

海水淡水化装置における熱交換器

Heat Exchanger as a Seawater Desalination Plant

井上節夫* Setsuo Inoue
和泉健吉** Kenkichi Izumi

蒸発法による海水淡水化の原理は、海水を加熱蒸発させ、発生する蒸気を凝縮させることにより淡水を得る方法であり、潜熱の回収方法により多段フラッシュ法、多重効用法及び蒸気圧縮法に大別される⁽¹⁾。

多段フラッシュ法の装置は、凝縮器における有効温度差が小さく、これは蒸発室で発生する非平衡温度差の影響を強く受ける。

このため、3種の蒸発室構造について蒸発特性を実験研究し、ブライン(濃縮海水)流速、ブライン レベル、フラッシュ温度差及びブライン温度の関係を明らかにした。

1 緒 言

蒸発プロセスのうち、現在最も普及している多段フラッシュ法は、既に単基造水容量日産数万トンのプラントが建設されるに至っており、プラント規模の大形化に伴い蒸発室単位面積当たりの蒸発量を増加させる必要が生じている。この場合、フラッシュ蒸発が完了しないまま次段に流出する非平衡現象が発生する。

この非平衡現象は、凝縮器における有効温度差を低下させ、プラント効率を悪化させる原因となる。我々は、この非平衡現象について3段フラッシュ エバポレータを用い実験検討したので、以下にその概要を述べる。

2 フラッシュ蒸発における非平衡温度差

多段フラッシュ エバポレータは、図1に示すように蒸発室、凝縮器などから構成される多段圧力の熱交換器であるといえることができる。

ここで、図2により*i*段における現象を説明すると、まず*i*段蒸発室に流入するブライン(濃縮海水)は*i*段圧力の飽和温度より高い温度にあるので、*i*段に流入した瞬間に過剰の顕熱をフラッシュ蒸発により発生蒸気に放出し、温度降下する。このフラッシュ蒸発が完全に平衡に達した場合のブライン温度 T_{Fi}^* は飽和温度 T_{Si} にブラインの沸点上昇 BPE_i を加えた温度まで降下する。

$$T_{Fi}^* = T_{Si} + BPE_i \quad \dots\dots(1)$$

しかし、ブライン流速(フラッシュ蒸発室幅当たりのブライン流量)を増加させた場合、フラッシュ ブラインの滞留時間が減少し、蒸発室床面積当たりの蒸発量が増加するためフラ

ッシュ蒸発が速やかに行なわれず、蒸発が完了しないまま次段に流出してしまう現象が生ずる。

このような状態を非平衡状態と称し、このときの流出ブライン温度 T_{Fi} と発生蒸気温度 T_{vi} との差を非平衡温度差[Non-Equilibrium Temperature Difference(以下、NTDと略す)]と定義する。

$$NTD = T_{Fi} - T_{vi} \quad \dots\dots(2)$$

従って、発生蒸気温度 T_{vi} は非平衡温度差NTDが大きくなるほど低くなる。

一般に、凝縮器における伝熱速度式は次式で表わされる。

$$W_c \cdot C_p (T_{ci-1} - T_{ci}) = U_i \cdot A_i \frac{(T_{ci-1} - T_{ci})}{1^n \frac{(T_{vi} - T_{ci})}{(T_{vi} - T_{ci-1})}} \quad \dots\dots(3)$$

ここに、

W_c : 冷却水(循環ブライン)流量(kg/h)
 C_p : 冷却水の比熱(kcal/kg°C)
 U_i : 凝縮器の熱貫流率(kcal/m²h°C)
 A_i : 凝縮器の伝熱面積(m²)

以上の関係から、非平衡温度差が発生することによって凝縮器における有効温度差が小さくなり、熱交換量が減少し、そのため流入ブラインからの発生蒸気が減少し、所定の造水量が得られなくなる。従って、目的造水量を得るためには凝縮器の伝熱面積を増加する必要がある。

