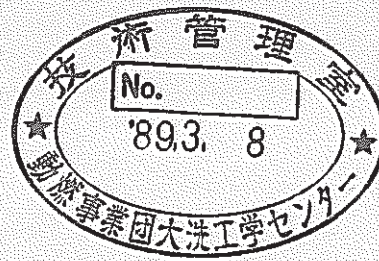


高クロム系SG伝熱管材のセルフ・ウェステージ特性

(微小リーク・ナトリウム-水反応試験研究 第4報)



1988年10月

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
.T	N9410 88-140
<p>この資料は 図書室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です</p> <p>動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室</p>	

動力炉・核燃料開発事業団
 大洗工学センター

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ください。

〒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

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

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

1988年10月

高クロム系SG伝熱管材のセルフ・ウェステージ特性

(微小リーク・ナトリウム-水反応試験研究 第4報)

下山一仁* 田辺裕美*

姫野嘉昭*

要 旨

FBR実証炉の蒸気発生器伝熱管の候補材料である高クロム系伝熱管材料(Mod. 9Cr-1Mo鋼, 9Cr-2Mo鋼, 9Cr-1Mo-Nb-V鋼)について、微小リーク時のリーク孔自己拡大(セルフ・ウェステージ)現象を解明するための試験が、微小リーク・ナトリウム-水反応試験装置(SWAT-4)を使用して実施された。45ケースの疲労クラック型の試験体と、9ケースの人工ヘアークラック型の試験体が試験に用いられ、それらの孔径は円孔換算で25~130 $\mu\text{m}\phi$ の範囲で使用された。試験は、ナトリウム温度が390 $^{\circ}\text{C}$ 、470 $^{\circ}\text{C}$ で、注水圧力はどの試験ケースも約130 $\text{kg}/\text{cm}^2\text{g}$ 一定条件であった。

主な試験結果は以下のとおりである。

- (1) 高クロム系3鋼種の耐セルフ・ウェステージ性に対する材料の違いを比較した結果、3鋼種ともほぼ同じで材料による違いは無いことがわかった。
- (2) 高クロム系鋼と「もんじゅ」SG伝熱管材料(2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼, SUS321)を比較した結果、前者の方が3~10倍程度耐セルフ・ウェステージ性が優れていることがわかった。
- (3) Mod. 9Cr-1Mo鋼における疲労クラック型試験体と人工ヘアークラック型試験体を比較した結果、後者の方が自己拡大挙動が5~10倍程度穏やかであることがわかった。
- (4) セルフ・ウェステージにより拡大するリーク孔の大きさは、円孔換算で0.4~2.35 $\text{mm}\phi$ となった。これを水リーク率に換算すると、SG蒸気出口付近で約2~74 g/sec の小リーク~中リーク領域となる。
- (5) 試験後ノズルの材料検査から、水・蒸気側の酸化スケールがリーク孔の閉塞を引き起こすことがわかった。

October, 1988

Self-Wastage Behavior of High-Chromium Content Steel
for FBR Steam Generator Tube
— Studies of Micro-Leak Sodium-Water Reactions(4) —

Kazuhito Shimoyama*
Hiromi Tanabe*
Yoshiaki Himeno*

Abstract

Self-wastage tests were conducted by use of Micro-Leak Sodium-Water Reaction Test Rig(SWAT-4) to clarify the self-enlargement behavior of high-chromium steels (Modified 9Cr-1Mo, 9Cr-2Mo and 9Cr-1Mo-Nb-V), as new steam generator tube materials of the Fast Breeder Demonstration Reactor. Fatigue crack defects were used in forty-five tests and slit type cracks in nine tests whose diameter corresponded to circular nozzles were ranging 25-130 micrometer. Major results are as follows:

- (1) No significant difference was found in the resistivity against self-wastage among three materials.
- (2) The 9Cr steels are as three to ten times resistant against self-wastage as 2-1/4Cr-1Mo steel and JIS-SUS321.
- (3) The self-enlargement behaviors using fatigue crack nozzles are more rapid than those using slit type nozzle.
- (4) The diameter after enlargement are ranging from 0.4 to 2.4mm.
- (5) The corrosion products at the steam side causes the self-plugging.

* FBR Plant Safety Section, Safety Engineering Division, O-arai Engineering Center, PNC.

目次

1 . 緒論	1
2 . 試験装置と試験方法	2
2.1 試験装置	2
2.2 試験体ノズル	2
2.2.1 人工ヘアークラック型の試験体製作方法	3
2.2.2 疲労クラック型の試験体製作方法	3
2.2.3 両試験体形状の比較	4
2.3 試験条件	4
2.4 試験方法	5
2.5 試験後処理法及び観察	6
3 . 微小リーク試験結果	7
3.1 試験内容	7
3.2 試験経過別分類	7
3.2.1 各ケースの分類例	9
3.2.2 分類結果	10
3.2.3 試験経過と試験体形状の違い	10
3.3 高クロム系3鋼種の比較	12
3.3.1 セルフ・ウェステージ率による3鋼種の比較	12
3.3.2 疲労クラック型ノズル3鋼種の実験整理式	12
3.4 疲労クラック型ノズルと人工ヘアークラック型ノズルの比較	13
3.5 高クロム系鋼と従来鋼種との比較	13
3.5.1 2¼Cr-1Mo鋼とSUS321のセルフ・ウェステージ率	13
3.5.2 Mod. 9Cr-1Mo鋼と2¼Cr-1Mo鋼, SUS321の比較	14
4 . ノズル材料検査結果	151
4.1 拡大後の孔径測定	15
4.2 断面形状観察	16
4.2.1 拡大形状の観察	16
4.2.2 拡大形状の特殊なケース	17
4.2.3 試験体ノズル水中ガス噴出試験	18
4.2.4 リーク孔の蒸気側からのセルフ・ウェステージ	19
4.3 リーク孔のSEM観察	19

4.4	断面金属組織観察	20
5	自己閉塞挙動についての考察	21
5.1	リーク孔閉塞挙動	21
5.1.1	閉塞ノズルの解体検査結果	21
5.1.2	リーク孔閉塞の原理	22
5.1.3	Mod. 9 Cr-1 Mo鋼と他の材質の閉塞孔径の違い	22
5.2	閉塞したリーク孔への熱過渡効果	23
5.2.1	温度サイクル実施方法	23
5.2.2	実施結果	24
6	微小リーク・ターゲット・ウェス テージ結果	25
6.1	試験方法	25
6.2	試験結果	25
6.3	小リーク・ターゲット・ウェステージ結果との比較	26
7	微小リークと水素検出計	27
7.1	計算方法	27
7.2	計算結果	29
8	結論	30
9	参考文献	32
10	謝辞	33
Appendix. I	: 試験データ収録方法	92
Appendix. II	: 伝熱管ミルシート	95
Appendix. III	: 疲労クラック型試験体製作データ	102
Appendix. IV	: クラック部等価孔径測定法	108

表リスト

Table. 2.1	FBR SG伝熱管用材料の化学成分	34
Table. 3.1(1/2)	試験条件と試験結果	36
Table. 3.1(2/2)	試験条件と試験結果	38
Table. 3.2	微小リーク試験内容	40
Table. 3.3	試験経過別分類方法	8
Table. 3.4	試験経過別の分類結果	10
Table. 5.1	温度サイクル実施結果	24
Table. 6.1	微小リーク・ターゲット・ウェステージ試験経過と結果	41
Table. 7.1	SG主要目	42
Table. 7.2	SWAC10 Input Data List	43
Table. II-1	Mod. 9Cr-1Mo 鋼伝熱管ミルシート	90
Table. II-2	9Cr-2Mo 鋼伝熱管ミルシート	92
Table. II-3	9Cr-1Mo-Nb-V鋼伝熱管ミルシート	94
Table. III-1	微小リークノズル試験体製作時の疲労試験結果(第1回目)	99
Table. III-2	微小リークノズル試験体製作時の疲労試験結果(第2回目)	100
Table. III-3	微小リークノズル試験体製作時の疲労試験結果(第3回目)	101

目 次

Fig. 2. 1	Micro-Leak Sodium Water Reaction Test Rig (SWAT-4)	44
Fig. 2. 2	Structure of Slit Type Nozzle	45
Fig. 2. 3	Structure of Fatigue Type Nozzle	46
Fig. 3. 1	Micro-Leak Behaviors (Case-1, 3)	47
Fig. 3. 2	Micro-Leak Behaviors (Case-2)	48
Fig. 3. 3	Self-Wastage Rates on the Mod. 9Cr-1Mo Steel , the 9Cr-2Mo Steel and the 9Cr-1Mo-Nb-V Steel of Fatigue Type Nozzle	49
Fig. 3. 4	A Reciprocal of Absolute Temperature and Self-Wastage Rates on the Mod. 9Cr-1Mo Steel , the 9Cr-2Mo Steel and the 9Cr-1Mo-Nb-V Steel of Fatigue Type Nozzle	50
Fig. 3. 5	Comparison between Fatigue Type Nozzles and Slit Type Nozzles on the Mod. 9Cr-1Mo Steel	51
Fig. 3. 6	Self-Wastage Rates on the 2¼Cr-1Mo Steel of Slit Type Nozzle	52
Fig. 3. 7	Self-Wastage Rates on the SUS321 Stainless Steels of Slit Type Nozzle	53
Fig. 3. 8	Comparison between the Mod. 9Cr-1Mo Steel , the 2¼Cr-1Mo Steel and the SUS321 Stainless Steel on Slit Type Nozzle	54
Fig. 4. 1	Orifice Diameters of the Self-Enlarged Holes	55
Fig. 4. 2	試験体据付状態と新たにできるリーク孔の位置の関係	17
Fig. 4. 3	ガスの噴出形態とリーク孔の増耗方向	19
Fig. 4. 4	Self-Wastage Depth of Steam Side	56
Fig. 4. 5	リーク孔のトレースとSEM観察位置 (W 4 2 1, 4 2 6)	57
Fig. 5. 1	Leak Enlargement Time on the Mod. 9Cr-1Mo Steel Slit Type Nozzle	58
Fig. 5. 2	「もんじゅ」SGの起動・停止曲線	59
Fig. 6. 1	Wastage Map of Test No. W 4 3 2	60
Fig. 6. 2	Target Wastage Rates on the Mod. 9Cr-1Mo Steel by Micro-Leak (Comparison between the SWAT-2 and SWAT-4)	62
Fig. 7. 1	SWAC10 計算モデル	63
Fig. 7. 2	Safety Map of Super Monju Steam Generator	64
Fig. III-1	疲労試験モーメント図	97
Fig. IV-1	リーク孔径測定用装置	103
Fig. IV-2	圧力7.8 kg/cm ² から6.8(7.7)kg/cm ² まで減少するまでに 要する時間と円孔径の関係	104

写真リスト

Photo. 2.1	Slit Type Nozzle	65
Photo. 2.2	Fatigue Type Nozzle	66
Photo. 2.3	Across Section of Fatigue Type Nozzle	67
Photo. 2.4	A Test Piece before and After Experiments	68
Photo. 3.1	Surfaces of Enlarged Leak Hole on Test No. W441 ($\times 15$)	69
Photo. 4.1	Outer Surface of Enlarged Leak Hole and Its Cross Section on Test No. W414 ($\times 15$)	70
Photo. 4.2	Outer Surface of Enlarged Leak Hole and Its Cross Section on Test No. W415 ($\times 15$)	71
Photo. 4.3	Surfaces of Enlarged Leak Hole on Test No. W408	72
Photo. 4.4	Experimental Results of Gas Blow in the Water	74
Photo. 4.5	A Cross Sectional View on Test No. W421 by SEM	75
Photo. 4.6	A Cross Sectional View on Test No. W426 by SEM	77
Photo. 4.7	Metallograph on Test No. W426	79
Photo. 5.1	Surfaces of Enlarged Leak Hole on Test No. W444 ($\times 15$)	80
Photo. 5.2	A Cross Section after Enlargement on Test No. W444	81
Photo. 5.3	Metallograph on Test No. W444	82
Photo. 5.4	EPMA on Test No. W444(1)—②—	83
Photo. 5.5	EPMA on Test No. W444(2)—④—	84
Photo. 5.6	EPMA on Test No. W444(3)—⑥—	85

1 . 結 論

現在進められているFBR実証炉プラント設計では、蒸気発生器を一体貫流型とし、さらに伝熱管材料を原型炉用蒸気発生器に使用してきた2¼Cr-1Mo鋼に代えて、高い高温強度が期待できる高クロム系材料の伝熱管を使用することで、蒸気発生器のコスト低減を図ることを指向している。

このような設計活動を支援するために、本研究では高クロム系伝熱管材料であるMod. 9Cr-1Mo鋼、9Cr-2Mo鋼、及び9Cr-1Mo-Nb-V鋼の3鋼種に対する微小リーク・ナトリウム-水反応試験を行い、セルフ・ウェスティング特性を明らかにした。試験には、これまでの人工ヘアークラック型のノズルに変えて、新たに考案した疲労クラック型のリーク孔を持った試験体を使用し、より現実に近いリーク状況を模擬した。

2. 試験装置と試験方法

試験では、ナトリウム中で試験体の微小リーク孔から高圧の水/蒸気を噴出させ、試験後の諸検査からリーク孔の受けた自己損耗現象（セルフ・ウェスティングと呼ぶ）の形態、損耗速度を明らかにした。

2.1 試験装置

装置は、SWAT-4（微小リーク・ナトリウム-水反応試験装置）で、長期間に渡る試験を効率的に行うために交互運転の可能な3基の反応容器を有する。また、その運転とデータ収録は無人化してある。装置系統をFig. 2.1に、データ収録方法をAppendix. I、装置の基本仕様を以下の表に示す。

	試験容器	注水系	カバーガス系	圧力開放系
設計圧力	35 kg/cm ² g	200 kg/cm ² g	35 kg/cm ² g	35 kg/cm ² g
常用使用圧力	0.5 kg/cm ² g	140 kg/cm ² g	0.5 kg/cm ² g	0.5 kg/cm ² g
設計温度	600 ℃	室温	室温	室温
常用使用温度	505 ℃	室温	室温	室温

2.2 試験体ノズル

試験体ノズルは、従来の「もんじゅ」SG伝熱管に対する試験^{1), 2), 3)}に使用して来た(1)人工ヘアークラック型と、新たに考案した(2)疲労クラック型の2種類を使用した。後者の疲労クラック型は、その加工段階で疲労亀裂を加えてリーク孔を発生させたのもで、前者の在来型と比較するとより現実に近い孔形状を有する。

材料は、以下の3鋼種で、実証炉設計⁴⁾の伝熱管寸法に合わせたパイプで購入した。それらの化学成分表をTable. 2.1に、ミルシートをAppendix. IIに示した。

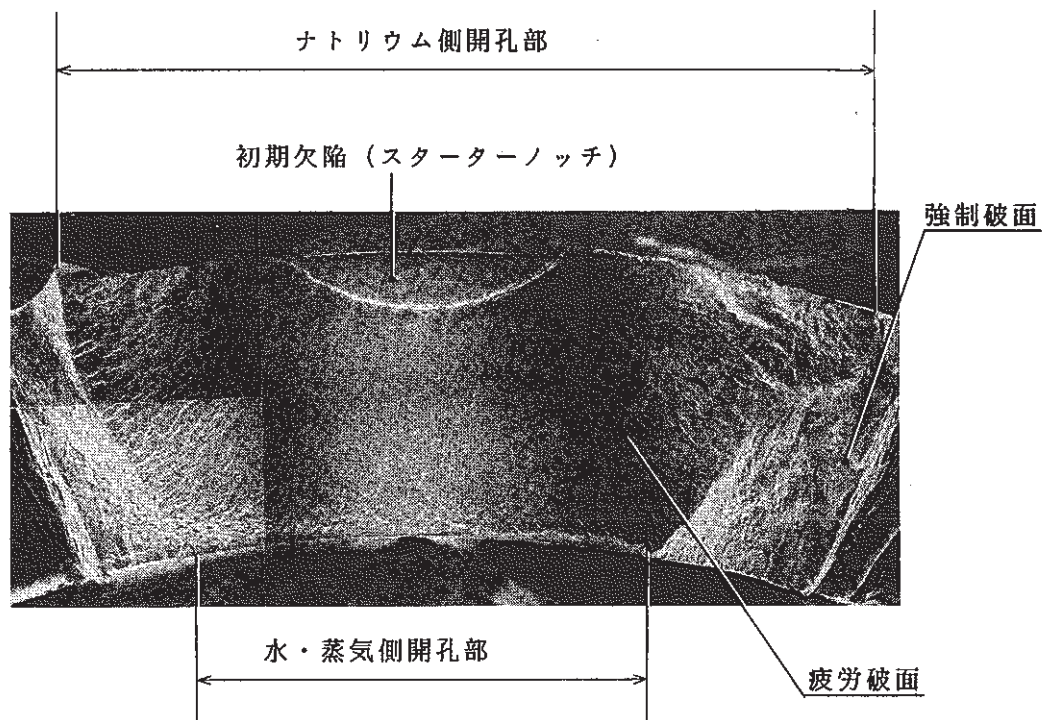
- ①. Mod. 9 Cr-1 Mo鋼
- ②. 9 Cr-2 Mo鋼
- ③. 9 Cr-1 Mo-Nb-V鋼

2.2.1 人工ヘアークラック型の試験体製作方法

この型の試験体の製作方法は、始めにノズルの製作を行い、次にこれを電子ビーム溶接で試験体に固定した。ノズルの製作では、平板材料に約0.3mmφの孔をドリルであけ、これをプレスで押し潰してヘアークラック状に加工した。この押し潰しの段階で、クラック幅を加減し、等価孔径で20～100μmφの微小貫通孔とした。Fig. 2.2に試験体の形状図を、Photo. 2.1にW443試験で使したリーク孔の内/外面の写真を示す。

2.2.2 疲労クラック型の試験体製作方法

この試験体は、実機の設計と同じ寸法の伝熱管に、繰り返し荷重をかけることで微小リーク孔を作り出す方法をとっており、繰り返し荷重の大きさや回数をコントロールすることによって所定のリーク孔径を作ることができる。その加工では、予め伝熱管の表面に放電加工で深さ0.5mm、幅0.2mmの初期欠陥（スターターノッチ）を入れて、これに応力を集中させ開孔させた。試験体形状、疲労亀裂部の拡大図をFig. 2.3に示す。疲労亀裂の挿入方法及び疲労試験結果をAppendix. IIIに示す。また、Photo. 2.2に試験体のリーク孔内、外面の写真を、Photo. 2.3に断面を光学顕微鏡（SEM）で観察したものを示す。写真から、応力集中点が開孔部となり、ここから亀裂が放射状に広がっている様子がよく分かる。なお、この断面は以下のようになっている。



(Photo. 2.3 の解説図)

2.2.3 両試験体形状の比較

疲労クラック型はリーク孔が非常に現実に近いこと、人工ヘアークラック型はこれまでの試験データと比較することが可能という理由から、ここでは2種類の試験体を使用した。しかし、両試験体には、製作上や微小リーク挙動を模擬する点でそれぞれメリット、デメリットがある。それを比較したものを、以下の表に示す。

試験体	疲労クラック型	人工ヘアークラック型
メリット	①塑性変形や熱影響が無い。 ②リーク孔が非常に現実に近いものである為、実現象を模擬するのに適している。	①ヘアークラックの亀裂形状（幅、長さ）を統一して作る事ができる
デメリット	①リーク孔の亀裂幅、長さが統一できない（データバラツキの原因） ②初期欠陥の影響が不明	①リーク孔が現実と違う。 ②製作時の塑性変形が多少残る。

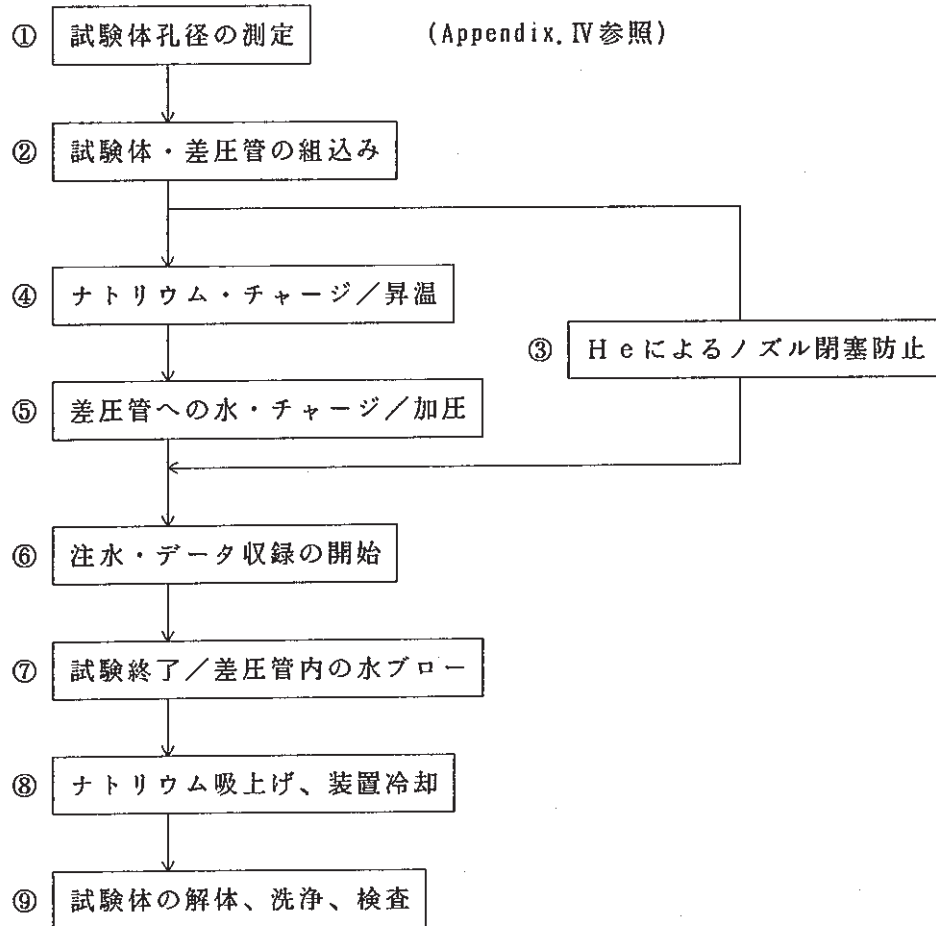
2.3 試験条件

本試験での試験条件を以下の表に示す。また、比較のため実証炉の設計値も示す。⁴⁾

	Na 温度 (℃)	水・蒸気圧力 (kg/cm ² g)	ノズル孔径 (μmφ)	伝熱管肉厚(mm)		Na 流量 (T/h)
				疲労	人工	
試験条件	390, 470	130	25~130	2.6	3.2	無し
実証炉設計	310~470	122~108	—	3.2		11400

2. 4 試験方法

試験装置 1 基に対し 1 個の試験体を組み込み、1 回の試験を行う。この 1 サイクルの試験の流れを以下に示す。



②の後から⑥の注水が始まるまでの期間は、ノズルからヘリウムガスを常時噴出させて、注水前に孔が閉塞することを防ぐ。試験開始直前に、弁の開閉によりラインをノズル保護ガス系から注水系に切り換えて注水を開始する。リーク孔の自己拡大によって試験が終了した場合は、差圧管内の加圧ガスは大気へブローする。

(閉塞した場合)

長期間試験を実施しても、リーク孔が閉塞して自己拡大に至らないケースもある。この場合、一定期間（たとえば 2 週間）流出水量に変化が見られないときは、完全閉塞したものと判断して試験を打ち切った。但し、第 5 章で述べるように環境温度の変化が閉塞したノズルに与える影響を調べる目的で、あるケースについては「温度サイクル」を掛けながら試験を継続した。

2. 5 試験後処理法及び観察

試験終了後、試験容器内のナトリウムを吸い上げ、装置を冷却した後、試験体を取り出した。試験体には、ナトリウムの混じった反応生成物が付着しており、燃えやすく危険性を伴うために、これを不活性ガスで覆って、潮解や酸化反応を極力少なくして、早急に処理した。処理方法は、アルコールによるナトリウム洗浄である。参考までにPhoto. 2. 4 に試験前後の試験体写真を示す。

試験後観察では、拡大後の孔径を製作時と同じ方法で測定し、次に実体顕微鏡、光学顕微鏡、電子顕微鏡、及びX線解析（成分分析）による試験後ノズルの形状変化、組織変化、成分変化等の調査を行った。

3. セルフ・ウェステージ試験結果

次に述べる合計54ケースのセルフ・ウェステージ試験を実施したが、それらの結果は、データ・ベースソフト「The CARD II」を用いたデータ・ベースとして残してある。

3.1 試験内容

Table. 3.1 (1/2), (2/2) にこれらの詳細試験データを、また試験内容別にまとめたものを、Table. 3.2 に示す。試験回数は全部合わせて54ケースでありその内訳は、

①疲労クラック型 : 45ケース

②人工ヘアークラック型 : 9ケース

である。また疲労クラック型を鋼種別に分けると、

a) Mod. 9 Cr-1 Mo鋼 : 21ケース

b) 9 Cr-2 Mo鋼 : 16ケース

c) 9 Cr-1 Mo-Nb-V鋼 : 8ケース

となる。

ナトリウム温度は470℃を基準にして、そのほかに390℃を使用した。ノズル孔径は、70 $\mu\text{m}\phi$ を中心に25~130 $\mu\text{m}\phi$ の範囲で実施した。70 $\mu\text{m}\phi$ は2 $\frac{1}{4}$ Cr-1 Mo鋼で拡大と閉塞の境界の孔径である。³⁾

3.2 試験経過別分類

試験パラメータは主にナトリウム温度、初期リーク孔径、試験体形状で、それらのパラメータに依存して注水量、注水時間が異なってくる。試験経過は、これまでの原型炉SG用伝熱管材で行った試験と同じような傾向で、大きく3つに分けることができる。

(1) ケース1・・・閉塞すること無く拡大するタイプ

(2) ケース2・・・完全閉塞するタイプ

(3) ケース3・・・一旦閉塞後、拡大するタイプ

Table. 3.3 に試験経過別分類の詳細な特徴をまとめたものを示す。また、次にこれらの実例を上げて説明する。

試験ケース	ケース 1	ケース 2	ケース 3
試験経過	試験開始後リーク率がほぼ一定状態で注水が続けられ、ある時間後にリーク孔が拡大する。(保有水量が不足して拡大以前に試験を終了したケースもこれに含めた)	試験開始後リーク率が徐々に低下していき、そのままリーク孔が閉塞し注水が停止する。	試験開始直後あるいは多少注水した後、リーク率が低下し(1桁以上)しばらく潜伏期間があった後また徐々にリーク率が増加して、拡大する。
リーク孔の孔径・形状への依存性	初期孔径の大きいものに多く、形状は疲労クラック型のものに多い	初期孔径の小さいものに多く、形状は人工ヘアークラック型に多い	疲労クラック型のものに多く、孔径にはあまり依存しない
注水量	多い	殆ど無い	ばらつくが一般に少ない
試験時間	短い(分オーダー)	長い(日オーダー)	中間(時間~日オーダー)
閉塞	無い	長い	短時間の潜伏期間がある
拡大孔径	中(小リーク領域)	拡大なし	大(小~中リーク領域)
特長	エロージョンが強い	コロージョンが多少ある	エロージョン、コロージョンの相互作用

Table. 3.3 試験経過別分類方法

3.2.1 各ケースの分類例

(1) ケース1

Fig. 3.1 (a)はW408試験の結果である。このグラフは、水リーク率の変化を表したもので、縦軸に水リーク率(g/sec)、横軸に注水時間(sec)を示している。条件は次の通り。

- ・試験体 : Mod. 9 Cr-1 Mo鋼、疲労クラック型、68 $\mu\text{m}\phi$
- ・Na温度 : 390℃

注水開始から約140分間、0.01 g/sec前後のほぼ均一な水リーク率で、閉塞することなく小リーク領域に拡大している。このケースは注水流量が多いことからリーク孔拡大要素としてエロージョンの作用が強いと推定される。

(2) ケース2

Fig. 3.2 (a)はW444試験の結果である。条件は次の通り。

- ・試験体 : Mod. 9 Cr-1 Mo鋼、人工ヘアークラック型、55 $\mu\text{m}\phi$
- ・Na温度 : 470℃

試験開始直後は 10^{-2} g/sec前後の水リーク率であったものが、その後低下し、やがて閉塞に至っている。この図で 10^{-7} g/sec位の水リーク率になっているのは、実質的に閉塞状態と考えることができ、この場合、閉塞してから約33日後に試験装置を停止した。このケースは、比較的初期リーク孔径の小さいものに多い。これらの中には、閉塞してから十数日経過後も以前進展の見られない場合、実際のプラントを模擬してナトリウム温度に変化を与える「温度サイクル」を掛けるものもある。Fig. 3.2 (b)のW441がその1例である。この試験条件は次の通り。

- ・試験体 : Mod. 9 Cr-1 Mo鋼、疲労クラック型、42 $\mu\text{m}\phi$
- ・Na温度 : 390℃

初期水リーク率は 10^{-2} g/sec前後あったが、その後 10^{-6} ~ 10^{-7} g/secに低下しほぼ閉塞状態となった。その後、プラントの動起動停止を模擬した「温度サイクル」を掛けた。その結果、リーク孔は再開孔し、再び注水が行われたが、保有水が無くなったため試験を停止した。

これらの閉塞に関する挙動と温度サイクルについては、第5章で詳細に述べる。

(3) ケース3

Fig. 3.1 (b)はW421試験結果である。条件は次の通り。

- ・試験体 : 9 Cr-2 Mo鋼、疲労クラック型、126 $\mu\text{m}\phi$
- ・Na温度 : 390℃

初期に比べ3桁位水リーク率が低下し、ある程度の時間の潜伏期間を経過した後、拡大に至っている。このケースは、初期リーク孔径に依存せず、試験時間も数時間から数十時間とバラツキている。また、拡大後のリーク孔径はケース1より大きくなる傾向にある。

3.2.2 分類結果

ケース別に高クロム系鋼の試験結果と、「もんじゅ」SG伝熱管材の試験結果³⁾をまとめたものを、Table. 3.4に示す。

これら結果から、疲労クラック型はケース3の比率が約3/4と非常に多く、人工ヘアークラック型はケース2の閉塞するケースが多いことがわかる。

材 質	型式	ケース1	ケース2	ケース3	合計
高クロム系3鋼種	疲労	10	6	32	45
Mod. 9Cr-1Mo	人工	4	4	1	9
SUS 321	人工	11	7	1	19
2¼Cr-1Mo	人工	4	23	5	32

Table. 3.4 試験経過別の分類結果

3.2.3 試験経過と試験体形状の違い

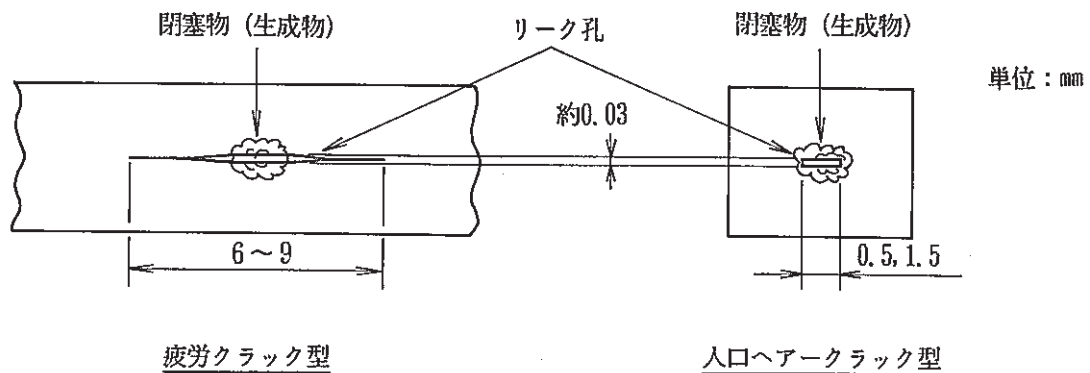
2つの試験体の経過の違いは、リーク孔の亀裂形状の違いによる閉塞挙動が原因と推定される。人工ヘアークラック型は亀裂長さ約0.5mm、亀裂幅約0.03mmの長方形に対し、疲労クラック型は亀裂長さが外面で6~9mm（内面は4mm前後）、亀裂幅は中心付近の最大点が約0.03mm前後で、そこから両端進むにつれて徐々に狭まっていく形状である。

両試験体とも閉塞位置は、セルフ・ウェステージ量の多い部分で起こっていることが試験後ノズルの解体検査結果から判った。この部分は、注水時の蒸気流量の最も多い部分でもある。このことを両試験体の亀裂形状に照らし合わせてみると、人工ヘアークラック型は、リーク孔亀裂長さが短くまた亀裂幅も均一であることから噴出する蒸気の流量はリーク孔全体でほぼ均一となる。一方疲労クラック型は、亀裂長さが10倍以上も長く且つ亀裂幅も均一でないため、

幅の最大となるリーク孔中心部で蒸気の噴出流量が最大となり両端に進むにつれて少なくなる。

従って下図に示すように、生成物による閉塞現象があった場合、人工ヘアークラック型は比較的容易にリーク孔全体が覆われ完全閉塞し易く、疲労クラック型は中心付近が閉塞した場合でも、亀裂の両端に近い部分に完全閉塞しない部分ができる。その部分は、等価孔径に換算すると非常に小さいが、そこで新たなセルフ・ウェステージが起こり、長時間かけて損耗範囲を拡大し、閉塞した部分を再開孔させる原因になると推定できる。

このことの証明となる試験後のリーク孔表面状態を撮った写真を、Photo. 3.1 に示す。この写真はW441試験のもので、リーク孔表面の中心部は生成物で閉塞しているが、その両端は拡大している。リーク孔の中心もセルフ・ウェステージを受けているが、これは初期の水リークで受けたもので、その後閉塞し、セルフ・ウェステージが停止したため、写真の様に深さが浅い。また、水/蒸気側の表面に付着している物質は、長い間の試験中にできた酸化スケールと思われる。閉塞挙動や酸化スケールについては、第5章で詳しく述べる。



(リーク孔表面の閉塞状態の推定)

3. 3 高クロム系 3 鋼種の比較

3.3.1 セルフ・ウェステージ率による 3 鋼種の比較

高クロム系 3 鋼種比較は、結果をセルフ・ウェステージ率*1(mm/sec)とリーク孔拡大前の平均水リーク率(g/sec)の関係にまとめて行った。比較に使用したデータは、3 鋼種とも疲労クラック型ノズルで、Fig. 3. 3 に示す。結果の中で、拡大に至らず途中で終了したものについては、それまでのリーク孔の進行深さ(減肉分)を注水時間で割って、セルフ・ウェステージ率を算出した。また、一旦閉塞し温度サイクルで拡大したケースも、それまでの経過からセルフ・ウェステージ率を算出した。この場合、そのまま放置しておくよりも更にセルフ・ウェステージ率は低下することから、過大評価されていることになる。

この図で○が Mod. 9 Cr-1 Mo 鋼、□が 9 Cr-2 Mo 鋼、△が 9 Cr-1 Mo-Nb-V 鋼を示し、それぞれ白ヌキが 470℃、塗り潰しが 390℃のナトリウム温度である。この図から全体的にバラツキているが、ナトリウム温度 470℃、390℃とも 3 鋼種にほとんど差が無いことがわかる。この結果、3 鋼種のセルフ・ウェステージ挙動は同じであると言える。

3.3.2 疲労クラック型ノズル 3 鋼種の実験整理式

Fig. 3. 3 のデータから、3 鋼種をまとめた実験整理式を求める。先ずデータ点数の多いナトリウム温度 470℃を基準にその Best-fit-curve の式を求め、次にナトリウム温度の関係式を相対セルフ・ウェステージ率から求める。Fig. 3. 4 に相対セルフ・ウェステージ率とナトリウム絶対温度の逆数の関係を示す。この結果、以下に示すような実験整理式が得られた。

(高クロム系 3 鋼種の実験整理式)

fatigue type :

$$S_w = \text{Exp} (8.0 + 0.74 \ln L_R - 9, 148 / T_{Na}) \quad \dots \dots \dots (1-1)$$

