

沸騰水形原子炉における飛沫除去

The Moisture Separation in BWR

遊 佐 英 夫*

Hideo Yusa

藤 江 秀 夫*

Hideo Fujie

青 木 直 司**

Naoshi Aoki

内 容 梗 概

沸騰水形原子炉を含めた蒸気発生器内での飛沫同伴現象の解析と有効な汽水分離の方法を見出すことを目的として実験を行なった。蒸気発生器内の飛沫量を決定する最も大きな因子は沸騰面からの高さ、蒸気速度および圧力の三つであると考えられる。実験条件として蒸気速度は最大 2.0 (m/s) まで、圧力は最大 70 ata (工業気圧) まで、沸騰面からの高さは最大 120 cm まで変えた実験を行ない、これらの関数関係を明確にした。次に波形スクラバおよびワイヤメッシュの飛沫分離性能について調べた。実験の結果と若干の仮定を基にした理論考察とから次のようなことがわかった。

- (1) 沸騰面からの高さが 60 cm 以上では蒸気純度は高さによってあまり変らない。
- (2) 高圧になってもそれほど急激に蒸気純度は悪化しない。70 ata において 99.9% 以上の蒸気純度が得られる。
- (3) 蒸気流量の小さなところでは波形スクラバなどはかなりよい飛沫分離性能を示すが、大体 $0.6 \text{ g/cm}^2\text{s}$ 以上の蒸気流量になるとわれわれの用いた分離器設定方式では飛沫の再同伴が著しくなる。

1. 緒 言

現在の沸騰水形原子炉では炉内で発生した蒸気を過熱器を通さずに直接タービンに送ることが多い。このため、蒸気中の飛沫量が多いとタービンの効率が落ちると同時に飛沫の中には溶解固形物が含まれているためにタービン、復水器などにおけるスケールそのほかの不純物の堆積度合が増加して出力が減退する。そのうえ、特に放射能によるタービンそのほかの汚染という重大問題が加わる。

以上の点から高純度の蒸気の発生が要求され、われわれは飛沫同伴現象の解析と有効な汽水分離の方法を見出すことを目的として基礎実験を行なった。

蒸気純度に最も大きく影響する因子は蒸気速度、沸騰面からの高さおよび圧力の三つであると考え、実験と若干の仮定を基にした理論的考察とからこれらの関数関係を明確にした⁽¹⁾。また、波形スクラバ、ワイヤメッシュなどの飛沫分離器についてその性能を明らかにしたので以下に報告する。

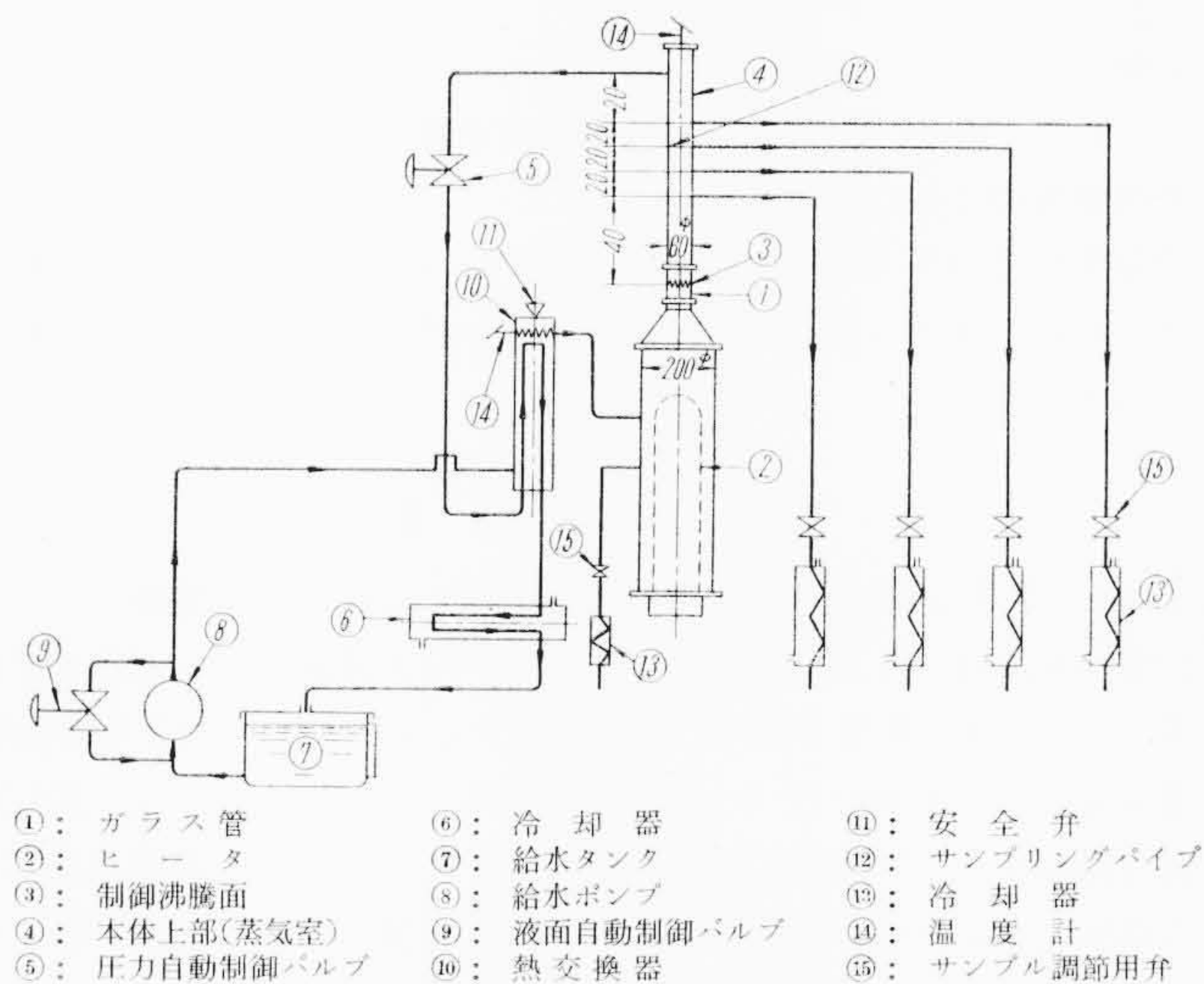
2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置

