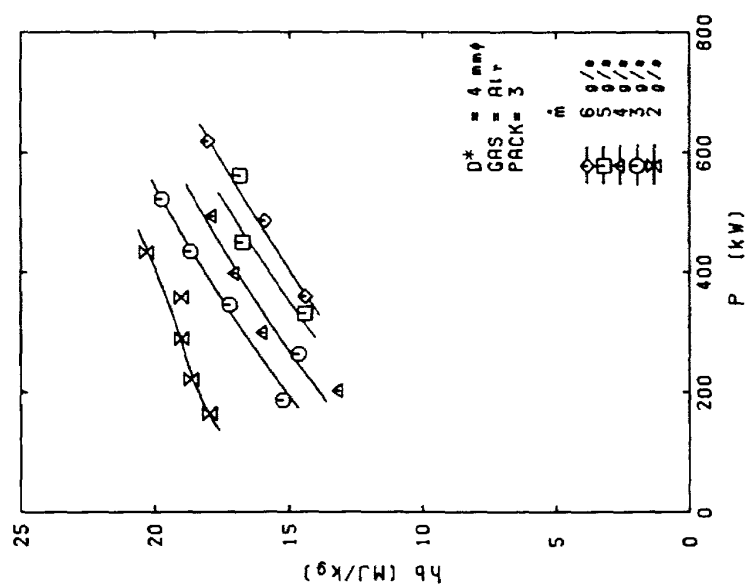


図11-(1) c 入力電力 P — h_b 特性
•電極エンタルピー h_b 特性

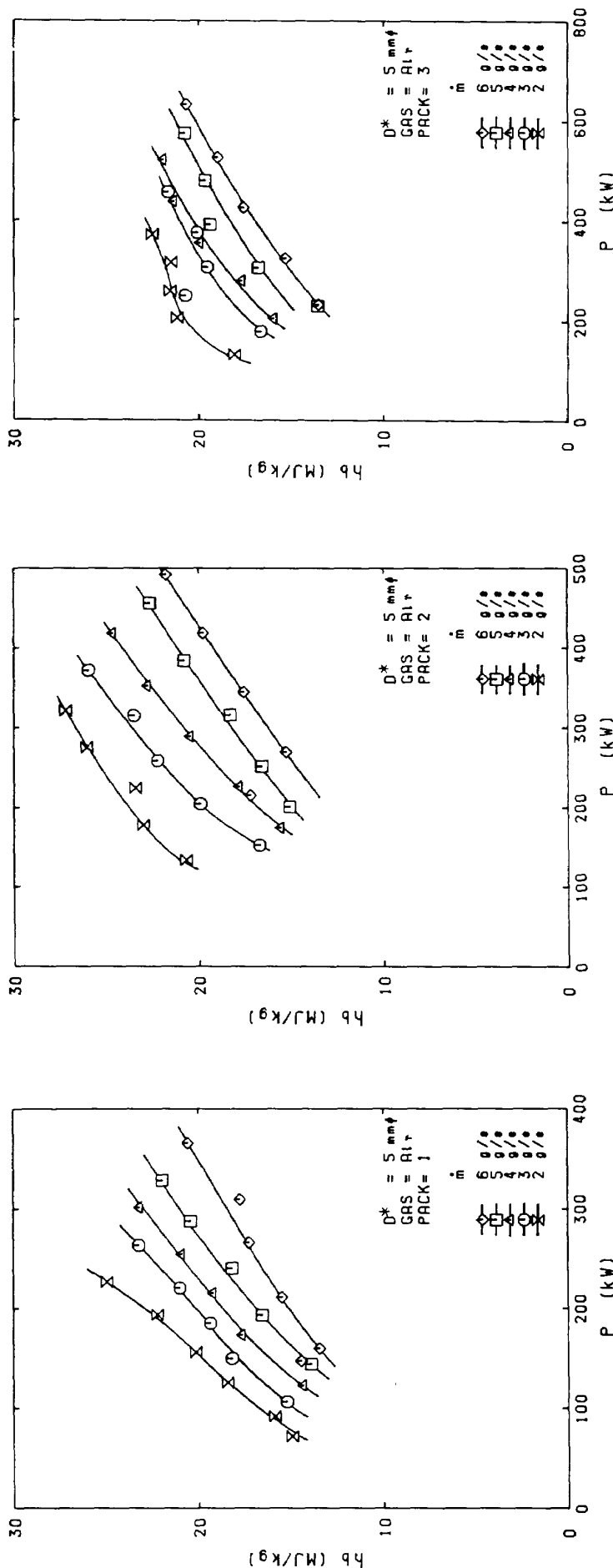


図 11-(2) a 入力電力 P — h_b コラム
• 電極エンタルピー T_b 特性

図 11-(2) b 入力電力 P — h_b コラム
• 電極エンタルピー T_b 特性

図 11-(2) c 入力電力 P — h_b コラム
• 電極エンタルピー T_b 特性

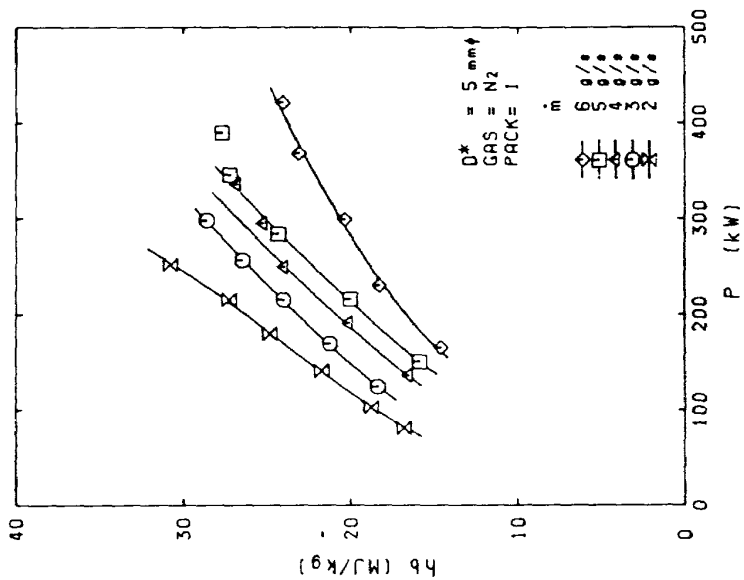