このように、非平衡温度差はフラッシュ エバポレータの凝縮器伝熱面積及び蒸発室形状の決定に必要、且つ重要な値である。

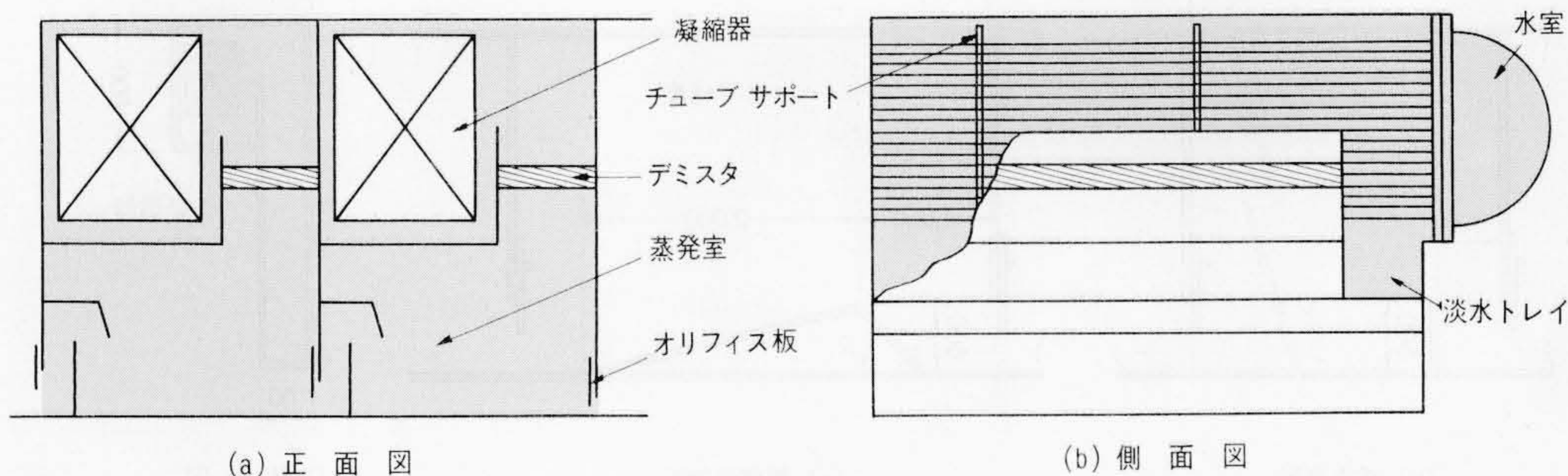


図1 多段フラッシュ エバポレータの構造 蒸発室で発生する蒸気は、デミスタで気水分離された後、凝縮器で凝縮し生成淡水となる構造である。

* バブコック日立株式会社呉工場 ** 日立製作所日立研究所

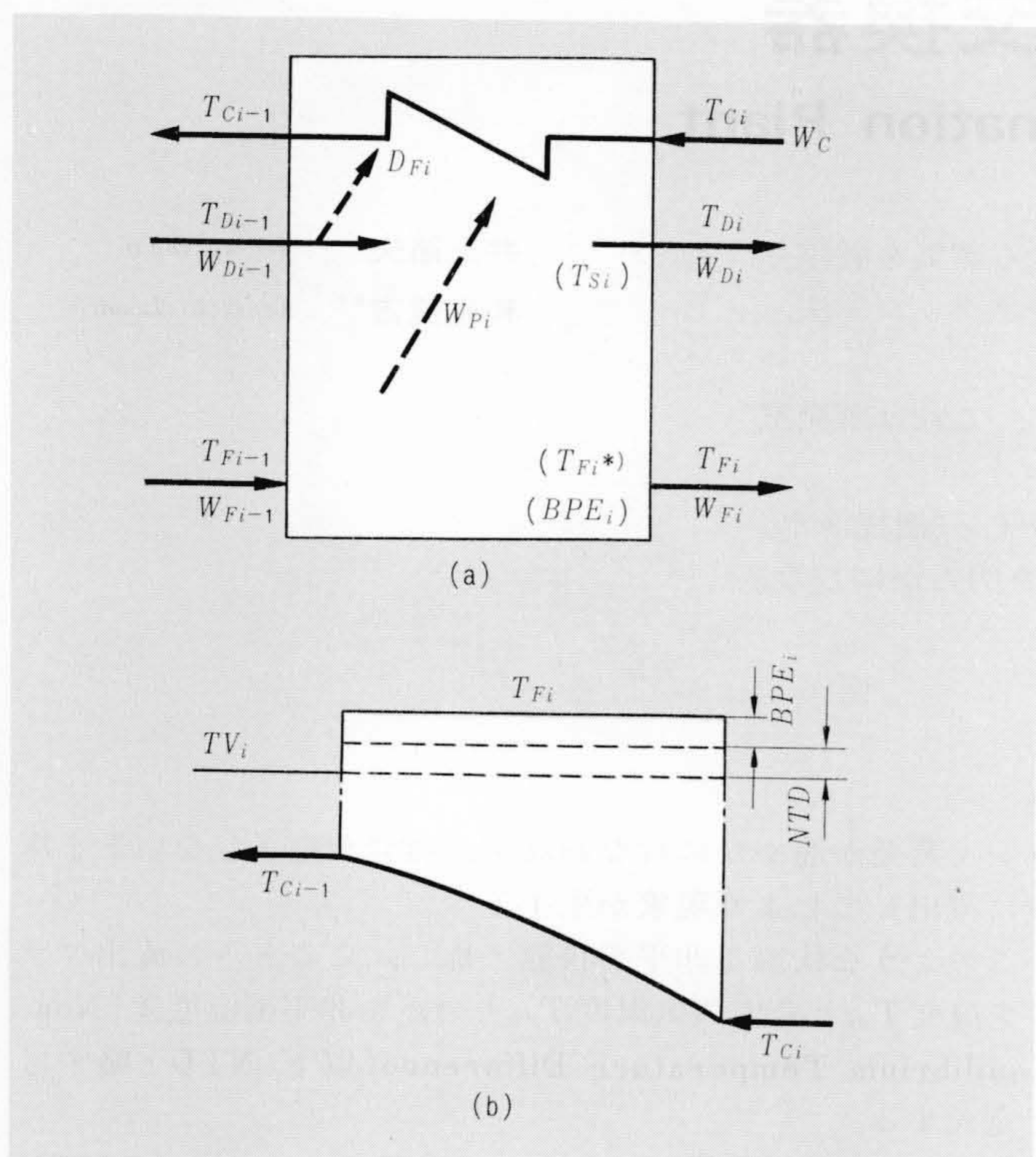


図2 多段フラッシュ エバポレータ i 段における熱及び物質収支
 i 段に流入するブラインは、 T_{Fi-1} から T_{Fi} までフラッシュ蒸発を行ない、 W_{Fi} の蒸気を発生し、その潜熱を冷却水 W_C に与え生成淡水となる。

