

ナトリウム中の粒状不純物挙動試験

— 磁気フィルタおよびメッシュフィルタによる捕集 —

1981年1月

動力炉・核燃料開発事業団

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター

システム開発推進部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor
and Nuclear Fuel Development Corporation 4002, Narita O-arai-machi Higashi-
Ibaraki-gun, Ibaraki, 311-14, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation)

ナトリウム中の粒状不純物挙動試験

— 磁気フィルタおよびメッシュフィルタによる捕集 —

佐々木 修^{**} 西沢 賢二^{*} 姫野 嘉昭^{*}
服部 直三^{*} 井口 達郎^{*}

要 旨

高温で長時間使用されるナトリウム試験施設では粒状不純物が特定場所に堆積する。同様なことはFBRの冷却系でも起こり、特に一次系では放射性腐食生成物の堆積は周囲の放射線レベルを増加させることが考えられる。粒状不純物に関しては、これまで断片的な実験情報が得られているのみで系統的なR & Dは行われていない。従ってFBRの冷却系でこれら粒状不純物が、いかなる挙動を示すかは明らかではなかった。こゝでは粒状不純物の成分組成、濃度、粒径分布および捕集方法に関する情報を得る目的で一連の試験を行った。捕集手段として機械的な方法であるメッシュフィルタと電磁気的な方法である磁気フィルタを用いた。

本試験結果を要約すると以下の通りである。

- (1) 使用した試験装置の粒状不純物濃度は1～5 ppbで、ループ主循環系の流速に強く依存し、粒子の沈降が濃度を支配する。
- (2) 厳密な粒径分布の測定は今後の課題であるが、捕集された粒状不純物の粒径は50 μmからサブミクロンまでの広い範囲にまたがり、2～3 μmにピークが認められた。
- (3) 粒状不純物の主成分はFe (18～43%)、Cr (44～18%)、Mn (4～9%)、Ni (2～3%)、Si (3～4%)であった。
- (4) 粒状不純物の捕集手段として今回使用したメッシュフィルタ、磁気フィルタはともに有効であった。

* 大洗工学センター，ナトリウム技術部，ナトリウム流動伝熱試験室

** 現在，高速増殖炉開発本部

Behavior of Particulate Impurities in Sodium System

—Tests by Mesh-type and Magnetic-type Filters—

S.Sasaki**, K.Nishizawa*, Y.Himeno*,
N.Hattori* and T.Iguchi*

Abstract

In an sodium test facility, particulate impurities are accumulated with time progresses when it has been operated for long period of times at elevated temperatures. Similar event may also be happen in coolant systems of LMFBR. In particular, deposition of radioactive corrosion products in sodium components and in pipings of a primary coolant system of the reactor may causes in high radiation background around them. But, the fact is that behavior of particulate corrosion products in sodium system is not well understood. No information is available, except few experimental findings.

To meet the requirement, a series of tests have been conducted placing their emphasis on determinations of particle sizes, elements compositions, and concentration of particulate in flowing sodium system. Mesh-type and magnetic-type filters were used for these purposes. Results here obtained are summerized as follows.

- (1) Particulate concentrations of the present sodium loop ranged from 1~5 ppb depending strongly upon flow velocity in main sodium curculation piping. This suggests that concentration is being controlled by settling of particles.
- (2) Particle sizes determined ranged from sub-micron to 50 μm , while their mean radius was 2-3 μm .
- (3) Main compositional elements of particulates were Fe

* Fluid Dynamics Section, Sodium Engineering Division, O-arai Engineering Center, PNC.

** Present Position; Fast Breeder Reactor Development Project.

- (18-48%), Cr (4.4-18%), Mn (4-9%), Ni (2-3%), and Si (3-4%).
- (4) Both the present mesh-type and magnetic-type filters worked effectively for collecting and trapping particulates in the loop sodium.

目 次

1.	ま え が き	1
2.	試験装置と試験方法	2
2.1	大型高温ナトリウムループによる試験	2
2.2	小型ナトリウムループによる試験	3
2.3	捕集した粒状不純物の回収と分析	3
3.	試験結果	5
3.1	大型高温ナトリウムループ中の粒状不純物	5
3.1.1	メッシュフィルタによる結果	5
3.1.2	磁気フィルタによる結果	6
3.2	磁気フィルタ特性試験	8
3.2.1	水ループによる基礎試験	8
3.2.2	小型ナトリウムループによる試験	9
4.	考 察	11
5.	まとめと今後の検討	15
5.1	ま と め	15
5.2	今後の検討	15
	謝 辞	17
	参 考 文 献	18

List of Figures

Fig. 1	Location of the Samplers in Sodium Flow Test Loop (2MW Loop).....	34
Fig. 2	Isometric Diagram of Hot Leg Sampling Test Section...	35
Fig. 3	Isometric Diagram of Cold Leg Sampling Test Section.....	36
Fig. 4	Schematic of Mesh Filter Unit.....	37
Fig. 5	Flow Diagram of Magnetic Filter System.....	38
Fig. 6	Structure of 2MW Loop Magnetic Filter Unit.....	39
Fig. 7	Recovery of Magnetite and Hematite vs Applied Magnetic Field.....	40
Fig. 8	Magnetic Flux Density vs Applied Current.....	41
Fig. 9	Distribution of Magnetic Flux Density.....	42
Fig. 10	Flow Diagram of Acoustic Device Test Loop.....	43
Fig. 11	Schematic Drawing of Magnetic Filter Unit and Holder.....	44
Fig. 12	Schematic Drawing of Sodium Sampler.....	45
Fig. 13	Dependent of Particulate Concentration on Flow Velocity in Main Piping of the Loop.....	46
Fig. 14	Trapped Particulate Weight vs Sodium Flow Relationship by Magnetic Filter.....	47
Fig. 15-a	Distribution of Particle Size Trapped by Magnetic Filter (Run No.EF-2, Inlet Side).....	48
Fig. 15-b	Distribution of Particle Size Trapped by Magnetic Filter (Run No.EF-2 Center & Outlet Side).....	48
Fig. 16-a	Magnetization Curve (Run No.EF-2).....	49
Fig. 16-b	Magnetization Curve (Run No.EF-3).....	49
Fig. 17	Magnetic Filter Performance Test by Water -1.....	50
Fig. 18	Magnetic Filter Performance Test by Water -2.....	51

Fig. 19 Magnetic Filter Performance Test by Water -3.....52

Fig. 20 Flow Diagram of Magnetic Filter Water Flow Test
Loop.....53

Fig. 21-a Distribution of Particle Size (Run 2-1 Inlet
Sodium).....54

Fig. 21-b Distribution of Particle Size (Run 2-1 Media).....54

Fig. 22 Comparison between Fe, Cr and Ni Solubilities in
Sodium and in Stainless Steel Sodium Loop.....55

List of Tables

Table 1	Procedures for Analysis and Measurements of Particulates.....	20
Table 2	Test Conditions and Data by Mesh Filter Type Particulate Samplers.....	21
Table 3	Test Conditions and Data by the Magnetic Filter.....	22
Table 4	Mass Spectroscopic Analysis of Particulate Impurities Trapped by 2MW Loop Magnetic Filter.....	23
Table 5	Chemical Analysis of Particulate Impurities Trapped by 2MW Loop Magnetic Filter.....	24
Table 6	Chemical Analysis of Impurities in Filtrated Solution.....	25
Table 7	Result of Once Through Test by Water.....	26
Table 8	Result of Recirculation Test by Water.....	27
Table 9	Result of Once Through Test by Sodium.....	28
Table 10	Result of Recirculation Test by Sodium.....	29

List of Photgraphs

- Photo. 1 Optical Micrographs of Particulates Collected by
 the Cold Leg Sampler (Run No.C-1-2).....30
- Photo. 2 Scanning Electron Micrographs of Particulate
 Collected by the Hot Leg Sampler (Run No.H-1-10)...31
- Photo. 3 Photographs of Particulates Recoverd from Media
 the Magnetic Filter (Run No.EF-2).....32
- Photo. 4 Scanning Electron Micrographs of Particulates
 Collected by the Magnetic Filter (Run No.EF-5).....33

1. ま え が き

長期間使用されたナトリウム試験装置では固体の微小粒子状不純物、いわゆる粒状不純物が蓄積されていく。予備的に行った分析では閉塞を起した配管ナトリウムからmg オーダの粒状不純物が回収され (APPENDIX-1), またナトリウム流動耐久試験を実施した模擬燃料集合体の表面残留ナトリウムからも同程度の量の粒状不純物が回収されている。化学分析によると、これら回収された粒状不純物はFe, Cr, Mn, Niなどを主成分とし、配管構造物材料であるSUS304鋼とほぼ類似な組成を成している。このためこれらは、ナトリウムによる腐食生成物であると推定された。

粒状不純物の生成、移行、蓄積は、高速炉一次冷却系の運転管理に大きな影響を与える。すでに商用軽水炉ではその対応策が試みられているが、放射性C.P.(腐食生成物)の配管付着や特定機器への推積は周囲の放射線レベルの上昇を来す。しかし、粒状不純物に関する実験情報が非常に限られているため現状では高速炉一次系内のかかる現象を正確に評価することができない。このためには最少限①粒状不純物濃度、②粒径分布、③成分組成などの実験情報が必要である。

本試験は粒状不純物の分離、回収に関する技術開発を計るとともに、それらの濃度、粒径分布、成分組成などに関するデータを得ることを目的として実施された。前者の技術開発としては①メッシュフィルタと②磁気フィルタを使用しそれらの有効性を検討した。後者の粒状不純物の性状については大型高温ナトリウムループであるナトリウム流動伝熱試験装置(2MWループ)からの捕集粒状不純物の実験的な調査、検討を行うとともに、小型ナトリウムループ(高温音響機器試験装置)での試験も実施した。

脚註* 粒状物そのものの分離、回収に関する技術開発はナトリウム分析室で行われている。

2. 試験装置と試験方法

試験は粒状物に関する諸データを得ることを目的とした(1)大型高温ナトリウムループによる試験と磁気フィルタの特性評価を目的とした(2)小型ナトリウムループによる試験の二つに分けて行った。(1)ではナトリウム中から回収された粒状不純物の濃度、粒径、成分組成を決定し、(2)では磁気フィルタの捕集効率を検討した。

2.1 大型高温ナトリウムループによる試験

使用したループのフローシートをFig.1に示す。このループは昭和46年以降今日まで高温部600℃でほぼ連続的に運転されて来た(約30,000時間)唯一の大型ループである。このため粒状不純物の生成・蓄積量も高いことが予想され本件のR & D対象ループとして適切と考えた。粒状物捕集フィルタの取付場所はFig.1中に図示したように、ループ高温部(図中の⑧)、低温部(図中の⑨)、およびループ側とストレージタンクを結ぶ再循環系(図中の⑩)の3ヶ所で、フィルタの型式は前二ヶ所がメッシュ型フィルタ(多孔焼結ステンレスフィルタ)、他の一ヶ所が磁気フィルタである。各フィルタについて以下に説明を加える。

(1) メッシュ型フィルタ

ループ高温部のメッシュフィルタ(以下、ホットレグサンプリング装置と記す)周りの配管をFig.2に示す。また低温部のメッシュフィルタ(以下、コールドレグサンプリング装置と記す)周りの配管をFig.3に示す。ホットレグサンプリング装置はFig.2に図示したように、横置きU字管(管径3/8インチ)にフィルタユニットを2個取り付けたものを1組としこれらが3組並列にならべられループ側配管に溶接固定されている。コールドレグサンプリング装置は同様のU字管にフィルタユニット1個が組込まれ、ループ側配管との固定はくい込み継手を使用している。これらのフィルタは試験開始前にループに組み込み、試験後取り外して内部に捕集された粒状不純物を回収した。

次にフィルタユニットの断面形状をFig.4に示す。内部のメッシュフィルタ素子はSUS304製で異なるメッシュサイズから成る金鋼5枚を重ね合わせ焼結したもの(商品名ポロプレートフィルタ)である。フィルタユニットのボディは文献1に示されるようなフランジ方式によるものも考えられるが、安全性と信頼性を考慮しネジ込みにより構造上の強度を保った上でリップシール溶接を行った。

(2) 磁気フィルタ

数多くあるR & Dの中でも磁気フィルタをナトリウムに応用したのは今回の試験が初めてである。このため設計仕様の決定に際してはすでに実績のある工業排水浄化用磁気フィルタを参考にした。Fig.5に本試験用に開発した磁気フィルタの断面図を示す。同図はナトリウム配管に対し直角方向に切断した時の断面を示すが、電磁石の2つのポールピス間の中央に

磁性細線を充填したナトリウム配管（フィルタユニット）が設置されている。電磁石の電流は数+アンペアで、またコイルの発熱は油冷却系で除去される。使用したフィルタユニット部の側部からの図をFig.6に示す。内部には高勾配磁場を得るため強磁性体であるSUS430の編み込み細線（以下メディアと称する）が充填されている。このメディアの耐ナトリウム腐食性については、別途試験を行い使用ナトリウム温度240℃程度では問題のない事を確認している（APPENDIX-2参照）。

APPENDIX-3に高勾配磁気分離による磁性粒子の捕集理論を示した。これから明らかなように捕集効率の向上のためには磁場強度を上げるとともにフィルタユニット部の流速を遅くしなければならない。これらのパラメータを定量的に把握するため磁気フィルタで粒径0.4～20 μm の強磁性体（ Fe_3O_4 ）と常磁性体（ $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ）粒子を用いた水試験を行った。その結果Fig.7に示すように常磁性体でも磁場強度9 KGussにすると流速150～200m/hr（流量で7～10 ℓ/min に相当）で捕集効率がほぼ80%以上となる知見を得た。このデータに基づいて本磁気フィルタは最大磁場強度9 KGussとして設計した。参考までに磁気フィルタ製作後に測定した励磁電流と磁束密度の関係をFig.8、磁束密度の分布をFig.9に示す。

2.2 小型ナトリウムループによる試験

ナトリウム中での使用実績が全く無い磁気フィルタの捕集効率を測定するのがこの試験の目的である。使用したループのフローシートをFig.10に示す。磁気フィルタの上流側と下流側に捕集効率決定のためのサンプリング部（Fig.12）が設けられている。試験ではすでにループ中に存在している粒状物の他に新たに Fe_3O_4 粒子を投入し粒状不純物代用粒子とし用いた。なお、ここで使用した磁気フィルタは前記大型高温ナトリウムループ用のそれと同型式ではあるが別途製作したもので、最大印加磁場強度～3 KGaussで内部には3種類のメディア（線径/メッシュ；0.8mm ϕ /10 $\#$ 、0.3mm ϕ /24 $\#$ 、0.1mm ϕ /100 $\#$ ）があり、これらがFig.11に示すように組合わされている。

本ループによる代表的な試験条件は以下の通りである。

温度：200～300℃

流量：新1.0 ℓ/min

2.3 捕集した粒状不純物の回収と分析

(1) 回収法

メッシュフィルタで捕集した粒状不純物の回収法および分析に関しては別途報告書を参照¹⁸⁾したい。ここでは磁気フィルタのメディアからの回収についてのみTable1に従って説明する。

(2) 重量分析

Table 1 中の逕過において逕紙上に集められた粒状不純物は十分乾燥させた後、直示天びんで重量を測定した。

(3) 粒径測定

回収した粒状不純物の一部を蒸留水に投入し、超音波洗浄器を用いて均一に分散させ、コールターカウンタ^{*}を用いて粒径測定を行った。その他、SEMにより直接粒状物を観察する方法でも粒径測定を行った。

(4) 組成分析

質量分析および湿式化学分析を実施した。またX線回折による結晶構造の同定も行った。なお化学分析に関しては以下の方法で実施した。

アルミニウム；原子吸光光度法

シリコン；二酸化けい素重量法

カリウム；原子吸光光度法

カルシウム；原子吸光光度法

チタン；原子吸光光度法

クロム；過マンガン酸カリウム滴定法

マンガ ン；過硫酸アンモニウム吸光光度法

鉄；O-フェナントロリン吸光光度法

ニッケル；ジメチルグリオキシム・クロロホルム抽出吸光光度法

脚注* コールターカウンタの原理

電解液（本試験においては食塩水を使用）中の粒子が細孔を通過する際に生ずる電気抵抗の変化によって粒子の数と体積を測定する。

V；粒子体積

R；電解液中の電極間抵抗

R'；粒子が細孔を通過する際の抵抗

Ro；電解液固有抵抗

A；細孔断面積

$$V = \frac{A^2(R - R')}{Ro}$$

粒子数は抵抗変化に伴って発生する電圧パルスの数によって測定する。

3. 試験結果

3.1 大型高温ナトリウムループ中の粒状不純物

3.1.1 メッシュ型フィルタ装置による結果

(1) 粒状物濃度

ループの最高温部に設置したホットレブサンプリング装置では2回の粒状物捕集試験を行った。第1回目 (Run No. H-1) では公称孔径 $10\mu\text{m}$ と $2\mu\text{m}$ のポロプレートフィルタ2枚を組合せ使用し、第2回目 (Run No. H-2) では $5\mu\text{m}$ と $2\mu\text{m}$ のポロプレートフィルタを2枚組合せ使用した。Table 2 の上部にこれら2回にわたる試験条件と粒状物捕集量を示す。Run No. H-1 では約535 ton のナトリウム炉過により約125 mg の粒状物が、Run No. H-2 では約500 ton のナトリウム炉過により約34 mg の粒状物が捕集回収された。これら捕集された粒状物の重量を通過ナトリウム総量で割りナトリウム中の平均粒状物濃度を計算すると $0.06\sim 0.2$ wppb となる。(だが、フィルタに捕集された粒状不純物の一部が各試験終了後のナトリウムドレン操作で流失していたためこれらの濃度値はオーダーを示す参考値としてのみ意味を持つ。)

次にループの低温部のコールドレグサンプリング装置ではいずれも公称孔径 $2\mu\text{m}$ のポロプレートフィルタ1枚を用い合計4回の粒状物捕集試験を行った。各試験条件とデータをTable 2 の下部に示す。各捕集粒状物重量から試験時におけるナトリウム中の平均粒状物濃度を計算すると $1\sim 4$ ppb となった。これは上に述べたループ高温部の値と比べると2~3桁高い。今回の一連の試験ではループの高温部と低温部のそれぞれの温度とコールドトラップ温度は一定に調節されたがループ主配管のナトリウム流量は、毎回の变化させられ、最大と最小の流量の間には約4倍の差がある。このような流量変化が上に述べたTable 2 のループ低温部で測定された平均粒状物濃度にどのような影響を与えたかを調べるため両者の関連を検討したが、Fig. 13に示す。同図ではたて軸に捕集粒状物重量から換算した濃度値を横軸には流量を代表する値として主配管中のナトリウム流速をとった。このように両者が1対1の直線関係にあることはナトリウム循環系内の粒状物沈降過程がループ低温部の粒状物濃度値に大きな影響を与えていることを示す。

(2) 粒状物の粒径

大まかな粒径データを得るため、捕集した粒状物を光学顕微鏡で観察した。Photo-1 にコールドレグサンプリング装置から回収した粒状物の写真を示す。この写真にも見られる通り、粒径はサブミクロンから $50\mu\text{m}$ 大のものまで非常に幅広く分布し、また形状も一定ではない。

(8) 粒状物の組成

ホットレグサンプリング装置から回収した粒状物のEPMAによる定性分析を行った。Photo-2に分析写真を示す。FeとCrの濃度が非常に高く、またNiやCも含まれていることが判る。

3.1.2 磁気フィルタによる結果

(1) 粒状物濃度

合計6回の試験 (Run No. EF-1~EF-6) の条件と捕集粒状物重量をTable 3に示すが捕集重量は約450~1,000 mgであった。これらを前記と同じ方法で平均粒状物濃度に換算すると電磁石が非励磁であったRun No. EF-6を除き約1.7~2.4 ppbとなるが、これらは前に述べたループ低温部における平均濃度値にほぼ等しい。Table 3の各粒状物捕集重量とこれらに対応する個々の試験の磁気フィルタ総通過ナトリウム重量との関係は非励磁のRun No. EF-6を除きFig. 14の如く直線関係にある。これは捕集重量が通過ナトリウム流量のみに比例し、Run No. EF-1~EF-5の間に变化させた磁気フィルタの磁場強度 (6~8 KGauss) およびメディアの網目密度 (10~100メッシュ) には殆んど影響されていないことを示す。

次に励磁の有無による粒状物捕集量への影響はTable 3の非励磁の時のRun No. EF-6と励磁の時の他のRun No.の単位通過ナトリウム重量に対する捕集量との比較から非励磁の場合捕集量は約1/6になることが示された。これは本試験に使用した磁気フィルタでは捕集した粒状物の内約16% (=1/6)はメッシュへの慣性衝突とそれに続く付着で捕集されるが大部分 (約74%)は磁場効果で捕集されることを示す。(しかし、観点を変えると捕集粒状物の約16%が非磁性体であることにもなるが後述するように捕集された粒状物は磁性体-非磁性体の混在物であるため非磁性体粒子のみとなる可能性は少ない。) Photo-3に濾紙上に回収された粒状物を示す。

(2) 粒状物の粒径

こゝでも厳密な粒径分布測定は目的とせず、大まかな粒径を把握することに主眼を置いた。コールカウンタで測定した粒径の重量分布をFig 15の(a)と(b)に示す。Fig.15 (a)は磁気フィルタのフィルタユニット入口側から回収した粒状物、Fig.15 (b)は同ユニット中央~出口側からの回収物のデータである。いずれも粒径はコールカウンタの測定下限である0.5 μm から25 μm の範囲にある。SEMによる粒状物観察ではPhoto-4に示すように粒径範囲0.2~5 μm の粒子が見られた。

(3) 粒状物の組成

質量分析計、X線回折装置、湿式化学分析法を用い組成決定を試みた。まずX線回折により主な結晶形態を決定した所、 $\alpha\text{-Fe}$ 、 Fe_3O_4 の強い回折ピークが得られFeの重量分

率が高い事が示された。

次に質量分析計では6回の各試験で捕集回収した粒状物試料全ての半定量分析を行い Table 4 に示すデータを得た。ここで Fe, Cr, Mn, Ni が高い含有率を占めていることが判る。続く化学分析では主に高含有率を占める各元素の定量分析を行い Table 5 に示すデータを得た。同表より Fe; 18~43%, Cr; 4.4~18%, Mn; 4.0~8.6%, Ni; 1.8~2.7% とこれらの元素が全体の 30~70% を占めることが判る。Table 5 には記入されていないが非金属元素では C (炭素) が約 10% 含まれていた。

(4) 汚液の元素分析

粒状物回収の際はアルコールと蒸留水を用いて各メディアの捕集粒状物および残留ナトリウムを溶解させている。これらの溶解液に溶けまたは汚紙を通過した粒子の成分元素を探するため汚液の化学分析を行った。結果を Table 6 に示す。同表では Fe, Cr, Ni, Mn なども検出され、粒状物のごく一部の極微細粒子が汚紙 (東洋汚紙 ポソクロン汚紙 PF-3 と住友電工製フロロ ポアメンブランフィルタ FP-500) を通過したか、これらの元素が溶解液中に溶解したことが示されている。Si については非常に多い量が検出された。同表の Si 分析量と Table 3 の粒状物捕集重量および Table 5 の捕集粒状物中の Si 分析量の比較から、殆どどの Si は上記二種類の溶解液中に溶けたことが判る。またこれらの表の Si 分析量と捕集粒状物重量から粒状物中の Si 含有率を求めると 2~7% と非常に高い。これは Si が周囲のナトリウム分圧が低い大気中では容易に分解するために、溶解液中に溶けたものと考えられる。Si の生成はループ構成材であるステンレス鋼中に含まれる Si (含有量; 約 1%) 成分の溶出によるとの見方が有力である。

(5) 磁化測定

Fig. 16 の(a)と(b)に粒状物中の磁性体の割合を求めるために行った EF-2 および FE-3 の捕集粒状不純物のメディア入口側および中央, 出口側の磁化測定結果を示す。印加磁場は測定装置の関係で 7 KOe まででこのため入口側粒状不純物に関しては磁気飽和に達していないが, 中央, 出口側に関してはほぼ飽和状態となっている。測定の結果 7 KOe において EF-2 の入口側は約 56 emu/g, 中央, 出口側は約 29 emu/g, EF-3 の入口側は約 72 emu/g, 中央, 出口側は約 27 emu/g であった。前に示したように X 線回折の結果からは粒状不純物の形態として α -Fe および Fe_3O_4 が同定されている。また化学分析の結果では鉄の割合は EF-2 の入口側で 36.2%, 中央, 出口側で 29.6% であり EF-3 の入口側で 43.0%, 中央, 出口側で 24.5% であった。純鉄の飽和磁化は 218 emu/g であるためこの磁化データより純鉄の割合を求めると EF-2 は入口側で 26%, 中央, 出口側で 13%, EF-3 の入口側で 33%, 中央, 出口側で 12% である。前述の化学分析および X 線回折の結果とこの磁化測定結果を考え合わせると入口側においてはほぼ純鉄の形態の粒状不純物が捕集され, 中央, 出口側においては鉄と他の元素の混合粒子が捕集されている

ものと推定される。

3.2 磁気フィルタ特性試験

3.2.1 水ループによる基礎試験

(1) メディア性能試験

こゝではメディアの網目密度の大小が磁気フィルタの捕集効果に与える影響を調べるため、10、24、100メッシュの3組のメディアを別々に試験した。使用した粒子は Fe_3O_4 （粒径；1～20 μm ）で、これを水に分散させ40～53ppmの濃度とした。磁気フィルタの磁場強度は3KGaussである。

Fig. 17に各メディアでの捕集効率とその時間変化を示す。いずれも初期は約98%程度の効率を示すが、約1時間経過したあたりからわずかに効率が低下する。網目密度の差は殆んどない。傾向としては低網目密度ほど時間に対する効率低下速度は遅い。異なる網目密度を組合せた10メッシュと24メッシュのメディアではFig. 18の如くこの効率低下速度は更に低くなる。