図11-(3) a 入力電力 P -コラム
・電極エンタルピー h_b 特性

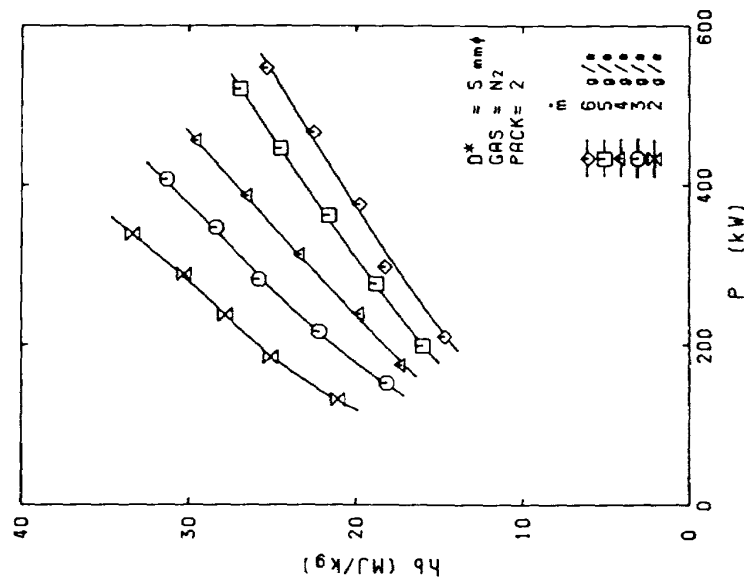


図11-(3) b 入力電力 P -コラム
・電極エンタルピー h_b 特性

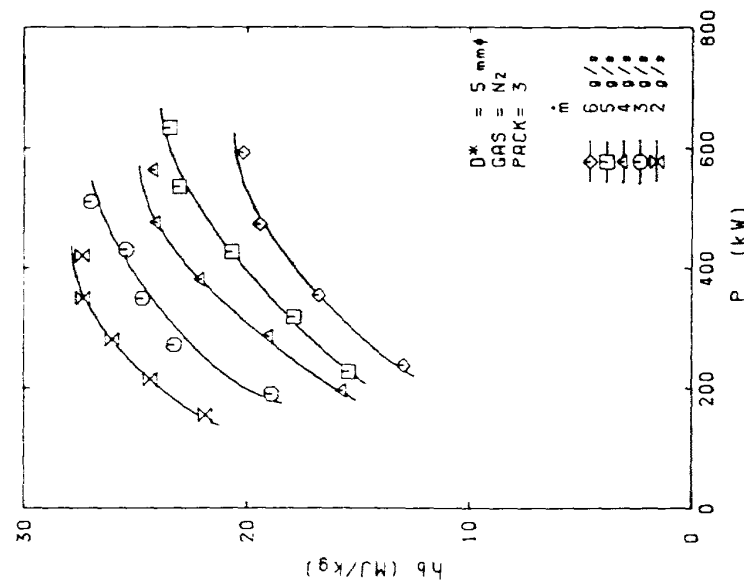


図11-(3) c 入力電力 P -コラム
・電極エンタルピー h_b 特性

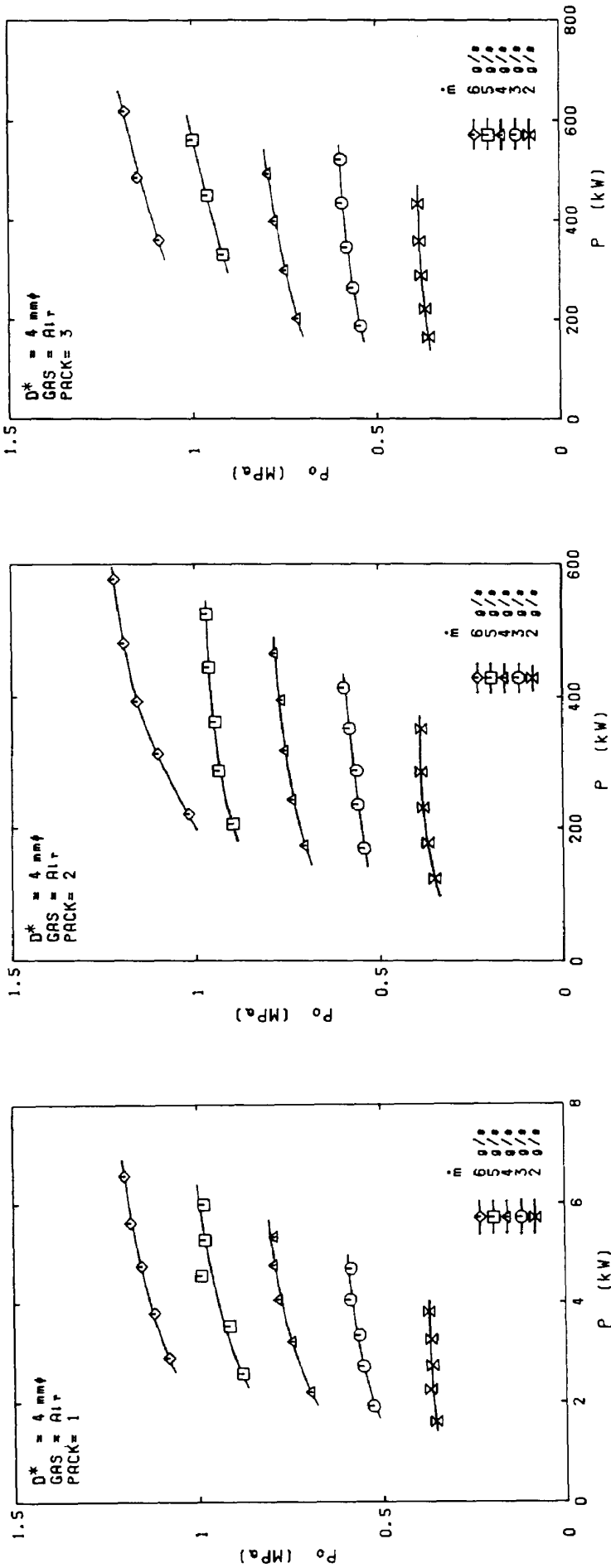
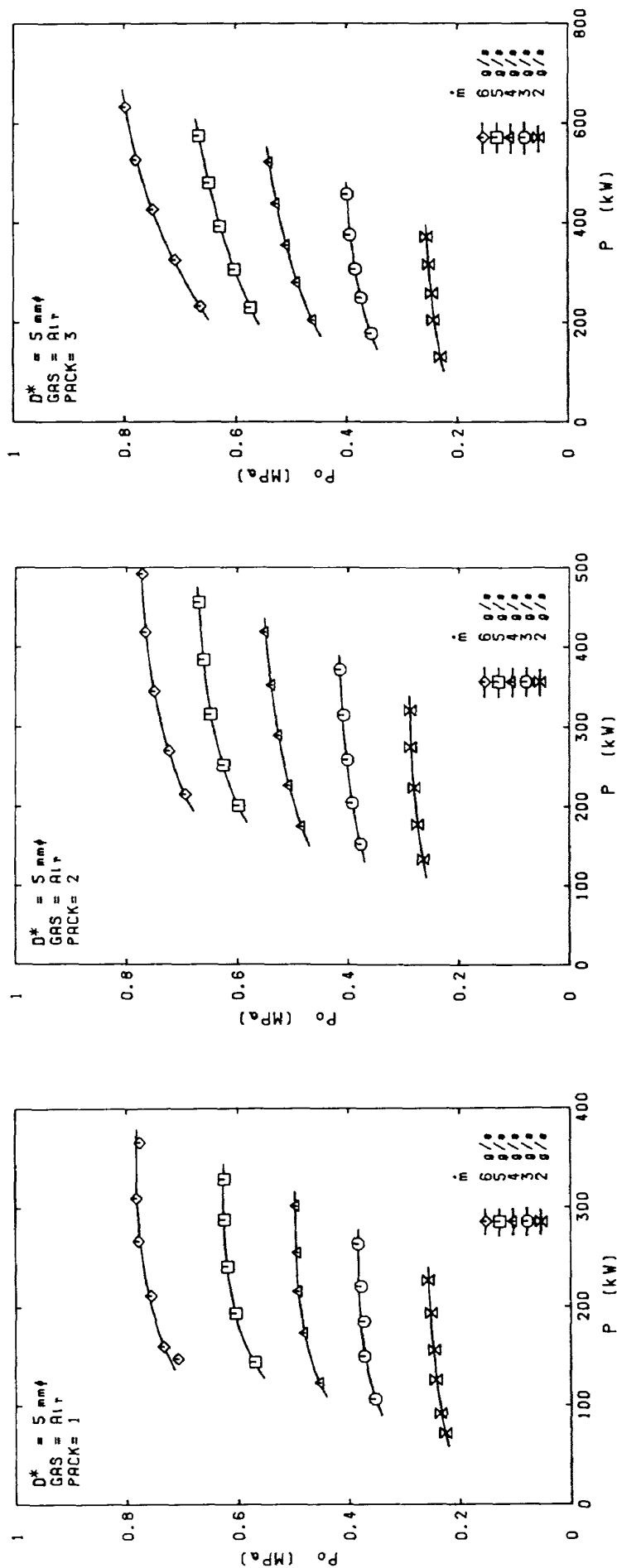