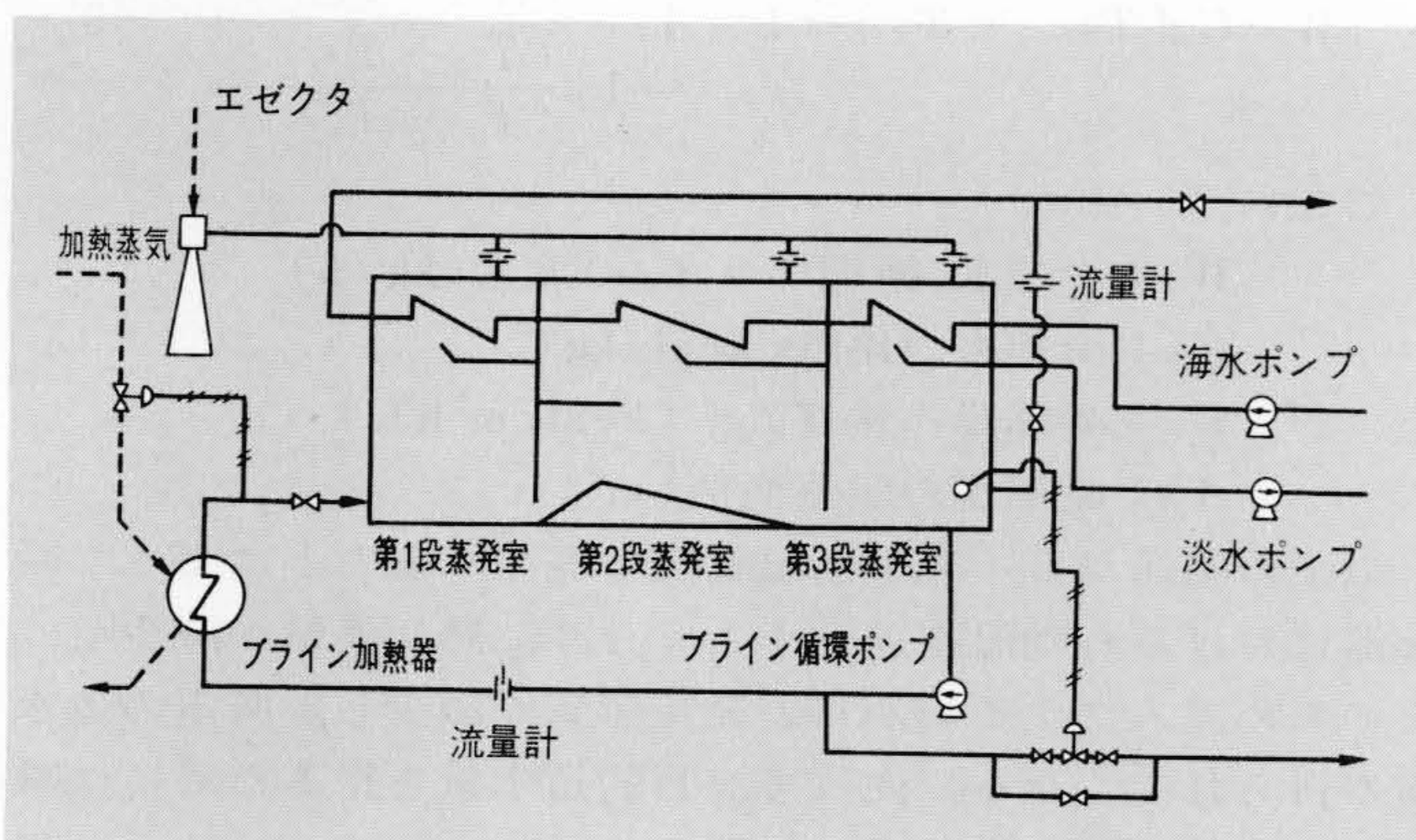


図3 実験装置系統図 使用した実験装置は、3段のフラッシュ エバポレータと補機類から構成されており、特に第2段蒸発室をテスト段として実験を行なった。

3 実験装置及び実験方法

実験装置の系統図を図3に示す。装置は3段フラッシュ エバポレータ、ブライン加熱器、エゼクタ、ポンプ及び計測制御機器から構成されている。

海水ポンプから送られた海水は、エバポレータ上部に設けられた凝縮器を通り、各段における循環ブラインからの発生蒸気を凝縮させ、昇温して第1段蒸発室を出る。この海水は一部が補給海水として流量計を通り、第3段蒸発室下部に供給され残りは排出される。

第3段蒸発室に供給された補給海水は、循環ブラインに加えられブライン循環ポンプによって循環ブラインの一部が排出される。残りの循環ブラインは、流量計を通りブライン加熱器に送られ所定の温度に加熱された後、第1段蒸発室に流入する。蒸発室に流入した循環ブラインはフラッシュ蒸発を各段で行ない、発生蒸気は凝縮器で凝縮され生成淡水となり淡水ポンプにより取り出される。また、未蒸発の循環ブラインは再循環され蒸発を繰り返す。以上が実験装置の系統である。

特に、本実験装置は第2段を実験段とし、蒸発室には多数の熱電対を設置して発生蒸気及びブラインの温度を測定した。また、実験段蒸発室側面の一方に透明なアクリル板を取り付け、フラッシュ状態を観察した。

実験は図4に示した3種の蒸発室構造について行なわれた。

(1) オリフィス形構造

蒸発室には何も設置せずに、各段間ブライン レベルを調節するためのオリフィスだけの構造である〔図4(a)〕。

(2) 垂直堰形構造

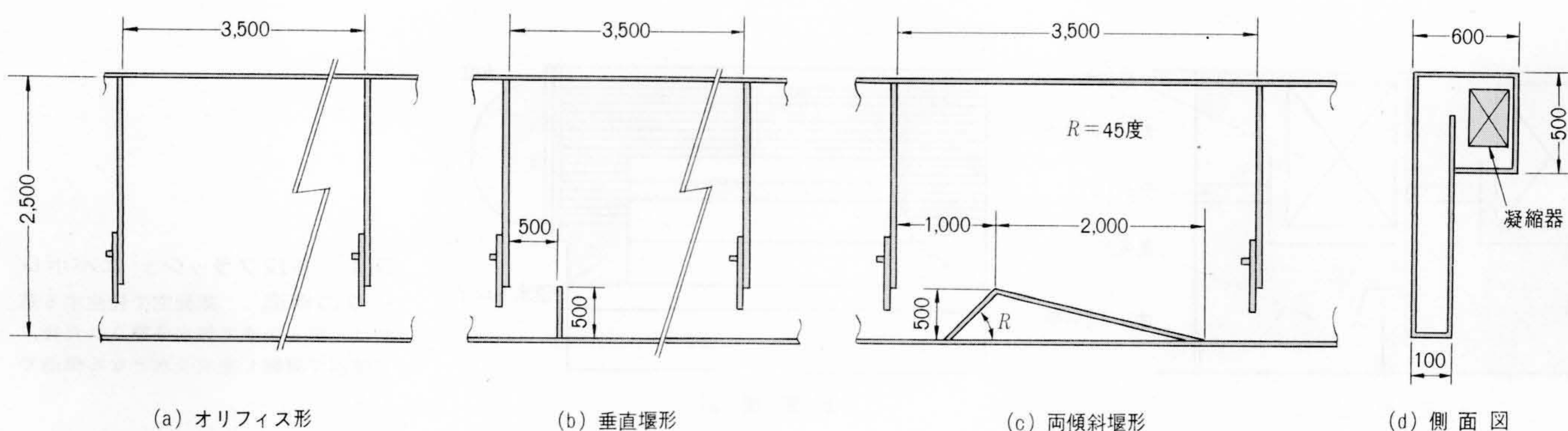
オリフィスの後に垂直の堰を設け、オリフィスからのフラッシュ ブラインを衝突させ攪拌させることによって蒸発を促進させる構造である〔同図(b)〕。

(3) 両傾斜堰形構造

オリフィスの後に山形の堰を設け、堰部における圧力損失を小さくし、ブライン レベルを浅くし蒸発を促進させる構造である〔同図(c)〕。

操作条件としては主として、ブライン流速、フラッシュ温度差、ブライン レベル及びブライン温度について次に述べる条件の範囲で実験した。

- (a) ブライン流速：600～1,800 t/hm
- (b) フラッシュ温度差：1.0～3.5℃
- (c) ブライン レベル：150～530 mm
- (d) ブライン温度：40～60℃



注：単位 (mm)

図4 3種類の蒸発室構造(第2段テスト段) 実験した3種の蒸発室構造を示す。テスト段の寸法は、高さ2.5m、長さ3.5m、幅0.1mである。

使用海水は、茨城県久慈浜海岸から採水したものを循環使用した。

4 実験結果及び考察

4.1 フラッシュ蒸発の状況と温度分布

図5にフラッシュ蒸発の状況と温度分布の一例を示す。温度測定は同図(a)に示すような測定点でブライン及び発生蒸気温度を測定した。

同図(b)は測定結果を示すもので、第1段流出ブラインは第2段蒸発室に流入した瞬間に激しいフラッシュ蒸発を行ない、蒸発室出口部に向かって温度降下する。一方、発生蒸気温度は、蒸発室長さ方向に対しほとんど温度差が見られない。

同図(c)は第2段入口部での激しいフラッシュ蒸発の状況を示している。

4.2 ブライン流速の影響

図6にブライン流速の非平衡温度差への影響について、オリフィス形、垂直堰形及び両傾斜堰形の各段間構造における実験結果を示す。

ブライン流速の非平衡温度差への依存性は大きく、ブライン流速が100 t/hm増加すると、非平衡温度差は0.05～0.15℃の範囲で増加している。3種の段間構造のうち、非平衡温度差が最も小さいのは両傾斜堰形であり、最も大きな値を示したオリフィス形に比べおよそ0.5℃低い値を示した。

オリフィス形についてW.R.Williamsonらの実験結果⁽²⁾と比較すると、±0.05℃の範囲で一致している。

4.3 フラッシュ温度差の影響

図7にフラッシュ温度差の非平衡温度差への影響を示す。

フラッシュ温度差が増加するに従い、非平衡温度差は減少する傾向を示した。これはフラッシュ温度差の増加に伴いフラッシュ蒸発の推進力が増大し、ブラインからの発生蒸気泡の離脱が容易に行なわれるためと考えられる。しかしフラッシュ状態の観察では、フラッシュ温度差の増加につれてフラッシュブラインのスプラッシュが激しく行なわれるため、ブライン飛沫に伴う気水分離についての考慮が必要である。