(2) 磁束密度の影響

磁束密度1KGaussと3KGaussとの比較結果をFig. 19に示す。この結果から磁束密度が低いとメディアに捕集された Fe_3O_4 粒子が磁場をしゃへいし周囲の磁気勾配が急激に低下させるため、捕集効率は急速に低下することが判る。しかし、この磁束密度の影響および前述のメディア性能試験で見られる捕集効率の時間による低下は40～53ppmの濃度の Fe_3O_4 粒子水を20～60 ℓ 流した後で Fe_3O_4 が0.9～1.8g程度メディアに捕集された後でないとは生じなかった。先の大型高温ナトリウムループおよび後に述べる小型ナトリウムループでは磁気フィルタで捕集された粒状物は最大で約1.0gである。しかもその中で磁性成分であるFe、Niは45%未満（捕集物中の磁性体の重量は450mg以下）であるためナトリウムに使用された2合の磁気フィルタの捕集効率は時間に対して、ほぼ一定した状態で使用された、すなわち同効率が低下する前に試験が折切られたと考えられる。

(3) ナトリウム試験前の水試験

Fig. 20に示す水試験装置はFig. 10の次のナトリウム試験に使用する装置の一部と同一に製作されている。このFig. 20の上部ストレージタンク内の5 ℓ の水に約250mgの Fe_3O_4 を圧送注入し、Once-through試験（タンク内の水を磁気フィルタを通してドレンする）と循環試験を行った。試験時にはガスバブリングを行いタンク内の粉末を均一分散させた。

Once-through試験の結果を試験条件とともにTable 7に示す。磁気フィルタの前後に取りつけたナトリウムサンプラによる分析では粒子濃度はフィルタの上流で22ppm、

下流で 3 ppm であり磁気フィルタは 86% の捕集効率を示した。

次の循環試験では上記と同じ条件で Fig. 20 のループを 20 分間にわたり循環させ Table 8 の結果を得た。初期のストレージタンク内粉末濃度約 10 ppm が 20 分後には約 1 ppm となった。この水循環中のストレージタンク内時間濃度変化を式で表わすと次のようになる。

$$-\frac{d}{dt}(W\rho) = \omega\rho\eta$$

ここで W ; ストレージタンク内の水量 (5×10^3 g)

ω ; 循環流量 (18 g/sec)

ρ ; 濃度 (ppm)

η ; 磁気フィルタ捕集効率 (-)

t ; 時間 (sec)

上式を積分すると初期条件 ρ_0 のもとでは

$$\rho = \rho_0 \exp\left(-\frac{\omega}{W}\eta t\right)$$

となり、この式に Table 8 に示す初期濃度 10.4 ppm と 20 分後の濃度 1.1 ppm を代入し効率 η を計算すると

$$\eta = 52\%$$

PNC TN941 81-06

となる。

こゝで得た効率 52% は前記の One-through 試験時の効率 80% および以前のメディア性能試験で得た効率 98% と比べると極端に悪い。これは前にも述べたようにストレージタンク内の壁や配管に相当多量の注入粉末が付着していたため、これが水循環中に悪影響を与えたため得られた濃度値が不正確となった。

3.2.2 小型ナトリウムループによる試験

合計 4 回 (Run No ; 1-1, 1-2, 2-1, 2-2) の試験を行い、Run No. 1-2 と同 2-2 は磁気フィルタを非励磁で、他は 3 KGauss の磁場強度で実施した。これらは上述の水試験結果との比較のためループナトリウム中に Fe_3O_4 粉末を投入し行った。

(1) One-through 試験 (Run No. ; 1-1 と 1-2)

結果を Table 9 に示すが効率評価データは得られなかった。また試験時の配管閉塞事故のため励磁と非励磁の比較もできなかった。ただ捕集物を化学分析したところ励磁した場合はフィルタユニット入口のメディアの捕集物の鉄が約 50% と高く、これに対する非励磁の時の鉄は約 6% で励磁による効果は十分認められた。

(2) 循環試験 (Run No ; 2-1 と 2-2)

結果を Table 10 に示す。励磁の Run No. 2-1 では合計 126.5 mg の粒状物と Fe_3O_4 粉末が捕集されたが非励磁の Run No. 2-2 では合計 73.3 mg と両者の差は 1.7 倍であり励磁に

よる効果は十分認められた。また上のOne-through試験と同様励磁すると特にフィルユニット入口での鉄占有量が大きく(63%),非励磁の時の34%と比べると大きな差を生じている。

次に捕集効率については磁気フィルタ前後のナトリウムサンプラによる分析値から励磁の時約81%,非励磁の時は約72%となった。また粒状物の内,Feのみに関してはそれぞれ94%と63%である。非励磁の時の効率が異常に高いのは後述するように粒径が10~20 μm にピークを持つ大粒径が主であるためと考えられる。

(2) 粒径分布

コーンターカウンタを用いて粒径分布の測定を実施した。測定に供した試料はRUN2-1で得た入口ナトリウムサンプラと入口メディアで捕集したものである。分布をFig.21の(a)と(b)に示す。入口ナトリウムサンプラで捕集した粒状不純物には10 μm ~20 μm のものが多く、これは前述のようにサンプリングまでの間で生じた沈降により比較的粒径の大きいものが選択的に捕集されたものと思われる。Appendix-4にナトリウム中における粒状不純物の粒径と沈降速度の関係を示す。入口メディア(10メッシュ)で捕集した粒状不純物の分布は測定範囲ではほぼ同じような重量分布となった。これはTable 10の粒状不純物重量とその中の鉄の割合よりも明らかなように、粒径が大きくても常磁性体は強磁性体に比較して捕集されにくいいため、ナトリウム中に含まれている粒径の小さい強磁性体が捕集されたためと思われる。PNC TN941 81-06

(3) 参考実験

粒状不純物挙動試験部のストレージタンク上部のサンプリング孔を用いて約200℃のナトリウム中へ永久磁石を挿入し、粒状不純物がナトリウム中でマグネットに捕集されるかどうか、また捕集された場合、その元素は何かを確認するための試験を実施した。その結果、マグネットには約20mg程度の粒状不純物が捕集されて来た。この粒状不純物をX線回折で定性分析すると、 $\alpha\text{-Fe}$ と Na_2CO_3 が同定された。引続きあらかじめ永久磁石に Fe_3O_4 を付着させた状態で同様にナトリウム中に入れ取り出して付着していた粒状不純物を分析したところ $\alpha\text{-Fe}$ と Na_2CO_3 が同定され、 Fe_3O_4 は同定されなかった。これらよりナトリウム中でも200℃では粒状不純物は磁力によって十分捕集され、また鉄は Fe_3O_4 では存在せず $\alpha\text{-Fe}$ の形態で存在していることがわかった。なお Na_2CO_3 が同定されているのは、付着ナトリウムを処理することなく、ストレージタンクより取り出したままの状態で行ったため空気中の CO_2 とナトリウムとが化合し生成したものである。

4. 考 察

4.1 粒状物の濃度，粒径，組成およびその挙動

まず今回の試験で得たナトリウム中の粒状物濃度については，ナトリウム自体をサンプリングし，その中の金属不純物の濃度を化学分析により決定した時の一般的な値 0.1～20 ppm と比較すると 2～3 桁も低い。Fig. 22 に両者の違いを示す。捕集された粒状物の粒径は平均して 1～50 μm の範囲にあったが，このような濃度値の大きな差はナトリウム中の殆どどの粒状物が本試験で得られた粒径よりも更に一段と小さいサブミクロンの領域にあることを示す。

次に組成に関しては主成分は Fe, Cr, Mn, Ni でこれらがほぼ全体の 30～70 % を占める。ループ構成材であるステンレス鋼 SUS-304 では Fe ≤ 65 %, Cr ≤ 20 %, Ni ≤ 11 %, Mn ≤ 2 % と各々の元素分率はこゝで得た粒状物中の各組成とは異なるもほぼ類似している。これより粒状物は腐食生成物の集合粒子と考えられる。

ナトリウム循環系の中での挙動については定性的な議論にとどまるが Appendix 4 に示した粒子の沈降速度データ（粒径 1～50 μm で沈降速度は 0.05 mm/s～70 mm/s）に示したように大きい粒子は非常に速く沈降する。次の Appendix 5 に示したようにこのような速い沈降速度を持った大きい粒子は流れの“よどみ”の部分や低流速部に多くが沈降し易い。

4.2 大型高温ナトリウムループで得た粒状物データの考察

(1) 主循環系内の粒状物挙動 PNC TN941 81-06

試験に使用した 2 MW ループの主循環系を簡略化し，ループが高温部と低温部のみから構成されているとする。高温部では腐食のため常に粒状物が生成され，一方生成された粒状物は他の場所で消滅する。この時ナトリウム中の粒状物に関し次の質量保存式(1)式が成り立つ。

$$\frac{d}{dt} (W\rho) = C - D - R \quad (1)$$

- ここで
- W ; ループを循環しているナトリウム量 (g)
 - ρ ; ループ内ナトリウムの粒状不純物濃度 (—)
 - C ; 腐食により供給される粒状不純物量 (g/sec)
 - D ; 配管，機器表面に沈着する粒状不純物量 (g/sec)
 - R ; フィルタで捕集される粒状不純物量 (g/sec)

今，Fig 1 で主循環配管を流れているナトリウムの内の一部は本試験で使用したメッシュ型フィルタの粒状物サンプリング装置に流入している。このサンプリング装置に流入するナトリウム量を W (g/sec) とし，そのフィルタ効率を η とするとフィルタで捕集される粒状不純物量は次式で表わされる。

$$R = W \cdot \eta \cdot \rho \quad (2)$$

(2)式を(1)式へ代入すると、

$$\frac{d}{dt} (W \cdot \rho) = C - D - \frac{W \cdot \eta \cdot \rho}{R} \quad (3)$$

となり、この式を解くことにより各時間におけるナトリウム中の粒状不純物濃度の時間変化を求めることが出来る。(3)式について、ここで各項のオーダーの推定を行ってみる。

右辺第1項の腐食により供給される粒状不純物量Cは試験装置の最高温度部である主加熱器のみで生成されるものとし、次に示すPNCのオーステナイトステンレス鋼のナトリウムによる腐食評準式(4)式を用い、腐食によってナトリウム中に供給される物質は全て粒状物になるとすると、

$$\ln CR = 12.63 + 0.804 \cdot \ln O_x - \frac{22,000}{RT} - 0.0591 (L/D) \quad (4)$$

ここで CR ; 腐食速度 ($\mu\text{m}/\text{year}$)

O_x ; 酸素濃度 (ppm)

R ; 気体定数 $\doteq 1,987$ ($\text{Cal}/^\circ\text{K} \cdot \text{mol}$)

T ; ナトリウム温度 ($^\circ\text{K}$)

L/D ; 下流位置

本試験時のループ主加熱器運転状態であるナトリウム温度600℃とコールドトラップ温度140℃(ナトリウム中酸素濃度はEichelbergerの式より約2ppmに相当)では $CR \doteq 1.5 \mu\text{m}/\text{year}$ となる。(L/Dの項は省略した。また、上式PNC TN941 81-06 $\sim 4 \text{ m}/\text{sec}$ であるが主加熱器伝熱管部の流速は試験によって異なるが、0.18~2.4 m/sec程度である。2 m/sec以下の流速における腐食速度は実際には上の値よりも少なくなるものと思われるが、ここでは上式の値をそのまま用いた。)このCRの値からステンレス鋼の比重を $\gamma_{\text{sus}} = 8.08$ (g/cm^3)とすると腐食生成物の重量生成率 CR_w は次のようになる。

$$CR_w = CR \times \gamma_{\text{sus}} \doteq 3.8 \times 10^{-11} \text{ g}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec} \quad (5)$$

2 MW ループの主加熱器の伝熱管内面積は約65 m^2 であるため主加熱器で生成される腐食生成物量は(2)式にこの面積を掛算し

$$C \doteq 2.5 \times 10^{-5} \text{ g}/\text{sec} \quad (6)$$

となる。

次に右辺第2項の配管、機器表面に沈着する粒状不純物量Dは次のようにしてそのオーダーを推定することができる。

Table 3-1に示したC-1-2~C-4-2の試験結果によると捕集された粒状不純物濃度は1~4 ppmの範囲で試験時間に殆んど依存していない。もし生成した粒状不純物量に対し、付着などで消滅する量が非常に少いとすれば試験時間に比例してナトリウム中粒状

不純物濃度も増加するはずである。したがって生成した量と同じオーダの粒状不純物が特定の配管または機器壁に沈着してゆくと考えるのが妥当で(3)式中のDは前記Cと同オーダになる。

$$D \approx C \quad (7)$$

最後の右辺第3項のフィルタで捕集される粒状不純物量RはC-1-2~C-4-2の試験結果よりフィルタ部流量にもよるが

$$R = W \cdot \eta \cdot \rho = 9.2 \times 10^{-9} \sim 8.4 \times 10^{-8} \text{ (g/sec)} \quad (8)$$

となる。

以上、(6)、(7)、(8)式より(3)式の質量保存式ではRのみが他のDやCと比べると3~4桁も小さいため無視できる。よって(3)式は簡略化されて(9)式となる。

$$\frac{d}{dt} (W \cdot \rho) = C - D \quad (9)$$

とできる。

(9)式によるとループ主循環系内の粒状不純物濃度は(3)式を解くまでもなく生成量と沈着量の関係だけで決まり、試験条件(コールドトラップ温度、ナトリウム温度、流速)を変化させない限りほぼ一定となる。また粒状物サンプリング装置の有無は全く影響を与えていない。

今回の試験ではコールドトラップ温度と主加熱器の温度は変化させていないため、これらの影響は明らかでない。しかし、主循環系の流量変化に対してはFig.13で述べたように濃度は主循環系の流速に強く依存し、流速が速い程ナトリウム中の粒状不純物濃度も高くなっている。この流速依存性の原因は(a)腐食速度の流速依存性と(b)粒状物が機器底部へ沈降割合の流速依存性の二つが考えられる。このうち前者の(a)についてはFig.13で破線でその依存性を示すように実験データとは異なる勾配を有し、その影響は少いを言える。従って(b)が主原因と考えられ、粒状物挙動にはこの沈降過程が生成過程とともに主要な役を果たすことが判る。

(2) ダンプタンク内の粒状物挙動

本試験に使用した磁気フィルタはFig.1に示したように再循環系のくみ上げライン、即ちダンプタンクからループの膨張タンクに向う配管に設置されている。よってここではダンプタンク内に着目してその中の粒状物の挙動を検討する。

これまでに2MWループは主加熱器設置後600℃で約 4×10^4 時間運転されてきたが、前述の腐食速度の標準式(6)式を用いるとこの間の積算腐食生成物重量G(g)は次に示すように約3.6kgになる。

$$G \doteq 2.5 \times 10^{-5} \times 4 \times 10^4 \times 3600 = 3.6 \times 10^3 \text{ (g)}$$

主加熱器で生成された粒状不純物の多くはAppendix 5に示すように、コールドトラップ、

再生熱交換器，その他の機器の底部に沈降し堆積しているが，残りはドレン時にダンプタンクに排出される。このドレンタンクに排出される割合を ϵ とすると，試験装置内の総ナトリウム重さ W_t (g)に対するダンプタンク内の粒状不純物濃度 ρ_{DO} は次式に表わされる。

$$\rho_{DO} = \frac{G}{W_t} \epsilon \quad (10)$$

(10)式で与えられる粒状不純物濃度 ρ_{DO} は ϵ の値にもよるが通常考えられる $0.1 < \epsilon < 1.0$ の範囲では次のようになる。(但し， $W_t = 2.4 \times 10^7$ g)

$$15 \text{ ppm} < \rho_{DO} < 150 \text{ ppm} \quad (11)$$

一方今回の試験で測定されたダンプタンク内ナトリウムの平均的な粒状不純物濃度は，Table 3 で見たようにたかだか2 ppb前後で(11)式の値と比べると3～4桁も低い。前出の「主循環系内の粒状物挙動」およびAppendix 4, 5 などとも考え合わせると，これまでの毎回の運転によってループ内に生成され，かつドレンされた粒状物の殆んどはダンプタンク底部に沈降堆積し，残りのわずかが同タンク内のナトリウム中に分散浮遊していると言える。この分散浮遊している粒状物の濃度は今回の試験期間中ほど一定で，かつ磁気フィルに捕集された粒状物の中には計算上は2～3分以内にダンプタンク底部に沈降してしまうような25 μ m程度の大きい粒子も含まれている。これらの事実から予熱によるダンプタンク内ナトリウムの自然対流の流れ，即ち粒子の舞い上がり効果が粒状物を液中に保持していると推定できる。

5. まとめと今後の検討

5.1 まとめ

メッシュフィルタおよび磁気フィルタを用いたナトリウム中の粒状不純物の捕集および分析を実施したところ次の結果が得られた。

- (1) 使用した試験装置内流動ナトリウム中の粒状不純物濃度はループ内のナトリウム流速に依存するが、本試験では1～5 ppbであった。また機器解体検査およびダンプタンク中粒状不純物濃度の推定等より、粒状不純物は流速および温度の変化によって機器や配管の底部に沈降し蓄積されることがわかった。
- (2) 捕集された粒状不純物の粒径は50 μm からサブミクロンまでの広い分布を持ち、コーンターカウンタでの測定では2～3 μm にピークが認められた。
- (3) 粒状不純物の主要構成物質は鉄(18～43%)クロム(4.4～18%)、マンガ(4～9%)ニッケル(2～3%)およびSiおよび(3～4%)であった。
- (4) ナトリウム中から粒状不純物を捕集する手段としてのメッシュフィルタおよび磁気フィルタとも有効であった。

5.2 今後の検討

種々の試験装置のナトリウム中の鉄、クロム、ニッケル等の濃度を分析した結果と²²⁾比較すると今回粒状不純物として捕集されたこれらの元素の濃度は2～4桁も低い。これはナトリウム中にフィルタで捕集することが困難である非常に微細な粒状不純物が多量に含まれていることを示唆し、これら微細粒子をどのように捕集するかを考える必要がある。

ナトリウム中の除状不純物の除去のためのフィルタとしてはここで使用したステンレス製のメッシュフィルタと磁気フィルタの他はエッジディスクフィルタ^{*}ぐらいである。メッシュフィルタおよびエッジディスクフィルタは適当な孔径のフィルタを選択すれば、ほぼ100%の捕集効率が得られる。しかし、孔径1 μm 以下のものは製作されておらず、また、この場合捕集後の再生にも困難を伴う。磁気フィルタについては、(その捕集効率はメディアの線径、充填率、印加磁場強度および粒状不純物の種類によって異なるが)比較的小粒径から大粒径の粒状不純物の種類によって異なるが)比較的小粒径から大粒径の粒状不純物まで捕集出来、励磁を切れば再生も容易であるため広く利用できよう。ただ、今後磁気フィルタでも捕集困難であるような非常に微細な粒状不純物が問題となるようであれば、水冷却炉で用いられ始めた「クラッドセパレータ」など異なる捕集原理の機器を開発する必要もある。

* The Etched Disc Filter (Vacco Filter)

本フィルタは今回の捕集試験では使用しなかったが、ステンレス製のディスクに一定寸法の流路をエッチングして積層させたものである。

なお本試験の結果から粒状不純物の高速炉冷却系に及ぼす影響として考慮に入れる必要があるのは次の諸点と考える。

(1) 粒状不純物の生成、付着に伴ない流動、伝熱に及ぼす影響について

我々が当初注目した粒状不純物の存在と燃料集合体の圧力損失の経時変化の関係については本試験において定量的な評価は出来なかった。しかし、定性的にはフィルタの設置後、燃料集合体の流動耐久試験において大きな圧力損失の増加は認められず、粒状不純物を除去するとともに適正なナトリウムの純度管理を行うことで圧力損失の増加を軽減させることが可能となった。

粒状不純物の生成に関してはPNC腐食速度標準式から考えるとナトリウム中の酸素濃度が大きな影響を及ぼすが、原子炉の運転に当っては粒状不純物の生成も考慮した酸素濃度管理が必要である。

(2) 粒状不純物の放射化による空間線量率の増加について

構造材の腐食によって生ずる腐食生成物はナトリウム中に溶解したものとナトリウム中に粒状不純物として分散しているものからなる。炉心内外で生成された腐食生成成分（溶解したもの、粒状のものを含めて）は炉心部で放射化され、炉心内外に蓄積される。このうち粒状不純物はナトリウム中では必ずしも均一に分散しておらず、流速および温度の変化に応じて中間熱交換器胴側下部、水平配管下側等に沈降して堆積される。また粒状不純物の中では鉄およびマンガンの含有量が高いので注意を払う必要がある。

前項までに示したように本試験で捕集された粒状不純物の濃度、粒径分布、主要構成物質が明らかにされ、またメッシュフィルタおよび磁気フィルタの有効性も確認出来た。しかし、ナトリウム冷却系の中における粒状不純物の挙動を把握しようとする、これに生成、移行、沈降および付着等が密接に絡むため容易ではなく、基礎的な試験を行うとともに原子炉の流れを模擬したモデル試験および計算コードの作成を行うことをここで提案する。これらの中で今後明らかにする必要がある項目は次のようなものであろう。

(1) 粒状不純物の生成過程に関するデータ

粒状不純物の生成過程を明らかにすることにより生成率が把握できまたフィルタの最適仕様、設置位置を定めることが出来る。

(2) 粒状不純物の燃料被覆管表面等への付着と剥離に関するデータ

これまで実施して来た試作燃料集合体の解体検査および「常陽」で照射された燃料検査の結果、被覆管表面に多くの粒状不純物が付着している。被覆管への付着および剥離の現象を解明することにより放射性核種の担体である粒状不純物の移行と将来にわたる線量率の予測のためのモデリングが可能となる。

謝 辞

本報告の R & D でナトリウム中粒状不純物に関する大まかな実験情報を得ることができた。これらは殆んどデータが無かった以前と比べ、粒状不純物挙動を量的に評価する上で大きな前進を与えるものとする。前節に示した幾つかの課題については、今後より詳細な解析を行う上で不可欠と考えられ将来の解明を持ちたい。

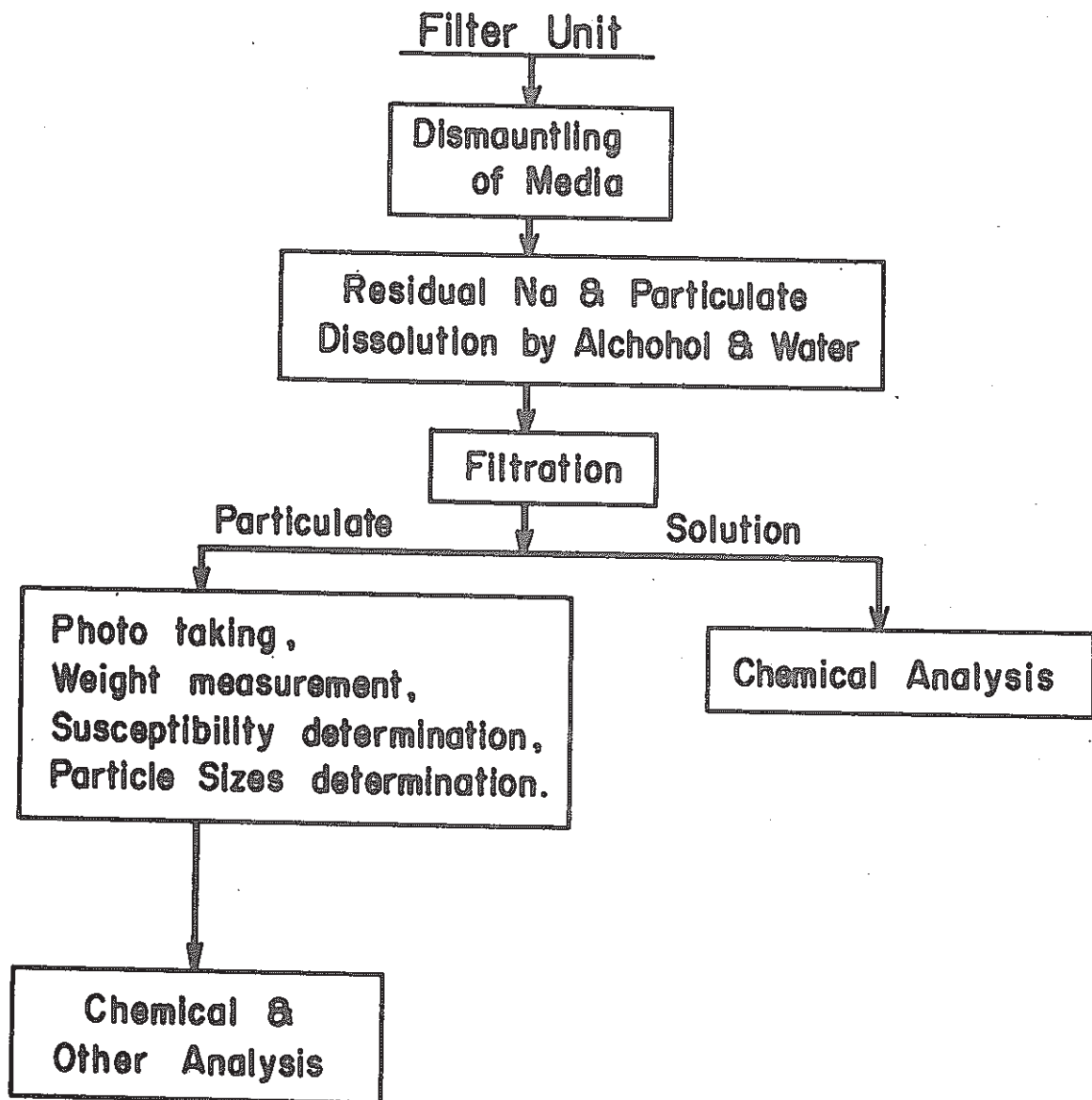
当室での R & D は本報の提出をもって全て終了する。終りにあたり、高所よりの御指導を頂いたナトリウム技術部三本保秀部長、FBR 本部山本研主任研究員、吉田直喜研究員および前 FBR 本部永瀬紀生副主任研究員、分析を実施していただいたナトリウム分析室の関係各位および試験装置の設計製作および解体分析を実施していただいた大同特殊鋼(株)および(株)中島製作所の関係各位に厚く感謝いたします。また試験開始時に当試験室に所属していた高橋克郎副主研、藤本哲郎研究員をはじめ運転を担当していただいた諸氏にも厚く感謝の意を表わします。

参 考 文 献

- 1) T.R. Padden "Characterization of Particulate Material Extracted from a Large Sodium Loop" Proceedings of International Conf. on Liq. Metal Technol. in Energy Production. May 1976, Champion Pennsylvania. USA.
- 2) 動燃資料 「エンリコフェルミ原子力発電器材の調査研究」 SJ256 76-05
- 3) 動燃資料 LMFBR Program Plan Ele.5 (その3) WASH-1105 N251 75-23
- 4) Prodyot Roy,他 "The Evaluation of Particulates Deposited in Flowing Non-Isothermal Sodium Systems" AIME Fall Meeting Oct. 1969 Philadelphia.
- 5) J.H.P. Watson "Theory of Capture of Particles in Magnetic High-Intensity Filters" IEEE Transactions on Magnetism, Vol. Mag-11, No.5 September 1975.
- 6) S. Uchiyama "Performance of Parallel Stream Type Magnetic Filter for HGMS" IEEE Transactions on Magnetism, vol. Mag: 12 No.6 November 1976
- 7) F.E. Luborsky,他 "High Gradient Magnetic Separation: Theory Versus Experiment" IEEE Transactions on Magnetism, vol. Mag-11 No.6 November 1975
- 8) 内 山 晋 「大勾配磁気分離 (HGMS)」 応用物理 第45巻 第2号 (1976)
- 9) J.A. Oberteuffer "High Gradient Magnetic Separation" IEEE Transactionson Magnetism, vol Mag-9 No.3 September 1973
- 10) J.A. Oberteuffer "Magnetic Separation: A Review of Principles, Devices, and Applications" IEEE Transactions on Magnetism, vol Mag-10 No.2 June 1974
- 11) 渡 辺 一 成, 他 「高勾配電磁フィルタの火力・原子力発電所への適用」 火力・原子力発電 Vol 31 No1 Jan. 1980
- 12) 矢 野 純 一, 他 「HGMSの廃水処理への応用(II)」 昭和53年電気四学会連合大会

- 13) 岡本 洋一 「磁気利用の汚染除去」固体物理 Vol 9 No10 1974
- 14) 江口 勇, 他 「磁気分離」昭和50年電気関係学会東海支部連合大会
- 15) J.H.P. Watson "Magnetic Filtration" J.Appl. Phys. vol 44
No.9 September 1973.
- 16) 高橋 幹二 基礎エアロゾル工学 養賢堂(1972)
- 17) 佐々木 修一, 他 「常陽」MK-II 燃料集合体流動試験(IV)
動燃資料 SN941-80-42
- 18) 根本 昌明, 他 ナトリウム中の粒状物分離分析法(1)
動燃資料 SN941 79-134
- 19) 大同特殊鋼社会資料 高勾配磁気フィルタ
- 20) 山本 研, 他 オーステナイトステンレス鋼のナトリウムによる腐食速度標準式
動燃資料 N241 79-11 1979. 3
- 21) R.A. Baus, 他 Solubility of Materials in Na
Vol. IX P/124 U.S.A.
- 22) 姫野 嘉昭, 他 「常陽」模擬炉心燃料集合体のナトリウム流動試験(5)
動燃資料 SN941 75-67 1975
- 23) 畑 草夫, 他 BWR型原子力発電所廃棄物処理系におけるクラッド除去
火力原子力発電 Vol. 31 No4 1980
- 24) W.H. Yunker "Silicon Mass Transfer in Sodium Loops and
The Resulting Thermal/Hydraulic Effects"
Proc. Int. Conf. on Liquid Metal Tech. in
Energy Production. ANS-AIME Meeting,
Champion, PA, 1976.