第1図に実験装置の略図を示す。

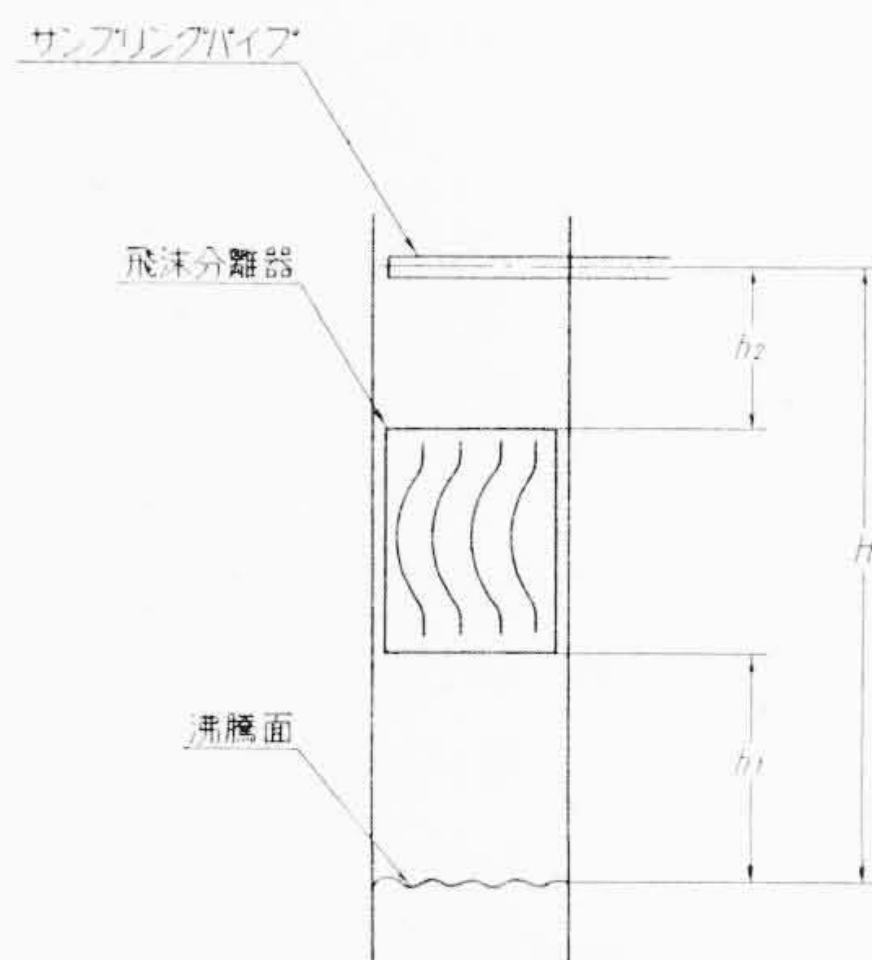
図において蒸気発生器の下部の加熱部に最大出力 100 kW のヒータ②をそう入して蒸気を発生させる。沸騰面③の付近は 10 ata 以下の実験では沸騰面が直接観察できるように肉厚の硬質ガラス管①をそう入した。10 ata 以上の高圧実験ではステンレス鋼管と取り替えた。この場合、線源 ^{60}Co を封入した金属性カプセルを沸騰面上に浮かべ、この位置をカウンタで検出することによって間接的に沸騰面を監視した。主蒸気流は蒸気かん上部(蒸気室)から出て圧力調節弁⑤、熱交換器⑩および冷却器⑥を経て復水されて給水タンク⑦にはいる。一方、給水ポンプ⑧によって供給された水は熱交換器にはいり、温度が上げられてかん内にはいる。蒸気室にはサンプル蒸気取出口が取り付けられ、サンプリングパイプ⑫をそう入することができるようになっている。

蒸気室には飛沫分離器が長さ 25 cm のわくの中に

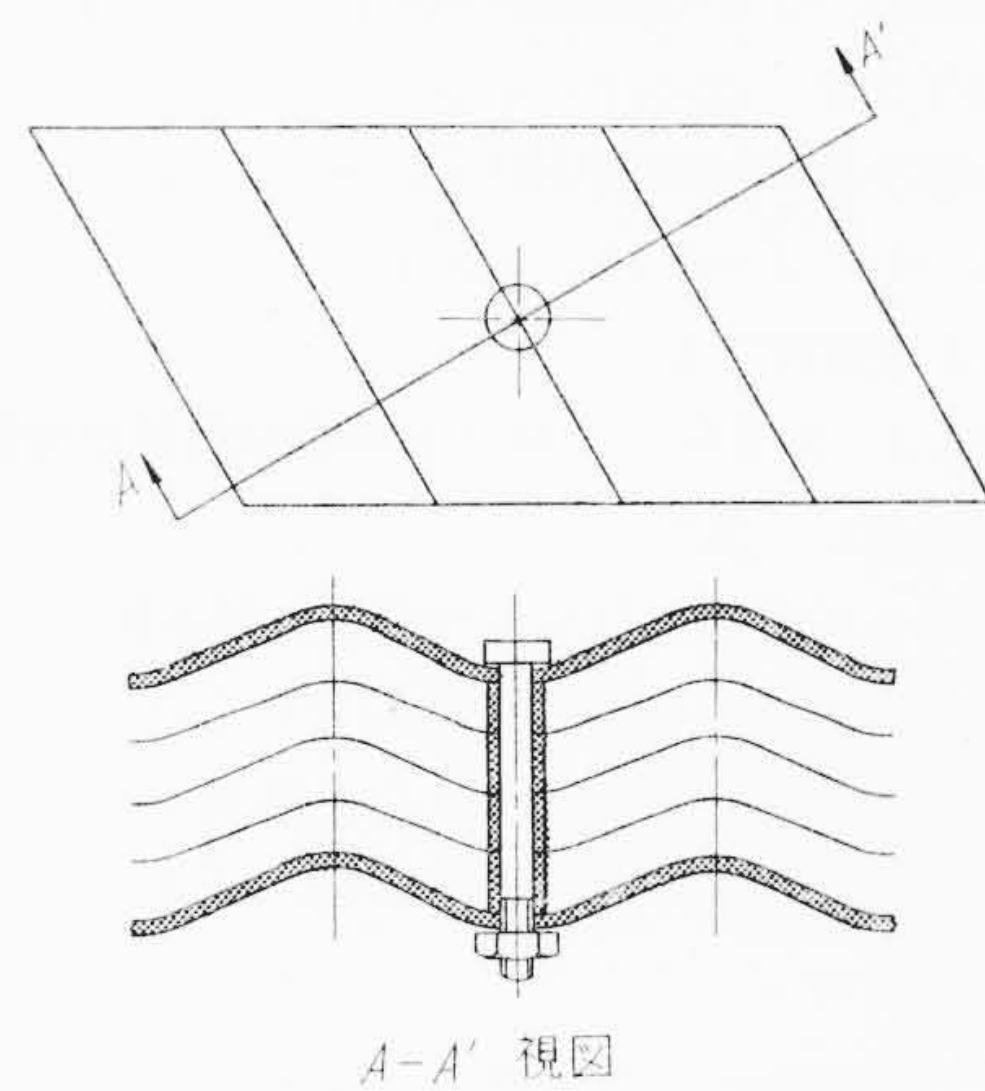


第1図 実験装置略図

入れられて任意の高さに第2図に示すように設定される。われわれは分離器の性能を調べるにあたって、分離器の下端から沸騰面までの距離 h_1 、分離器の上端からサンプリングパイプまでの距離 h_2 およびパイプから沸騰面までの距離 H の三つの量をいろいろに変えて実験を行なった。飛沫分離器は第3図に示すような波形のスクラバおよびこれらのスクラバとワイヤメッシュを併用したものである。ス



第2図 飛沫分離器の設定



第3図 波形スクラバ (波数 2)

* 日立製作所日立研究所

** 日立製作所日立工場

クラバは波の数が1, 2, 3, 4, 5および6の6種のものを, ワイヤメッシュは20メッシュの金網を55枚重ねたものを用いた。

2.2 実験方法

蒸発かん内が一定圧力になり蒸気速度も一定, すなわち定常状態に達してからサンプル蒸気の復水とかん水がサンプルされる。蒸気中の飛沫同伴量を測定するのにわれわれはトレーサ物質を用いることとし, これに LiCl を選んだ⁽¹⁾。

飛沫同伴量を表わすものとして次式で定義される除染係数 (decontamination factor) $D.F.$ を用いた。

$$D.F. = \frac{X_B}{X_D} \div \frac{\text{蒸気重量流量}}{\text{飛沫重量流量}} \quad (1)$$

ここに X_B : かん水中の Li 濃度

X_D : 復水中の Li 濃度

蒸気純度 (かわき度) x と $D.F.$ との関係は $x=100(1-1/D.F.)$ で与えられる。

2.3 飛沫分離器の圧力損失の測定

$h_1=65$ cm のところに飛沫分離器を設定し*, $H=60$ cm と $H=100$ cm のサンプル蒸気取出口を圧力取出口として用い, 分離器前後の差圧を測定した。高圧になると蒸気および液滴の差圧計内への流入によりほとんど測定が不可能になったので, 今回は高圧下での圧力損失の測定は行なわなかった。