4.4 ブラインレベルの影響

図8にブラインレベルの非平衡温度差への影響を示す。

ブラインレベルの増加により、同一ブライン流速においては滞留時間が増加するが、実験結果ではブラインレベルの増加に伴い非平衡温度差も増加する傾向を示した。これは、ブラインの滞留時間以上に液深の増加に起因する沸点上昇によるものと考えられる。

4.5 ブライン温度の影響

図9にブライン温度の非平衡温度差への影響を示す。

実験結果からブライン温度が10℃上昇することにより、非平衡温度差はおよそ0.15℃減少する傾向を示した。これは、ブラインが高温になるほど発生蒸気の比容積量が小さくなり、フラッシュ蒸発が速やかに行なわれるためと考えられる。

4.6 蒸発室長さに対する蒸発特性

蒸発室長さ方向の蒸発特性を知るために、蒸発室長さに対してフラッシュ蒸発がどの程度まで完了しているかをフラッシュ温度差($T_{Fn-1} - T_{Fn}$)に対する非平衡温度差(NTD)の割合で検討した。この割合を非平衡度(α)と定義し(4)式で表わした。

$$\alpha = NTD / (T_{Fn-1} - T_{Fn}) \cdots \cdots (4)$$

図10は各蒸発室長さにおける非平衡度をプロットしたもので、ブライン流速が増加するにつれ非平衡度が大きくなり、必要蒸発室長さも増すことを示している。また、非平衡度は