Table 1 Procedures for Analysis and Measurements of Particulates



(NG. NO; 2MW-55-22)

Table 2 Test Conditions and Data by Mesh Filter Type Particulate Samplers

	Run No	Filter Porosity(μ m)	Sodium Temp.($^{\circ}$ C)	Test Duration (hrs)	Flow Rate (ℓ /min)	Total Na Wt. Passed (kg)	Particulate Wt. (mg)	Particulate Conc.(ppb)	Note
Hot Leg Sampler	H-1	10 & 2	600	1,562	7.1	535.7 ^{x10³}	125.15	0.23	some collected particulates were lost
	H-2	5 & 2	600	1,319	7.9	503.6	33.95	0.067	
Cold Leg Sampler	C-1	2	250	2,205	1.4	161.9	667.79	4.12	non
	C-2	2	250	1,044	0.7	40.8	91.98	2.15	
	C-3	2	250	2,052	0.6	67.8	68.17	1.00	
	C-4	2	250	1,337	0.7	49.0	207.50	4.23	

(2MW-55-23)

Table 3 Test Conditions and Data by the Magnetic Filter

Run No	Sodium Temp (°C)	Test Duration (hrs)	Flow Rate (ℓ/min)	Total Na Passed (g)	Magnetic Flux Intensity (Gauss)	Particulate Wt (mg)	Particulate Conc. (ppb)
EF-1	240	880	7.6	359×10^6	6.8×10^3	793.3	2.2
EF-2	220	670	5.2	189	7.4	445.2	2.4
EF-3	240	936	7.8	394	7.9	670.3	1.7
EF-4	240	720	5.8	262	6.8	516.0	2.0
EF-5	220	1,337	5.8	421	5.8	1,000.9	2.4
EF-6	230	1,553	9.5	793	0	290.3	0.37

(2 MW-55-24)

Table 4 Mass Spectroscopic Analysis of Particulate Impurities Trapped by 2MW Loop Magnetic Filter

PNC TN941 81-06

Element	EF-1	EF-2		EF-3		EF-4			EF-5	EF-6			
	Total	Inletside	Outletside	Inletside	Outletside	Inletside	Center	Outletside	Total	Inletside	Center	Outletside	
Na	Sodium	6.7 %	1.5 %	1.5 %	1.6 %	5.9 %	3.4 %	3.3 %	2.9 %	0.2 %	0.5 %	0.4 %	0.3 %
Al	Aluminum	2.4	0.7	1.5	0.4	0.7	1.7	1.8	1.3	0.7	0.4	0.8	1.8
Si	Silicon	2.2	1.2	2.3	0.6	0.7	0.9	0.6	0.9	4.4	3.5	8.1	22
P	Phosphorus	—	0.2	0.3	0.1	0.2	4.4	0.2	0.2	—	—	—	—
S	Sulfur	<0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	1.1	1.2	0.8	—	—	—	—
K	Potassium	0.2	0.2	0.4	0.2	0.1	0.6	0.6	0.2	1.9	0.5	1.0	5.6
Ca	Calcium	1.7	1.7	2.5	0.9	2.0	2.2	2.1	0.9	0.4	3.9	6.7	2.1
Ti	Titanium	1.2	0.5	0.7	0.2	0.4	2.0	2.7	1.0	0.4	1.2	2.2	1.2
V	Vanadium	0.1	<0.1	0.2	<0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Cr	Chromium	32.8	23	24	17.7	28.7	17.2	17.4	22.7	12	14.4	10	10
Mn	Manganese	15.3	12	9.2	9.1	14.7	6.5	11.2	9.0	5.0	11.6	9.3	9.6
Fe	Iron	31.6	51	51	61.9	42.1	53.7	52.6	55.1	63	52.3	54	41
Co	Cobalt	<0.1	0.4	0.5	0.3	0.1	0.1	0.1	<0.1	0.2	0.2	<0.1	<0.1
Ni	Nickel	4.3	5.9	3.5	5.5	3.1	5.0	3.7	3.7	10	9.2	5.1	4.4
Cu	Copper	<0.1	0.2	0.2	0.3	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	0.5	0.4	0.6	0.4
Zn	Zinc	<0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	—	—	—	—
Zr	Zirconium	<0.1	0.2	0.3	0.1	0.1	0.3	0.5	0.3	0.2	0.1	0.2	<0.1
Nb	Niobium	0.1	<0.1	<0.1	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	—	—	—	—
Mo	Molybdenum	0.3	0.7	0.8	0.5	0.4	0.4	0.5	0.5	0.3	0.5	0.5	0.9
W	Tungsten	<0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.3	0.2	0.2
Pd	Lead	<0.1	0.1	0.5	<0.1	0.1	0.1	0.4	0.1	<0.1	0.3	0.4	0.2
Total (mg)		793.3	276.0	169.2	503.5	166.8	186.9	150.5	178.6	1000.9	41.7	98.6	150.0

Table 5 Chemical Analysis of Particulate Impurities Trapped by 2MW Loop Magnetic Filter

Element	EF-1	EF-2		EF-3		EF-4			EF-5	EF-6		
	Total	Inletside	Outletside	Inletside	Outletside	Inletside	Center	Outletside	Total	Inletside	Center	Outletside
Aluminium	11.3 mg	1.3	1.7	2.1	0.5	0.6	1.2	1.1	—	—	—	—
	1.4 %	0.4	1.0	0.4	0.3	0.3	0.8	0.6	—	—	—	—
Silicon	— mg	1.9	2.9	2.1	0.7	2.0	0.9	2.0	—	—	—	—
	— %	0.7	1.7	0.4	0.4	1.1	0.6	1.1	—	—	—	—
Potassium	— mg	0.6	0.5	<0.3	<0.2	0.2	0.5	<0.2	—	—	—	—
	— %	0.2	0.3	<0.1	<0.1	0.1	0.3	<0.1	—	—	—	—
Calcium	8.2 mg	4.1	2.0	2.8	2.3	2.0	1.4	1.8	—	—	—	—
	1.0 %	1.5	1.2	0.6	1.4	1.1	0.9	1.0	—	—	—	—
Ti Tanium	2.4 mg	1.3	0.7	0.8	0.4	2.2	1.1	1.6	—	—	—	—
	0.3 %	0.4	0.4	0.2	0.2	1.2	0.7	0.9	—	—	—	—
Iron	244.1 mg	99.9	50.1	216	40.9	63.2	39.4	53.2	432.4	12.9	20.2	27.5
	30.8 %	36.2	29.6	43.0	24.5	33.8	26.2	29.8	43.2	30.9	20.5	18.3
Nickel	21.3 mg	10.2	3.9	18.4	3.1	6.0	2.7	3.6	—	—	—	—
	2.7 %	3.7	2.3	3.7	1.9	3.2	1.8	2.0	—	—	—	—
Cromium	106.5 mg	48.9	21.2	68.5	25.0	26.2	16.3	19.5	99.1	3.3	4.5	6.6
	13.4 %	17.7	12.5	13.6	15.0	14.0	10.8	10.9	9.9	7.9	4.6	4.4
Manganese	68.3 mg	19.6	10.3	34.0	13.1	8.8	9.6	8.4	57.1	2.4	4.7	6.0
	8.6 %	7.1	6.1	6.8	7.9	4.7	6.4	4.7	5.7	5.8	4.8	4.0
Molybdenium	— mg	—	—	1.4	0.4	—	—	—	—	—	—	—
	— %	—	—	0.3	0.2	—	—	—	—	—	—	—

Table 6 Chemical Analysis of Impurities in Filtrated Solution

		EF-1	EF-2	EF-3	EF-4			EF-5	EF-6		
		Total	Total	Total	Inletside	Center	Outletside	Total	Inletside	Center	Outletside
Silicon	mg	—	21.5	12.8	10.4	17.7	12.1	—	—	—	—
	ppm*	—	333	214	291	215	190	165	225	140	135
Iron	mg	4.2	2.34	3.2	0.6	2.0	1.7	—	—	—	—
	ppm*	30.6	36.3	53	17	24	27	24	16	25	25
Nickel	mg	0.49	0.21	0.3	—	—	—	—	—	—	—
	ppm*	3.5	3.3	5	—	—	—	—	—	—	—
Chromium	mg	2.1	2.75	3.1	0.5	0.7	0.8	—	—	—	—
	ppm*	15.1	42.8	52	14	9	13	—	—	—	—
Manganese	mg	1.78	0.44	0.8	0.1	0.4	0.3	—	—	—	—
	ppm*	12.8	6.9	13	3	5	5	—	—	—	—

* Concentration (ppm) : Element Wt/sodium Wt

Table 7 Results of Once Through Test by Water

Test Conditions		
Magnetic Field ; 3KGuss		
Velocity ; 500m/hr		
Flow Rate ; 1.11/min.		
Media ; 10Mesh*26 24Mesh*50 24Mesh*50		
Sample	Concentration (ppm)	Weight (mg)
Strage Tank	18	
Inlet Sampler	22	
Inlet Media (10Mesh)		46
Center Media (24Mesh)		12
Outlet Media (24Mesh)		1
Outlet Sampler	3.1	

Table 8 Results of Recirculation Test by Water

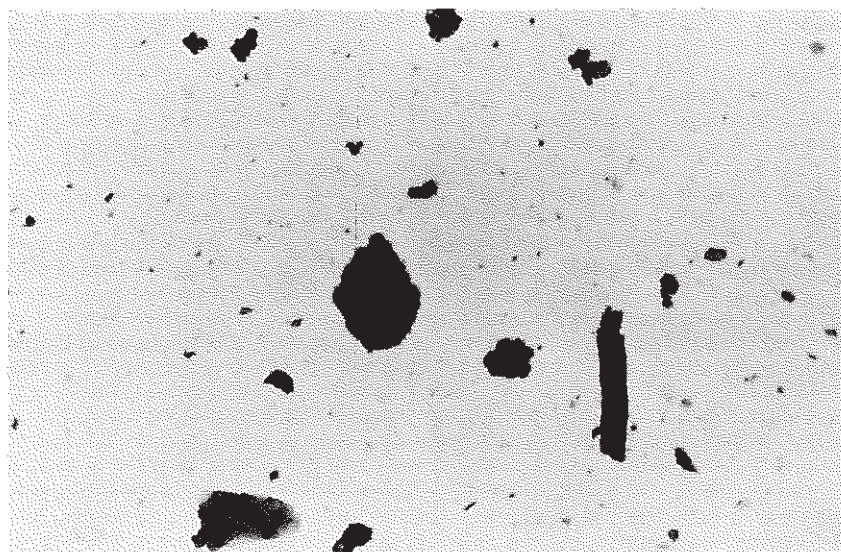
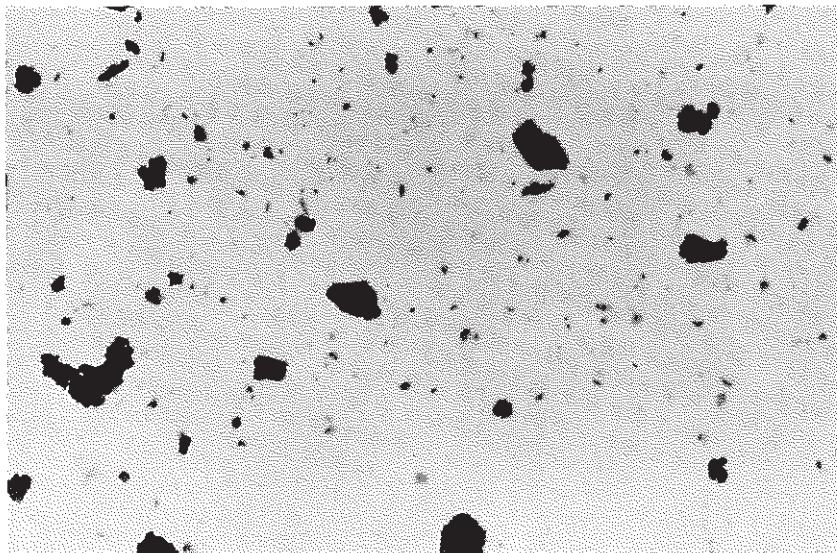
Test Conditions	
Magnetic Field ;	3KGuss
Velocity ;	500m/hr
Flow Rate ;	1.1l/min.
Media ;	10Mesh*26 24Mesh*50 24Mesh*50
Recirculation Time ;	20min.
Sample	Concentration (ppm)
Strage Tank (Start)	10.4
Strage Tank (End)	1.1
Inlet Sampler	10.0
Outlet Sampler	1.1

Table 9 Results of Once Through Test by Sodium

Test Condition	Sample	Particulate wt. (mg)	Particulate Fe wt. (mg)	Particulate Mn wt. (mg)	Particulate Cr wt. (mg)
Test No. Run 1-1 Magnetic Field ; 3KGuss Velocity ; 240m/hr Flow Rate ; 0.53 l/min Media ; 10Mesh×26 24Mesh×50 24Mesh×50	Inlet Sodium Sampler	9.0			
	Inlet Media(10Mesh)	28.7	13.9	0.1	0.31
	Center Media(24Mesh)	5.2	1.4	0.041	0.052
	Outlet Media(24Mesh)	5.0	1.1	0.048	0.052
	Outlet Sampler	6.2	2.8	0.1	0.41
Test No. Run 1-2 Magnetic Field ; 0 Velocity ; - Flow Rate ; - Media ; 10Mesh×25 24Mesh×60 100Mesh×90	Inlet Sodium Sampler	5.6	1.2	0.04	0.15
	Inlet Media(10Mesh)	20.9	1.2	0.17	0.09
	Center Media(24Mesh)	2.6	0.43	0.012	0.028
	Outlet Media(24Mesh)	6.8	2.6	—	—
	Outlet Media(24Mesh)	3.9	1.0	—	—

Table 10 Results of Recirculation Test by Sodium

Test Condition	Sample	Particulate wt. (mg)	Particulate Fe wt. (mg)	Particulate Mn wt. (mg)	Particulate Cr wt. (mg)
Run No. 2-1 Magnetic Field ; 3KGuss Velocity ; 500m/hr Flow Rate ; 1.0 1/min. Test Duration ; 150min. Media ; 10Mesh×26 24Mesh×50 24Mesh×50	Inlet Sodium Sampler	29.1	8.0	0.059	0.21
	Inlet Media(10Mesh)	68.8	43.1	0.36	1.62
	Center Media(24Mesh)	17.0	3.5	0.043	0.13
	Outlet Media(24Mesh)	6.2	—	—	—
	Outlet Sampler	5.4	0.5	0.013	0.041
Run No. 2-2 Magnetic Field ; 0KGuss Velocity ; 500m/hr Flow Rate ; 1.0 1/min. Test Duration ; 150min. Media ; 10Mesh×26 24Mesh×50 24Mesh×50	Inlet Sodium Sampler	16.1	4.4		
	Inlet Media(10Mesh)	19.1	6.6	0.020	0.35
	Center Media(24Mesh)	23.7			
	Outlet Media(24Mesh)	8.9	3.5	0.020	0.063
	Outlet Media(24Mesh)	5.5	1.6	0.023	0.15



100 μm

Photo 1 Optical micrographs of particulates collected from the cold leg sampler

(Run No.C - 1 - 2)

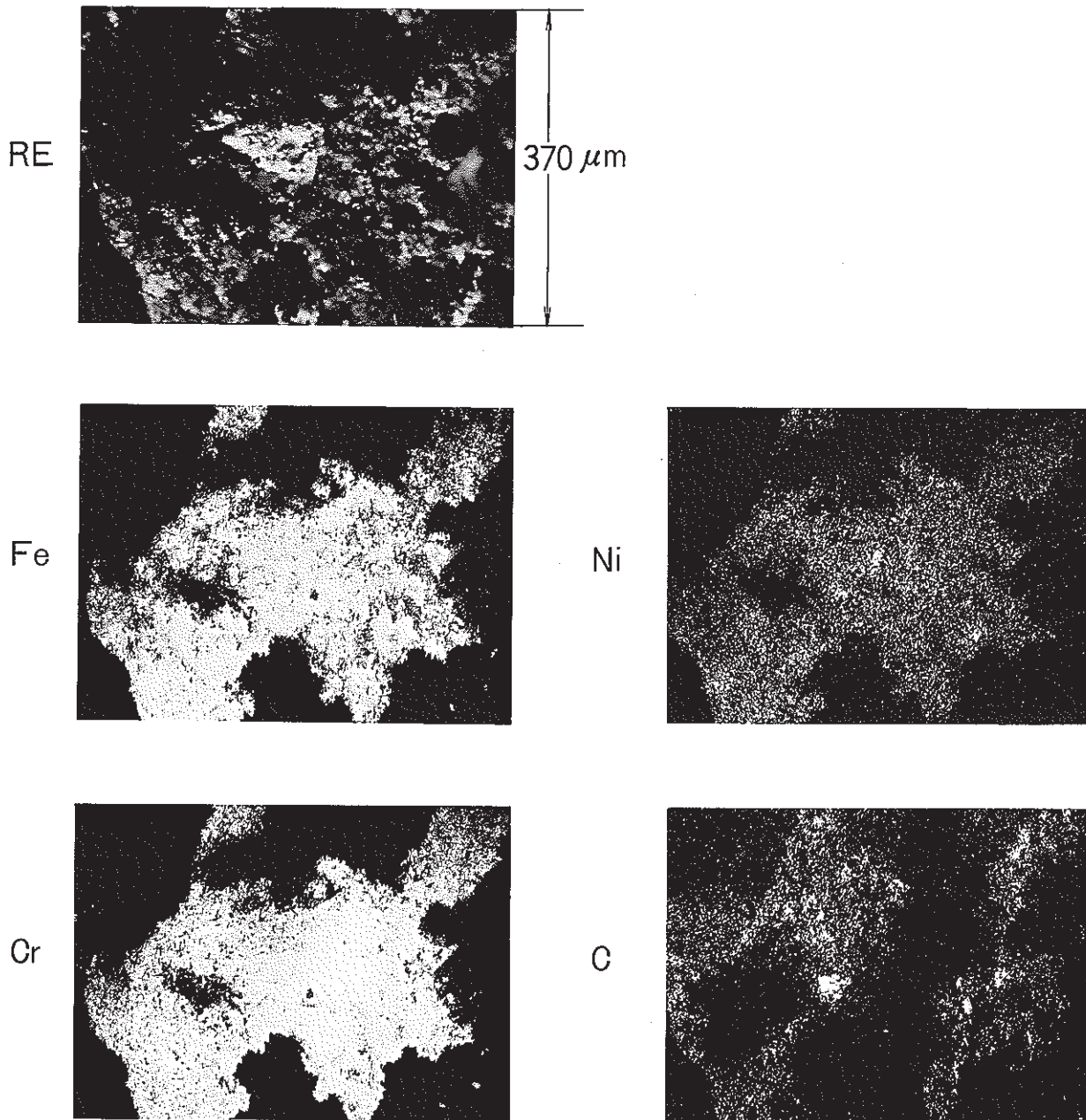
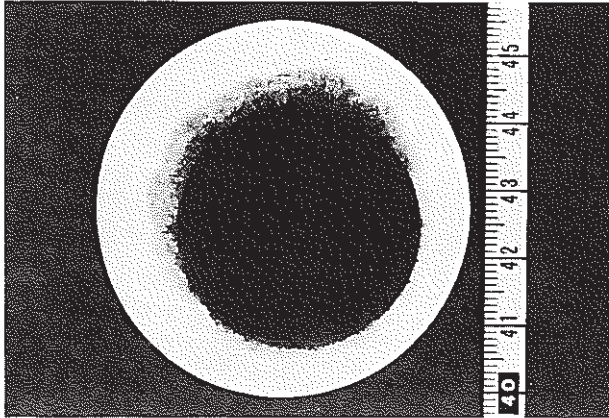
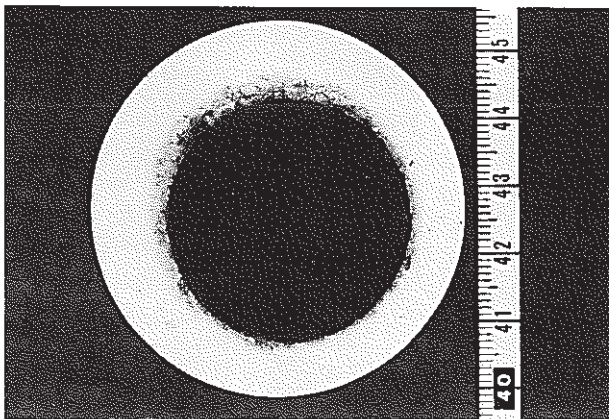


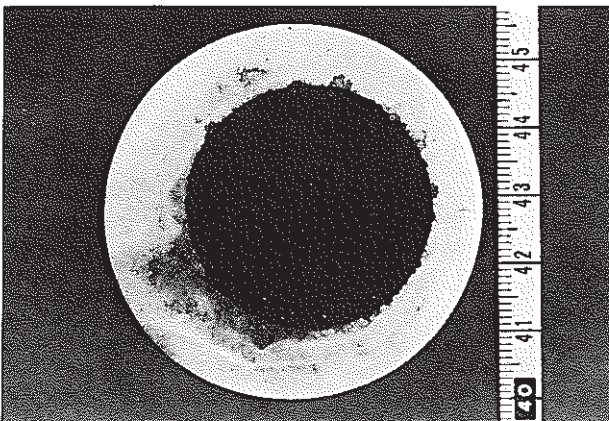
Photo 2 Scanning electron micrographs of particulate collected from the hot leg sampler (Run No. H-1-10)



Inlet Side Media
No. 1 ~ 4



Inlet Side Media
No. 5 ~55



Center & Outlet Side
Media
No.56~150

Photo 3 Photographs of particulates recovered from
media of the magnetic filter (Run No. EF - 2)