ただし, 後述するように大気圧下の実験から圧力損失はほとんど蒸気速度の2乗に比例することがわかっているの, 大気圧下の圧力損失係数 (圧力損失と蒸気流量との間の比例定数) を求めておけばこれは一定とみなせるので高圧下における大体の圧力損失が算出できる。

3. 実験結果

3.1 $D.F.$ と蒸気速度および沸騰面からの高さとの関係

第4図に圧力1 ataにおける蒸気速度 v_g と沸騰面からの高さ H の $D.F.$ に対する影響を調べた実験結果を示す。ただし以下の実験結果を示す図の縦軸は圧力1 ata, 沸騰面からの高さ80 cm, 蒸気速度1.0 m/sのときの $D.F.$ の平均値 $(D.F.)_0$ に対する比 $D.F./(D.F.)_0$ で表わした。一般に $D.F.$ は v_g が増すほど減少しているが, 特に次のような傾向が顕著に認められる。すなわち, H が60 cmと80 cmでは $D.F.$ の差異があまりみられないが, H が40 cmとなると著しく $D.F.$ は小さくなっている。この傾向は高圧下の実験でもやはり顕著にみられる。この点については4.1で検討する。

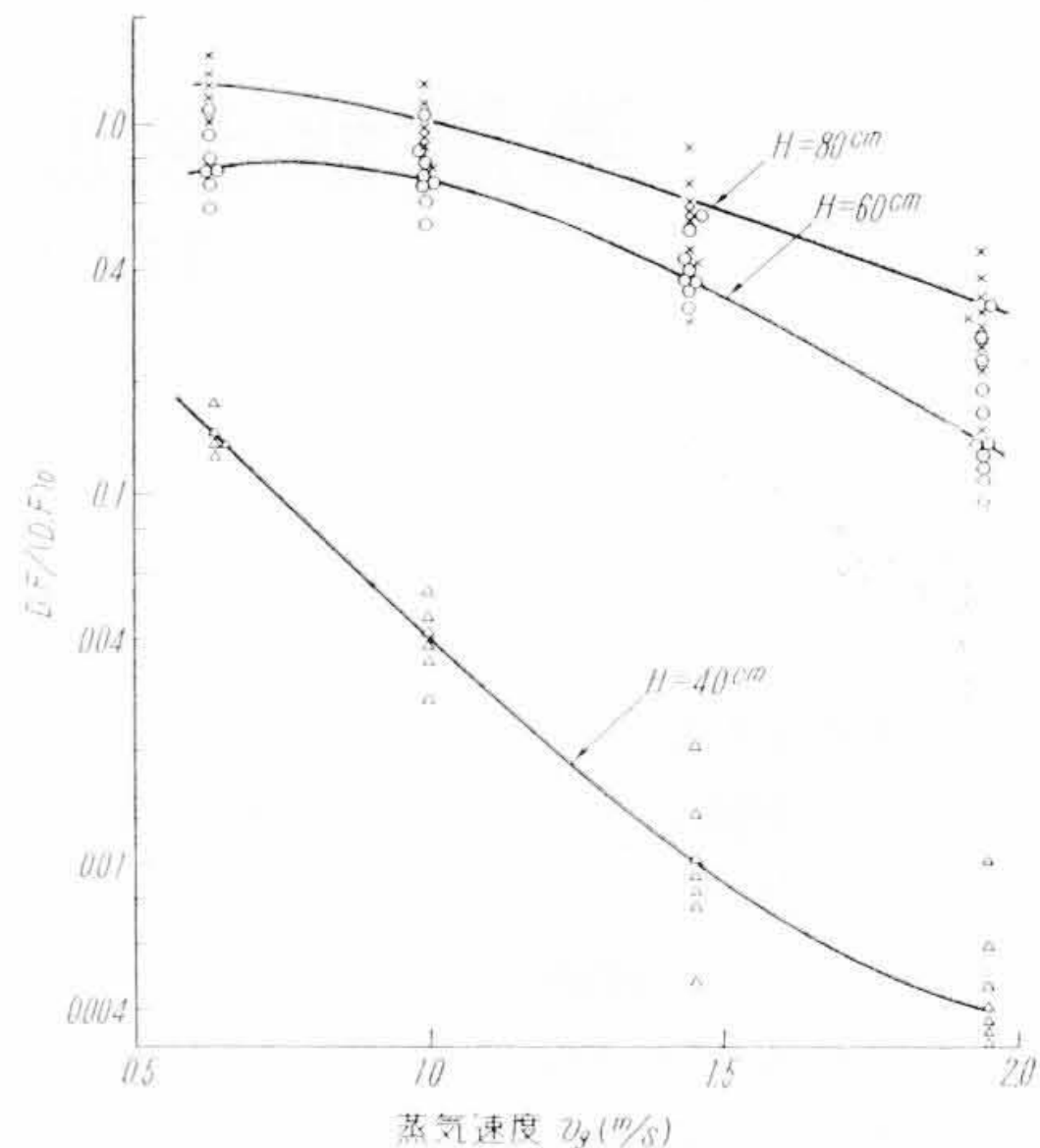
3.2 圧力 p の影響

3.1で述べたように H が60 cm以上では $D.F.$ に対する H の影響は非常に小さいものとみなせるので, この範囲について圧力 p の影響を調べた。第5図に $H=80$ cm の場合について種々の圧力での $D.F.$ と v_g との関係を半対数グラフに整理した。一般に $D.F.$ は圧力が大きくなるほど小さくなっているが, 圧力が6 ata以上ではその減少度は比較的少なく, また, v_g が1.0 m/s以上になると, $D.F.$ は v_g によってほとんど変化しなくなっている。この点については4.2で検討する。