図 12-1) a 入力電力 P —ブレンラム室
圧力 P_0 特性

図 12-1) b 入力電力 P —ブレンラム室
圧力 P_0 特性

図 12-1) c 入力電力 P —ブレンラム室
圧力 P_0 特性

図12-(2) a 入力電力 P —ブレンナム室
圧力 P_0 特性図12-(2) b 入力電力 P —ブレンナム室
圧力 P_0 特性図12-(2) c 入力電力 P —ブレンナム室
圧力 P_0 特性

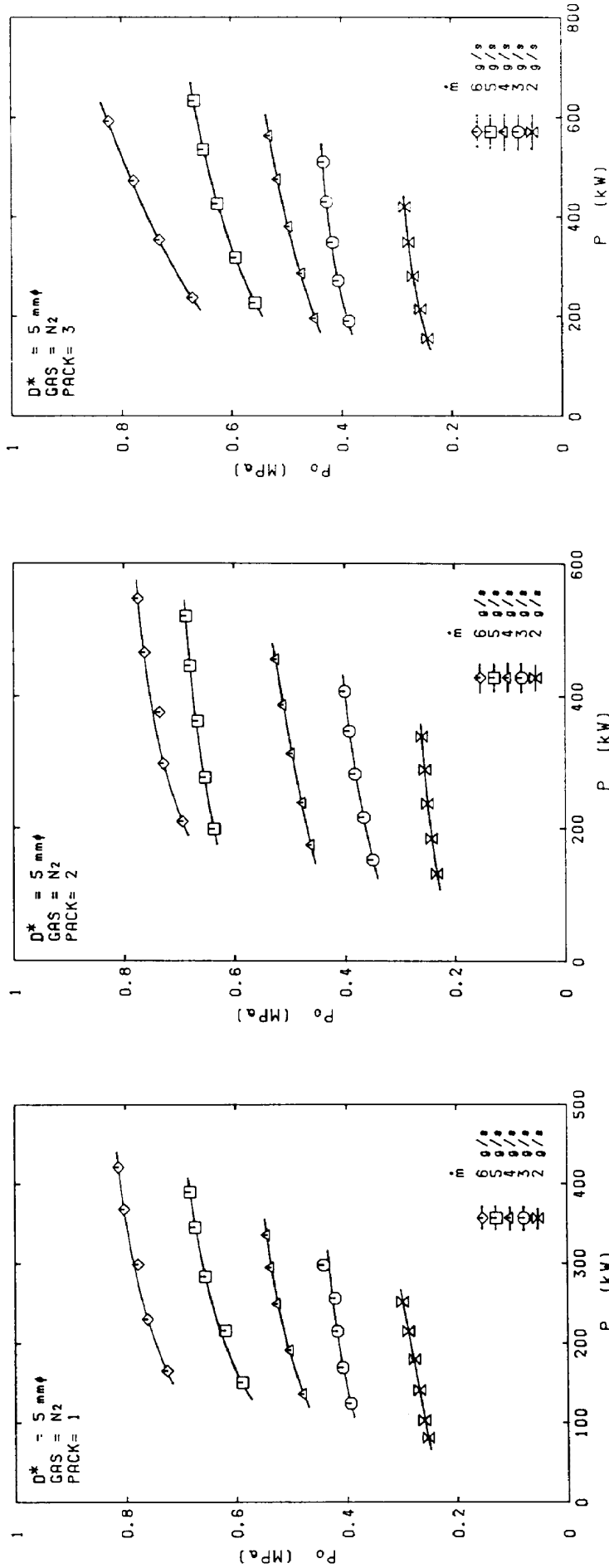


図 12-(3) a 入力電力 P —ブレンナム室
圧力 P_0 特性

図 12-(3) b 入力電力 P —ブレンナム室
圧力 P_0 特性

図 12-(3) c 入力電力 P —ブレンナム室