Photo 4 - 5 - a
Inlet Side Sodium Sample

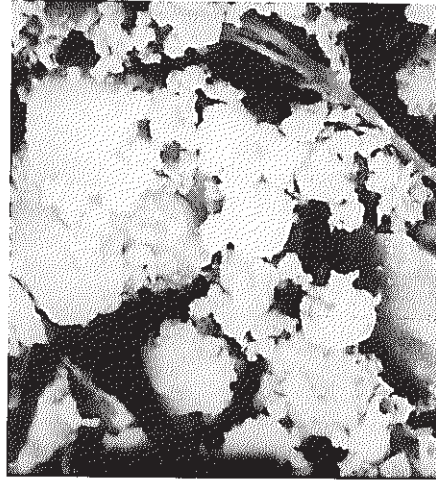


Photo 4 - 5 - b
Media Sample

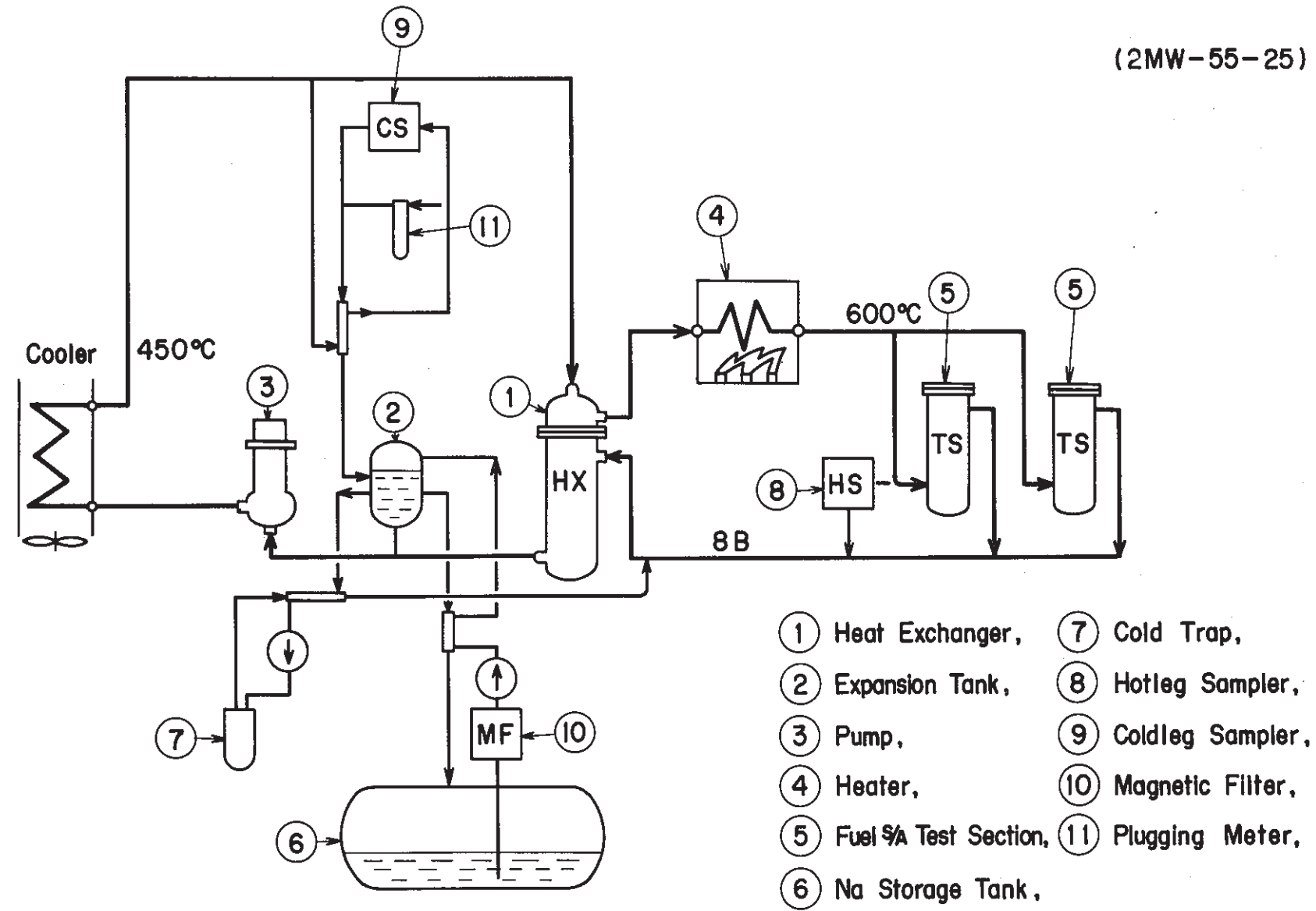
┌
1 μ m



Photo 4 - 5 - c
Outlet Side Sodium Sample

Photo 4 Scanning electron micrographs of particulates collected from the magnetic filter (Run No. EF - 5)

(2MW-55-25)



- ① Heat Exchanger,
- ② Expansion Tank,
- ③ Pump,
- ④ Heater,
- ⑤ Fuel %A Test Section,
- ⑥ Na Storage Tank,
- ⑦ Cold Trap,
- ⑧ Hotleg Sampler,
- ⑨ Coldleg Sampler,
- ⑩ Magnetic Filter,
- ⑪ Plugging Meter,

Fig. 1 Location of the Samplers in Sodium Loop (2 MW Loop)

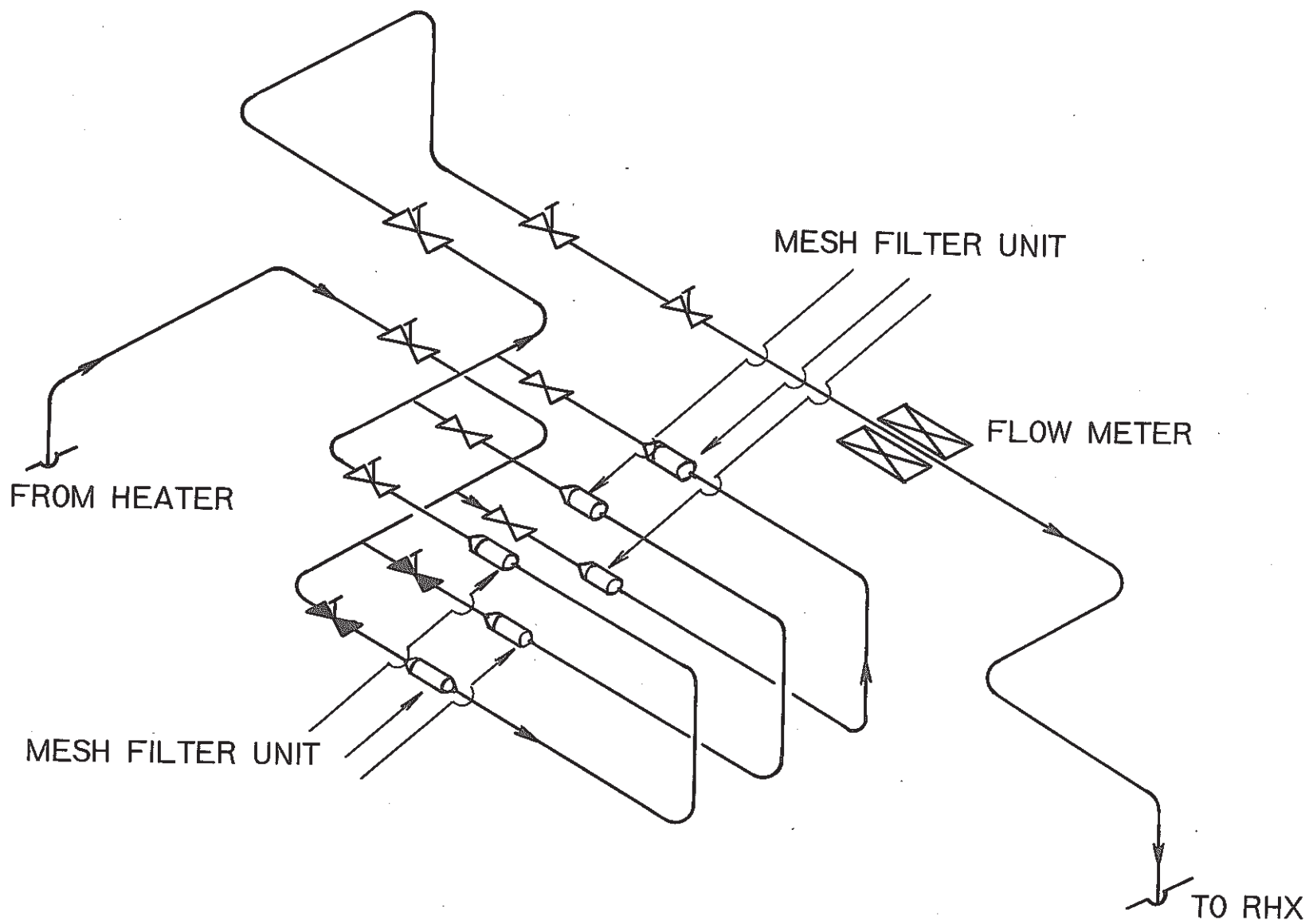


Fig. 2 Isometric Diagram of Hot Leg Sampler Section

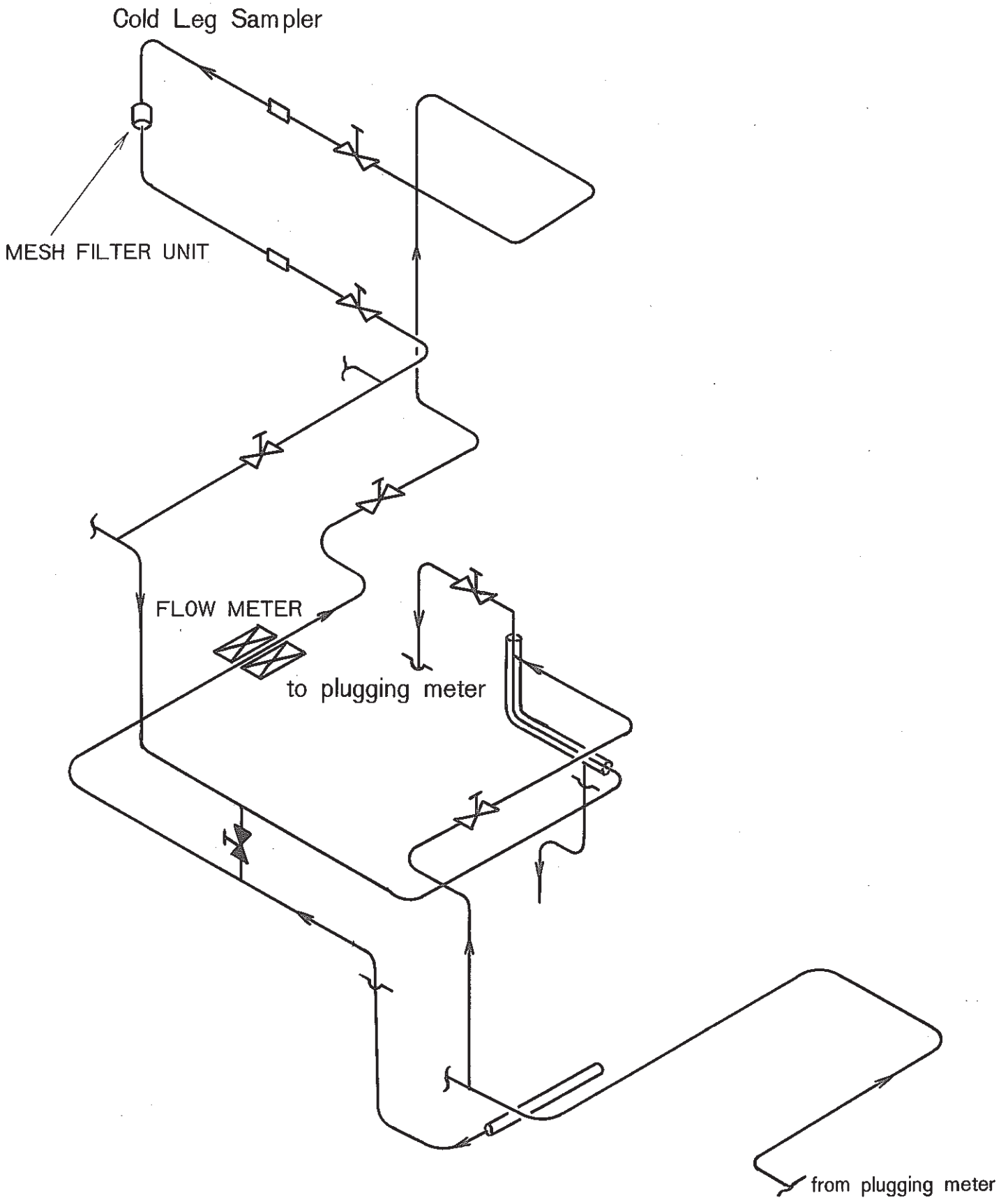
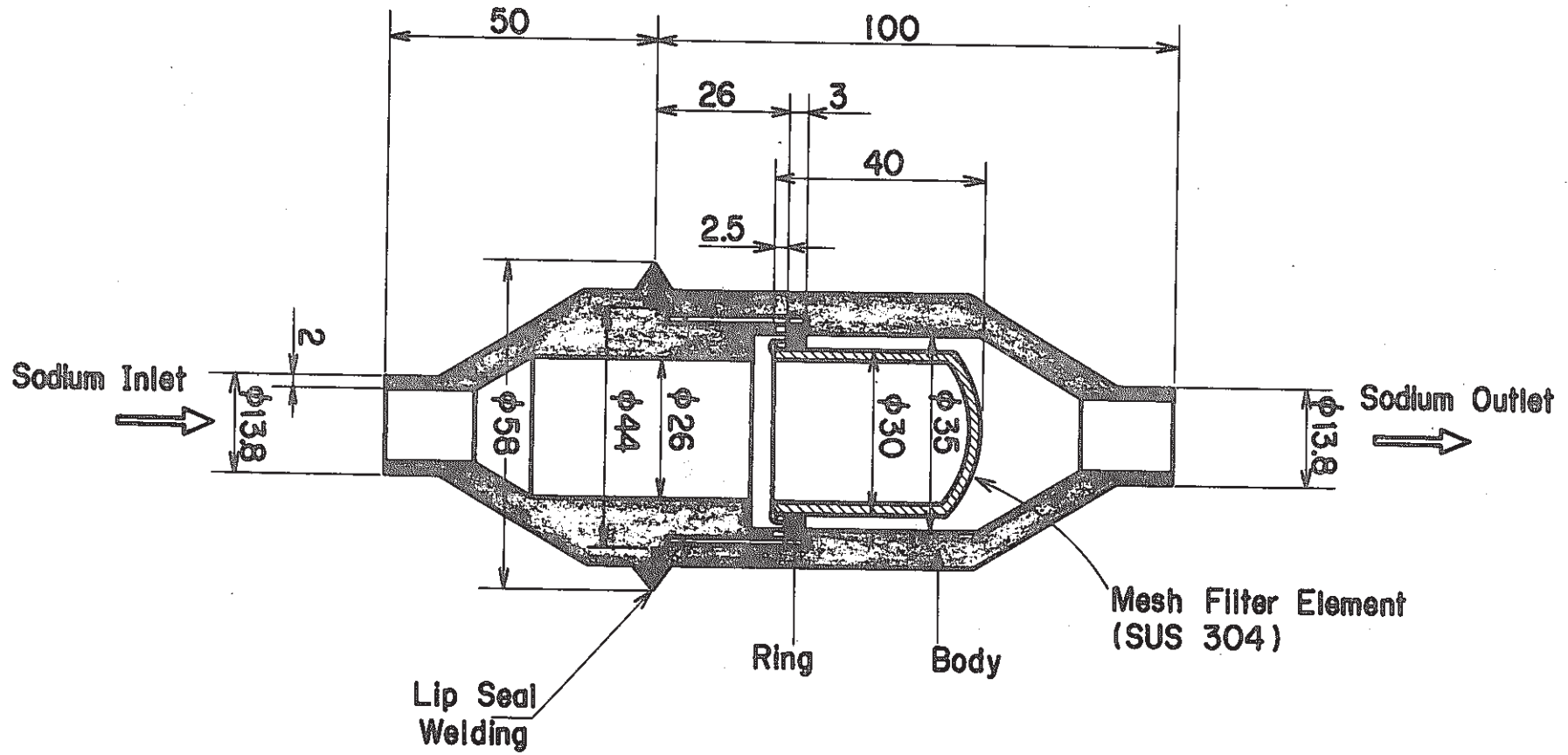


Fig. 3 Isometric Diagram of Cold Leg Sampler



(NG.NO ; 2MW-55-26)

Fig. 4 Schematic of Mesh Filter Unit

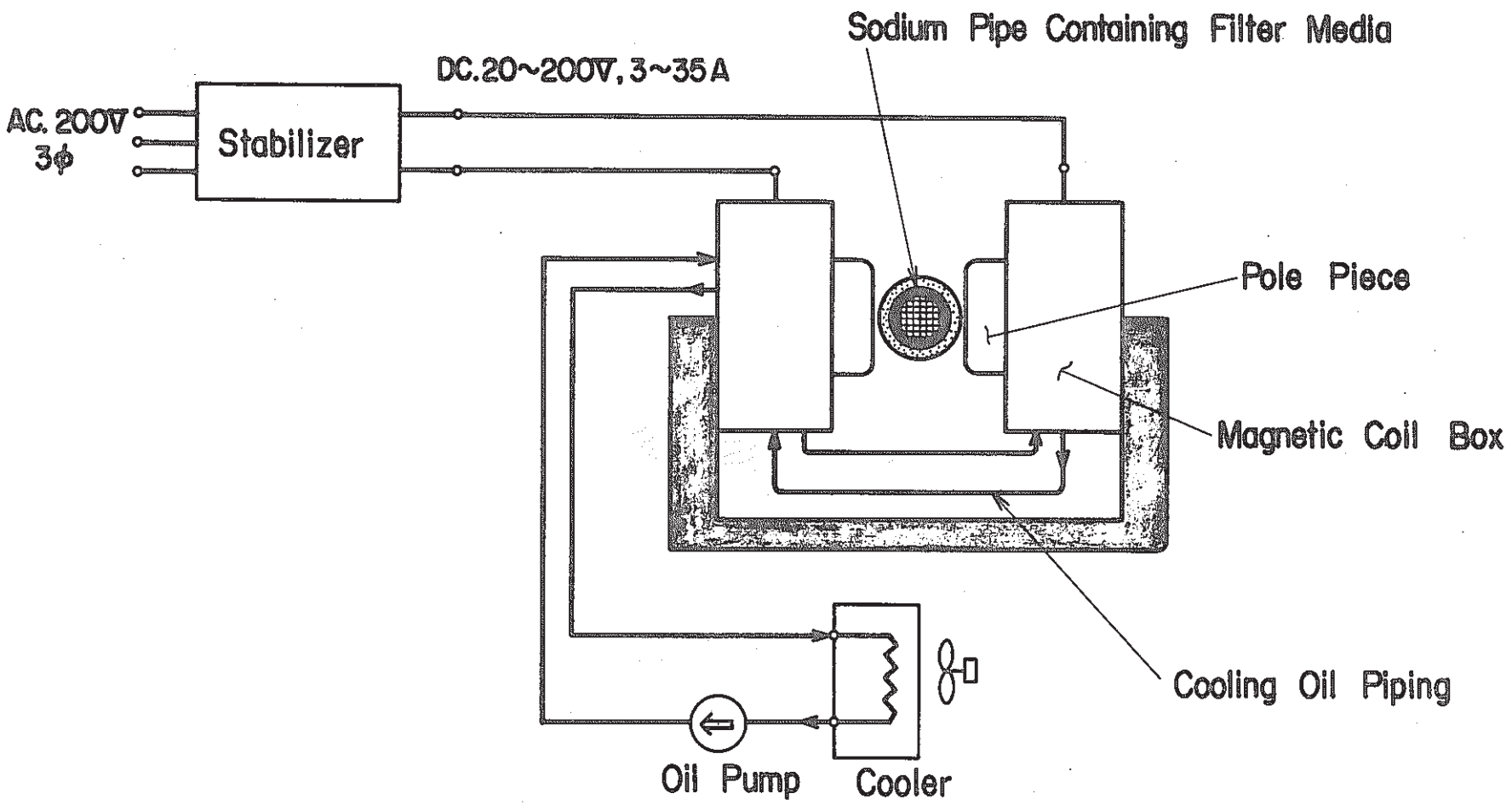


Fig. 5 Configuration of Magnetic Filter Unit. (2MW-55-19)

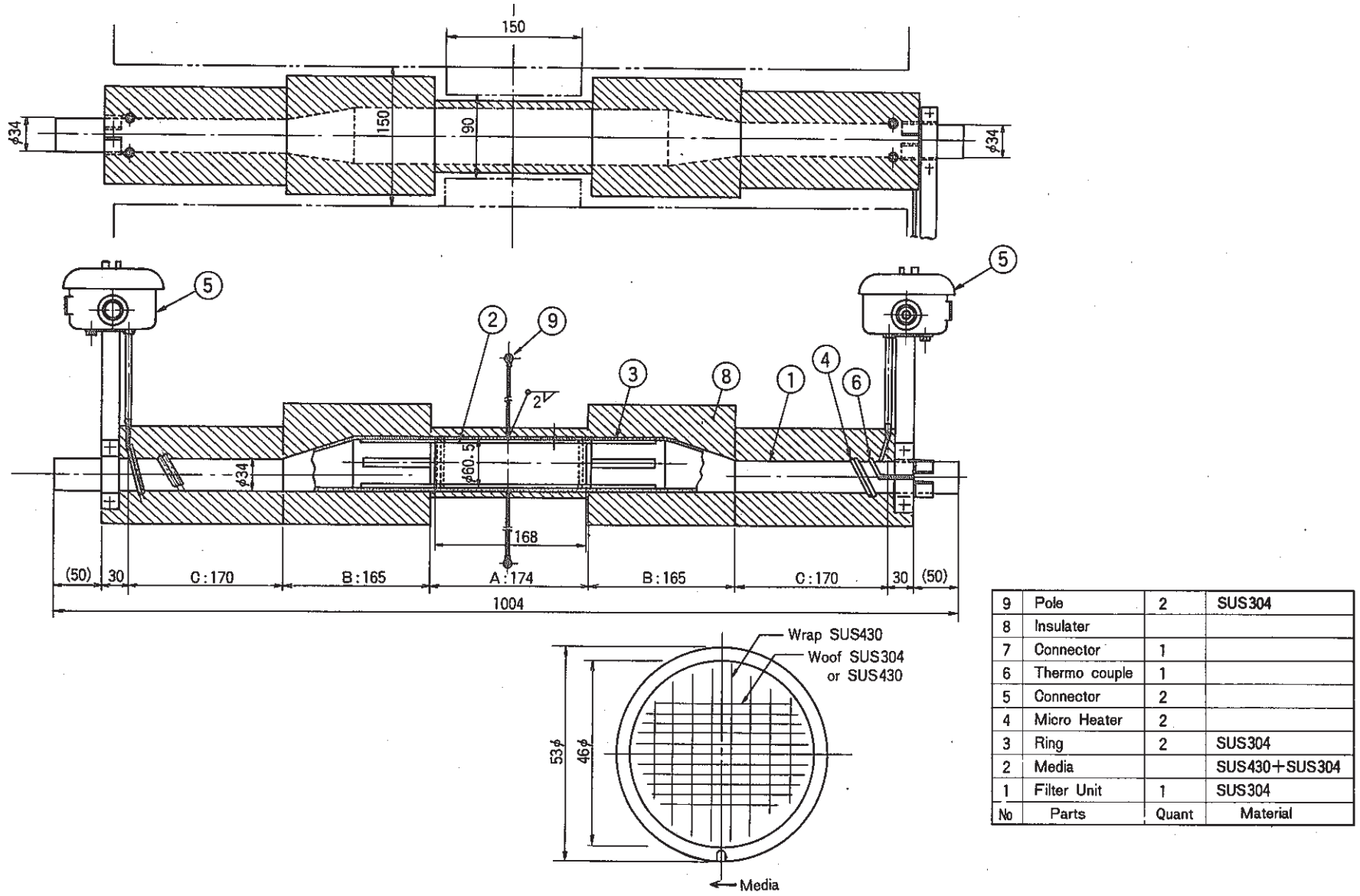


Fig. 6 Structure of 2 MW Loop Magnetic Filter Unit

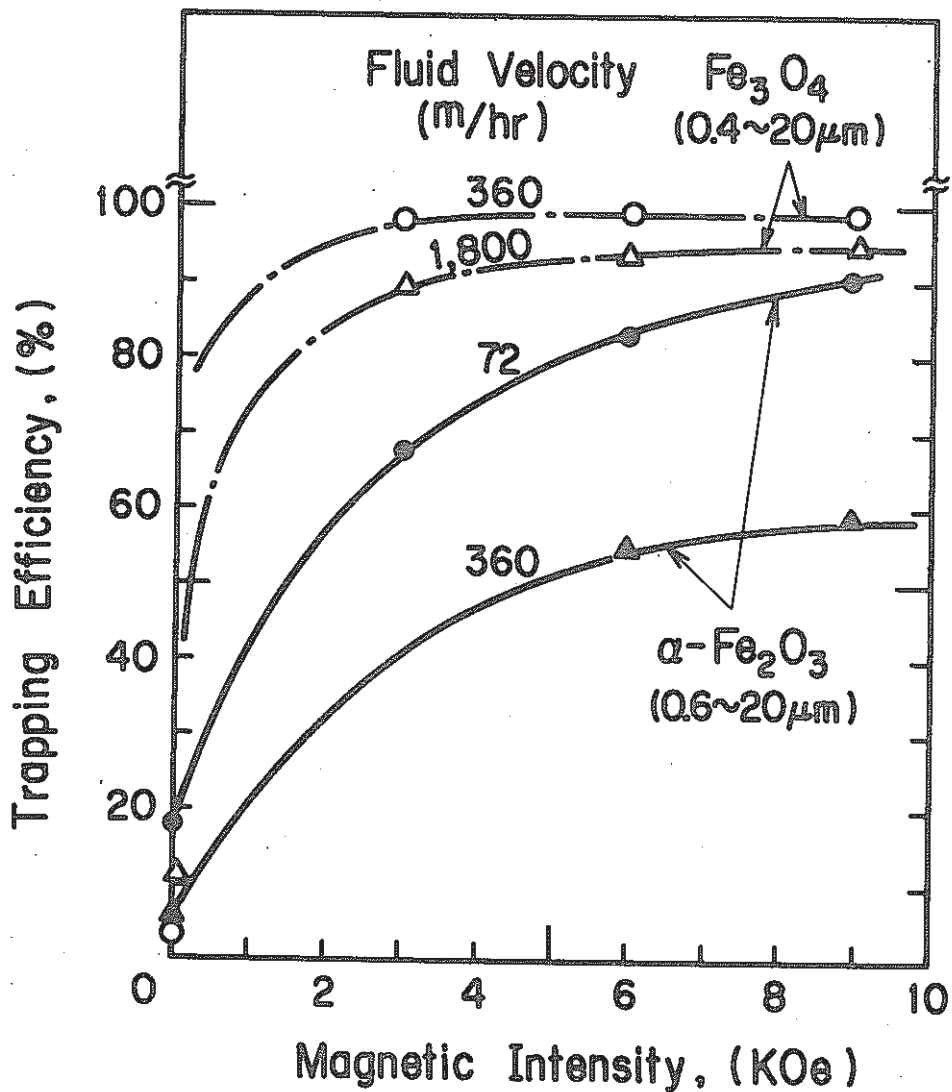


Fig. 7 Trapping Efficiency of Fe_3O_4 and $\alpha-Fe_2O_3$ against Applied Magnetic Intensity. (2 MW-55-18)