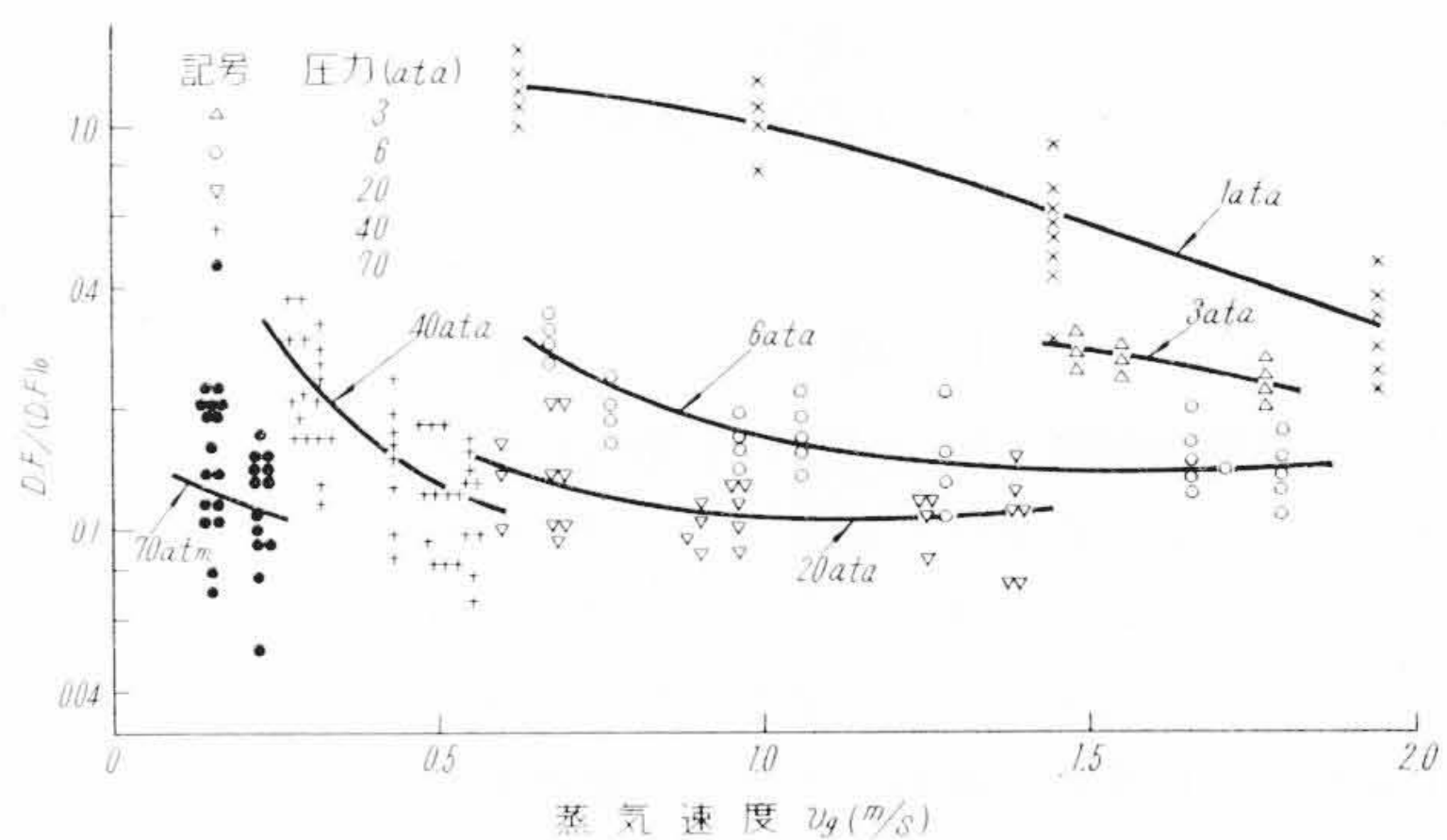
3.3 大気圧下における飛沫分離器の性能

前述した波形スクラバおよびワイヤメッシュについて h_1, H を種々変えて実験を行なった結果を第6図に示す。図からスクラバの波数が3以上で h_1 が35 cm以上ならば, スクラバ出口蒸気の $D.F.$ は実験誤差の範囲内でほとんど差異が認められず, ほぼ 10^5 以上の $D.F.$ が得られることがわかる。なお, この場合には h_2 の影響はみられない。スクラバとワイヤメッシュを併用した場合でもこれ以上

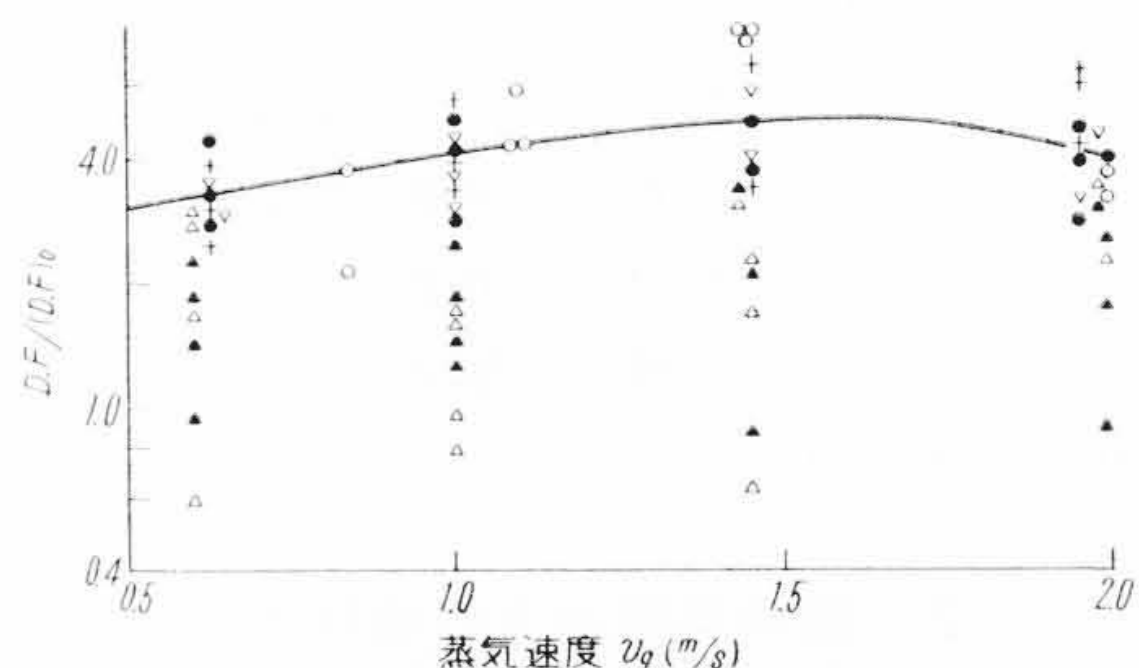
* 分離器には落下飛沫 (後述) は衝突しない状態で圧力損失を測定した。



第4図 $D.F.$ と沸騰面からの高さ H との関係 ($p=1$ ata の場合)



第5図 $D.F.$ と圧力との関係 ($H=80$ cm の場合)