S_w ; セルフ・ウェステージ率 (mm/sec)

L_R ; 拡大前平均水リーク率 ($10^{-6} \sim 10^{-1}$ g/sec)

T_{Na} ; ナトリウム温度 (663 ~ 743 K)

* 1 : セルフ・ウェステージ率とは、リーク孔が拡大するまでの注水時間(sec)で初期のノズル肉厚(mm)を割ったもの

3. 4 疲労クラック型ノズルと人工ヘアークラック型ノズルの比較

人工ヘアークラック型と疲労クラック型の比較には、Mod. 9 Cr-1 Mo鋼を使用した。セルフ・ウェステージ率と拡大前の平均水リーク率で整理した結果をFig. 3. 5に示す。図中で、 \times が人工ヘアークラック型の470℃で、 \boxtimes が390℃のデータである。○は疲労クラック型の470℃、●が390℃のデータである。ここで、人工ヘアークラック型におけるMod. 9 Cr-1 Mo鋼の実験整理式を導くと以下のようなになる。

(Mod. 9 Cr-1 Mo鋼)

Slit type :

$$S_W = E_{KP} (4.2 + 0.91 \cdot \ln L_R - 7, 000 / T_{Na}) \quad \dots\dots\dots (1-2)$$

S_W ; セルフ・ウェステージ率 (mm/sec)

L_R ; 拡大前平均水リーク率 ($10^{-6} \sim 10^{-1}$ g/sec)

T_{Na} ; ナトリウム温度 (663 ~ 743 K)

両者を比較するため、470℃のデータを実線で、390℃のデータを点線で示す。ここで用いた疲労クラック型の実験曲線は、高クロム系3鋼種を併せた実験式(1-1)である。この図から、疲労クラック型に比べ人工ヘアークラック型の方が、セルフ・ウェステージ率が低いことがわかる。個々のデータにはバラツキがあるため、Best-fit-curveの実験式で比較すると、両タイプで5~10倍の差があり、水リーク率が低くなるほど差が大きくなる。

同図より疲労クラック型の方が微小リークからの拡大時間が早いことになり、疲労クラック型の方が現実に近いことを考慮すると、人工ヘアークラック型の方は過小に評価している可能性が強い。このことから2¼Cr-1Mo鋼やSUS321の拡大時間は、実際はもっと早くなると予想され、これらを見直す必要がある。

3. 5 高クロム系鋼と従来鋼種との比較

3.4項で述べたように、ノズル型式による違いは5~10倍の差があることからノズルは同型式が望ましく、2¼Cr-1Mo鋼、SUS321と高クロム系鋼の比較は、人工ヘアークラック型ノズルで行う。

3.5.1 2¼Cr-1Mo鋼とSUS321のセルフ・ウェステージ率

2¼Cr-1Mo鋼とSUS321の実験整理式は「微小リーク・ナトリウム-水反応試験研

究 第3報」³⁾で示したが、その後実施した試験データを追加し、更新した実験式をFig. 3.6, 3.7に示す。この式は、人工ヘアークラック型に於ける2¼Cr-1Mo鋼とSUS321の最終式とする。

(2¼Cr-1Mo鋼)

Slit type :

$$S_W = E_{XP} (9.7 + 0.86 \cdot \ln L_R - 9,743 / T_{Na}) \quad \dots \quad (1-3)$$

S_W ; セルフ・ウェステージ率 (mm/sec)

L_R ; 拡大前平均水リーク率 ($10^{-6} \sim 10^{-1}$ g/sec)

T_{Na} ; ナトリウム温度 (663 ~ 743 K)

(SUS321)

Slit type :

$$S_W = E_{XP} (15.4 + \ln L_R - 13,686 / T_{Na}) \quad \dots \quad (1-4)$$

S_W ; セルフ・ウェステージ率 (mm/sec)

L_R ; 拡大前平均水リーク率 ($10^{-6} \sim 10^{-1}$ g/sec)

T_{Na} ; ナトリウム温度 (663 ~ 743 K)

3.5.2 Mod. 9Cr-1Mo鋼と2¼Cr-1Mo鋼, SUS321の比較

Fig. 3.8にMod. 9Cr-1Mo鋼、2¼Cr-1Mo鋼、及びSUS321のナトリウム温度470℃において、比較した図を示す。

この図から、Mod. 9Cr-1Mo鋼は2¼Cr-1Mo鋼、SUS321より耐セルフ・ウェステージ性が優れていることがわかる。2¼Cr-1Mo鋼に対しては7~10倍、SUS321に対しては3~7倍となる。

Mod. 9Cr-1Mo鋼のナトリウム-水反応によるウェステージ特性は、高温強度や耐アルカリ腐食のデータから、両材料の中間値と予想されていた。小リーク・ナトリウム-水反応によるターゲット・ウェステージ試験の結果では、予想通りほぼ中間値となっている⁵⁾。しかし、微小リーク・ナトリウム-水反応による耐セルフ・ウェステージ性に関しては、Mod. 9Cr-1Mo鋼が最も優れている結果が得られた。

4. ノズル材料検査結果

試験後ノズルの材料検査は、セルフ・ウェステージ挙動のメカニズム解明、及び拡大後の小リーク～中リークへの進展挙動を把握する目的で実施する。主な検査項目は、以下の4種類である。

- ①. 拡大後のリーク孔径測定
- ②. 実体顕微鏡による形状観察（寸法測定）
- ③. 走査型電子顕微鏡（SEM）によるリーク孔のセルフ・ウェステージ形態観察
- ④. 光学顕微鏡による断面金属組織観察

4.1 拡大後の孔径測定

拡大後の孔径測定方法は製作時と同じ方法で行われ、リーク孔の最小孔径（オリフィス部）が求められる。また中には、試験終了後にナトリウムや反応生成物が浸入するため閉塞して、測定ができないケースもあった。54ケース中33ケース（疲労クラック型：32ケース、人工ヘアークラック型：1ケース）について測定した結果、

○ 円孔換算で 0.4～2.35 mmφ

の範囲となった。細詳データはTable. 3.1 (1/2), (2/2)に示してある。

Fig. 4.1に、拡大孔径と拡大前平均水リーク率の関係を示す。記号の白ヌキは、ナトリウム温度470℃、塗り潰しは390℃で、各記号の種類は材質の違いを表している。

（疲労クラック型）

- : Mod. 9 Cr-1 Mo鋼
- : 9 Cr-2 Mo鋼
- △ : 9 Cr-1 Mo-Nb-V鋼

（人工ヘアークラック型）

- × : Mod. 9 Cr-1 Mo鋼（470℃）

この図から、0.4～0.8 mmφの範囲が多く、全体の約半分を占めていることがわかる。ナトリウム温度が390℃の場合は、1.0 mmφ以下となる特長もある。また拡大孔径の分布をみると、最小孔径はどのリーク率の範囲においても約0.4 mmφであるが、最大孔径は各リーク率によって差があり 10^{-3} ～ 10^{-4} g/secが大きくなる傾向にあることがわかる。図中に点線を引くと、その傾向がよくわかる。

拡大孔径の半分をしめる0.4～0.8 mmφの孔径を水リーク率に換算すると、2～10 g/sec

の小リーク領域となる。また、最大孔径2.35mmφの水リーク率は、約74g/secの中リーク領域に達する。

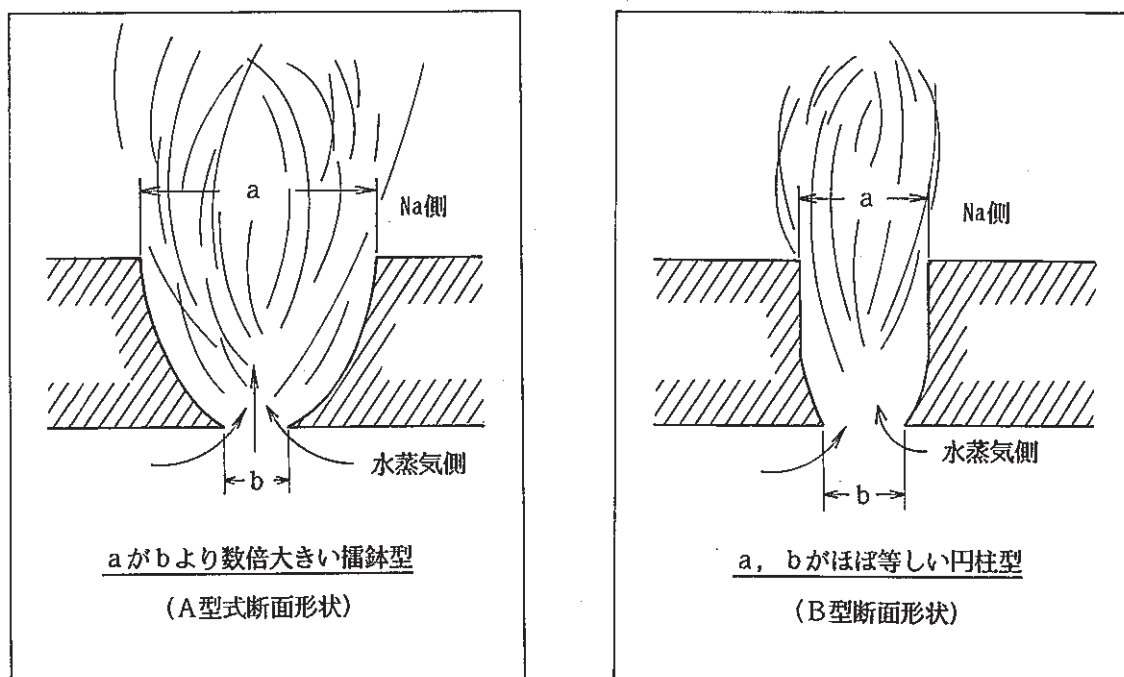
4.2 断面形状観察

4.2.1 拡大形状の観察

リーク孔の断面形状は、次の大きく2種類に分けられる。

A型式：水/蒸気側からナトリウム側にかけてほぼ逆三角形（楯鉢状）に損耗しているもの

B型式：水/蒸気側、ナトリウム側が均等（円柱）に損耗しているもの



これら2ケースのリーク孔形状写真、および断面形状写真の一例をPhoto. 4.1, 4.2に示す。

これはW414, W415試験の拡大リーク孔で、以下に試験条件と試験結果を示す。

	W414 (A型式)	W415 (B型式)
ノズル材質	Mod. 9Cr-1Mo鋼	同左
ノズル型式	疲労クラック型	同左
試験Na温度	390℃	同左
初期リーク孔径	約99μmφ	約69μmφ
拡大前注水量	約280cc	約20cc
拡大前注水時間	約2.0hour	同左
拡大後の孔径	0.84mmφ	0.97mmφ

これらの結果から、自己リーク孔拡大現象が反応生成物の化学的腐食作用（コロージョン）と、水／蒸気噴流のエロージョン作用とによって起こると考えた場合、その過程は次のようになる。

1). リーク孔から出た水／蒸気は管外面でナトリウムと反応し、その反応温度、反応生成物の腐食作用、及び水／蒸気の噴出流によってリーク孔周辺を損耗する。

A 型式：初期水リーク率の大きいものでは、流速が比較的あるためナトリウム－水反応が伝管表面からナトリウム側にかけて起こり、損耗範囲が主としてリーク孔周辺を拡大し、徐々に内側へ進行していく。

B 型式：初期水リーク率が小さいものでは、流速が少ないことから損耗範囲は拡大せず、主としてリーク孔に沿って内側（水／蒸気側）に進行する。

2). 前記 1). の過程で拡大されたリーク孔が、内面まで到達した時点で噴流によるエロージョン作用が相乗し、リーク孔が急速に拡大する。

4.2.2 拡大形状の特殊なケース

疲労クラック型の試験で、初期亀裂以外の部分がセルフ・ウェステージの進展により拡大するというこれまでに例のない現象が発見された。これは全部で4ケース（W408, 409, 414, 425）あり、全体の1割弱にあたる。その1例のW408試験のリーク孔内外面、および断面写真をPhoto. 4.3に示す。試験体に初期のリーク孔が2箇所あることは、この疲労亀裂の製作上からは考えられない。このことは、試験前に試験体を検査した結果からも無いことが確認されている。従って、セルフ・ウェステージの進行中に発生したことは間違いない。

このケースは、ナトリウム側から水／蒸気側に進行していく過程で、噴出する蒸気の流れが何らかの影響で変化

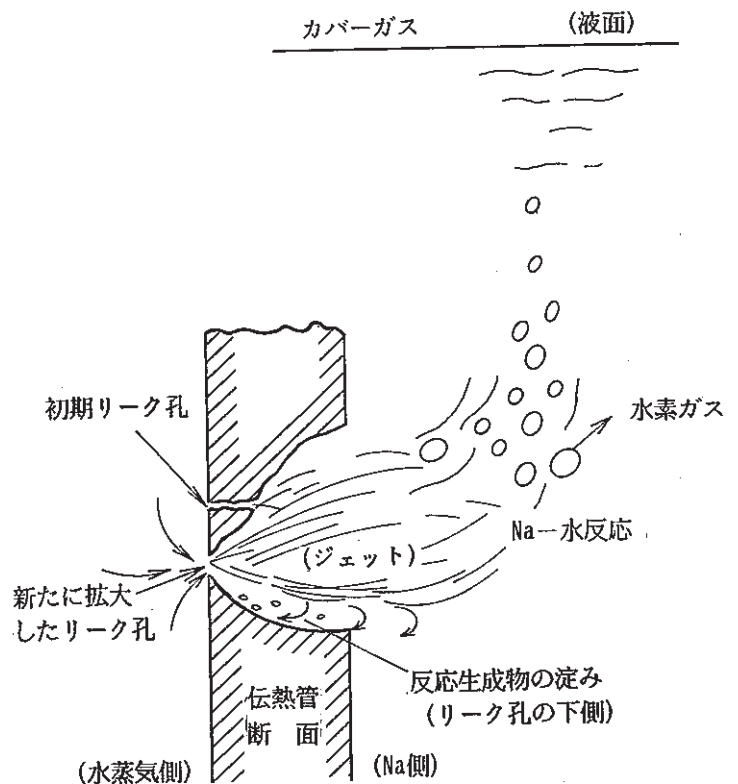


Fig 4.2 試験体据付状態と新たにできるリーク孔の位置の関係

し、その部分のセルフ・ウェステージが促進され得ることと、反応生成物による腐食を受けてその部分が弱まって得ることの2つの要因が考えられる。これらの拡大形状に共通する特徴は、新たにできるリーク孔がFig. 4.2に示すように、容器に据付た試験体の下側にできることである。

この図から進行過程を推定すると、リーク孔より噴出した蒸気や反応により発生した水素ガスは、浮力で上昇しようとするためそれらのリーク孔下部へ与える影響は小さくなる。しかし、ナトリウムより重い反応生成物がその部分へ回りこみ、淀みができて腐食作用が促進される。やがて、腐食の影響により損耗を受けた部分が初期リーク孔より速く水/蒸気側に貫通するところのようなリーク孔ができる。

これらのケースのセルフ・ウェステージ率は、通常の拡大するケースより多少早くなる傾向にあり試験データのばらつく原因になる。

4.2.3 試験体ノズル水中ガス噴出試験

ナトリウム-水反応によりセルフ・ウェステージを受けるリーク孔表面と、蒸気噴出形態にどのような関係があるのかを調査するため、試験前の人工ヘアークラック型を使用して常温の水中でのガス噴出による模擬試験を実施した。

(試験条件)

- ・使用ガス : 窒素ガス
- ・圧力 : 100 kg/cm²g
- ・使用ノズル : (型式) 人工ヘアークラック型ノズル
(孔径) 71 μmφ
(材質) ALLOY-800*
(リーク孔長さ) 0.5 mm
(リーク孔幅) 0.015 mm

(* 前シリーズで残った試験体を使用した。)

Photo. 4.4に、試験結果の写真を示す。この写真から、リーク孔出口付近のガス噴出形態を観察すると、両者のガスの広がり方の違いがよくわかる。正面からみるとストレートに噴出し、側面からみると放射状に広がりながら噴出している。この噴出とリーク孔の亀裂形状との関係は、Fig. 4.3に示すようになり、これからセルフ・ウェステージされる方向を推定すると、点線のように広がっていくと思われる。このことは、これまでの試験の拡大形状と見合う。

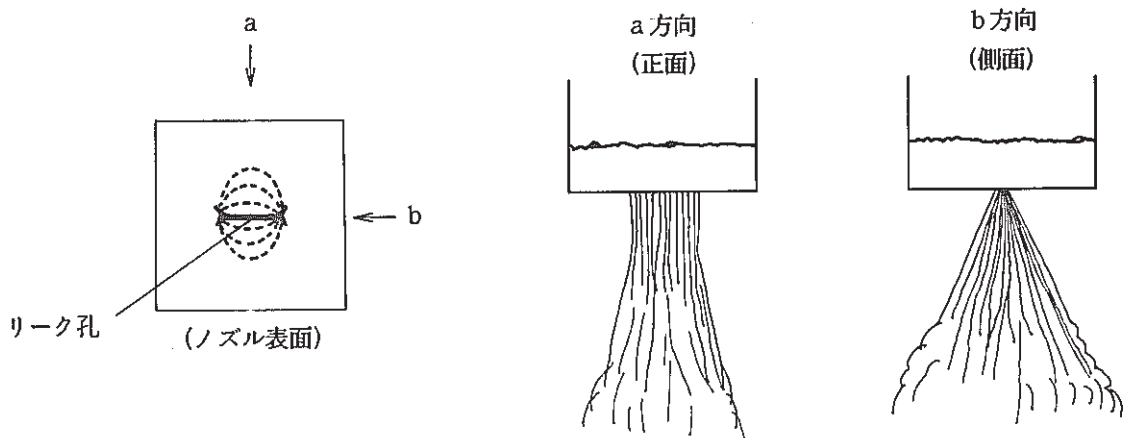


Fig. 4.3 ガス噴出形態とリーク孔の損耗方向

4.2.4 リーク孔の蒸気側からのセルフ・ウェステージ

断面形状観察の結果から、ナトリウム側のセルフ・ウェステージの他に、水／蒸気側も損耗を受けているケースが見られた。また、それらのほとんどのケースの伝熱管内面に、蒸気酸化によるスケール（マグネタイト： Fe_3O_4 ）が付着していた。Photo. 3.1のW441試験後ノズル内面に見える光沢のある黒サビがそれである。全54ケース中ウェステージを受けている18ケースの、蒸気側ウェステージ深さと拡大時間の関係をプロットしたものをFig. 4.4に示す。この中で○は疲労クラック型、□は人工ヘアークラック型、白ヌキはナトリウム温度470℃、塗り潰しは390℃である。

蒸気側の損耗量（深さ）は、試験時間が長くなるにつれて大きくなる傾向にある。エロージョンの効果は、純水な蒸気ではほとんど無いが、蒸気内になんらかの物質の細粒が含まれると加速される。従って、蒸気側の損耗の原因は、水／蒸気側で生成された酸化スケールの細粒が蒸気に含んでリーク孔に流れ込み、エロージョンを引き起こしたものと考えられる。また、酸化スケールがあるにも関わらず、蒸気側のウェステージが見られなかったケースもあるが、これらはリーク孔の拡大により蒸気側のウェステージの跡が無くなったためと考えられる。

4.3 リーク孔のSEM観察

リーク孔内壁面のミクロ的形態を走査型電子顕微鏡（SEM）を用いて観察した。観察資料は、疲労クラック型のW421とW426で前者はリーク孔が拡大したもので、後者は保水量が不足して未拡大となったものである。Photo. 4.5, 4.6にSEM観察の結果を示す。SEM観察面は両者のノズル表／裏面、断面形状をトレースしたFig. 4.5の⇒で示す部分である。

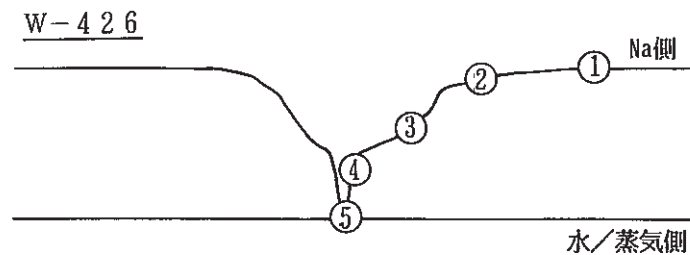
W 4 2 1 はスリパチ状に大きくセルフ・ウェステージを受けており、W 4 2 6 はナトリウム側から約 0.9 mm (全肉厚の 1/3 程度) のセルフ・ウェステージを受けている。低倍率で全体の様子を観察したところ、W 4 2 1 の場合水/蒸気側は比較的凸凹が少なく滑らかなエロージョン的色彩の濃い様相を示しているが、ナトリウム側は無数の気泡状の凹部が見られコロージョンが強いと考えられる様相を示している。一部高倍率観察 (×1000倍) では、前者の部分は粒界侵食の形跡が強いのに対し、後者の領域は比較的平滑な全面腐食の様相を示している。

W 4 2 6 の場合、W 4 2 1 と比較し表面に腐食性生成物の付着の傾向がやや強く (写真の黒色の部分)、コロージョンの影響が強いと見られる。尚、セルフ・ウェステージによるリーク孔の損耗が軽微なためか、水/蒸気側に近い方に亀裂導入時のストライエーションが一部に残留している。Photo. 4. 6 の拡大写真では④の位置がそれに該当する。

4. 4 断面金属組織観察

4. 3 項の SEM 観察で使用したノズルと同じものを使用し、リーク孔断面の金属組織観察を実施した。腐食液にピクリン酸塩酸アルコールを使用し、光学顕微鏡により損耗表層部の金属組織を観察した。W 4 2 6 の結果を Photo. 4. 7 に、またその観察位置を下図に示す。

セルフ・ウェステージを受けていない母材の表層部 (観察位置①) と比較し、損耗部 (観察位置②~⑤) は組織上の差は認められず、ナトリウム-水反応熱によるノズル材の温度上昇は高くても Mod. 9 Cr-1 Mo 鋼の A₁ 変態点以下であったことが示される。



(断面トレース図と観察位置)

5. 自己閉塞挙動についての考察

閉塞物の成分分析等から、ここではリーク孔の閉塞原因の解明を行うと共に、プラントの定常あるいは過渡的な温度変化による再開口の可能性を、温度サイクル試験から明らかにする。

5. 1 リーク孔閉塞挙動

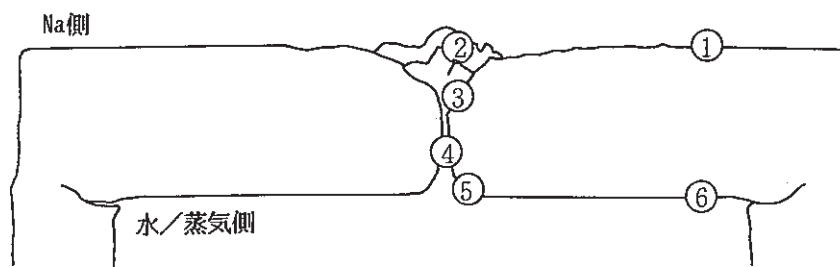
閉塞は初期ノズル孔径に依存する。一般に、初期孔径が小さいほど閉塞し易い。ここでは、試験後の材料検査から、閉塞状況とその原因を調べる。

5.1.1 閉塞ノズルの解体検査結果

検査を行った試験体は、W444試験のノズルで、試験条件や試験経過は第3章で示した。

Photo. 5.1に試験後ノズルの表裏面形状写真を、Photo. 5.2に断面形状写真を示す。表面の形状は、リーク孔に溶岩の冷え固まったような物質が形成されており、その回りは腐食損耗を受けたと思われるような減肉が見られる。断面形状の観察から、閉塞以前の水リークによって全肉厚の約1/3程度のセルフ・ウェスティングが確認できる。また、水/蒸気側にも損耗が見られ、それら両方の最小孔径部付近で閉塞している。Photo. 5.3にこの断面のトレース図(下図)の②、④、⑥について行った金属組織観察の結果を示す。また、Photo. 5.4、5.5、5.6にそれと同じ場所でO, Na, Fe, Cr, Moの5元素について成分分析を行った結果を示す。

W444 (人工型, Md9Cr-1Mo)



(断面トレース図と観察位置)

断面トレース図で、②、④、⑥は次の位置を示す。

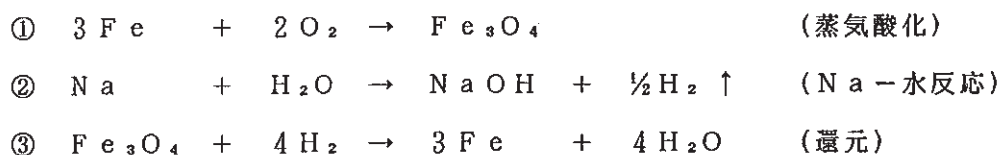
- ②：リーク孔表面に形成された物質
- ④：リーク孔が閉塞している位置
- ⑥：水/蒸気側のウェスティングの影響が無い位置 (成分分析で基準とした位置)

⑥は、ナトリウム-水反応の影響が無い、母材のMod. 9 Cr-1 Mo鋼の金相及び成分とみなし、②、④と比較する。⑥の位置(Photo. 5. 6)にO元素が分析面の下部に非常に多く見られるのは水/蒸気の酸化スケールで、母材はその上方の部分である。この酸化スケールは、Photo. 3. 1に示すW 4 4 1試験の水/蒸気側にある、光沢を含んだ黒サビがそれにあたり、 Fe_3O_4 のマグネタイトである。Photo. 5. 1の水/蒸気側の写真は、茶褐色をしているが、これは赤サビ(Fe_2O_3)が付着たため変色していると思われ、これらの発生状況から見て、ナトリウム洗浄後に生じたものと推定される。

閉塞物は、Photo. 5. 3の④の金相結果とPhoto. 5. 5の成分分析結果から、フェライト系の酸化鉄と純鉄の混合物と思われる。また、ところどころにナトリウム-水反応生成物と思われるクロム酸ナトリウムも含んでいる。②の位置も金相、成分分析結果から同じような傾向の成分であることがわかる。

5. 1. 2 リーク孔閉塞の原因

酸化鉄及び純鉄がリーク孔をプラグする原因として、次のことが考えられる。水/蒸気側に来た酸化スケール(Fe_3O_4 :マグネタイト)が、セルフ・ウェステージ進行中に水/蒸気に混じってリーク孔に巻き込まれ浸入し、それらが何らかの原因でリーク孔内面に付着する。また、同時に蒸気流量も低下する。一方、反対側からはナトリウムが浸入してきて、リーク孔内部でナトリウム-水反応を起こし、水素(H_2)が発生する。その水素ガスでリーク孔内部に付着している酸化スケールが還元され鉄と水になる。この時、リーク孔内部は、高温でかつ強アルカリ環境下であり、化学変化の起こりやすい状態となっている。これらの経過を化学式で示すと以下のようなになる。



5. 1. 3 Mod. 9 Cr-1 Mo鋼と他の材質の閉塞孔径の違い

2 ¼ Cr-1 Mo鋼, SUS 3 2 1の閉塞と初期リーク孔径の関係は、人工ヘアークラック型の場合、2 ¼ Cr-1 Mo鋼で70 μmφ以下、SUS 3 2 1で30 μmφ以下であった。³⁾ところがMod. 9 Cr-1 Mo鋼は90 μmφで閉塞するケースもあれば、46 μmφで閉塞しないケースもある。Fig. 5. 1にそれらの関係を初期リーク孔径と拡大時間で整理した図を示す。図中の塗り潰しが閉塞したケースを示している。

これらのことからMod. 9 Cr-1 Mo鋼は閉塞挙動にバラツキがあり、SUS 321や2¼Cr-1 Mo鋼のように何 $\mu\text{m}\phi$ 以下で閉塞する、ということはいえない。ただ、ナトリウム温度が高い方が閉塞し易い傾向にあることがわかる。一般的に高温環境下の方が、酸化あるいは還元速度が増すことなどの理由から、ナトリウム温度が高いケースの方が酸化スケールの生成速度あるいは閉塞後の還元速度が速くなり、閉塞し易くなると言える。

5. 2 閉塞したリーク孔への熱過渡効果

ここでは、実プラントでの熱過渡を模擬した温度変化が、閉塞したリーク孔に及ぼす影響を調べた。これを「温度サイクル試験」という。この試験を実施するにあたり、実プラントに於ける熱過渡事象の調査を行い、実際に起こる可能性の非常に高い現実的なもので、更に本装置の性能上実施可能なものを選択した。その温度サイクルは、起動・停止模擬温度サイクルと核沸騰挙動模擬温度サイクルである。

5.2.1 温度サイクル実施方法

(1) 起動・停止模擬温度サイクル試験

起動・停止は、FBR実証炉を例にとると30年間で約100回といわれている。⁶⁾短期的には変化が穏やかなためあまり厳しくないが、長期的にみるとクリープ疲労などが発生し易く、厳しい事象である。また、実際に行われる事象でもあるという理由から選択した。起動・停止を模擬する上で、参考としたプラントは原型炉「もんじゅ」SGで、その起動・停止曲線をFig. 5.2に示す。試験方法は、そのグラフに合わせた温度変化を電気ヒータの出力を調整することで行った。温度調節器は温度プログラマーにより自動調節が可能で、実際と殆ど同じ曲線が得られる。

(2) 核沸騰挙動模擬温度サイクル試験

SG内では、核沸騰領域(DNB点)において非常に速い周期で温度の変化がある。「もんじゅ」SGを対象としたR&Dとして1MWSGで測定した結果によると、管内壁で最大振幅20~30℃幅、周期は10~20秒である。^{7) 8)}この温度変化により伝熱管周方向に応力が発生し、更に数十秒刻みの周期からクリープ疲労も発生する。しかし、本装置の性能から10~20秒の周期で温度を変化させることはできない。従って、周期を実際の約300倍の30℃/hとし30℃幅のサイクルを行った。この温度変化率は起動・停止模擬の約2倍に相当する。

5.2.2 実施結果

これまで高クロム系鋼を使用して、疲労クラック型6回、人工ヘアークラック型3回の合計9回実施した。また、従来鋼種では計12回実施した。それらの結果を以下の表に示す。

型 式	材 質	サイクル方法	未開孔	再開孔	その他
疲労ク ラック型	高クロム系鋼	DNB模擬 and 起動停止模擬	0	6	
人工 ヘアーク ラック型	Mod9Cr-1Mo鋼	起動停止模擬	0	3	
	2¼Cr-1Mo鋼	〃	3	2	3
	SUS 321	〃	0	0	3
	ALLOY-800	〃	0	1	
合 計		—	3	12	6

Table. 5.1 温度サイクル実施結果

DNB点の模擬は、疲労クラック型で1ケース実施したが、全く水リーク率に変化が見られなかったため、それ以後行っていない。この表で、再開孔した合計12ケースのうち、疲労クラック型の4ケースが、再開孔から拡大へと進展した。また、その他の欄に示す6ケースは、人工ヘアークラック型のものでノズル取付け台に亀裂が発生し試験を中断したものである。このケースのリーク孔は、閉塞状態のまま変化はなかった。亀裂の原因は、製作不良による応力腐食割れであった。

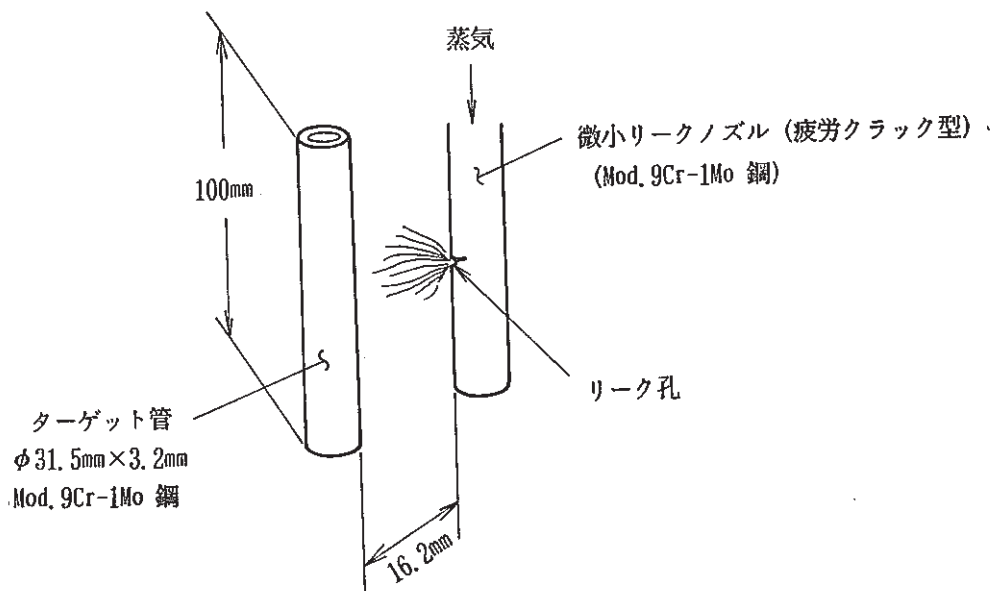
これらのこの結果によると、疲労クラック型、人工ヘアークラック型の両方を合わせて、半分以上のケースが再開孔、あるいは再開孔から拡大まで至っており、実際にも起こり得ると言える。また、人工ヘアークラック型に比べ、疲労クラック型は再開孔、及び拡大に至り易いこともわかる。これは、第3章で述べた通常状態の疲労クラック型が拡大し易いことと同じ理由で、試験体形状の違いが原因と推定できる。

6. 微小リーク・ターゲットウェステージ結果

微小リーク・ナトリウム-水反応領域で、隣接する伝熱管がウェステージされないことを確認するため、Mod. 9Cr-1Mo鋼のターゲット管を設け、微小リーク・ターゲット・ウェステージ試験を行う。微小リーク試験体は、疲労クラック型を使用した。

6. 1 試験方法

ターゲット管の取付け方法は、伝熱管間の距離が「もんじゅ」SG伝熱管の最小寸法である16.2mmとした。この寸法は、小リークによるターゲット・ウェステージでは最もウェステージ率が大きい距離である。⁵⁾注水方向は、ターゲット管の中心とした。



6. 2 試験結果

ターゲット・ウェステージ試験は10ケース実施しており、微小リーク試験の経過とターゲット・ウェステージの結果をTable. 6.1に示す。この中でウェステージが無かったのは、W407, W426, W431, W433の4ケースである。これらは、微小リーク領域の注水が行われている途中、保水量が無くなり試験を停止したもので、リーク孔が拡大に至らなかったケースである。ただ、W407のターゲット管には、蒸気があたったと思われるような光沢が見られた。このケースの最大水リーク率は、約0.1 g/secの微小リーク領域と小リーク領域のちょうど境界であった。このことから、微小リーク領域の注水では、ジェットがターゲット管に当たってもウェステージを受けないことがわかる。それ以外のケースは、全てリーク孔が拡大

に至っており、ターゲット管もウェステージを受けていることから、リーク孔が拡大した後の注水で受けたものであると言える。

ウェステージを受けたターゲット管については、CONTOUR 処理^{*2}で損耗量を測定した。その1例としてW432試験のWastage MapをFig. 6.1示す。CONTOUR 処理の結果、ターゲット管のほとんどが注水方向(0°)よりずれた位置でウェステージされていた。また、その方向も各ケースによって異なっていた。その他、ウェステージを受ける範囲も、軸方向に長かったり、周方向に長かったりして異なっており、微小リーク孔の拡大形状が一定していないことがよくわかる。

6.3 小リーク・ターゲット・ウェステージ結果との比較

Table. 6.1に示すデータから、リーク孔拡大後の平均水リーク率と、ターゲット・ウェステージ率の関係をFig. 6.2に示す。○印が470℃、△印が390℃である。同図の点線は、小リーク・ナトリウム-水反応試験から得られた9Cr系鋼のターゲット・ウェステージの実験線である。⁵⁾この実験式を以下に示す。

$$W_R = 0.08 \cdot E_{HP} \{ -0.265 \cdot (\ln L_R / 6.25)^2 \}$$

W_R : ウェステージ率 (mm/sec)

L_R : リーク率 (g/sec)