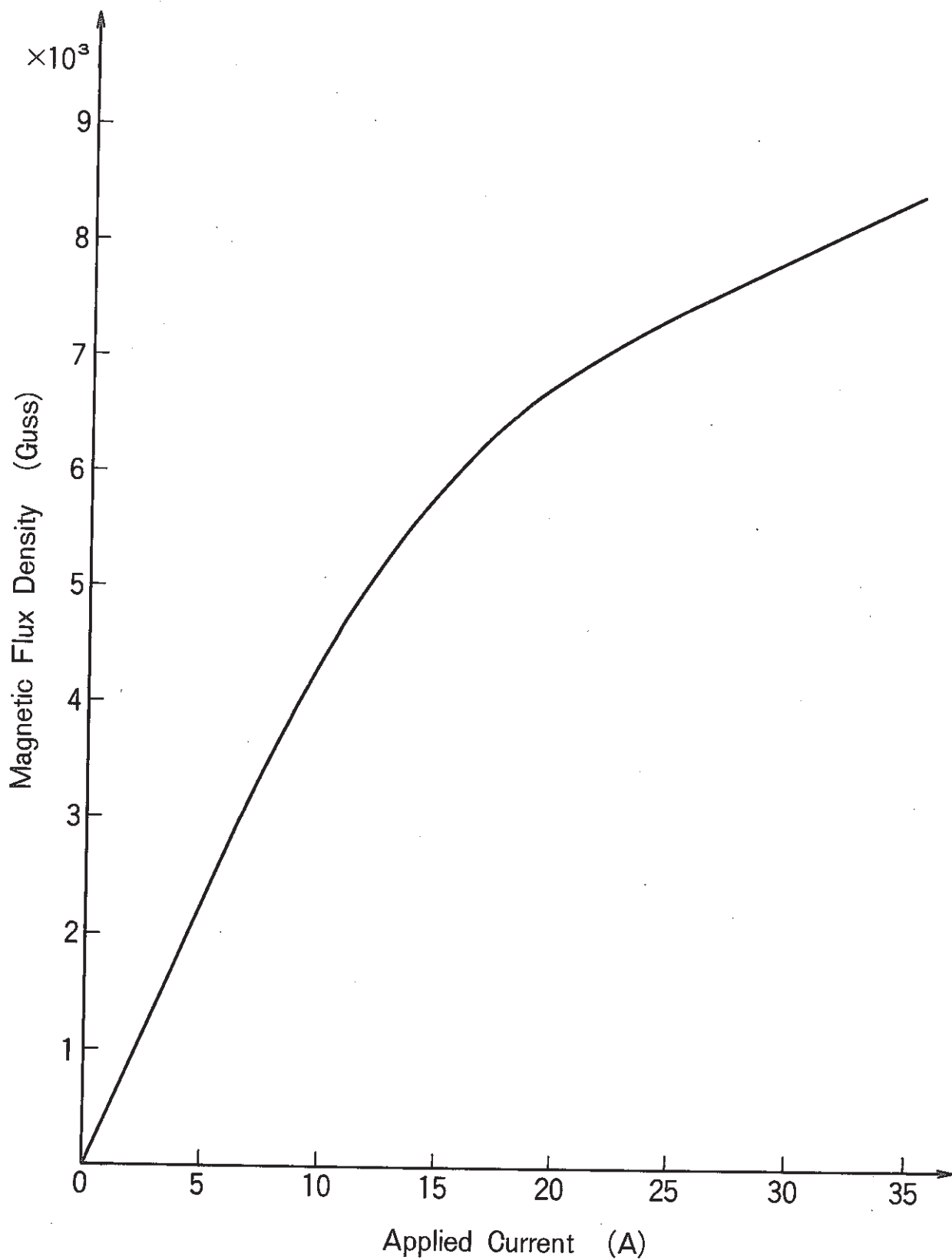


Fig. 8 Magnetic Flux Density ν s. Applied Current

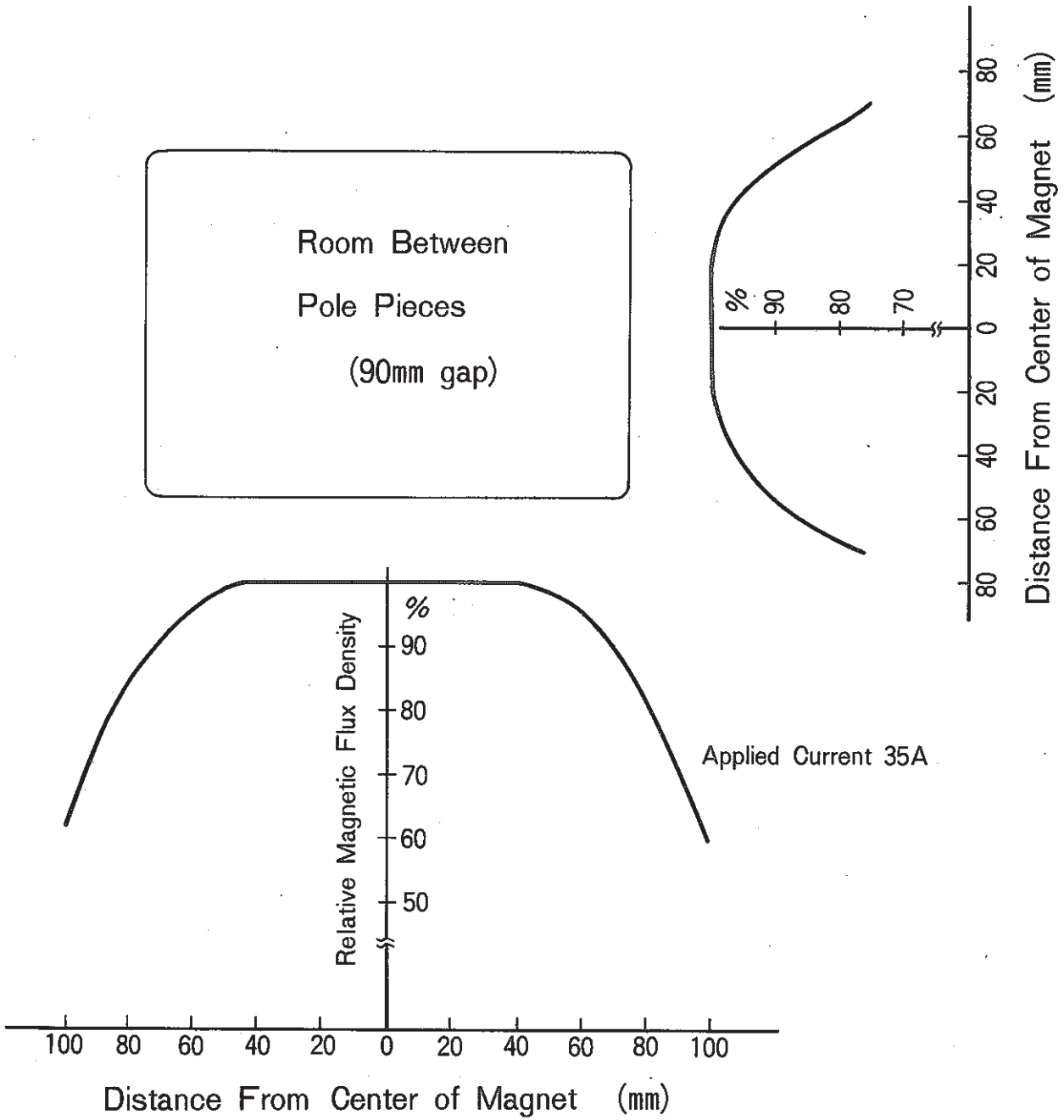


Fig. 9 Distribution of Magnetic Flux Density

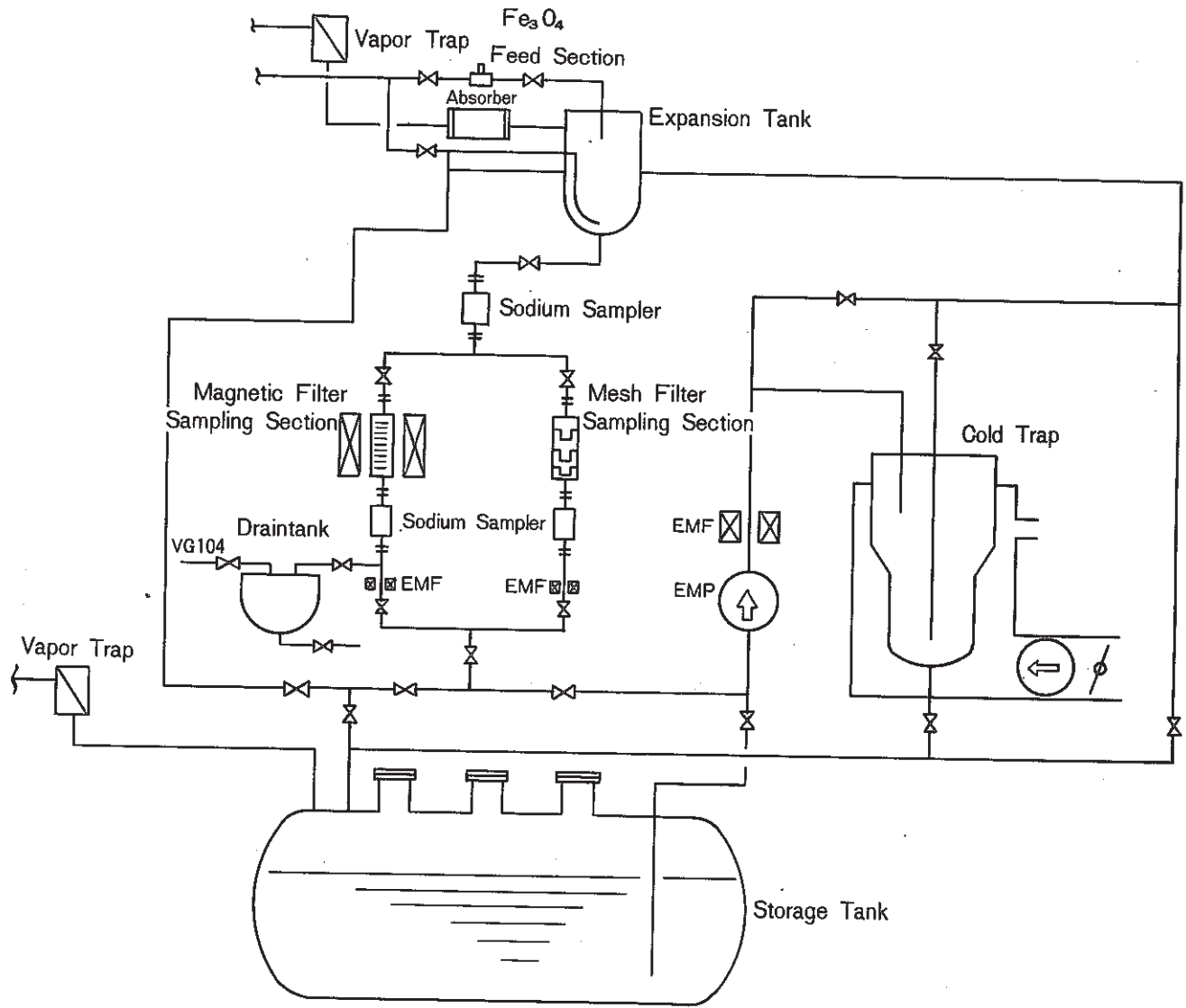
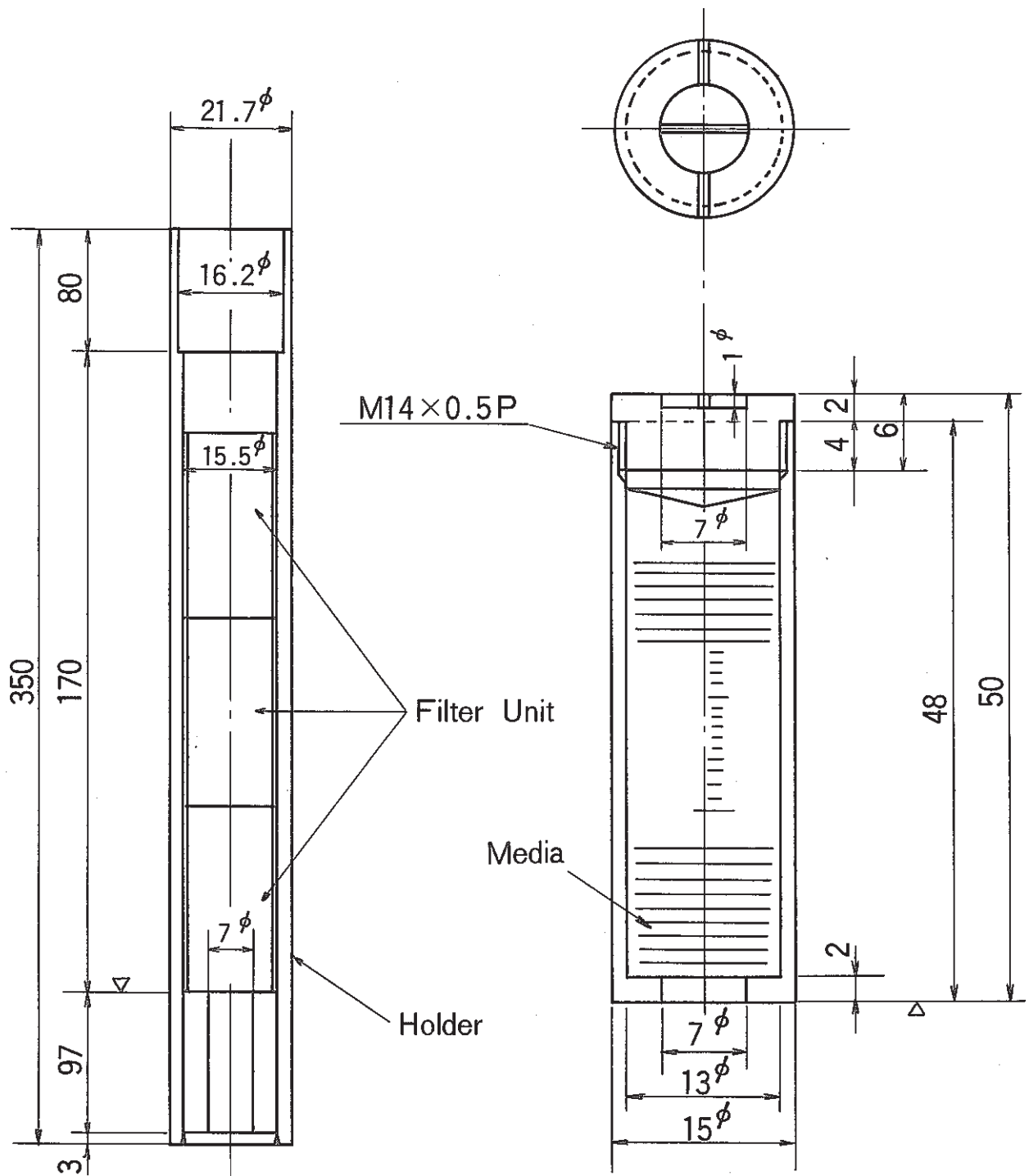


Fig. 10 Flow Diagram of Small Test Loop



Media	
0.8mmφ	10Mesh
0.3mmφ	24Mesh
0.1mmφ	100Mesh

Fig. 11 Schematic Drawing of Magnetic Filter Unit and Holder for Small Loop Test.

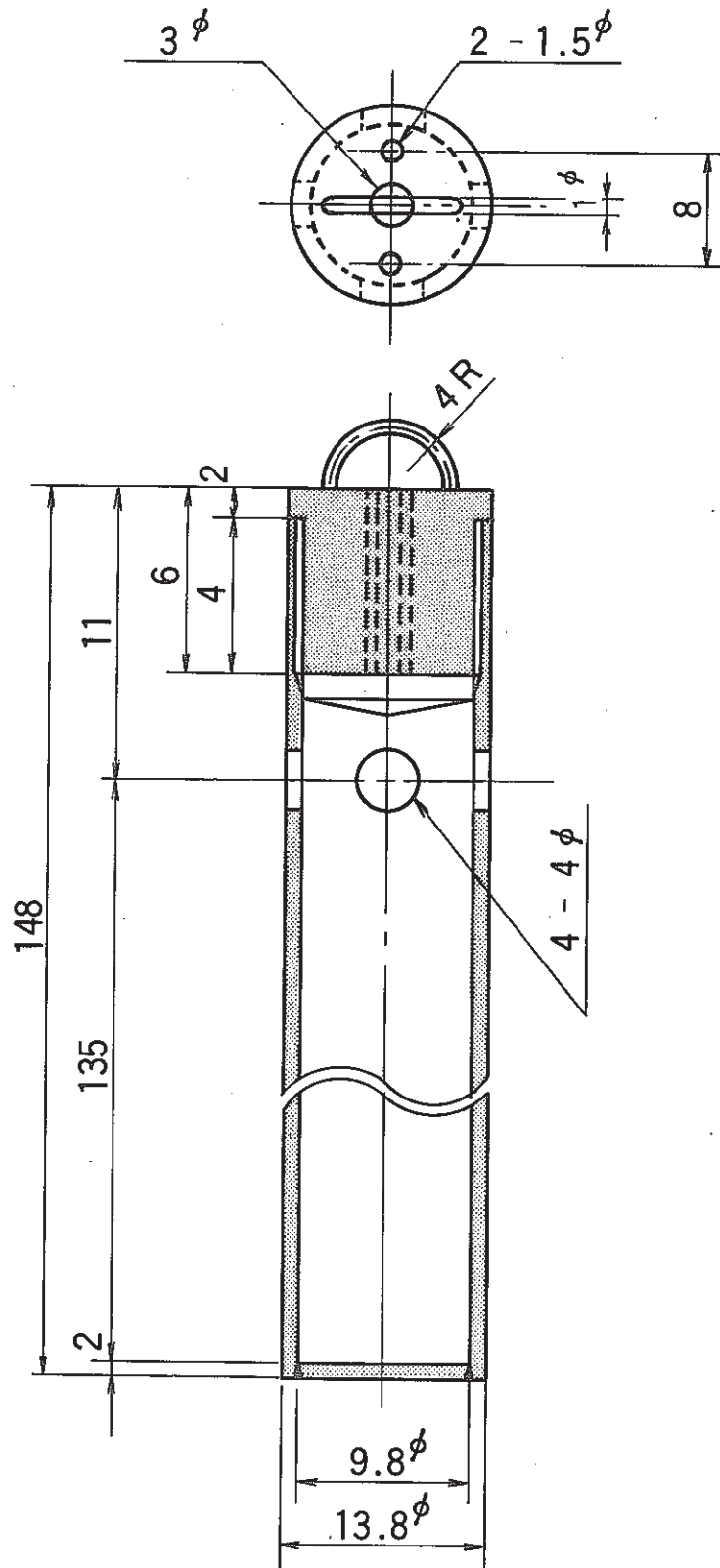


Fig. 12 Schematic Drawing of Sodium Sampler

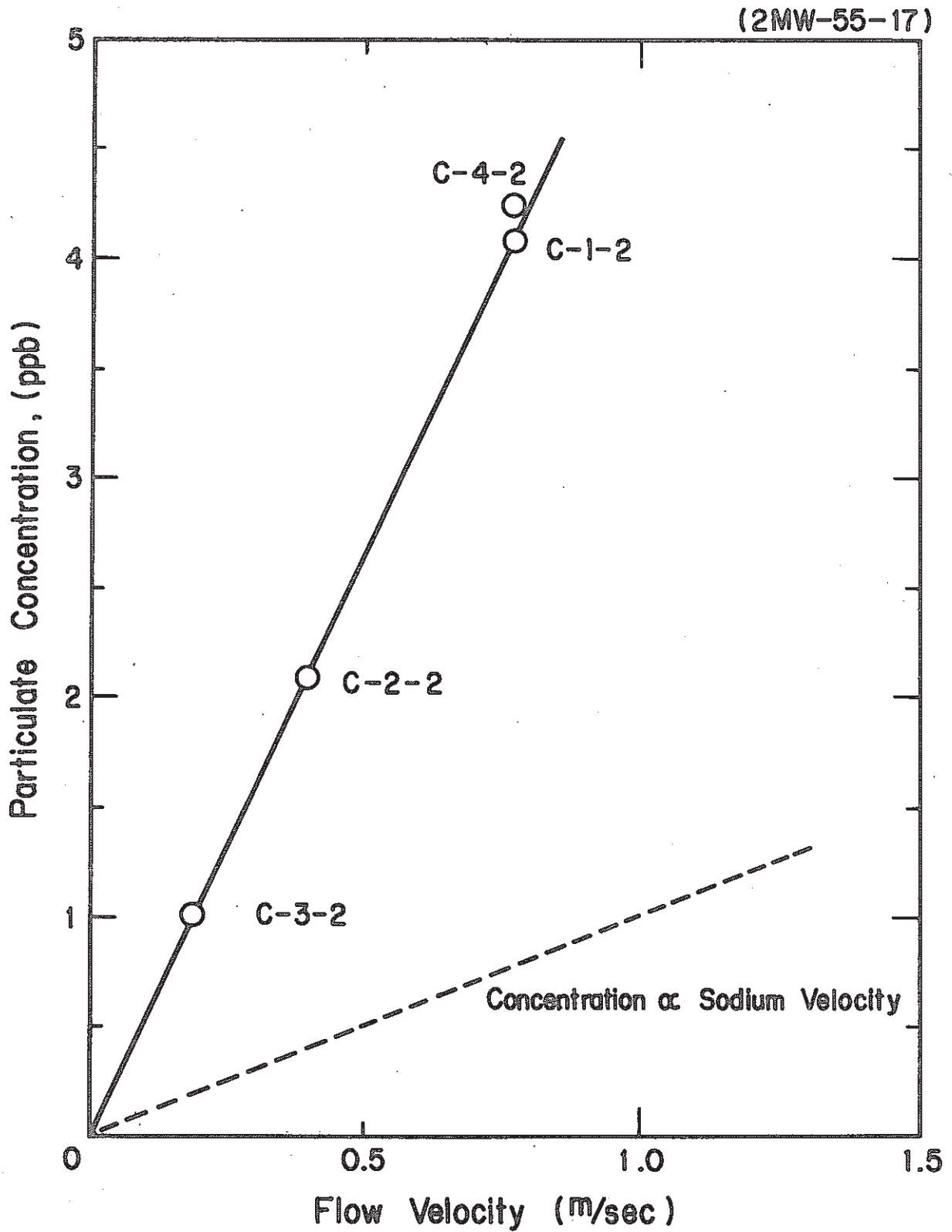


Fig. 13 Dependent of Particulate Concentration on Flow Velocity in Main Piping of Loop.