圧力 P_0 特性

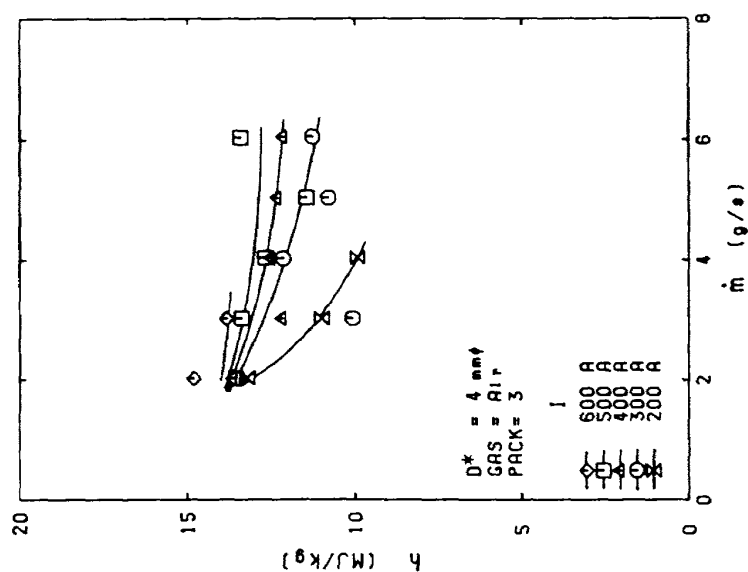


図 13-(1) a ガス流量 \dot{m}_g —全エント
ルビ h 特性

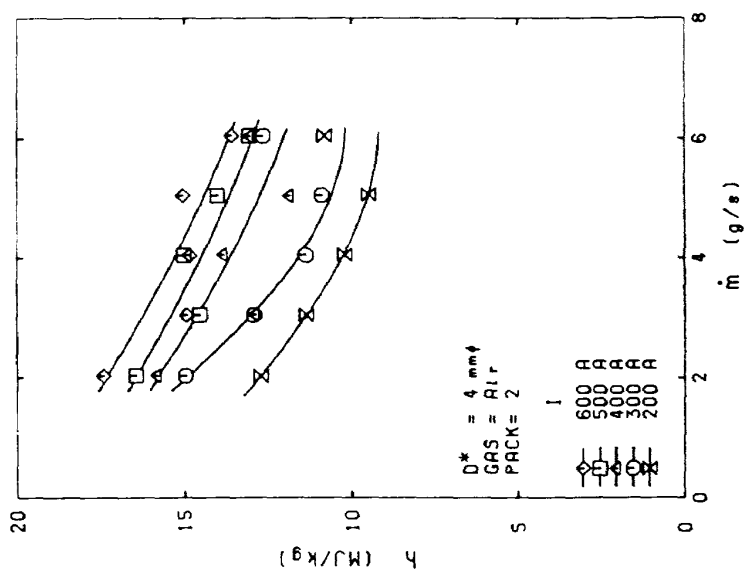


図 13-(1) b ガス流量 \dot{m}_g —全エント
ルビ h 特性

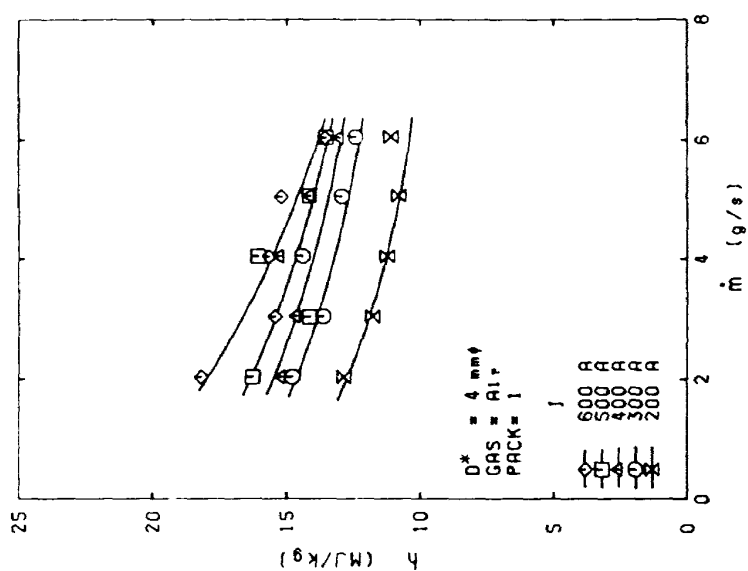


図 13-(1) c ガス流量 \dot{m}_g —全エント
ルビ h 特性

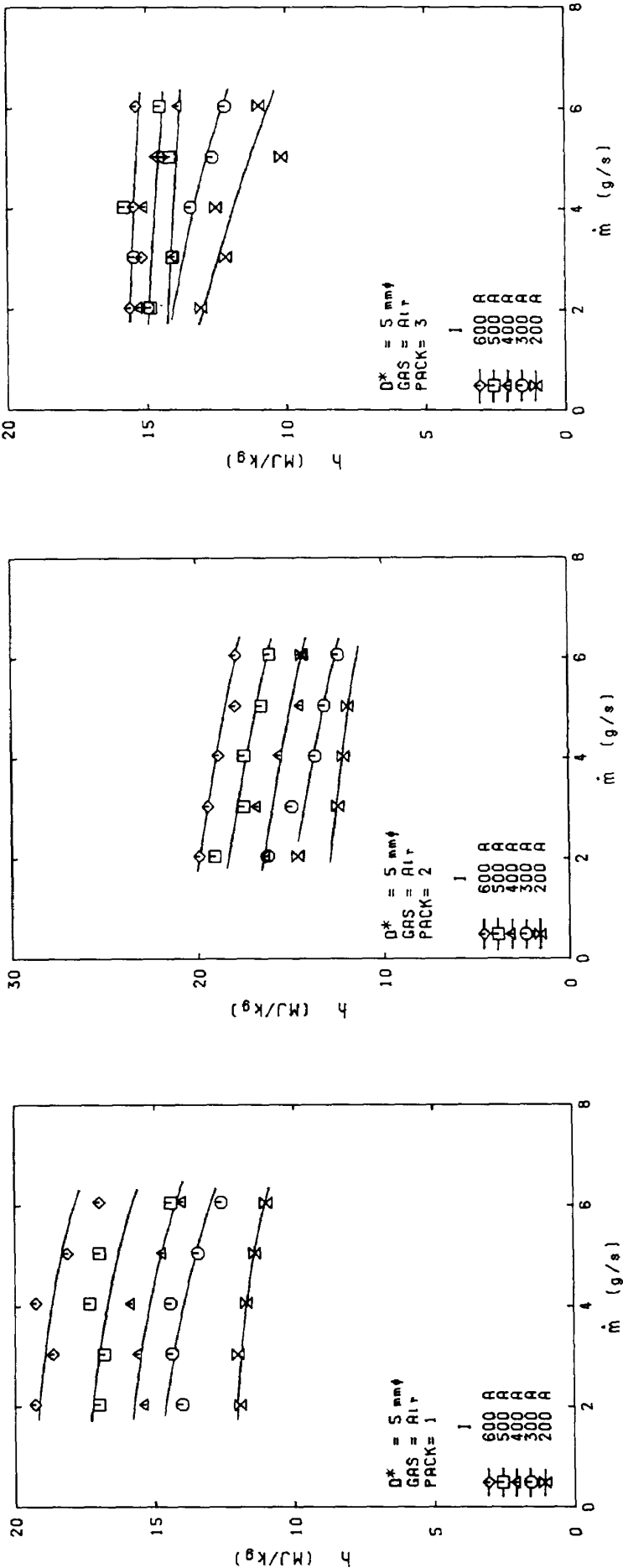


図 13-(2) a ガス流量 \dot{m}_g - 全エント
ルビ \dot{m} 特性