この実験は、ナトリウム温度350～520℃の範囲で行ったが、ナトリウム温度に依存しないため、ナトリウム温度の関数は含まれていない。

微小リーク試験装置は、インターロックで試験終了の際注水バルブが閉になるが、そのバルブから注水ノズルまでの残水をブローする機能が装備されていないため、その間に約5ccの水が残る。従って、その残水による影響で試験後も多少のウェステージがある。Table. 6.1で示した注水量や注水時間のデータには、この残水分が含まれておらず、この結果は過大評価になる。Fig. 6.2に示す結果から、微小リークのターゲット・ウェステージ結果は、残水分を考慮しなくても小リークより低くなる。

*2 : CONTOUR 処理は、ウェステージされた伝熱管表面の損耗量(深さ)を約0.5 mm間隔で測定し、その結果から等高線図を書く処理のことを言う。

7. 微小リークと水素検出計

ここでは、水素計による小リーク・微小リークの検出可能な水リーク率の範囲を、「SWA C10」コードを用いて評価する。SG伝熱管には、Mod. 9 Cr-1 Mo鋼を使用した。また、SGの液面有無をパラメータにした比較も行った。

7. 1 計算方法

(1) 計算体系

Fig. 7.1 に示す「もんじゅ」体系で行った。図中の過熱器、オーバーフローラインはインプット上で削除し、一体貫流型SGの体系としている。また、SGの液面有無も同様にインプット上で行っている。

その他に構造データ、SG主要目等のインプットデータは、プラント工学室が発行した「大型高速増殖炉要素技術設計研究(Ⅱ)」⁹⁾を参考にした。Table. 7.1 にSG主要目を示す。

(2) 水素計検出条件

「もんじゅ」のそれをそのまま用いた。

・ サンプリングからのNi膜までのNa輸送時間	20秒
・ Ni膜拡散時間	15秒
・ 水素センサの1次遅れ応答の時定数	25秒
・ 警報設定点	バックグラウンドの10%

(3) ウェステージ率

高クロム系鋼の小リーク・ウェステージ結果⁵⁾で示す高クロム系鋼の実験式を使用した。

$$W_R = 0.08 \cdot \text{Exp} \{ -0.265 \cdot (\ln L_R / 6.25)^2 \}$$

(4) セルフ・ウェステージ率

第3章で求めた疲労クラック型の実験式(1-1)を使用した。

$$S_w = \text{Exp} (8.0 + 0.74 \ln L_R - 9.148 / T_{Na})$$

(5) 伝熱管肉厚

Mod. 9 Cr-1 Mo鋼の隣接管破損時間、リーク孔自己拡大時間評価用の伝熱管の肉厚は、以下の値とする。

鋼種 \ 肉厚	公称値 (mm) a	腐れ代除去後 の肉厚 (mm) b	隣接管破損時 間用肉厚 (mm) $C = b \times 0.8$	リーク孔自己拡大 時間用肉厚 (mm) a, b
Mod. 9Cr-1Mo鋼	2.6	1.72	1.376	2.6, 1.72

(6) 伝熱管の水素拡散率

Mod. 9 Cr-1 Mo鋼は、2 ¼ Cr-1 Mo鋼の1/10とする。

・ Mod. 9 Cr-1 Mo鋼 (暫定値) 2×10^{-2} (gH₂/cm²sec)

(7) コールドトラップ流量

Mod. 9 Cr-1 Mo鋼を使用した場合、水素拡散率が低いのでナトリウム中水素濃度のバックグラウンドレベルを「もんじゅ」と同レベル (約 170ppb) になるコールドトラップ流量を求めると、約 2.5 Ton/hになる。⁹⁾ 但し、まだ設計に関する詳細な検討がなされていないため、過大評価の意味からもここでの計算には「もんじゅ」と同じ 1.0 Ton/hを使用した。

(8) SG液面の有無

有液面型のSGカバーガス量は、大リーク・ナトリウム-水反応事象評価¹⁰⁾ で使用したSGの寸法から算出した。また無液面でのこの値は 0.001m³とした。

有液面 ・カバーガス体積 約 50 m³
 ・Na液面表面積 約 8 m²

以上をまとめたSWAC10用のインプットデータリストをTable. 7.2に示す。

7.2 計算結果

Mod. 9 Cr-1 Mo鋼を用いたSGのセーフティ・マップをFig. 7.2に示す。この検出時間に相当する水素計の位置は、SG出口である。

計算パラメータのSG液面有無の比較では、無液面の方が多少検出時間が速くなる。この図で水リーク率が0.1 g/secの時は約1分半、0.01 g/secの時は約10分速い。これは有液面型の場合、SG上部に到達する水素気泡はカバーガスへ抜けるのに対し、無液面型の場合は、全てナトリウム中に溶解するためである。

これらの検出時間と隣接管破損時間は、コールドトラップ流量10 Ton/h以下では有液面、無液面とも約0.7 g/sec以下のリーク率では隣接管の破損伝播前にリーク検出が可能となる（但し、この数字に運転員判断時間は考慮されていない）。また微小リークによるリーク孔の自己拡大時間と比較すると、伝熱管肉厚を1.72 mmとした場合でも拡大前に検出することが可能となる。ただ、リーク孔拡大時間にはそれぞれのケースによってバラツキがあるため、全ての微小リークを検出できるとは言えない。

8. 結 論

高クロム系SG伝熱管材について、疲労クラック型ノズルと人工ヘアークラック型ノズルを使用した、合計54回の微小リーク・ナトリウム-水反応試験を実施した。また、微小リーク領域におけるターゲット・ウェステージ試験も平行して行った。

試験データおよび試験後の材料検査データを評価し、伝熱管材料の比較、微小リーク挙動の解明を行い、次の結果を得た。

(1) 高クロム系3鋼種の比較

高クロム系3鋼種 (Mod. 9Cr-1Mo鋼, 9Cr-2Mo鋼, 9Cr-1Mo-Nb-V鋼) の耐セルフ・ウェステージ性に対する違いを比較した結果、3鋼種間に差異の無いことがわかった。疲労クラック型ノズルを使用して得たそれら鋼種のデータをまとめて、以下に示すような実験評価式を導いた。

高クロム系3鋼種の実験整理式

$$S_W = E_{SP} (8.0 + 0.74 \cdot \ln L_R - 9,148 / T_{Na})$$

L_R : 拡大前平均水リーク率 ($10^{-6} \sim 10^{-1}$ g/sec)

T_{Na} : ナトリウム温度 (633~743 K)

(2) 高クロム系鋼と他材料との比較

Mod. 9Cr-1Mo鋼と2¼Cr-1Mo鋼, SUS321 (「もんじゅ」SG伝熱管材) の違いを、人工ヘアークラック型ノズルで得た結果に基づいて比較した結果、Mod. 9Cr-1Mo鋼は、2¼Cr-1Mo鋼の7~10倍、SUS321の3~7倍程度の耐セルフ・ウェステージ性が有ることがわかった。

(3) 疲労クラック型と人工ヘアークラック型の比較

Mod. 9Cr-1Mo鋼における疲労クラック型と人工ヘアークラック型を比較した結果、人工ヘアークラック型の方が自己拡大挙動が5~10倍程度セルフ・ウェステージ性が穏やかであることがわかった。

(4) リーク孔拡大後の孔径

セルフ・ウェステージにより拡大するリーク孔径の大きさは、円孔に換算すると0.4~2.35mmφである。これを水リーク率に換算すると、SG蒸気出口付近で約2~74

g/sec の小～中リーク領域となる。また、拡大孔径には、ナトリウム温度が依存しており、高温になるほど孔径が大きくなることがわかった。

(5) 閉塞挙動

閉塞したリーク孔の成分分析の結果、閉塞物は主に純鉄であることがわかった。これは、水/蒸気側にできる酸化スケールのマグネタイト (Fe_3O_4) が、還元してできたものである。

一旦閉塞したリーク孔も温度変化が加わると、再開孔する可能性があることが、温度サイクル試験でわかった。

(6) 微小リーク・タゲット・ウェステージ試験

微小リーク領域（水リーク率0.1g/sec以下）の注水では、隣接管（ターゲット管）のウェステージが無いことがわかった。又、リーク孔拡大後の注水で損耗を受ける隣接管のウェステージ率は、小リーク・ターゲット・ウェステージ試験で得たウェステージデータより低くなる。

(7) 微小リーク水素検出時間

「SWAC10」コードを使用して計算した実証炉の水素検出時間と、微小リーク孔拡大の比較では、拡大する前に検出することが可能であることがわかった。（但し、これには運転員の判断時間は考慮されていない）

9. 参考文献

- 1). PNC SN941 80-135 黒羽 他 , 高速炉蒸気発生器伝熱管 2 1/4 Cr-1Mo鋼のリーク孔自己拡大試験 —— 微小リーク・ナトリウム-水反応試験研究 第1報 ——
- 2). PMC ZN941 82-101 黒羽 他 , 高速炉蒸気発生器伝熱管損傷リーク孔の自己拡大試験 —— 微小リーク・ナトリウム-水反応試験研究 第2報 ——
- 3). SN9410 86-027 M. KUROHA 他 , MICRO-LEAK BEHAVIOR ON LMFBR MONJU STEAM GENERATOR TUBE MATERIALS.
—— Studies of Micro-Leak Sodium-Water Reaction (3) ——
- 4). SJ2124 86-009 要素技術設計研究(Ⅱ), 大型化に関する設計研究に伴う設備設計役務(2) —— 2次熱輸送系設備等 ——
- 5). SN9410 88-129 宇佐美 他 , 高クロム系SG伝熱管材の小リーク・ウェステージ特性 —— 小リーク・ウェステージ試験 ——
- 6). SY9471 87-003(1) 亀井 他 , 共同研究報告 , Mod. 9 Cr-1 Mo鋼を使用した一体貫流型蒸気発生器伝熱管の健全性評価研究
- 7). SN-941 75-89 丸山 他 , 50 MW蒸気発生器試験結果報告
—— 過熱器出口Na温度振動現象の検討 ——
- 8). ZN-201 79-39(2) PNC, 東芝, 三井造船 , 1 MW不安定現象試験装置DNB試験及び解析評価報告書
- 9). 19410 88-020 米川 他 , 大型高速増殖炉要素技術設計研究(Ⅱ)
—— 一体貫流型SGの検討(4.2.C) ——
- 10). PNC SN9410 88-068 田辺 他 , 無液面及び有液面蒸気発生器の大リーク・ナトリウム-水反応解析(Ⅱ)
—— 大リーク・ナトリウム-水反応試験研究 第16報 ——

1 0 . 謝 辞

本試験を実施するに当たり、試験装置の運転に携わった東興機械工業（株）の関係者、並びに試験体ノズルの製作・試験後の検査に関して多大な協力と助言をいただいた石川島検査計測（株）の岡田文夫氏にここで厚く御礼申し上げます。

鋼種	材料規格		熱処理	化学成分 (Wt%)											備考 (FBR名) 他
	ASTM	JIS		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Nb	Ti	V	
304ステンレス鋼	A213TP 304	SUS304TB	1010°C以上ST	≤ 0.08	≤ 1.00	≤ 2.00	≤ 0.040	≤ 0.030	8.00 11.00	18.00 20.00					BN600
316ステンレス鋼	A213TP 316	SUS316TB	1040°C以上ST	≤ 0.08	≤ 1.00	≤ 2.00	≤ 0.040	≤ 0.030	10.00 14.00	16.00 18.00	2.00 3.00				PFR
321ステンレス鋼	A213TP 321	SUS321HTB	1095°C以上ST	0.04 0.10	≤ 0.75	≤ 2.00	≤ 0.030	≤ 0.030	9.00 13.00	17.00 20.00			4×C% 0.60		Monju Phenix
2¼Cr-1Mo鋼	A213T5	STBA24	920/950N+ 680/710°C	≤ 0.15	≤ 0.50	0.31 0.60	≤ 0.030	≤ 0.30		1.90 2.60	0.87 1.13				Monju EBR-1 CRBRP BN350etc
2¼Cr-1MoNbNi鋼			970/1030°CN+ 680/750°C	< 0.10	0.15 0.50	0.40 0.80	< 0.040	< 0.040	0.30 0.80	2.0 2.5	0.9 1.1	>10×C+0.1 <10×C+0.1			SNR300, PFR
9Cr-1Mo鋼	A213T5	STBA26	900/1000°CN+ 700/800°C	≤ 0.15	0.25 1.00	0.30 0.60	≤ 0.030	≤ 0.030		8.00 10.00	0.90 1.10				CFR
9Cr-1Mo鋼			~ 1038°CN+ ~ 760°C T	0.08 0.12	0.2 0.5	0.3 0.5	≤ 0.02	≤ 0.01	≤ 0.2	8.0 9.0	0.85 1.05	0.06 0.10	≤ 0.01	0.18 0.25	米国大型炉
9Cr-1Mo-NbVB鋼 (Tempaloy F-9)			1100/1180°CN+ 750/810°C	0.04 0.08	0.25 1.00	0.4 0.8	≤ 0.030	≤ 0.030		8.00 9.50	0.90 1.10	0.20 0.60	(B) ≤ 0.010	0.15 0.45	日本鋼管開 閉材料
9Cr-2Mo鋼 (HCM 9M)			~ 1100°CN+ 725/810°C	≤ 0.08	≤ 0.50	0.30 0.70	≤ 0.030	≤ 0.030		8.0 10.0	1.8 2.2				住金開発材 料
9Cr-2Mo-NbV鋼 (NSCR 9)			1035/1065°CN+ 765/795°C	≤ 0.10	≤ 0.50	≤ 1.50	≤ 0.030	≤ 0.030		8.00 10.00	1.50 2.30	≤ 0.10		≤ 0.20	新日鉄 開発材料
9Cr-2Mo-NbV(EM12)			1050/1125°CN+ 725/775°C	0.07 0.12	≤ 0.50	0.9 1.2	≤ 0.030	≤ 0.030		8.5 1.0	1.8 2.2	0.3 0.6		0.25 0.45	Super Phenix 2
12Cr-1MoV鋼 (MS13.HT91)			1020/1070°CN+ 680/780°C	0.17 0.23	≤ 0.50	≤ 1.00	≤ 0.030	≤ 0.030		10.00 12.50	0.80 1.20			0.25 0.35	SNR-2
12Cr-1MoWV鋼 (HT9)			~ 1050°CN+ 750/800°C	0.17 0.23	0.2 0.3	0.4 0.7	≤ 0.030	≤ 0.030		11.0 12.5	0.80 1.20		(W) 0.4/0.6	0.25 0.35	Sandvick 開発材料
Alloy 800	B 163	NCF2HTB	1100°C以上ST	0.05 0.10	≤ 1.00	≤ 1.50	≤ 0.030	≤ 0.015	30.00 35.00	19.00 23.00			0.15 0.60	(A1) 0.15/0.60	Super Phenix1,2

Table. 2.1 FBR SG伝熱管用材料の化学成分

試験No	使用ノズル				試験条件			試験 開始日	初期水 リーク率 (g/sec)	拡大前 注水 時間 (hour)	拡大前 注水量 (cc)	拡大前平均 水リーク率 (g/sec)	試験 経過別 分類	閉塞 時間 (hour)	総注 水量 (cc)	総注水 時間 (hour)	Na側 損耗 深さ (mm)	セルフウ エ ス テー ジ 率 (mm/sec)	水側 損耗 深さ (mm)	拡大 後 孔径 mmφ	試験結果
	材質	型式	孔径 mmφ	厚さ (mm)	Na温度 (℃)	水温度 (℃)	注水圧 kg/cm ²														
W401	Mod9Cr-1Mo	疲労	0.1096	2.62	470	320	133	610618	1.6×10^{-1}	0.2	88.0	1.1×10^{-1}	ケース 1	—	88	0.2	1.72	2.1×10^{-3}	—	—	保水量φ
W402			0.0683			280	130	610627	2.2×10^{-3}	5.8	8.8	4.2×10^{-4}	ケース 3	5.1	97	5.8	2.62	1.3×10^{-4}	—	1.26	拡大
W403			0.0546			330		610805	5.9×10^{-5}	423.7	457.0	3.0×10^{-4}	ケース 3	53.3	507	424.0	2.62	2.0×10^{-5}	0.47	1.37	拡大
W404			0.0766			340		610723	9.1×10^{-4}	1.8	4.2	6.5×10^{-4}	ケース 3	1.3	91	1.9	2.62	4.0×10^{-4}	—	0.44	拡大
W405			0.0834			330		610731	4.3×10^{-2}	9.3	38.9	1.2×10^{-3}	ケース 3	—	95	9.3	2.62	7.8×10^{-5}	—	1.39	拡大
W406			0.0553			330	133	610822	5.0×10^{-2}	3.1	58.0	5.2×10^{-3}	ケース 3	1.9	150	3.1	2.62	2.4×10^{-4}	—	0.41	拡大
W407			0.0753	2.63	390	250	129	610829	9.3×10^{-2}	0.5	180.0	9.1×10^{-2}	ケース 1	—	180	0.5	1.73	8.8×10^{-4}	—	—	保水量φ
W408			0.0680	2.62		250	130	610925	1.9×10^{-2}	2.3	78.0	9.3×10^{-3}	ケース 1	—	165	2.4	2.62	3.1×10^{-4}	—	1.08	拡大
W409			0.0755	2.63		270	130	611001	5.4×10^{-2}	4.2	222.9	1.5×10^{-2}	ケース 1	—	250	4.2	2.63	1.7×10^{-4}	—	0.57	拡大
W410			0.0583	2.63		280	128	611015	8.8×10^{-5}	2629.6	117.9	1.2×10^{-5}	ケース 2	861.2	169	2629.6	2.63	2.8×10^{-7}	0.95	—	拡大 (オ)*
W411			0.0374	2.62	470	340	130	611021	8.5×10^{-3}	7.1	28.9	1.1×10^{-3}	ケース 3	—	89	7.1	2.62	1.0×10^{-4}	—	0.57	拡大
W412			0.0800		390	270	120	611031	1.6×10^{-1}	3.1	153.4	1.4×10^{-2}	ケース 1	—	202	3.1	2.62	2.4×10^{-4}	—	0.63	拡大
W413			0.0725		470	325	130	611204	4.5×10^{-5}	331.6	29.1	2.4×10^{-5}	ケース 3	174.3	93	331.7	2.62	2.0×10^{-6}	0.57	0.43	拡大 (オ)
W414			0.0989		390	250	132	611209	9.0×10^{-2}	2.0	278.6	3.8×10^{-2}	ケース 1	—	339	2.1	2.62	3.6×10^{-4}	—	0.84	拡大
W415			0.0689		390	270	130	620108	1.5×10^{-2}	1.9	19.3	2.8×10^{-3}	ケース 1	—	99	1.9	2.62	3.8×10^{-4}	—	0.97	拡大
W416			0.0354		470	330	130	620402	5.7×10^{-2}	72.9	12.8	4.9×10^{-5}	ケース 3	70.3	98	72.9	2.62	1.0×10^{-5}	—	1.01	拡大
W417		人工	0.0902	3.22		330	133	620406	4.4×10^{-2}	449.5	228.0	1.4×10^{-4}	ケース 2	350.7	228	449.5	1.56	1.0×10^{-6}	1.06	—	保水量φ (オ)
W418	9Cr-2Mo	疲労	0.0839	2.62		250	130	620408	4.8×10^{-2}	72.4	11.9	4.6×10^{-5}	ケース 3	71.9	99	72.5	2.62	1.0×10^{-5}	—	0.57	拡大
W419	Mod9Cr-1Mo	人工	0.0576	3.22		340		620422	2.0×10^{-4}	182.3	98.0	1.5×10^{-4}	ケース 2	181.7	98	182.3	0.42	1.0×10^{-6}	0.68	—	保水量φ (オ)
W420	9Cr-2Mo	疲労	0.0692	2.63		350		620515	5.0×10^{-3}	27.8	22.0	2.2×10^{-4}	ケース 3	14.6	106	27.8	2.63	2.6×10^{-5}	—	2.35	拡大
W421			0.1246	2.62	390	290		620413	1.2×10^{-1}	28.7	162.4	1.6×10^{-3}	ケース 3	—	177	28.7	2.62	2.5×10^{-5}	—	0.87	拡大
W422			0.1298	2.61	470	330		620604	1.9×10^{-3}	63.7	5.2	2.3×10^{-5}	ケース 3	63.1	85	63.7	2.61	1.1×10^{-5}	0.20	—	拡大
W423	Mod9Cr-1Mo		0.0281	2.62	390	280		620527	6.8×10^{-5}	1023.6	14.2	4.0×10^{-6}	ケース 2	1023.0	96	1023.7	2.62	1.0×10^{-6}	1.20	0.46	拡大 (オ)
W424	Mod9Cr-1Mo	人工	0.0808	3.20	470	360		620601	6.0×10^{-2}	628.0	155.0	6.9×10^{-5}	ケース 2	551.0	155	628.2	1.02	4.5×10^{-7}	0.67	—	保水量φ (オ)
W425	9Cr-2Mo	疲労	0.0374	2.62	470	360		620717	2.4×10^{-3}	49.1	28.5	1.6×10^{-4}	ケース 3	17.5	104	49.1	2.62	1.5×10^{-5}	—	1.24	拡大
W426			0.0551		390	265	126	620723	4.4×10^{-3}	12.3	93.0	2.1×10^{-3}	ケース 1	0.0	93	12.3	0.87	2.0×10^{-2}	—	—	保水量φ
W427			0.0709		390	280	130	620703	8.0×10^{-3}	215.1	144.0	1.9×10^{-4}	ケース 1	13.7	144	215.1	2.47	3.0×10^{-6}	—	—	保水量φ

* (オ) は温度サイクルのことである。

Table. 3.1(1/2) 試験条件と試験結果

試験No	使用ノズル				試験条件			試験開始日	初期水リーク率 (g/sec)	拡大前注水時間 (hour)	拡大前注水量 (cc)	拡大前平均水リーク率 (g/sec)	試験経過別分類	閉塞時間 (hour)	総注水量 (cc)	総注水時間 (hour)	ピラミッド深 (mm)	セルフェースステージ率 (mm/sec)	水側消耗深 (mm)	拡大後孔径 (mmφ)	試験結果
	材質	型式	孔径 (mmφ)	厚さ (mm)	Na温度 (℃)	取温度 (℃)	注水圧 (kg/cm ²)														
W428	9Cr-2Mo	疲労	0.0774	2.62	470	320	130	620805	3.0×10^{-2}	1.9	75.6	1.1×10^{-2}	ケース 3	—	146	2.0	2.62	3.7×10^{-4}	—	1.10	拡大
W429	9Cr-2Mo	疲労	0.0332	2.62	390	270	130	620810	5.0×10^{-3}	2111.7	66.0	9.0×10^{-6}	ケース 2	2098.7	66	2111.7	1.97	2.6×10^{-7}	0.65	—	保水量φ
W430	Mod9Cr-1Mo	人工	0.0663	3.20	↓	250	131	620820	1.0×10^{-1}	3.6	212.0	1.7×10^{-2}	ケース 1	—	212	3.6	0.47	3.7×10^{-5}	—	—	保水量φ
W431	9Cr-2Mo	疲労	0.0773	2.63	↓	280	132	620826	5.0×10^{-3}	6.4	139.0	6.1×10^{-3}	ケース 1	—	139	6.4	1.96	8.5×10^{-5}	—	—	保水量φ
W432	Mod9Cr-1Mo	↓	0.0278	2.62	470	340	129	620904	1.0×10^{-3}	178.8	22.3	3.5×10^{-5}	ケース 2	168.4	90	178.8	2.62	4.0×10^{-6}	—	1.52	拡大 (オ)*
W433	↓	↓	0.0473	2.63	390	295	130	620909	4.0×10^{-6}	102.9	92.0	2.5×10^{-4}	ケース 3	97.3	92	102.9	0.53	1.0×10^{-6}	0.60	—	保水量φ
W434	↓	人工	0.0459	3.22	390	280	130	621001	2.0×10^{-2}	8.4	253.0	8.4×10^{-3}	ケース 1	—	253	8.4	0.93	3.1×10^{-5}	—	—	保水量φ
W435	9Cr-2Mo	疲労	0.0440	2.62	470	350	130	621009	9.0×10^{-6}	(12.3	10.0	2.3×10^{-4}	ケース 2	12.3	10	12.3	0.70	1.6×10^{-5}	—	—	装置不良停止)
W436	↓	↓	0.0422	↓	↓	330	131	621016	2.0×10^{-2}	(9.7	11.0	3.1×10^{-4}	ケース 2	9.7	12	9.7	2.62	7.5×10^{-5}	—	0.54	装置不良停止)
W437	↓	↓	0.0573	↓	↓	370	130	621116	3.0×10^{-3}	24.9	20.2	2.3×10^{-4}	ケース 3	5.6	95	24.9	2.62	2.9×10^{-5}	0.95	0.60	拡大
W438	Mod9Cr-1Mo	↓	0.0481	↓	↓	380	↓	621126	6.0×10^{-4}	15.9	26.0	4.5×10^{-4}	ケース 3	4.1	84	15.9	2.62	4.6×10^{-5}	—	0.74	拡大
W439	9Cr-2Mo	↓	0.0501	↓	390	287	↓	621130	2.6×10^{-2}	540.6	91.0	4.7×10^{-5}	ケース 2	531.7	91	540.6	1.29	6.6×10^{-7}	0.58	0.67	保水量φ (オ)
W440	9Cr-2Mo	↓	0.0634	↓	470	350	↓	621203	5.0×10^{-3}	6.6	5.8	2.4×10^{-4}	ケース 3	5.9	95	6.7	2.62	1.1×10^{-4}	—	1.80	拡大
W441	Mod9Cr-1Mo	↓	0.0424	↓	390	305	132	621211	4.7×10^{-3}	308.1	116.0	1.1×10^{-4}	ケース 2	252.5	116	308.1	0.89	8.0×10^{-7}	0.48	—	保水量φ (オ)
W442	9Cr-2Mo	↓	0.0245	↓	470	350	132	630121	1.0×10^{-3}	59.1	16.0	7.5×10^{-5}	ケース 3	36.9	88	59.1	2.62	1.2×10^{-5}	—	0.56	拡大
W443	Mod9Cr-1Mo	人工	0.0922	3.21	↓	320	130	620125	8.6×10^{-2}	1.0	233.0	6.8×10^{-2}	ケース 1	—	233	1.0	1.81	5.3×10^{-4}	—	—	保水量φ
W444	↓	↓	0.0552	3.21	↓	360	130	620226	1.0×10^{-2}	787.1	62.0	2.2×10^{-5}	ケース 2	753.4	62	787.1	1.07	3.8×10^{-7}	0.80	—	閉塞停止
W445	↓	↓	0.0555	3.21	390	280	128	620308	1.0×10^{-2}	18.1	248.0	3.8×10^{-3}	ケース 1	—	248	18.1	0.50	7.7×10^{-6}	—	—	保水量φ
W446	↓	↓	0.0609	3.22	470	390	130	620311	1.5×10^{-3}	257.6	60.0	6.5×10^{-5}	ケース 3	254.7	87	257.6	3.22	3.0×10^{-6}	0.67	0.59	拡大
W447	9Cr-1MoNbV	疲労	0.0770	2.61	↓	360	↓	620426	2.0×10^{-4}	112.8	18.1	4.5×10^{-5}	ケース 3	108.3	90	112.8	2.61	6.0×10^{-6}	—	0.60	拡大
W448	↓	↓	0.0376	2.60	↓	350	↓	620428	2.0×10^{-6}	404.5	30.0	2.1×10^{-5}	ケース 3	392.1	90	404.5	2.60	2.0×10^{-6}	0.47	0.89	拡大
W449	↓	↓	0.0671	↓	↓	370	↓	620511	1.0×10^{-3}	19.6	14.6	2.1×10^{-4}	ケース 3	17.2	93	19.6	2.60	3.7×10^{-5}	0.20	0.40	拡大
W450	↓	↓	0.0448	↓	390	315	↓	620525	1.8×10^{-3}	130.5	87.0	1.8×10^{-4}	ケース 3	123.7	95	130.5	↓	6.0×10^{-6}	0.62	—	保水量φ
W451	↓	↓	0.0924	↓	470	380	↓	620603	4.0×10^{-3}	30.5	25.3	2.3×10^{-4}	ケース 3	26.5	91	30.5	2.60	2.4×10^{-5}	—	1.45	拡大
W452	↓	↓	0.0256	↓	470	345	↓	620608	6.0×10^{-4}	272.3	4.6	5.0×10^{-6}	ケース 3	268.7	102	272.3	2.60	3.0×10^{-6}	—	0.96	拡大
W453	↓	↓	0.0829	2.61	390	230	↓	620615	6.6×10^{-3}	45.3	96.5	5.9×10^{-4}	ケース 3	32.1	148	45.3	2.61	1.6×10^{-5}	—	0.89	拡大
W454	↓	↓	0.0686	2.59	390	300	↓	620628	1.4×10^{-2}	2039.9	36.5	5.0×10^{-6}	ケース 2	2030.0	36.5	2039.9	1.30	1.8×10^{-7}	—	—	閉塞停止

* (オ) は温度サイクルのことである。

Table 3.1(2/2) 試験条件と試験結果

材 料	ノズル 形状	試験Na 温度 (℃)	試験ノズル孔径 ($\mu\text{m}\phi$)	試 験 回 数	合 計
Mod. 9Cr-1Mo鋼	疲労型	470	100 以上	1	11
			100~80	1	
			80~60	3	
			60~40	3	
			40 以下	3	
	人工型	390	100~80	1	10
			80~60	5	
			60~40	3	
			40 以下	1	
	人工型	470	100~80	3	6
80~60			1		
390		60~40	2		
		40 以下	1		
9Cr-2Mo鋼	疲労型	470	100 以上	1	10
			100~80	1	
			80~60	3	
			60~40	3	
			40 以下	2	
	疲労型	390	100 以上	1	6
			80~60	2	
			60~40	2	
9Cr-1Mo-NbV鋼	疲労型	470	100~80	1	5
			80~60	2	
			60~40	0	
			40 以下	2	
	疲労型	390	100~80	1	3
			80~60	1	
			60~40	1	

合計 54 ケース

Table. 3.2 微小リーク試験内容

試験No		W 4 0 4	W 4 0 6	W 4 0 7	W 4 0 8	W 4 1 4	W 4 2 2	W 4 2 6	W 4 3 1	W 4 3 2	W 4 3 3
項目											
初期リーク孔径 ($\mu\text{m}\phi$)		76.6	55.3	75.3	68.0	98.9	129.8	55.1	77.3	27.8	47.3
ナトリウム温度 ($^{\circ}\text{C}$)		470	470	390	390	390	470	390	390	470	390
初期水リーク率 (g/sec)		0.004	0.04	0.094	0.019	0.1	0.002	0.0044	0.005	0.001	4.0E-6
拡大前注水時間 (hour)		1.8	3.1	0.5	2.3	2.0	63.7	12.3	6.4	178.8	102.9
拡大前注水量 (cc)		6.2	57.3	180.0	74.4	267.9	5.2	93.0	139.0	22.3	92.0
拡大前平均水リーク率 (g/sec)		9.0E-4	5.2E-3	0.091	8.9E-3	0.037	2.3E-5	2.1E-3	6.1E-3	3.5E-5	2.5E-4
拡大後注水時間 (sec)		72.0	28.4	—	100.9	253.8	34.0	—	—	13.0	—
拡大後注水量 (cc)		84.8	92.7	—	90.6	71.1	79.8	—	—	67.7	—
拡大後平均水リーク率 (g/sec)		1.18	3.26	—	0.90	0.28	2.35	—	—	5.2	—
ターゲット管 拡大状況 (mm)	周方向	12.0	9.0	—	12.5	6.0	7.0	—	—	6.0	—
	軸方向	7.0	16.0	—	3.0	9.0	10.0	—	—	11.0	—
	深さ	1.03	1.26	—	0.48	0.31	1.99	—	—	1.02	—
ウェステージ率 ①/②(mm/sec)		0.014	0.044	—	4.8E-4	1.2E-3	0.06	—	—	0.077	—
その他				保水量0 で終了				保水量0 で終了	保水量0 で終了		保水量0 で終了

Table. 6.1 微小リーク・ターゲット・ウェステージ試験経過と結果

型 式	一 体 貫 流 型
交 換 熱 量	650 MW _t
Na 入 口 温 度	470 °C
Na 出 口 温 度	310 °C
Na 流 量	1.14 × 10 ⁷ kg / h
給 水 入 口 温 度	210 °C
蒸 気 出 口 温 度	453 °C
給 水 入 口 圧 力*	117 kg / cm ² g
蒸 気 出 口 圧 力	107 kg / cm ² g
給 水 流 量	1.00 × 10 ⁶ kg / h
伝 熱 管 外 径	31.8 mm
肉 厚	2.6 mm
材 質	Mod. 9 Cr - 1Mo
本 数	451
層 数	22
配 列 ピ ッ チ	軸 方 向 48mm 径 方 向 50mm
傾 斜 角 度	8.7°
内 部 シ ュ ラ ウ ド 外 径	950
ヘ リ カ ル コ イ ル 径 (最 内 層)	1000
ヘ リ カ ル コ イ ル 径 (最 外 層)	3100
外 部 シ ュ ラ ウ ド 内 径	3150
有 効 伝 熱 高 さ m	10.22
有 効 伝 熱 管 平 均 長 さ m	67.69
伝 熱 面 積 m ²	3048

} 5 %
マージン
含む

* オリフィス圧類考慮なし

Table. 7.1 S G 主要目

							00000100
3	3						00000200
1	0						00000300
1							00000400
		1					00000500
1	27	20					00000600
0	1	1					00000700
48	0	1	1				00000800
0	0	1	1				00000900
1	6	17	25	33			00001000
CASE-CT-10 9CR STEEL SUPER MONJU SG (100%LOAD-UP LEAK),CV							00001100
11400.		10.		0.0001			00001200
60000.							00001300
10.	10.						00001400
0.7	120.						00001500
470.	310.	470.					00001600
0.							00001700
0.							00001800
0.							00001900
0.0001		3048.			2.	-1200002000	00002000
0.							00002100
0.478		2.578	1.55		1.8		00002200
1.376		1.376	2.6				00002300
2.784		2.	470.		470.		00002400
0.0001		50.000					00002500
0.		0.					00002600
0.							00002700
10.		10.					00002800
10.		10.					00002900
55.		55.					00003000
35.	35.	35.	35.	35.	35.		00003100
0.							00003200
25.	25.						00003300
1.	1.		1.5				00003400
16.2	1.	1000.	0.	0.118	0.5		00003500
0.	0.	0.	0.	0.	0.		00003600
0.		0.	9.9	26.3	9.9		00003700
0.	9.39	3.77	2.18				00003800
94.5	46.6	0.	126.9				00003900
0.	0.	0.		0.	10.4		00004000
0.2			0.		7.43		00004100
10.	9.	8.	7.	6.	5.5		00004200
5.0	4.5	4.0	3.7	3.3	3.0		00004300
2.7	2.5	2.3	2.2	2.1	2.0		00004400
1.8	1.7	1.5	1.4	1.3	1.2		00004500
1.1	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6		00004600
0.50	0.40	0.30	0.20	0.10	0.08		00004700
0.07	0.05	0.030	0.020	0.017	0.013		00004800
0.010	0.007	0.005	0.003	0.002	0.001		00004900
0.							00005000
1.	1.	1.	1.	1.	1.		00005100
1.	1.	1.	1.	1.	1.		00005200
1.	1.	1.	1.	1.	1.		00005300
1.	1.	1.	1.	1.	1.		00005400
1.	1.	1.	1.	1.	1.		00005500
1.	1.	1.	1.	1.	1.		00005600
1.	1.	1.	1.	1.	1.		00005700
1.	1.	1.	1.	1.	1.		00005800
							00005900
5.01							00006000
0.	20.	0.01	20.	0.01001	5.48		00006100
0.1	5.48	0.1001	2.	100.	2.		00006200
							00006300
							00006400
							00006500
							00006600
							00006700
0.0001	8.0000	1.55	1.8				00006800
0.0	0.75	100.	0.75				00006900
							00007000
							00007100
							00007200
							00007300
							00007400
							00007500
							00007600