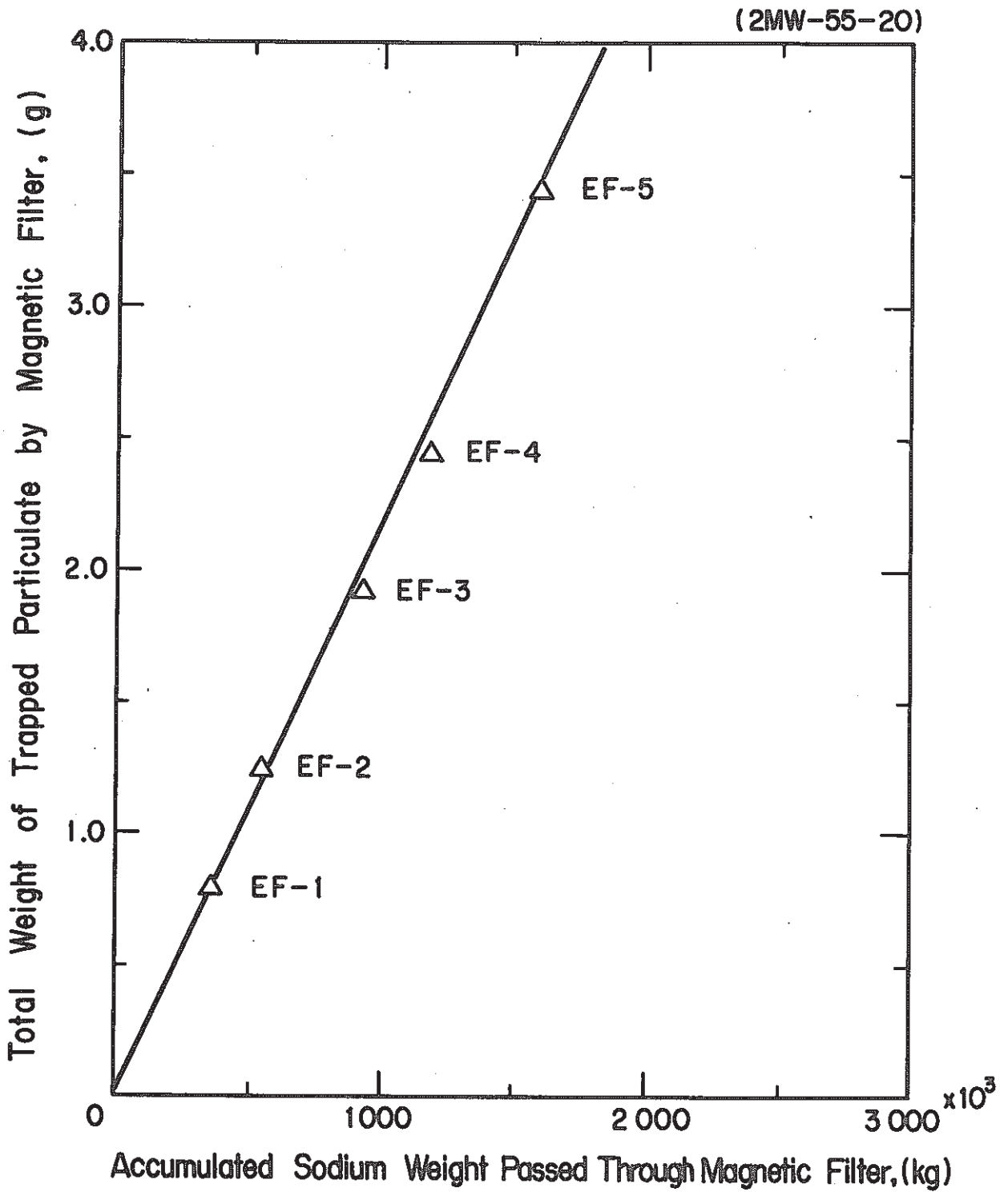
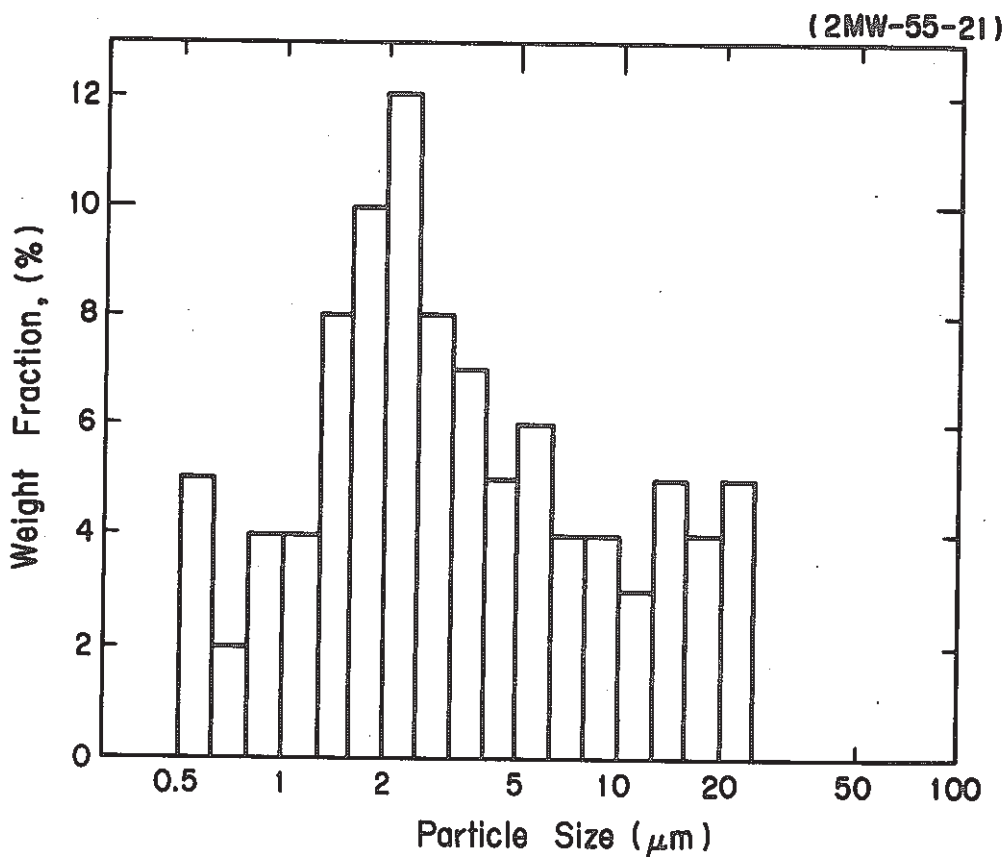
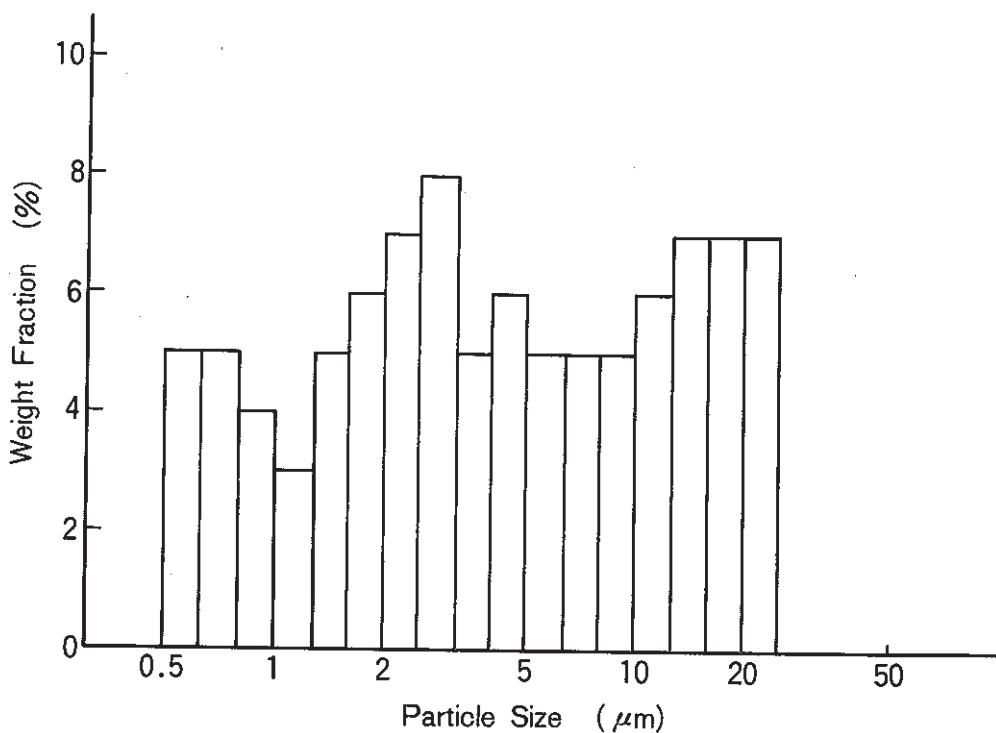


Fig. 14 Weight of Trapped Particulate vs Accumulated Sodium Weight Relationship by Magnetic Filter.

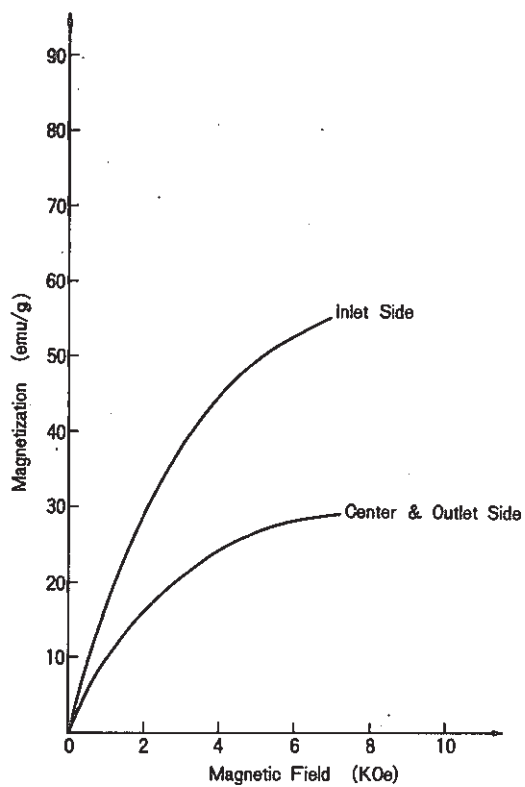


(a) Inlet Media

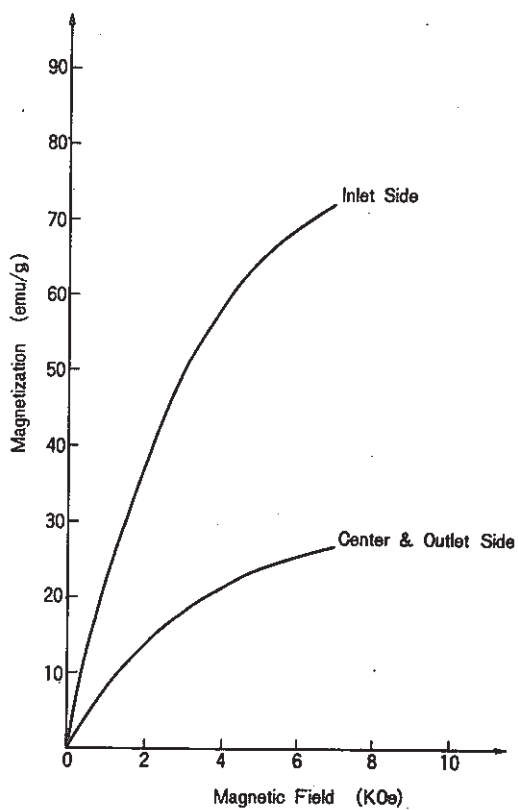


(b) Center Media

Fig. 15 Distribution of Particle Sizes Trapped by Magnetic Filter.



(a) EF - 2



(b) EF - 3

Fig. 16 Magnetization Curve

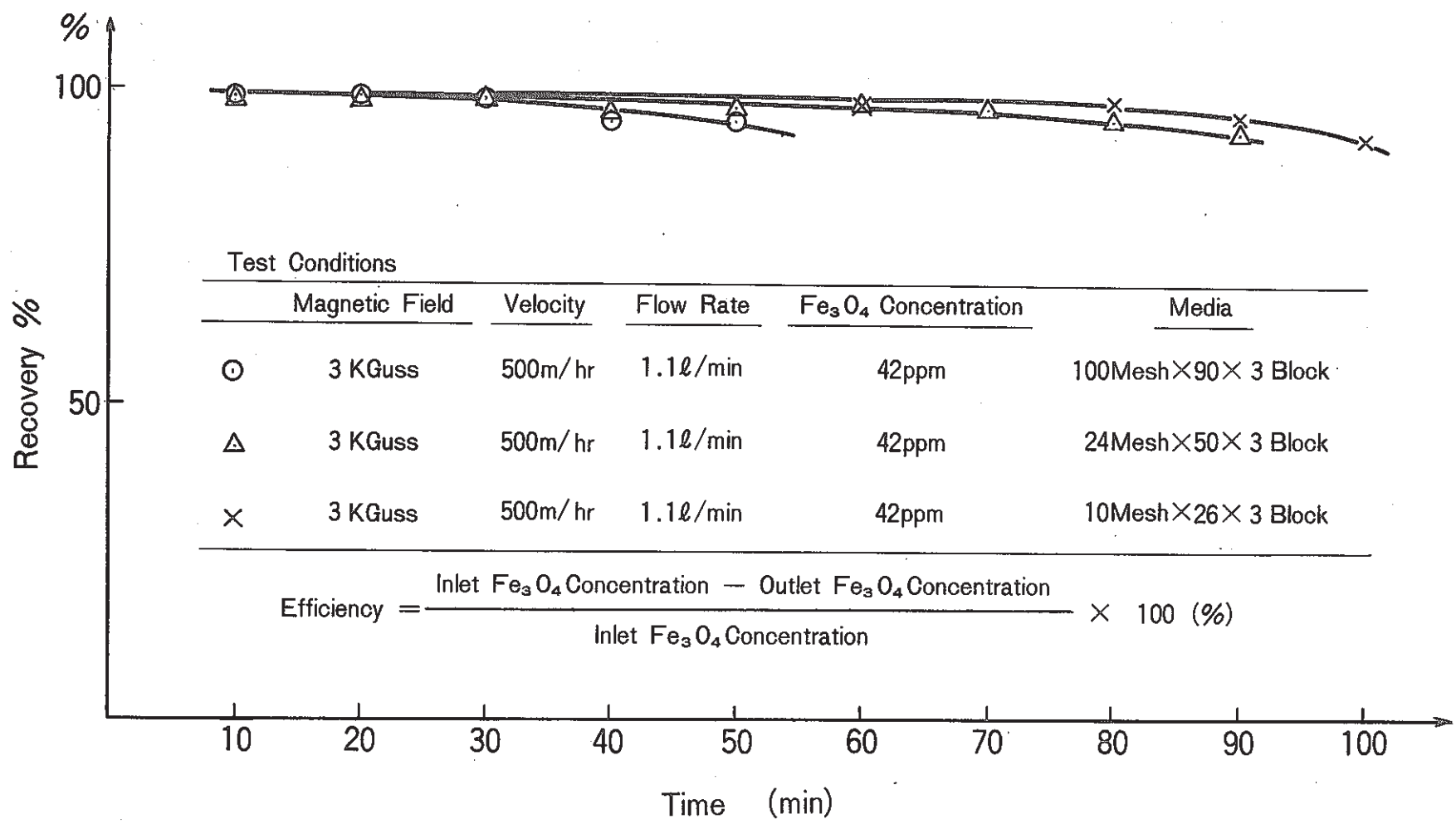


Fig. 17 Magnetic Filter Performance by Water Test

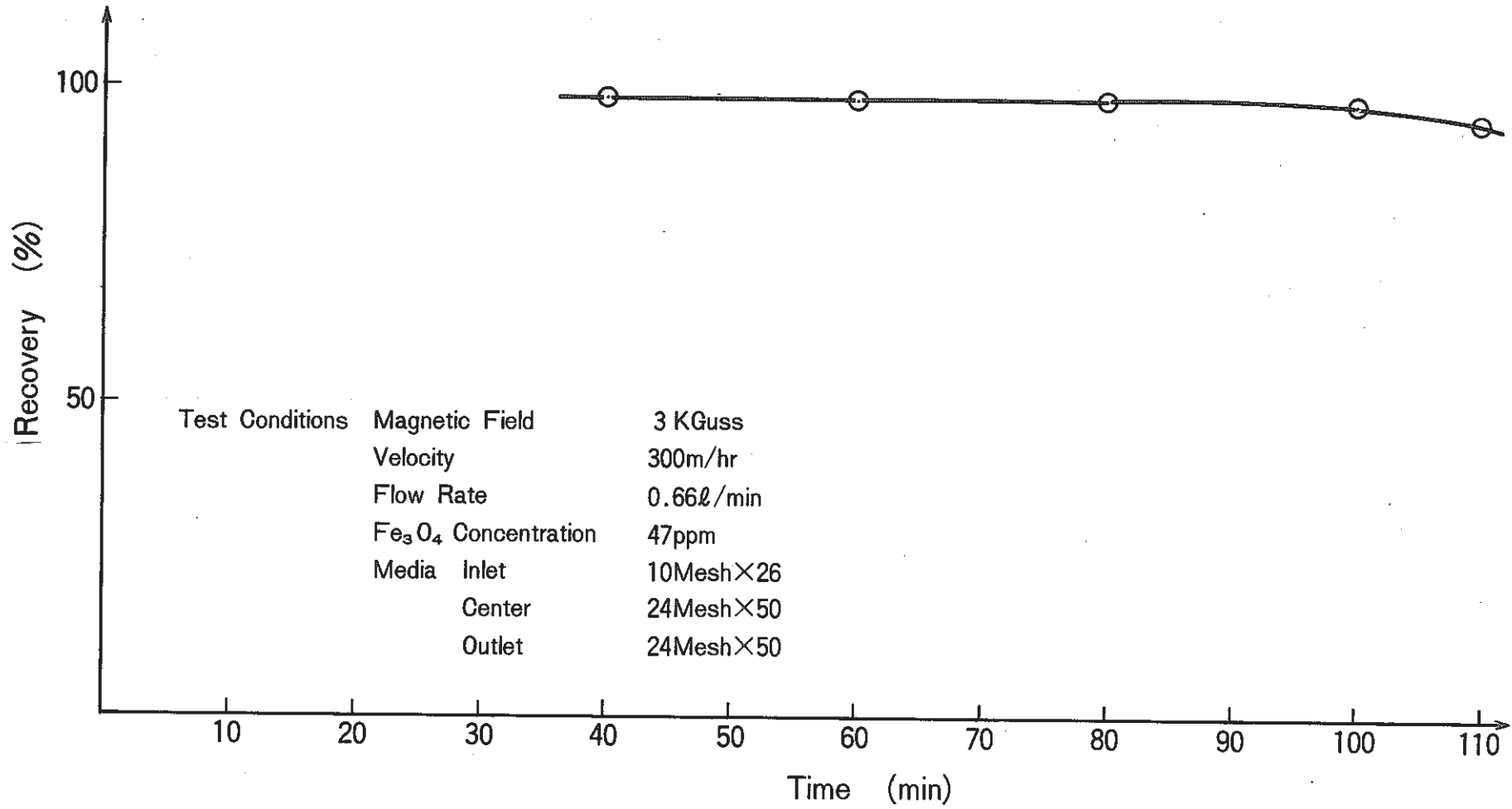


Fig. 18 Magnetic Filter Performance by Water Test

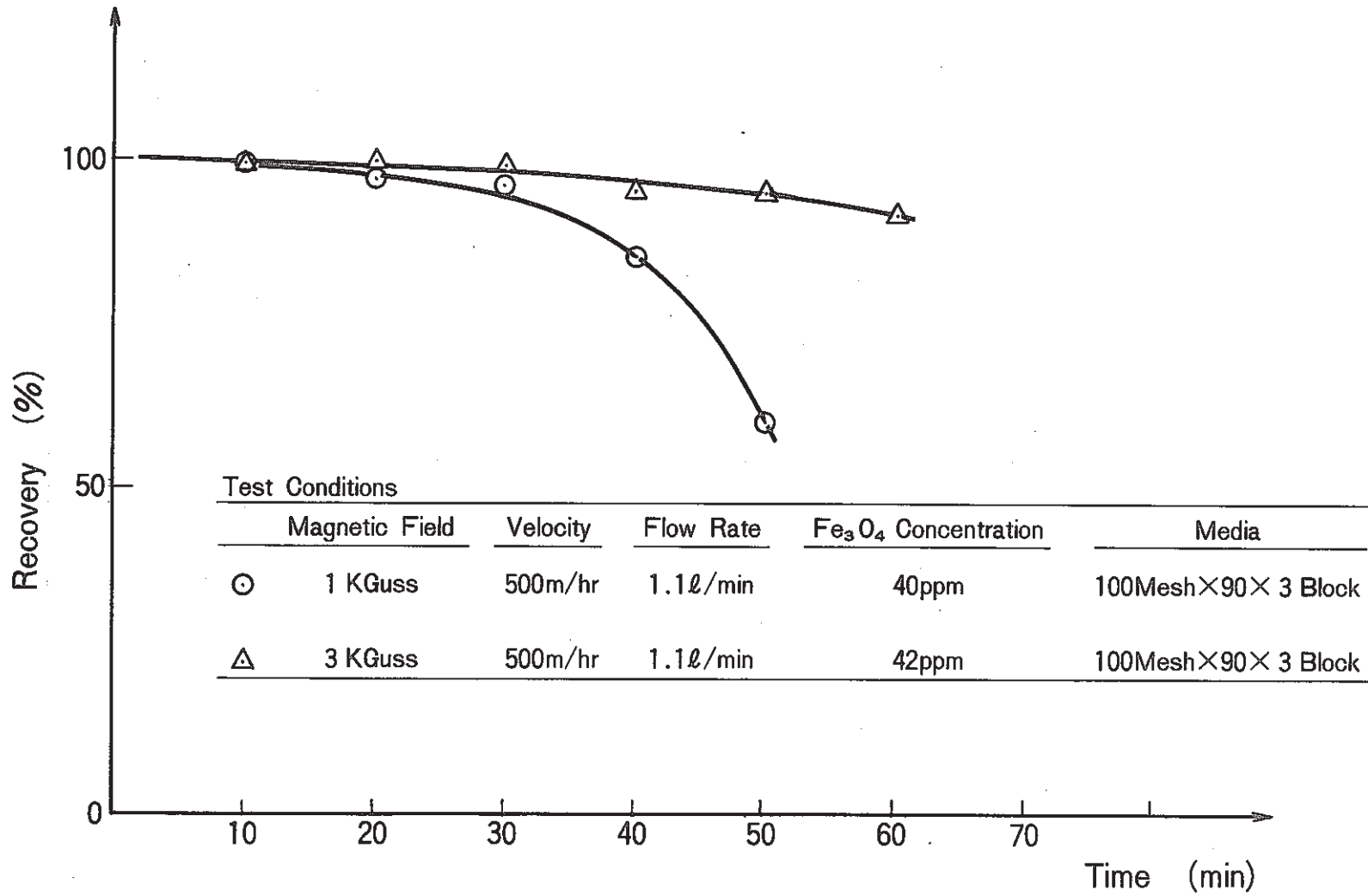


Fig. 19 Magnetic Filter Performance by Water-3

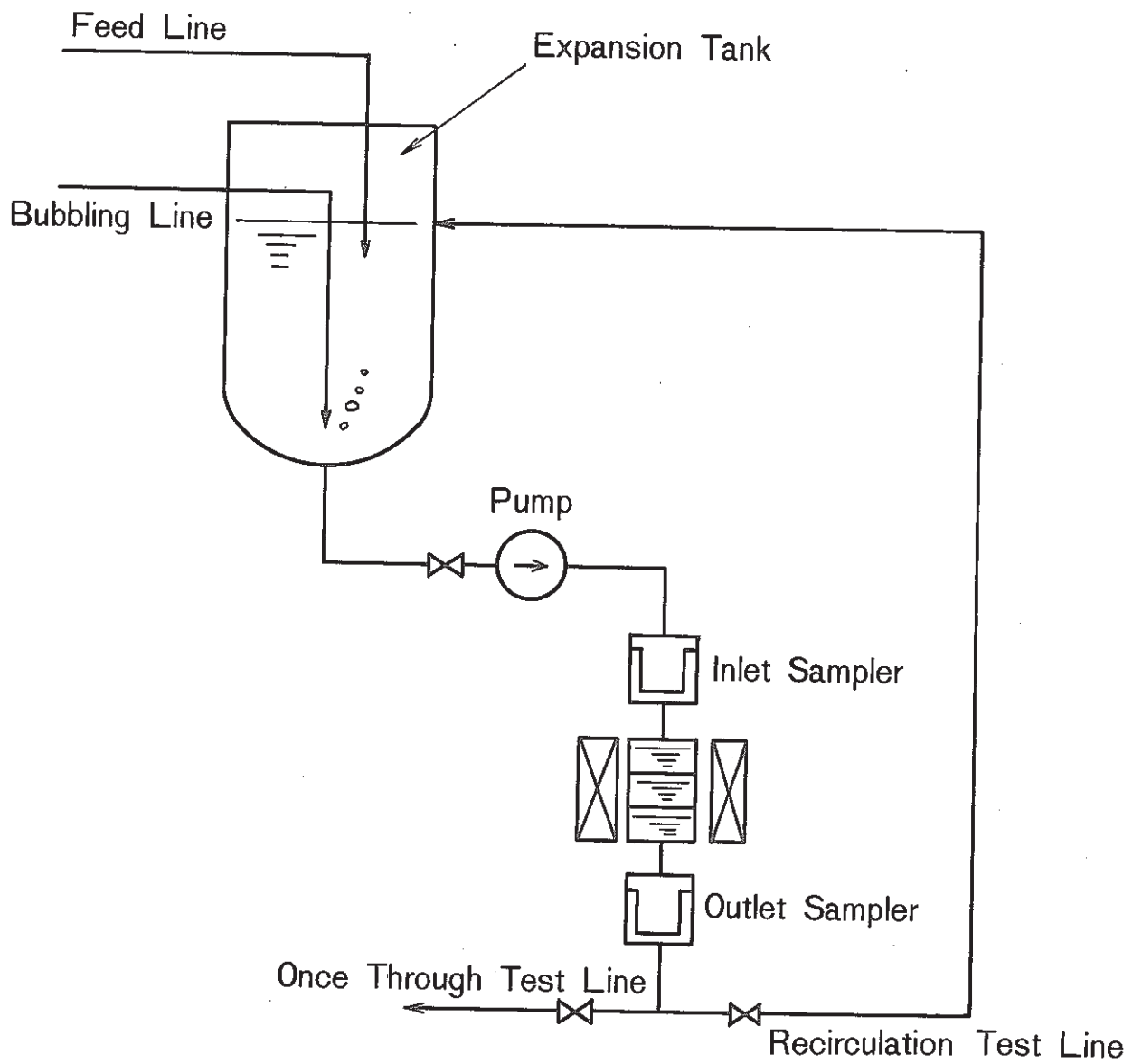
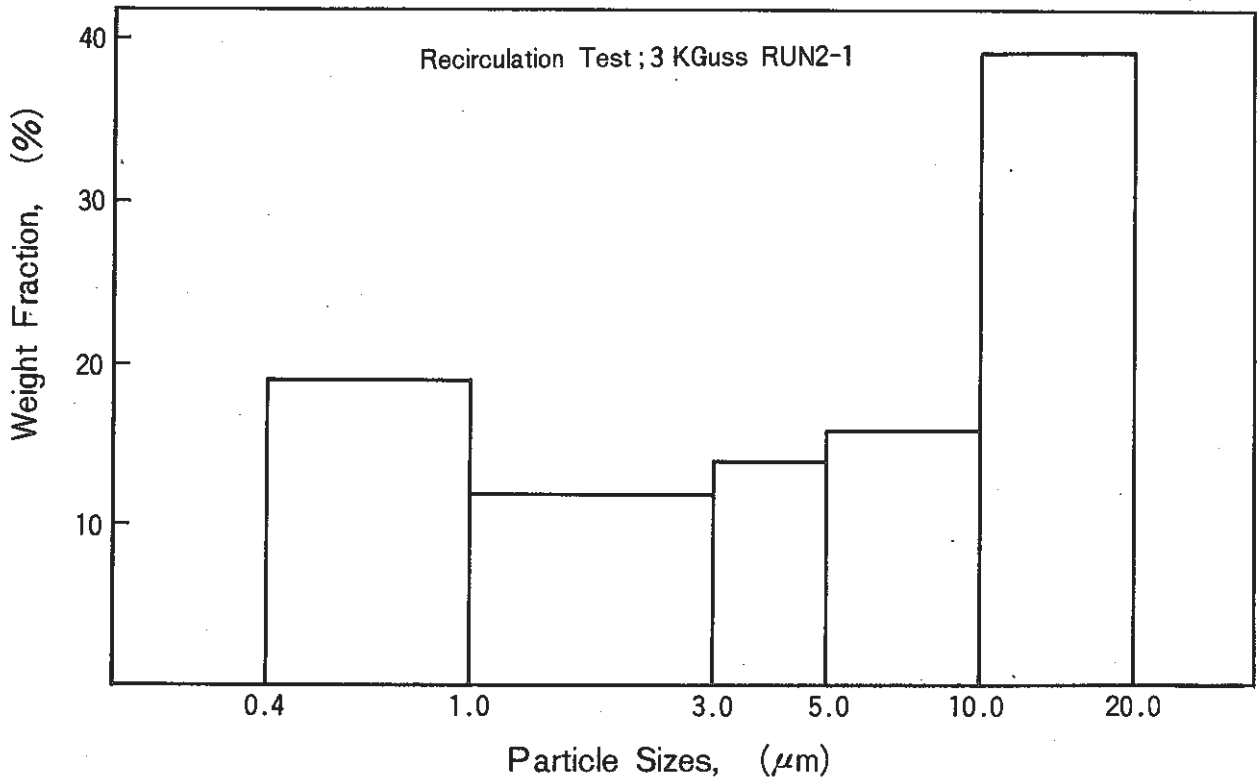
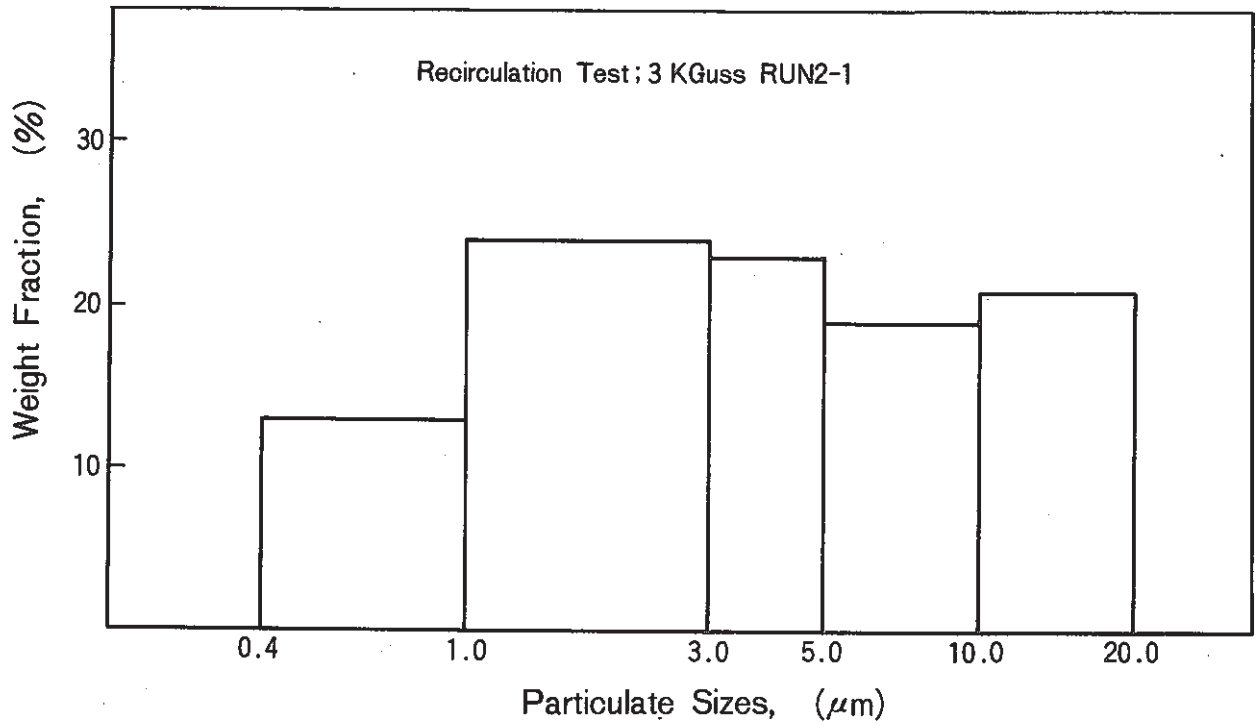