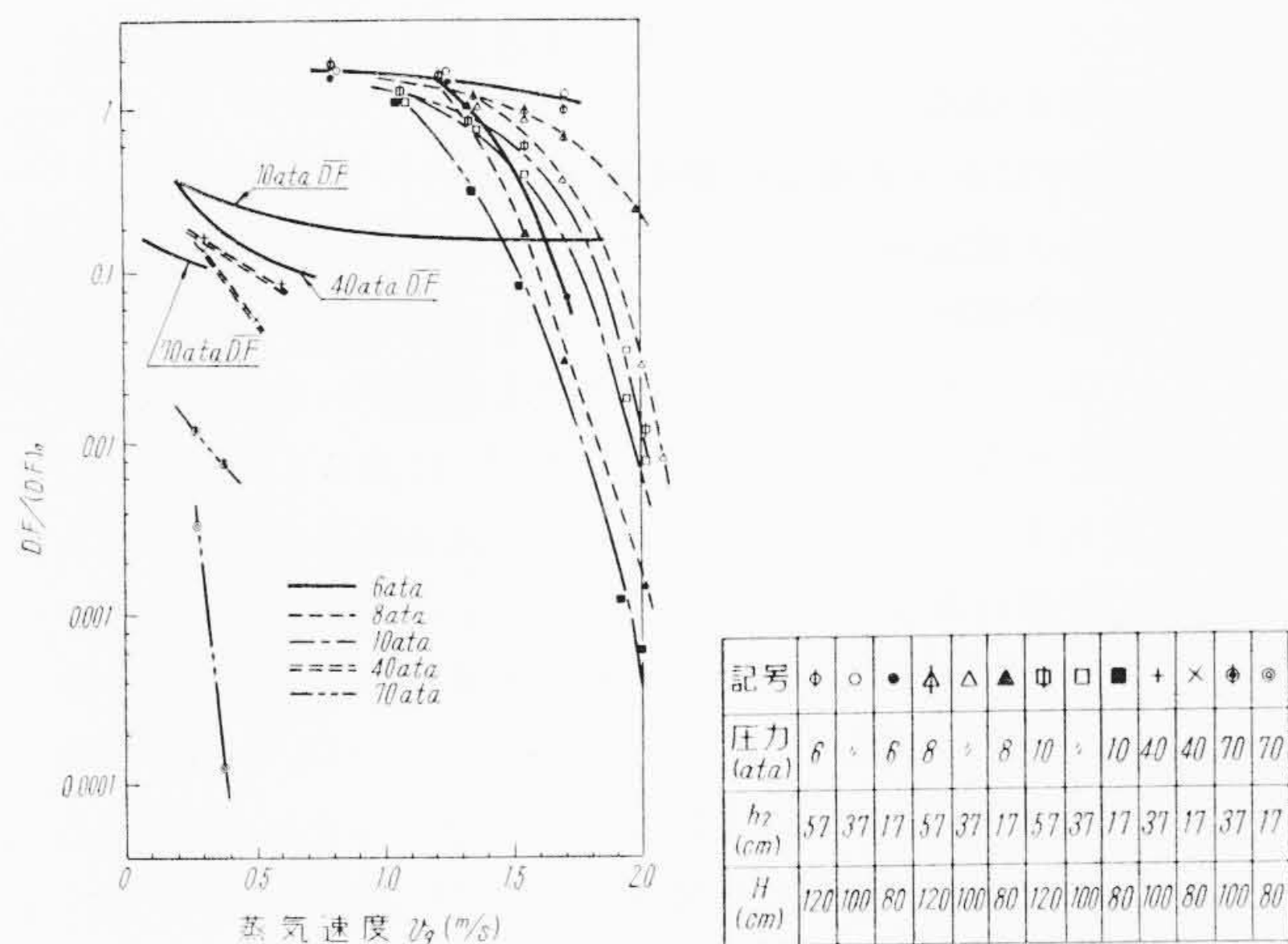
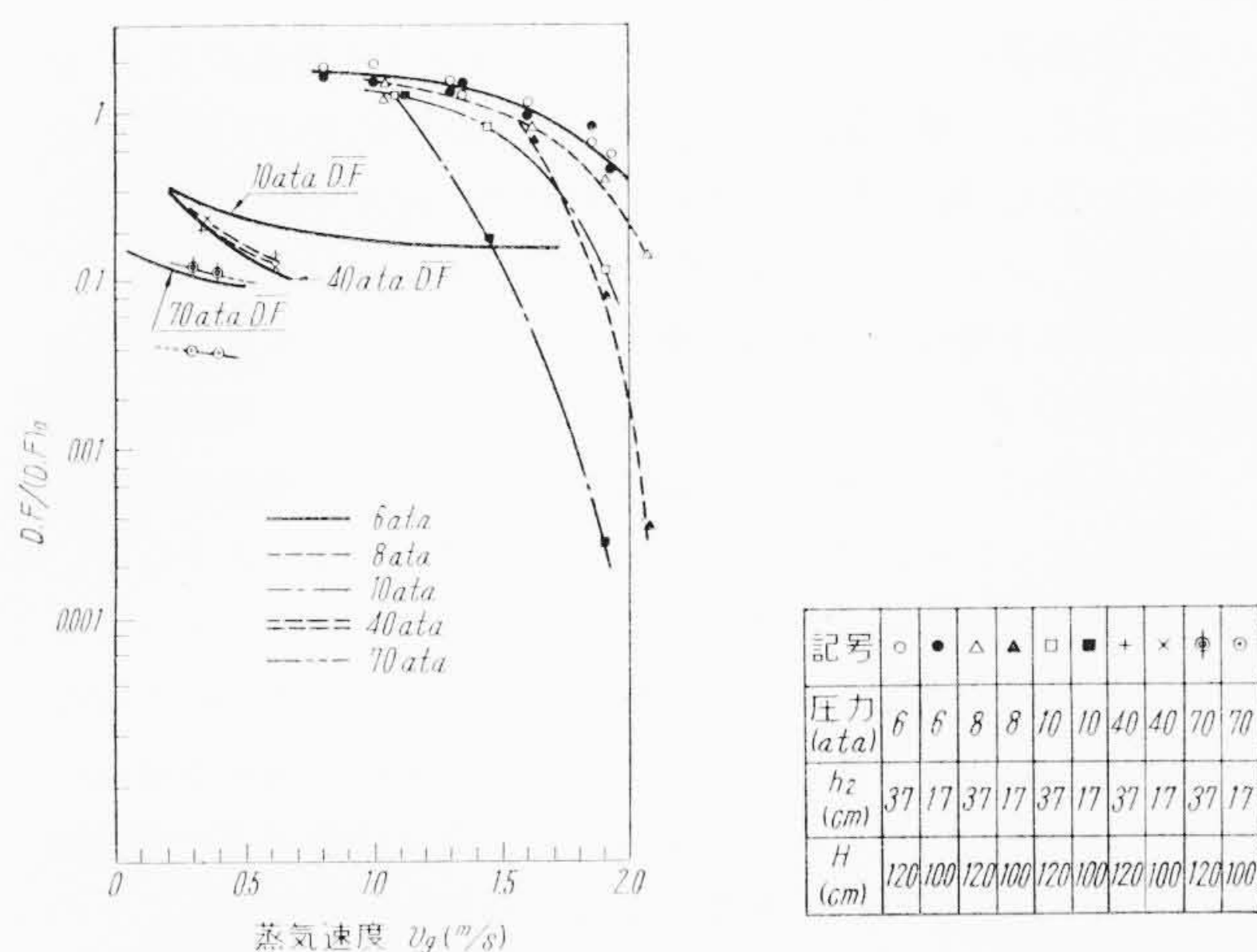
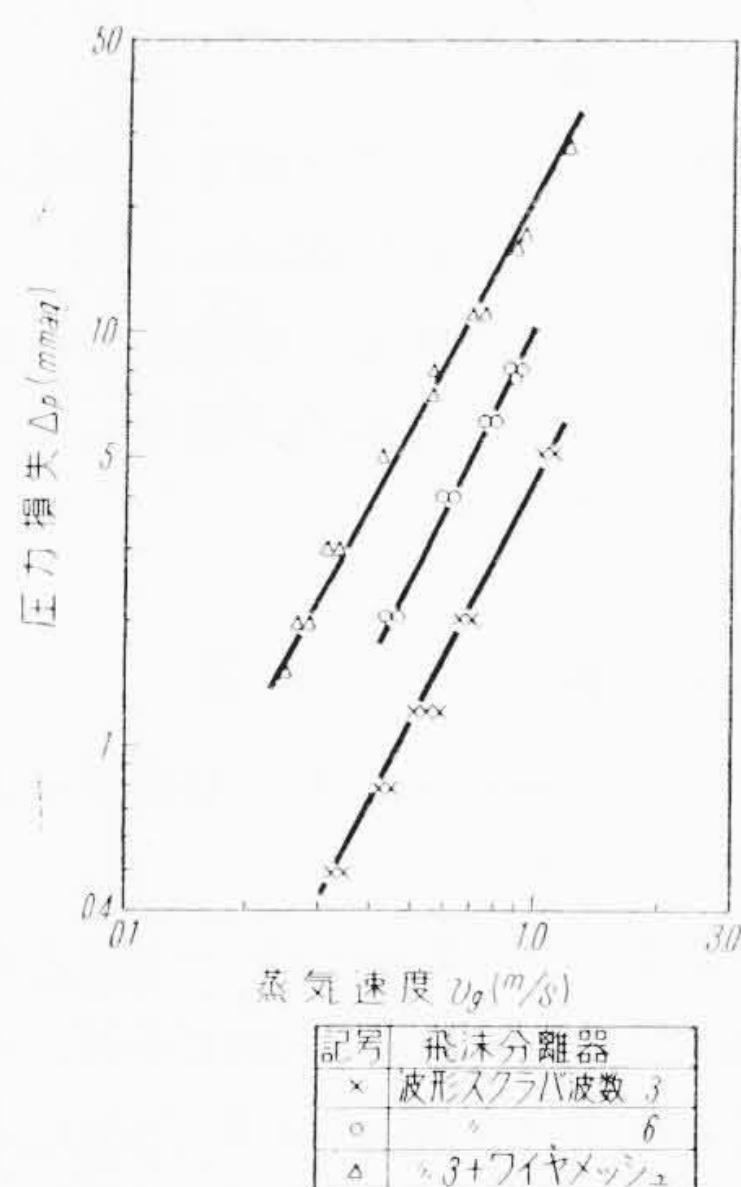
記号	飛沫分離器	設定値 h_1	蒸気取出口 (H)
△	波形スクラバ波数2	35 cm	60 cm
▲	△	15 cm	60 cm
●	△	35 cm	60 cm
+	△	40 cm	80 cm
▽	△	40 cm	80 cm
○	3+ワイヤメッシュ	40 cm	80 cm