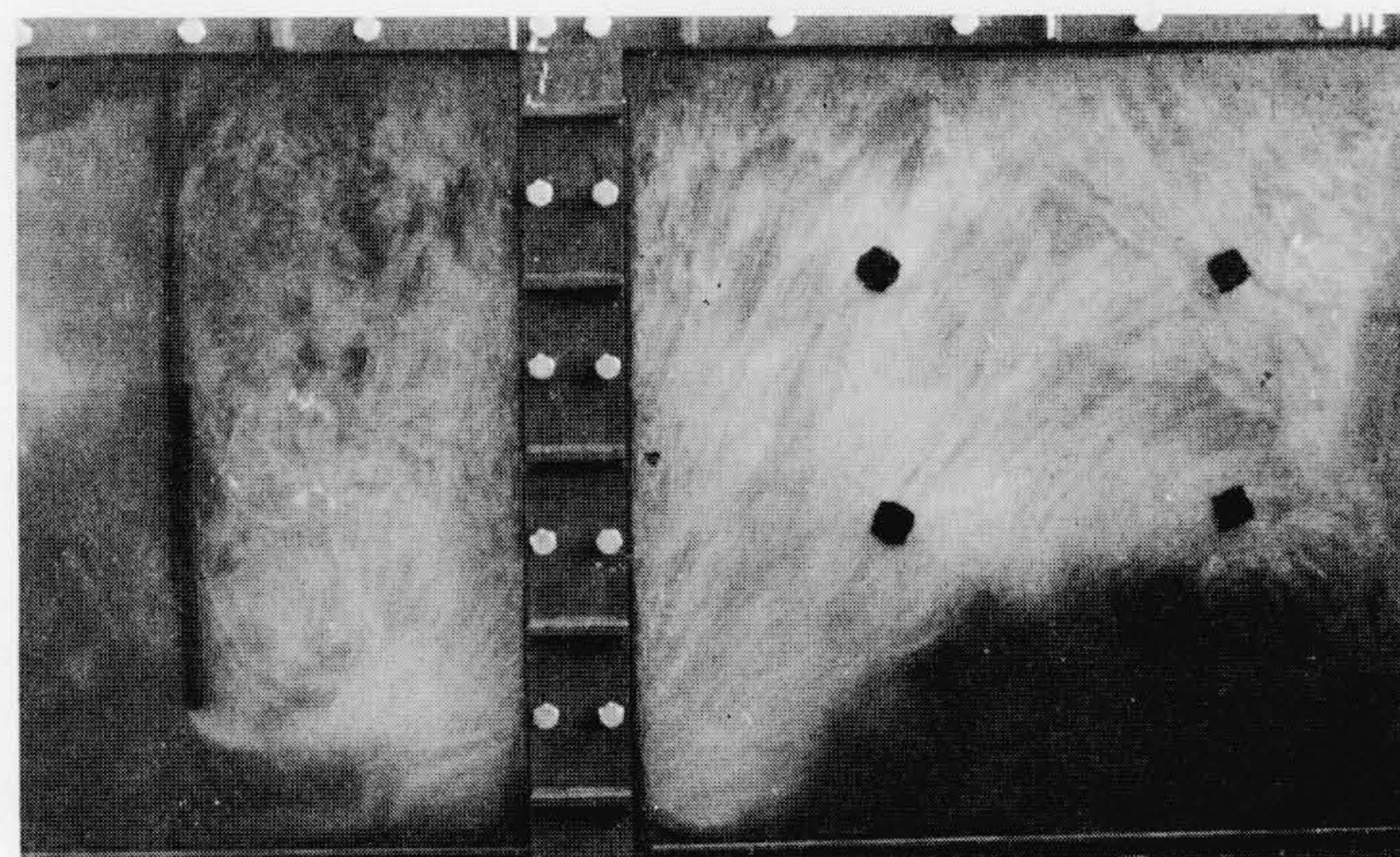
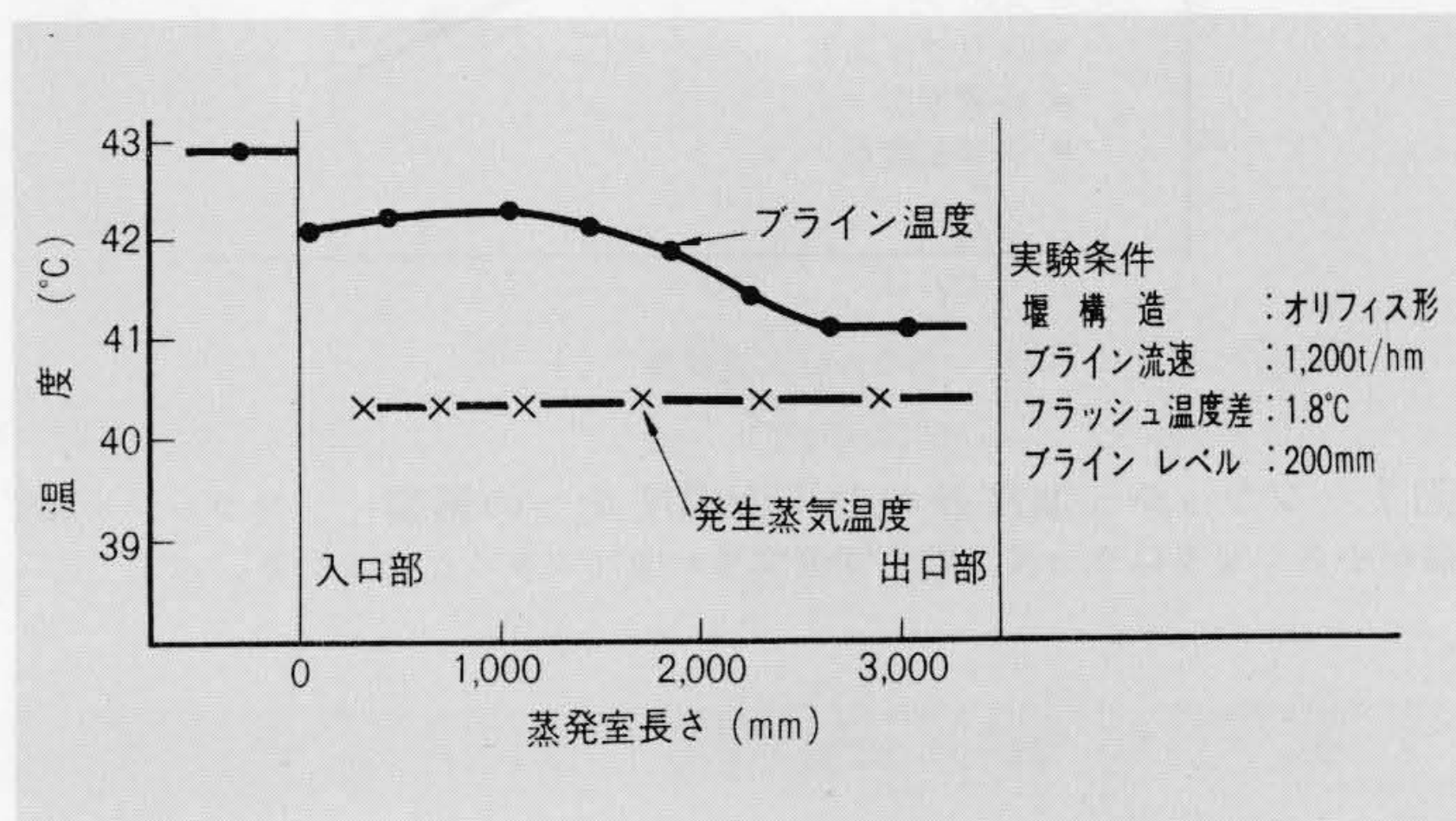
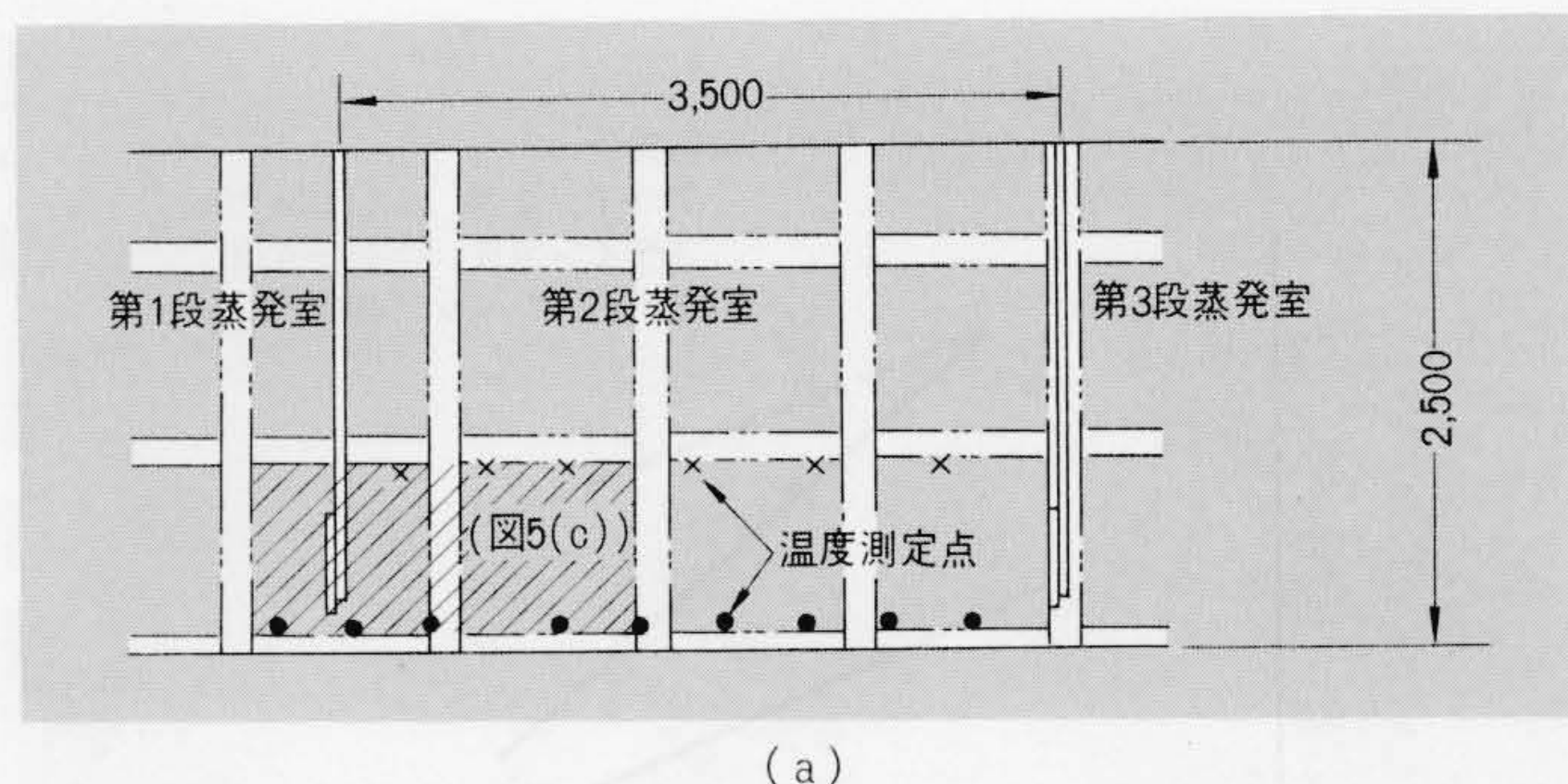


図5 フラッシュ蒸発の状況と温度分布 (a)に温度測定位置、(b)に測定結果に基づく蒸発室温度分布、(c)にそのフラッシュ状況の写真を示す。これらからフラッシュ蒸発現象が分かる。