Table. 7.2 SWAC10 Input Data List

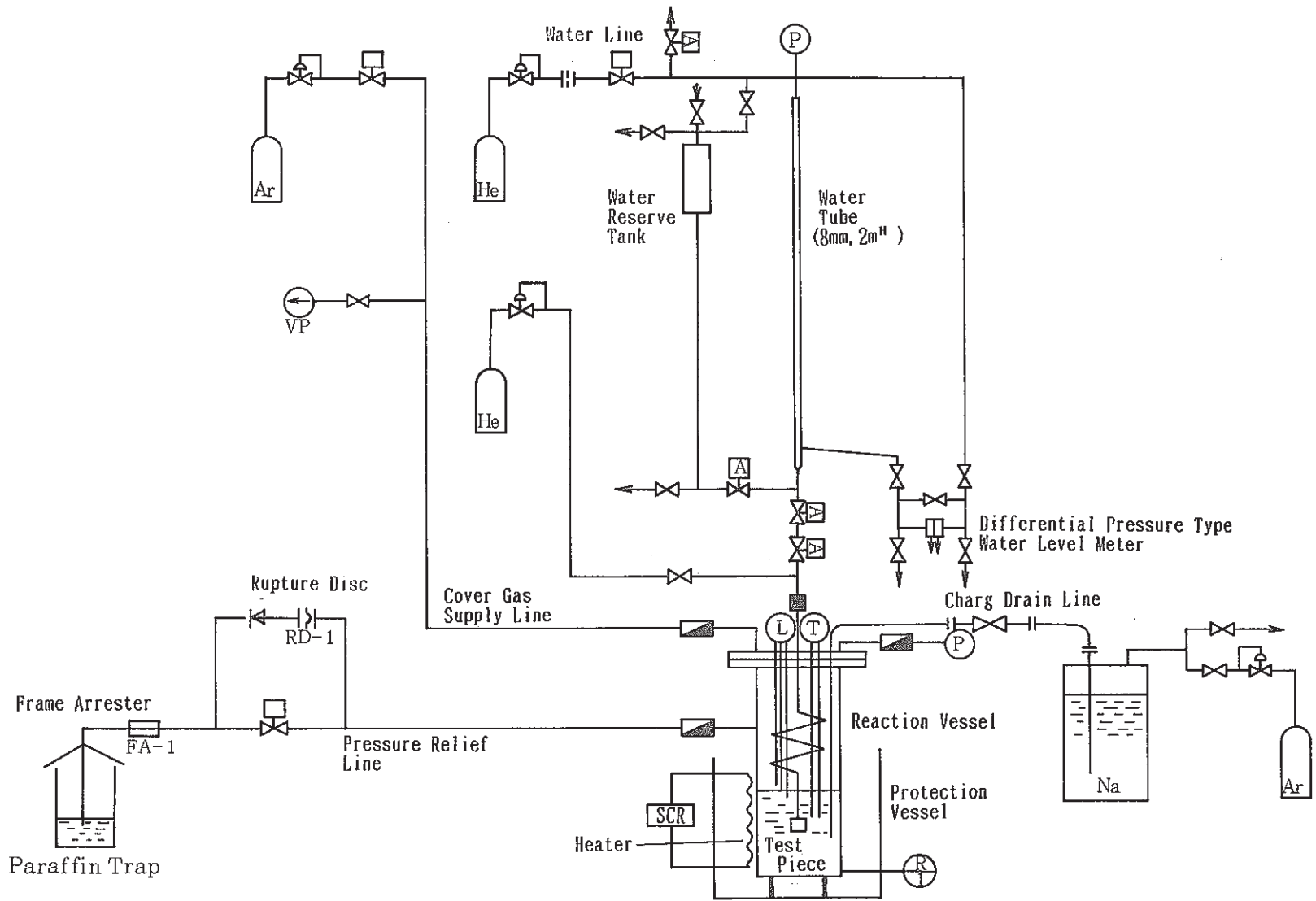


Fig. 2.1 Micro-Leak Sodium Water Reaction Test Rig (SWAT-4)

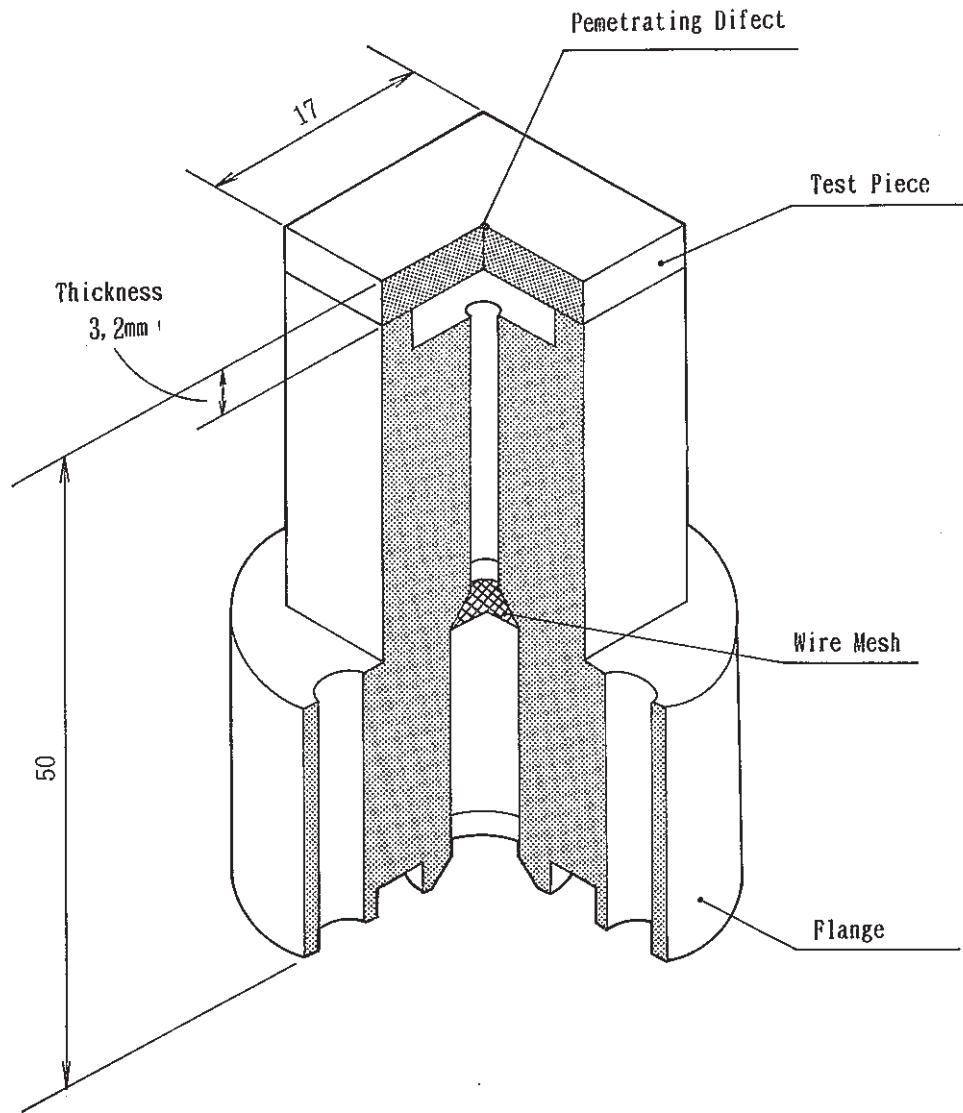


Fig. 2.2 Structure of Slit Type Nozzle

Unit:mm

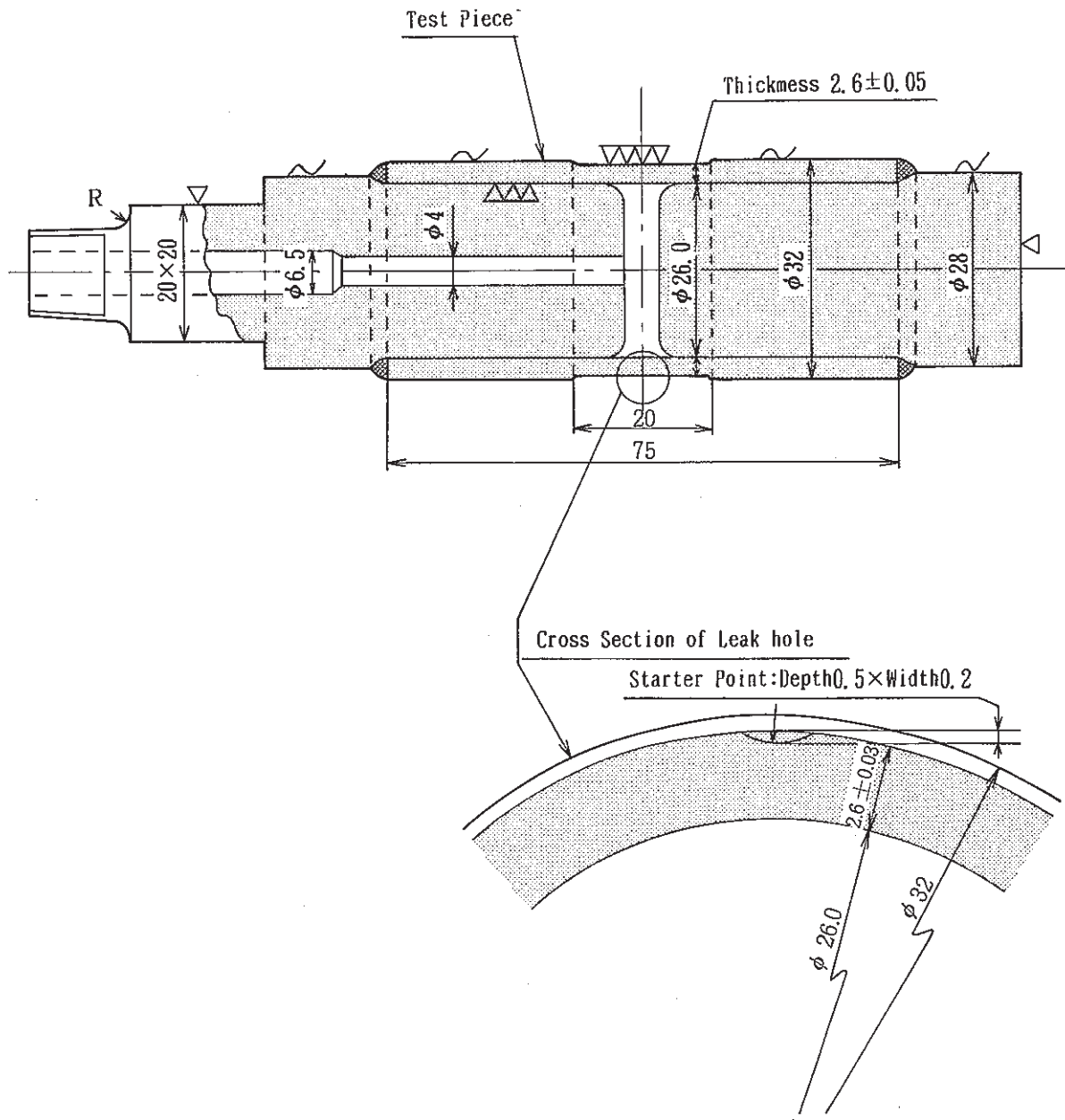
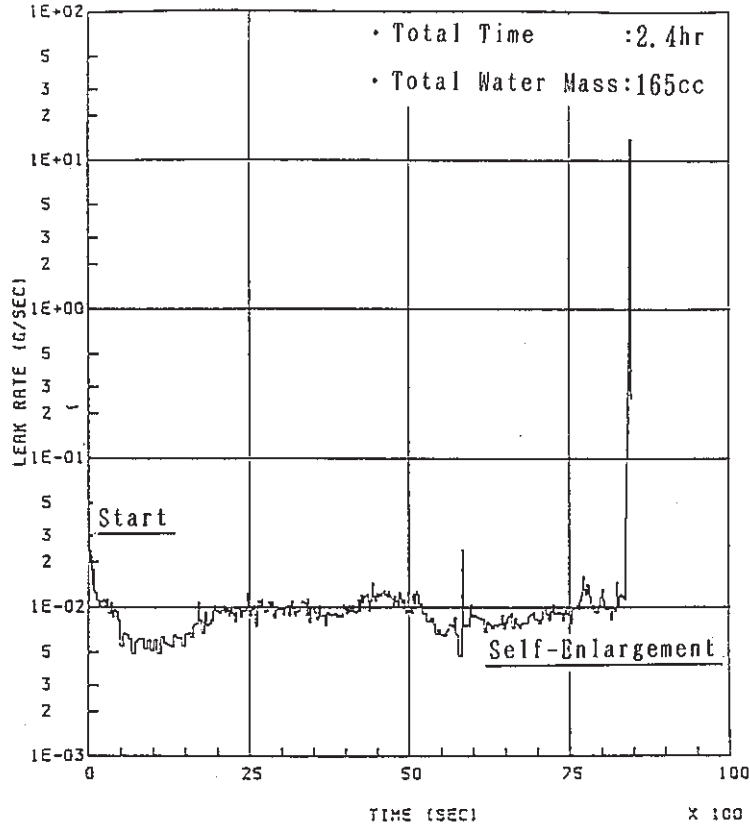
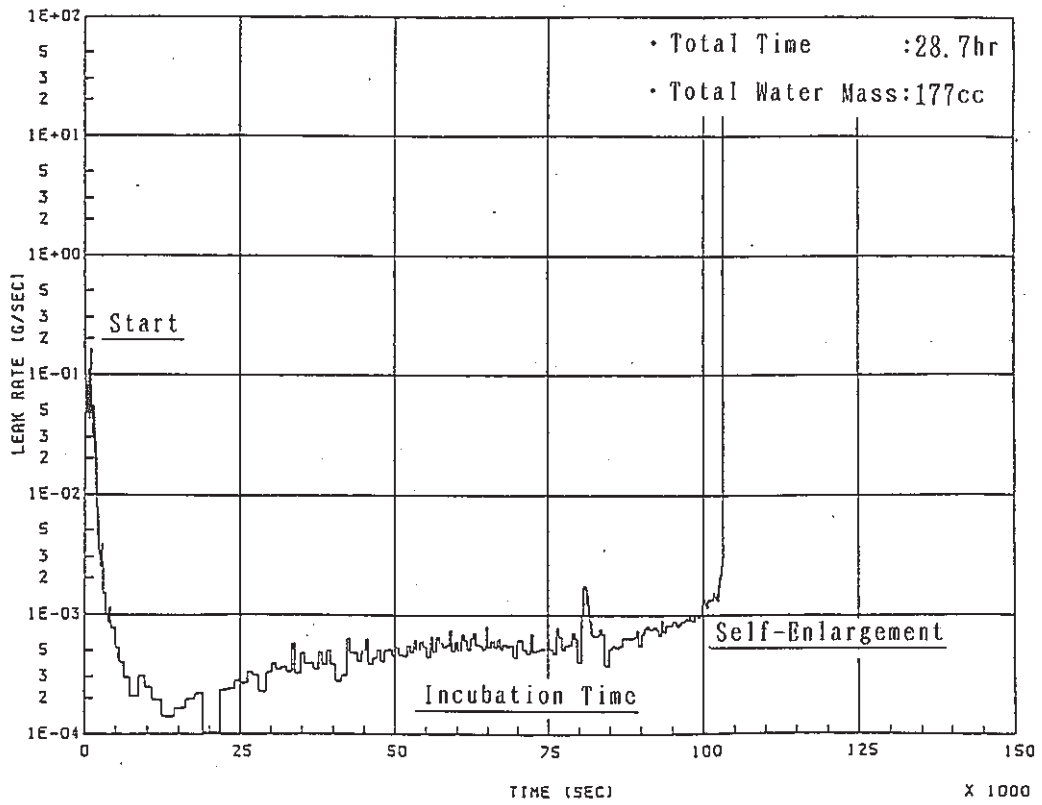


Fig. 2.3 Structure of Fatigue Type Nozzle

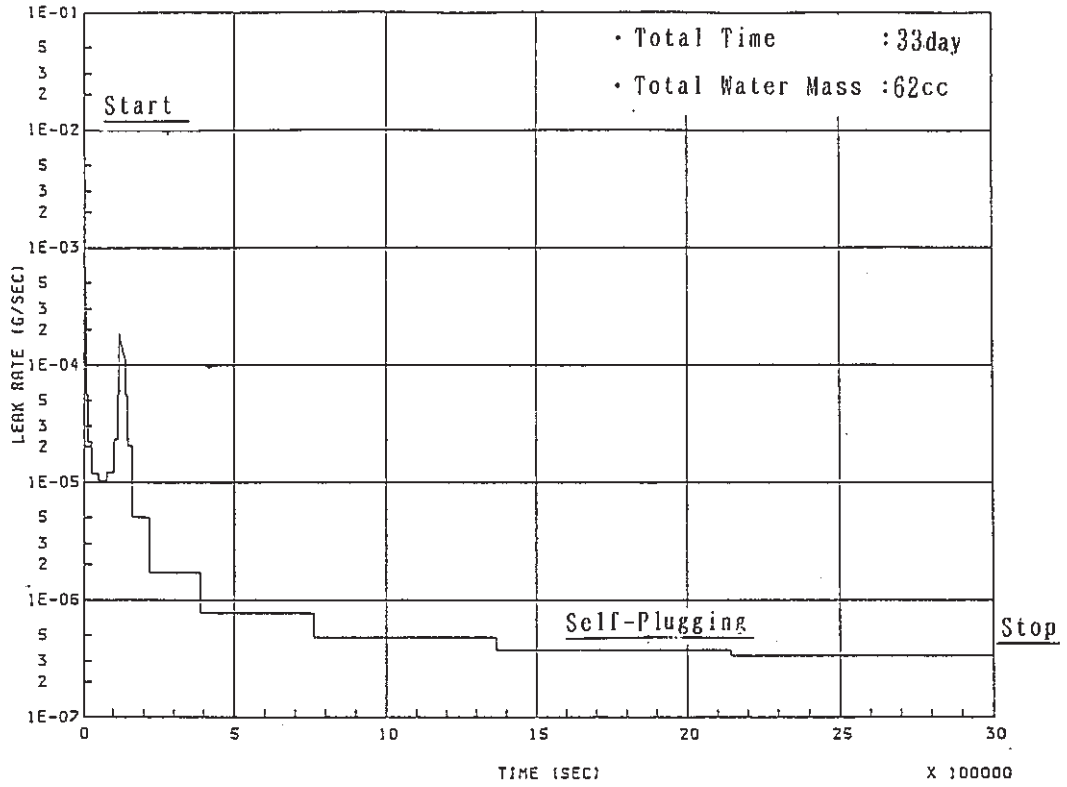


(a) Test No. W408 (Case-1)

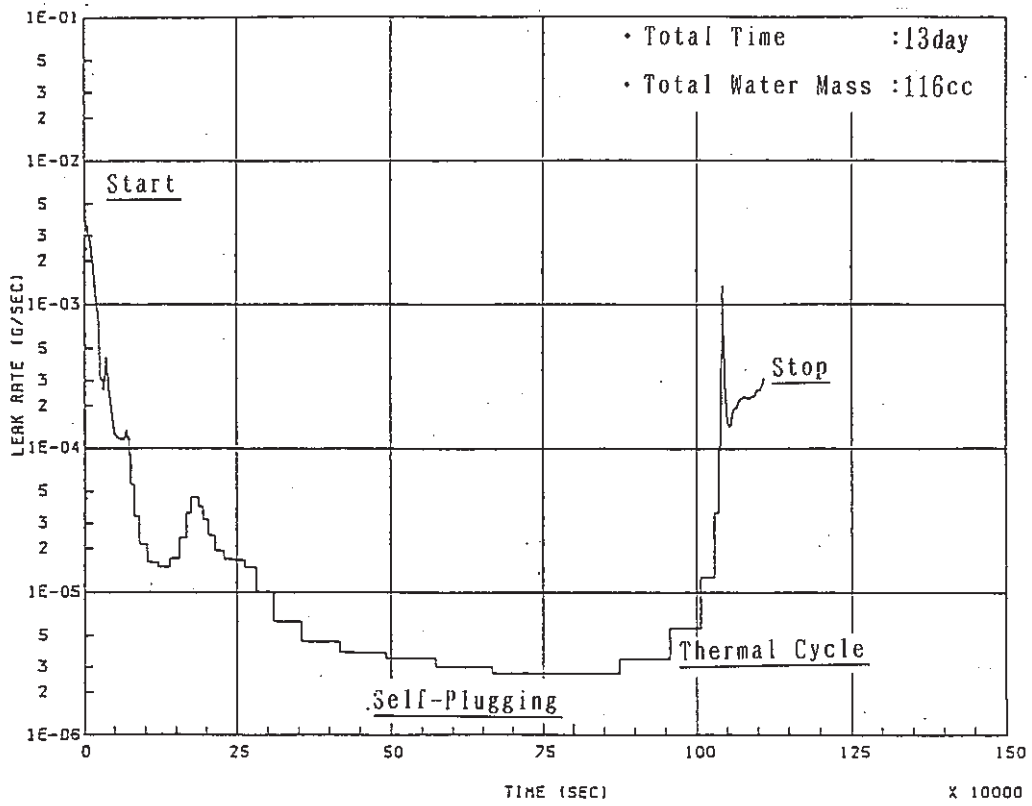


(b) Test No. W421 (Case-3)

Fig. 3.1 Micro-Leak Behaviors (Case-1,3)



(a) Test No. W444 (Case-2)



(b) Test No. W444 (Case-2)

Fig. 3.2 Micro-Leak Behaviors (Case-2)

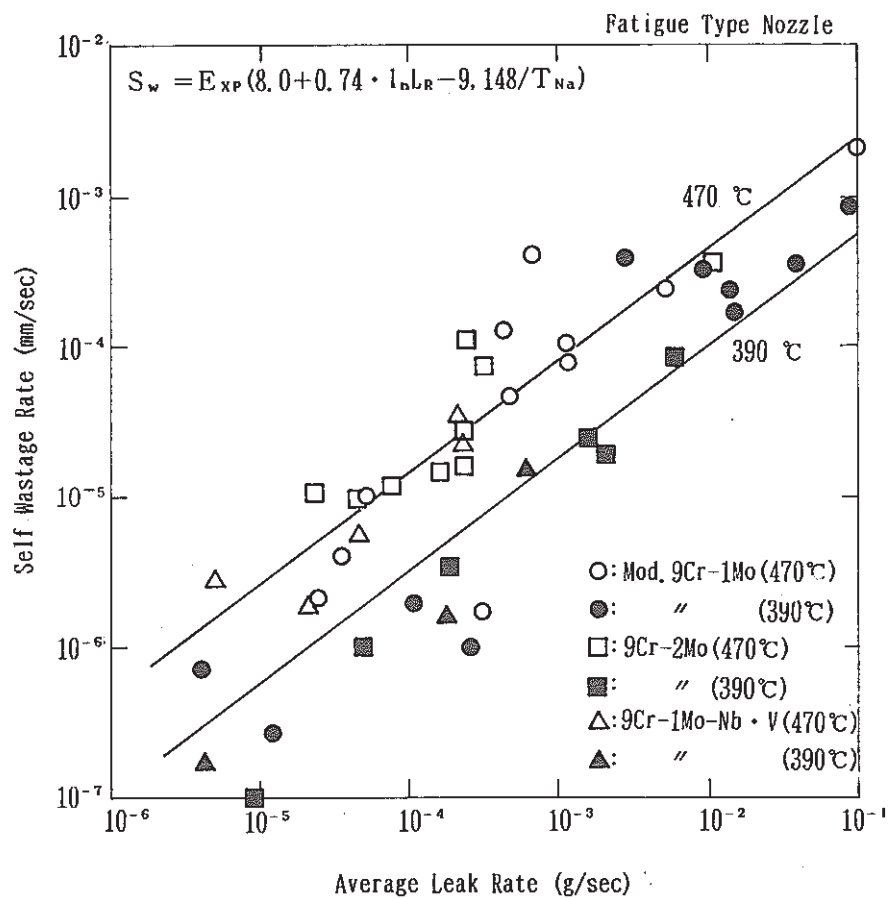


Fig. 3.3 Self-Wastage Rates on the Mod.9Cr-1Mo Steel , the 9Cr-2Mo Steel and the 9Cr-1Mo-Nb-V Steel of Fatigue Type Nozzle

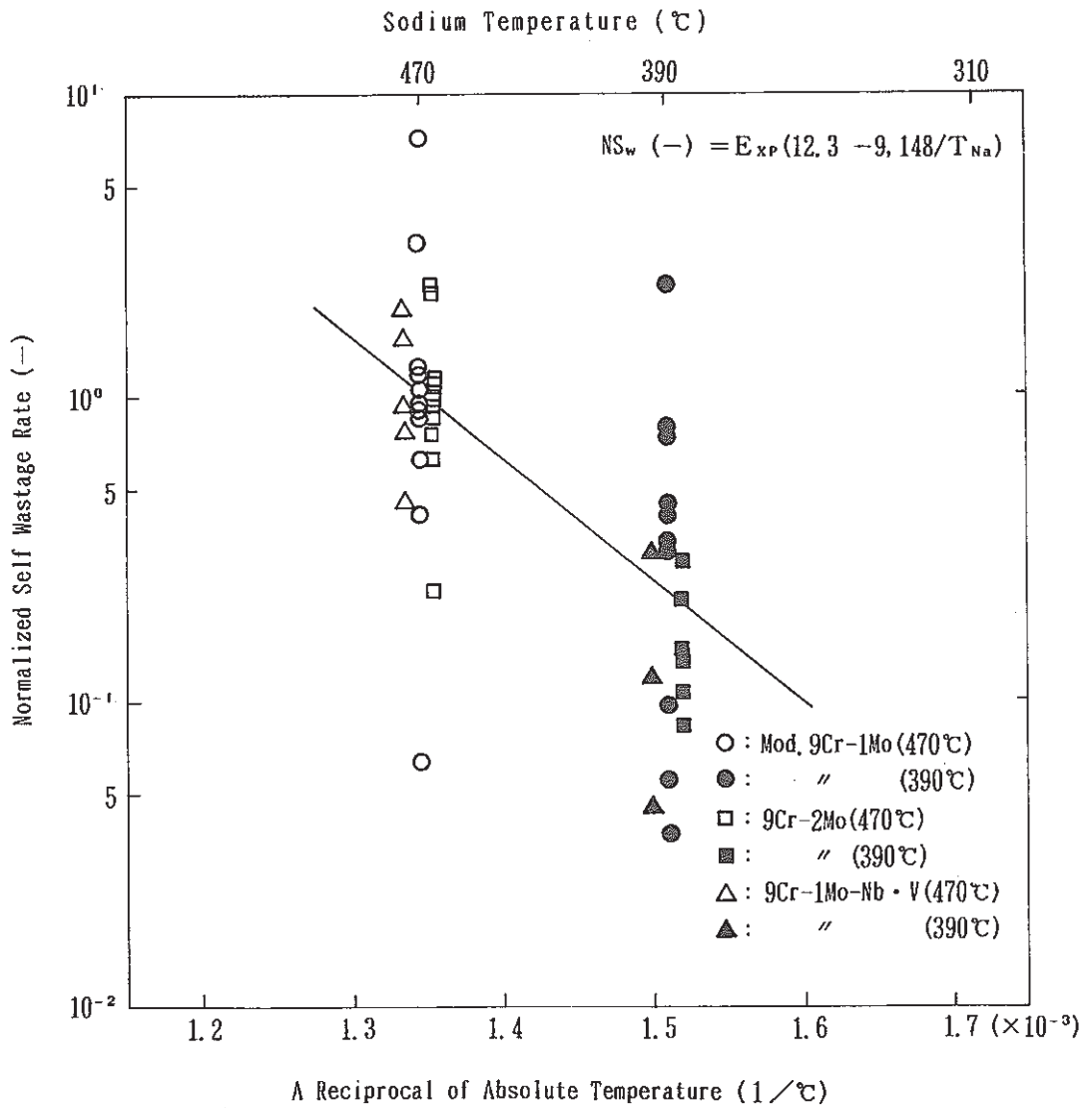


Fig. 3.4 A Reciprocal of Absolute Temperature and Self-Wastage Rates on the Mod. 9Cr-1Mo Steel, the 9Cr-2Mo Steel and the 9Cr-1Mo-Nb-V Steel of Fatigue Type Nozzle

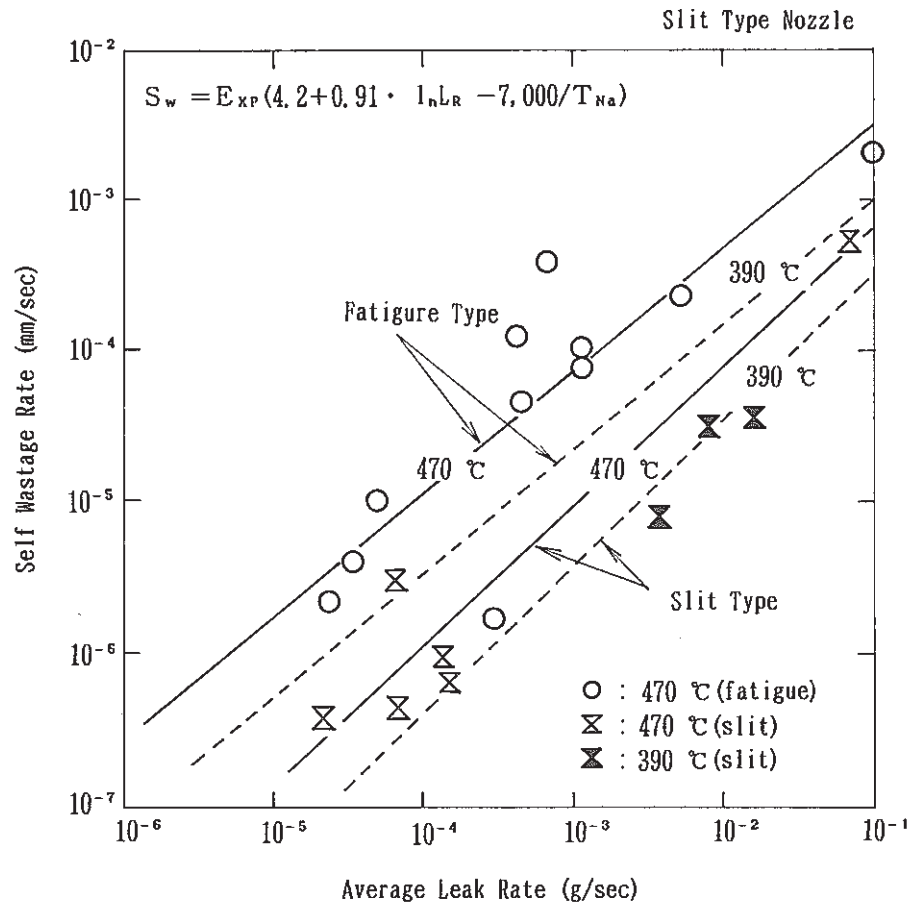


Fig. 3.5 Comparison between Fatigue Type Nozzles and Slit Type Nozzles on the Mod.9Cr-1Mo Steel

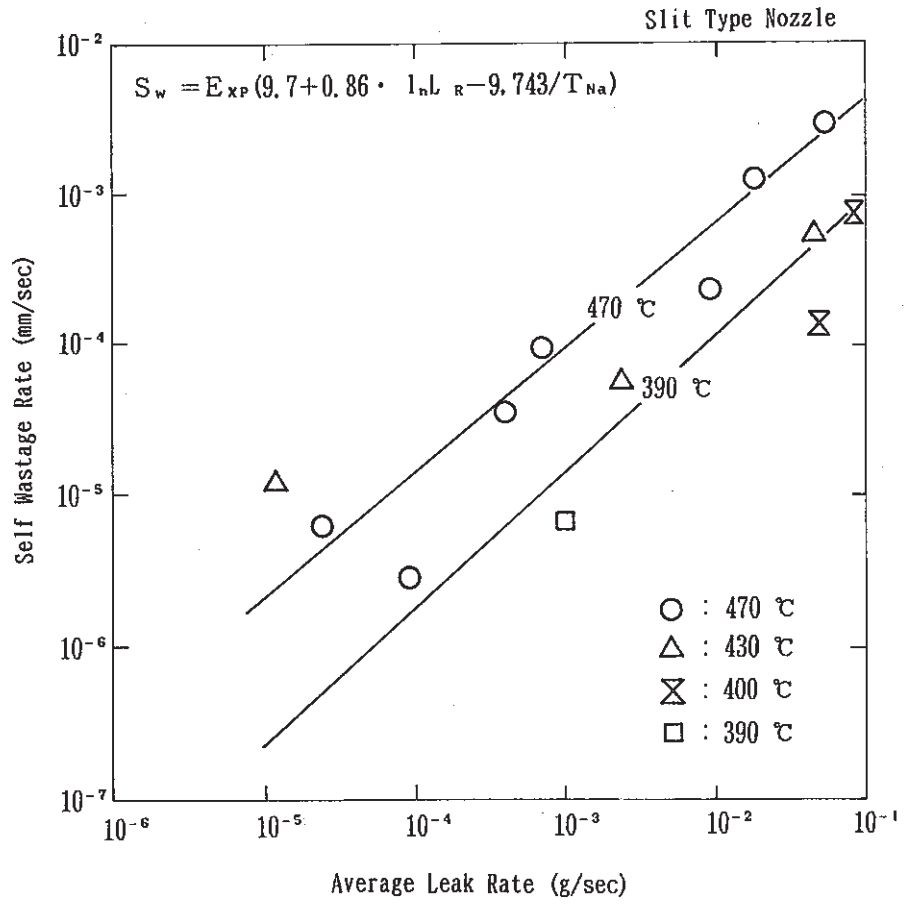


Fig. 3.6 Self-Wastage Rates on the 2¼Cr-1Mo Steel of Slit Type Nozzle

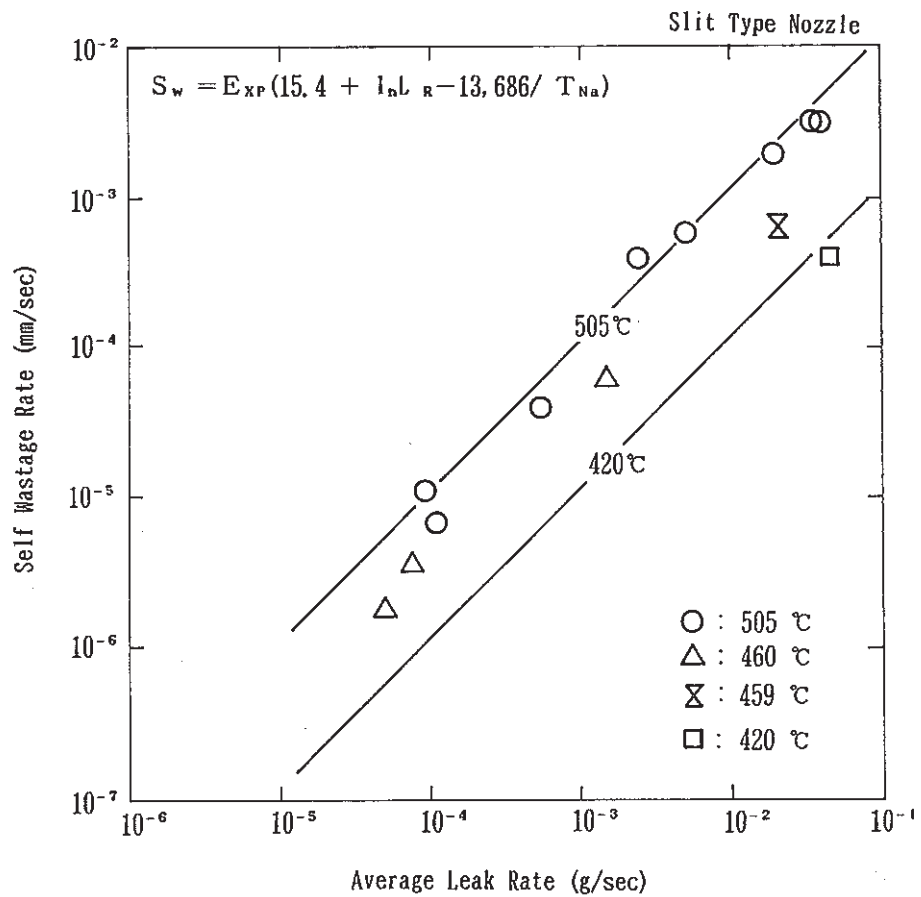


Fig. 3.7 Self-Wastage Rates on the SUS321 Stainless Steels of Slit Type Nozzle

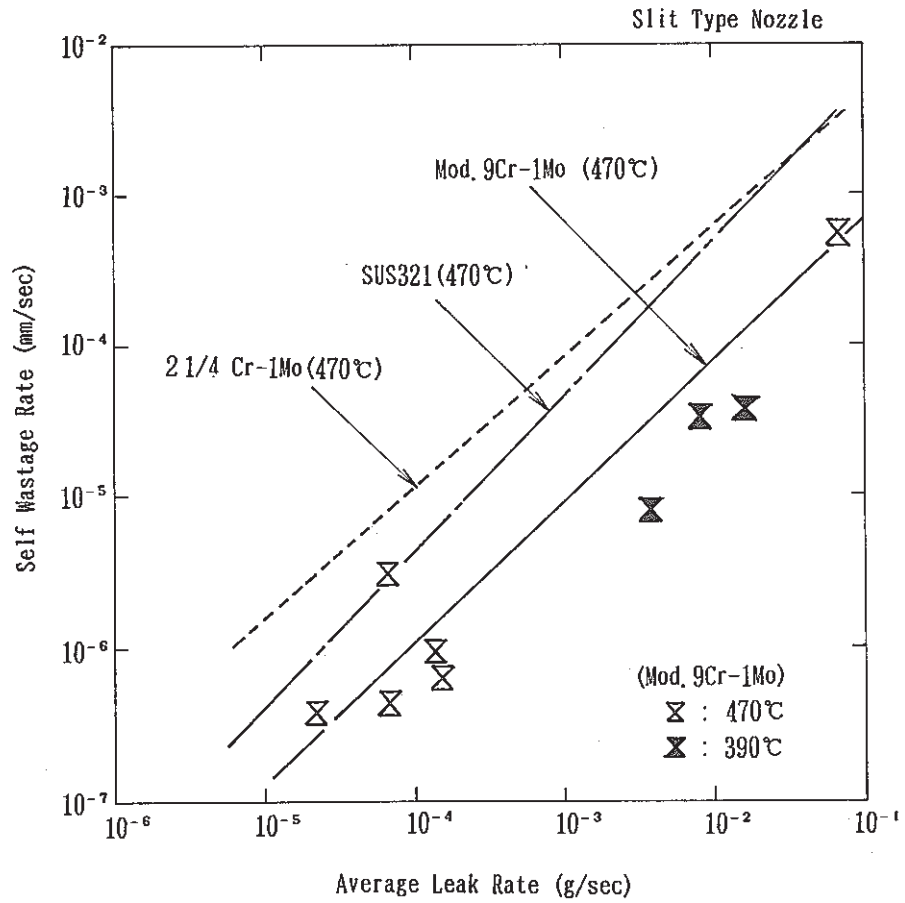


Fig. 3.8 Comparison between the Mod. 9Cr-1Mo Steel , the 2 1/4 Cr-1Mo Steel and the SUS321 Stainless Steel on Slit Type Nozzle

