

高速炉蒸気発生器伝熱管  $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$  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)

1980年6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)

1980年6月

# 高速炉蒸気発生器伝熱管 $2\frac{1}{4}$ 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)

報告者	黒羽光男*
	井上設生*
	大後美道**
	佐藤稔*

## 要旨

高速増殖炉「もんじゅ」蒸気発生器伝熱管の候補材料である $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼を対象に、微小水リーク時のリーク孔自己拡大(セルフウェステージ)現象を調査するための試験が、動燃大洗工学センタ SWAT-2 装置を使用して実施された。試験範囲はナトリウム温度 480°C, 水リーク率  $1.6 \times 10^{-5} \sim 2.3 \times 10^{-1}$  g/sec である。

本試験により次の成果が得られた。

- (1) 水リーク率  $L_{R1}$ (g/sec) とセルフウェステージ率  $S_{R1}$ (mm/sec) には、次の関係式が成立する。  

$$S_{R1} = 0.0173 L_{R1}^{0.58}$$
- (2) セルフウェステージはナトリウム側から発生して水側に進行し、水側に到達した時点でリーク率が急増する。
- (3) セルフウェステージによる拡大形態で特徴的なことは、ナトリウム側の拡大孔径の方が水側よりも数倍程やや不連続的に大きい二重構造を有することである。
- (4) リーク孔の最小拡大孔径は 0.45~1.3 mm $\phi$  で、リーク孔拡大比は水リーク率の小さいもの程大きい傾向にある。

\* 大洗工学センター・蒸気発生器開発部・蒸気発生器安全性試験室

\*\* FBR 開発本部・蒸気発生器グループ

PNC TN941 80-135  
Jun., 1980

Preliminary Study of Micro-Defect Self-Wastage on 2 1/4Cr-1Mo Steel Nozzles for LMFBR Steam Generators

- Studies of Micro-Leak Sodium-Water Reactions (1) -

Mitsuo Kuroha,\*  
Setsunari Inoue,\*  
Yoshimichi Daigo,\*\*  
Minoru Sato\*

Abstract

Experimental study on self-enlargement of a micro-defect was carried out using SWAT-2 test loop in order to establish the counter-plan for the micro-water leak in the LMFBR steam generators. The leak nozzles were made of 2 1/4Cr-1Mo steel which will be used as the heat transfer tube in the evaporator. The sodium temperature was fixed at 480°C and the initial leak rates were chosen within the range of  $1.6 \times 10^{-5}$  g/s to  $2.3 \times 10^{-1}$  g/s.

Main results of the experiments are as follows:

- (1) The self-wastage rate  $S_{R1}$  (mm/sec) is dependent on the water leak rate  $L_{R1}$  (g/sec), and the relation is expressed as following equation.

$$S_{R1} = 0.0173 L_{R1}^{0.58}$$

- (2) The post test micrographs show that the self-enlargements started from the surface of sodium side, developed toward the water side, and finally the leak rates increased suddenly.  
(3) It is a characteristic of the self-wastaged holes that enlarged diameters of the sodium side are several times as large as that of the water side.

---

\* Steam Generator Safety Section, Steam Generator Development Division, O-arai Engineering Center, PNC.

\*\* Fast Breeder Reactor Development Project, Steam Generator Groupe.

- (4) The minimum diameters of the enlarged nozzles were measured within 0.45mm to 1.3mm, and the enlargement ratios of nozzle diameters increased as the water leak rates decreased.

## 目 次

1. まえがき .....	1
2. 試験装置 .....	2
2.1 SWAT-2 装置の概要 .....	2
2.2 微小リーキ注水装置 .....	2
2.3 微小リーキノズル .....	3
3. 試験方法 .....	4
3.1 注水方法 .....	4
3.2 試験条件 .....	4
3.3 拡大リーキ孔の観察方法 .....	5
4. 試験結果 .....	6
4.1 Run 2008-1 試験結果 .....	7
4.1.1 注水試験 .....	7
4.1.2 拡大リーキ孔の観察 .....	7
4.2 Run 2009-1 試験結果 .....	7
4.2.1 注水試験 .....	8
4.2.2 拡大リーキ孔の観察 .....	8
4.3 Run 2010-1 試験結果 .....	8
4.3.1 注水試験 .....	8
4.3.2 拡大リーキ孔の観察 .....	9
4.4 Run 2011-1 試験結果 .....	10
4.4.1 注水試験 .....	10
4.4.2 拡大リーキ孔の観察 .....	10
4.5 Run 2012-1 試験結果 .....	11
4.5.1 注水試験 .....	11
4.5.2 拡大リーキ孔の観察 .....	11
4.6 Run 2014-2 試験結果 .....	12
4.6.1 注水試験 .....	12
4.6.2 拡大リーキ孔の観察 .....	12
5. 試験結果の検討 .....	14
5.1 セルフウェステージ率の検討 .....	14
5.2 セルフウェステージ拡大孔径の検討 .....	14
5.3 リーキ孔径拡大推移の検討 .....	15

6. まとめ .....	17
参考文献 .....	18

## 1. まえがき

ナトリウム冷却高速炉の蒸気発生器（以下 SG）に生じるナトリウム－水反応現象の中で、微小リーク領域において伝熱管の水リーク孔自体が拡大する現象（セルフウェステージ）がある。この現象は伝熱管壁に或リーク率の貫通欠陥が生じ、継続して水リークが生じた場合に初期リーク率が必ずしも保たれず、リーク率が増大する場合があることを意味している。このことは、ナトリウム中水素計の感度以下の微小なリーク率から開始したとしてもセルフウェステージによりリーク孔拡大が生じて、さらに大きなリークに発展することを示唆するものである。そしてリーク孔拡大の挙動によっては小リークを飛越えて中リークへ拡大する可能性を秘めている。

初期欠陥が微小リーク領域から発生する確率が高いこと、かつ、セルフウェステージ挙動が上述のように SG 伝熱管の破損伝播の規模を左右するかもしれないことを考えると、本現象を把握することは SG の安全性評価の観点から重要なことである。

小リーク領域でのセルフウェステージによるリーク孔拡大現象は小リーク・ナトリウム－水反応試験装置（以下 SWAT-2）の注水用ノズル部の観察で確認されている。これらは小リーク・ナトリウム－水反応試験研究第 7 報<sup>1)</sup>でステンレス鋼（SUS 304）ノズルの拡大後の孔径、拡大時間等が報告されている。

本書は、もんじゅ SG の蒸発器伝熱管と同材質の  $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼を使用して、微小リーク領域のセルフウェステージに関する予備試験の結果を記述したものである。微小孔径ノズルの製作上の困難さ、またこのリーク率の領域では試験中にしばしばノズルが閉塞するという試験実施上の困難さから制約が多く、データ数はあまり多くとれなかった。しかしながら、注水試験データおよび試験後に実施したノズル部断面の金属学的観察結果等から、 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼の微小リーク領域におけるセルフウェステージ現象について、多くの知見が得られたので報告する。

## 2. 試験装置

本試験は全て SWAT-2 装置とこれに付属する微小リーク注水装置とを用いて実施された。  
SWAT-2 装置および運転法の詳細な説明は小リーク・ナトリウム-水反応試験研究第 1 報<sup>2)</sup> 第  
<sup>3)</sup> 2 報<sup>3)</sup> を参照されたい。

### 2.1 SWAT-2 装置の概要

図 2.1 に SWAT-2 装置の系統図を示す。ループは主循環系、微小リーク注水装置、純化系、水リーク検出系、ガス系およびドレン系から構成される。

主循環系は電磁ポンプ、電気式主加熱器、微小リーク用反応容器、空気冷却器などから構成される。微小リーク領域の注水試験時には、高圧水が微小リーク注水装置によって反応容器内のナトリウム中に注入される。図 2.2 に微小リーク用反応容器断面構造図を示す。

純化系はエコノマイザとコールドトラップから構成され、ループ内のナトリウム純度を管理するために使用される。

水リーク検出系は、PNC 型ナトリウム中水素計 2 号機 MK-III<sup>4)</sup>、ナトリウム中酸素計 (WH 社製 1 基、GE 社製 1 基) および O-H モジュール・リーク検出計が図 2.1 に示されるループ各部に設置される。

運転時にはダンプタンクよりループに約 600 ℥ のナトリウムをチャージし、ナトリウムを所定の温度に昇温する。その後、コールドトラップ制御温度約 120°C でナトリウムを純化し、コールドトラップ隔離後反応容器内のナトリウム中に試験体である微小孔径のノズルから注水して、材料ウェステージの試験を行うものである。

### 2.2 微小リーク注水装置

図 2.3 に微小リーク注水装置の系統図を示す。注水配管は各注水ノズルに対応して独立に 6 系統で構成され、WV-1~6 の弁によって注水する試験ノズルを選択することができる。注水系のスケールによるノズル孔の閉塞を防止するために、10 μm のフィルタ F-1, F-2 が Ar ガス供給系および給水系の出口に各々取付けられている。この Ar ガス供給系からの Ar ガス供給ノナトリウム中へのバブリングにより、注水試験前後にノズル孔をナトリウムの侵入から保護する。その他に高圧負荷用の He ガス供給系および真空引き系が設けられている。

図 2.4 に高圧型透視式水面計 (サイトグラス) を示す。これは注水槽を兼ねており、液位の変化を目読して注水率を測定するためのものである。図 2.3 に示されるように He ガス供給系と注水配管との間に No.1 と No.2 サイトグラスの 2 本が設置されている。これら 2 本のサイトグラスは両者とも内径 4 mm の管 2 本の連結型であり、長さは No.1 が 2,030 mm で、No.2 が 930 mm である。No.2 は主として注水直前に Ar ガス切換点までの注水ラインの水充填用に使用され、

No. 1 は注水中の液位変化を読取ることに使用される。

図 2.5 および図 2.6 に No. 1 および No. 2 サイトグラス液位と水重量との較正曲線を示す。図 2.5 をもとに水リーク率と No. 1 サイトグラス液位低下速度の関係を示したのが図 2.7 である。

### 2.3 微小リークノズル

図 2.8 に本試験に使用されたノズル台を含めた微小リークノズルの形状を示す。本セルフウェステージ試験は微小リーク・ウェステージ試験の一環として実施された関係で、ノズル台は図 2.2 に示すノズル・ターゲット・アセンブリのノズル台支持板に組みめる構造になっている。ノズル部は SG の伝熱管と同材質の  $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$  鋼であり、ノズル台の材質は注水管と同一の SUS 304 である。ノズルとノズル台との接合はノズルを支持台にネジ込んで円周部を隅肉溶接する構造である。

ノズル部の微小孔は放電加工によって製作された。写真 2.1 は注水試験前のノズル孔サンプル（公称値  $0.04\text{mm}\phi$ ,  $0.5\text{mm}\text{t}$ ）とその縦断面後の金相写真である。孔明け加工時の受熱によって、金属組織が母材と比較して特に変化したところはない。孔内面は放電溶融後の滑らかな表面状態であった。

各試験に対して使用されたノズルの初期口径  $D_0$  と深さ  $L_0$  は表 4.1 に示されている。

### 3. 試験方法

#### 3.1 注水方法

ナトリウム・チャージから注水開始までの期間は、ノズル閉塞防止のために微小リーク注水装置の保護ガス系（図2.4参照）を使用してノズル先端からArガスを常時噴出させる。

注水操作は、ナトリウム純化運転によりループ内ナトリウム中水素濃度が一定状態であることをPNC型ナトリウム中水素計により確認し、保護ガス系から注水系に弁を切換えることによって行う。またナトリウム純化系は注水前に主ループから切離される。これはナトリウム-水反応生成物がコールドトラップに捕獲されて後述する水素計による注水率の算定およびリーク孔拡大時点の検出が不可能になるのを防ぐためである。

注水中はサイトグラス液位の変化を定期的に読取ると同時に、ナトリウム中水素計の出力変化を注視する。

ナトリウム中水素計の出力変化率が急激に変化すれば、リーク孔の拡大が生じたと判断して注水を停止する。同時に注水配管内の残留水のためにリーク孔拡大が促進するのを防止するために、残留水の大気ブローを行う。大気ブローが終了した時点で、注水系にArガス系からArガスを供給し、注水系へのナトリウムの侵入を防止する。

#### 3.2 試験条件

表3.1に本試験範囲で実施された試験条件を示す。これらの条件が決定された根拠は次の通りである。

ノズル材質はSGの伝熱管に採用されているステンレス鋼と $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼について試験する必要がある。ターゲットウェステージ耐性はステンレス鋼の方が $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼よりも数倍強い。従ってセルフウェステージによるリーク孔拡大が発生した場合、ステンレス鋼伝熱管よりも $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼伝熱管の方が被害が大きくなると予想される。このため安全性評価の点から $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼が最初に選択された。

初期水リーク率がセルフウェステージ率に及ぼす効果を調査することは本試験の主目的である。このため可能な限り広範囲の水リーク率で実験するように考慮した。ノズル孔径Doは製作技術上の限界である0.04mmまでのものを製作した。

ノズル深さLoは意図的に可変条件としたものではない。本来は実機の伝熱管肉厚である3.2から3.8mmの範囲とすべきものである。しかし0.04mmのような極微小円孔になるに従い、製作技術上の困難さからノズル厚さも0.5mmの薄さにならざるを得なかった。

ナトリウム温度もセルフウェステージ試験に関して重要なパラメータである。しかしノズルが高価格であるため、限られた本数では温度までパラメータにとることができなかつた。セルフウェステージはナトリウム温度が高い程大きい。これらのことから安全性評価の点でナトリ

ウムの試験温度は実機運転の最高温度として、これに相当する 480°C 一定とした。

初期水リーク率は次式<sup>4)</sup>を用いて孔径、圧力および温度を与えて算定した。

$$G = \frac{\pi}{4} d^2 f \sqrt{g k \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \frac{P_1}{V_1}} \quad (3.1)$$

但し  $G$  : リーク率 ( $\text{kg/sec}$ )

$d$  : 孔 径 ( $\text{m}$ )

$g$  : 9.8 ( $\text{m/sec}^2$ )

$k$  : 比熱比 (-)

$f$  : オリフィス係数 1 (-)

$P_1$  : 蒸気圧力 ( $\text{kg/m}^2$ )

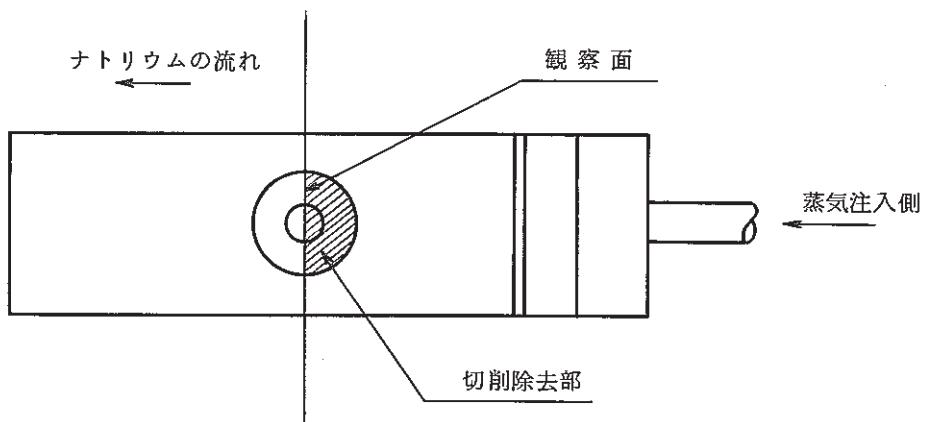
$V_1$  : 比容積 ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )

### 3.3 拡大リーク孔の観察方法

注水試験後、供試体である注水ノズルを反応容器からとりだし、アルコール洗浄を行う。

セルフウェステージ部を含むノズル孔部全体の拡大観察は、ナトリウム側から実体顕微鏡を使用して行う。

その後、下図に示される通り、蒸気注入側とナトリウム側の断面が観察できるようにノズル部を半分に切断する。次にノズル部をノズル台より切離し、ノズル孔中心部まで研磨する。研磨面の状態で、下図の観察面側から光学顕微鏡を使用してセルフウェステージ部断面へ観察を行う。



## 4. 試験結果

前章の試験条件に従って計6ケースの微小リーク試験を実施した。これらの注水試験時のリーク検出計出力およびサイトグラス液位の変化からリーク孔拡大時間を求めた。また注水試験後に拡大リーク孔の顕微鏡観察を行い、セルフウェステージ形状を測定した。

なお表4.1に各試験条件およびその結果をまとめて示す。

本章および表4.1中の各用語の定義は次の通りとした。

$$1\text{次水リーク率 } L_{R1} = \frac{W_1}{t_1}$$

$$2\text{次水リーク率 } L_{R2} = \frac{W_2}{t_2}$$

$$1\text{次水リーク率拡大比} = \frac{L_{R2}}{L_{R1}}$$

$$2\text{次水リーク率拡大比} = \frac{L_{R3}}{L_{R2}}$$

$$1\text{次セルフウェステージ率 } S_{R1} = \frac{L_1}{t_1} \text{ or } \frac{L_0}{t_1}$$

$$2\text{次セルフウェステージ率 } S_{R2} = \frac{L_0}{t_2}$$

$$1\text{次セルフウェステージ拡大孔径比} = \frac{D_1}{D_0}$$

$$2\text{次セルフウェステージ拡大孔径比} = \frac{D_2}{D_0}$$

但し、

$W_1$  : 1次(最初の)リーク孔拡大までの注水量

$W_2$  : 1次リーク孔拡大から2次(2回目の)リーク孔拡大までの注水量

$t_1$  : 1次リーク孔拡大までの時間(未拡大の場合は全注水時間)

$t_2$  : 1次リーク孔拡大から2次リーク孔拡大までの時間

$L_{R3}$  : 2次リーク孔拡大後の水リーク率

$L_0$  : 初期ノズル深さ

$L_1$  : 1次セルフウェステージ深さ(未拡大の場合)

$D_0$  : 初期ノズル孔径

$D_1$  : 1次セルフウェステージ拡大孔径

$D_2$  : 2次 ノズル孔径

#### 4.1 Run 2008-1 試験結果

本試験には初期ノズル径が  $0.04 \text{ mm} \phi$ 、ノズル厚さが  $0.5 \text{ mm}$  の薄肉、極微小孔径のノズルが使用された。

##### 4.1.1 注水試験

注水圧力は  $102 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$  で実施された。

図 4.1 は注水開始から注水停止までのサイトグラス No.1 の液位の変化を目視で読み取り、この値をプロットしたものである。リーク拡大後は液位の変化が大きすぎ、読み取り精度が悪いので点線で示した。最後の点は注水停止後の静定した液位である。

図 4.2 は図 4.1 と同様に PNC 型ナトリウム中水素計の出力変化を示したものである。図に示されるように注水後 265 秒で最初に水リーク率が急増し（リーク孔 1 次拡大）、さらに 2 回目の水リーク率の急増（リーク孔 2 次拡大）が 1 次拡大後の 45 秒で発生した。従って注水開始からリーク孔 1 次拡大までの 1 次セルフウェステージ率は  $1.9 \times 10^{-3} \text{ mm/sec}$  である。

図 4.2 をもとに図 2.7 から水リーク率の変化に換算したのが図 4.3 である。水リーク率の拡大比および拡大点はサイトグラスの読み取りデータが無いので、図 4.2 のナトリウム中水素計出力の変化から求めた。すなわち、本試験では 1 次水リーク率  $2.2 \times 10^{-2} \text{ g/sec}$  で注水され、リーク孔の 1 次拡大により  $7.8 \times 10^{-2} \text{ g/sec}$  に増加し、さらに 2 次拡大により  $3.4 \times 10^{-1} \text{ g/sec}$  に急増した。

リーク孔が 1 次拡大するまでに  $5.8 \text{ g}$  が注水され、注水停止までの総注水量は  $30.8 \text{ g}$  であった。

##### 4.1.2 拡大リーク孔の観察

写真 4.1 は注水試験後の拡大したノズル孔を実体顕微鏡を使用して、ナトリウム側から拡大観察したものである。

写真 4.1 は試験後のノズル損耗部を縦割にし、その平面部および断面部を光学顕微鏡観察したものである。このリーク孔 2 次拡大後の孔は初期ノズル位置から大きく偏心しており、形状は長円に近い。写真 4.2 をもとに寸法測定されたスケッチが図 4.4 である。この結果は長径が  $1.5 \text{ mm} \phi$ 、短径が  $1.1 \text{ mm} \phi$  であった。面積が等価な円を考えると、その直径は  $1.3 \text{ mm} \phi$  と算出される。

#### 4.2 Run 2009-1 試験結果

本試験に使用されたノズル形状は初期ノズル孔径が  $0.08 \text{ mm} \phi$ 、ノズル深さが  $1 \text{ mm}$  のものである。これは前回の Run 2008-1 試験に使用されたノズルと比較して、ノズル孔径および深さ共 2 倍である。

#### 4.2.1 注水試験

注水圧力は 50 kg/cm<sup>2</sup>G で実施された。

図 4.5 は注水開始からリーク孔拡大までのサイトグラス No.1 の液位変化を示したものである。また図 4.6 はナトリウム中水素計のイオンポンプの出力変化を示したものである。これら両者の変化のパターンは良く一致しており、リーク孔の 1 次拡大が注水開始後 1,200 秒、2 次拡大が注水開始後 2,148 秒に発生したと判断される。従って 1 次セルフウェーステージ率は  $8.44 \times 10^{-4}$  mm/sec, 2 次セルフウェーステージ率は  $4.66 \times 10^{-4}$  mm/sec と算出される。