図 13-(2) b ガス流量 \dot{m}_g - 全エント
ルビ \dot{m} 特性

図 13-(2) c ガス流量 \dot{m}_g - 全エント
ルビ \dot{m} 特性

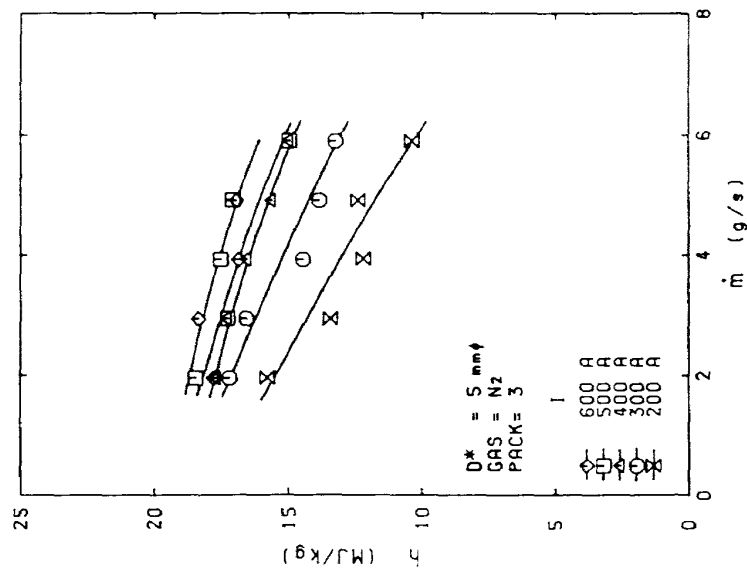


図13-(3) a ガス流量 \dot{m} —全エンタルピー特性

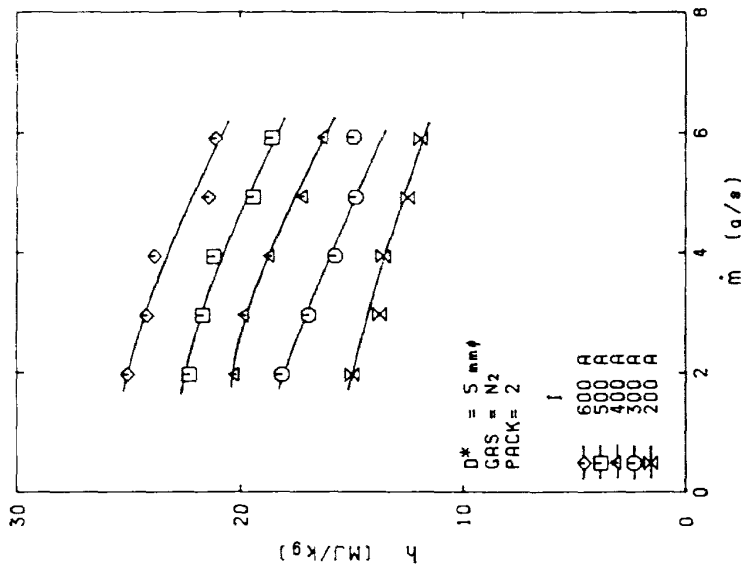


図13-(3) b ガス流量 \dot{m} —全エンタルピー特性

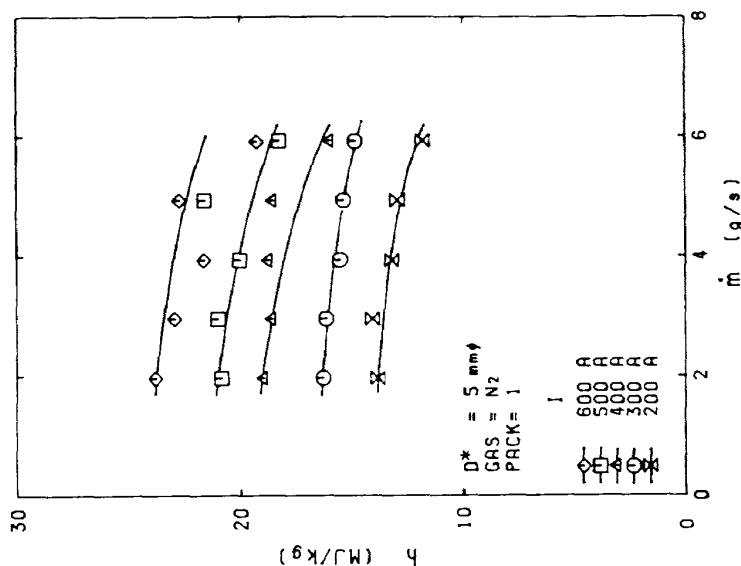


図13-(3) c ガス流量 \dot{m} —全エンタルピー特性

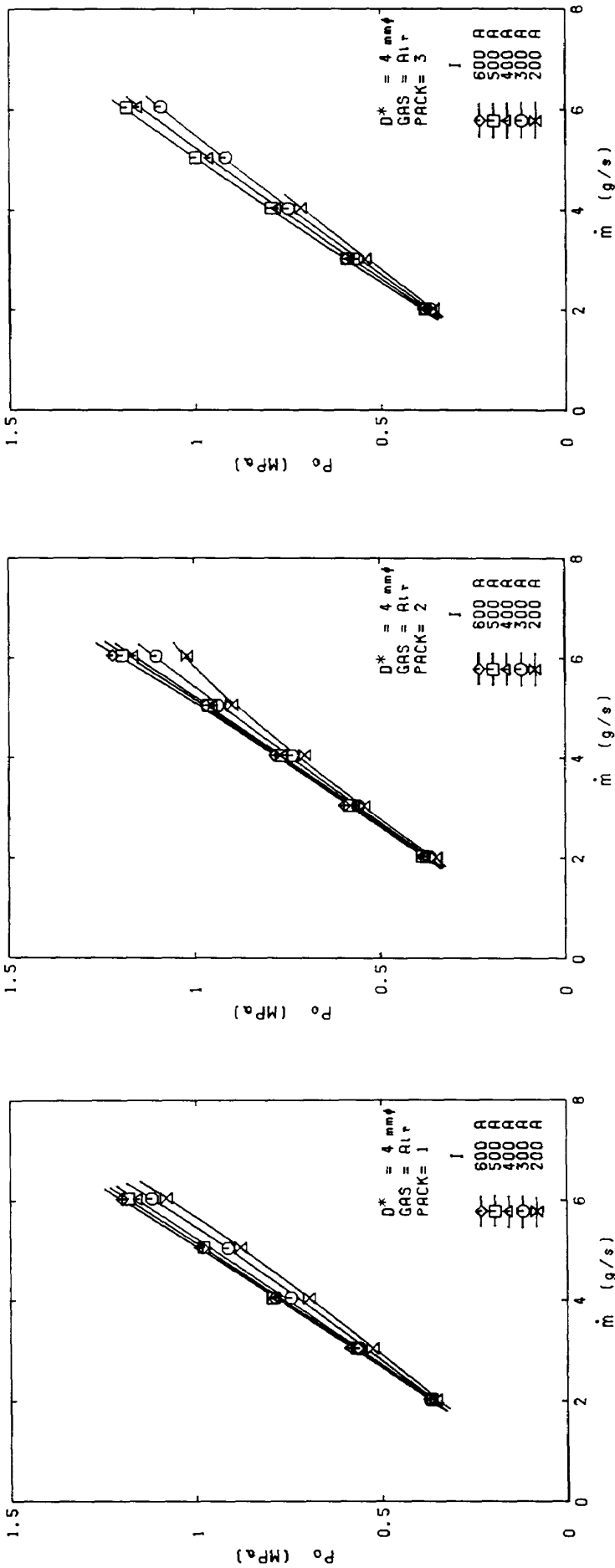