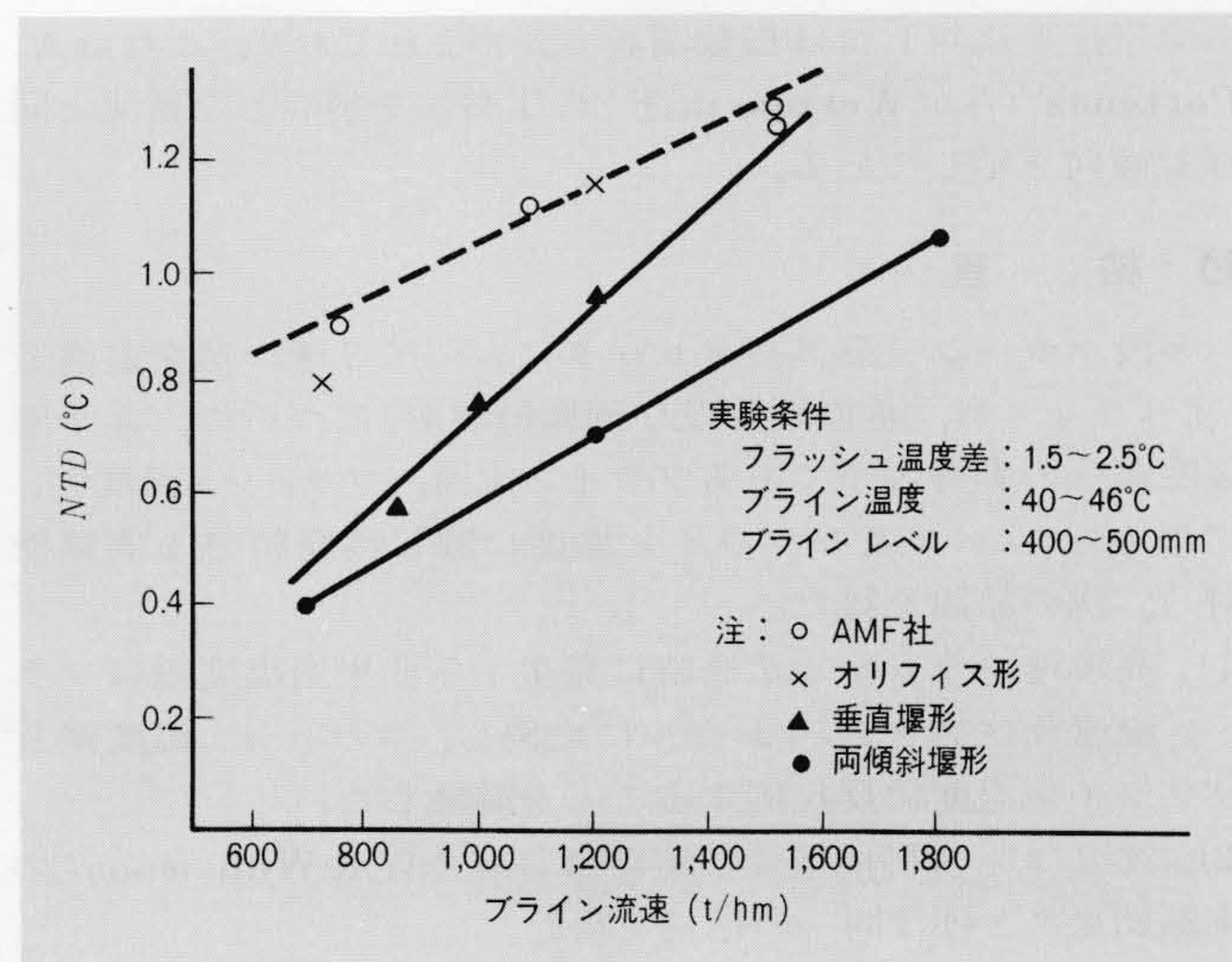


図6 ブライン流速の非平衡温度差への影響 ブライン流速に比例して、非平衡温度差が増加することを示している。また、両傾斜堰形は非平衡温度差の発生が小さいことが分かる。