図 4.7 は図 4.5 のサイトグラス液位変化から注水率に換算したものである。注水開始から 1 次リーク孔拡大までの 1 次水リーク率は  $6.67 \times 10^{-3}$  g/sec であり、1 次リーク孔拡大から 2 次リーク孔拡大までの 2 次水リーク率は  $1.25 \times 10^{-2}$  g/sec であった。従って 1 次水リーク率拡大比は約 1.9 となる。注水停止直前の水リーク率は 0.49 g/sec にまで増大しており、1 次水リーク率を基準とした 2 次水リーク率拡大比は約 39 と大きな値となる。

1 次リーク孔拡大までの注水量は 0.25 g/cm の関係から約 8 g であり、2 次リーク孔拡大までの注水量は注水開始から約 19.5 g であった。また注水停止までの全注水量は約 43.8 g であった。

#### 4.2.2 リーク孔拡大の観察

写真 4.3 は注水試験後の拡大したノズル孔をナトリウム側から拡大観察したものである。

写真 4.3 は試験後のノズル損耗部を縦割りにし、その 2 次拡大後の断面部および断面後のナトリウム側平面部を顕微鏡観察したものである。セルフウェーステージ部の孔径はナトリウム側の方が水側よりも大きく、セルフウェーステージがナトリウム側から水側へ進行したことを示している。ナトリウム側のセルフウェーステージ形状は円ではなく、複雑な形状となっている。

図 4.8 は写真 4.3 をもとにセルフウェーステージ各部の寸法測定結果を示したものである。リーク孔 2 次拡大後の孔径は最小孔径である水側 D<sub>2</sub> の約 1.2 mm とした。従って初期ノズル孔径 D<sub>0</sub> が 0.08 mm であるから、リーク孔 2 次拡大比 D<sub>2</sub>/D<sub>0</sub> は約 15 である。面積比から推測される 2 次水リーク率拡大比 (D<sub>2</sub>/D<sub>0</sub>)<sup>2</sup> は 225 となる。

### 4.3 Run 2010-1 試験結果

本試験に使用されたノズル形状は初期ノズル孔径が 0.25 mm で、ノズル深さが 3.6 mm のものであった。

#### 4.3.1 注水試験

注水圧力は 50 kg/cm<sup>2</sup>G 一定で実施された。

図 4.9 に注水弁開から注水停止までのナトリウム中水素計出力信号の変化を示す。注水弁が開かれてもノズル孔が閉塞したために最初は注水がされなかった。この間イオンポンプ出

力が緩慢に上昇しているのは、純化系を隔離したために系内水素濃度の収支がくずれたからである。ノズル孔の閉塞が再開口されたのは、注水弁が開かれてから約45分経過後であった。水素計出力の上昇過程から、閉塞物の解凍は最初は、その一部分であったと思われる。その後次々と閉塞物が解凍されて、約115分後からは水素計出力信号が急上昇し、やっと約150分後に上昇率が安定した。169分後頃にはナトリウム中水素濃度が水素計イオンポンプの作動範囲を越える恐れがでてきたため、リーク孔の拡大を待たずに注水を停止した。

図4.10に注水弁開以後の水リーク率の変化を示す。これは図4.9の水素計出力信号から算出されたものである。初期の水リーク率は $2.1 \times 10^{-5} \text{ g/sec}$ であったが、これは0.25mmφのノズル孔径の割には非常に小さい。この理由は前述したようにノズル孔に閉塞物があり、水の通過が妨げられたためと思われる。注水開始後約80分経過してからは、水リーク率が加速度的に増加した。注水時間の経過と共に閉塞物がどんどん溶解されたのであろう。約124分後には最大の水リーク率である $7.8 \times 10^{-3} \text{ g/sec}$ に達した。注水開始から停止までの全注水量は9.06gであり、この間の7,420秒間の1次水リーク率は $1.22 \times 10^{-3} \text{ g/sec}$ であった。

#### 4.3.2 拡大リーク孔の観察

写真4.5は注水試験後の拡大したノズル孔をナトリウム側から拡大観察したものである。ピット状に大きくセルフウェステージされている。

写真4.3は注水試験後のノズル損耗部を縦割りにし、その平面部と断面部と顕微鏡観察したものである。図4.11は写真4.3をトレースし、寸法測定の結果を示すものである。写真4.3はセルフウェステージがナトリウム側から水側へと進行の途中で注水が停止されたために、リーク孔の拡大が完全に水側にまで達しなかったことを示している。ナトリウム側の拡大部の孔径は拡大部の先端のものと比べて5倍近く大きい。この形状はカクテルグラスの上に皿を置いたような2段階形状になっている。1次セルフウェステージ率は、注水時間の7,430秒で2.8mm（ノズル深さの78%）に達したことから約 $3.8 \times 10^{-4} \text{ mm/sec}$ と算出される。図4.11の1次セルフウェステージ形状が保たれたまま残りのノズル深さ0.8mmを貫通すると仮定すれば、1次セルフウェステージの拡大孔径 $D_1$ は最大の場合でもその先端の長円部の最大径にはほぼ等しいであろう。この場合は $D_1$ は0.8mmφである。初期リーク孔径0.25mmφから拡大するとして、1次リーク孔拡大比は約3.2となる。この値から推測される水リーク率拡大比は約10である。

ナトリウム側の大きく拡大したセルフウェステージは発生時期が不明であるが、深さ約0.5mm、孔径が約3.7mmφであった。

#### 4.4 Run 2011-1 試験結果

本試験で使用されたノズルは初期ノズル孔径  $0.04 \text{ mm} \phi$  , ノズル深さ  $0.5 \text{ mm} \phi$  のもので, Run 2008-1 試験のノズルと同一である。

##### 4.4.1 注水試験

より小さいリーク率を得るために, 注水圧力は  $50 \text{ kg/cm}^2 G$  で実施された。

ナトリウム中水素計の出力では, 注水開始から一定の勾配で上昇し, 279分経過後にリーク孔拡大によると判断される出力の急上昇が観察された。図4.12にそのリーク孔拡大時におけるイオンポンプの出力変化を示す。1次セルフウェステージ率は  $3.0 \times 10^{-5} \text{ mm/sec}$  である。

本試験ではサイトグラスが不調であったために, 液位の変化は記録されていない。このため水リーク率は次のようにナトリウム中水素計の出力信号(図4.12)の上昇率から算出された。

純化系が停止されている場合(本試験中はこの処置がとられる), ナトリウム中水素濃度の上昇と水リーク率は次式の関係がある。

$$\frac{\Delta C_{\text{NH}}}{\Delta t} = \frac{\phi \frac{1}{g} G \times 10^{-3}}{W} \times 10^6 \quad (4.1)$$

$\Delta C_{\text{NH}}$  [ ppm ] ;  $\Delta t$  時間に上昇する水素濃度

$W$  [ kg ] ; SWAT-2 主系統内 Na 容量  $167 \text{ kg}$

$\phi$  [ - ] ; 水素溶解割合  $1$

$G$  [ g/sec ] ; 求めようとする水リーク率

水素計の出力信号であるイオンポンプ出力  $I_P$  [  $\mu\text{A}$  ] から, 水素濃度  $C_{\text{NH}}$  [ ppm ] は次の較正曲線から求められる。

$$C_{\text{NH}} = 5.44 \times 10^{-2} I_P^{0.678} \quad (4.2)$$

(4.1)式と(4.2)式を用い,  $\Delta I_P / \Delta t$  から注水開始後の水リーク率を算出したのが図4.13である。リーク孔拡大までの初期水リーク率は  $1.56 \times 10^{-5} \text{ g/sec}$  と非常に小さかったが, 拡大後の水リーク率は  $3.8 \times 10^{-2} \text{ g/sec}$  にまで急上昇した。従って, 1次水リーク率拡大比は 2,470 となる。その後  $1.3 \times 10^{-2} \text{ g/sec}$  から  $5 \times 10^{-3} \text{ g/sec}$  へと段階的に水リーク率が低下し, 拡大後 13.5 分で注水を停止した。

ナトリウム中水素濃度の増加からリーク孔拡大までの注水量は  $0.26 \text{ g}$ , 注水弁閉までの全注水量は約  $10 \text{ g}$  であった。

##### 4.4.2 拡大リーク孔の観察

写真4.7は注水試験後の拡大したノズル孔をナトリウム側から拡大観察したものである。大きく拡大したノズル孔の周辺部は変色しており, ナトリウム-水反応生成物によりアタッ

クを受けたことを示している。

写真4.8は注水試験後のノズル損耗部を縦割りにし、その平面部、断面部を顕微鏡観察したものである。ノズル孔はセルフウェステージによって完全に拡大しており、拡大孔の形状はナトリウム側および水側ともほぼ円形であった。

図4.14は写真4.8をもとにセルフウェステージ形状の輪郭をトレースし、寸法測定した結果である。1次リーク孔拡大部の最小孔径 $D_1$ (水側の拡大孔径)は $0.85\sim1.0\text{ mm}\phi$ で、ナトリウム側の拡大孔径 $D'_1$ は $1.84\sim1.7\text{ mm}\phi$ であった。 $D'_1$ は深さ $0.15\text{ mm}$ (ノズル深さの約30%)に達しており $D_1$ と比較して約2倍である。またナトリウム側に極く浅く減肉された領域は径 $3.8\text{ mm}\phi$ の広範囲にわたっていた。このように1次の微小リーク中に2重、3重のリーク孔拡大部が生じていた。

#### 4.5 Run 2012-1 試験結果

本試験に使用されたノズルの形状はノズル深さが $3.6\text{ mm}$ 、初期ノズル孔径が $0.2\text{ mm}\phi$ のもので、これまでのものと比較して厚肉で、孔径は大きい。

##### 4.5.1 注水試験

本ノズルで微小水リーク率を得るために、水注入圧力は $42\text{ kg}/\text{cm}^2\text{G}$ で実施された。

図4.15に注水弁開から注水停止までのナトリウム中水素計の出力変化を示す。注水開始と同時に水素計の出力は上昇の一途を示した。リーク孔拡大が発生する前にナトリウム中水素濃度が $10\text{ ppm}$ となり、水素計イオンポンプの運転許容圧力範囲を越える恐れが出たために、注水開始後 $1,230\text{ 秒}$ で注水を停止した。注水を開始する以前から水素計出力が上昇しているのは、既にコールドトラップを隔離していたためである。この量は水素リーク率に換算しても $1\times10^{-12}\sim1\times10^{-11}\text{ g/sec}$ のオーダで無視できる程度である。

図4.16はサイトグラスの液位変化から水リーク率を求めたものである。同図では液位の変化が始まってから注水を停止するまでを示した。注水初期では水リーク率は一定でなく、注水開始から約 $700\text{ 秒}$ 経過する間に $2.3\times10^{-1}$ から $4\times10^{-2}\text{ g/sec}$ に低下した。これ以後の水リーク率は注水停止までほぼ一定の減少率で低下した。

注水停止までの全注水量は $34.1\text{ g}$ で、注水時間は $1,135\text{ 秒}$ だったので、1次水リーク率は $3.0\times10^{-2}\text{ g/sec}$ となる。

##### 4.5.2 拡大リーク孔の観察

写真4.9は注水試験後の拡大したノズル孔をナトリウム側から拡大観察したものである。ほとんど円錐孔に近い形状で拡大が生じている。

写真4.10は注水試験後のノズル損耗部を縦割りにし、その平面部、断面部を顕微鏡観察したものである。この写真をもとに形状の輪郭をトレースし、寸法測定した結果が図4.17である。セルフウェステージはナトリウム側から水側へ約 $3.4\text{ mm}$ の深さ(ノズル深さの約93%

%)まで進行し、リーク孔拡大が発生する直前であった。水側からは全くセルフウェステージは生じてなかった。注水時間は1,135秒だったので、1次セルフウェステージ率は $3.0 \times 10^{-3} \text{ mm/sec}$ となる。

セルフウェステージの断面形状は先端がふくらんのようなクサビ形をしている。水側から0.2mm離れたその先端の孔径が $0.45 \text{ mm} \phi$ であるのに対し、ナトリウム側から0.1mm程離れたクサビの付け根の孔径は $1.5 \text{ mm} \phi$ ある。この形状を保ちながらセルフウェステージが進行するとすれば、先端の孔径 $0.45 \text{ mm} \phi$ が拡大後の最大リーク孔径となる。この場合の1次リーク孔拡大比は2.25となる。従ってリーク孔拡大比から推定される水リーク率拡大比は約5となり、他のケースに比べて小さい。

ナトリウム側には深さ0.1mm程度で、浅いながらも直径 $3.7 \sim 4.0 \text{ mm} \phi$ にも及ぶ大きな孔径を有するウェステージが生じていた。この発生時期と成長の挙動は不明である。このセルフウェステージ形態はRun 2011-1の結果と非良に良く似ている。

#### 4.6 Run 2014-2 試験結果

本試験に使用されたノズルは初期ノズル孔径が $0.09 \text{ mm} \phi$ 、ノズル深さが2.3mmのものである。

##### 4.6.1 注水試験

本ノズルで微小水リーク率を得るために、注水圧力は $41 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ で実施された。

図4.18に注水弁開から注水弁閉までのサイトグラスの液位変化を示す。注水弁を開いた初期の段階では、ノズル孔が閉塞したために注水されなかった。閉塞孔を貫通させるために注水配管中の水を全量大気ブローし、再加圧したところ注水され始めた。これは注水弁を開いてから約4.8分程経過した時であった。ノズル孔閉塞の原因はノズル部水側に錆等の粒子が付着したためと思われる。その後、順調に注水が続き、サイトグラスの保水量がつきる直前で注水弁が閉じられた。

図4.19は図4.18のサイトグラス液位変化から求めた注水率の変化である。注水初期の段階では約 $5 \times 10^{-2} \text{ g/sec}$ の注水率であったが、約2分後には約 $3 \times 10^{-2} \text{ g/sec}$ の注水率に安定し、約18分持続した。

サイトグラスの液位変化からはリーク孔の拡大が発生していないと判断されたが、セルフウェステージの進行過程を観察する目的で再注水しなかった。全注水量は約38.9gであった。従って注水時間1,225秒の間の1次水リーク率は約 $3.2 \times 10^{-2} \text{ g/sec}$ となる。

##### 4.6.2 拡大リーク孔の観察

写真4.11は注水試験後の拡大したリーク孔をナトリウム側から拡大観察したものである。大きな円形ピットのさらに奥に小さなピットが存在した2重構造になっている。

写真4.12および写真4.13は注水試験後のノズル損耗部を縦割りにし、その断面部およびナトリウム側表面を顕微鏡観察したものである。写真4.12から判断してセルフウェステ

ージはナトリウム側から水側に向って進行し、水側に到達する途中であったことを示している。水側のノズル孔には全く拡大した様子が無い。弾丸状のセルフウェステージ先端形状とナトリウム側の浅いながらも孔径の大きなセルフウェステージ形状とが特徴的である。これらの形状は Run 2010-1, 2011-1 試験のノズル損耗形態と良く似ている。

ナトリウム側表面の 2 次セルフウェステージの周辺には反応生成物と思われるものが堆積している。

図 4.20 は 20 倍の顕微鏡写真をもとにセルフウェステージの輪郭をトレースし、寸法測定したものである。1 次セルフウェステージは約 1.1 mm (ノズル深さの約 50 %) まで進行した。注水時間は約 1,225 秒だったので、1 次セルフウェステージ率は  $9 \times 10^{-4} \text{ mm/sec}$  となる。1 次セルフウェステージ先端は直径 0.6 mm の球に近似できる。もしこの形状を保ってセルフウェステージが進行するとすれば、水側に到達する場合に生じるリーク孔の拡大径  $D_1$  は 0.6 mm であろうと推定される。この時の 1 次リーク孔拡大比は初期リーク孔が 0.09 mm のので約 6.7 となり、これから推定される水リーク率拡大比は約 44 となる。

ナトリウム側表面に生じた大きなウェステージは深さ 0.7 mm, 孔径 2.9 mm のであった。これは 1 次水リークが続行されれば、さらに発達すると思われる。

## 5. 試験結果の検討

第4章で示された試験結果をもとにセルフウェステージ率、セルフウェステージ拡大孔およびその拡大推移のモデル化について検討した。

### 5.1 セルフウェステージ率の検討

図5.1は1次水リーグ率に対する1次セルフウェステージ率の関係を示したものである。

図中には米国GE社のクラック・ポットで実施された同一材質、試験温度482°Cのデータ<sup>6)</sup>も点線で示した。このデータと比較して本試験結果は70%程セルフウェステージ率が小さいが、両者の曲線の傾きは非常に良く一致している。

本試験結果は次の関係式で表示される。

$$S_{R1} = 0.0173 L_{R1}^{0.58} \quad (5.1)$$

#### 記号の説明

$S_{R1}$  = 1次セルフウェステージ率 (mm/sec)

$L_{R1}$  = 1次水リーグ率 (g/sec)

上式を使用すれば、任意の伝熱管肉厚に対して480°Cにおけるリーク孔拡大までの時間を算出することができる。

### 5.2 セルフウェステージ拡大孔径の検討

図5.2に初期ノズル孔径 $D_0$ とセルフウェステージによる1次拡大孔径比 $D_1/D_0$ 、2次拡大孔径比 $D_2/D_0$ の関係を示す。 $D_0$ が大きい程 $D_1/D_0$ 、 $D_2/D_0$ の拡大比は小さくなる傾向であり、さらに外挿すれば $D_0$ が0.6mm以上で拡大比が1になると推定される。しかしながら微小リークの場合ノズル孔の局部的な閉塞かと思われる原因のために、製作されたノズル孔径から算出された予想水リーグ率と実際に測定された水リーグ率とが一致するとは限らず、本試験では大幅に異なった場合が6ケース中3ケースあった。

図5.1に示されるようにセルフウェステージ率は水リーグ率に依存することから、セルフウェステージの形態も水リーグ率に依存することが推定される。従って、リーク孔の自己拡大孔径は、初期ノズル孔径とともに実際の水リーグ率にも強く支配されると考えられる。

図5.3は上記の考えをもとに水リーグ率の影響を調査すべく、1次水リーグ率に相当するノズル孔径 $d$ を表4.1の各試験の蒸気条件をもとに式(3.1)から算出し、これと実際に発生したセルフウェステージ拡大孔径 $D_1$ 、 $D_2$ との関係を示したものである。 $D_1$ 、 $D_2$ は $d$ にほとんど依存していない。縦軸を拡大孔径比 $D_1/d$ 、 $D_2/d$ にとって $d$ との関係を示したのが図5.4である。図5.2と図5.4を比較すると、 $D_0$ が0.04~0.2mmの範囲であるのに対して $d$ は

0.002~0.093  $\text{mm} \phi$  と 1 桁小さい。そのため、拡大比  $D/d$  は  $D/D_0$  に対して、1 桁大きく値となるとともに、2 桁にまたがる広範囲なもの（5~360）になっている。

ノズル孔径が 1.5  $\text{mm} \phi$  の場合はセルフウェステージが全く発生しない<sup>1)</sup> というデータにもとづいて、 $d$  に依存しない  $D = 1.5$  の曲線を点線で図 5.2 および図 5.4 に示した。両図とも全データが点線以下にあり、分布の傾向もほぼ点線に沿っているが、 $d$  で整理した図 5.4 の方がより点線に合致している。また注目すべきは 2 次セルフウェステージにまで発展した Run 2008-1, 2009-1 の 2 ケースは点線に最も近く、一方ノズル深さが深く、そのため 1 次セルフウェステージが完全に完了しなかった Run 2010-1, 2012-1 および 2014-2 の 3 ケースは拡大比（推定値）が点線より小さいことである。おそらくは、これら 3 ケースとも注水を続けていれば、1 次から 2 次リーク孔拡大にまで発展し、最終的な拡大孔径比は点線に近づくものと推定される。

これらのことから、セルフウェステージによる拡大孔径には上限としての最大値があり、その値は 1.5  $\text{mm} \phi$  前後にあるものと思われる。

### 5.3 リーク孔径拡大推移の検討

注水試験後のノズル断面を観察した写真 4.1~4.13 をもとに、セルフウェステージによるリーク孔拡大の進行過程をモデル化したのが図 5.5 の(a)~(f)である。

各図の説明は次のとおり、

- (a) ; 注水前のノズル初期状態である。
- (b) ; 1 次水リーク開始とともに 1 次セルフウェステージがナトリウム側から水側へ進行開始する。
- (c) ; 1 次セルフウェステージが水側に到達する前に、さらに孔径の非常に大きなセルフウェステージがナトリウム側に発生し、1 次セルフウェステージ拡大孔径は不連続となる。
- (d) ; 1 次セルフウェステージが水側に到達し、リーク孔の 1 次拡大が完了する。
- (e) ; さらに注水が続行されれば、2 次拡大水リークによって新たな 2 次セルフウェステージがナトリウム側から進行を開始する。(c)で発生した 1 次水リークによってナトリウム側に大きく拡大したセルフウェステージはこの段階では進行を停止している。
- (f) ; 2 次セルフウェステージがナトリウム側から水側へ進行する。
- (g) ; 2 次セルフウェステージが水側に到達し、リーク孔の 2 次拡大が完了する。