Fig. 20 Flow Diagram of Magnetic Filter Water Flow Test Loop



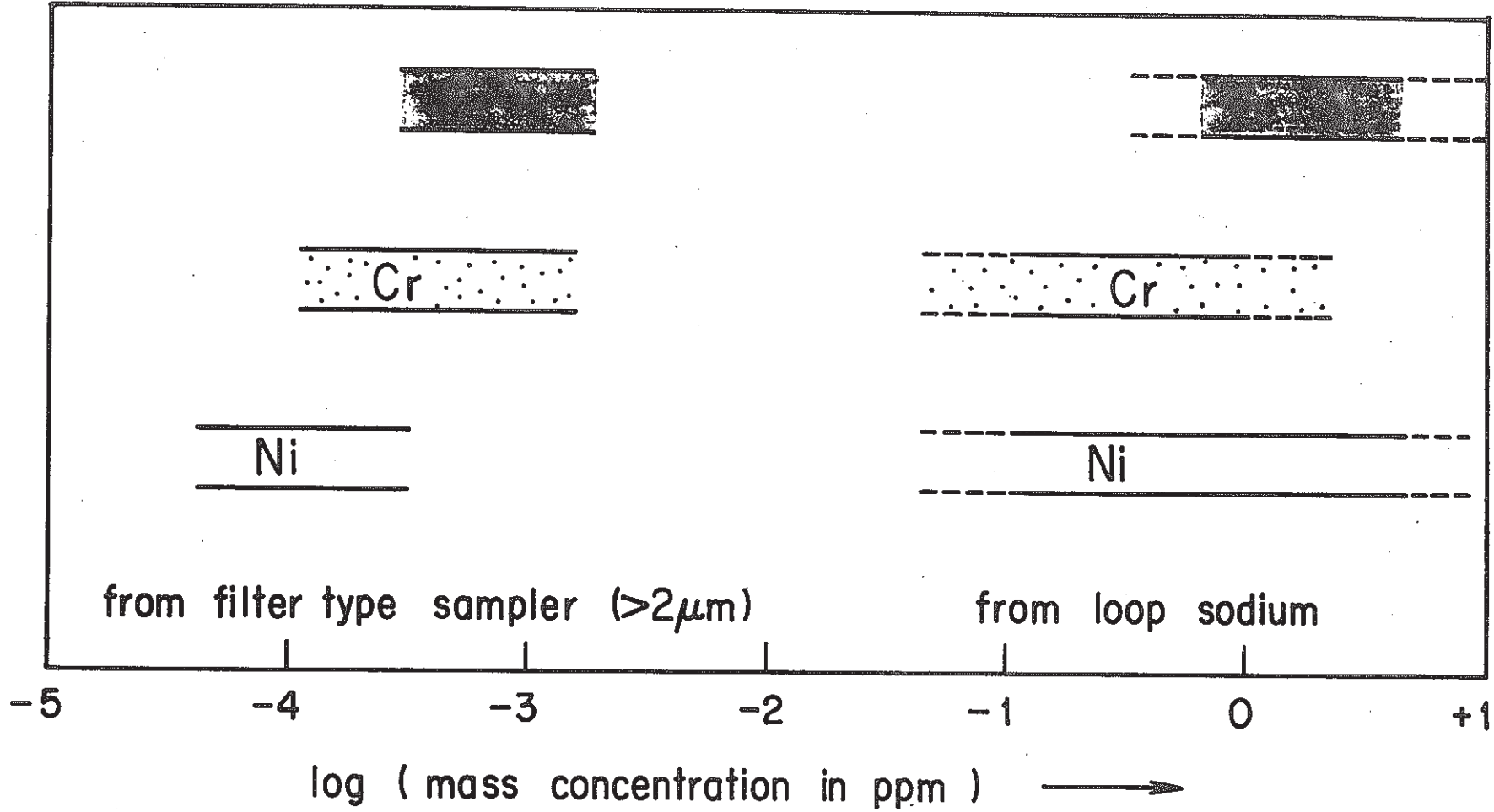
(a) Run 2 - 1 , Inlet



(b) Run 2 - 1 , Center

Fig. 21 Particle Size Distribution

2MW-55-7



-55-

PNC TN941 81-06

Fig. 22 Total concentrations of each metal element in loop sodium and those in the from of particulate.

APPENDIX

APPENDIX-1	ナトリウム中の粒状不純物捕集予備試験	A-1
APPENDIX-2	磁性細線 (SUS430) のナトリウム中における健全性の調査	A-2
APPENDIX-3	磁気フィルタによる粒状不純物の捕集理論	A-3
APPENDIX-4	ナトリウム中における粒状不純物の粒径と沈降速度の関係	A-6
APPENDIX-5	ナトリウム機器内での粒状不純物の堆積状況	A-7

APPENDIX - 1 ナトリウム中の粒状不純物捕集予備試験

予備試験として不純物析出のために閉塞を生じたナトリウム流動伝熱試験装置の再循環系汲み上げ配管（2インチ）より試料を採りその分析を行った。試料は閉塞部の高不純物濃度ナトリウムで、その約30 ccをアルコールに溶解した。

(1) 濾液の分析

アルコール溶解試料を孔径5 μm の濾紙（商品名ポリフロン濾紙）で吸引濾過し、得られた濾液中の鉄、ニッケル、クロム、マンガンの化学分析を行った。結果をTable A-2に示す。ナトリウム流動伝熱試験装置のナトリウムは原子炉級の仕様のものを使用しているがその仕様と比べニッケル以外の元素の濃度が異常に高く閉塞物は金属性の腐食生成物であることがわかった。

(2) 残渣の分析

吸引濾過で得られた残渣の分析を実施した。残渣はPhoto A-1に示すように全体に茶褐色の粒状物であり、一部に淡黄色と黒色の粒子も混っていた。残渣の重量は約43 mgであった。

(3) 化学分析

得られた残渣を溶解し、原子吸光法でそれぞれの元素の含有量を求めた。分析結果をTable A-3に示す。残渣である粒状不純物も濾液と同様に鉄、マンガンが多く認められた。

(4) X線回折

粒状不純物の形態を調べるためにX線回折を行った。その結果、 $\alpha\text{-Fe}$ 、Cr、Mn、 Mn_2O_3 、 $\text{K}_2\text{Mn}_4\text{O}_8$ 等がASTMカードとよく対応していた。なお本試料はアルコールで溶解し、蒸留水を加えて濾過したものであり、ナトリウム中では必ずしも上記のような化合物として存在するとはかぎらない。

以上の予備試験の結果、ナトリウム中には配管、機器等の場所にもよると思われるが、多くの粒状不純物が存在することが明らかとなった。

APPENDIX -2 磁性細線 (SUS430) のナトリウム中における健全性の調査

磁気フィルタの磁性細線としてこゝで用いた SUS 430 はこれまでナトリウムでの使用経験が無い。このためその健全性に関する調査を実施した。

○断面観察

未使用材および 250℃ で約 900 時間ナトリウム中で使用したメディアの断面写真を Photo A-2 に示す。

○表面観察

断面観察と同様な未使用材とナトリウム中で使用したメディアの SEM による表面観察写真を Photo A-3 と Photo A-4 に示す。

こゝに示した断面および表面観察写真からナトリウム温度 240℃, 運転時間 900 時間程度ではメディアは特に腐食されてはならず, ナトリウム中における磁性細線として十分使用出来るものと判断できる。

APPENDIX - 3 磁気フィルタによる粒状不純物の捕集理論

高勾配磁気分離の捕集理論について以下に示す。

高勾配磁気分離の理論は J.A.Oberteuffer 他による Force Balance Model (力平均モデル) と J.H.P.Watson 他による Particle Trajectory Model (粒子航跡モデル) によって解析されて来た。Force Balance Model は磁性細線と粒子の吸引力に対して流体圧力等による離脱力とのバランスを考えたものであり、磁気分離の限界を求めるのに便利である。また Particle Trajectory Model は磁性細線へ粒子が吸引される経過および磁気フィルタの計算上の捕集効率を求めることが出来るものである。本報告書においては Particle Trajectory Model の概要を J.H.P.Watson の「Magnetic Filtration」および内山の「大勾配磁気分離 (HGMS)」に従って示す。

Fig.A-1 に示すように Z 軸方向に半径 a の磁性細線を考え X 軸方向に一樣な磁場 H_0 が加えられているものとする。ここで H_0 は十分大きくて磁性細線は飽和磁化 M_s の状態であるとする。この場合磁性細線外部の空間の磁位 ϕ_m は次式で表わされる。

$$\phi_m = -r H_0 \cos \theta + (M_s a^2 / 2 \mu_0 r) \cos \theta \quad (A-1)$$

ここで、 r 、 θ は円柱座標で表わした変数、 μ_0 は真空の透磁率。磁性細線の近傍に存在する磁性粒子を半径 b の球形と考え、位置を (r_0, θ_0, Z_0) とする。磁性粒子 (磁化率 χ 、体積 $V (= \frac{4}{3} \pi b^3)$ 、密度 ρ_0) に働く力 \vec{F}_m は粒子が十分小さいため、この粒子が磁場へ与える影響は無視出来ると仮定すると次式で近似できる。

$$\vec{F}_m = \frac{1}{2} \mu_0 \chi V (\vec{H} \cdot \vec{H}) \quad (A-2)$$

\vec{H} は磁性粒子の重心 (r_0, θ_0, Z_0) における磁場で (A-1) 式よりの空間磁位の勾配として求められる。

$$\vec{H} = -\text{grad } \phi_m \quad (A-3)$$

(A-1) ~ (A-3) より r 方向の磁場勾配と \vec{F}_m の吸引力は次式で表わされる。

$$H_r / r = (M_s a^2 / \mu_0 r^3) \cos \theta \quad (A-4)$$

$$\vec{F}_m = -\chi V M_s H_0 \{ \cos 2\theta + (k a^2 / r^3) (a^2 / r^3) \} \quad (A-5)$$

ここで $k = M_s / 2 \mu_0 H_0$

次に磁性粒子が流体中を緩やかに定常運動をしているとし、慣性項を省略する。また流体は磁性細線と直交し、磁場 \vec{H}_0 と α の角度を持って速度 \vec{u} で流れ粘性は η をする。磁性粒子の速度は \vec{u}_p ($\vec{u}_p = d\vec{r}/dt$) であるとする。この場合磁性粒子が流体より受ける抗力 F_D は Stokes の公式に従って次式で表わされる。

$$\vec{F}_D = -6 \pi \eta b (\vec{u}_p - \vec{u}) \quad (A-6)$$

これより磁性粒子の運動方程式は重力の効果などを無視すると次式で表わされる。

$$\vec{F}_m + F_D = 0 \quad (A-7)$$

(A-7) 式を r および θ 成分に分けて表わすと次式のようなになる。

$$d a/dt = (v/a) \left(1 - \frac{1}{r a^2}\right) \cos(\theta - \alpha) - (v_m/a) \left(\frac{1}{r^3} \cos 2\theta + k \frac{1}{r a^5}\right) \quad (A-8)$$

$$r a (d\theta/dt) = - (v/a) \left(1 + \frac{1}{r a^2}\right) \sin(\theta - \alpha) - (v_m/a) \frac{1}{r^3} \sin 2\theta \quad (A-9)$$

ここで $r a = r/a$

$$v = |\vec{v}|$$

$$\frac{v_m}{a} = \frac{2}{9} \left(\frac{\chi \cdot M_s \cdot H_0 \cdot b^2}{\eta a^2} \right) \quad v_m : \text{磁気速度}$$

(A-8) 式を (A-9) 式で割り t を消去すると $d a/d\theta$ より $r a$ と θ の関係を求めることが出来、粒子の捕集までの航跡が求められる。今回の実験で用いた磁気フィルタに相当する場合 ($\alpha = \frac{\pi}{2}$) の磁性粒子の航跡の計算例を Fig. A-2 に示す。

次に磁気フィルタの捕集効率について示す。

単位断面積を有する厚さ dx の磁気フィルタを考え、フィルタ部分には磁性体で作ったワイヤ (半径 a) が綿状に入れているとする。磁性細線の体積充填率を F とすると厚さ dx における磁性細線の体積は $F dx$ 、長さ l は $F dx / \pi a^2$ で表わされる。ここで磁場に直交する有効な磁性細線の長さを全体の $2/3$ と仮定する。また磁気フィルタを運転することにより磁性細線の表面は磁性粒子で覆われるため磁性細線の実効半径が大きくなる。この半径を $\zeta \cdot a$ とすると長さ l の磁性細線の捕獲断面積は $2 \zeta \cdot a \cdot l$ で表わされる。したがって磁気フィルタの捕獲断面積 dSc は次式で表わされる。

$$dSc = 2 \zeta \cdot a \cdot l \left(\frac{2}{3}\right) = \frac{4}{3} \frac{F \cdot \zeta}{\pi a} dx \quad (A-10)$$

(A-10) 式は磁気フィルタの厚さ dx の部分で捕集される磁性粒子の割合を表わす。 $N(x)$ を磁気フィルタ x の位置における流体に含まれる磁性粒子の濃度とすると次式で表わされる。

$$\frac{dN}{N} = \frac{4 F \zeta}{3 \pi a} dx \quad (A-11)$$

(A-11) 式を解くと

$$N(x) = N_0 \exp \left(- \frac{4 F \zeta}{3 \pi a} x \right) \quad (A-12)$$

ただし N_0 は磁気フィルタ入口の濃度である。

磁気フィルタの捕集効率は次式で定義されるので (A-12) 式を代入すると (A-13) 式の様に

なる。

$$R = \frac{N(O) - N(L)}{N(O)} = 1 - \exp\left(-\frac{4F\zeta}{3\pi a} L\right) \quad (A-13)$$

ただし R ; 捕集効率

L ; 磁気フィルタ長さ

実験結果からも明らかなように磁気フィルタはメディア自身が機械的フィルタの作用をある程度持っているのでこれらを考慮して下記のような実験式が提案されている。

$$R = 1 - \exp\left(-\frac{4 \cdot f \cdot F \cdot (\zeta + \xi)}{3 \pi a} L\right) \quad (A-14)$$

ここで f ; 補正係数

ξ ; 機械的フィルタの効果を考慮した係数

磁気フィルタの捕集効率に対する実験と理論の比較を文献より Fig. A-3 に示す。

APPENDIX -4 ナトリウム中における粒状不純物の粒径と沈降速度の関係

流体中の粒子に加わる外力が重力のみであるときは粒子の重力と流体から受ける抵抗力がつり合って、ある平衡速度となる。この速度を終末沈速度 (Terminal Settling Velocity) と呼ぶ。粒子が球形と仮定すると次式で表わされる。

$$V_s = \left[\frac{8}{3} \left(\frac{\rho_p}{\rho} - 1 \right) \frac{r}{C_D} g \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A-15})$$

層流領域では $C_D = 24/Re$ であるため次のようになる。

$$V_s = \frac{2}{a} \left(\frac{\rho_p}{\rho} - 1 \right) \frac{r^2}{\nu} g \quad (\text{A-16})$$

- ここで V_s ; 終末沈降速度
 ρ_p ; 粒子の密度
 ρ ; 流体の密度
 r ; 粒子の半径
 ν ; 流体の動粘性係数
 g ; 重力の加速度

(A-16) 式は Stokes の重力沈降速度式と呼ばれている。
 上式を用い温度 200℃ で計算した結果を Fig. A-4 に示す。この図から粒子径が $1 \mu\text{m}$ の時は $3.4 \times 10^{-5} \text{ m/sec}$ であるが、 $50 \mu\text{m}$ 程度の比較的大きい粒子になると 0.086 m/sec (86 mm/s) と速くなり短時間内に沈降することがわかる。

APPENDIX - 5 ナトリウム機器内での粒状不純物の堆積状況

現在までに解体検査が行われ、それらの記録が残されている機器について内部の粒状物堆積状況を示す。

(1) コールドトラップ

コールドトラップ 2 号機は昭和47年～53年の間 6 年間使用された。使用期間中に合計16回、600℃昇温による高温再生を受けている。Fig.A-5 にその底部の不純物堆積状況を示す。堆積物の局所的なフェライト含有量は最大で 0.25% (フェライトインディケータ使用) であった。これより、図中の堆積物には非金属系の不純物、ナトリウム、金属系の粒状物などが混在しているものと考えられる。

(2) 燃料集合体試験部

Fig.A-6 に堆積場所を示す。主流のナトリウム流速が 1～2 m/s と前記コールドトラップと比較すると高いため量は少く、また非常に微細な粉末粒子で層が形成されていた。

(3) 再生熱交換器

Fig.A-7 に再生熱交換器の構造図と粒状不純物の堆積状況を示す。堆積場所は胴側のナトリウムバイパス防止リング上面である。定格運転状態では 8 B 配管で約 2.6 m/sec の流速であったものが胴側入口ノズルを出た位置で約 0.3 m/sec となるが、ノズルよりバイパス防止リングまでの間はわずかな漏洩流量のみであるためほぼ静止ナトリウムと考えられる。またナトリウム温度は内部で約 600℃より約 450℃まで変化している。本再生熱交換器は真空蒸溜洗浄を行っており、残溜ナトリウムは少なく写真に示した堆積物はほぼ全てが粒状不純物である。なお胴側下部にはドレンノズルがあるためか、ほとんど認められなかった。また遊動頭下部にはナトリウムが多量に残溜していたため粒状不純物の確認は出来なかった。

Table A-1 Characteristics of Magnetic Separators ⁹⁾

Device	Device Tube	Kolm-Marston
Competing Forces	Gravity Hydrodynamic Drag	Hydrodynamic Drag
Force Range (cm)	1	0.01
Field (kOe)	4	20
Field Gradient (kOe/cm)	4	2000
Force ; Fe, O ₄ ($\frac{\text{dynes}}{\text{cm}^3}$)	2×10^6	1×10^9

Table A-2 Results of Chemical Analysis of Filtrate Impurities

Element	Sample (ppm)	*Spec. (ppm)
Iron	13.0	< 5
Nickel	6.9 5.5	< 5
Chromium	19.3 19.2	< 5
Manganese	53.5 49.0	< 5

* Initial concentrations in loop sodium

Table A-3 Results of Chemical Analysis of Particulate Impurities

Iron	8.9
Chromium	3.1
Manganese	21.0
Calcium	7.8
Pottasium	<0.1

unit (ppm), Sample Weight 7.2mg

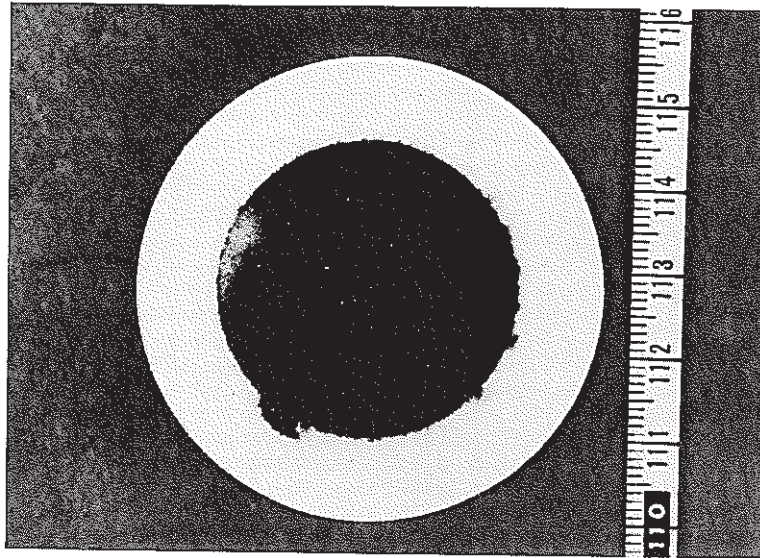
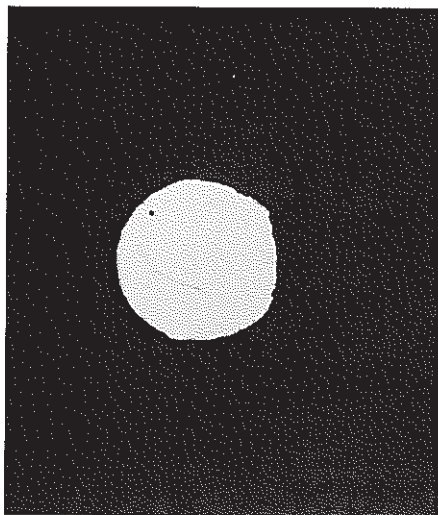
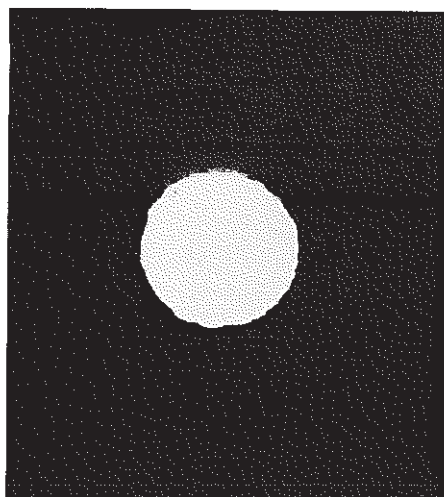


Photo A - 1 Particulate Impurities Recovered
From Plugged Pipe.