図14-(1) a ガス流量 \dot{m} —プレナム室
圧力 P_0 特性

図14-(1) b ガス流量 \dot{m} —プレナム室
圧力 P_0 特性

図14-(1) c ガス流量 \dot{m} —プレナム室
圧力 P_0 特性

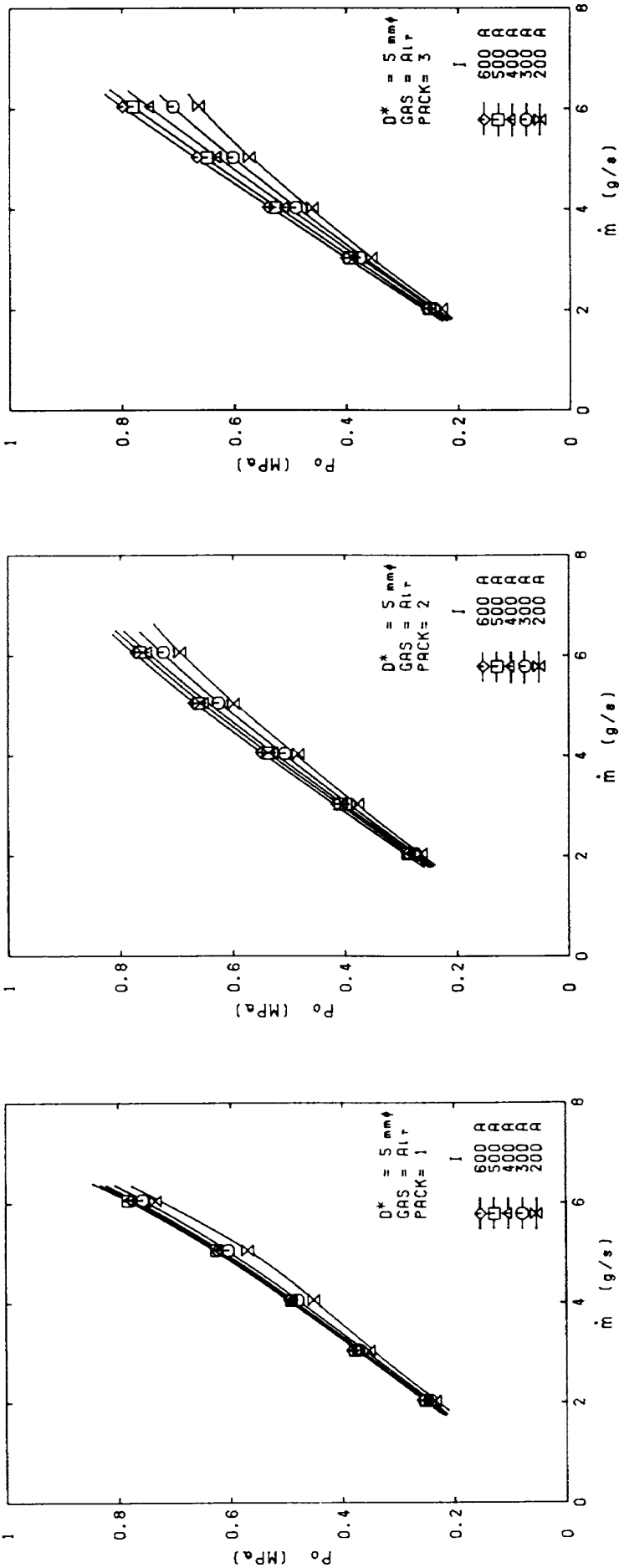


図14-(2) a ガス流量 \dot{m}_g —ブレンナム室
圧力 P_0 特性

図14-(2) b ガス流量 \dot{m}_g —ブレンナム室
圧力 P_0 特性

図14-(2) c ガス流量 \dot{m}_g —ブレンナム室
圧力 P_0 特性

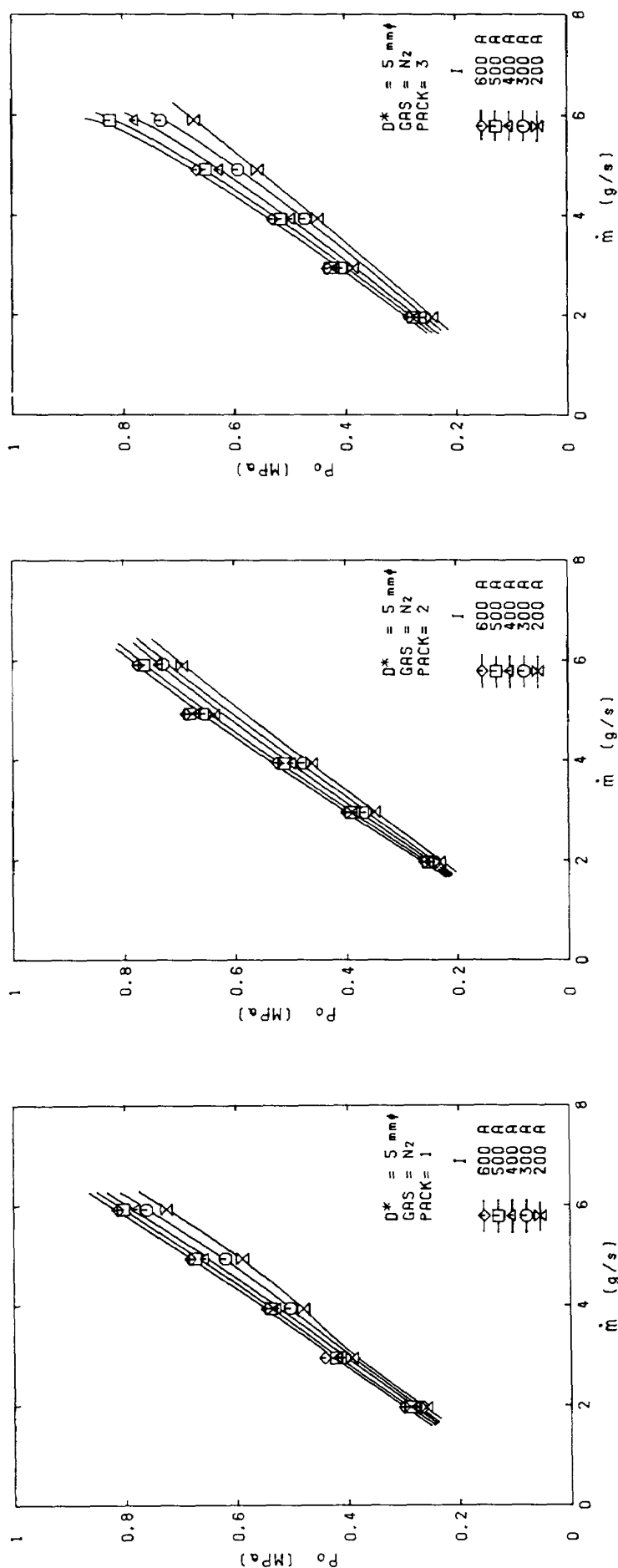