写真 4.6, 4.10 および 4.12 をモデル化したのが(e)であり、写真 4.8 をモデル化したのが(f)である。1 次水リークのみで(c), (d)に示される二重ピット状の 1 次セルフウェステージが発生することが特徴である。0.2  $\text{mm} \phi$  以上のノズル孔径のステンレス鋼ノズルではこのようなセルフウェステージは観察されていない。<sup>1)</sup>

2 次リーク孔拡大が発生した写真 4.2, 4.4 の場合、二重構造の 2 次セルフウェステージの

発生が観察されなかったので、(a), (b), (c)のようなモデルとした。

(a)に見られるような2重ピット状にナトリウム側が大きく1次セルフウェステージされた場合、ナトリウム側の減肉が著しい。このため2次セルフウェステージ率は同一リーク率のセルフウェステージ率と比べて、大きな値になると思われる。

EDF の試験<sup>7)</sup> のフェライト鋼管で観察された水側からのリーク孔拡大は、写真 4.6, 4.10 および 4.12 を見る限り本試験では発生しなかった。

## 6. ま　と　め

$2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$  鋼の注水ノズルを使用して、480°Cにおける微小水リーク領域  $1.6 \times 10^{-5} \sim 2.3 \times 10^{-1} \text{g/sec}$  のセルフウェステージ試験を実施した。

得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) セルフウェステージはナトリウム側から発生して水側へ進行し、水側に到達した時点でリーク孔の拡大が完了することが顕微鏡観察から確認された。
- (2) 1次セルフウェステージの拡大孔径は、ナトリウム側の方が水側よりも数倍大きな2重ピット状であることが特徴的で、あたかも1次セルフウェステージと2次セルフウェステージ現象が同時進行するように見える。
- (3) 1次水リーク率  $L_{R1}$  ( $\text{g/sec}$ ) と1次セルフセルフウェステージ率  $S_{R1}$  ( $\text{mm/sec}$ ) には試験温度 480°C の時、次の関係式が成立した。

$$S_{R1} = 0.0173 L_{R1}^{0.58}$$

これは Gudahl らの試験結果<sup>6)</sup>と比較して、約 70 % 程小さいが、傾向は非常に良く一致している。

- (4) リーク孔の最小拡大孔径は  $0.45 \sim 1.3 \text{ mm}\phi$ 、拡大比は  $5 \sim 500$  の範囲にわたっていた。これらはリーク孔拡大までの平均水リーク率の小さいもの程拡大比が大きい傾向であった。
- (5) 2次リーク孔拡大まで発展したノズルの場合でも、拡大リーク孔径は  $1.3 \text{ mm}\phi$  を越えていかなかった。

本試験を実施した時期においては、試験体である微小孔ノズルの製作手法に制約があり、実機 SG 条件を満し得るノズルの入手は困難であった。従って、穴径は小さいが薄肉のノズルあるいは肉厚は厚いが穴径の大きなノズルを用いざるを得なかった。このため微小水リーク率を得るために、試験注水条件が実機と異なることになり、得られた結果の解釈に推論が多く入ることとなつた。今後の課題として、実機条件を満す試験体ノズルの製作法の開発が望まれる。

## 参考文献

- 1) 鐘ヶ江, 橋口, 池本, 大内, 井上, 堀 "ウェステージに対する距離の効果に関する試験とその検討およびリーク孔拡大(セルフウェステージ)に関する一考察" (小リーク・ナトリウム-水反応試験研究 第7報) SN941 76-27 (1976).
- 2) 根井, 大内, 大島, 堀 "小リーク・ナトリウム・水反応試験研究 第1報" (試験装置の概要) SN941 72-08 (1972).
- 3) 根井, 大内, 氏原, 大島, 井上, 堀, 中山 "小リーク・ナトリウム・水反応試験研究 第2報" (リーク検出計の特性試験) SN941 72-14 (1972).
- 4) 機械工学便覧 改訂第6版 P. 8-58
- 5) 鐘ヶ江, 池本, 大後, 井上, 堀 "PNC型Na中水素検出計2号機-動的室・静的室分離型-(小リーク・ナトリウム・水反応試験研究 第15報) SN941 78-91(1978).
- 6) J.A. Gudahl, P.M. Magee "Microleak Wastage test Results"  
GEFR-00352 March 1978
- 7) J.L. Quinet, L. Lannou "LMFBR Steam Generators: Behavior of Heat Exchange Tubes Faced with a Through Crack Resulting in Contact Between Sodium and Water" Nuclear Technology. Vol 46, No. 3

表 3・1 試験条件

一定条件

Na 温度	約480 °C
Na 液深	約871 mm
Na 流速	約0.08 m/sec
Na 純度	コールドトラップ制御温度120 °C
Arカバーガス圧力	約0.5 kg/cm <sup>2</sup> G
ノズル材質	2 1/4 Cr-1 Mo鋼
蒸気温度	約480 °C

可変条件

注水圧力	40~100 kg/cm <sup>2</sup> G
初期リーク率	$1.6 \times 10^{-5} \sim 2.3 \times 10^{-1}$ g/sec
ノズル径 ( $D_0$ )	0.04~0.25 mm
ノズル深さ ( $L_0$ )	0.5~3.6 mm

表4-1 セルフウェステージ試験結果一覧表

試験番号		2008-1	2009-1	2010-1	2011-1	2012-1	2014-2
使用ノズル	初期ノズル孔径 (mmφ)	0.04	0.08	0.25	0.04	0.2	0.09
	“ 深さ (mm)	0.5	1.0	3.6	0.5	3.6	2.3
試験条件	Na 温度 (℃)	481	480	480	480	472	490
	水注入圧力 (kg/cm <sup>2</sup> G)	102	50	50	50	42	41
試験結果	予想水リーク率 (g/sec)	$1.5 \times 10^{-2}$	$2.8 \times 10^{-2}$	$2.8 \times 10^{-1}$	$7.1 \times 10^{-3}$	$1.5 \times 10^{-1}$	$3.0 \times 10^{-2}$
	初期水リーク率 (g/sec)	$2.2 \times 10^{-2}$	$2.7 \times 10^{-3}$	$2.1 \times 10^{-5}$	$1.6 \times 10^{-5}$	$2.3 \times 10^{-1}$	$5.2 \times 10^{-2}$
	1次リーク孔拡大までの注水時間 (sec)	265	1200		16740		
	1次リーク孔拡大までの注水量 (sec)	5.75	8.0		0.26		
	1次水リーク率 (g/sec)	$2.2 \times 10^{-2}$	$6.7 \times 10^{-3}$	$1.22 \times 10^{-3}$	$1.6 \times 10^{-5}$	$3.0 \times 10^{-2}$	$3.2 \times 10^{-2}$
	1次リーク孔拡大から2次リーク孔拡大までの注水時間 (sec)	45	948				
	1次リーク孔拡大から2次リーク孔拡大までの注水量 (g)	3.5	11.5				
	2次水リーク率 (g/sec)	$7.8 \times 10^{-2}$	$1.2 \times 10^{-2}$				
	2次リーク孔拡大後の水リーク率 (g/sec)	$3.4 \times 10^{-1}$	$4.9 \times 10^{-1}$		$3.8 \times 10^{-2}$		
	最終了水リーク率 (g/sec)	$3.4 \times 10^{-1}$	$4.9 \times 10^{-1}$	$7.8 \times 10^{-3}$	$5 \times 10^{-3}$	$3.5 \times 10^{-2}$	$3.0 \times 10^{-2}$
	全注水量 (g)	30.75	43.8	9.06	10	34.1	38.9
	全注水時間 (sec)	338	2353	7420	17550	1135	1225
	全試験時間 (sec)	338	2353	7420	17550	1135	1513
	ノズル孔閉塞回数	0	0	初期1回	0	0	初期1回
	ノズル孔閉塞時間 (sec)	0	0	2700	0	0	288
	1次水リーク率拡大比	3.6	1.8		2474		
	2次水リーク率拡大比	4.4	40.8				
	1次セルフウェステージ深さ (mm)	0.5	1.0		0.5	3.4	1.1
	2次セルフウェステージ深さ (mm)	0.5	1.0				
	1次セルフウェステージ率 (mm/sec)	$1.9 \times 10^{-3}$	$8.3 \times 10^{-4}$	$3.8 \times 10^{-4}$	$3.0 \times 10^{-5}$	$3.0 \times 10^{-3}$	$9.0 \times 10^{-4}$
	2次セルフウェステージ率 (mm/sec)	$1.1 \times 10^{-2}$	$1.1 \times 10^{-3}$				
	1次セルフウェステージの拡大孔径 (mm)	不明	不明	0.8	0.85	0.45	0.6
	1次セルフウェステージの拡大孔径比	不明	不明	3.2	21.3	2.3	6.7
	2次セルフウェステージの拡大孔径 (mm)	1.3	1.2				