New Wire, $\times 200$



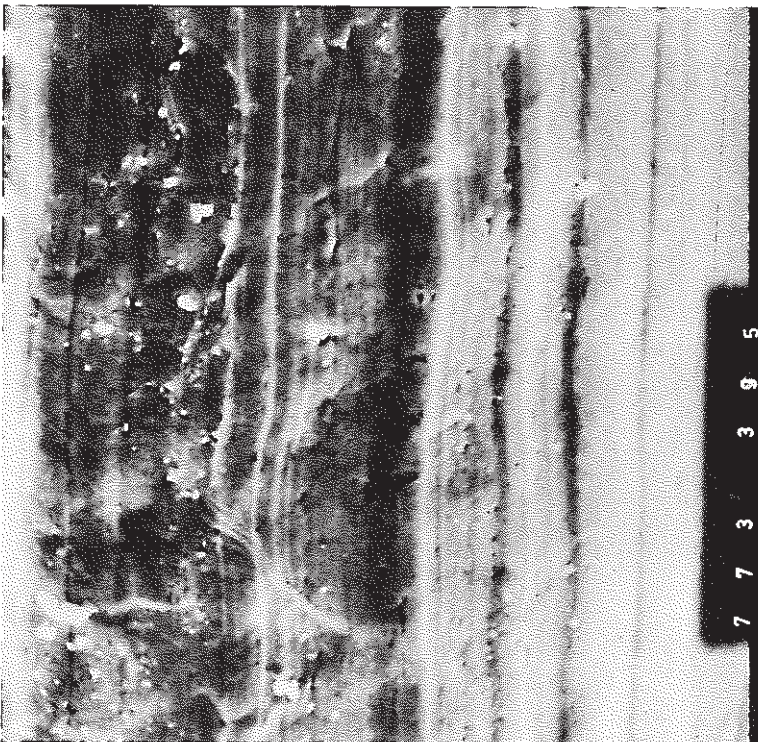
Sodium Exposed, $\times 200$

Photo A - 2 Cross Section of SUS 430 Media Wire



New Wire

× 1,000



Sodium Exposed
Wire

× 1,000

Photo A - 3 Scanning Electron Micrograph of
SUS 430 Media Wire



New Media

× 100



Sodium Exposed
Media

× 100

Photo A - 4 Scanning Electron Micrograph of
Media

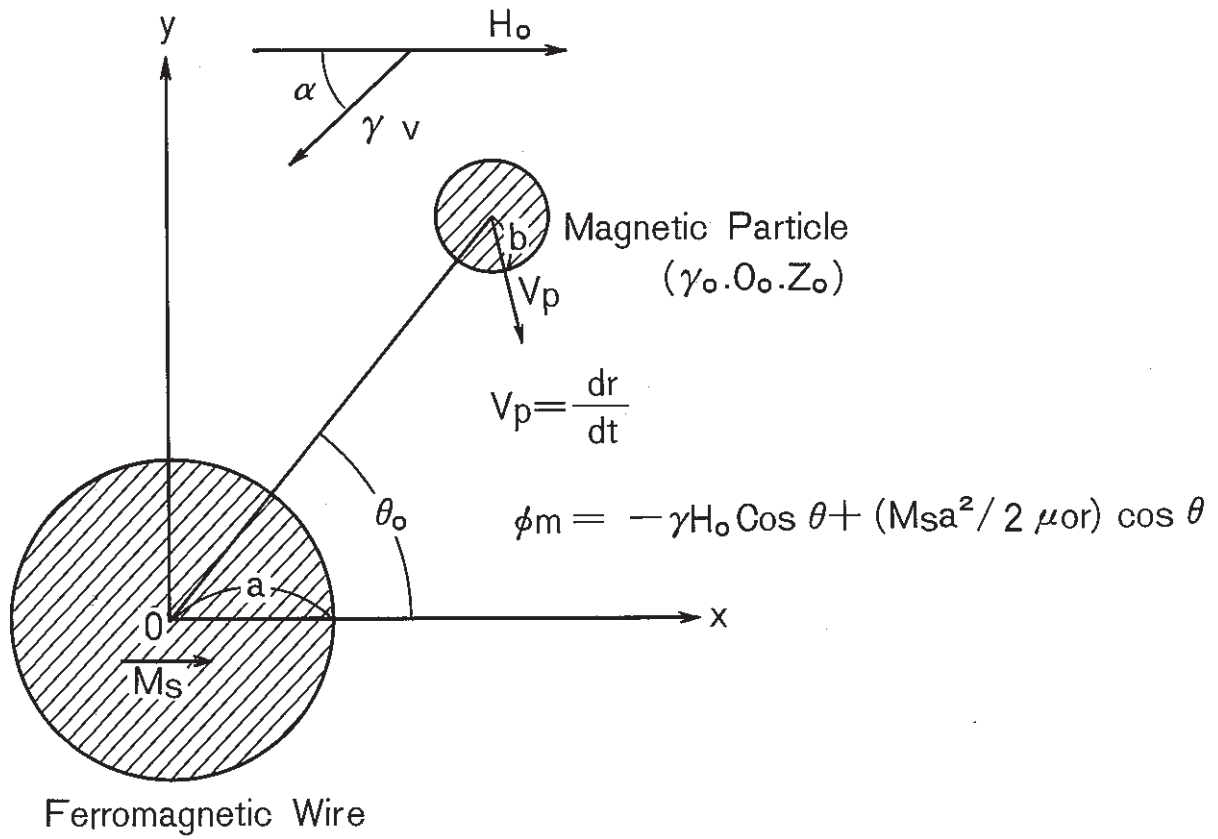
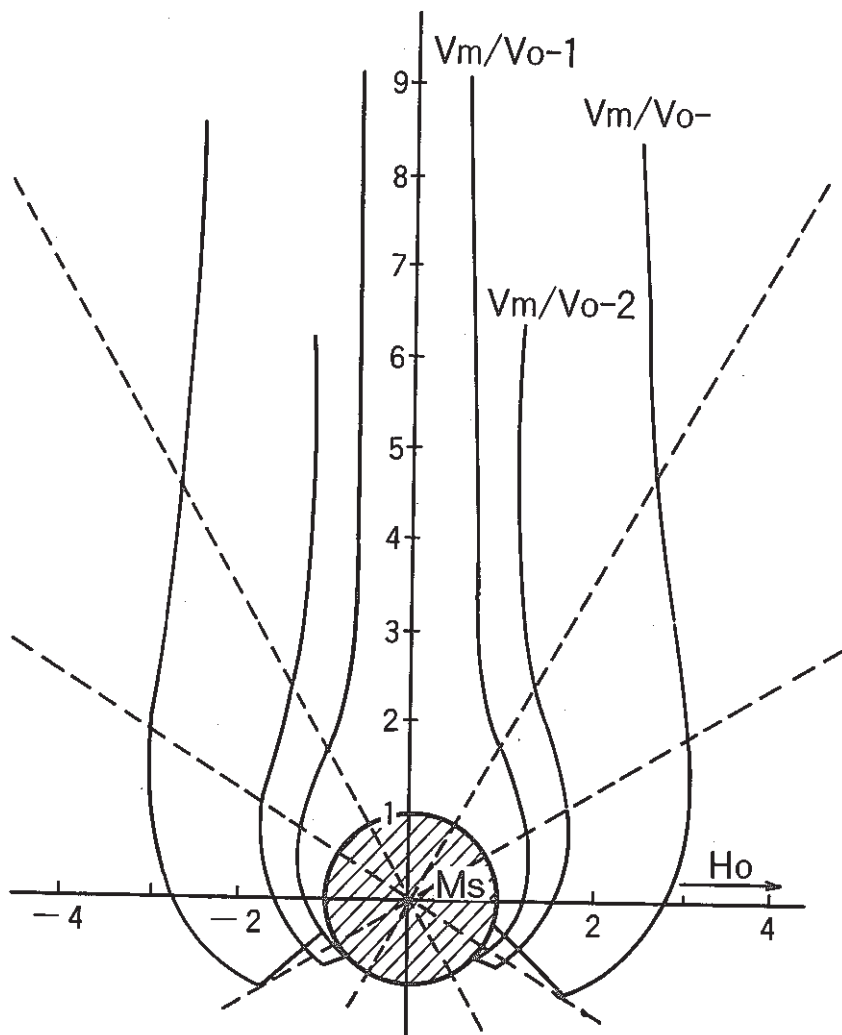


Fig. A - 1 Cylindrical Coordinates of a Magnetic Particle With Respect to a Ferromagnetic Wire.
from Ref, (8)



V_m : Magnetic Velocity
 V_o : Fluid Velocity
 H_o : Magnetic Field
 M_s : Saturation Magnetization

Fig. A - 2 Particle orbits shown for the case where $\alpha = 1/2.5$

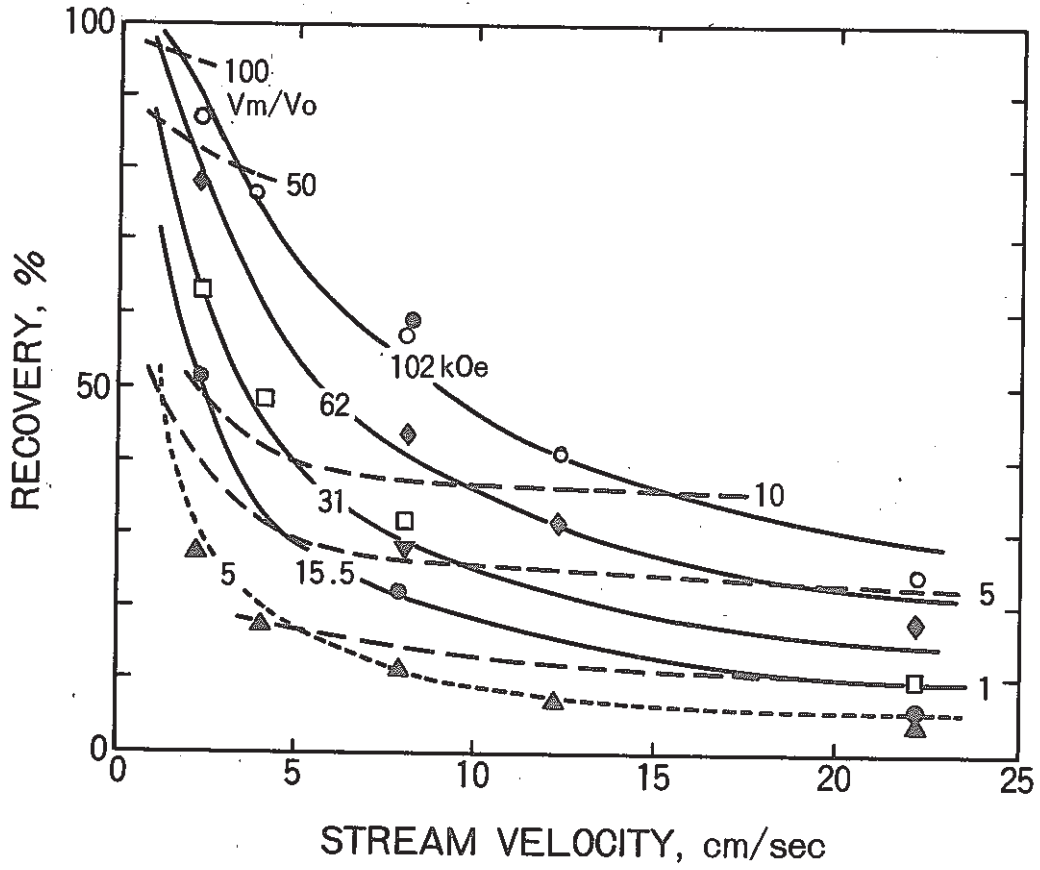


Fig. A - 3 Recovery of CuO Particles Experimental Points Compared to Calculated Curves from Ref, (7)

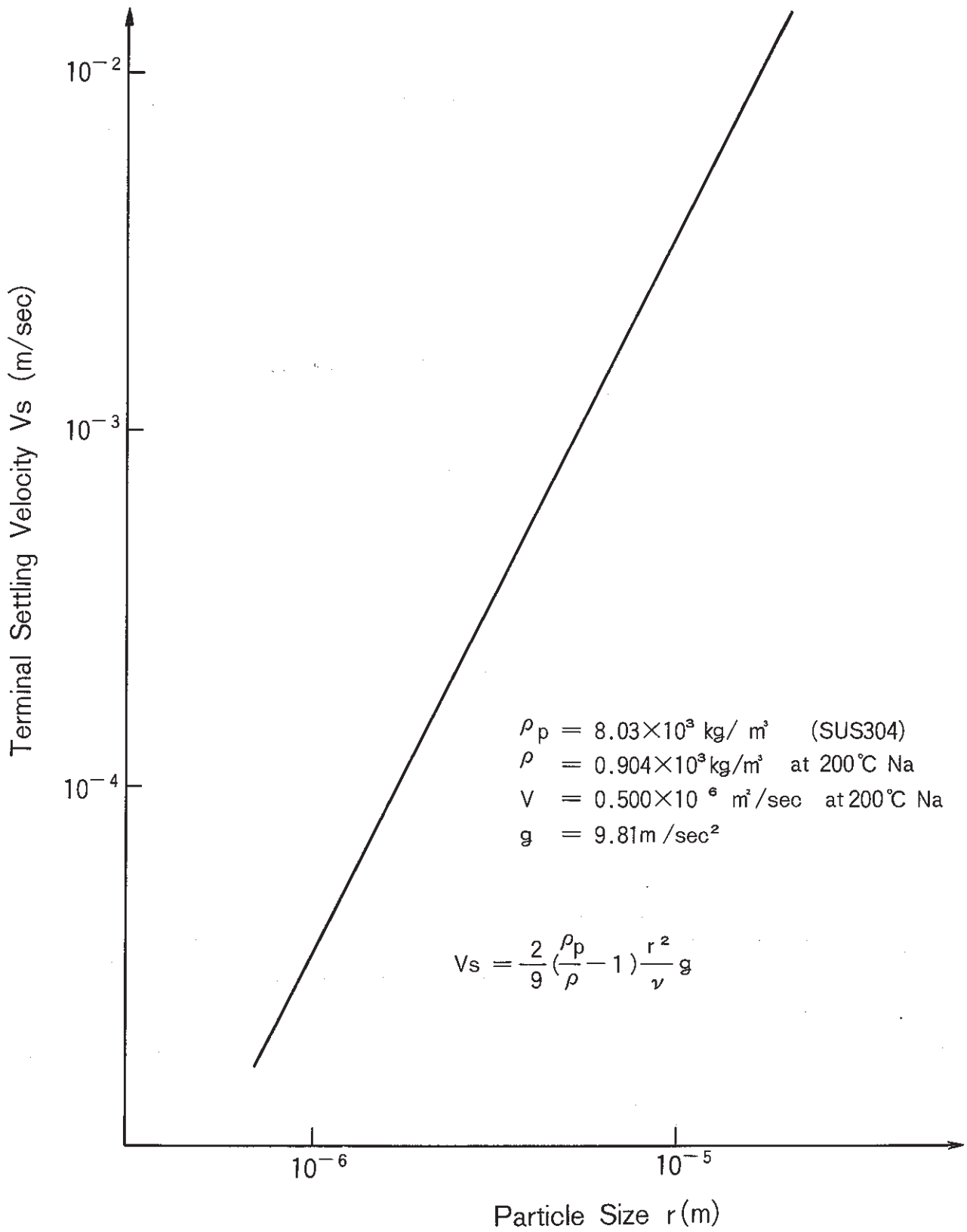


Fig. A - 4 Terminal Settling Velocity V_s

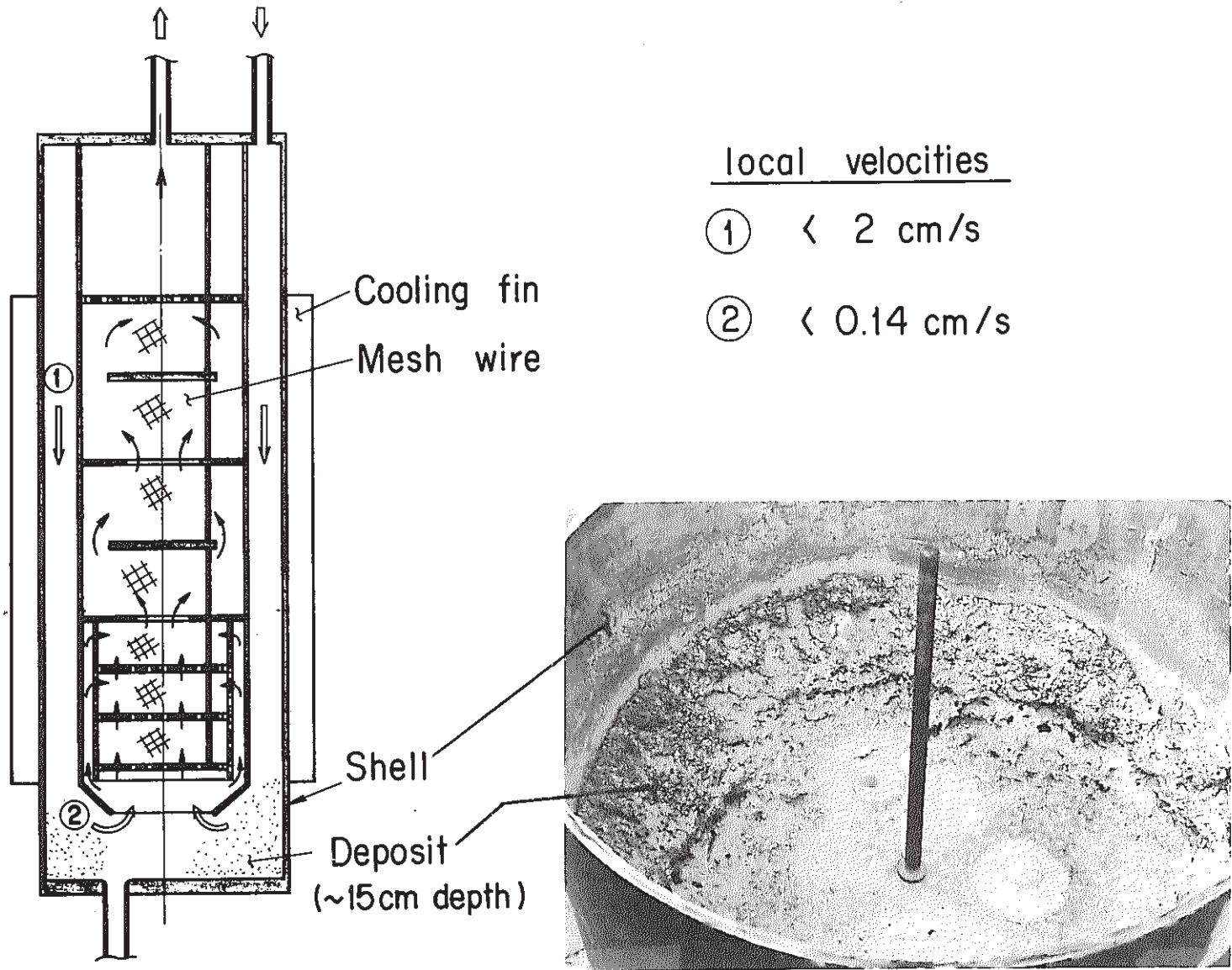


Fig. A - 5 Metal-Non metal Mixed Deposit in Cold trap. (NG.NO; 2 MW-55-12)

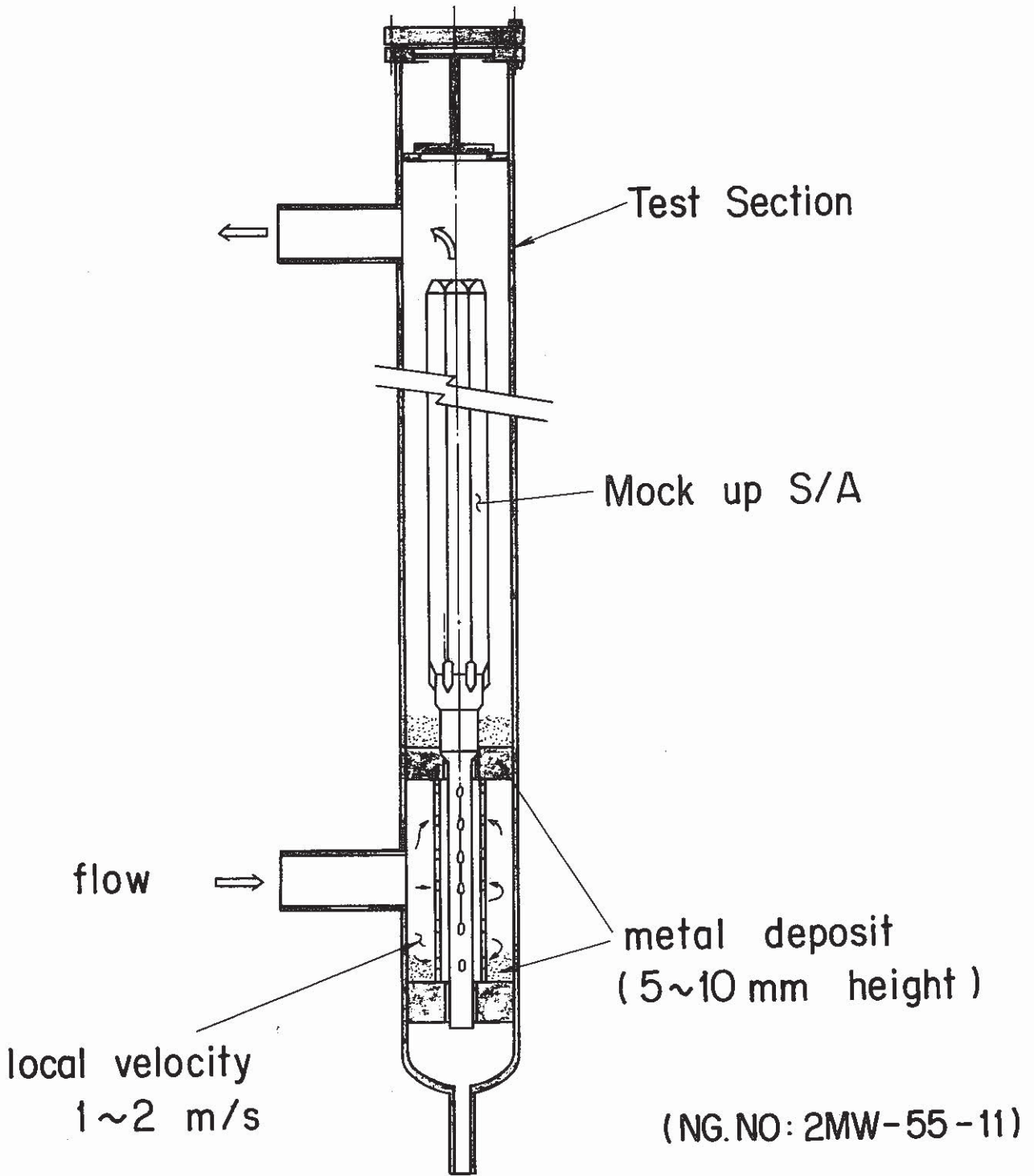
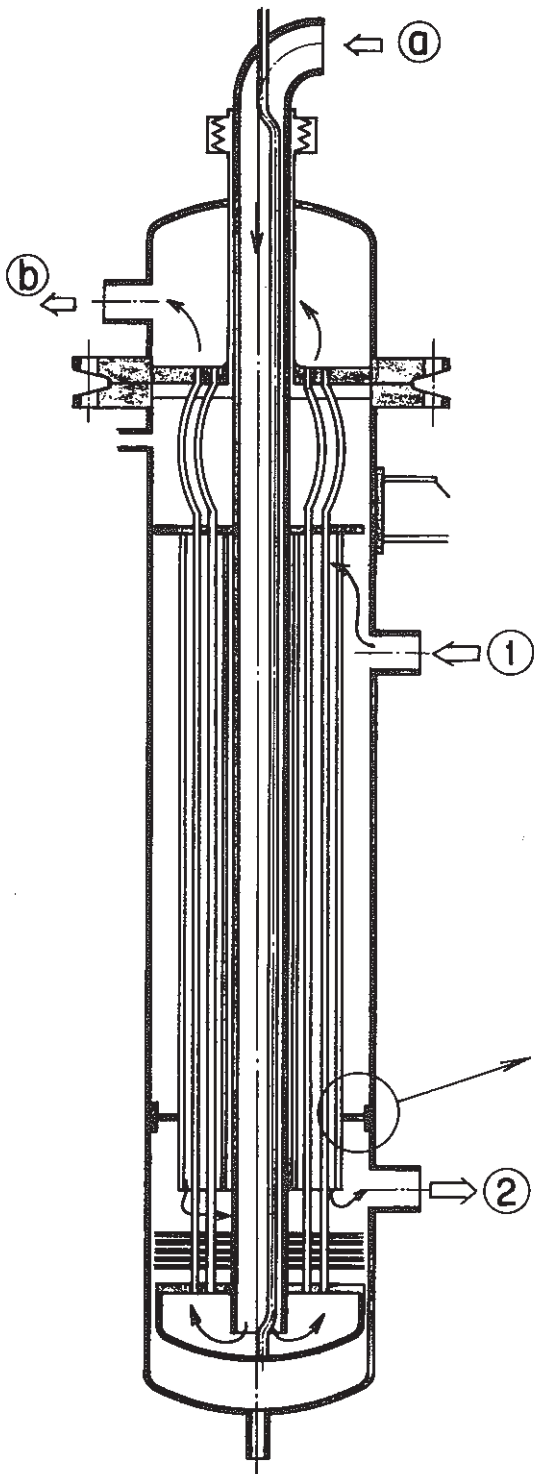


Fig. A - 6 Metal Deposit Found in Joyo S/A Test Section

(NEG. NO: 2MW-55-10)

flows

- ① hot Na in from S/A test section
- ② cold Na out to cooler
- Ⓐ cold Na in from cooler
- Ⓑ hot Na out to heater



Metal Deposit

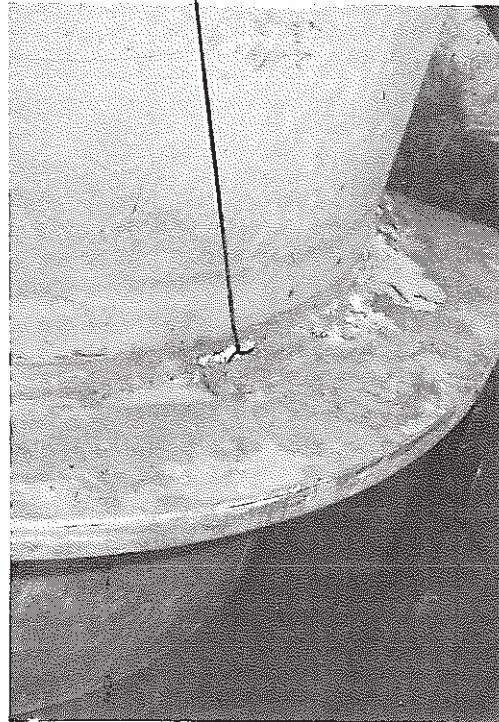


Fig. A - 7 Metal Deposit Found in Flow Stagnant Region of RHX.