第6図 大気圧下における飛沫分離器の性能

にはなっていない。しかし, スクラバの波数, h_1 のいずれかが上記の値以下であるとスクラバの飛沫分離性能は急に悪くなっている。

3.4 高圧下における飛沫分離器の性能

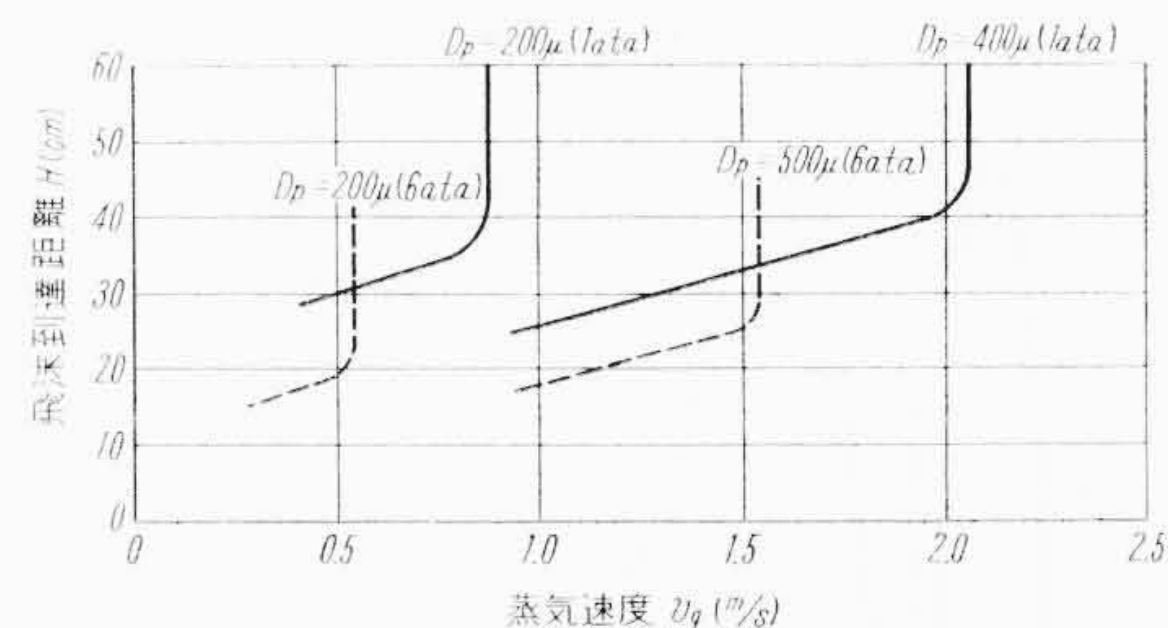
第7図に $h_1=40$ cm の位置に波形スクラバを設定したときの圧力70 ata までの実験結果を示す。図のプロットは整理の都合上実験値を平均したものである。なお分離器をそう入しないとき ($H=80$ cm) の $D.F.$ を $D.F.$ として比較のために図示した。また, 高圧下においても飛沫分離器の形状 (スクラバの波数) が $D.F.$ に及ぼす影響は大気圧下における場合と同様で, 波数3以上では形状を複雑にしてもほとんど $D.F.$ の向上が認められないことを実験で確かめたので波数4のものを用いて実験を進めた。一般に高圧になると分離器出口蒸気の $D.F.$ は小さくなっているが, 特に注目すべきことは蒸気速度と圧力, すなわち蒸気流量が大きくなると $D.F.$ の急激な減


 第7図 高圧下における波形飛沫分離器の性能 ($h_1=40$ cm)

 第8図 高圧下における波形飛沫分離器の性能 ($h_1=60$ cm)


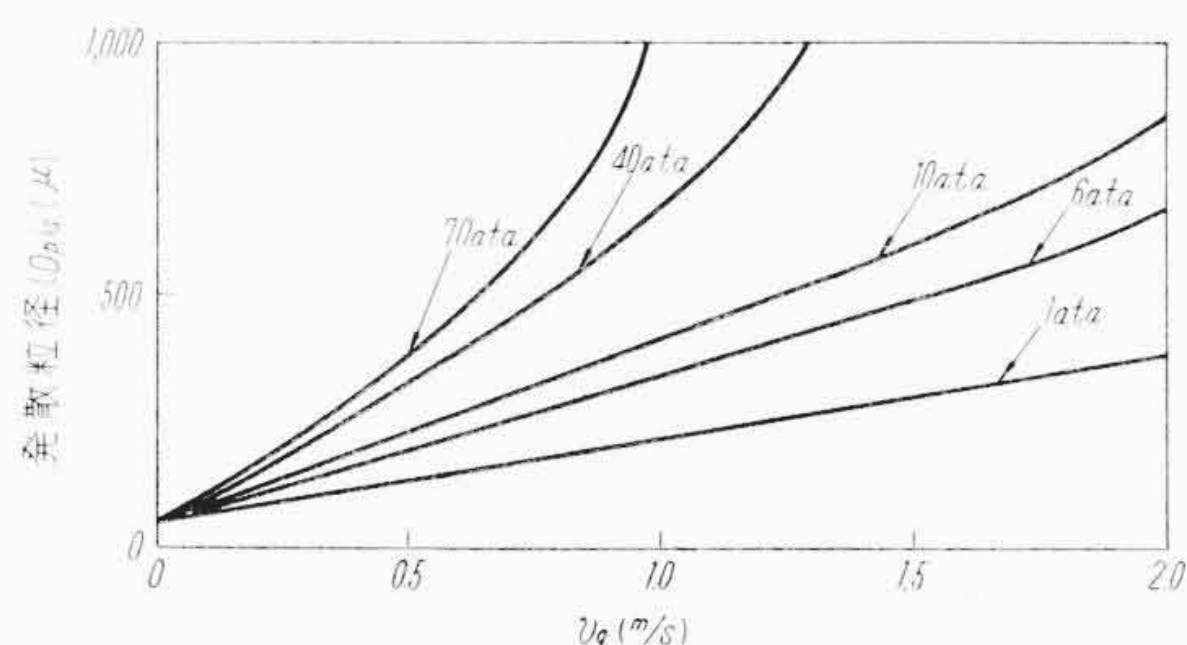
第9図 飛沫分離器の圧力損失

少がみられ、 h_2 が小さいと特にその傾向が著しいことである。これは一度分離器に捕集された液滴が蒸気流量が多いときには再同伴されるためであろうと思われる。分離器をそう入し、 H が大きくなっているにもかかわらず $D.F.$ より $D.F.$ が小さくなっている。第8図に $h_1=60$ cm の場合を示す。 h_1 が 20 cm だけ大きくなったために $D.F.$ はかなり大きくなっている。しかし、40、70 ata の高圧下では蒸気純度はたかだか $D.F.$ 程度にしかならず分離器をそう入したことによる蒸気純度の向上はみられない。