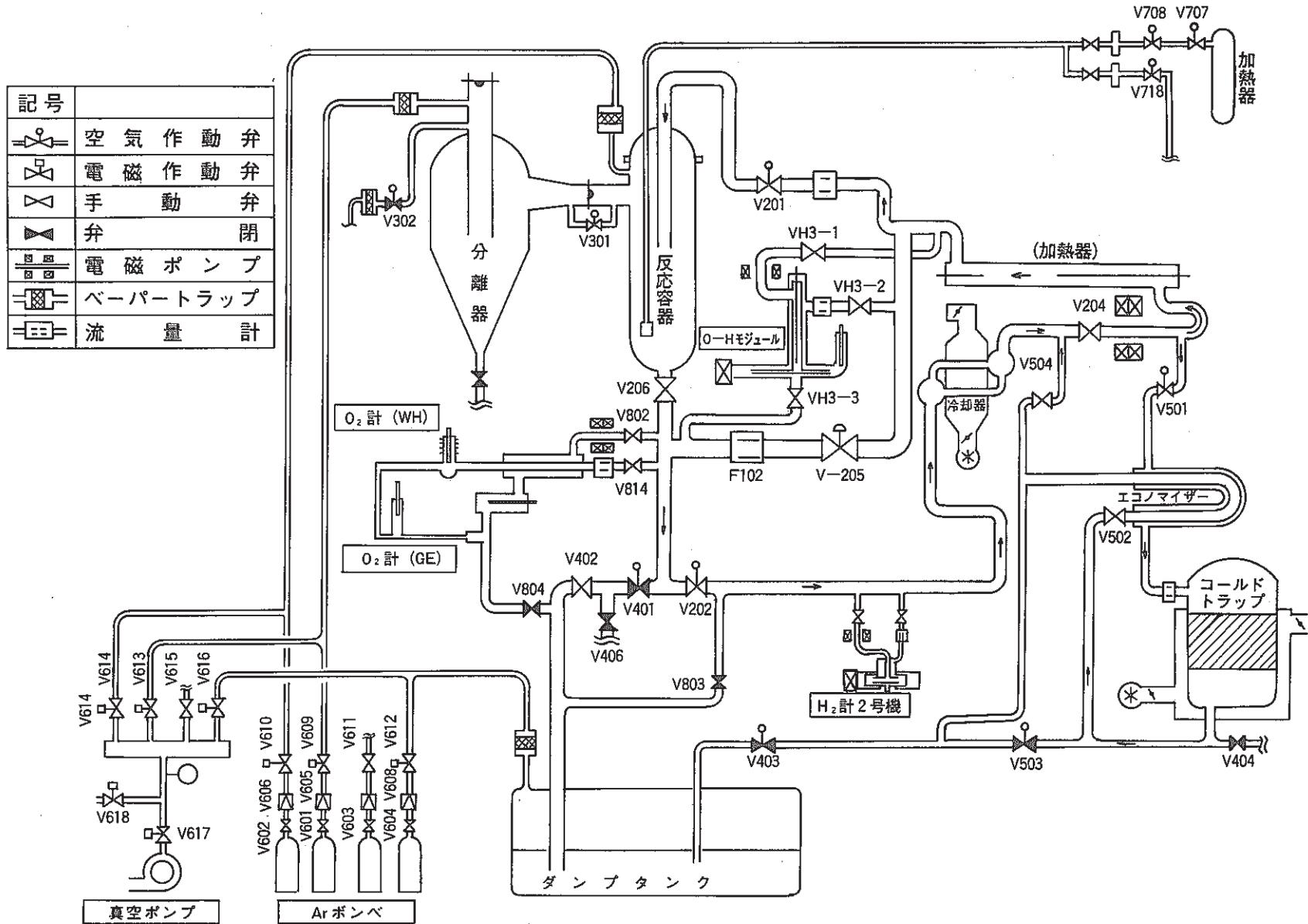


図2.1 : SWAT-2装置の系統図

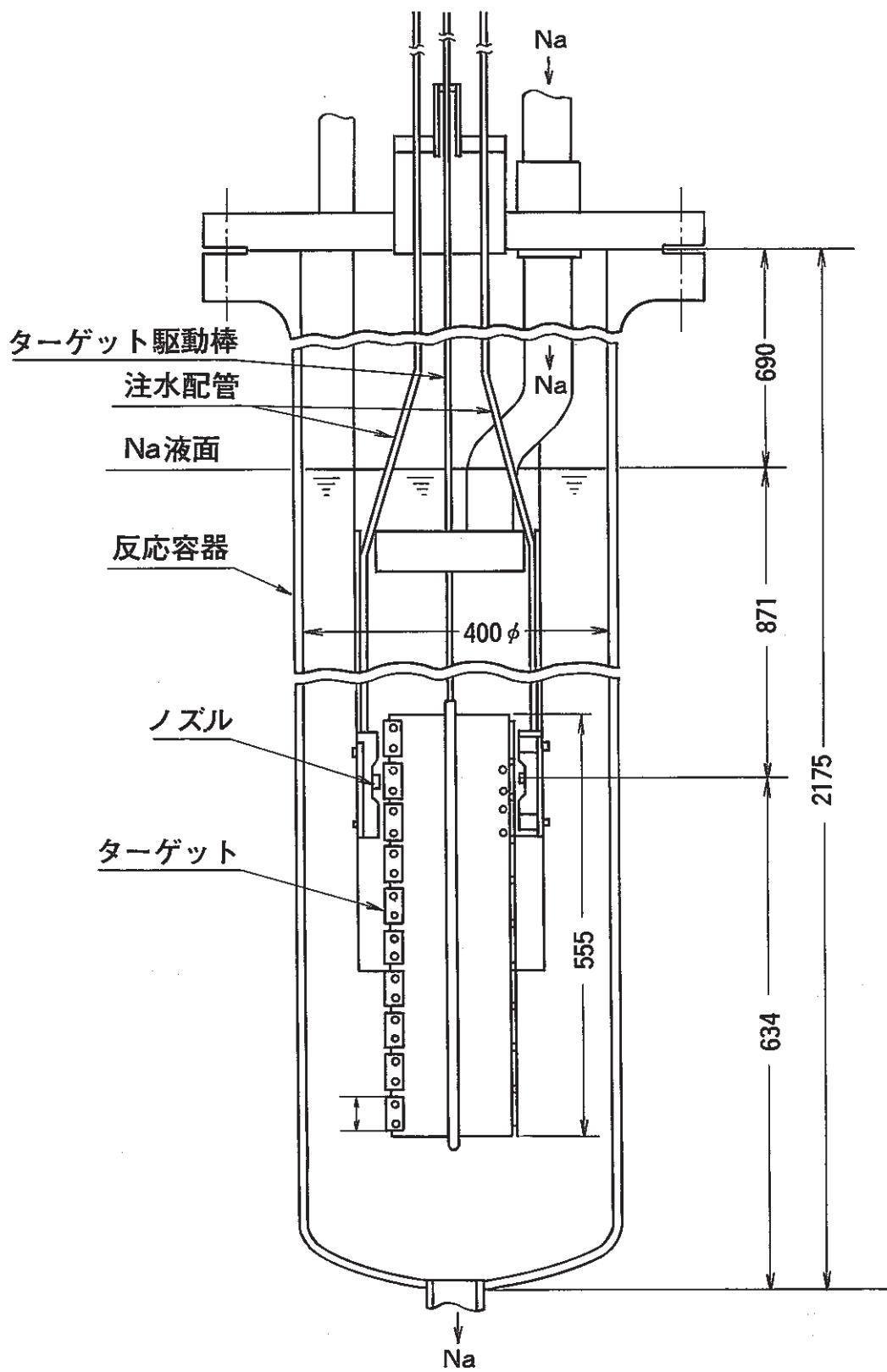


図2.2 微小リーク用反応容器断面構造図

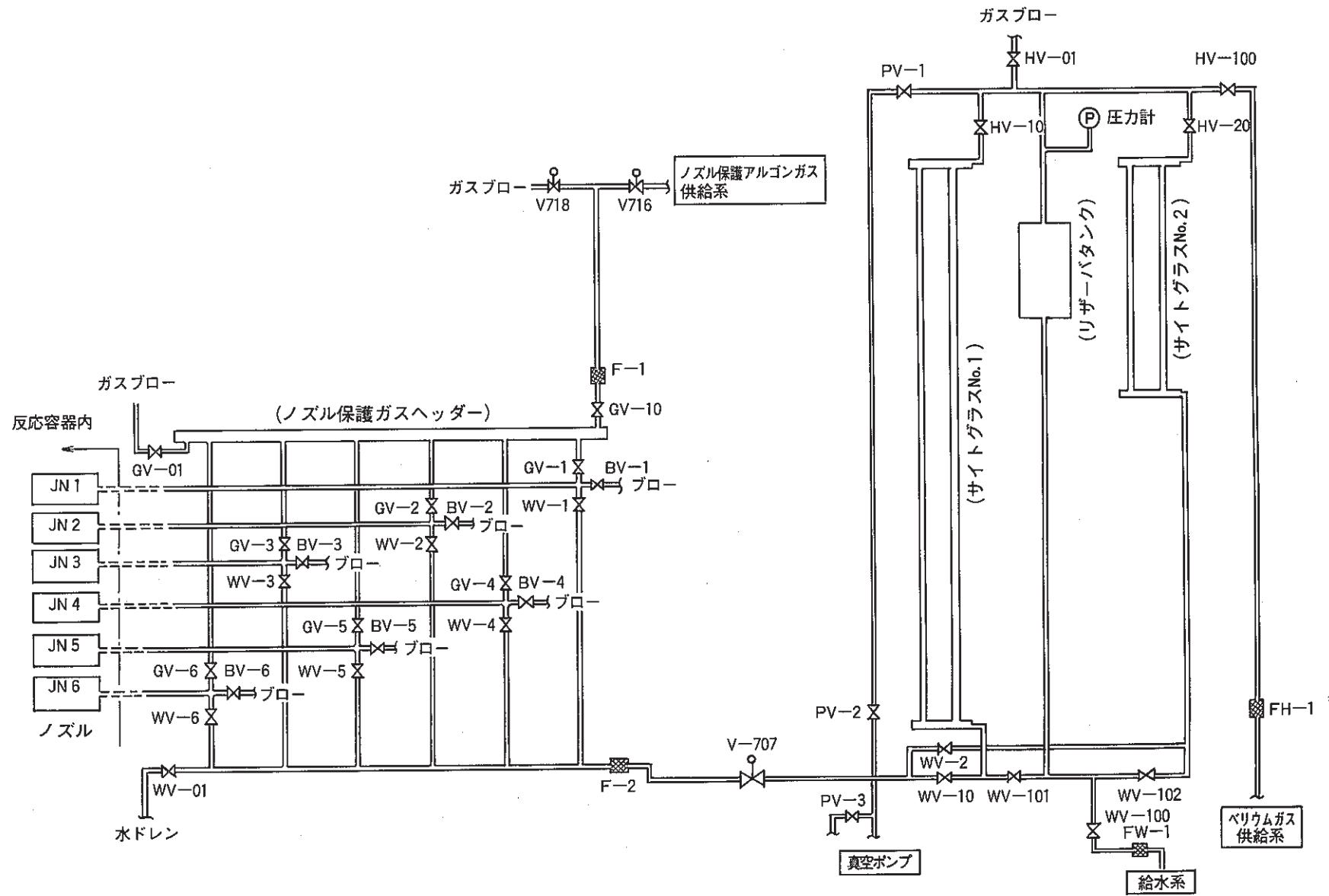


図 2.3 微小リーク注水装置の系統図

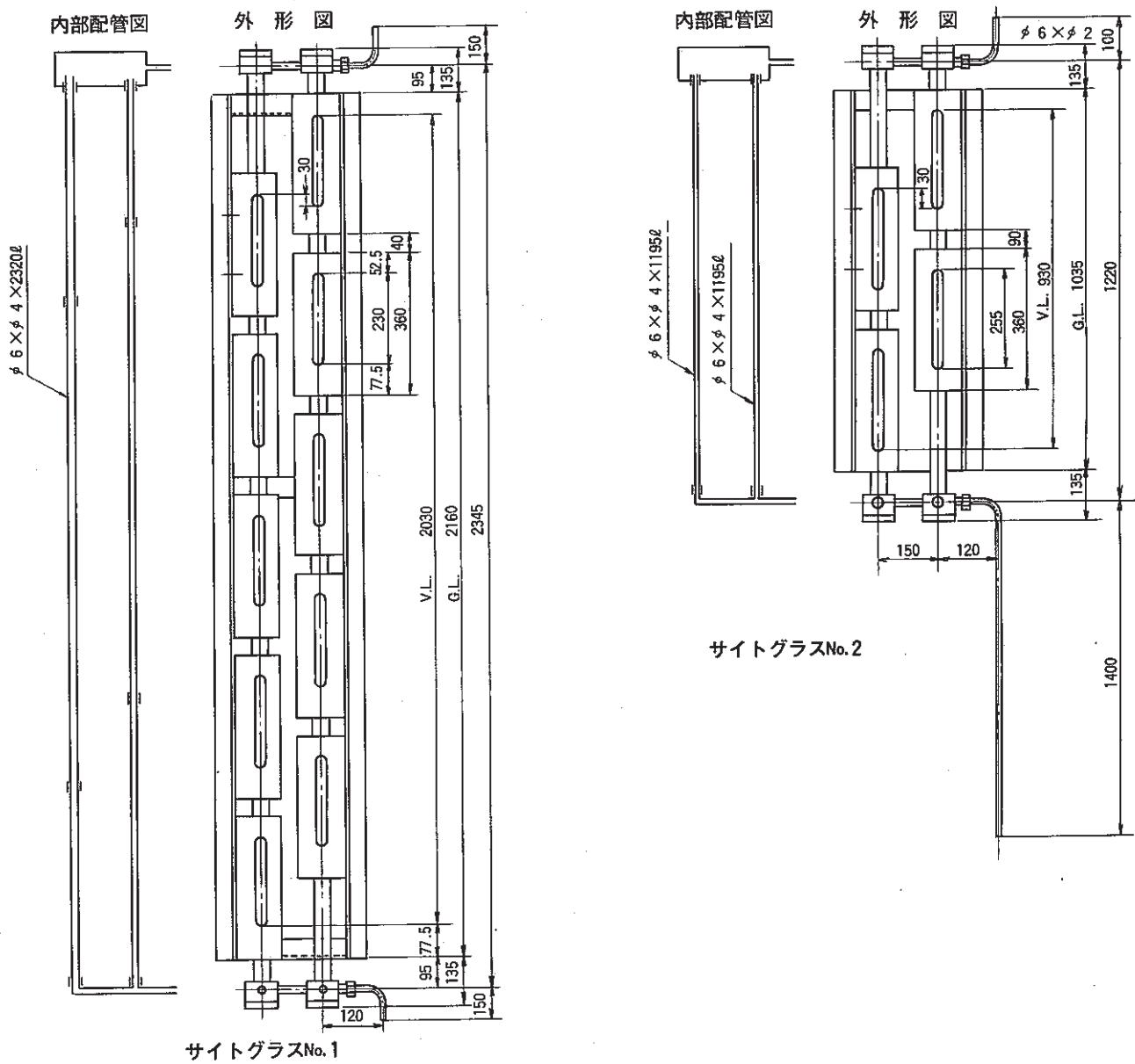


図2.4 サイトグラス外形構造図

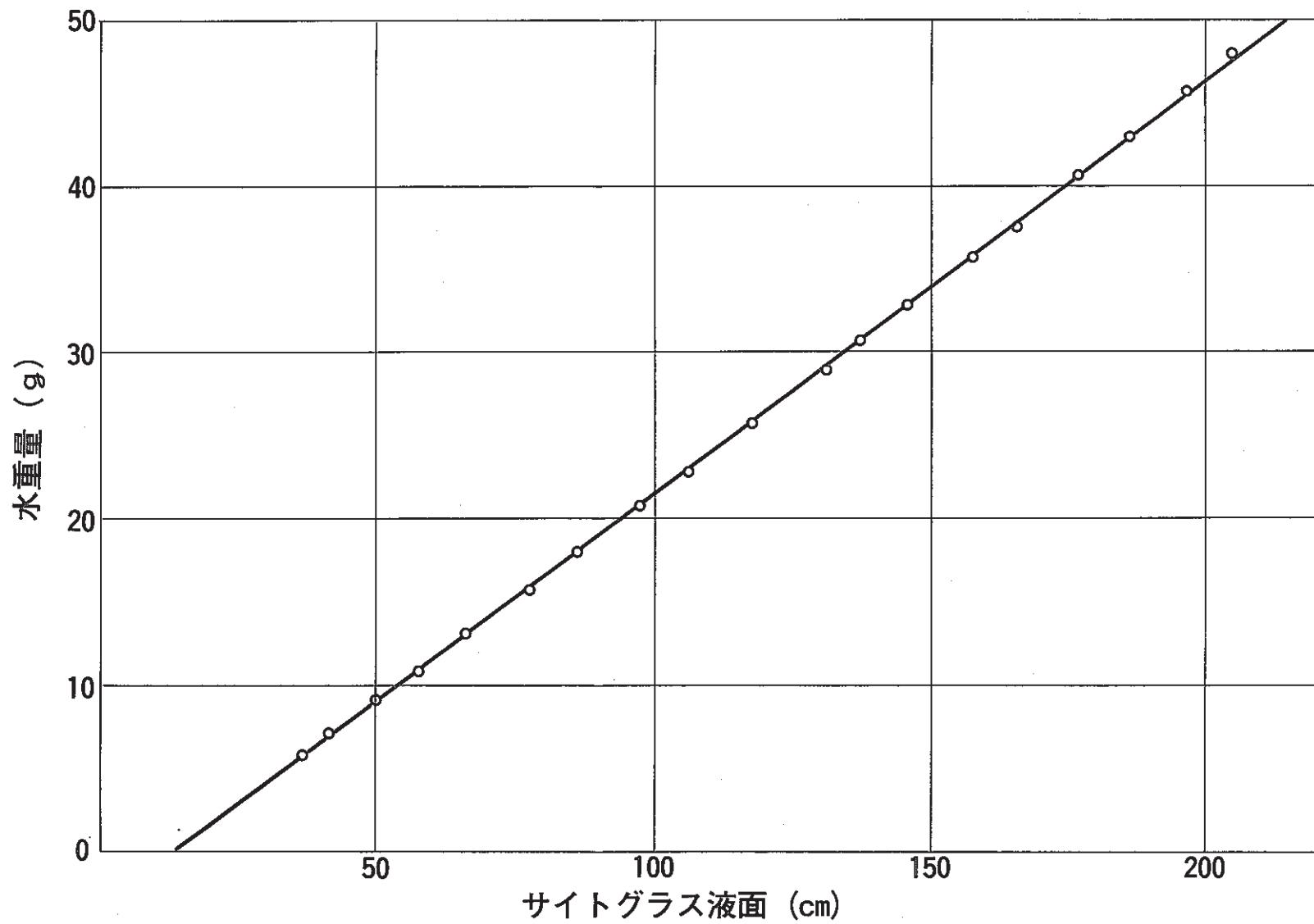


図 2.5 サイトグラスNo.1 重量較正曲線

-26-

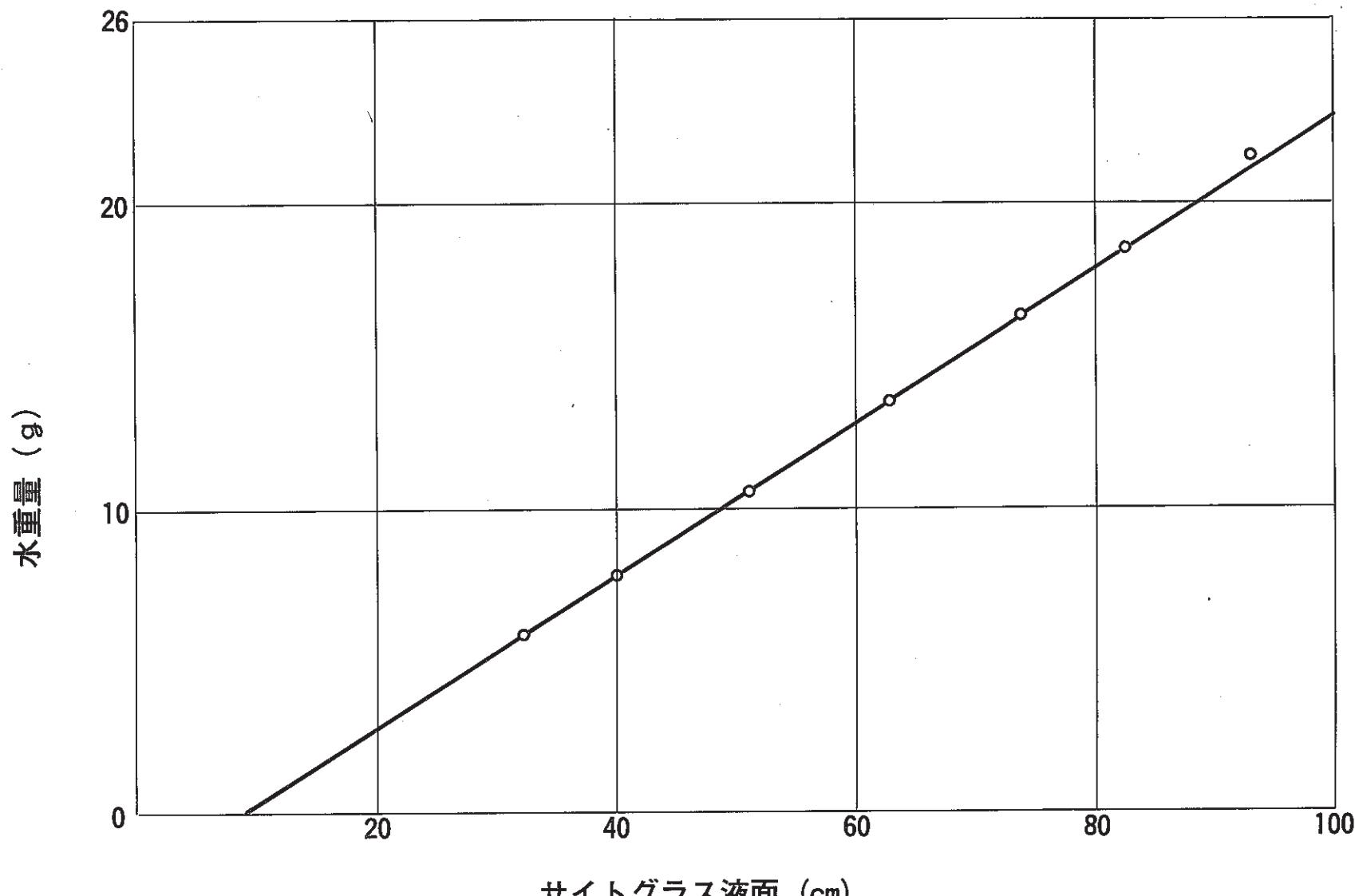


図2.6 サイトグラスNo.2 重量較正曲線

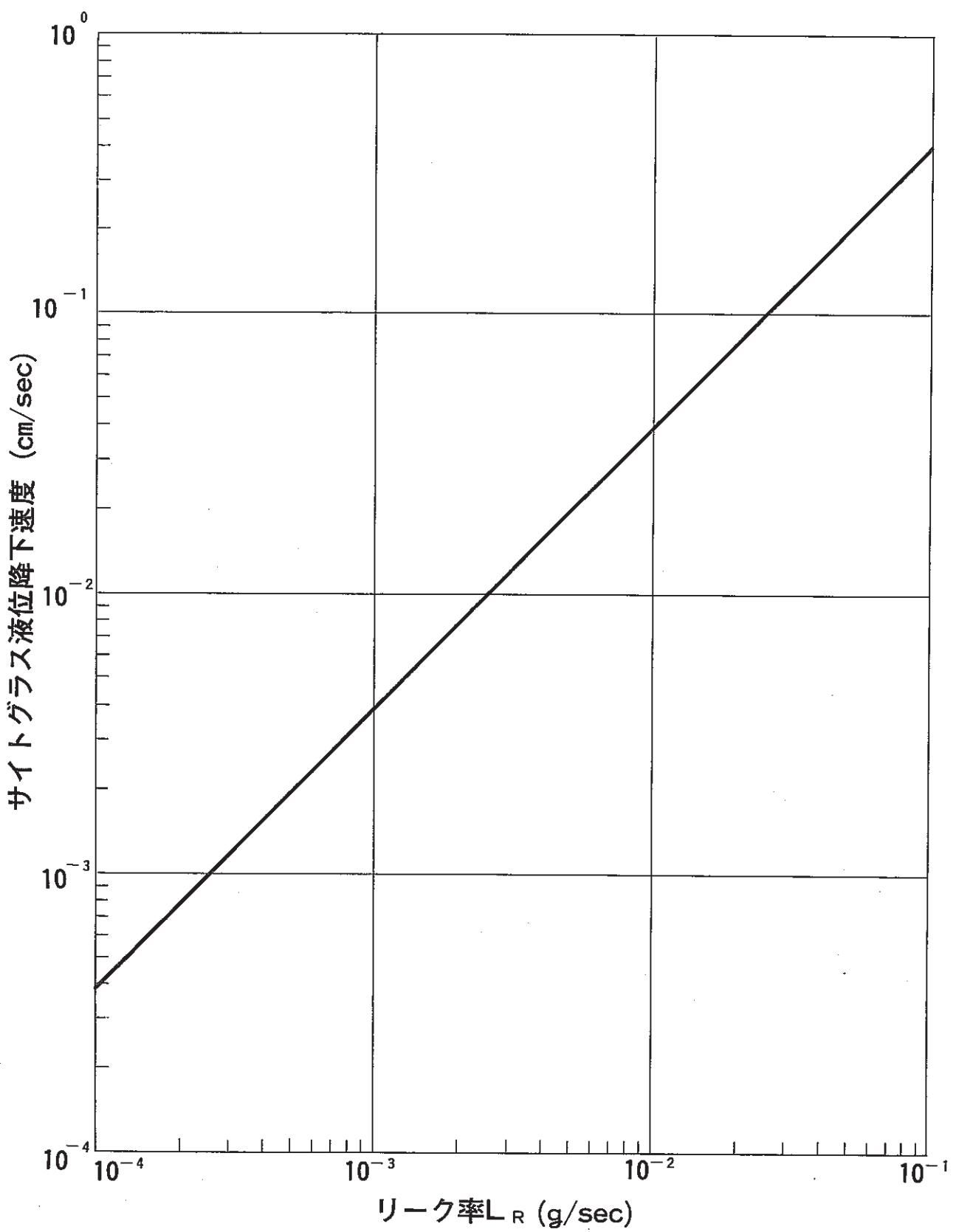


図2.7 水リーケ率とNo.1サイトグラス液位降下速度の関係

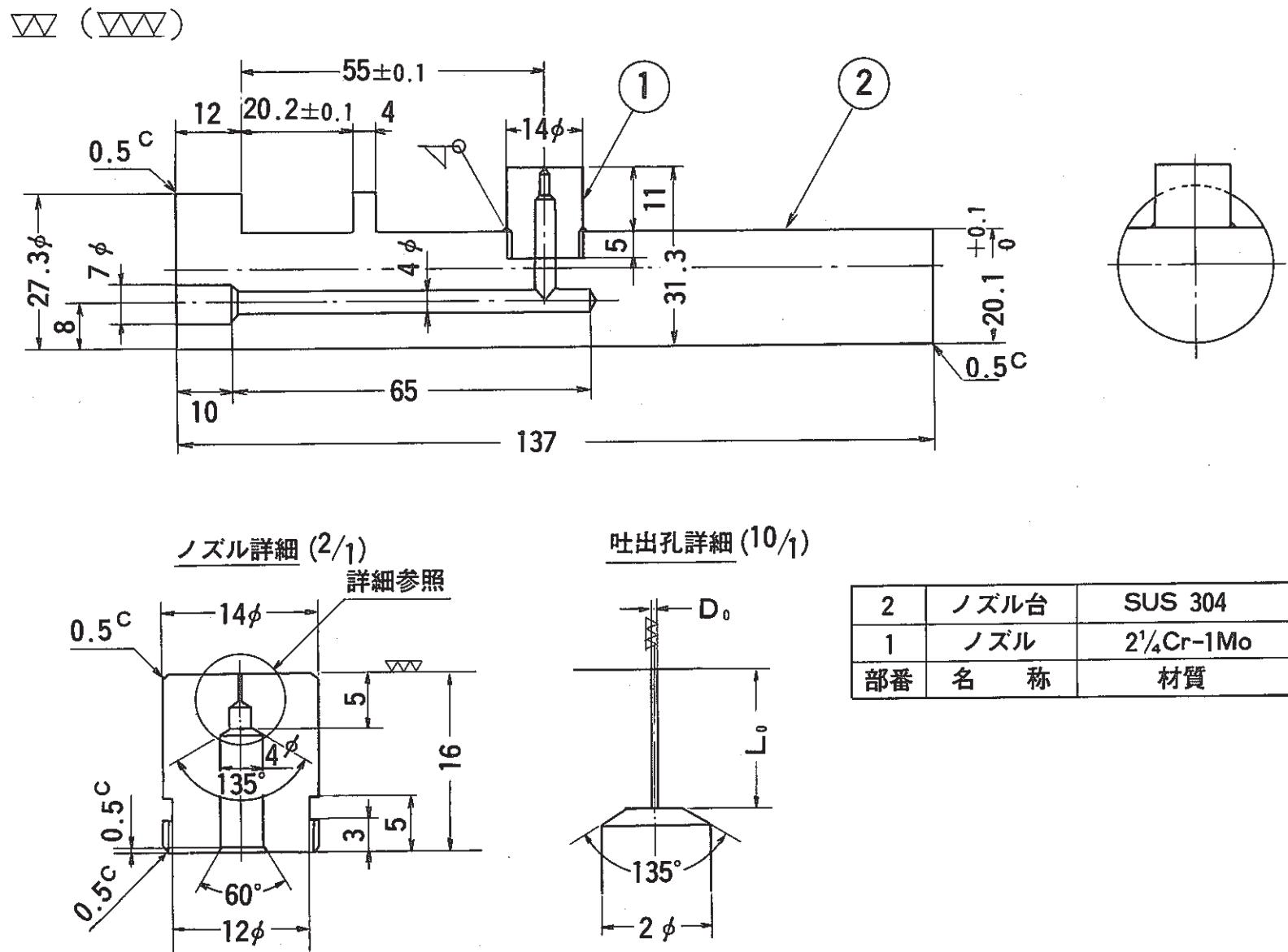
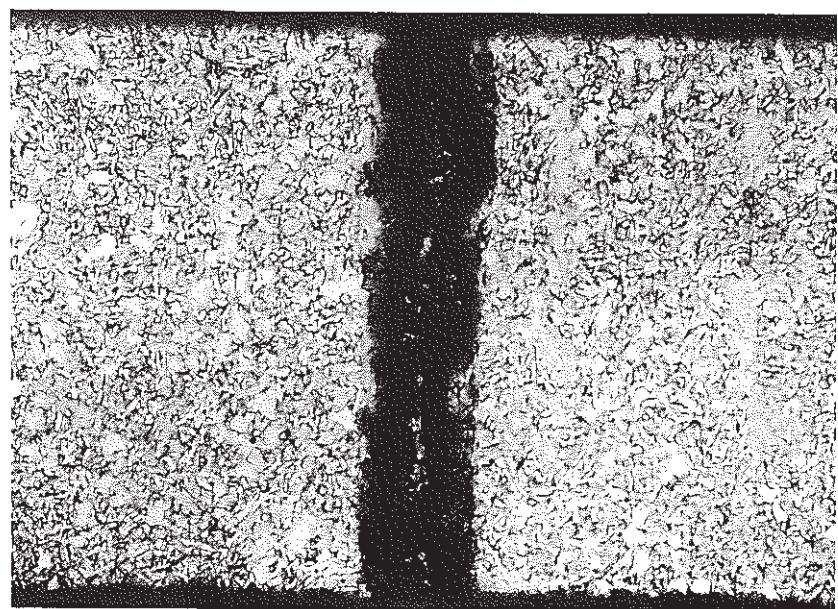
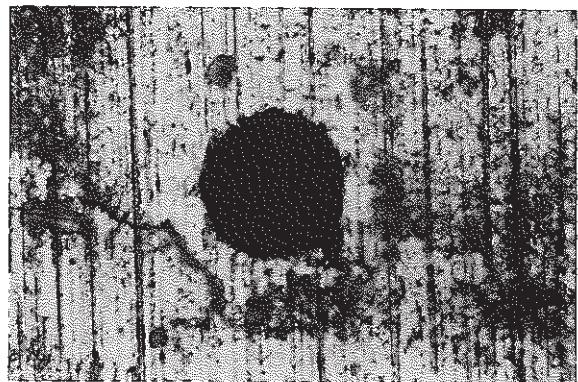


図2.8 微小リークノズル部形状



公称値 :  $0.04\text{mm}\phi$   
 $0.5\text{ mm}$ 肉厚

写真 2.1 ノズルサンプル ( $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼非供試材)