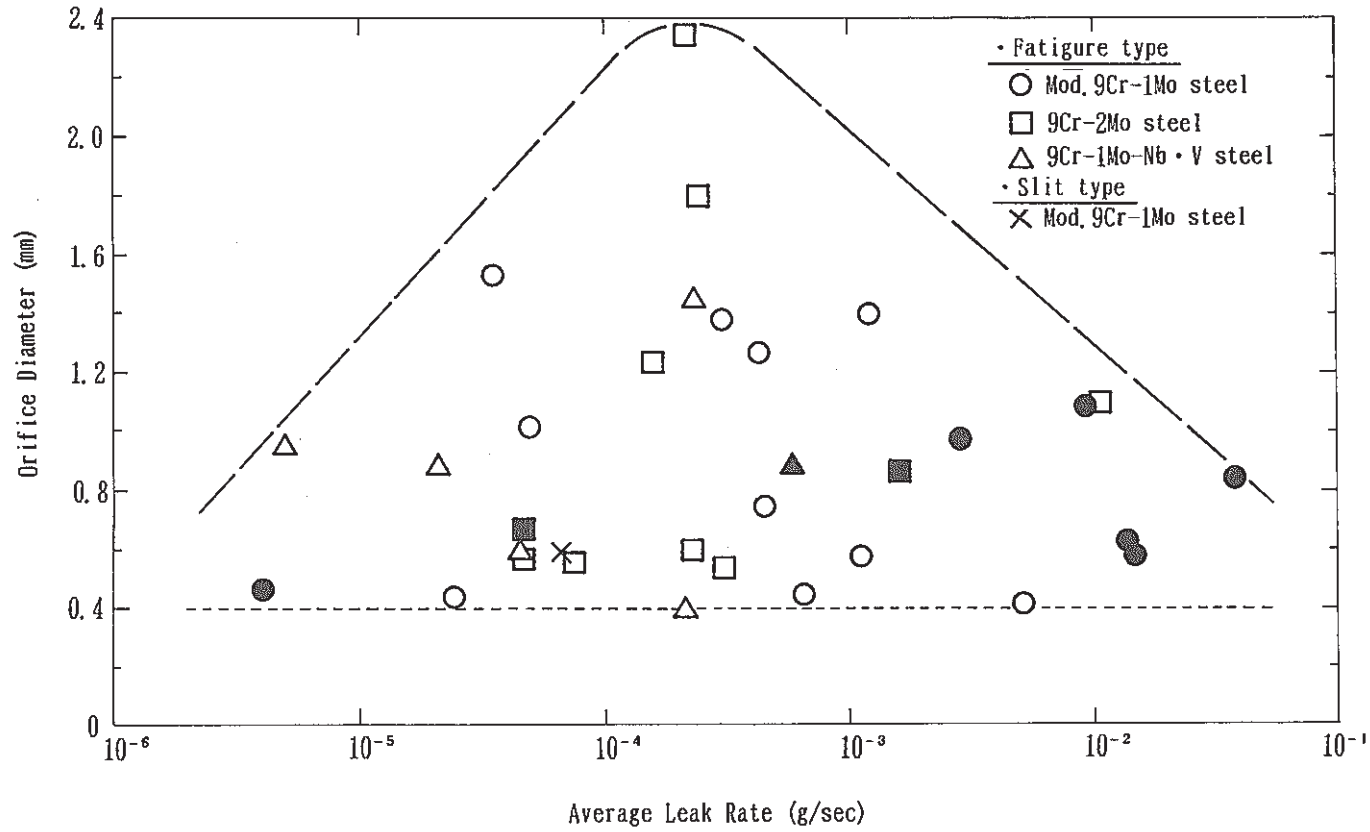


Fig. 4.1 Orifice Diameters of the Self-Enlarged Holes

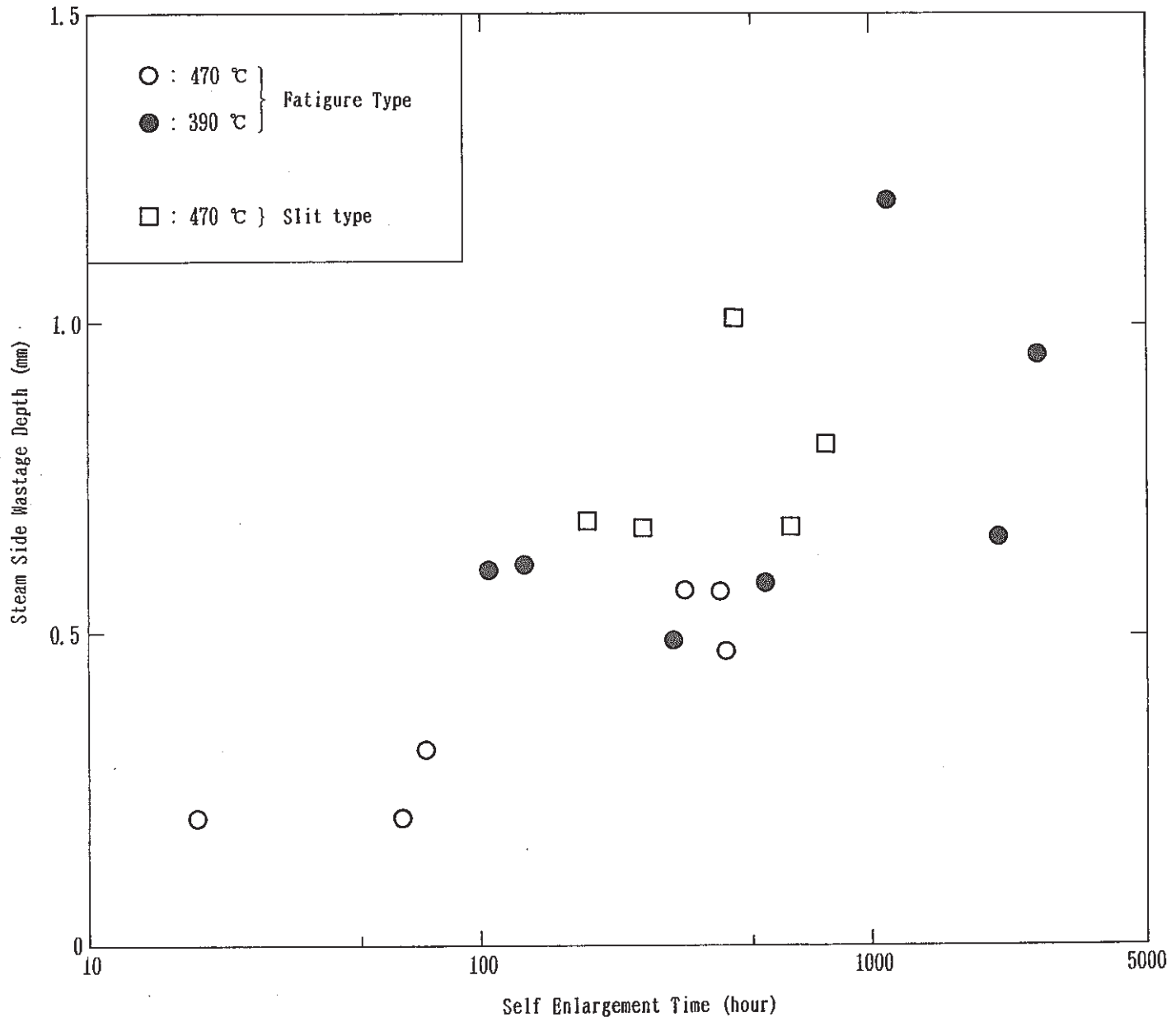


Fig. 4.4 Self-Wastage Depth of Steam Side

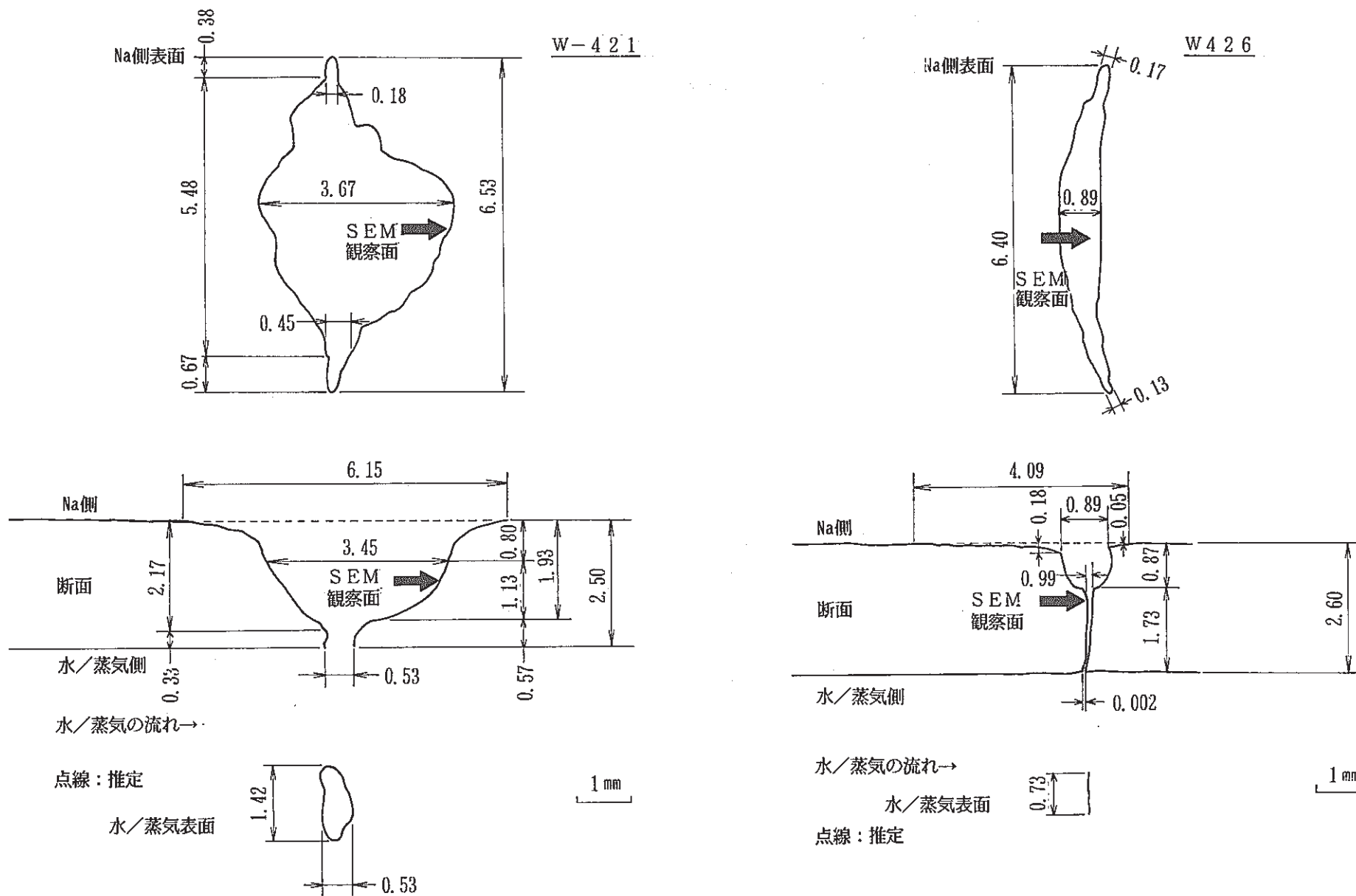


Fig. 4.5 リーク孔のトレースとSEM観察位置 (W421, 426)

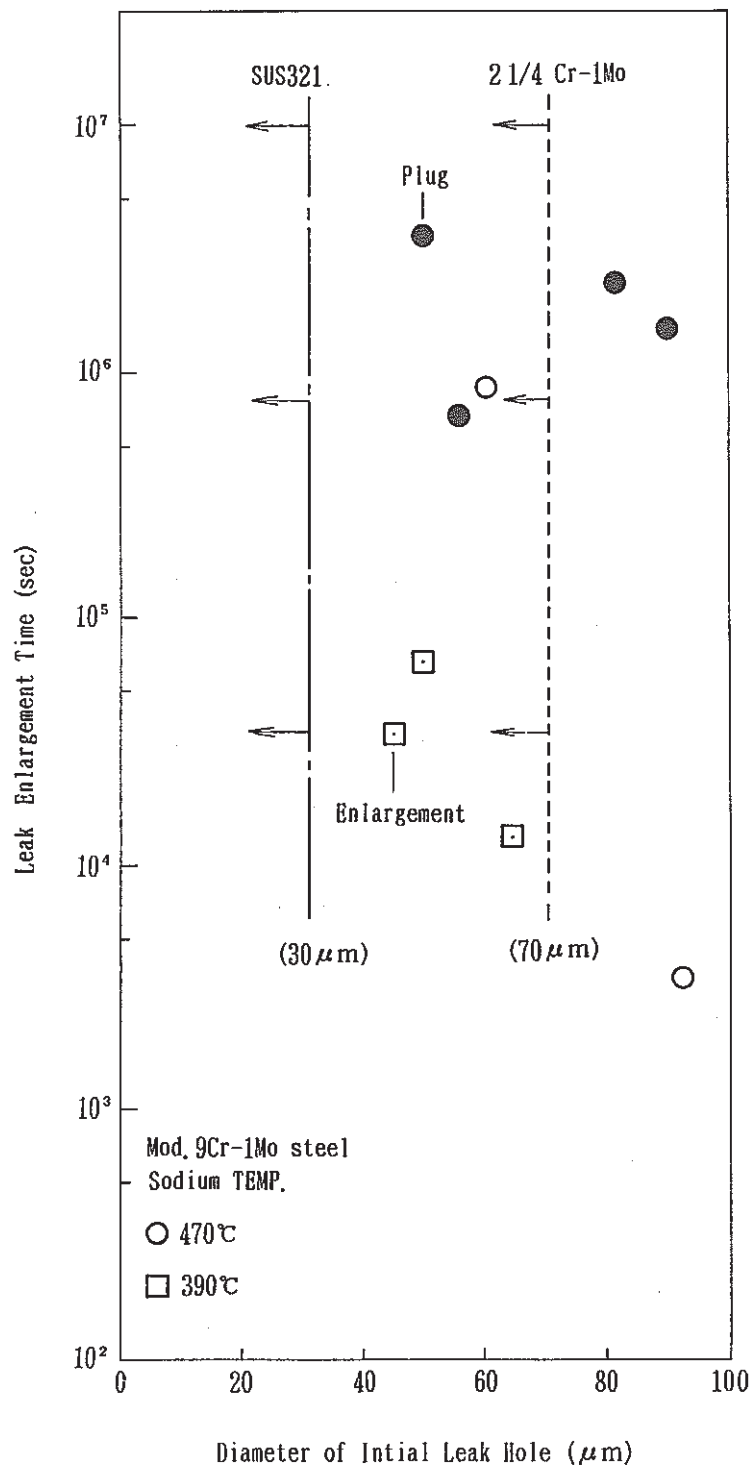


Fig. 5.1 Leak Enlargement Time on the Mod. 9Cr-1Mo Steel Slit Type Nozzle

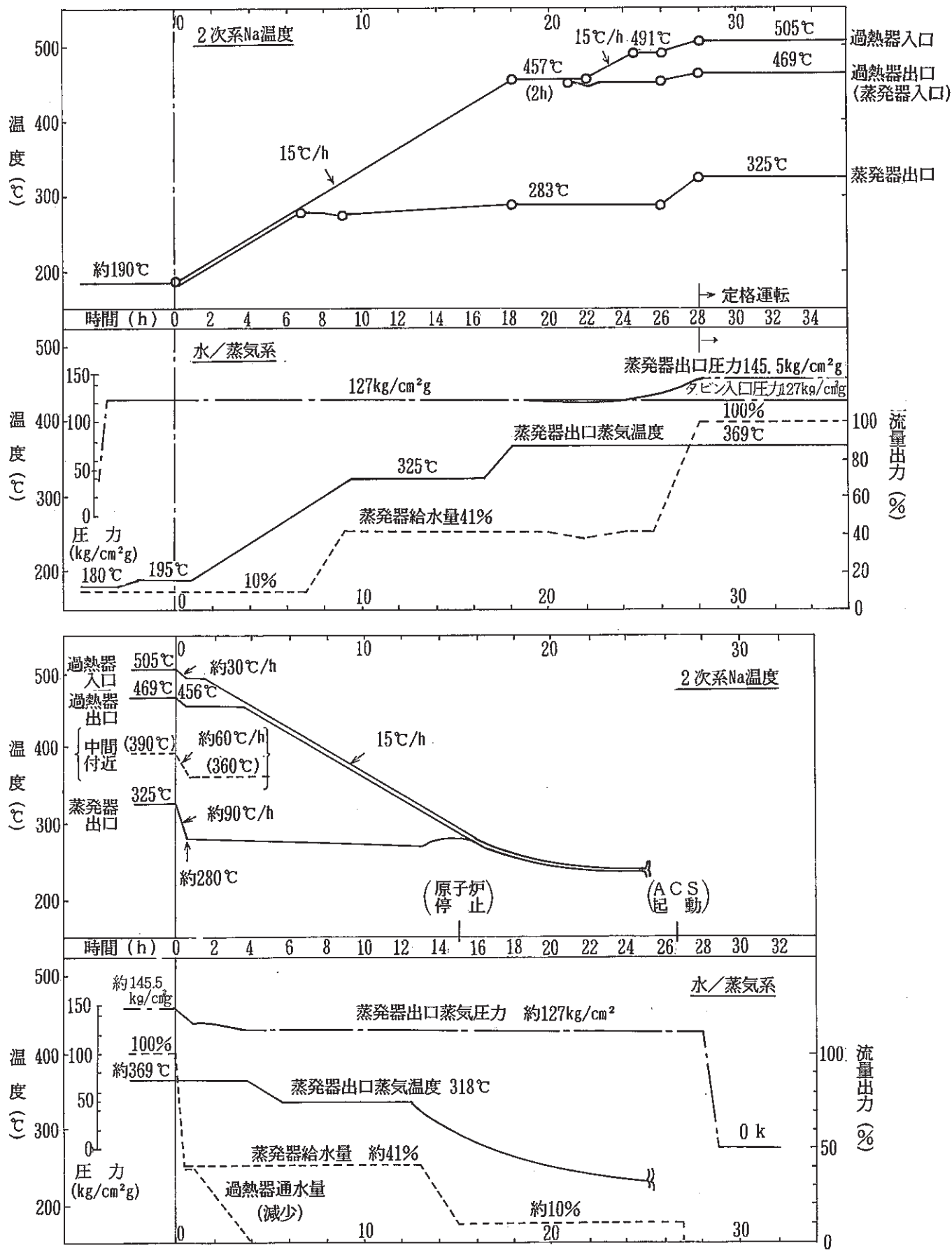


Fig. 5.2 「もんじゅ」SGの起動・停止曲線

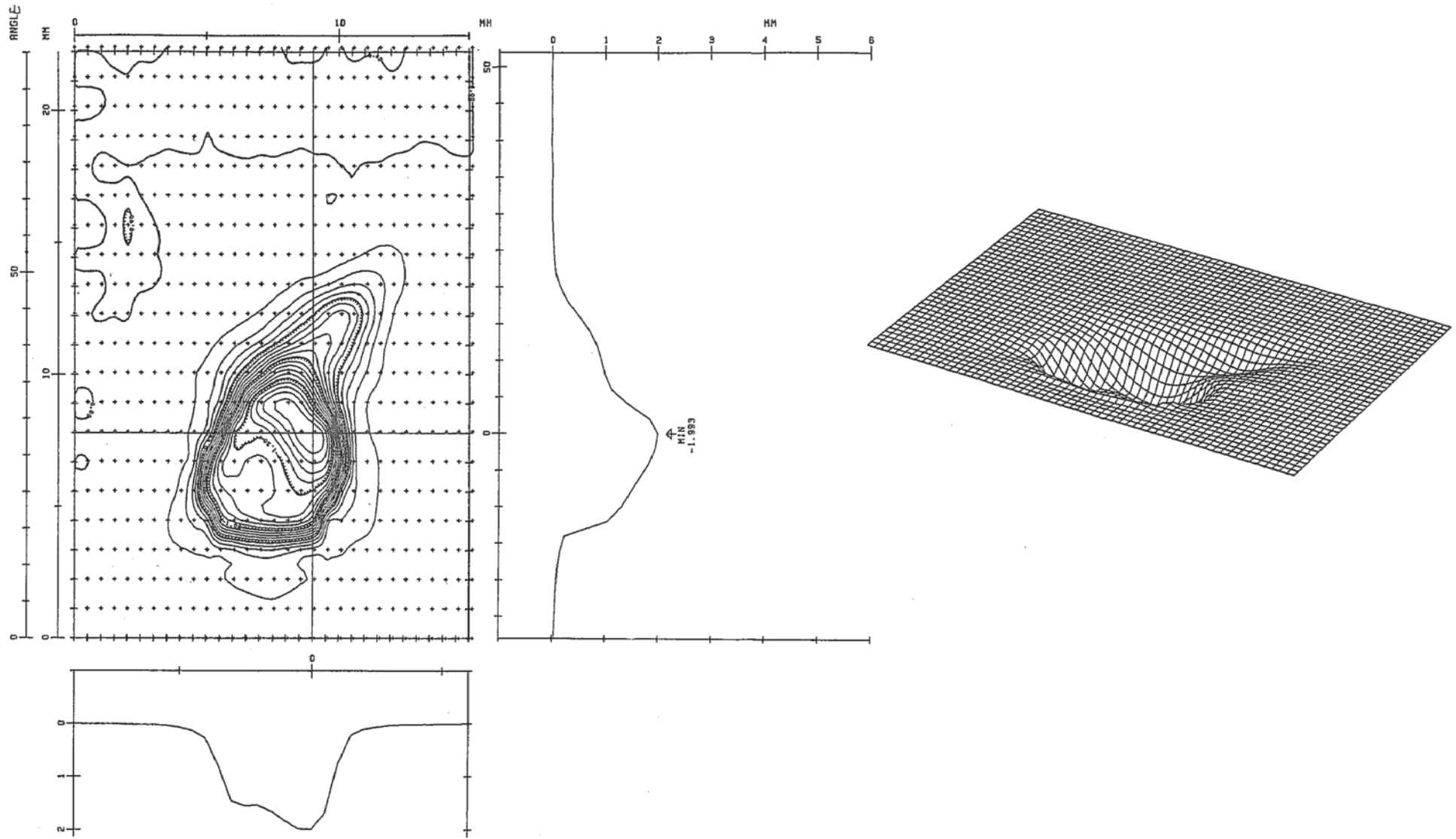


Fig. 6.1 Wastage Map of Test No. W 4 3 2

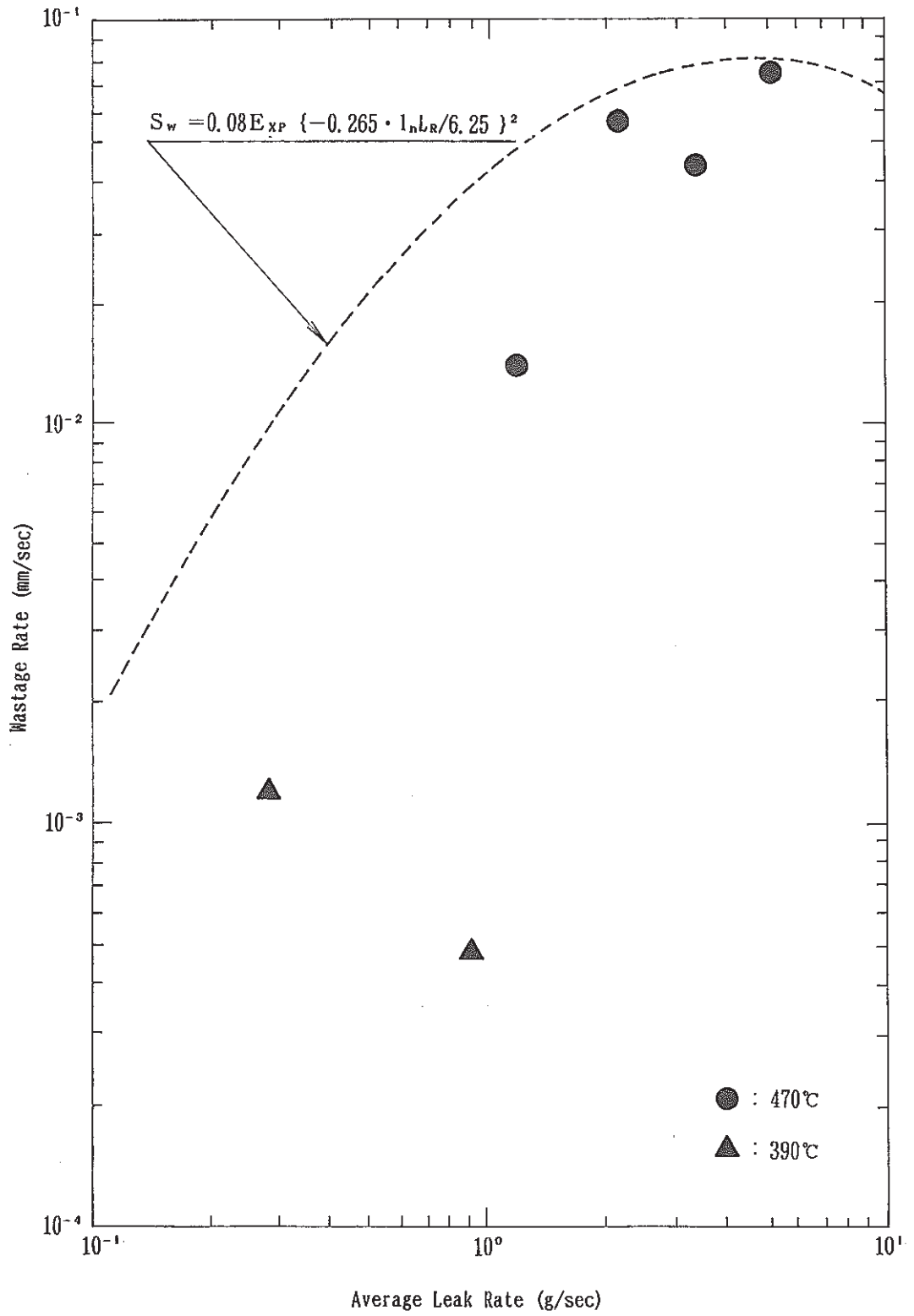


Fig. 6.2 Target Wastage Rates on the Mod. 9Cr-1Mo Steel by Micro-Leak (Comparison between the SWAT-2 and SWAT-4)

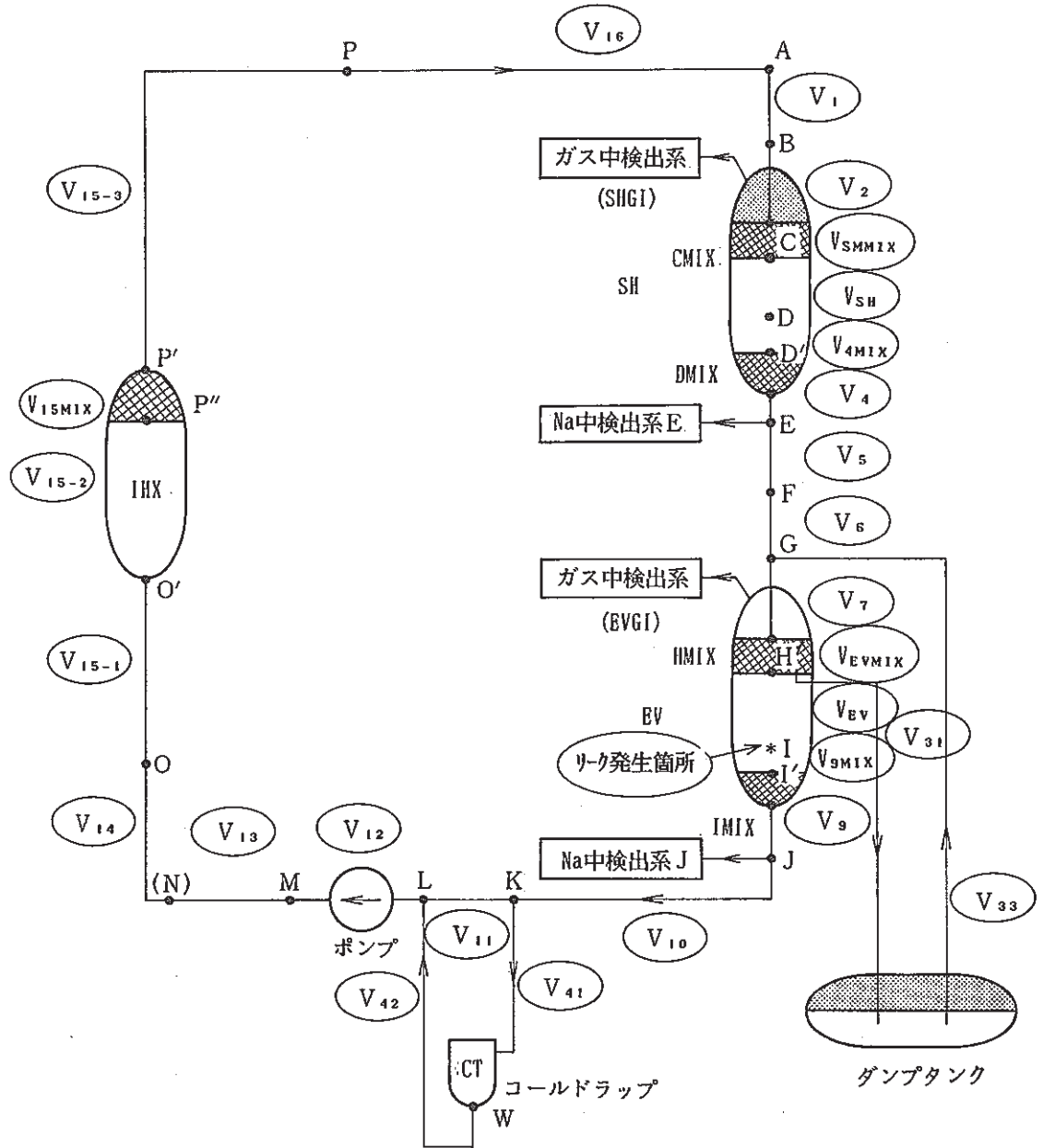


Fig. 7.1 SWAC10 計算モデル

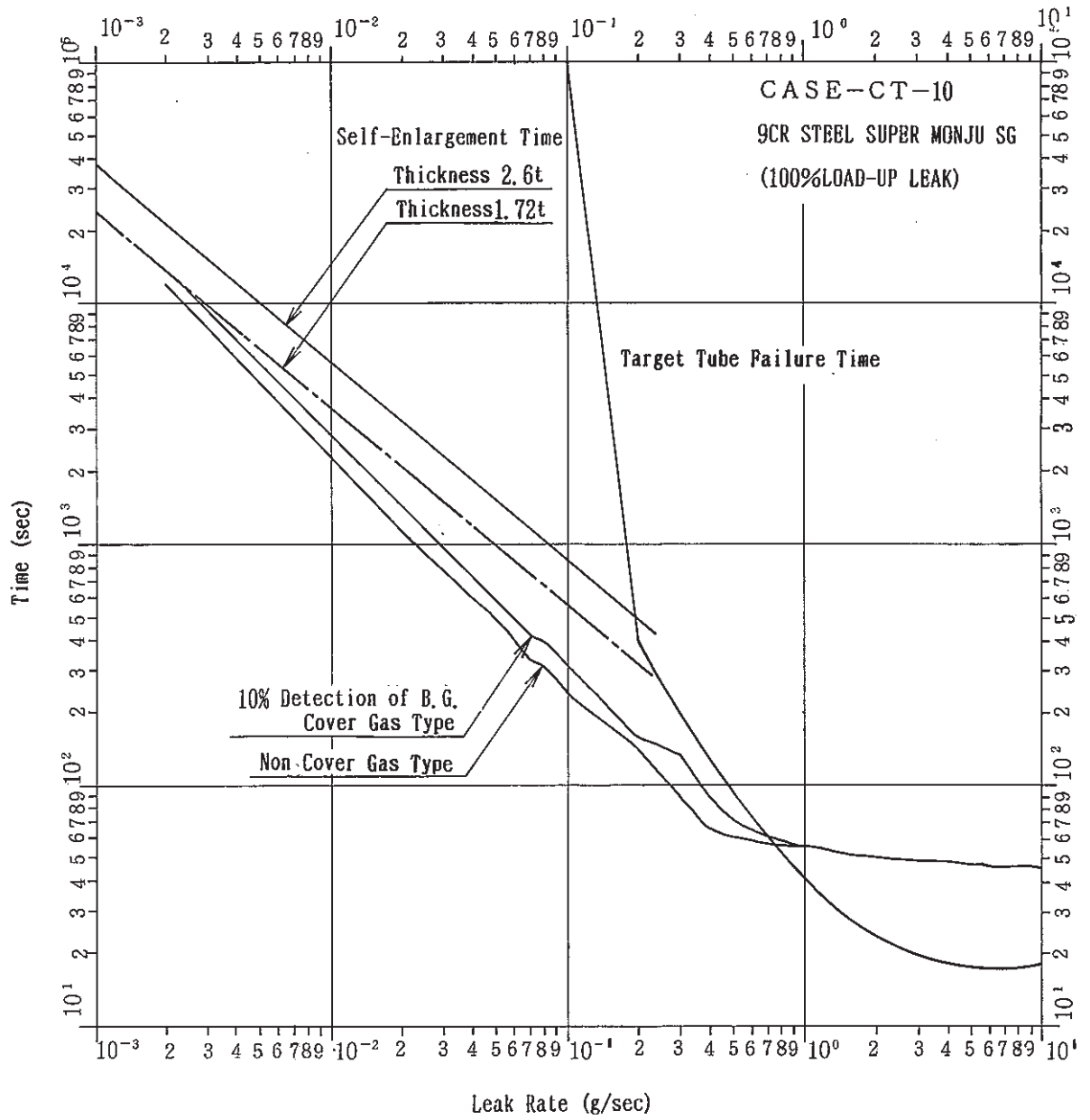
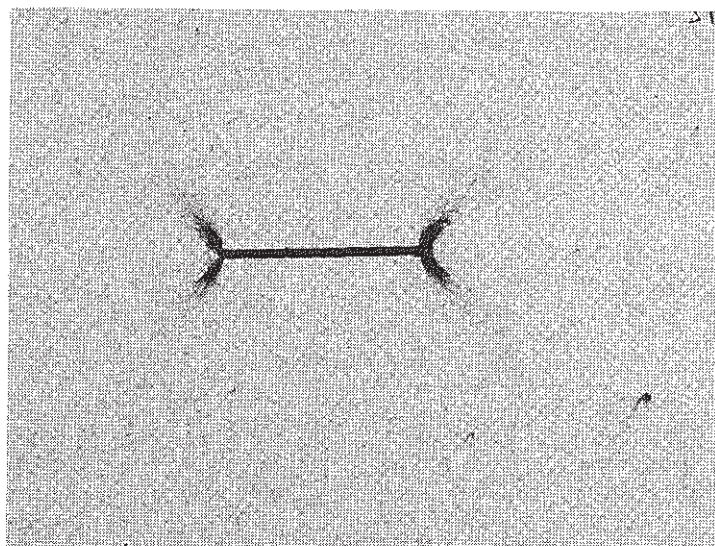
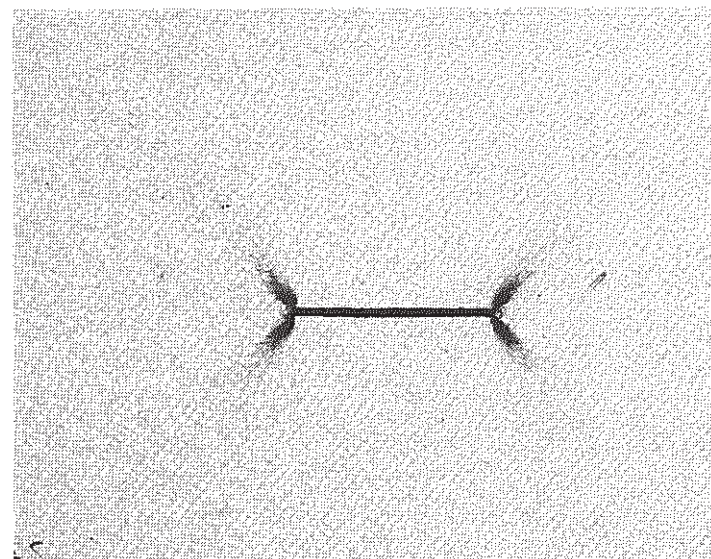