これらの点については 4.3 において考察する。



第10図 飛沫到達距離と蒸気速度との関係



第11図 発散粒径と蒸気速度との関係

3.5 分離器の圧力損失

大気圧下の実験で求めた圧力損失と蒸気速度との関係を両対数グラフに整理すると第9図のようになり、すべての分離器についてほぼこう配は2になっている。

4. 実験結果の考察

4.1 飛沫到達距離 H の計算

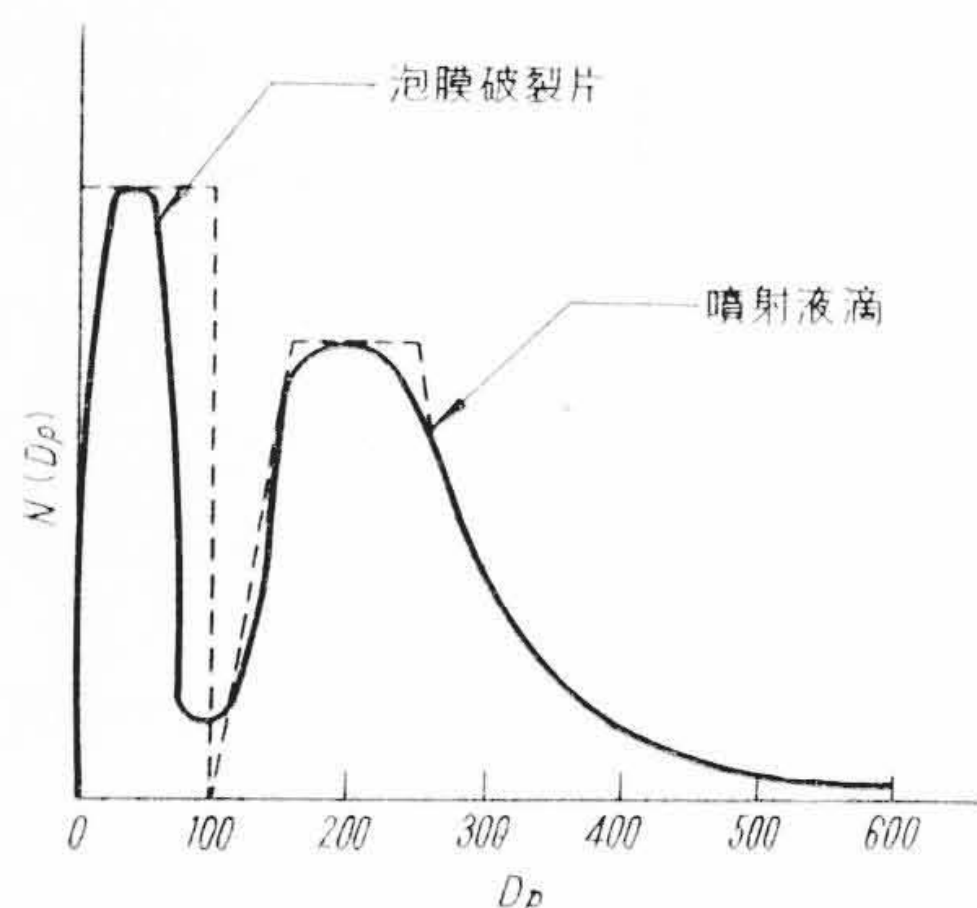
われわれは蒸気流中における飛沫の運動方程式の解を若干の仮定を置いて図式積分によって求めた⁽¹⁾。種々の蒸気速度 v_g と飛沫の粒径 D_p に対する H を計算して H を v_g に対して整理すると第10図のようになる。図からわかるように沸騰面から噴射され、重力によってふたたび沸騰面上に落下するような飛沫（落下飛沫）の到達距離 H はせいぜい 40 cm 程度であり、40 cm 以上の蒸気室にはほとんど発散した飛沫（発散飛沫）のみが存在すると考えてさしつかえない。これはすでに述べたように実験結果のうえに顕著に表われている。すなわち、 $H=40$ cm では沸騰面の変動を加味すれば大粒径の落下飛沫も蒸気流中に同伴されている。したがって、飛沫流量が極度に大きくなり、 $D.F.$ は小さくなる。一方 $H=60$ cm 以上ではほとんど発散飛沫しか存在しないため、高さによる $D.F.$ の差は認められず、しかも $H=40$ cm の場合に比して $D.F.$ は大きくなる。

4.2 $D.F.$ の計算

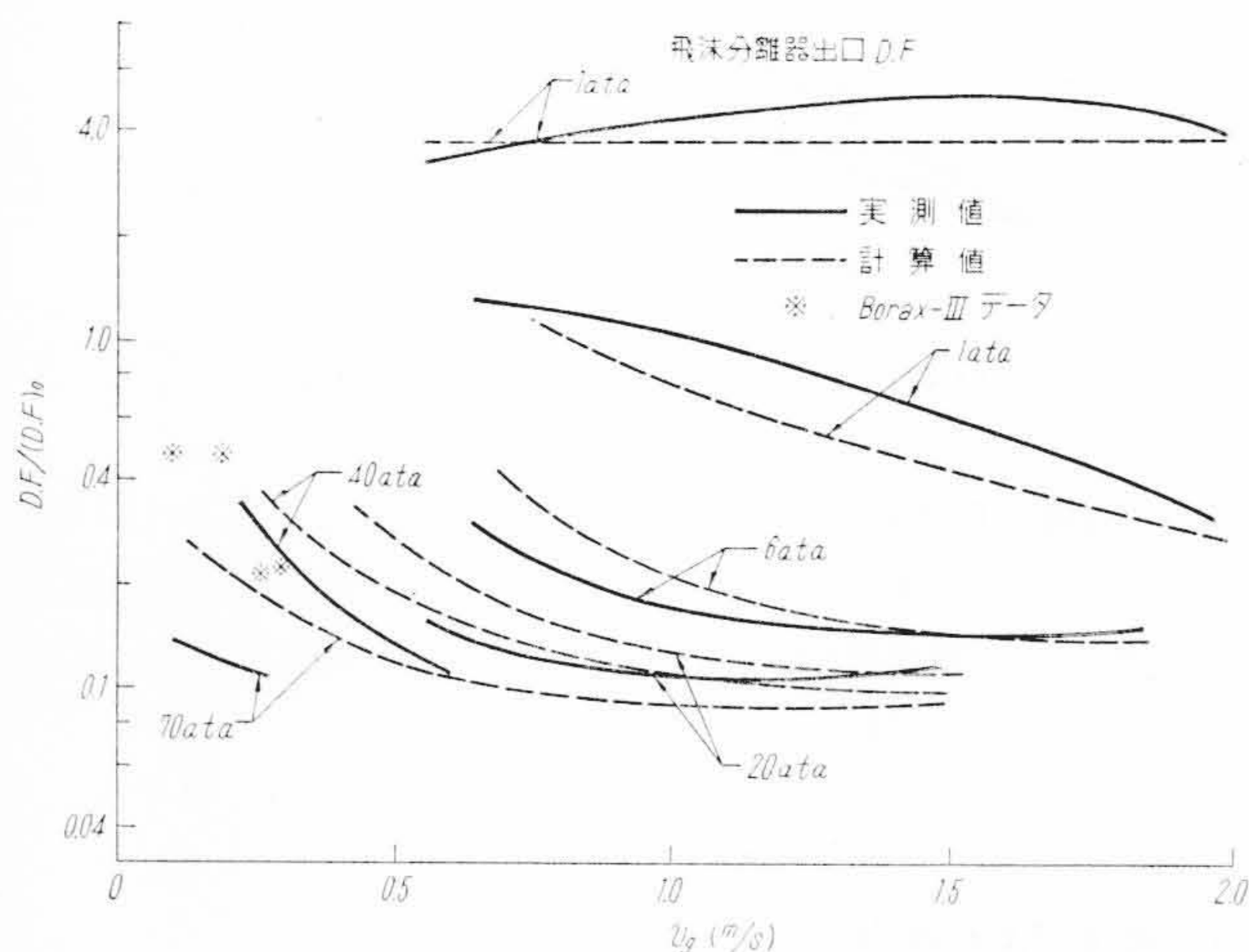
前節から $H=60$ cm 以上では発散飛沫のみを考慮すればよいことがわかったから飛沫流量の計算は非常に容易となる。すなわち、ある蒸気速度 v_g における飛沫流量 L は単位面積の沸騰面上で単位時間に発生する飛沫の個数 $N(D_p)$ と、その蒸気速度における最大発散粒径 $(D_p)_s$ がわかれば次式によって計算される。

$$L = \int_0^{(D_p)_s} N(D_p) \cdot \rho_w \cdot \frac{\pi}{6} D_p^3 dD_p \text{ (g/cm}^2 \cdot \text{s)} \dots\dots (2)$$