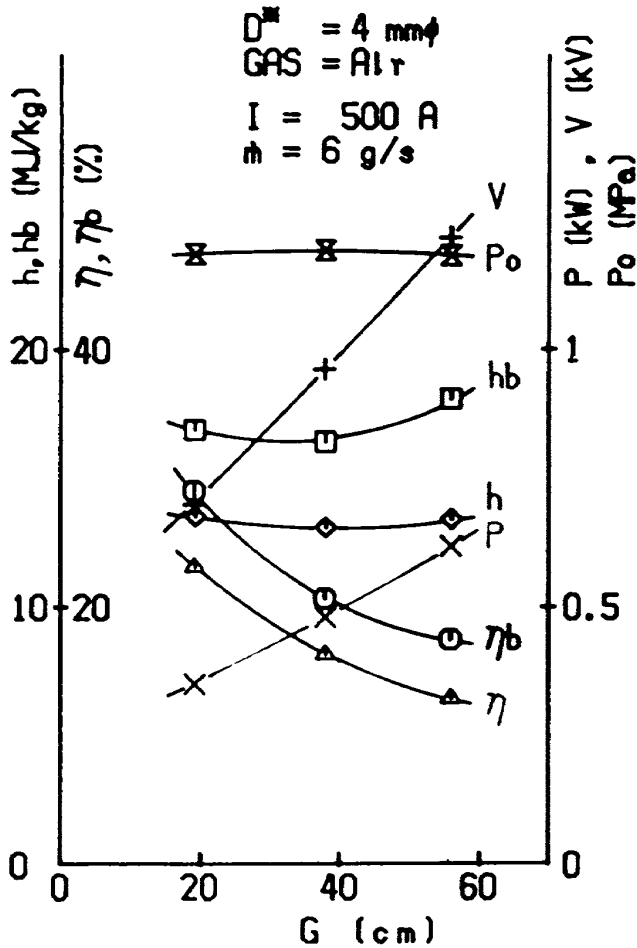
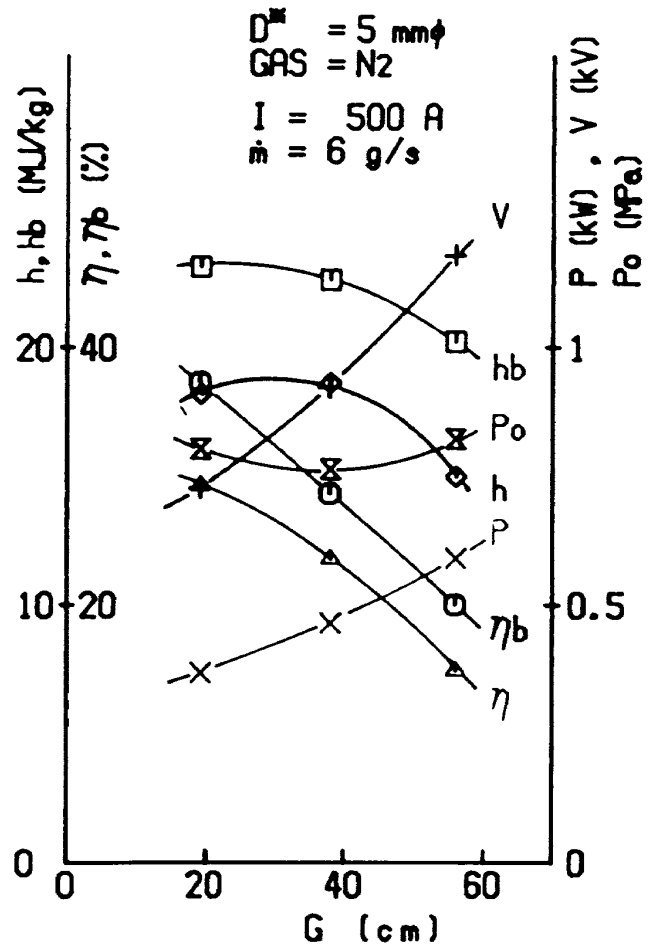
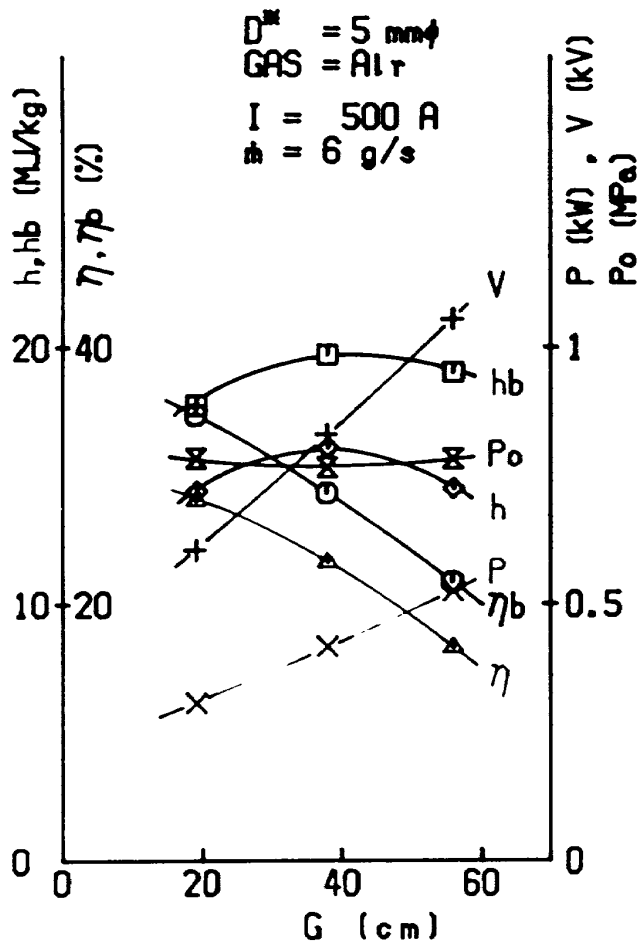
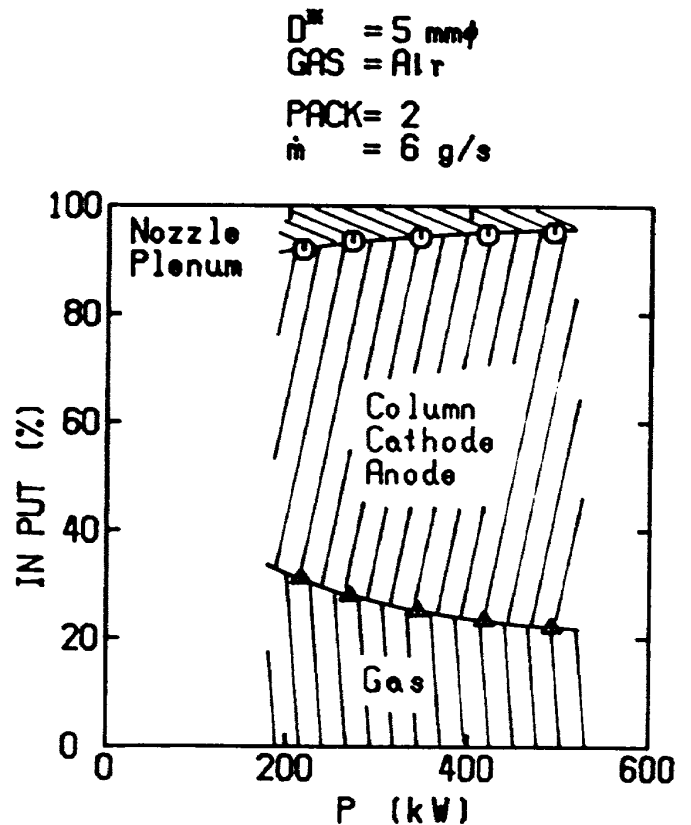
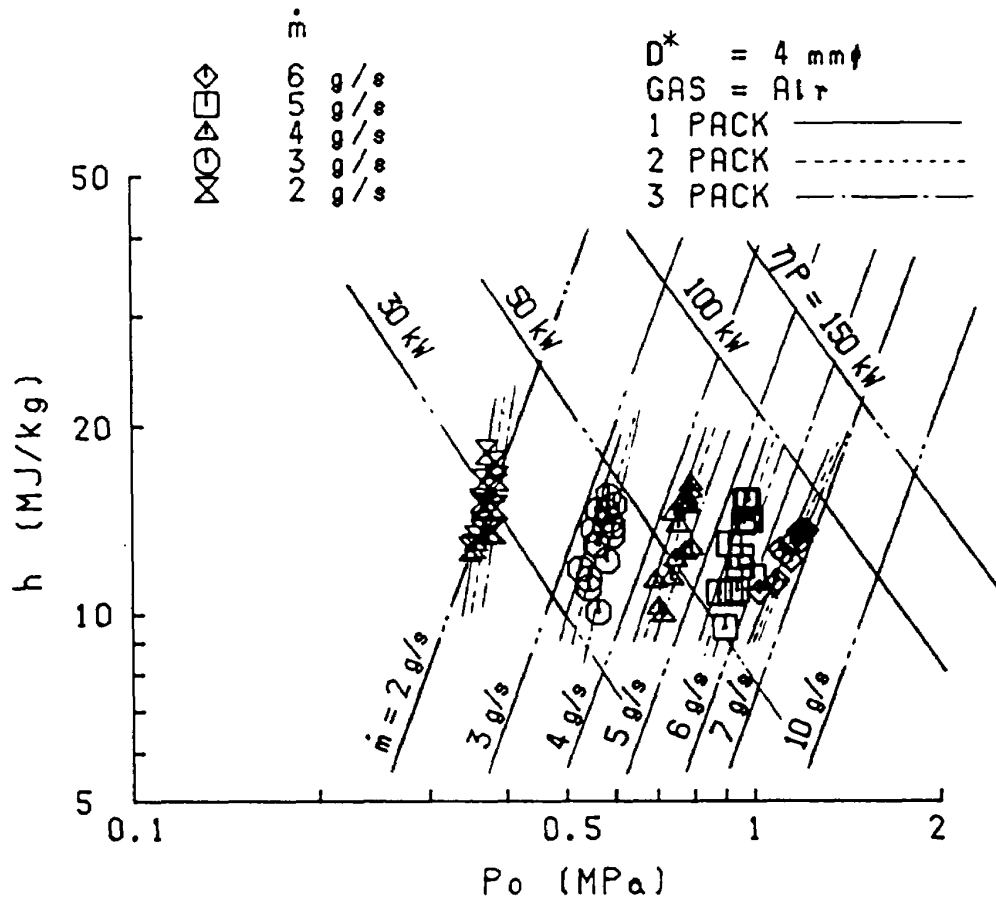
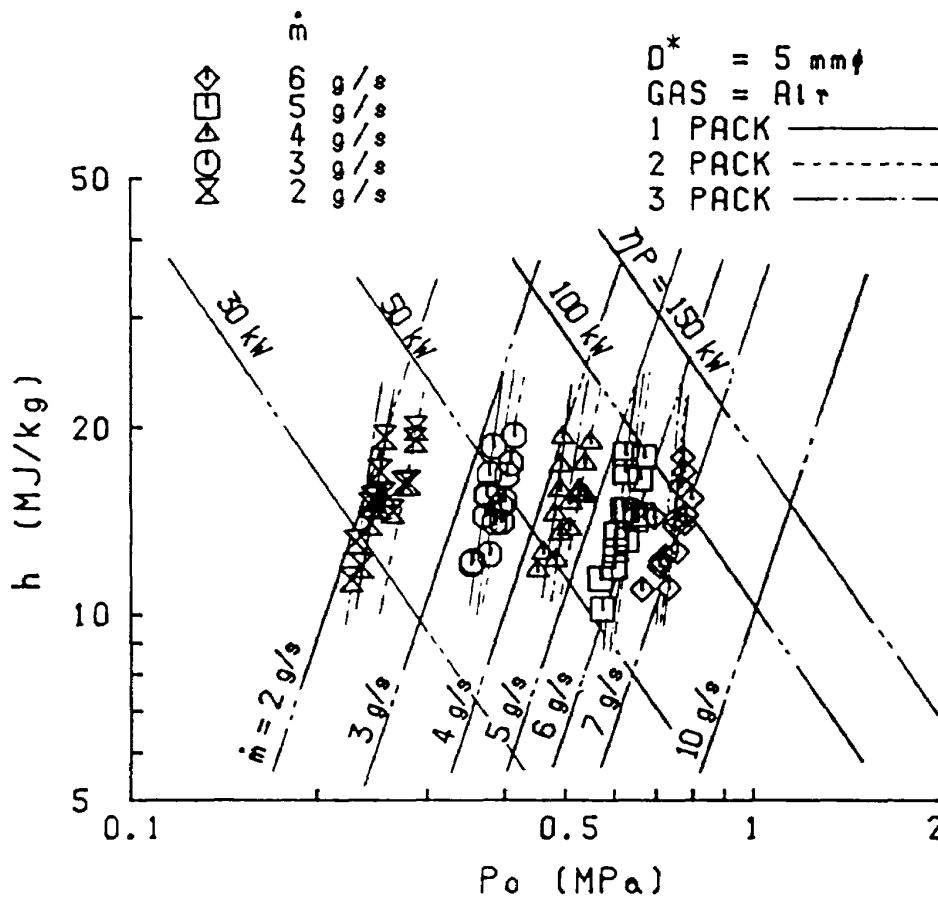


図 14-(3) a ガス流量 \dot{m} - ブレナム室
圧力 P_0 特性

図 14-(3) b ガス流量 \dot{m} - ブレナム室
圧力 P_0 特性

図 14-(3) c ガス流量 \dot{m} - ブレナム室
圧力 P_0 特性

図 15 - (1) 電極間隔 G - 諸特性図 15 - (3) 電極間隔 G - 諸特性図 15 - (2) 電極間隔 G - 諸特性図 16 入力電力 P - 入力電力配分 INPUT

図17-(1) プレナム室圧力 P_0 —全エンタルピ h 特性図17-(2) プレナム室圧力 P_0 —全エンタルピ h 特性

航空宇宙技術研究所資料 545 号

昭和 60 年 6 月 発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町 7 丁目 44 番地 1
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182
印刷所 株式会社実業公報社
東京都千代田区九段南 4-2-12