Fig. 7.2 Safety Map of Super Monju Steam Generator



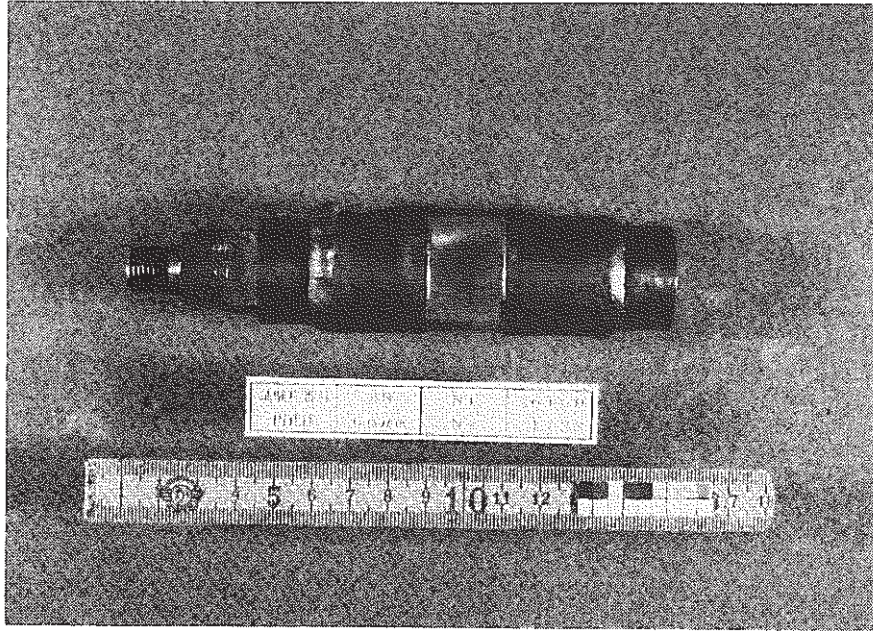
(Front Surface/Sodium Side) ×50



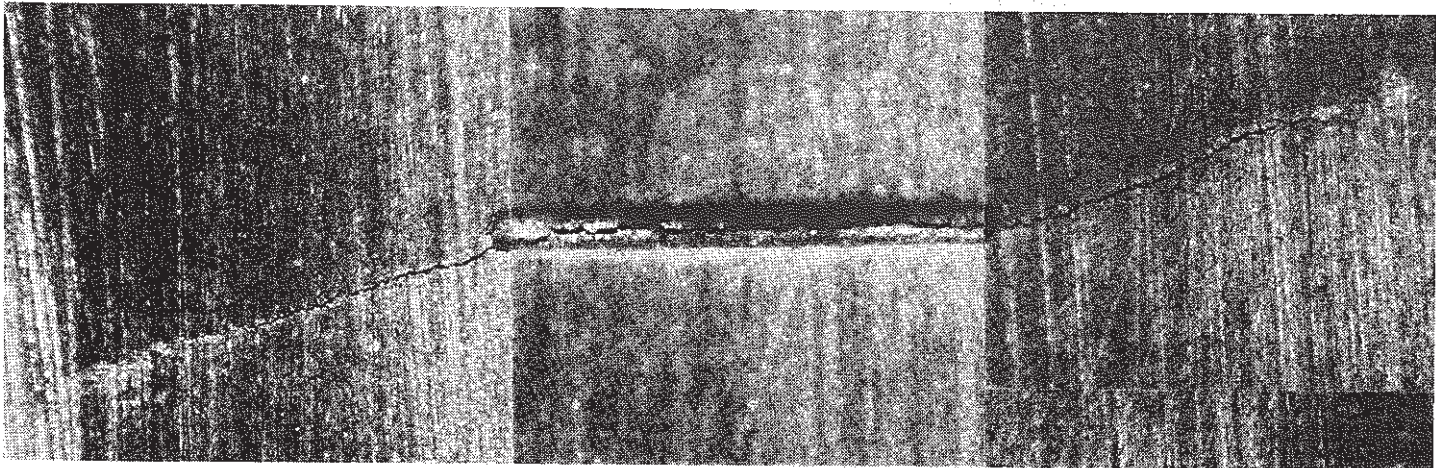
(Back Surface/Steam Side) ×50

- Nozzle No. C 2 (W 443)
- Diameter 92.2 μm φ

Photo. 2.1 Slit Type Nozzle

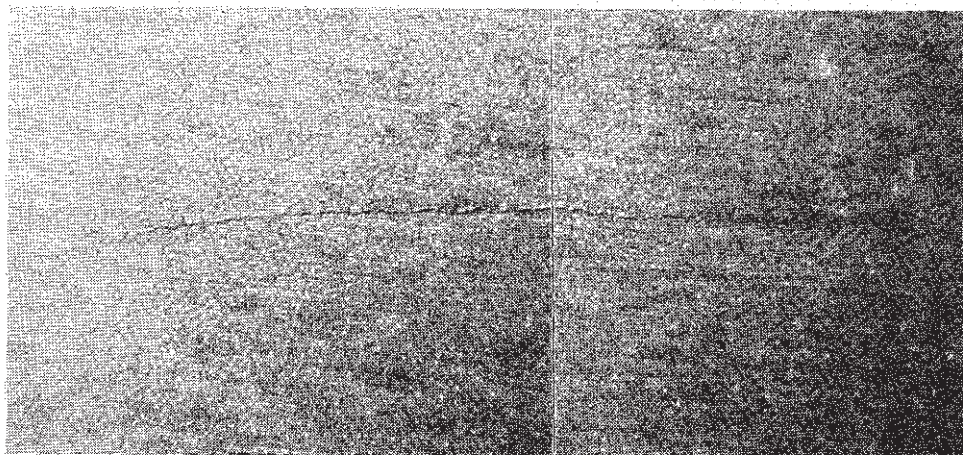


(Appearance Shape)



(Front Surface/Sodium Side)

(× 25.7)



(Back Surface/Steam Side)

(× 25.7)

Photo. 2.2 - Fatigue Type Nozzle

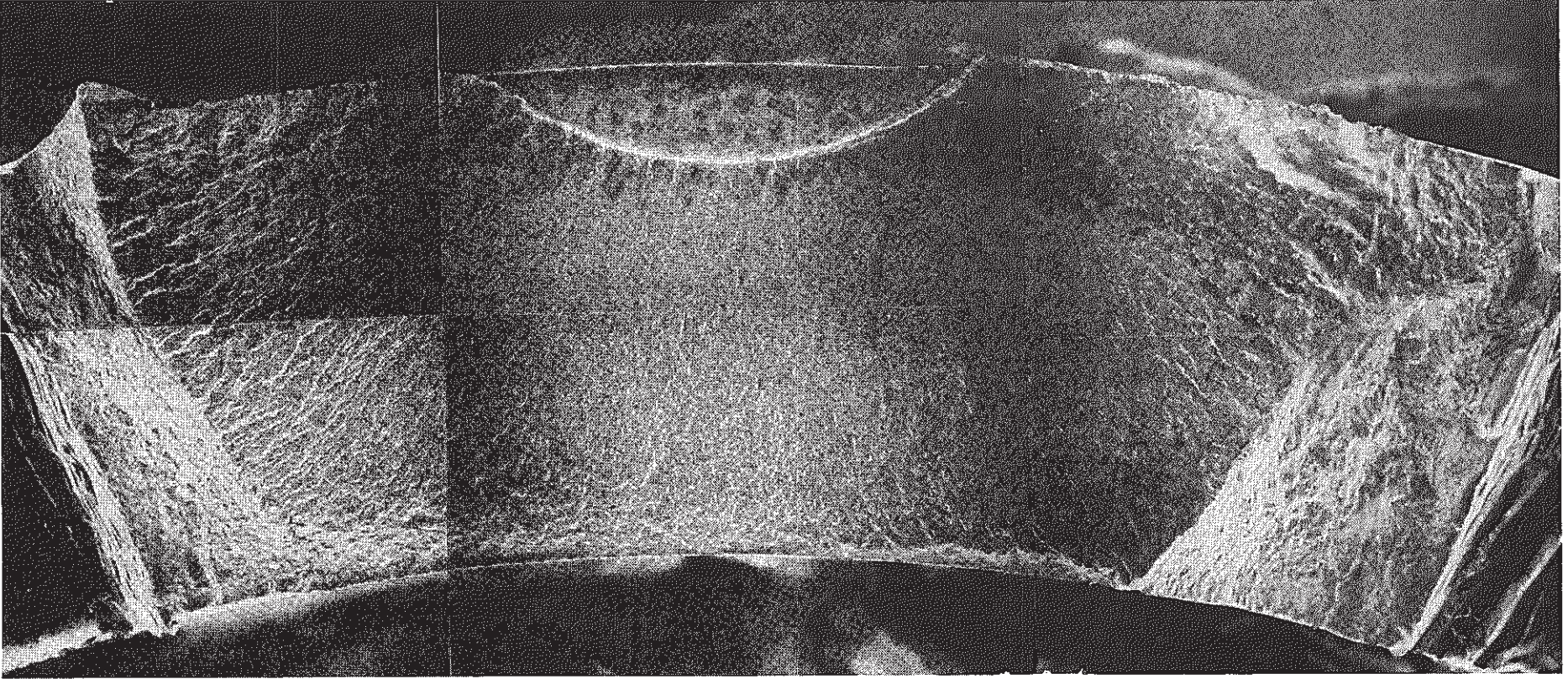
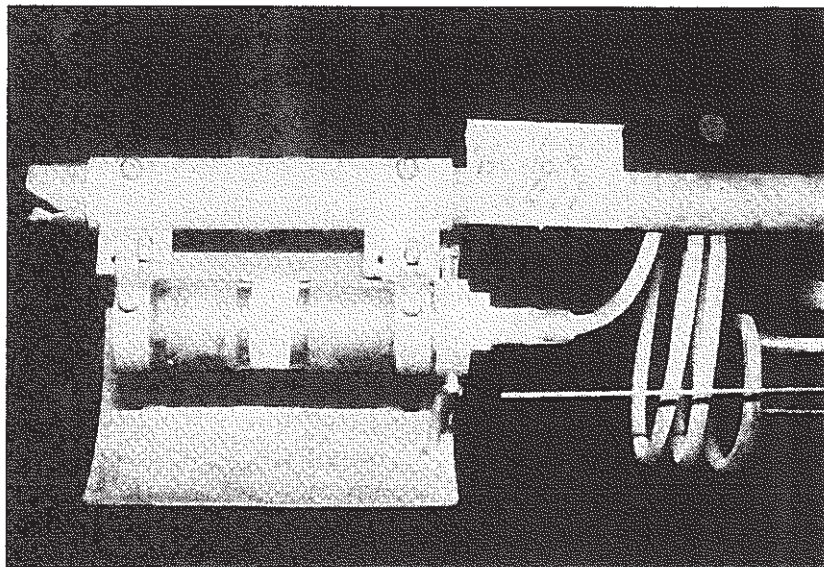
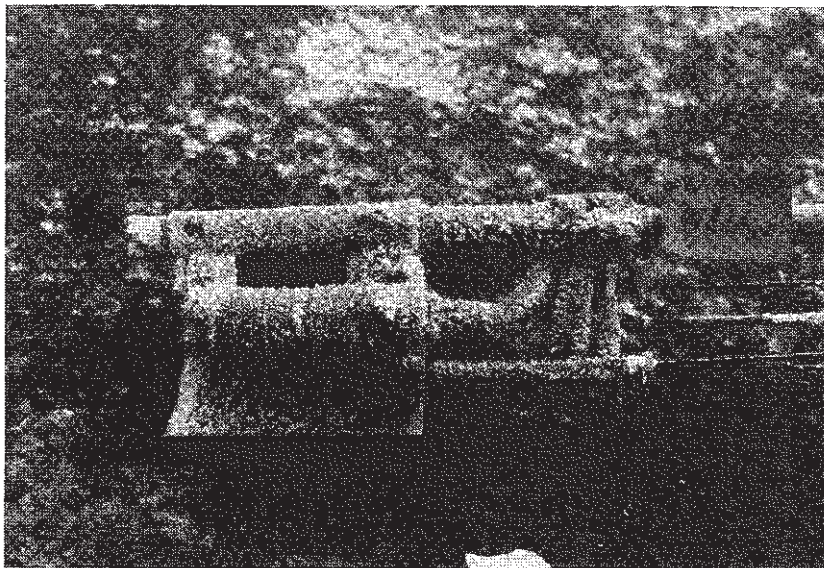


Photo. 2.3 - Across Section of Fatigue Type Nozzle

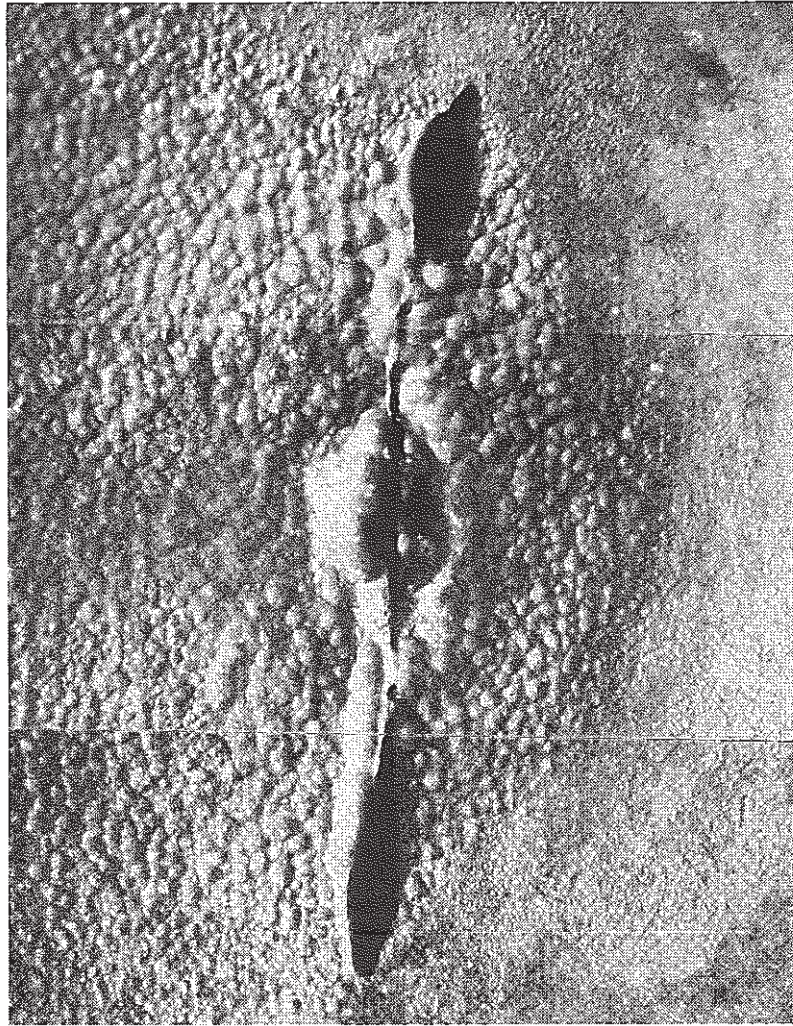


(Before)

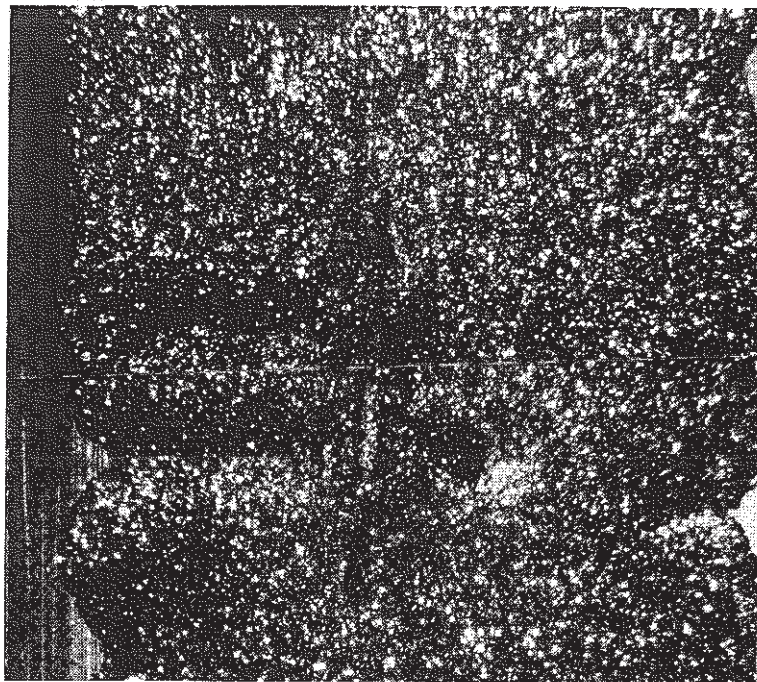


(After)

Photo.2.4 A Test Piece before and After Experiments

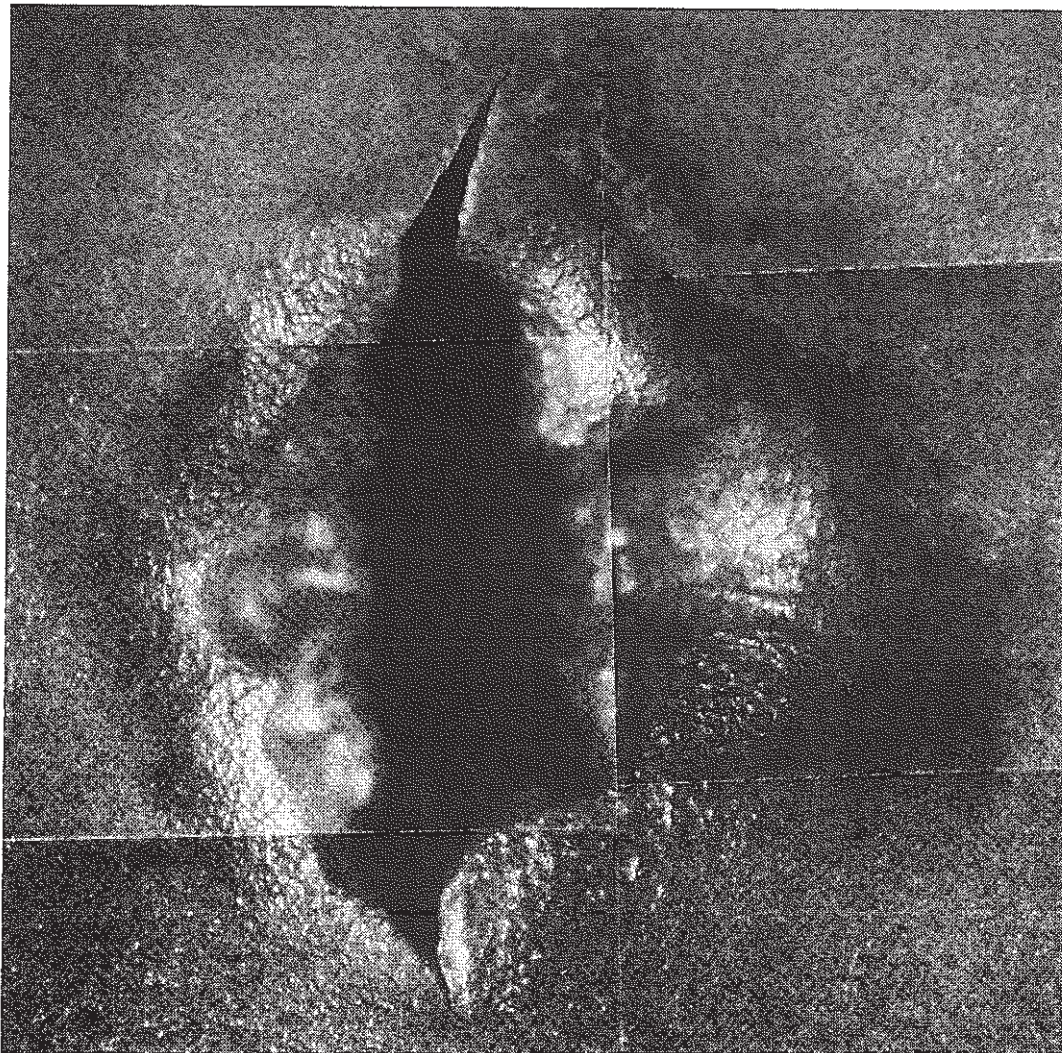


(Sodium Side)



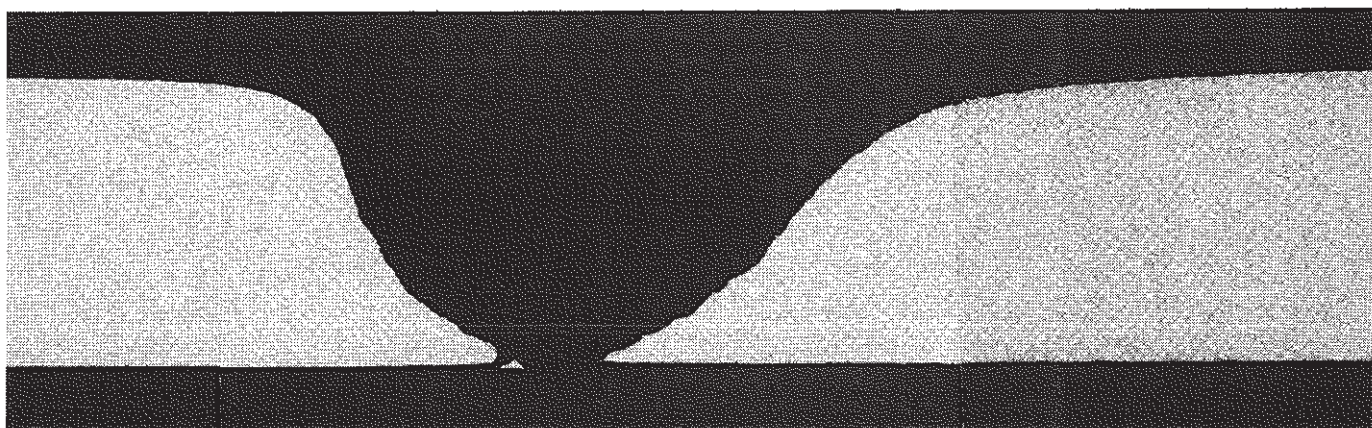
(Steam Side)

Photo. 3.1 Surfaces of Enlarged Leak Hole on Test No. W441 ($\times 15$)



Outer Surface
(Sodium side)

(Sodium side)



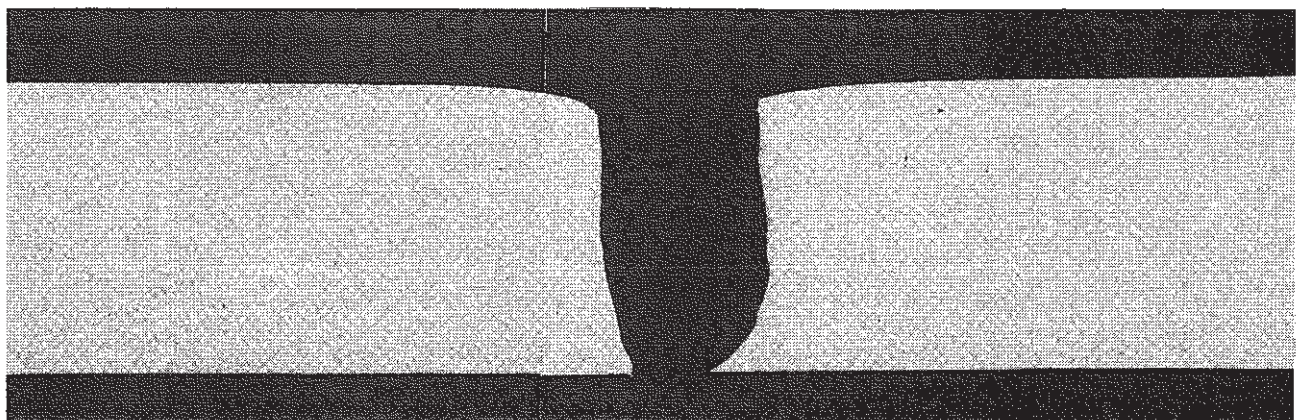
(Water side)

Photo. 4.1 Outer Surface of Enlarged Leak Hole and Its Cross Section
on Test No. W414 ($\times 15$)



Outer Surface
(Sodium side)

(Sodium side)



(Steam Side)

Photo. 4.2 Outer Surface of Enlarged Leak Hole and Its Cross Section
on Test No. W415 ($\times 15$)

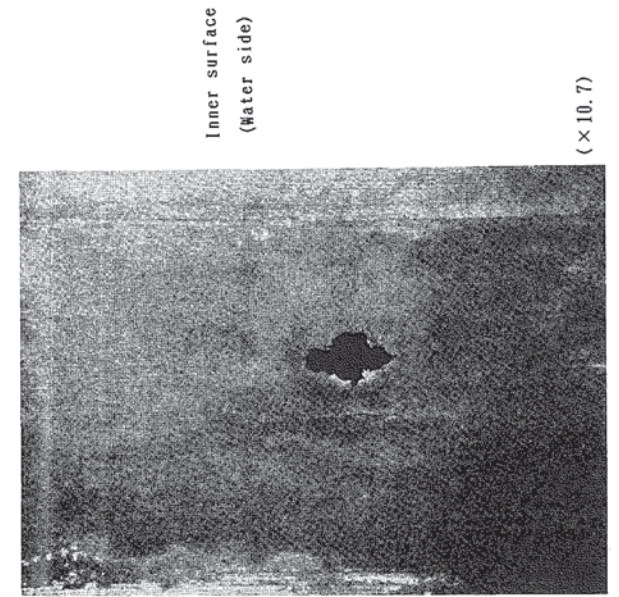
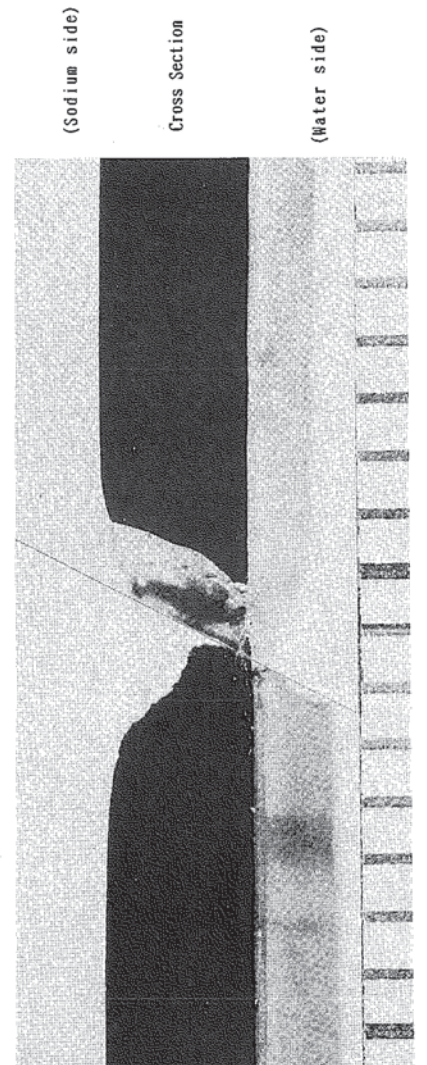
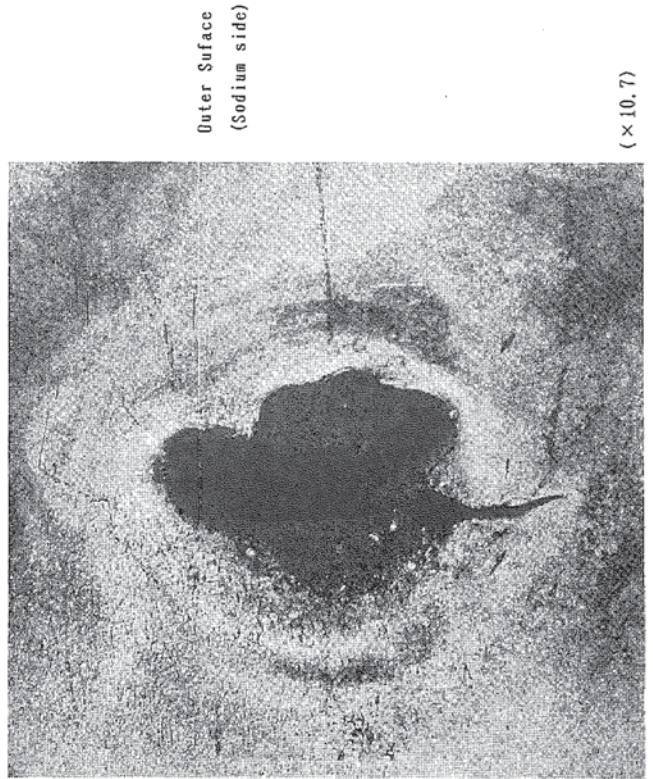
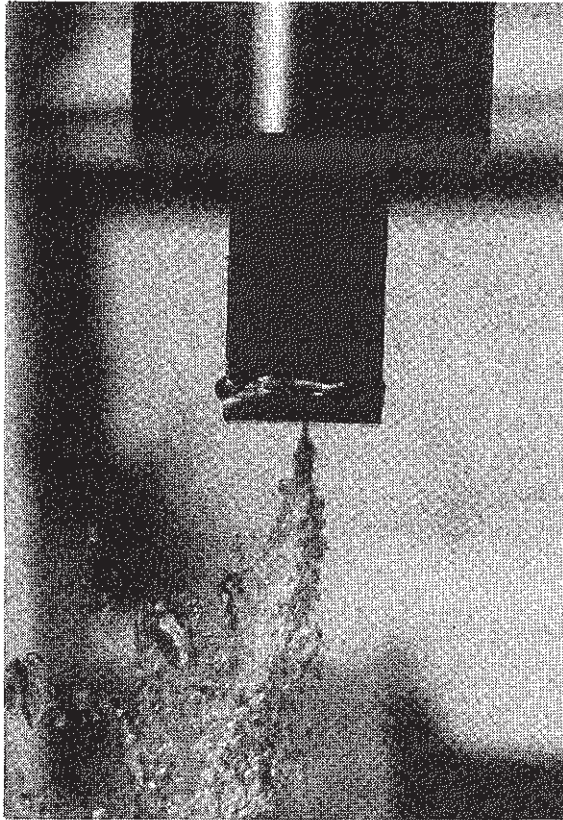
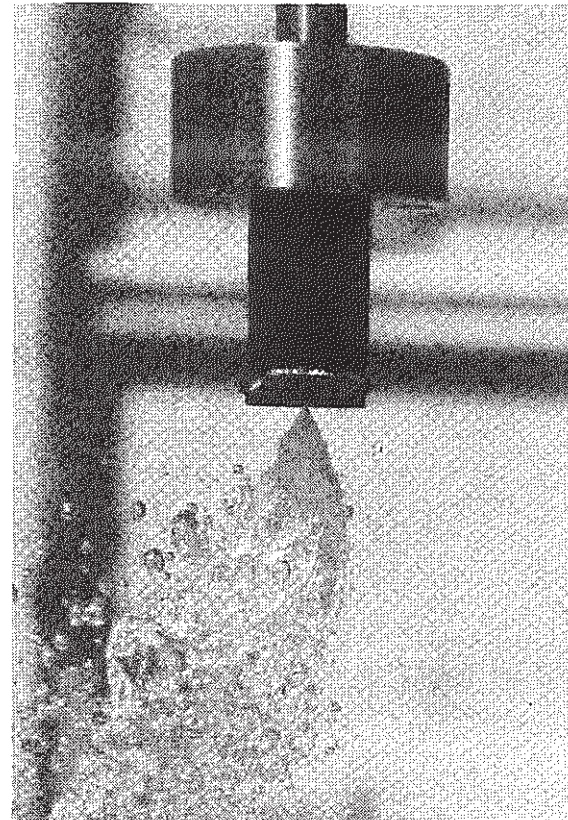


Photo. 4.3 Surfaces of Enlarged Leak Hole on Test No. W408



(Front Side)



(A Side Face)