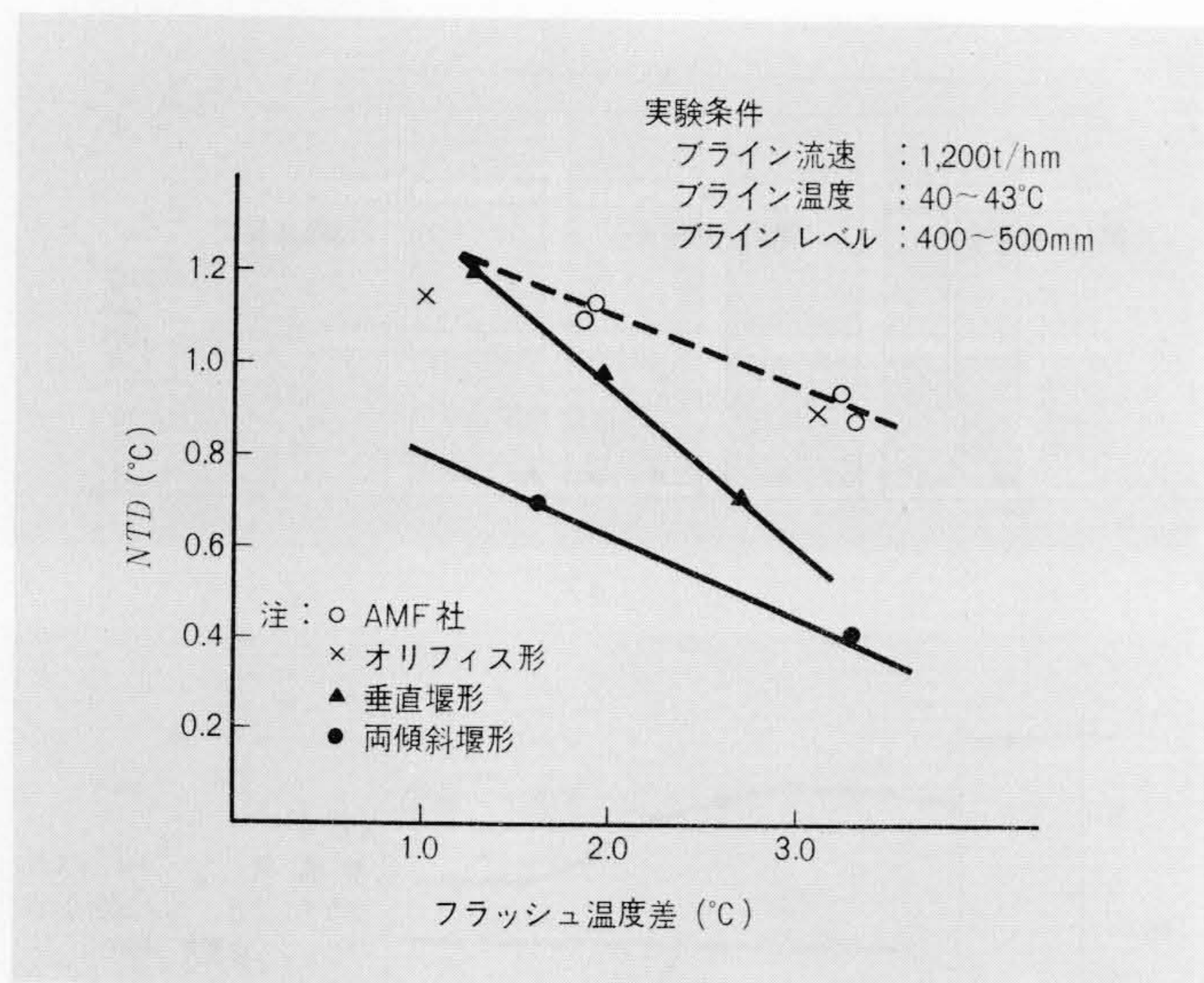


図7 フラッシュ温度差の非平衡温度差への影響 フラッシュ温度差が小さくなるに従って、非平衡温度差が増加することが分かる。

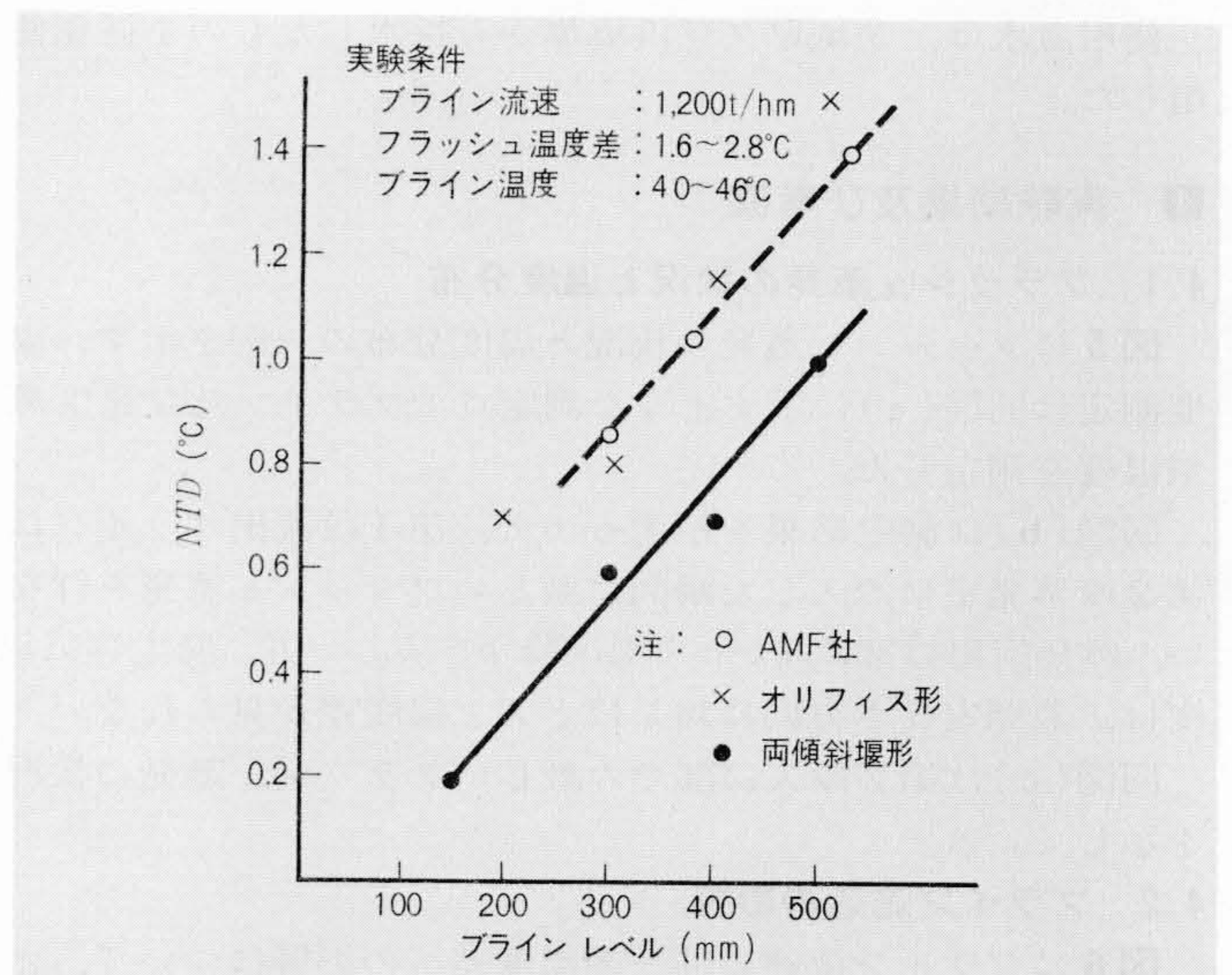


図9 ブライン温度の非平衡温度差への影響 ブライン温度の上昇に伴い、わずかながら非平衡温度差が減少することが分かる。

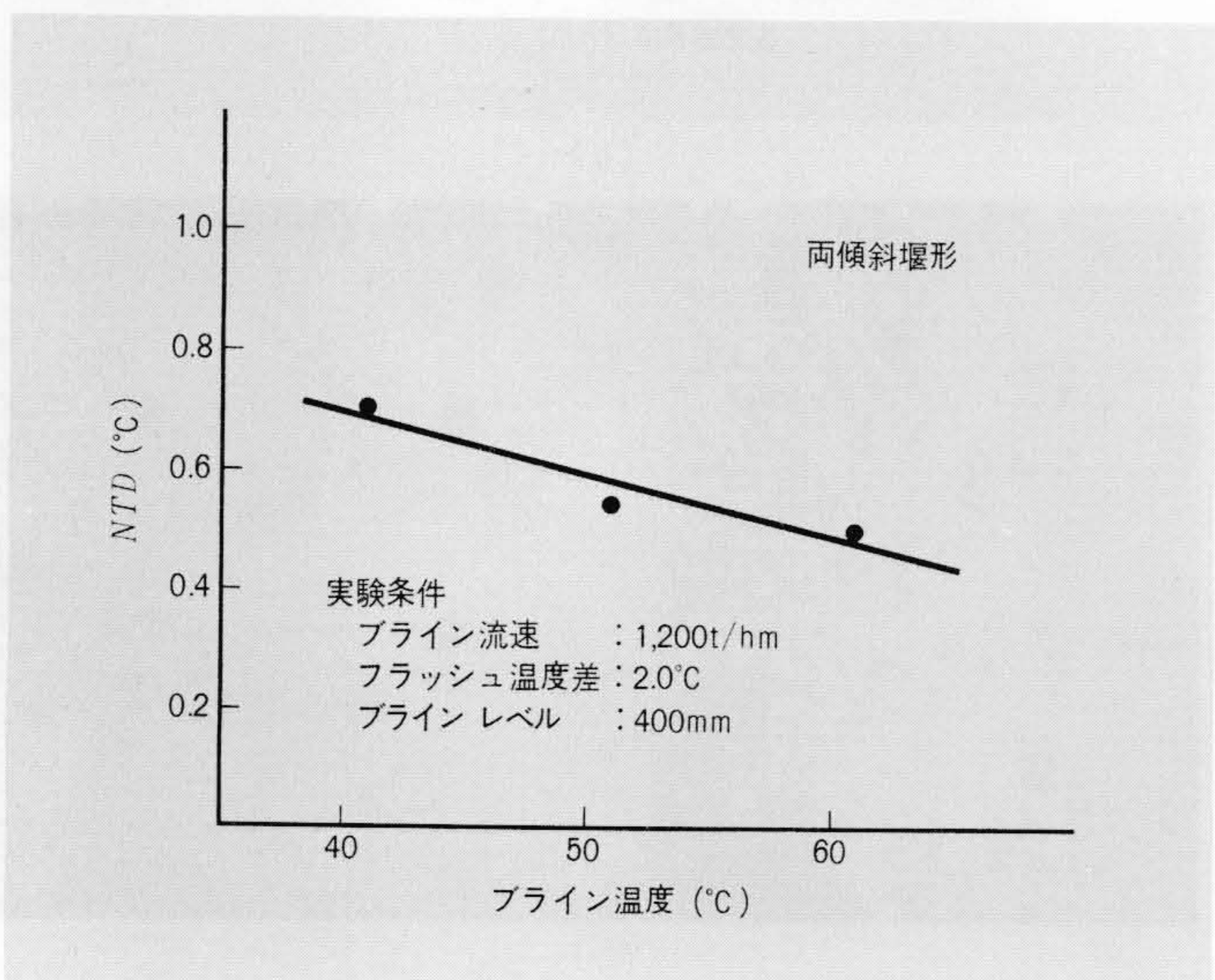


図8 ブライン レベルの非平衡温度差への影響 ブライン レベルの増加に比例して、非平衡温度差も増加することが分かる。

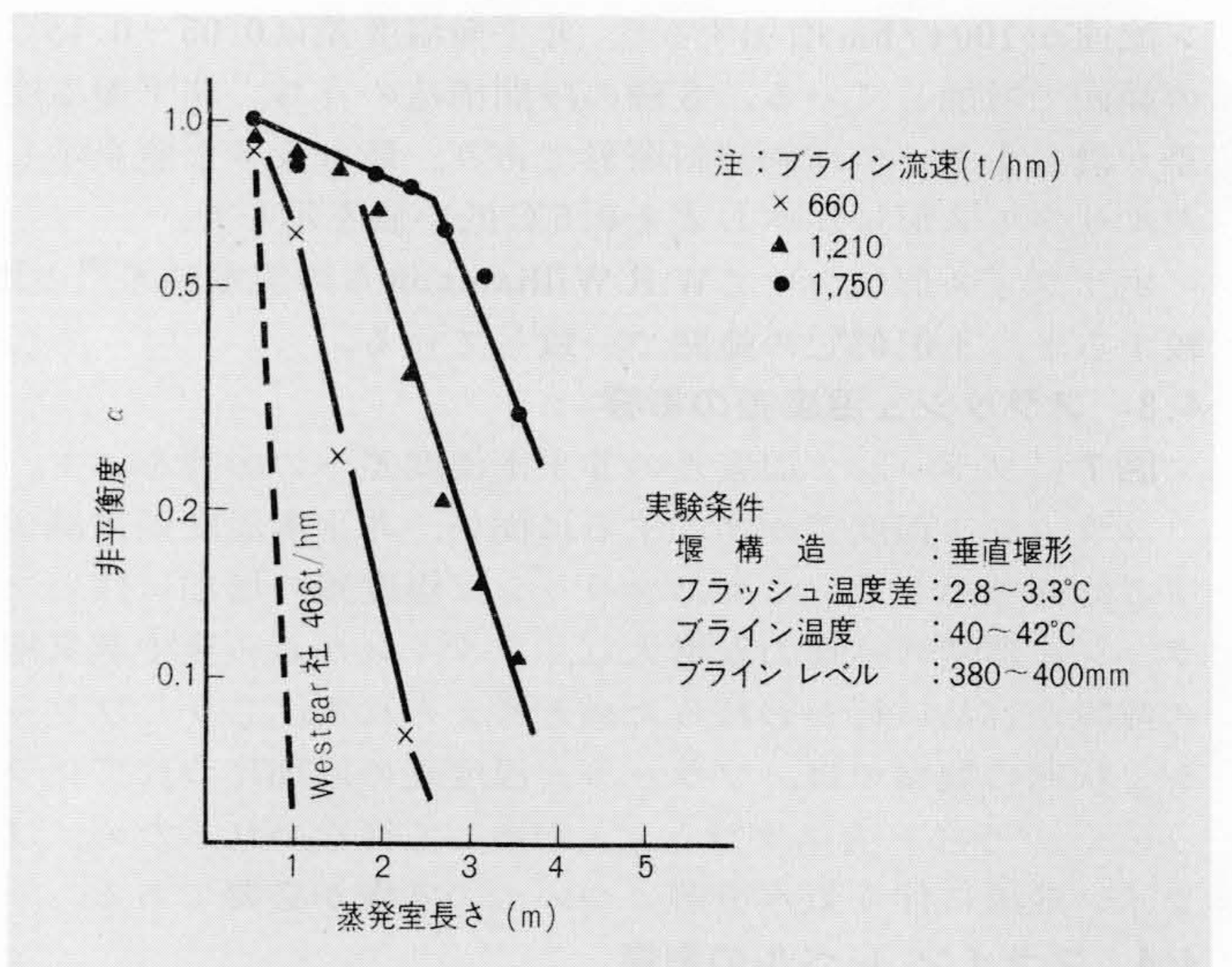


図10 蒸発室長さに対する非平衡度の関係 ブライン流速の増加に比例して、必要蒸発室長さが増加することが分かる。

蒸発室長さに対しほぼ指数関数で表わされており、これは A. Porteous⁽³⁾らが Westgarth 社⁽⁴⁾の実験値を解析した結果と同様な傾向を示している。

5 結 言

多段フラッシュ形エバポレータにおいて 3 種の蒸発室構造 (オリフィス形、垂直堰形及び両傾斜堰形) について、非平衡温度差への影響因子であるブライン流速、フラッシュ温度差、ブライン レベル及びブライン温度に関し蒸発特性を実験検討し、次の結論を得た。

- (1) 高流速フラッシュ蒸発時に発生する非平衡温度差はブライン流速及びブライン レベルに比例し、フラッシュ温度差及びブライン温度に反比例することを確認した。
- (2) オリフィス形構造での実験において W.R. Williamson らの実験結果⁽²⁾ とほぼ同一の結果を得た。
- (3) 垂直堰形及び両傾斜堰形構造については、それぞれ異なった特性を示し、特に両傾斜堰形はブライン流速 700t/hm 以上において著しく非平衡温度差を減少させること、また、ブラ

インの流動状態も速やかであることを確認した。

以上、筆者らは今後これらの実験検討から得られた蒸発室構造に対する蒸発特性をもとに、優れたフラッシュ エバポレータの設計を行なってゆく考えである。

参考文献

- (1) 吉原ほか「日立の海水淡水化装置」火力原子力発電 第221号 (1975)
- (2) W. R. Williamson, F. W. Gilbert, "Investigation of Multistage Flash Phenomenon in a Three Stage Test System", O. S. W R & D Report No. 525 (1970)
- (3) A. Porteous and R. Muncaster, "An Analysis of Equilibration Rate in Flashing Flow with Particular Reference to The Multistage Flash Distillation Process", 3rd International Symposium on Fresh Water from The Sea, 1, 145 (1970)
- (4) Richardsons Westgarth & Co. Ltd., "Chamber Geometry in Multistage Flash Evaporators" O. S. W R & D Report No. 108 (1964)