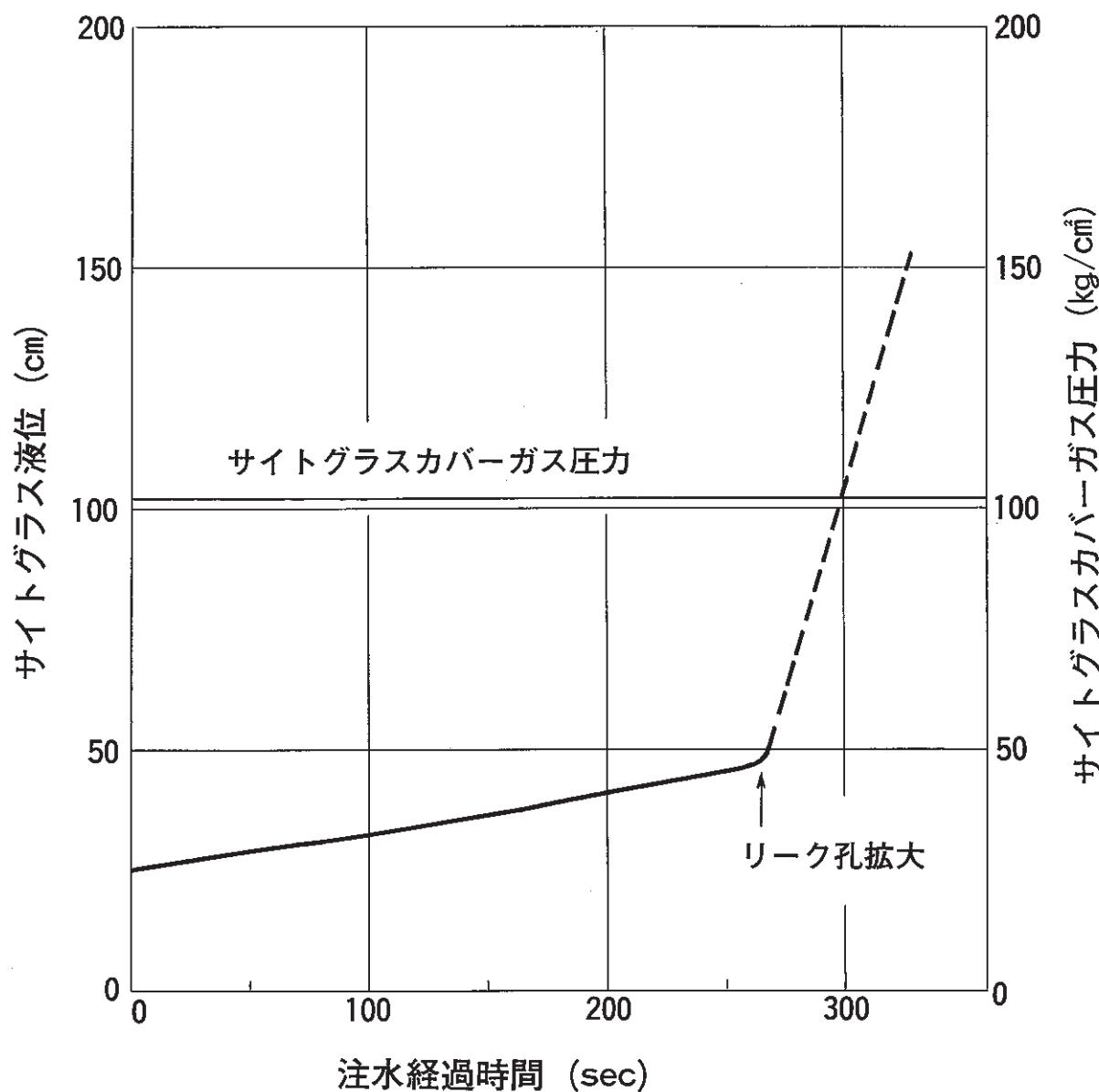


図4.1 注水開始後のサイトグラス液位の変化 (Run2008-1)

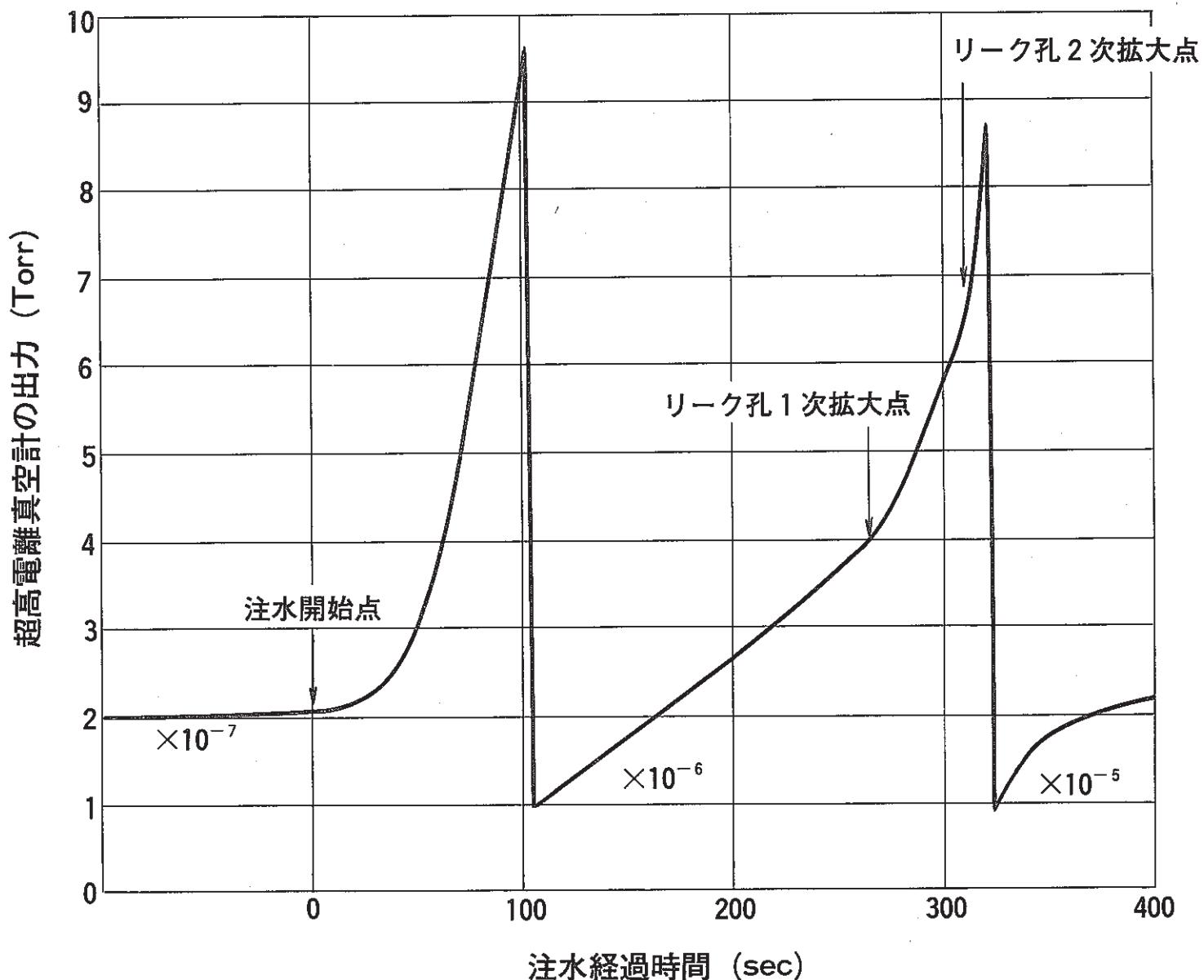


図4.2 Run2008-1 注水時のNa中水素計出力変化

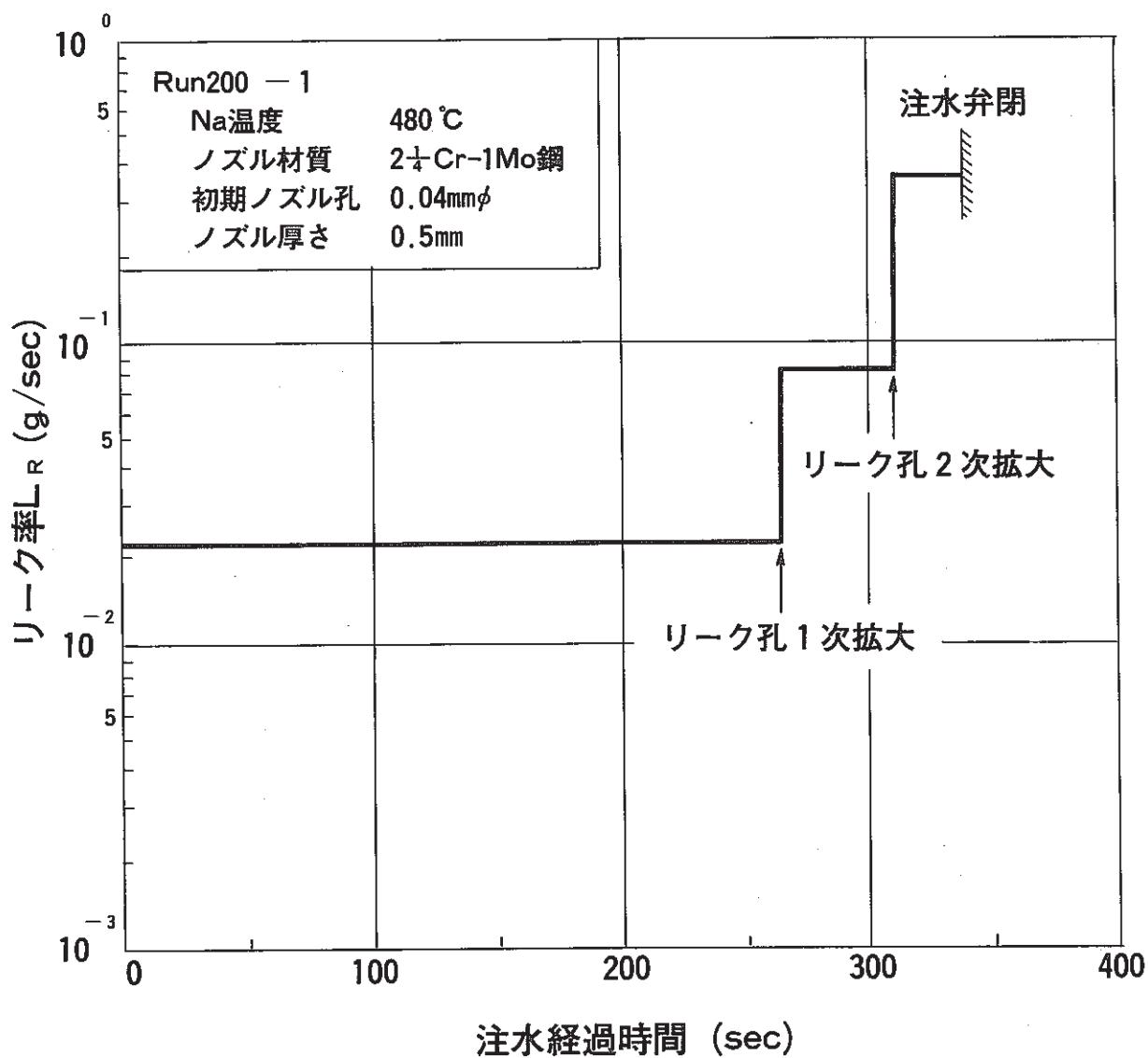
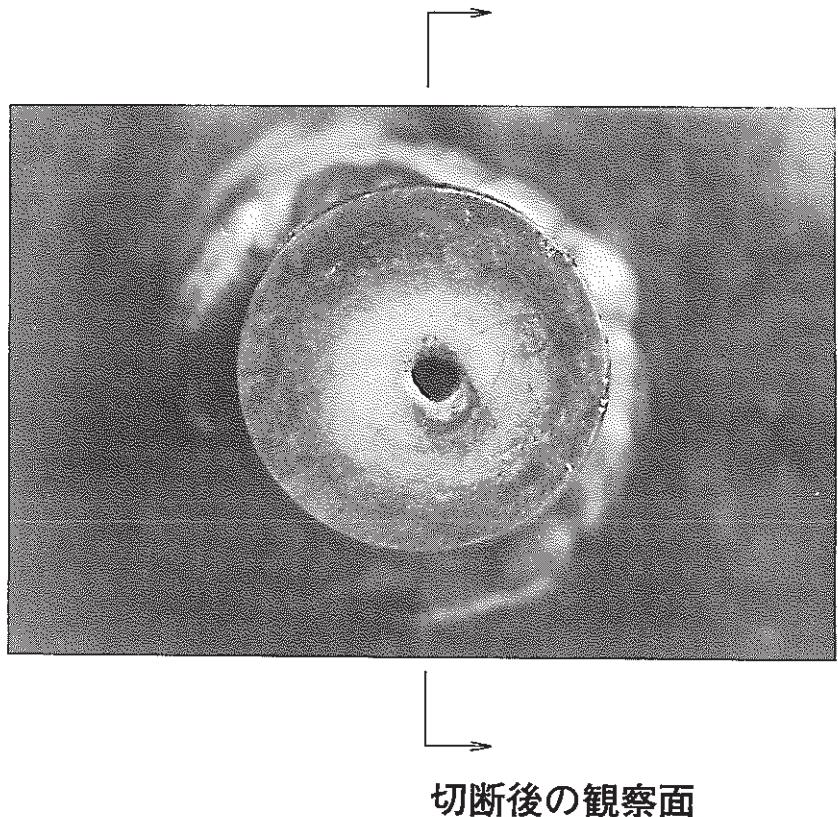


図4.3 注水開始後のリーク率変化 (Run2008-1)



切断後の観察面

写真4.1 注水試験後のナトリウム側ノズル外観 (Run2008-1)

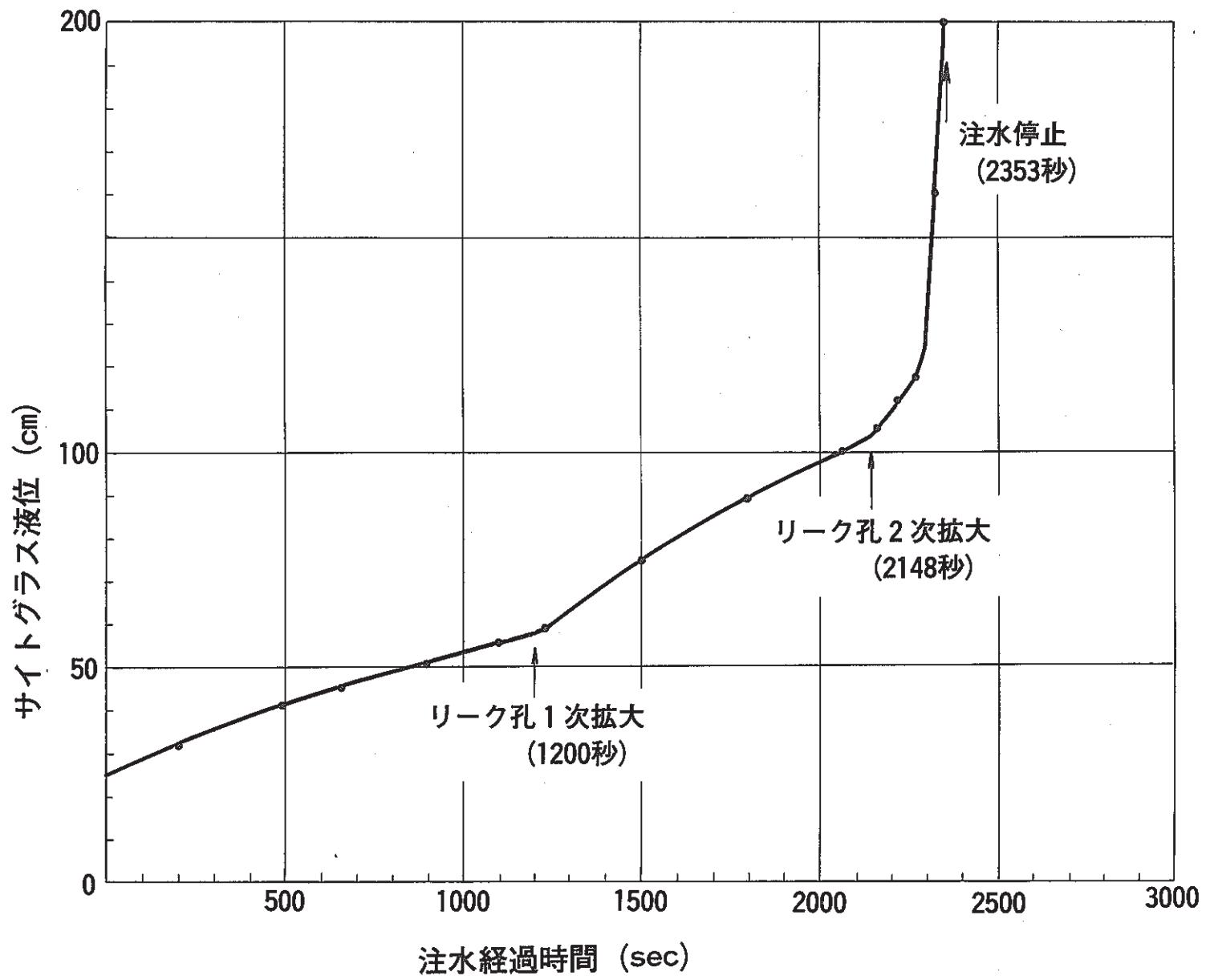


図4.5 注水開始後のリーク率変化 (Run2009-1)