Photo. 4.4 Experimental Results of Gas Blow in the Water

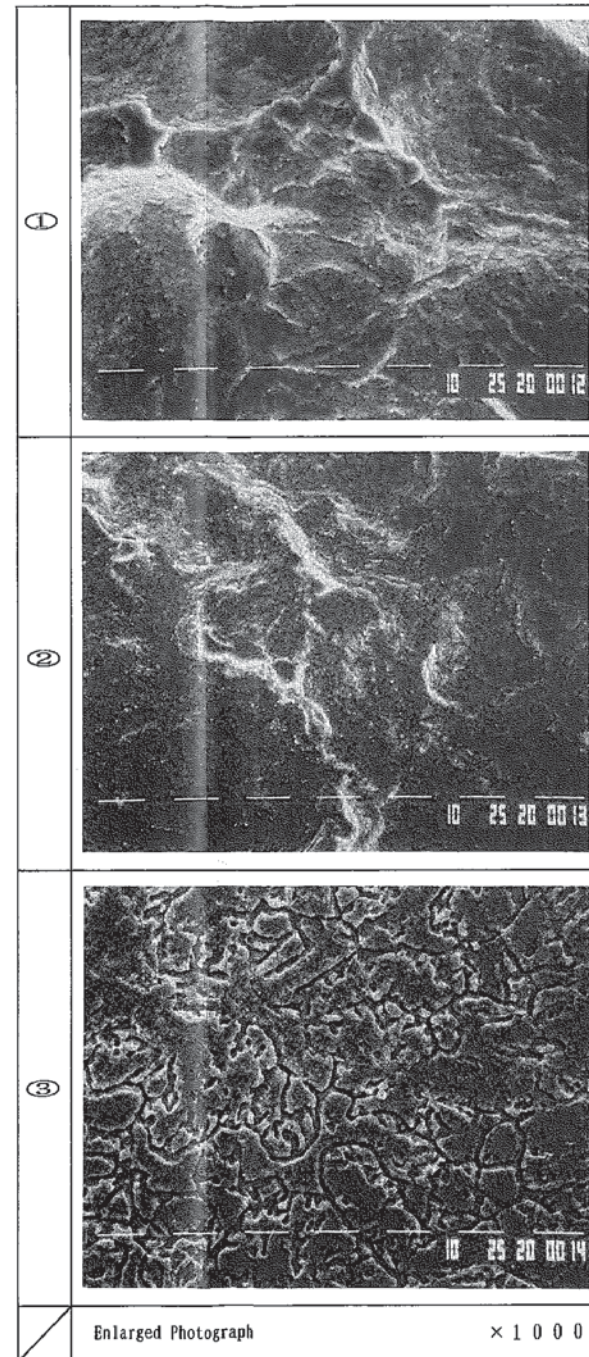
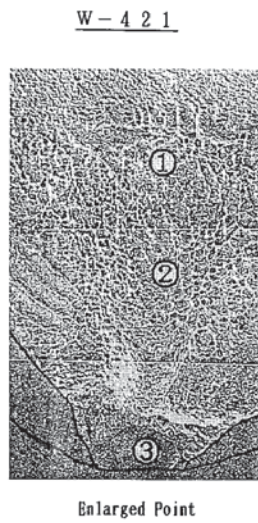
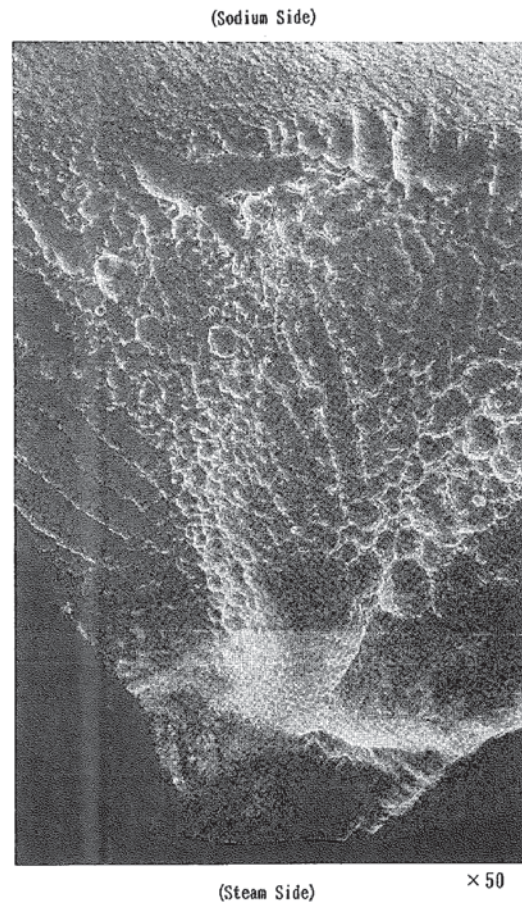
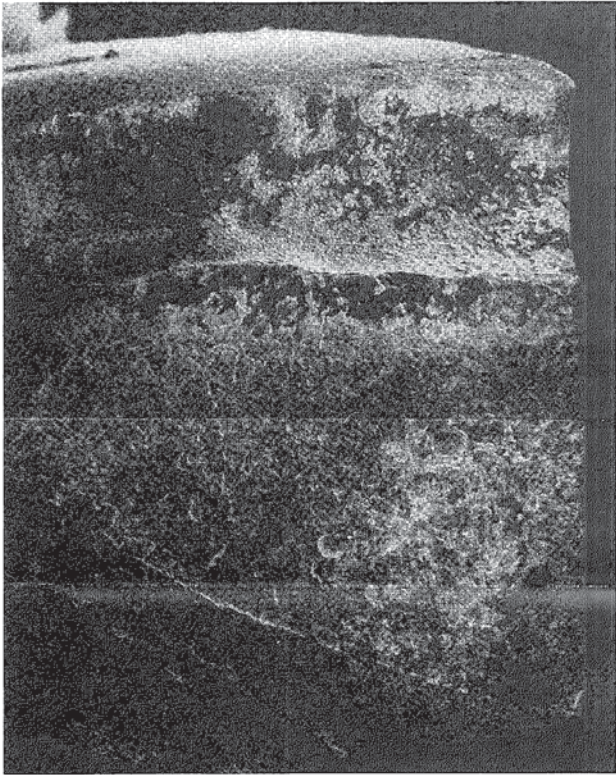


Photo. 4.5 A Cross Sectional View on Test No. W421 by SBM

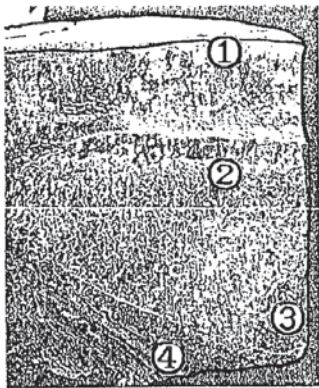
(Sodium Side)



(Steam Side)

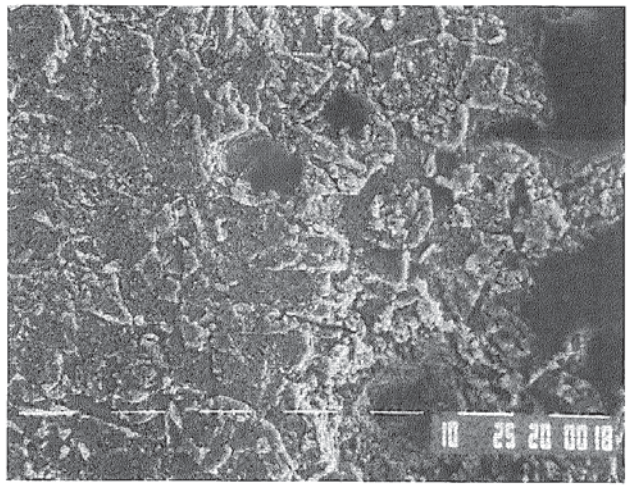
× 50

W - 4 2 6

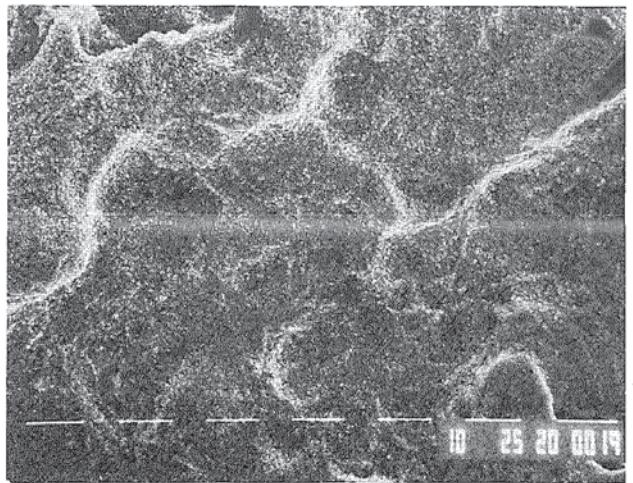


Enlarged Point

①



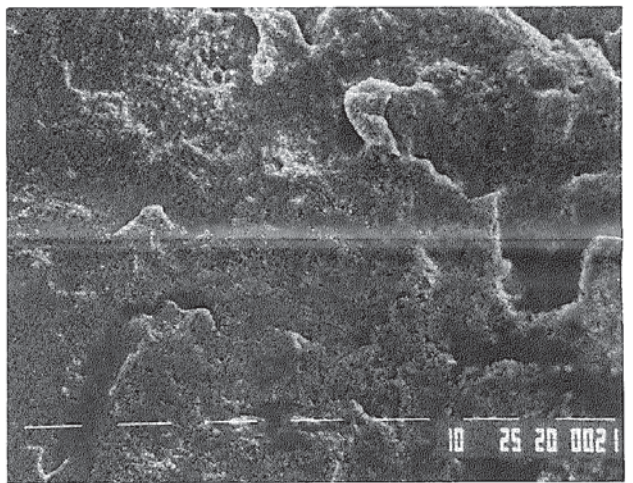
②



Enlarged Photograph

× 1 0 0 0

③



④

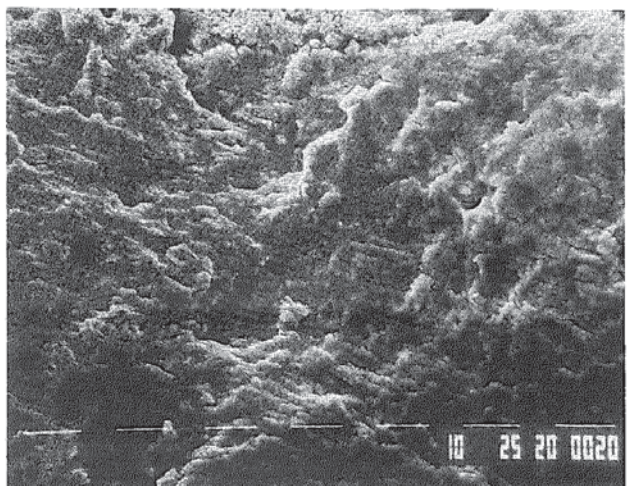
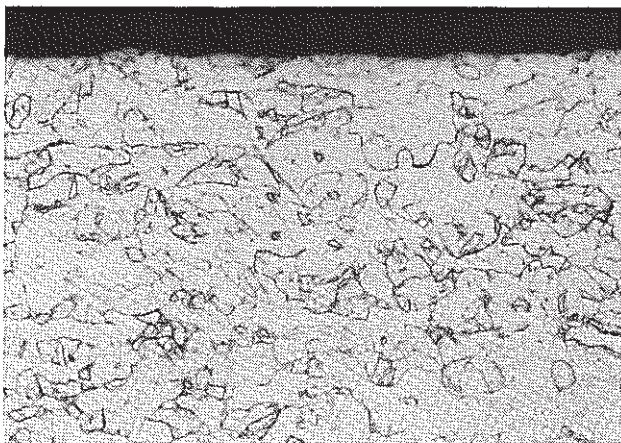
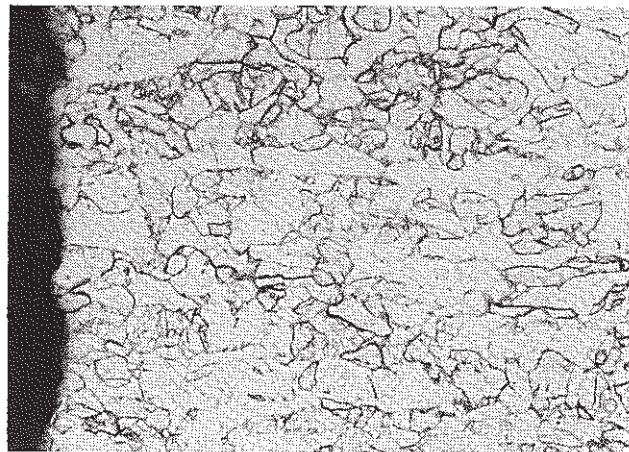


Photo. 4.6 A Cross Sectional View on Test No. W426 by SEM



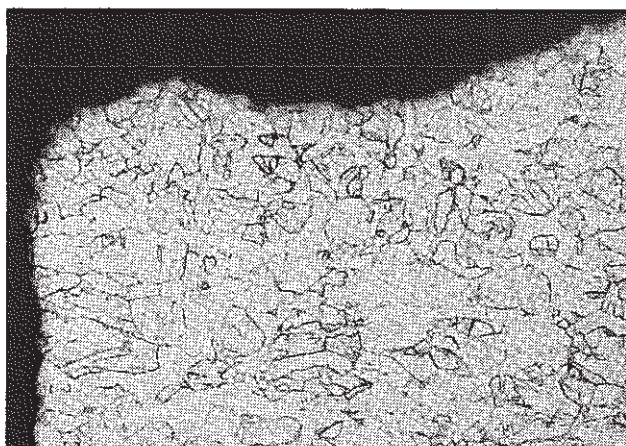
①

×400



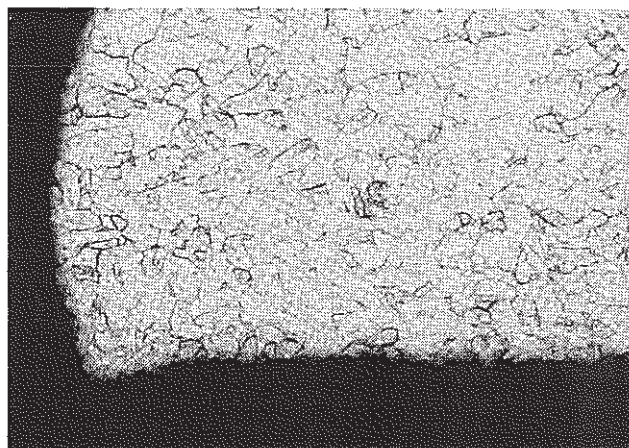
④

×400



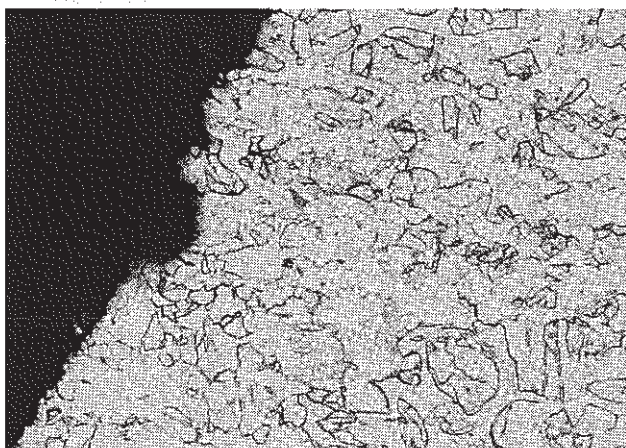
②

×400



⑤

×400



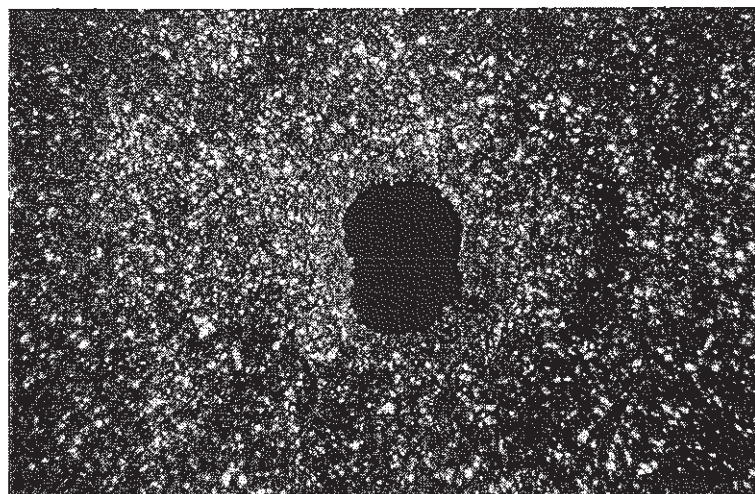
③

×400

Photo. 4.7 Metallograph on Test No. W426



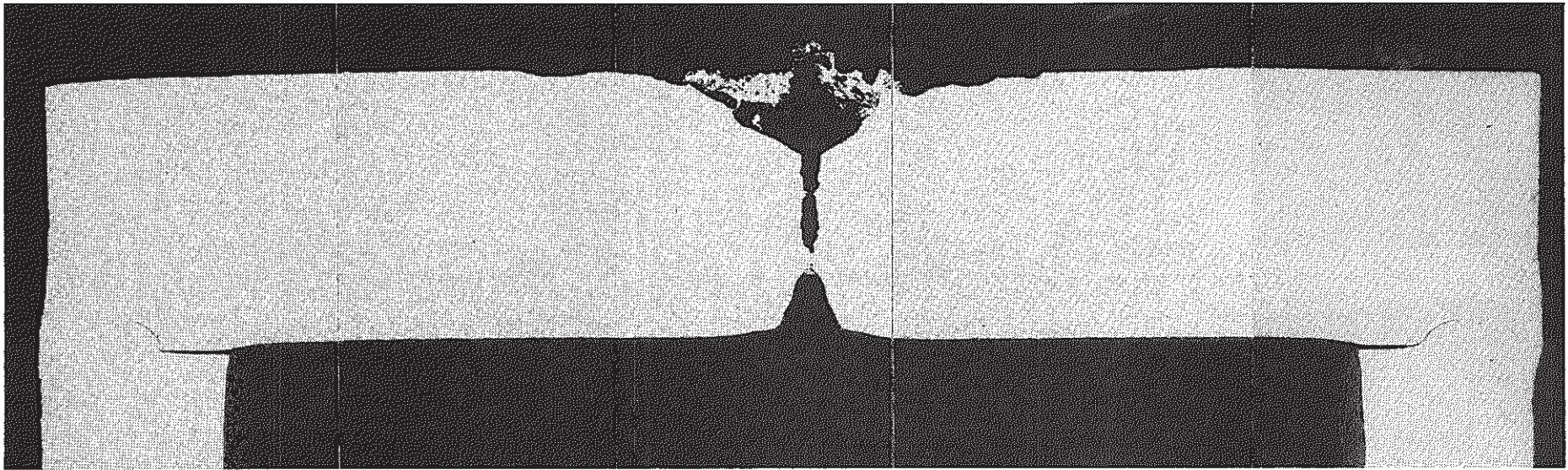
(Sodium Side)



(Steam Side)

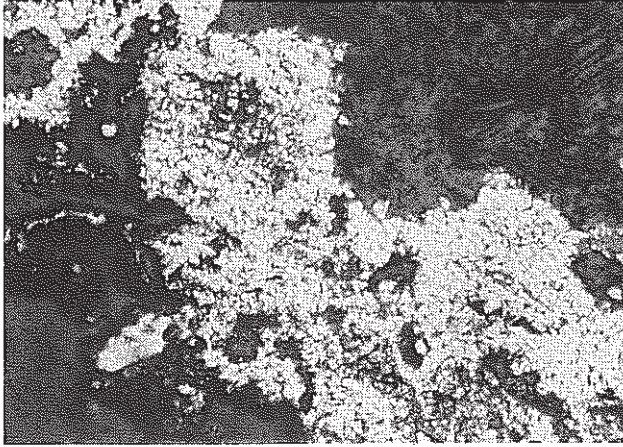
Photo. 5.1 Surfaces of Enlarged Leak Hole on Test No. W444 ($\times 15$)

(Sodium side)



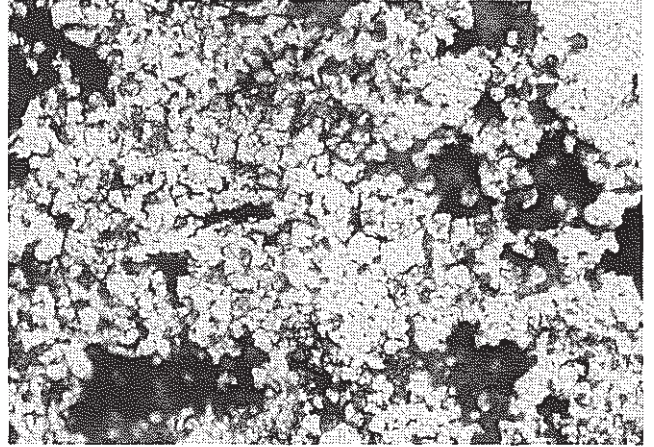
(Water side)

Photo.5.2 A Cross Section after Enlargement on Test No.W444

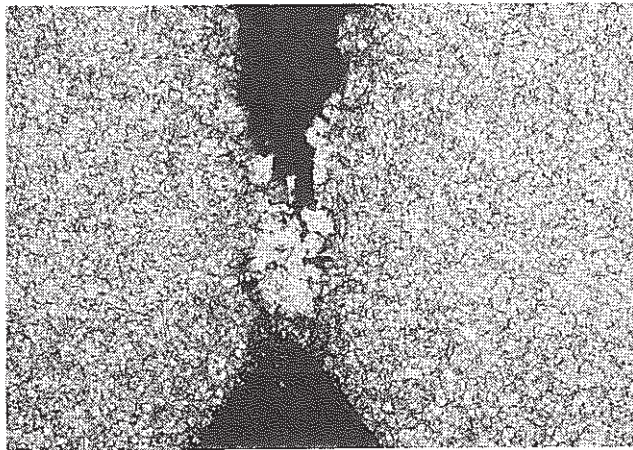


②

× 100

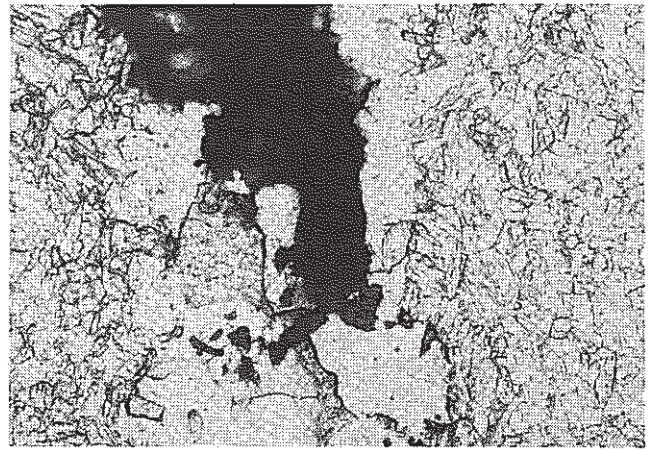


× 400

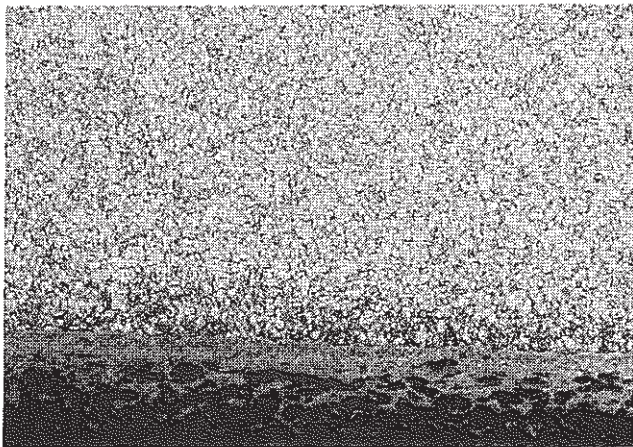


④

× 100

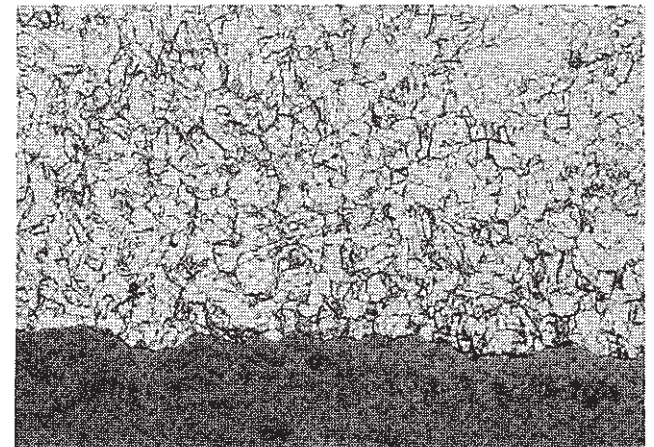


× 400



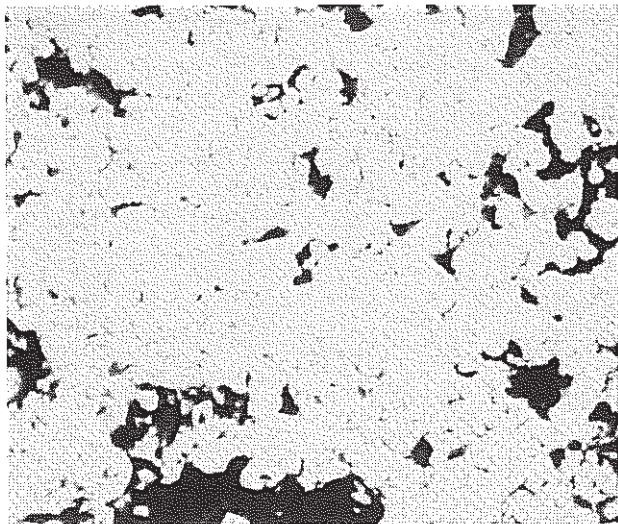
⑥

× 100



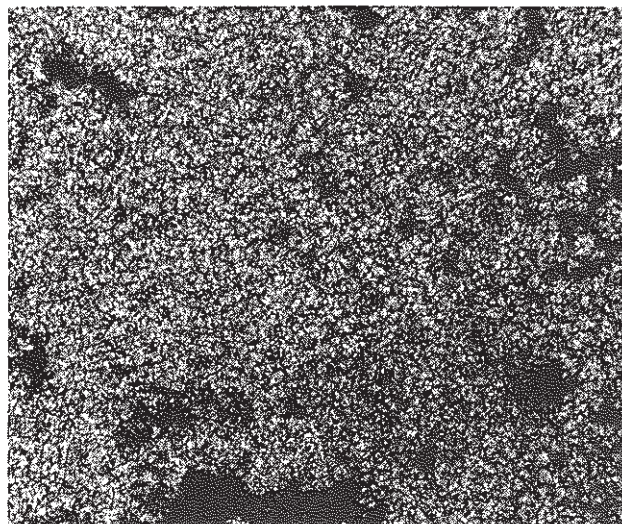
× 400

Photo. 5.3 Metallograph on Test No. W444.