$D.F.$ は(1)式から $D.F. = v_g \rho_g / L$ となる。 $(D_p)_s$ と v_g との関係は飛沫の運動方程式を解くときの積分が発散しないための条件から簡単に求められる⁽¹⁾。種々の圧力に対して発散粒径 $(D_p)_s$ と v_g との関係を求めると第11図のようになる。また、われわれは $N(D_p)$ が大体第12図の実線のようになるであろうと仮定した⁽¹⁾。計算を簡単にするために点線で近似し $N(D_p)$ の関数形を決めた。これらの値を用いて計算した $D.F.$ と実験値を比較すると第13図のようになる。 $N(D_p)$ は蒸気量のみならず圧力によってもひずむことはないという大ざっぱな仮定をおいたにもかかわらず、かなりよく一



第12図 飛沫の発生分布状態



第13図 実験値と計算値との比較

致している。3.2で述べたように圧力が6 atm以上ではそれほど圧力による $D.F.$ の減少はみられず、また v_g が1.0 m/s以上になると $D.F.$ は v_g によってほとんど変化しなくなっている。これらの傾向は上記の $(D_p)_s$ と $N(D_p)$ とを考慮すれば容易に説明できる。すなわち、圧力が6 ata以上で v_g が1.0 m/s以上では $(D_p)_s$ は400 μ 以上になっている。一方、400 μ 以上の $N(D_p)$ は急激に小さくなっているため、これらの大粒径の飛沫は飛沫流量 L にほとんど寄与しなくなり、したがって $D.F.$ は一定となる。

4.3 飛沫分離器の性能

4.3.1 大気圧下における飛沫分離性能

3.3で h_1 を35 cm以下にすると急激に分離性能が低下することを知った。これは4.1で述べたように、沸騰面の変動も加味した落下飛沫の最大到達距離を H_s とすると、圧力と蒸気速度が小さい場合にはせいぜい40 cm程度であることを考慮すれば理解できる。すなわち、 $h_1 < H_s$ の場合には大量の落下飛沫が分離器に衝突して非常に大きな負荷が分離器にかかることになる。われわれが実験に用いたスクラバ、ワイヤメッシュなど蒸気と水滴との慣性の差を利用して両者を分離する方式のものはこのような目的には適していない。次に上記の分離器を $h_1 > H_s$ の条件で用いた場合には出口蒸気の $D.F.$ を 3×10^5 以上にすることができないことも知った。これは $N(D_p)$ を考えれば説明できる。いま、発散飛沫の中で100 μ 以下の微小粒径の泡膜破裂片は慣性が小さいため多少分離器の形状を複雑にしてもほとんど分離されないものと仮定して $D.F.$ を計算してみた。第13図に実験値と比較して示す。なお、計算値と実験値との傾向の違いは分離器固有の特性によるものであろう。すなわち、スクラバ、ワイヤメッシュなど慣性を利用する方式のものは一般に蒸気速度 v_g が大きくなるほど捕集効

率は良くなる。しかし、 v_g があまりに大きくなると再同伴が起きてふたたび捕集効率は低下する。

4.3.2 高圧下における飛沫分離性能

高圧になると蒸気密度 ρ_g は大きくなり水の密度 ρ_w は小さくなるため、両者の慣性の差は小さくなり捕集効率は低下する。すなわち、 $N(D_p)$ において噴射液滴の中でも小粒径のものは高圧になると分離されなくなるため、一般に $D.F.$ は減少している。しかし特に注目すべきことは前述したように蒸気流量が大きくなると $D.F.$ の急激な減少がみられることである。この主原因として二つ考えられる。まず第1に蒸気流量が大きくなると沸騰面の変動が激しくなり、瞬間的に H_s が大きくなることがあり(H_s の時間的な平均値は大きくはならない)、このときには $h_1 > H_s$ となると大量の落下飛沫が分離器に衝突する。第2に蒸気流量が大きくなると飛沫の分離器からの再同伴が著しくなることである(実験結果から大体0.6 g/cm²・s以上の蒸気流量で再同伴が著しくなる)。

いま、分離器をそう入せず $H > H_s$ を満足する場合の $D.F.$ を $D.F.$ とすると(第7図に示した $H=80$ cmの結果はこの条件を満足している)、 $h_1 > H_s$ のときには再同伴が起きても分離器出口蒸気の $D.F.$ は少なくとも $D.F.$ よりは大きい。しかし、 $h_1 > H_s$ のときには落下飛沫が分離器に衝突し、しかもこれが再同伴される場合には $D.F.$ よりも小さくなっている。さらに、再同伴が起っている場合には分離器の上端はあたかも一種の沸騰面とみなせるようになるため、 $h_2 < H_s$ のときには $D.F.$ は小さくなり、 h_2 の影響がでてくる。高圧下においてスクラバ、ワイヤメッシュなどをわれわれの行なった設定の仕方を用いるには h_1, h_2 を少なくとも H_s より大きくすべきであるが、この条件を満足させるには H が非常に大きくなり、しかも得られた蒸気純度は40, 70 ataの高圧ではたかだか $D.F.$ 程度であるからなんら使用することの意味がない。したがって高圧下において用いる飛沫分離器は十分再同伴を考慮したものでなければならない。われわれは目下そのような分離器について検討中である。

4.4 他の実験結果との比較

Shorらによって高圧下における蒸気純度の測定が沸騰水形原子炉Borax-IIIを用いてなされた⁽³⁾。圧力22 ata, 蒸発かん内径137 cm, 沸騰面からの高さは60 cm以上である。実験結果を第13図に示す。蒸発かんの内径がわれわれのものと相当に異なっているにもかかわらず、実験結果はかなりよく一致している。

5. 結 言

以上、圧力70 ataまでの実験結果と若干の仮定を基にした理論考察とから次のことが確かめられた。

- (1) 沸騰面からの高さ H が60 cm以上ではほとんど発散飛沫しか存在しないため高さによる $D.F.$ の差は小さいのに対し、40 cm以下では落下飛沫も存在するために $D.F.$ は急に小さくなる。
- (2) 一般に $D.F.$ は圧力が大きくなるほど小さくなるが、6 ata以上では圧力によってあまり $D.F.$ は変らない。しかも蒸気速度が1.0 ms以上になると $D.F.$ はほぼ一定になる。これは400 μ 以上の飛沫の発生個数が非常に少ないためである。
- (3) 高圧下においては飛沫分離器からの再同伴量が非常に大きくなるため、この点を十分考慮していない分離器は使用しないほうがよい。

参 考 文 献

- (1) 藤江, 遊佐, 青木: 日本原子力学会誌 3, 792 (1961)
- (2) J. Shor, et al: Nucl. Sci. Engng., 2, 126 (1957)