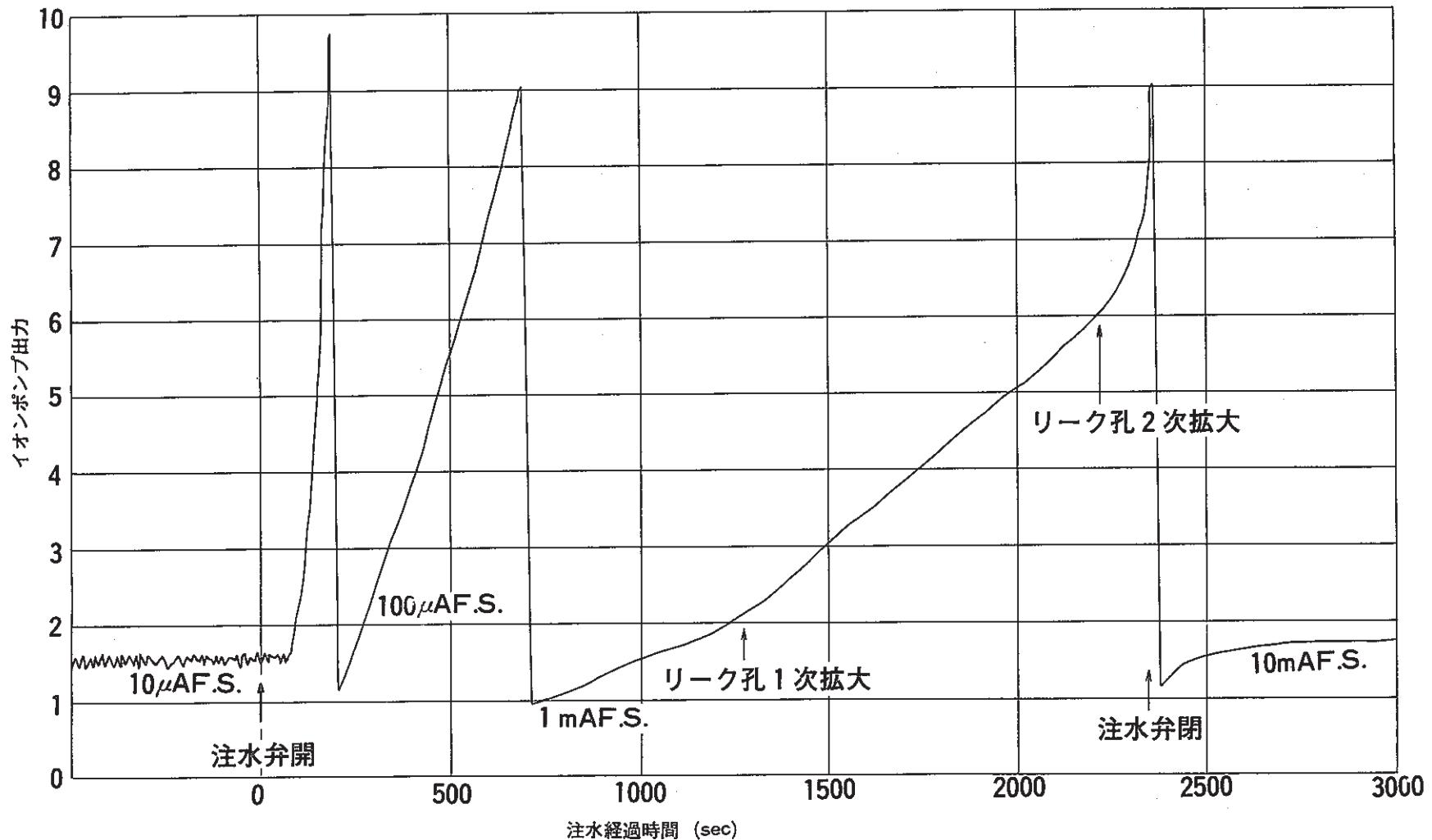


図 4 . 6 Run2009-1 注水時のNa中水素計出力変化

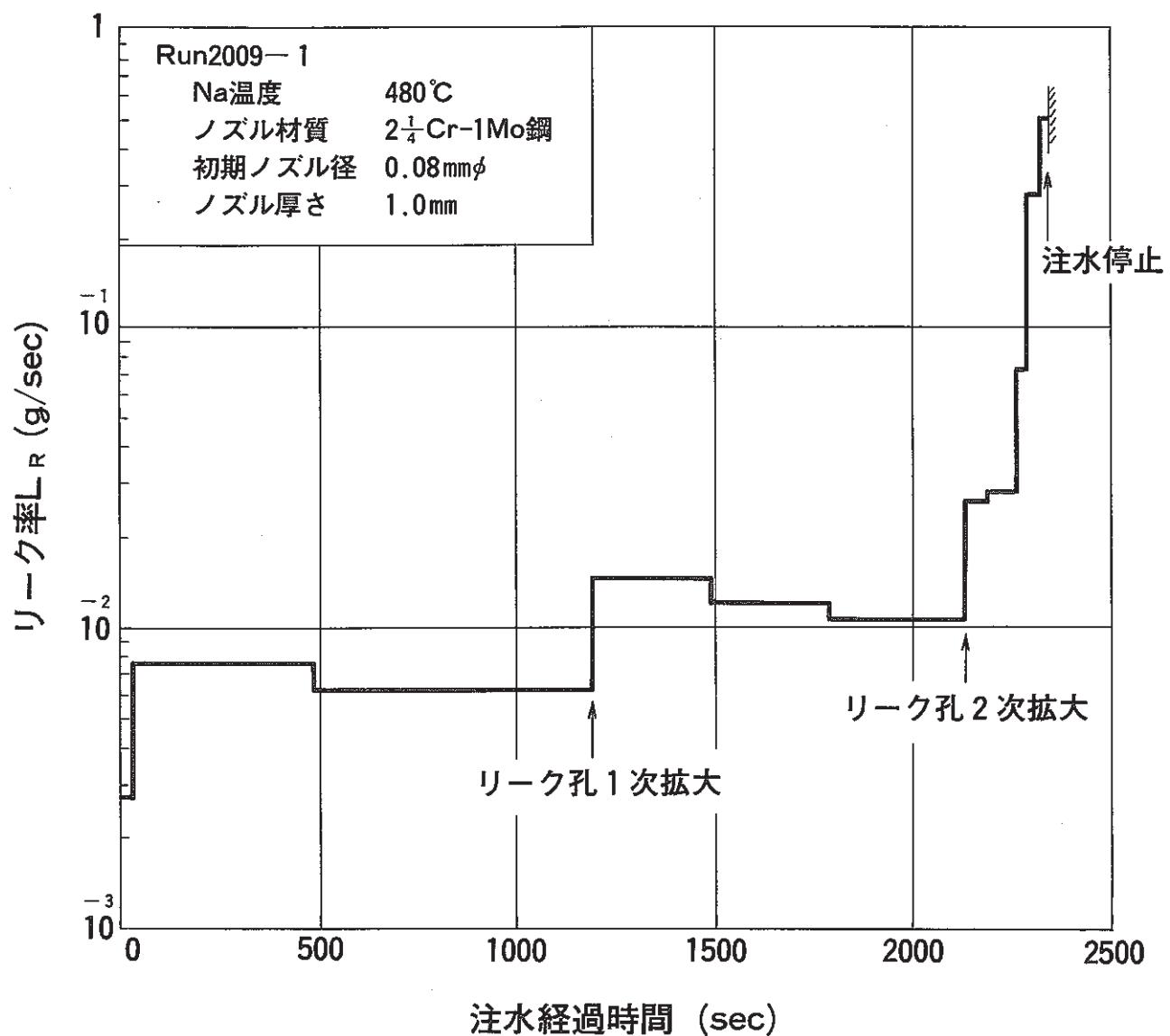
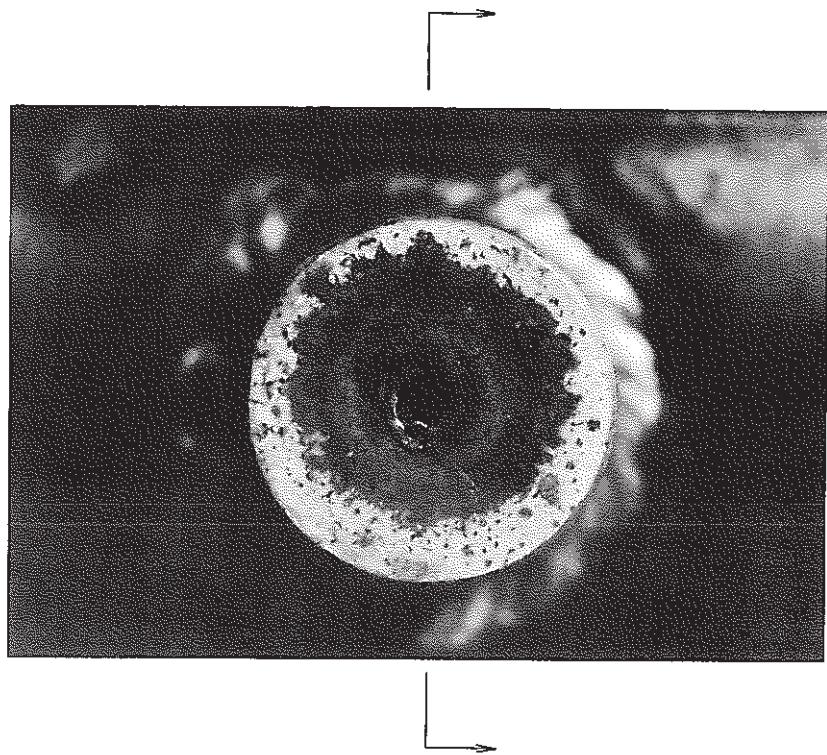


図4.7 注水開始後のリーク率変化 (Run2009-1)



切断後の観察面

写真4.3 注水試験後のナトリウム側ノズル外観 (Run2009-1)



ナトリウム側



蒸気側

×20

写真4.4 Run2009-1 ノズル損耗部断面およびナトリウム側平面

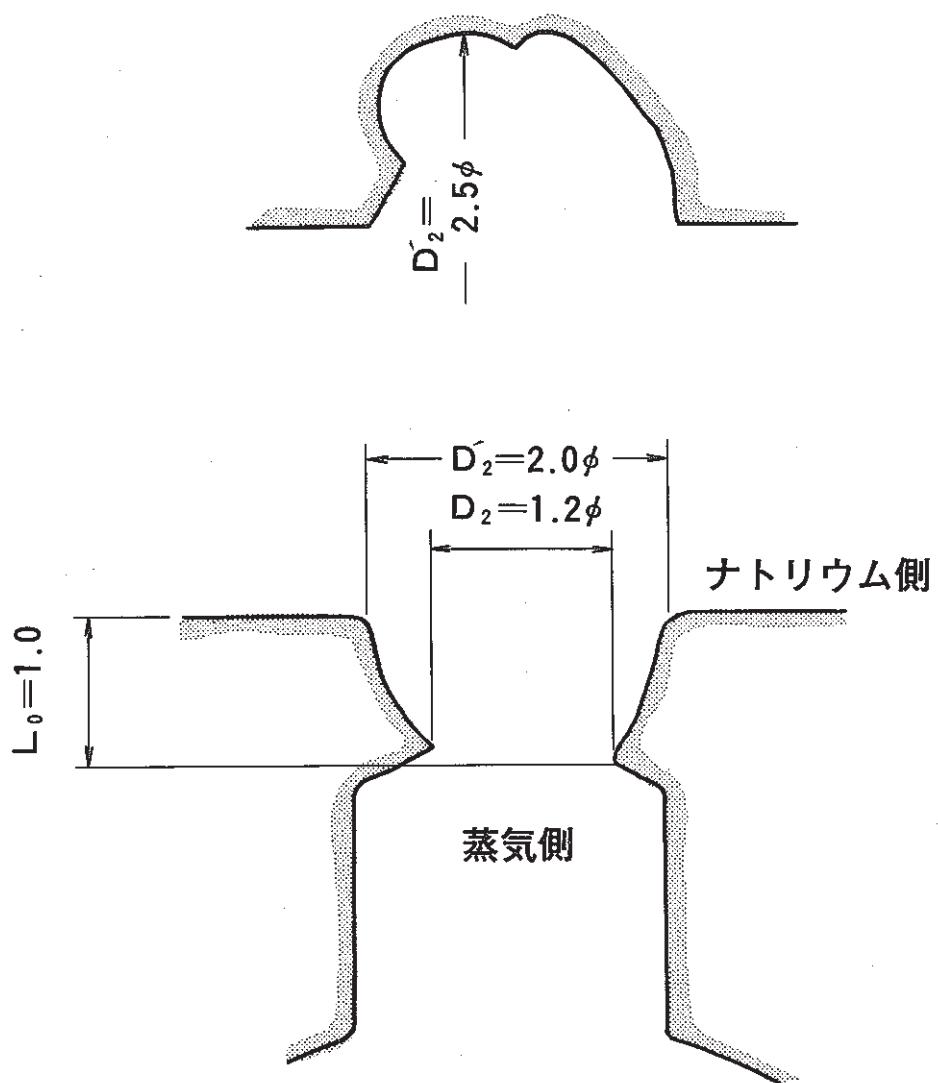


図4.8 ノズル損耗部断面寸法 (Run2009-1)

単位:mm

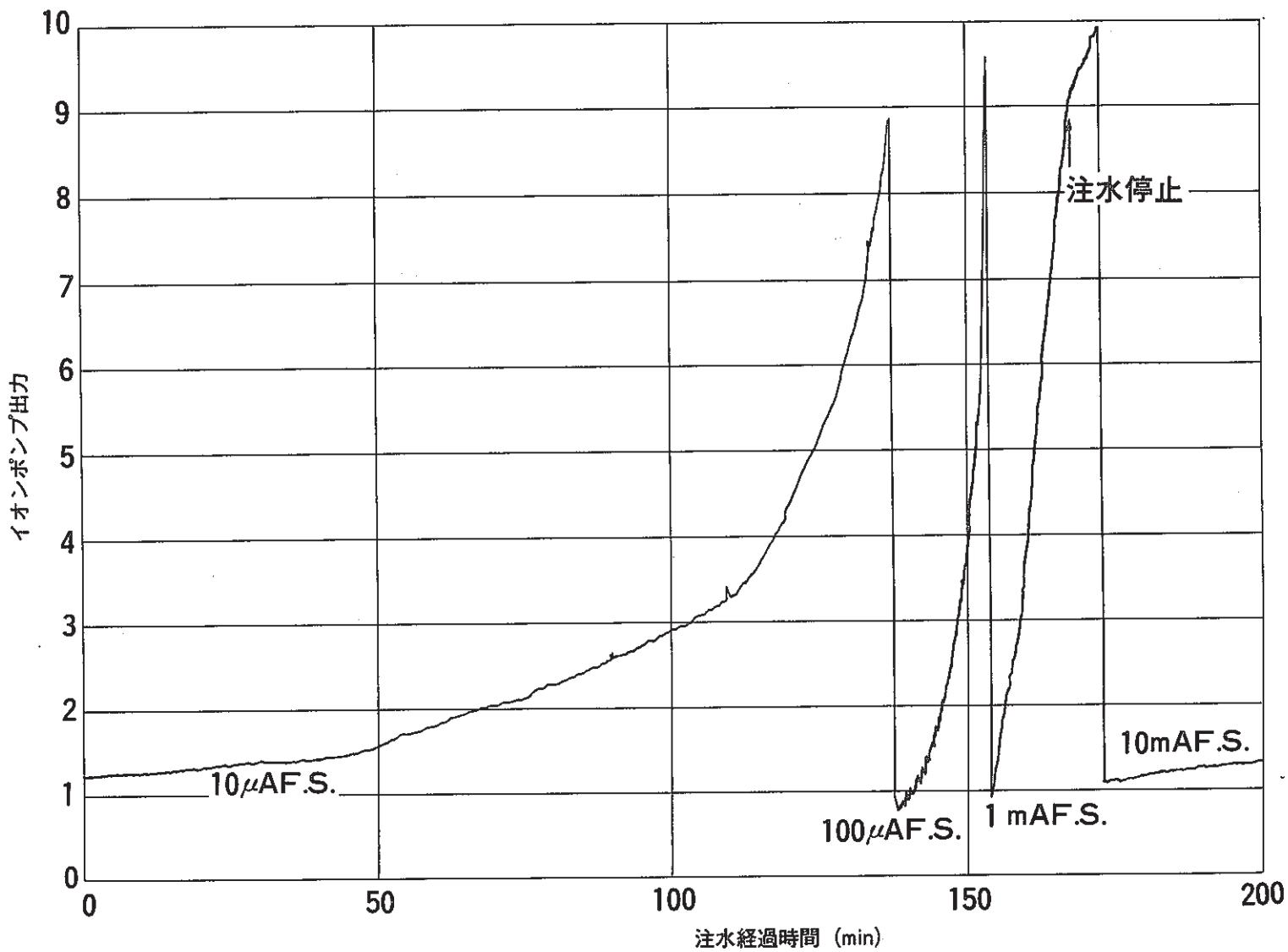


図4.9 Run2010-1注水時のNa中水素計出力変化

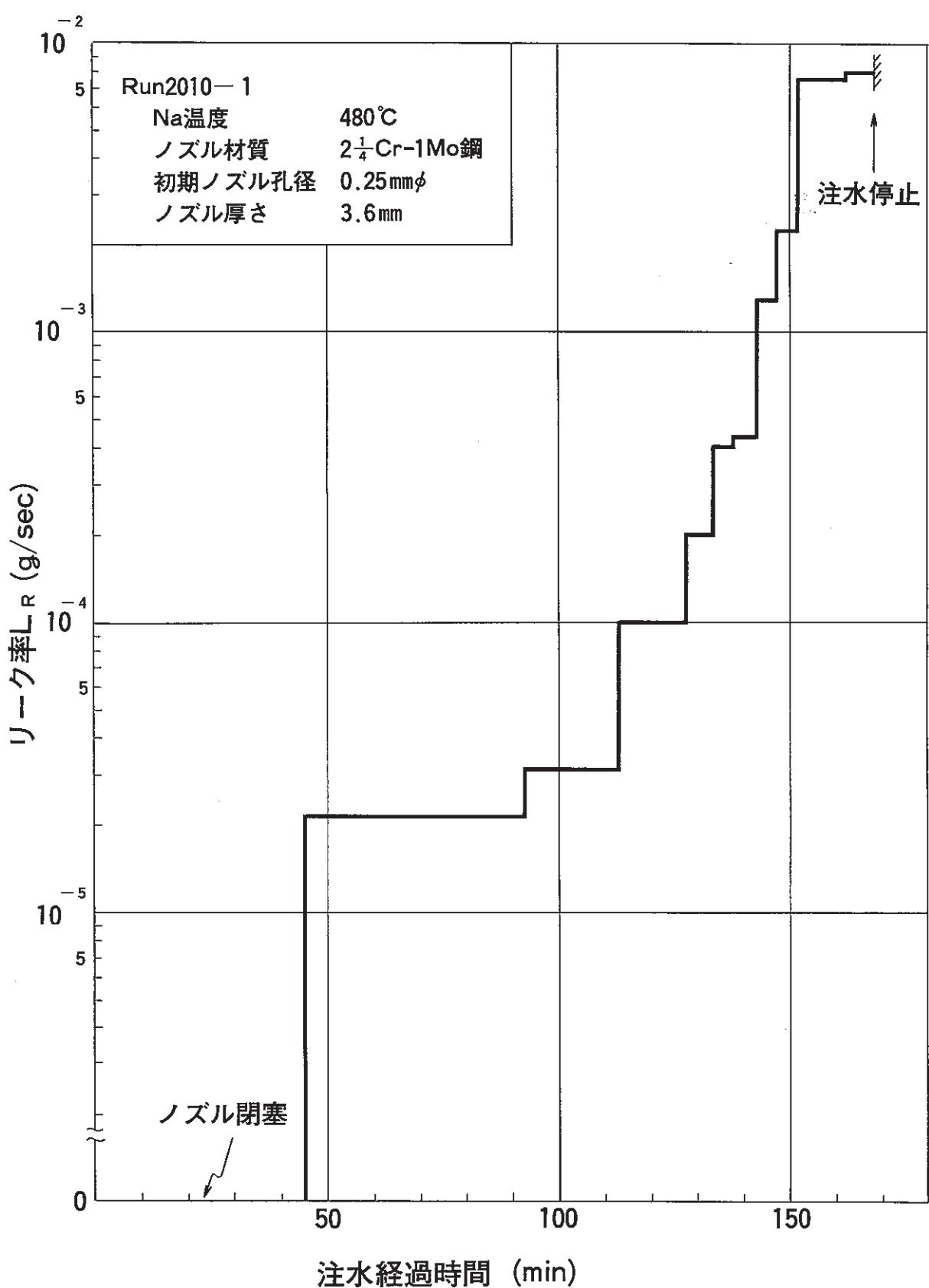
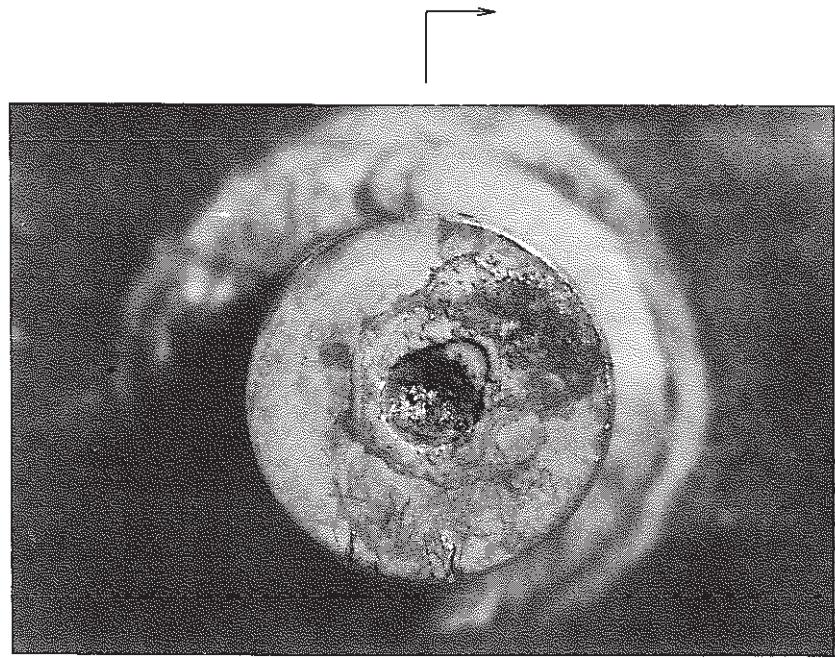
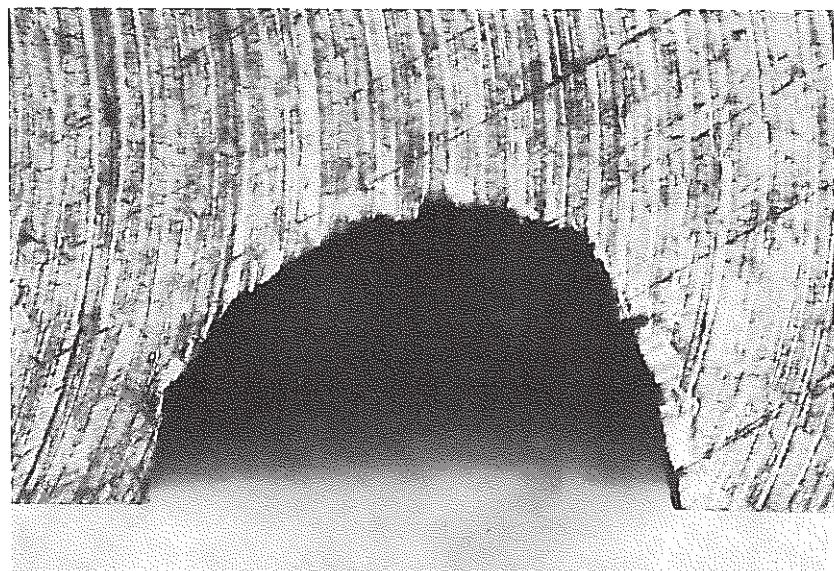


図 4.10 注水開始後のリーク率変化 (Run2010-1)



切断後の観察面

写真4.5 注水試験後のナトリウム側ノズル外観 (Run2010-1)