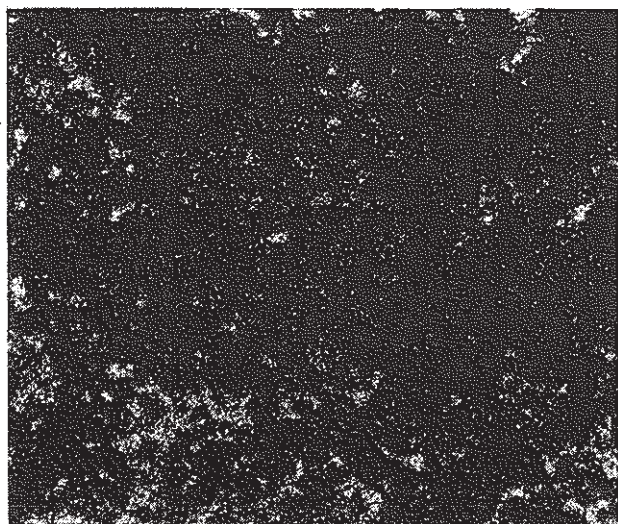


50 μ m

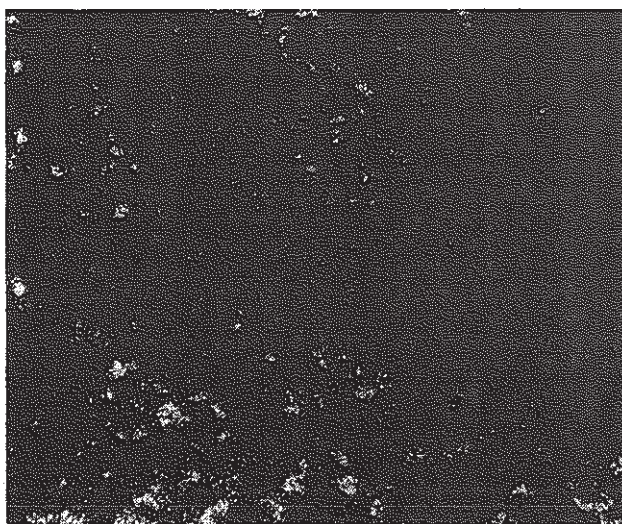
Basic Photograph



Fe Element



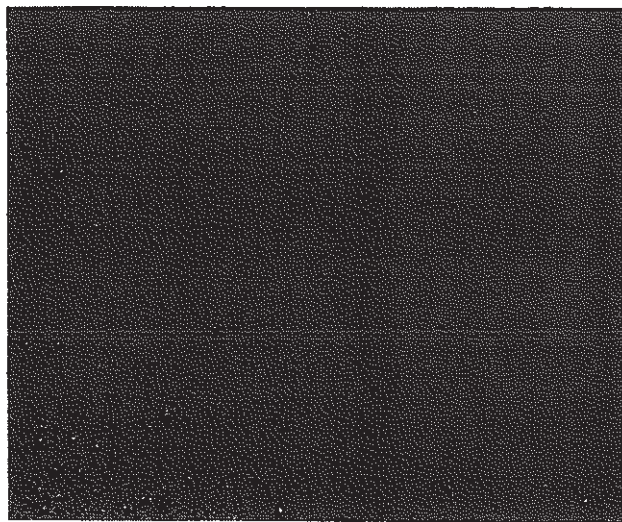
O Element



Cr Element

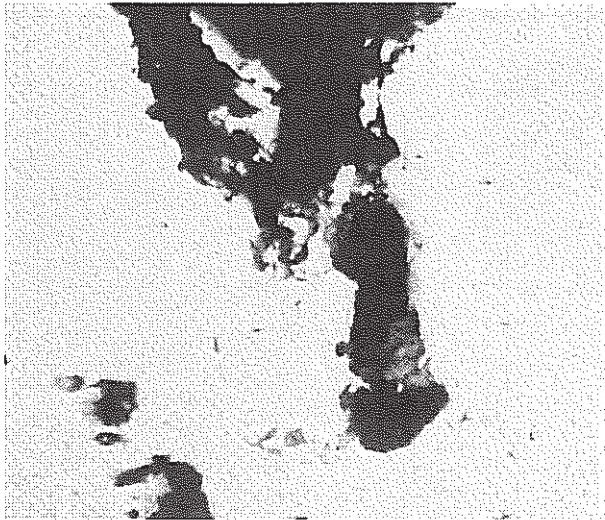


Na Element



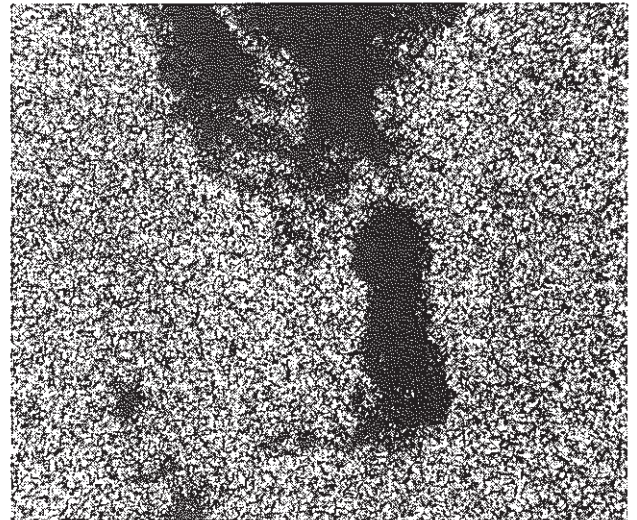
Mo Element

Photo. 5. 4 EPMA on Test No. W444(1)---②---

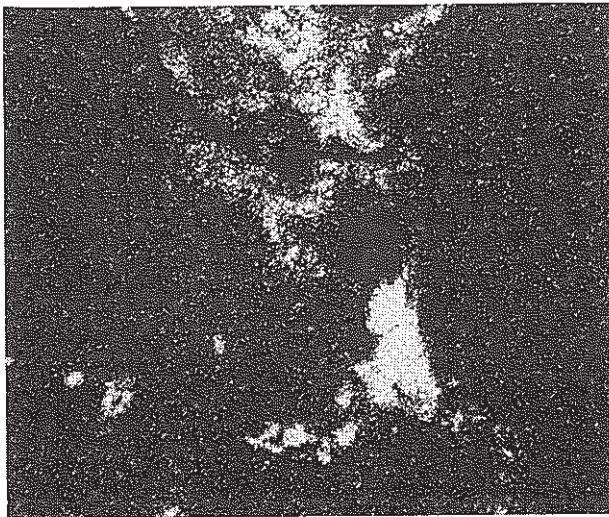


50 μ m

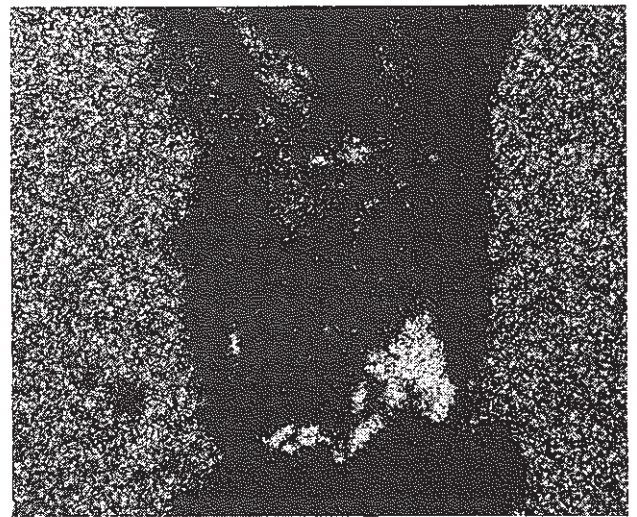
Basic Photograph



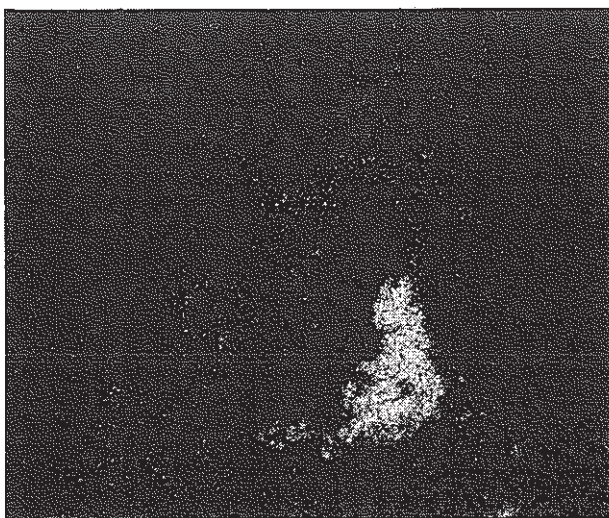
Fe Element



O Element



Cr Element

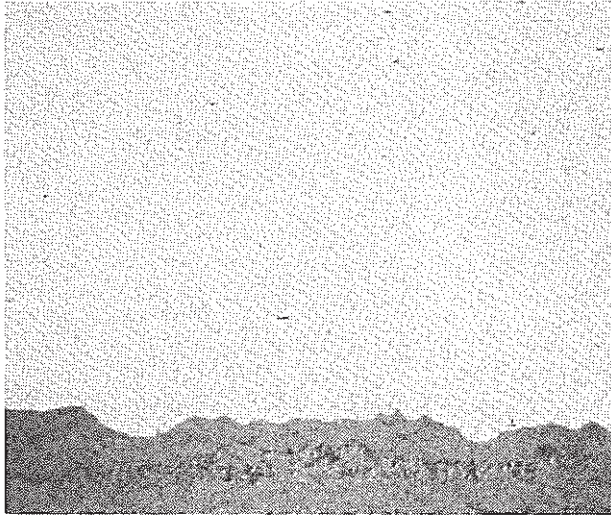


Na Element



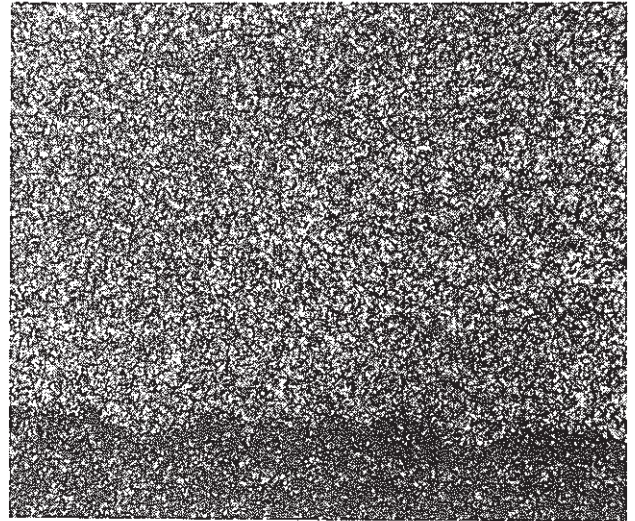
Mo Element

Photo. 5.5 EPMA on Test No. W444(2)—④—

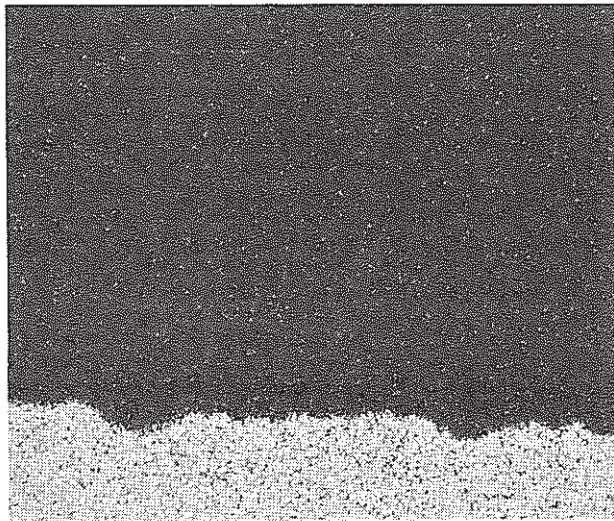


50 μ m

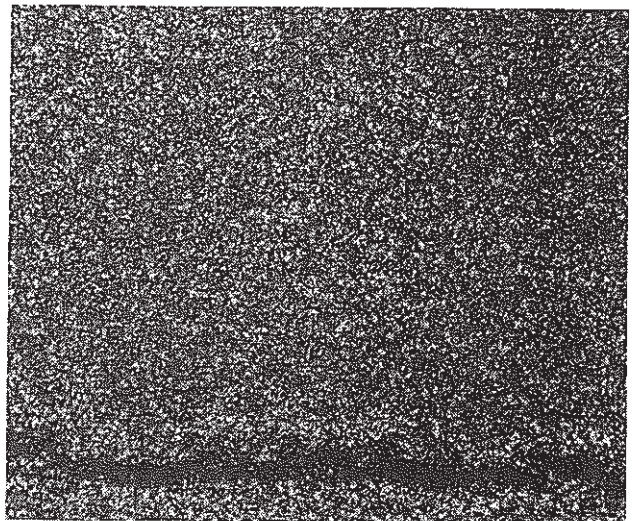
Basic Photograph



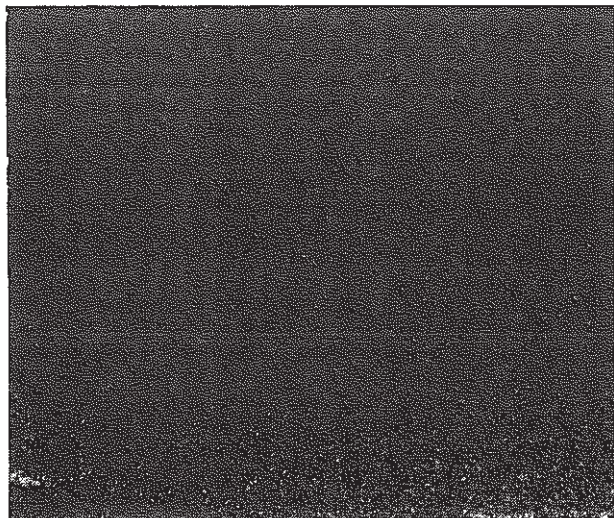
Fe Element



O Element



Cr Element



Na Element



Mo Element

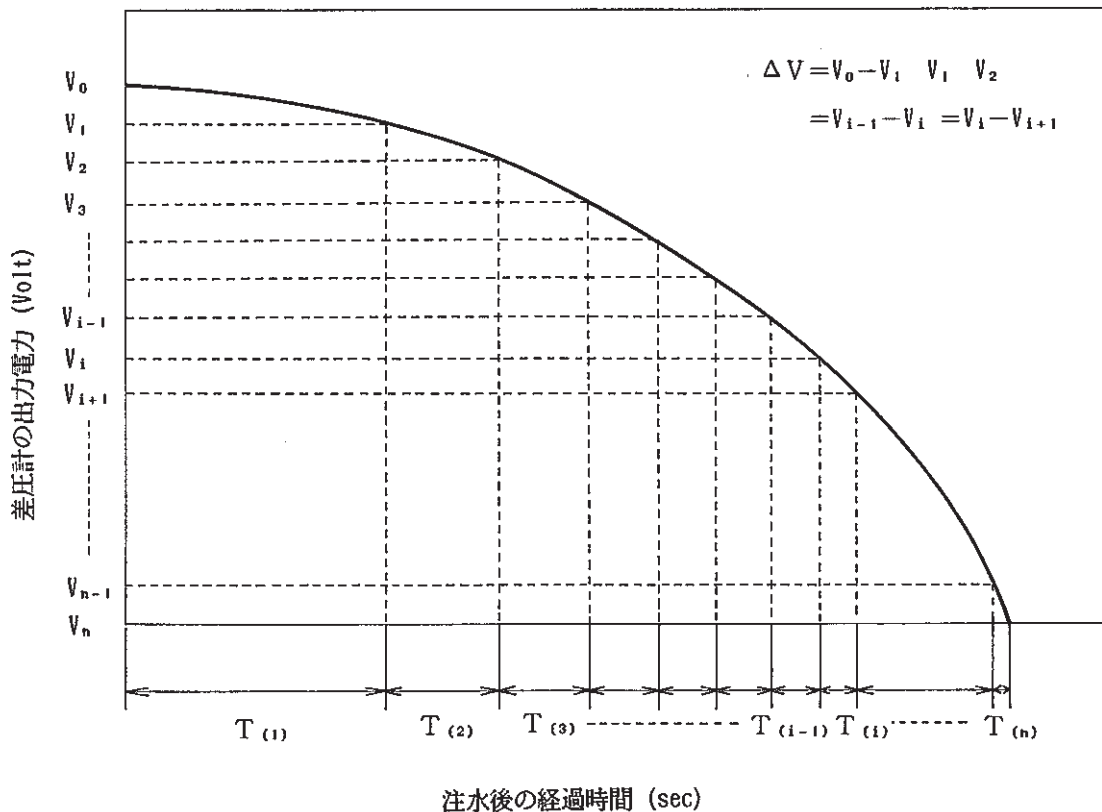
Photo. 5.6 EPMA on Test No. W444(3)---⑥---

A p p e n d i x . I

試験データ収録方法

Appendix - I 試験データ収録方法

本装置は、差圧計のアナログ信号が約 5 V から約 1 V に降下する間の変化を記録するものである。1 回の微小リーク試験が何時間かかるかを事前に予測しにくく、また試験中にリーク孔のセルフ・プラグが発生して試験が非常に長期化する場合もある。このため本装置による差圧計電圧の収録方法は、定期毎にその時の出力電圧 ΔV が降下するまでに要する各時間（例えば $T_i \text{ sec}$ ）を収録する方法を採ることにした。



ここでは単位降下電圧 ΔV は 0.01 V を、最小サンプリング周期は 0.02 sec を採用した。
 また差圧計の電圧 ΔV が降下したかどうかの判断と、 $T(i)$ のデータ収録及びリーク率計算はパソコンが行う。データ収録条件及び $T(i)$ のデータは、CPU に収録される他に外部メモリー・ユニットにも同時に収録される。この外部メモリー・ユニットは、電池でバックアップされており停電時の対策を行う。

リーク率計算には、次式を用いる。

$$L_R(i) = \frac{R \cdot \Delta V}{T(i)}$$

ここで、各記号は次の通りである。

R : 1 V 当たりの水重量 (g/V)

ΔV : 単位降下電圧 (V)

T(i) : 差圧計電圧が ΔV 降下するのに要する時間 (sec)

$L_R(i)$: T(i) 間のリーク率 (g/sec)

R は差圧管への充填水量を試験毎に実測したのから算出した。

A p p e n d i x . Ⅱ

伝熱管ミルシート

Table. II-1 Mod.9Cr-1Mo 鋼伝熱管ミルシート

需要家: FUJIKYOKUQ, KAKUNENRYU KAIHATSU
 Purchaser: JIGYODAN.
 需要家管理番号: 60A2712
 Purchaser's Order No.
 注文者: FUJI SHOJI CO., LTD.
 Trading Co.
 注文者照合番号: 313 Z-950
 Reference No.
 品名: COLD FINISHED SEAMLESS STEEL TUBE
 Commodity: STBA TEMPALLOY F95
 &
 規格: PLAIN END
 Specification

日本鋼管株式会社
 NIPPON KOKAN K.K.
 検査証明書
 INSPECTION-CERTIFICATE

本社: 東京都千代田区丸の内1丁目1番2号
 Head Office: 1-2, Marunouchi 1-chome, Tokyo 100 Japan

証明番号: AA 36241
 Certificate No.
 日付: 1985-12-18
 Date
 船名/工事番号:
 Ship's No./Construction No.
 製造番号: 3624
 Production No.
 契約番号: TT8427
 Contract No.

寸法・Size				鋼種	Heat No.	化学成分・Chemical Composition (%)												引張試験・Tensile Test				硬度試験 Hardness Test																															
31.3x3.2x5000																																																					
行番 Item No.	長さ Length +1 (MM)	数量 Quantity 本数 Number of Pieces +1 () 質量 Mass	規格 Spec.	下限 Min.	上 限 Max.	L	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	S.A.L	N	V	+3 引張点/耐力 Yield Point/ Yield Strength	+4 引張強さ Tensile Strength	+4 伸び Elongation	+5 %	+5 HRC																														
																								X100	X100	X1000	X100	X1000	X100																								
001	5,000	60	57015	L			8	20	30						800	85			30	18																																	
		TOTAL	60	P			12	50	60	20	10		40	950	105			40	70	25	11	42.2K	60.0K	20.0																													
				L			10	33	39	8	2		13	844	92			10	39	21	11	51.2K	71.9K	25.8																													
				P			10	34	37	7	2		11	837	91			8	37	20	11	51.4K	72.0K	25.6																													
							X100																																														
				L																																																	
				L																																																	
				L																																																	
				P																																																	
外観・寸法 Visual & Dimension						水圧試験 Hydrostatic Test						非破壊検査 NDE						曲げ試験 Bend Test						へん平試験 Flattening Test						押しつぶし試験 Flaring Test						拡大試験 Expansion Test						ULTRASONIC EXAMINATION GOOD. MICROSCOPIC TEST GOOD. NON-METALLIC INCLVSION TEST GOOD.											
GOOD						GOOD						GOOD						GOOD						GOOD						GOOD																							
注記・Note		③ 試験片 Test Specimen		④ K : kgf/mm ² KS : ksi		⑤ YR: 降伏比 - Yield Ratio RA: 絞り - Reduction of Area		⑥ K : kgf/cm ² P : psi MPa : MPa N : N/mm ² B : bar A : atm		4L: JIS 4号 (縦) - JIS No. 4 (Longitudinal) 4T: JIS 4号 (横) - JIS No. 4 (Transverse) 5L: JIS 5号 (縦) - JIS No. 5 (Longitudinal) 5T: JIS 5号 (横) - JIS No. 5 (Transverse) 11: JIS 11号 - JIS No. 11 12: JIS 12号 (縦) - JIS No. 12 (Longitudinal) FS: 管状試験片 - Full Section RL: 棒状試験片 (縦) - Round Specimen (Longitudinal) RT: 棒状試験片 (横) - Round Specimen (Transverse) S1: 線状試験片 (縦) - Strip Specimen (Longitudinal) - Width 1/2 in. S2: 線状試験片 (縦) - Strip Specimen (Longitudinal) - Width 3/4 in. S3: 線状試験片 (横) - Strip Specimen (Longitudinal) - Width 1 1/4 in. S5: 線状試験片 (横) - Strip Specimen (Longitudinal)		L: とりへ分析・Ladle Analysis P: 製品分析・Product Analysis																																									

上記製品は検査の結果指定の規格に合格していることを証明いたします。
 WE HEREBY CERTIFY THAT THE MATERIAL HEREIN HAS BEEN MADE AND TESTED IN ACCORDANCE WITH THE ABOVE SPECIFICATION AND ALSO WITH THE REQUIREMENTS CALLED FOR BY THE ABOVE ORDER.

S. Nagai
 京浜製鉄所検査
 Manager of Inspection
 KEIHIN WORKS

京浜製鉄所: 神奈川県川崎市川崎区南渡田町1番1号 KEIHIN WORKS: 1-1, Minamiwatarida-cho, Kawasaki 210 Japan

Table. II-2 9Cr-2Mo 鋼伝熱管ミルシート

証明書番号 Certificate No. TTC9450
 日付 Date 56.11.20
 注文者 Shipper 057 FCA B9051611
 顧客 Customer トウリヨク ロカスリヨク カイハツ ショウキョク
 品名 Commodity ネイラ ネツコクカンキョク コウキンコク コウカン
 検査証明書 INSPECTION CERTIFICATE
 住友金属工業株式会社 鋼管製造所 SUMITOMO METAL INDUSTRIES, LTD. STEEL TUBE WORKS
 1. Nishino-cho, Higashi-mukojima Amagasaki, Japan
 規格 Standard ストキ サイワツ HCM9M S-C
 仕様番 Specification A-NQ.1674

NOTES	作業番号 Mill Work No.	寸法 Size				数量 Quantity		重量 Weight (kg)	需要管理番号 Order No. or Job No.									
		外径 O.D.	内径 I.D.	肉厚 W.T.	長さ Length	本数 No. of pcs.	延べ長さ Total Length											
#1 Unit F=feet, * = inch M=mm, No Mark=mm #2 L=Length (Heat) F=Feet #3 Direction L=Longitudinal T=Transverse #4 Type of Specimen 1=JIS No. 1 4=JIS No. 4 3=JIS No. 3 10=JIS No. 10 11=JIS No. 11 12=JIS No. 12 F=Full Section S=Rectangular R=Round Bar #5 Unit K=kg/cm ² , P=psi W=wt, T=Ton/ft ³ M=MPa, N=N/mm ² C=N/cm ² , S=bar A=atm, G=kg/cm ² Q=MPa #6 Gauge Length s.g. 50=50x25.5=502mm T=10x10=100mm SD=54, 4A=4.7A S.6A=5.65A #7 R=Reduction Area Y=Yield Ratio #8 Size of Specimen F=10X10mm 7=10X7.5mm 6=10X6.5mm 5=10X5mm 3=10X3.5mm 2=10X2.5mm #9 Unit 1=kg/cm ² 2=kg/cm ² 3=N/mm ² 4=N/mm ² 5=mmHg 6=mmHg	TTC9450	31.8		3.2	5000	30		372	61A3258									
	製鋼番号 Heat No.	化学成分 Chemical Composition %											試番 Lot or T.P.No.	引張試験 Tensile Test G.L. S.G.			衝撃試験 Impact Test	
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	NB	V		形状 Y.S.or Y.P.	引張強さ T.S.	伸び E.L.	試験片 Specimen	試験結果 Result
	A691001	0.08	0.50	0.70	0.030	0.030			9.07	2.00			L11K	46	64	33		
		0.05	0.26	0.49	0.025	0.02			9.10	2.02			P	47	65	29		
	試験検査 Description of Tests											ネツコク : ヤキアラシ 950°C X 20' A.C. ヤキトモシ 800°C X 30' A.C.						
	水圧試験 Hydrostatic Test		へん平 Flattening		押しつぶし Flaring (Soft)		曲げ Bending		リング膨大 Ring Expansion		リング引張 Ring Tensile		つば出し Flange					
	圧力 Pressure	結果 Result	圧力 Pressure	結果 Result	圧力 Pressure	結果 Result	圧力 Pressure	結果 Result	圧力 Pressure	結果 Result	圧力 Pressure	結果 Result	圧力 Pressure	結果 Result				
	リヨク	G 100	リヨク	リヨク	リヨク	リヨク	リヨク	リヨク	リヨク	リヨク	リヨク	リヨク	リヨク	リヨク				
	リングゲージ Ring Gauge		ドリフト Drift															
	上記注文品は指定の規格および仕様に従って製造され、その要求事項を満足していることを証明します。											住友金属工業株式会社 鋼管製造所 SUMITOMO METAL INDUSTRIES, LTD. STEEL TUBE WORKS 品質保証部 品質保証係 Manager of Quality Assurance Section						

Sealsheet Item
Y N A

Table. II-3 9Cr-1Mo-Nb-V鋼伝熱管ミルシート

需要家 Purchaser : DORYOKURO KAKUNENRYO KAIHATSU
 JIGYUJAN.
 需要家管理番号 Purchaser's Order No. : 62A2021
 注文者 Trading Co. : FUJI SHOJI CO., LTD.
 注文者照合番号 Reference No. : 313 XX-60
 品名 Commodity : COLD FINISHED SEAMLESS STEEL TUBE
 & : STBA TEMPALUY SW9
 規格 Specification : PLAIN END

日本鋼管株式会社
 NIPPON KOKAN K.K.
検査証明書
INSPECTION CERTIFICATE

本社 : 東京都千代田区丸の内1丁目1番2号
 Head Office: 1-2, Marunouchi 1-chome, Tokyo 100 Japan

証明書番号 : AA 35590
 Certificate No.

日付 : 1987-11-27
 Date

船名/工事番号 :
 Ship's No. /Construction No.

製造番号 : 35580
 Production No.

契約番号 : TT69979
 Contract No.

寸法・Size			化学成分・Chemical Composition (%)										引張試験・Tensile Test			硬度試験			
31.8X3.2X5000			鋼種 Heat No.	C Si Mn P S Cu Ni Cr Mo V Nb										引張強さ Tensile Strength	伸び Elongation	硬度 Hardness			
行番 Item No.	長さ Length +1 (MM)	数量 Quantity 本数 Number of Pieces		規格値		X100		X100		X1000		X100					X1000		+3
			下限 Min.	上限 Max.	L	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb	MPa	%	HRB
001	5,000	5	58333	L	8	13	69	6	2			805	95	20	4	11	63.8K	74.2K	24.0
		TOTAL	"	P	8	12	68	5	2			798	94	20	4				

外観・寸法 Visual & Dimension GOOD	水圧試験 Hydrostatic Test GOOD 100	非破壊検査 NDE GOOD	曲げ試験 Bend Test	へん平試験 Flattening Test GOOD	押し出し試験 Flaring Test GOOD	拡大試験 Expansion Test	ULTRASONIC EXAMINATION GOOD.									
注記・Note -1- 試験片 Test Specimen -2- L:とり分け分析・Ladle Analysis P:製品分析・Product Analysis 4L:JIS 4号(縦)・JIS No.4 (Longitudinal) 4T:JIS 4号(横)・JIS No.4 (Transverse) 5L:JIS 5号(縦)・JIS No.5 (Longitudinal) 5T:JIS 5号(横)・JIS No.5 (Transverse) 11:JIS11号 12:JIS12号(縦)・JIS No.12(Longitudinal) FS:厚板試験片・Full Section RL:棒状試験片(縦)・Round Specimen(Longitudinal) RT:棒状試験片(横)・Round Specimen(Transverse) S1:直線試験片(縦)・Strip Specimen(Longitudinal)-Width 1/2 in. S2:直線試験片(横)・Strip Specimen(Longitudinal)-Width 3/4 in. S3:直線試験片(縦)・Strip Specimen(Longitudinal)-Width 1 1/2 in. S4:直線試験片(横)・Strip Specimen(Longitudinal)							-3- 引張強さ Tensile Strength K :kgf/mm ² KS :ksi MP:MPa N :N/mm ² -4- 伸び Elongation YR:降伏比・Yield Ratio RA:絞り・Reduction of Area -5- 硬度 Hardness K :kgf/cm ² P :psi KP:kPa MP:MPa N :N/mm ² B :HRC A :teln									

上記製品は検査の結果指定の規格に合格していることを証明いたします。
 WE HEREBY CERTIFY THAT THE MATERIAL HEREIN HAS BEEN MADE AND TESTED IN ACCORDANCE WITH THE ABOVE SPECIFICATION AND ALSO WITH THE REQUIREMENTS CALLED FOR BY THE ABOVE ORDER.

京浜製鉄所: 神奈川県川崎市川崎区南渡田町1番1号 KEIHIN WORKS: 1-1, Minamiwatarida-cho, Kawasaki 210 Japan

S. Masugi
 京浜製鉄所検査室
 Manager of Inspection
 KEIHIN WORKS

A p p e n d i x . Ⅲ

疲労クラック型試験体製作データ

A p p e n d i x . III

疲労クラック型試験体製作データ

油圧サーボ型疲労試験機（島津サーボパルサー、EHF-ED10型）を用いて繰り返し曲げ応力を負荷し、疲労亀裂を発生、進展させることにより、疲労クラック型ノズルの試験片を製作する。試験体の製作は計3回実施しており、使用した材料は高クロム系3鋼種（Mod. 9Cr-1Mo鋼，9Cr-2Mo鋼，9Cr-1Mo-Nb-V鋼）である。

以下に疲労試験条件を示す。

- 負荷方式 : 4点曲げ、荷重制御
- 支点間距離 : Fig. III-1 に示す
- 荷重 : 最大 -6tonf, 最小 -1tonf
- 繰り返し速度 : 10Hz

(但し、亀裂貫通後は2~5Hz)

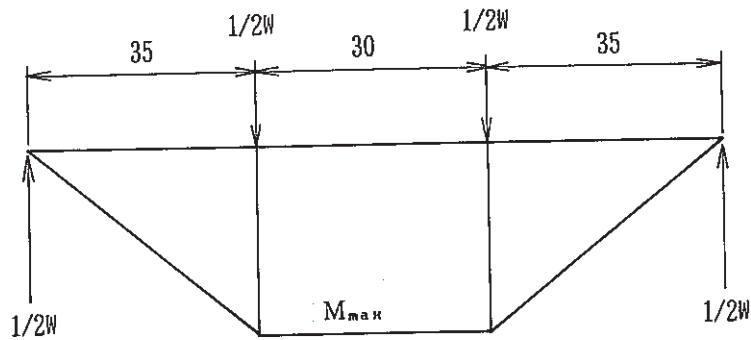


Fig. III-1 疲労試験モーメント図

尚、疲労試験中、試験片にはArガスにより $2\text{ kgf/cm}^2\text{g}$ の内圧を加えつつ、初期欠陥部外面に取りつけた圧力センサの出力を、試験機の制御系に入力することにより、貫通亀裂の発生と同時に試験機の作動を自動的に停止するようにした。

貫通亀裂発生後は、ただちにガスリーク試験によるリーク孔径の測定を行い、リーク孔径が所定の寸法に満たない場合には、更に一定回数の繰り返し荷重を負荷後、ガスリーク試験を行う操作を繰り返し、所定の寸法のリーク孔径を製作した。

これらの疲労試験の結果をTable. III-1、III-2、III-3に示す。この表でNfが貫通亀裂発生までの繰り返し回数を示し、Nxが所定の孔径までの繰り返し回数である。また同時に亀裂寸法の測定結果も記載する。亀裂幅はほぼ中央部で測定し、亀裂長さは弦長を測定した。

Table. III-1 微小リークノズル試験体製作時の疲労試験結果
 (第1回目)
 (Mod. 9Cr-1Mo鋼)

仕 様		疲 労 試 験			亀 裂 寸 法		
孔径 $\mu\text{m}\phi$	数	No.	Nf	Nx	孔径 μm	幅 μm	長さ mm
50~60	2	8	19611	2800	54.4	32	8.76
		7	23911	3200	52.0	26	7.06
60~70	3	5	22181	1600	65.0	37	6.80
		3	20405	2600	66.0	34	8.26
		12	24045	3000	64.0	33	7.70
70~80	3	13	20185	2510	73.0	37	7.37
		18	21789	3250	75.0	33	8.04
		15	22061	2300	74.6	37	7.74
80~100	2	11	23124	1800	98.3	44	9.77
		2	18484	2260	96.5	42	8.25
そ の 他 (予 備)		9	22398	3000	51.0	26	8.12
		19	25629	2740	59.0	36	7.98
		17	21839	2600	71.0	36	8.14
		16	23464	2720	80.0	34	7.60
		20	28626	3210	79.0	31	8.59

Table. III-2 微小リークノズル試験体製作時の疲労試験結果
(第2回目)

(Mod. 9Cr-1Mo鋼)

仕 様		疲 勞 試 験			亀 裂 寸 法		
孔径 $\mu\text{m}\phi$	数	No.	Nf	Nx	孔径 μm	幅 μm	長さ mm
20~30	1	1 M10	2 7 6 4 0	2 5 0	2 8. 0	3 0	6. 3 5
30~40	2	1 M 8	2 8 7 9 1	2 6 1 4	3 5. 0	2 8	6. 8 5
		1 M 9	2 3 5 2 0	2 5 2 9	3 0. 0	2 8	7. 3 7
40~50	2	1 M 4	2 5 3 2 1	1 3 0	4 8. 0	3 2	6. 4 9
		1 M 5	2 9 9 1 2	1 0 0	4 3. 0	3 4	6. 9 9
そ の 他		1 M 7	2 6 7 4 9	3 5 6 5	6 1. 0	3 9	7. 3 8

(9Cr-2Mo鋼)

仕 様		疲 勞 試 験			亀 裂 寸 法		
孔径 $\mu\text{m}\phi$	数	No.	Nf	Nx	孔径 μm	幅 μm	長さ mm
20~30	1	2 M 6	3 0 0 0 5	5 0 5	2 7. 0	4 2	7. 0 8
30~40	2	2 M15	1 4 7 2 8	8 1 6	3 7. 0	4 3	6. 7 4
		2 M18	2 6 9 5 0	1 8 0 3	3 4. 0	5 0	6. 9 3
40~50	2	2 M 9	9 3 9 3	3 8 5 4	4 4. 0	5 8	6. 4 0
		2 M19	2 3 7 0 6	6 8 5	4 2. 0	4 6	6. 5 6
50~60	2	2 M12	2 8 9 4 1	5 0	5 2. 0	6 3	6. 3 8
		2 M20	2 2 6 3 7	1 0 0	5 5. 0	5 1	6. 3 1
60~80	3	2 M10	3 0 7 8 0	4 1 5 6	6 8. 0	4 2	6. 6 2
		2 M16	2 4 4 8 6	1 5 3	7 6. 0	4 9	6. 3 8
		2 M17	2 2 8 7 2	1 1 3 3	6 1. 0	5 8	6. 9 6
80~100	2	2 M 4	2 4 4 2 6	5 0 0	8 2. 0	4 8	6. 5 9
		2 M11	2 4 3 4 0	9 2	8 0. 0	4 7	6. 5 1
そ の 他 (予 備)		2 M 1	3 9 6 8 1	0	1 4 0. 0	3 7	6. 6 0
		2 M 3	3 1 9 0 6	2 6 1 0	6 4. 0	3 4	7. 3 3
		2 M 5	3 0 0 4 5	1 0 0	7 6. 0	5 0	6. 4 4
		2 M 7	2 3 1 8 1	5 0	1 4 0. 0	6 0	6. 3 7

Table. III-3 微小リークノズル試験体製作時の疲労試験結果
(第3回目)

(9Cr-1Mo-Nb-V 鋼)

仕 様		T. P. No.	疲 労 試 験		亀 裂 寸 法			備 考
孔径 $\mu\text{m}\phi$	個数		Nf	Nx	孔径 μm	幅 μm	長さ mm	
20~ 40	3	5	2 1 8 0 5	2 5 0	3 6	2 8	6.07	
		1 5	2 2 1 6 1	6 5 5	3 4	3 1	6.46	
		1 7	2 4 3 3 1	1 5 3 6	2 8	2 4	6.46	
40~ 60	2	6	2 1 4 9 7	1 2 1 0	4 6	3 3	6.84	
		1 3	2 3 2 5 1	7 0 1	4 7	2 5	6.07	
60~ 80	3	4	2 1 5 1 3	2 4 3 4	7 6	3 2	6.15	
		1 2	2 6 4 0 1	6 7 2	6 8	3 4	6.95	
		2 3	2 4 2 0 5	1 5 1 8	7 1	3 3	6.54	
80~100	2	8	2 0 2 5 0	3 9 8	9 8	3 3	6.61	
		2 7	1 8 8 0 5	5 2 7	8 9	3 5	6.19	
解体検査	1	2 8	2 6 1 6 0	1 1 2 8	6 6	3 9	6.66	外 面
						8	3.79	内 面

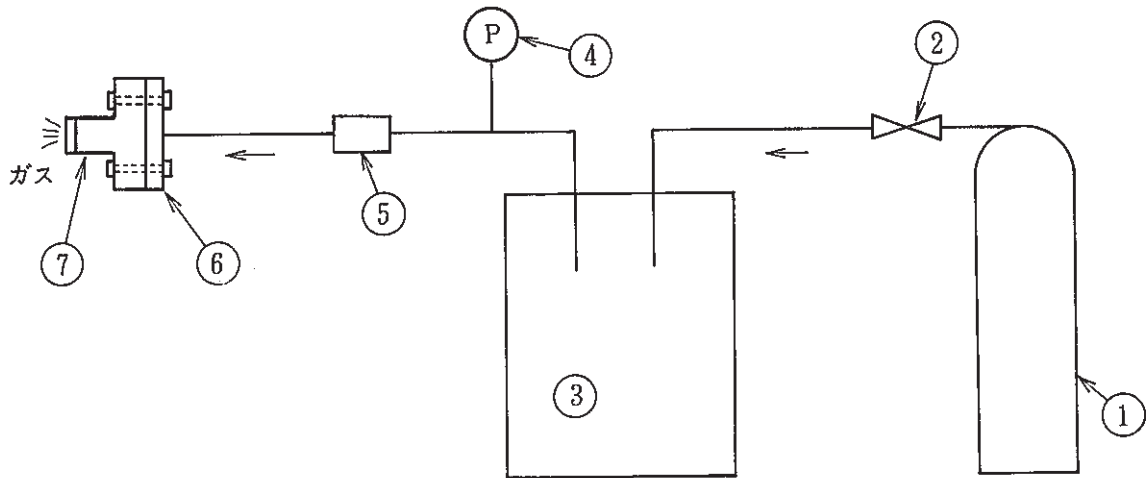
A p p e n d i x . I V

クラック部の等価孔径測定法

Appendix. IV クラック部の等価孔径測定法

下図の装置を使用して、ノズルから高圧のアルゴンを噴出させ、アルゴンの圧力が7.8 kg/cm²から6.8 kg/cm²に（極く微小孔径の場合は、7.8 kg/cm²～7.7 kg/cm²の範囲とする）減少するまでの時間から、既知の実験式を用いて円孔換算の孔径を算出する。

実験式は円孔に製作されたガラス製ノズル（孔径は光学顕微鏡によって拡大して実測した）を使用して、上述した装置、圧力範囲を基礎にした孔径 d と時間 t の関係から求められた。次ページにこの実験式とガラス製ノズルから得られた関係図を示す。



- | | |
|------------------------------|--------------------------------|
| ① スーパーアルゴン | ② レギュレータ |
| ③ バッファタンク | ④ 精密圧力計 0～10kg/cm ² |
| ⑤ フィルタ (SUS304 300メッシュ 3枚重ね) | ⑥ フランジ、Oリングシール |
| ⑦ 供試体 (クラック状貫通欠陥) | |

(注) ②～⑥までの容積 1100cc

Fig. IV-1 リーク孔径測定用装置

実験式

$$d = \left\{ \frac{\ln(7.8/P)}{3.4 \times 10^{-9} \times t} \right\}^{1/2.189}$$

t : 圧力が7.8 kg/cm²の時点からリークの時間 (sec)

P : 時間 t sec後のアルゴン圧力 (kg/cm²)

d : 円孔換算の直径 (mm)

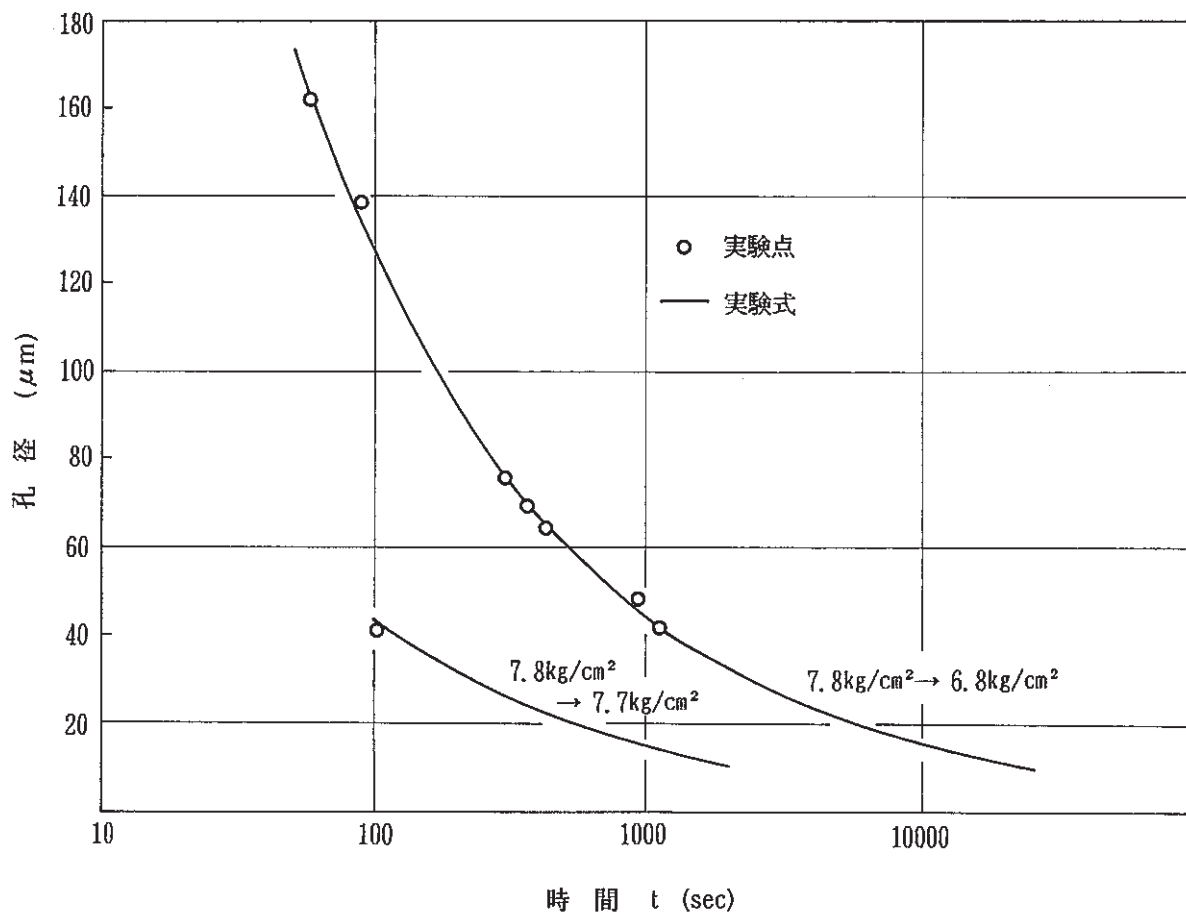


Fig. IV-2 圧力7.8 kg/cm²から6.8(7.7)kg/cm²まで減少するまでに要する時間と円孔径の関係