ナトリウム側

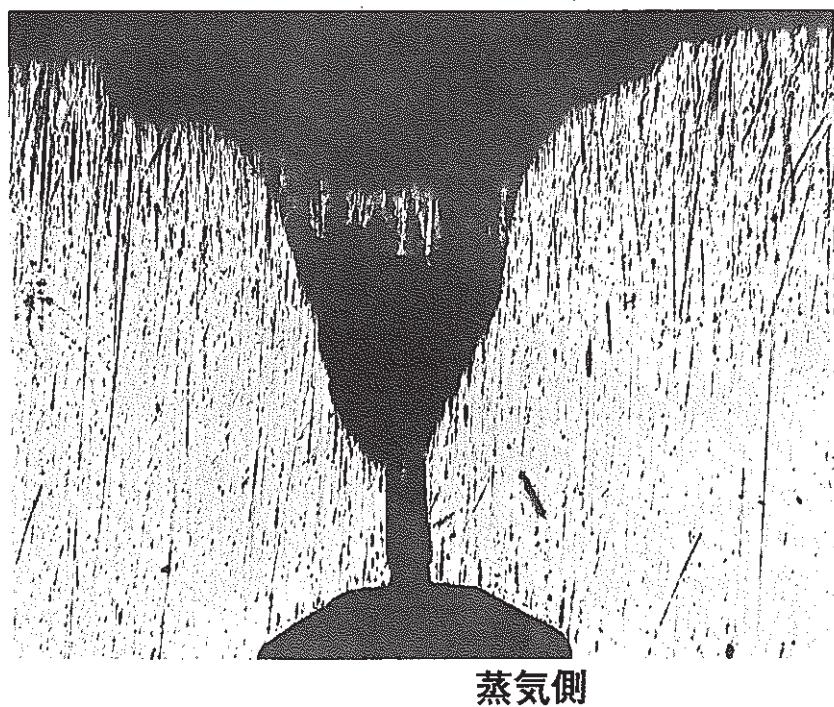


写真4.6 Run2010-1 ノズル損耗部断面およびナトリウム側平面

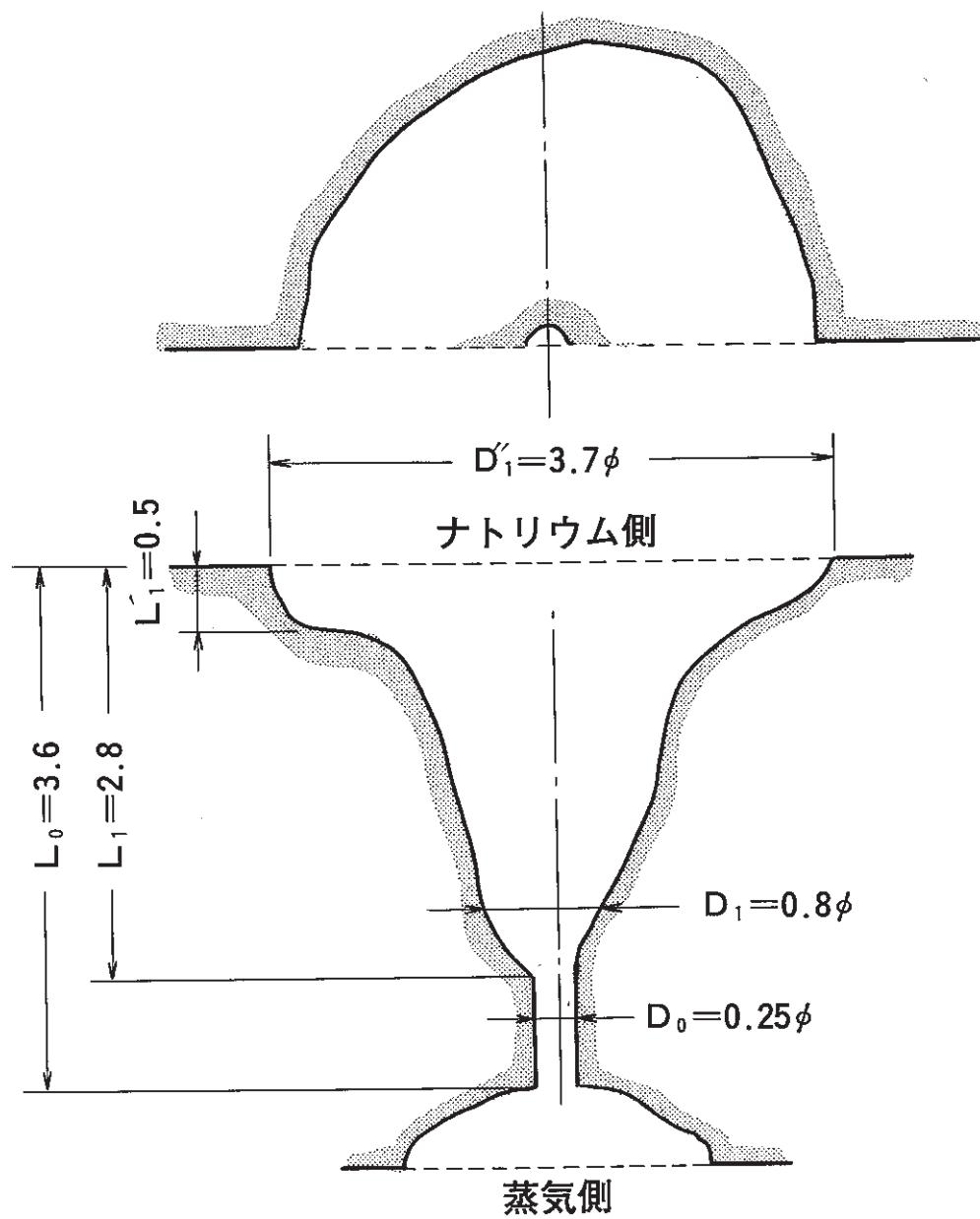


図 4.11 ノズル損耗部断面寸法 (Run2010-1)

単位:mm

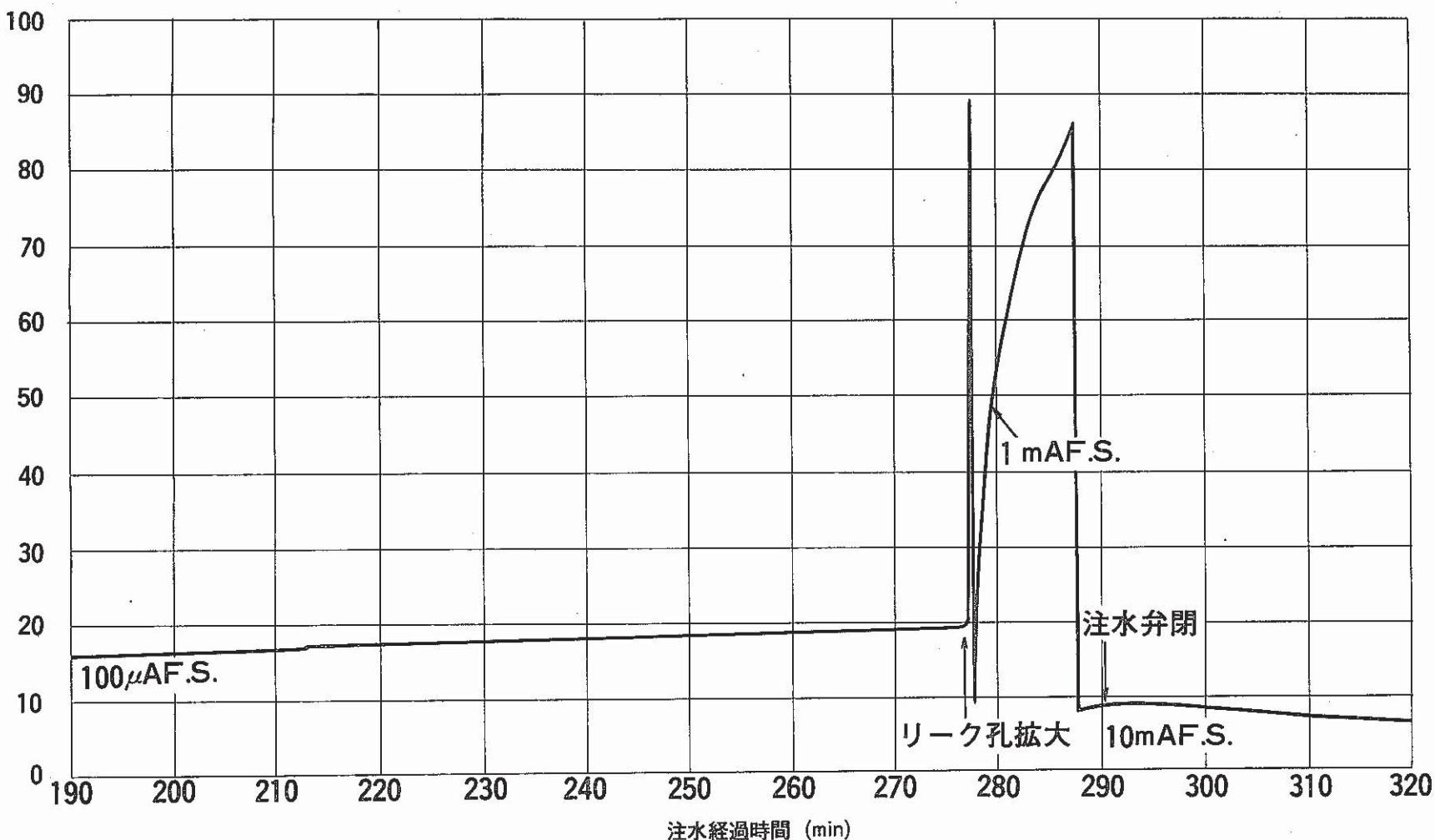


図 4.12 Run2011-1 注水時のNa中水素計出力(イオンポンプ)変化

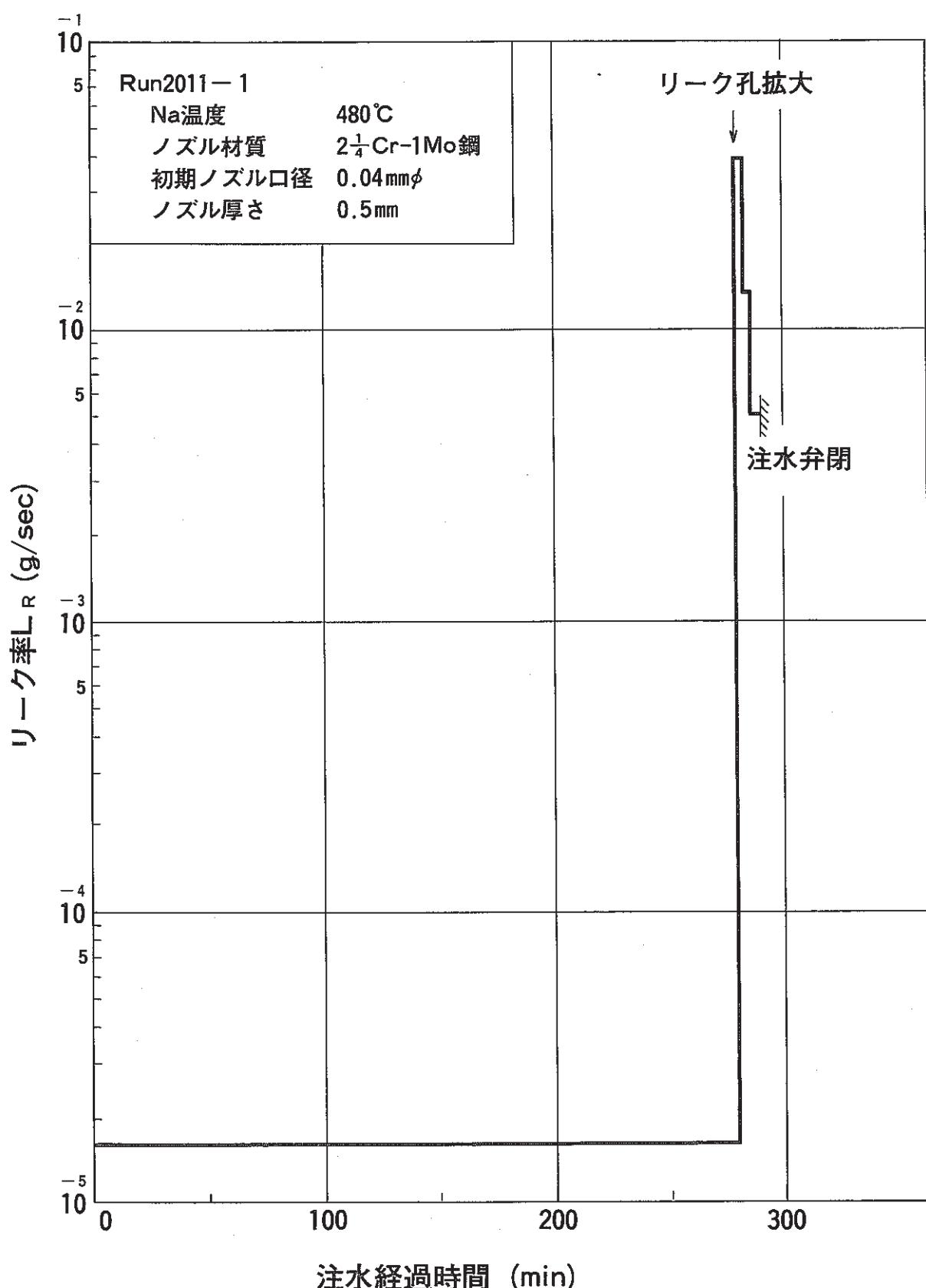


図4.13 注水開始後のリーク率変化 (Run2011-1)

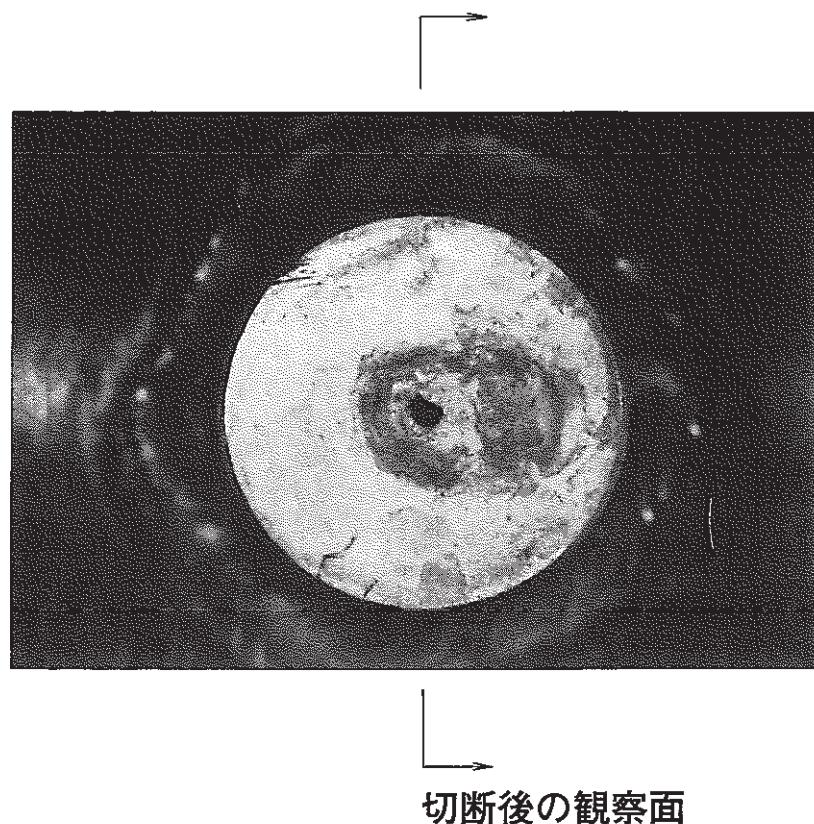
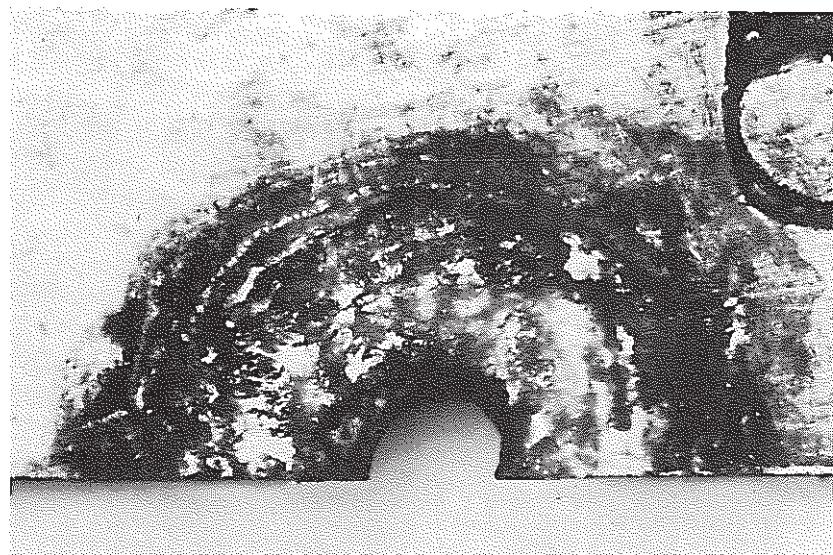
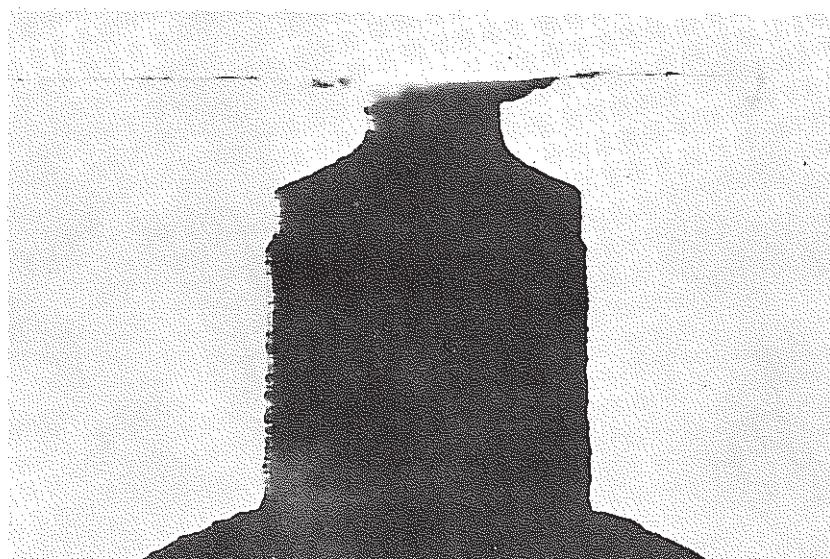


写真4.7 注水試験後のナトリウム側ノズル外観 (Run2011-1)



ナトリウム側



蒸気側

×20

写真4.8 Run2011—1 ノズル損耗部の断面およびナトリウム側平面

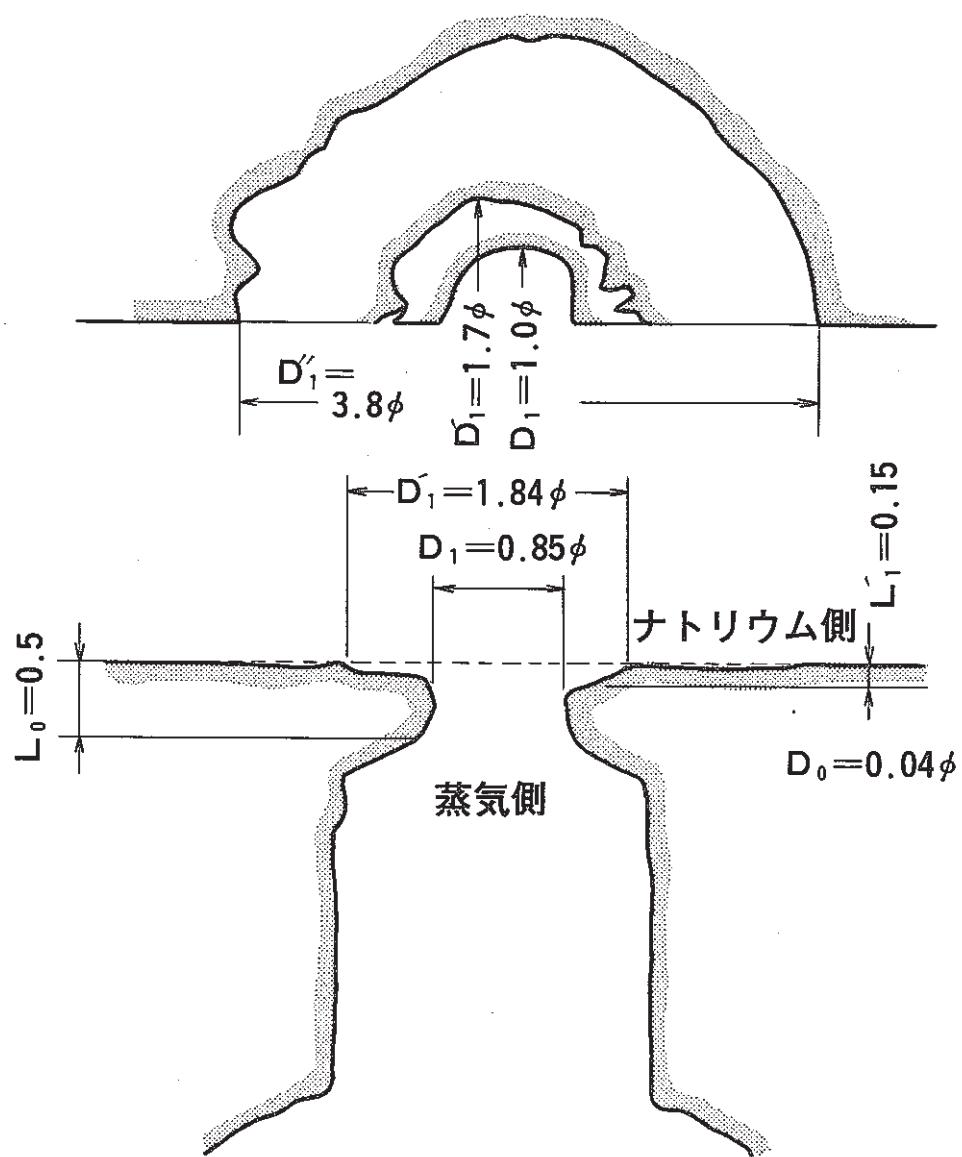


図4.14 ノズル損耗部断面寸法 (Run2011-1)

単位:mm

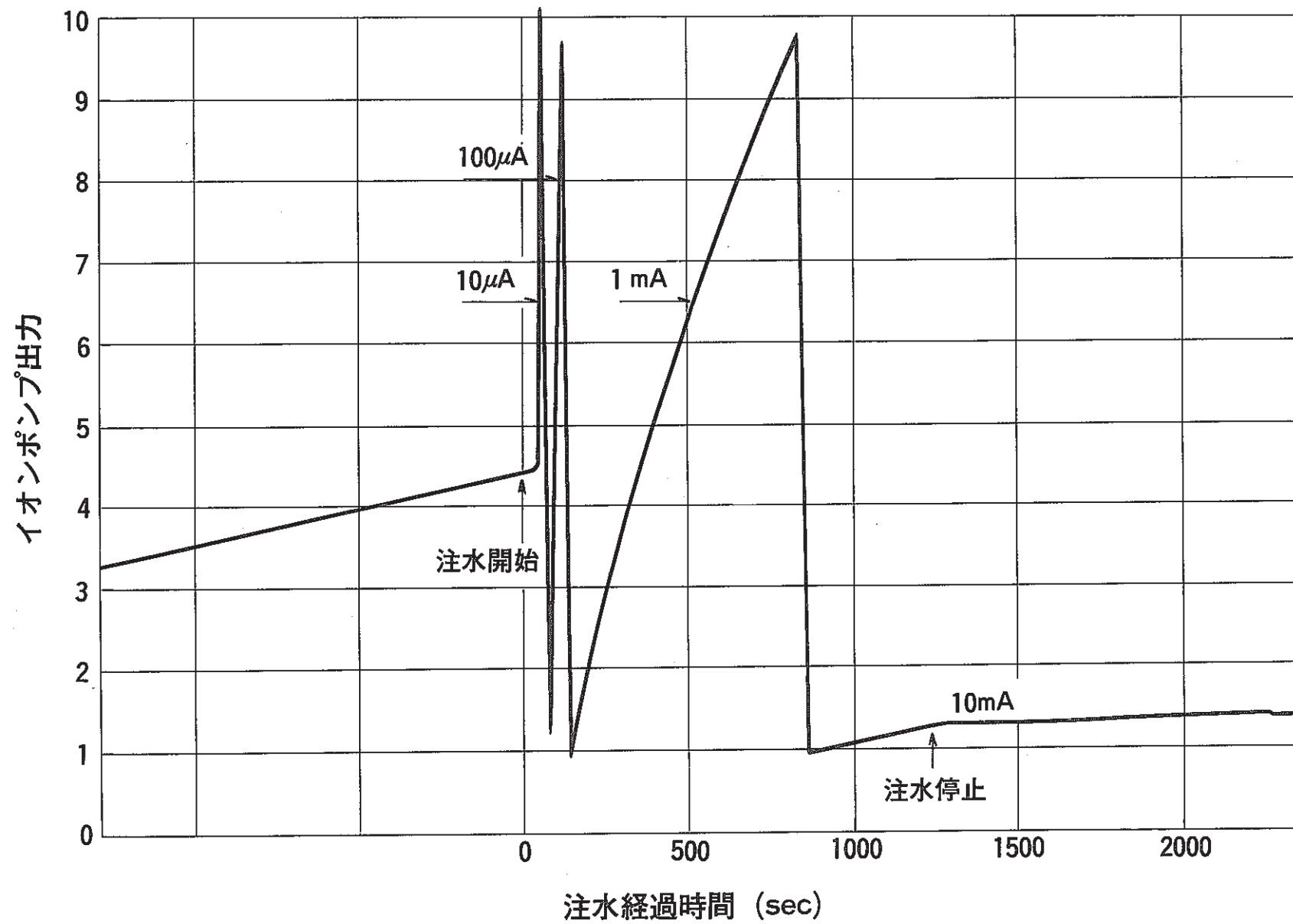


図4.15 Run2012-1 注水時のNa中水素計出力変化

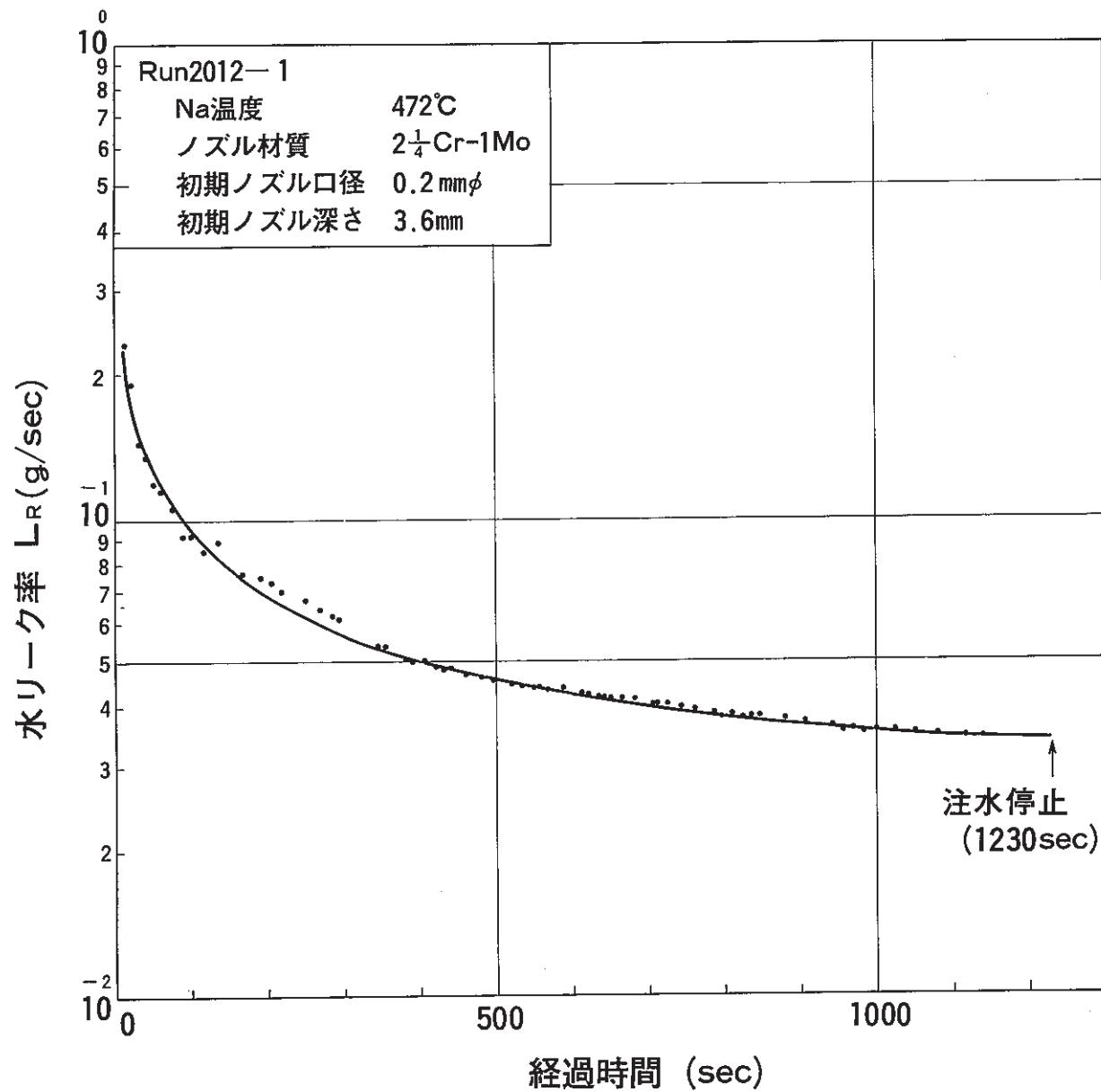
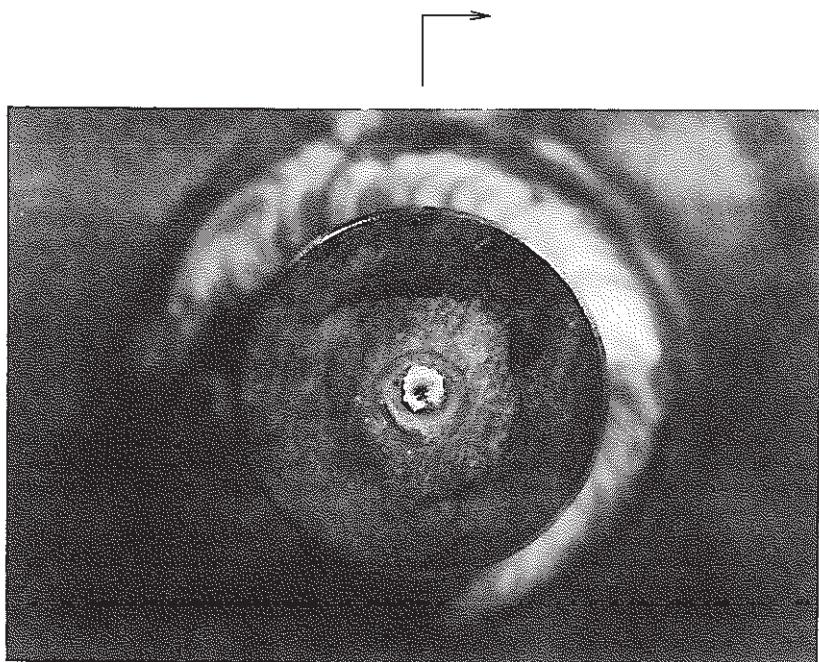
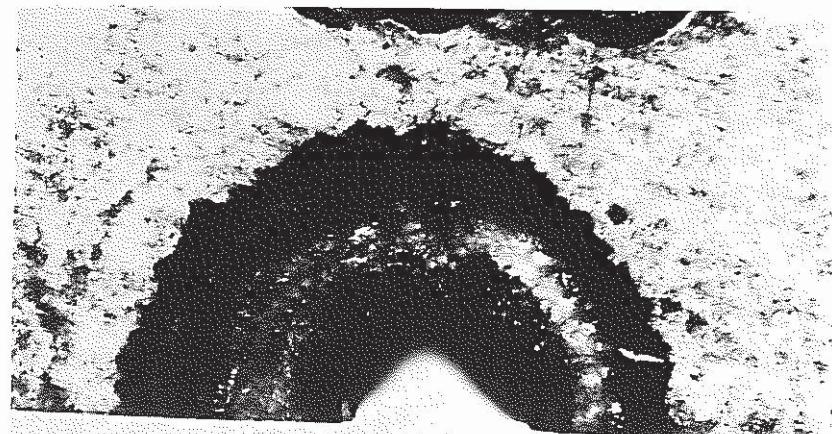


図4.16 注水開始後の水リーク率変化 (Run2012-1)

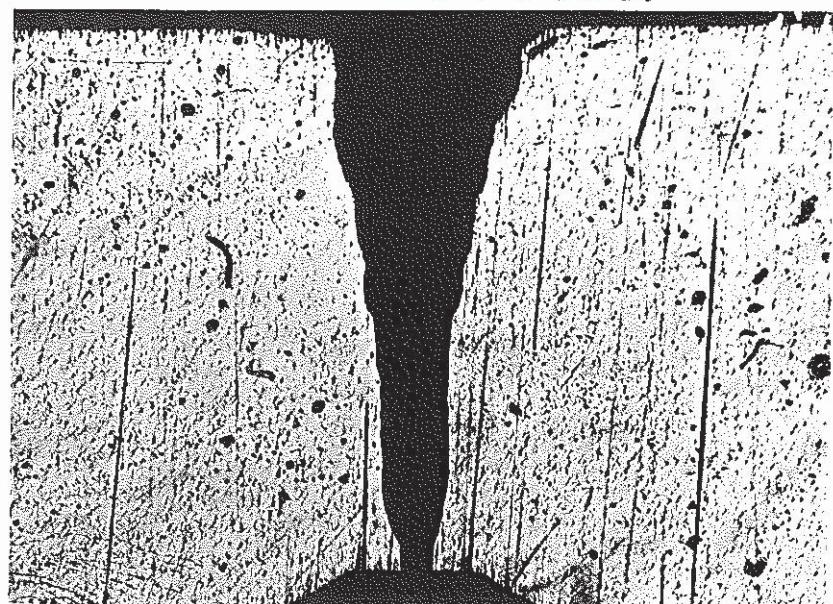


切断後の観察面

写真4.9 注水試験後のナトリウム側ノズル外観 (Run2012-1)



ナトリウム側



×20

写真4・10 Run2012-1 ノズル損耗部断面およびナトリウム側平面

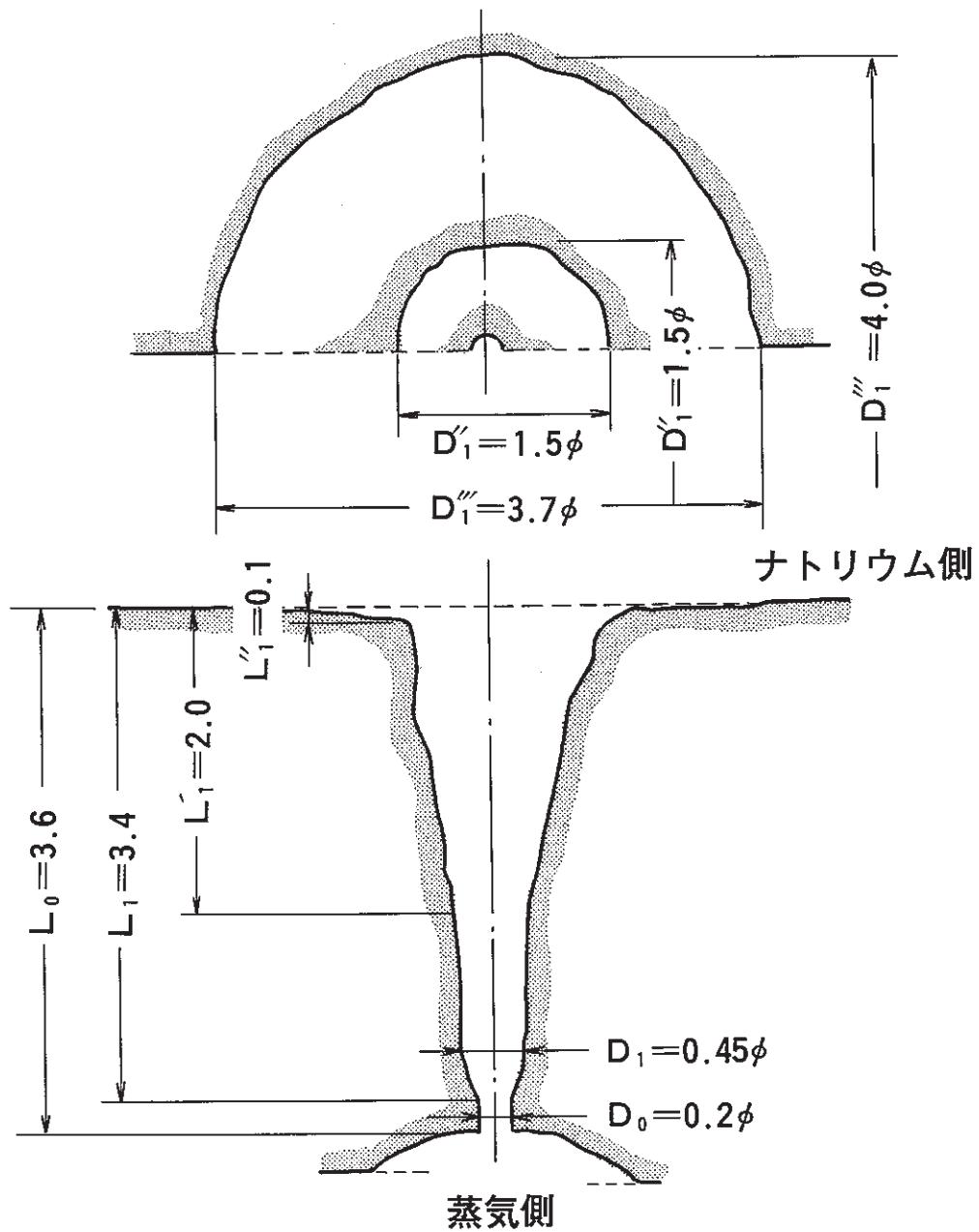


図4.17 ノズル損耗部断面寸法 (Run2012-1)

単位:mm

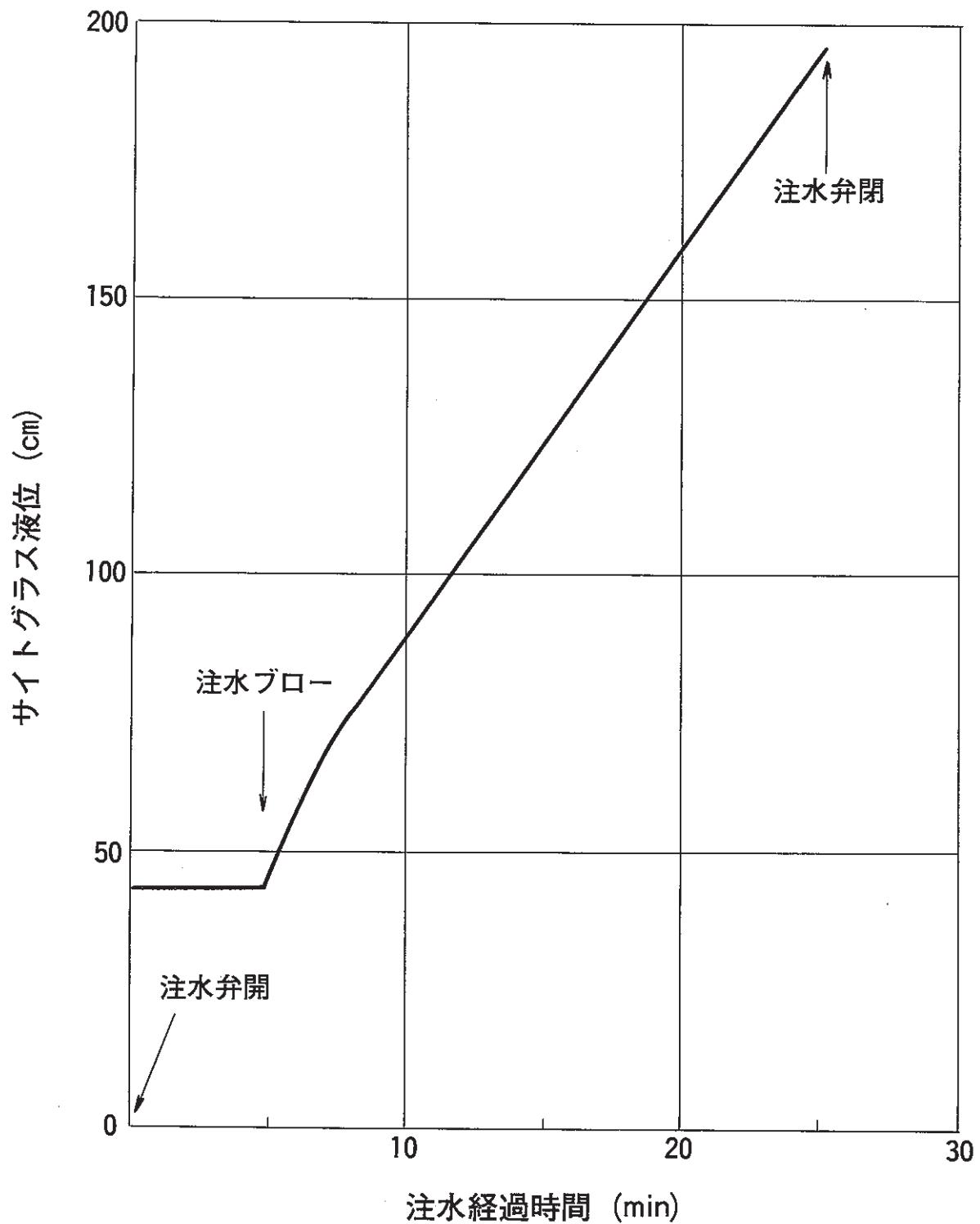
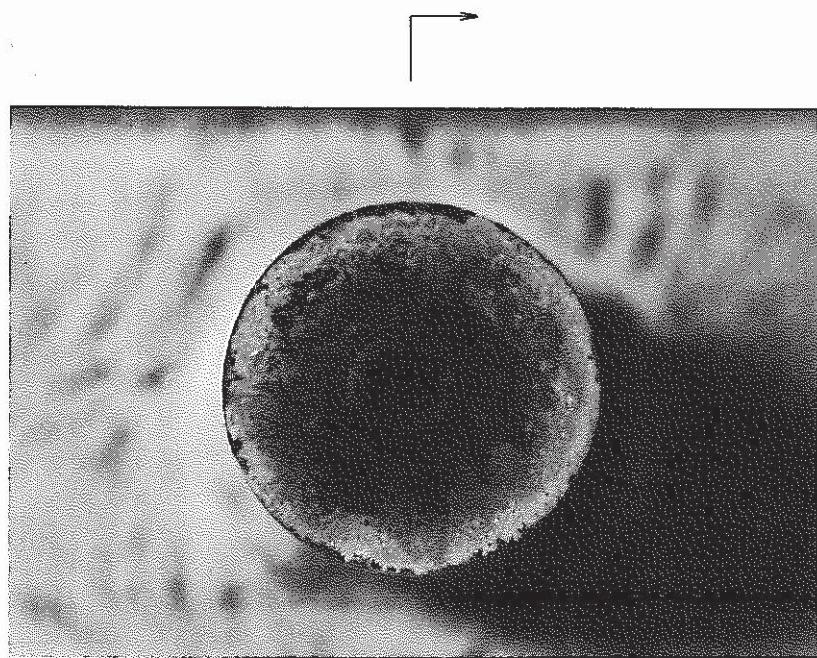


図4.18 注水開始後のサイトグラスの液位変化 (Run2014-2)



切断後の観察面

写真4.11 注水試験後のナトリウム側ノズル外観 (Run2014-2)

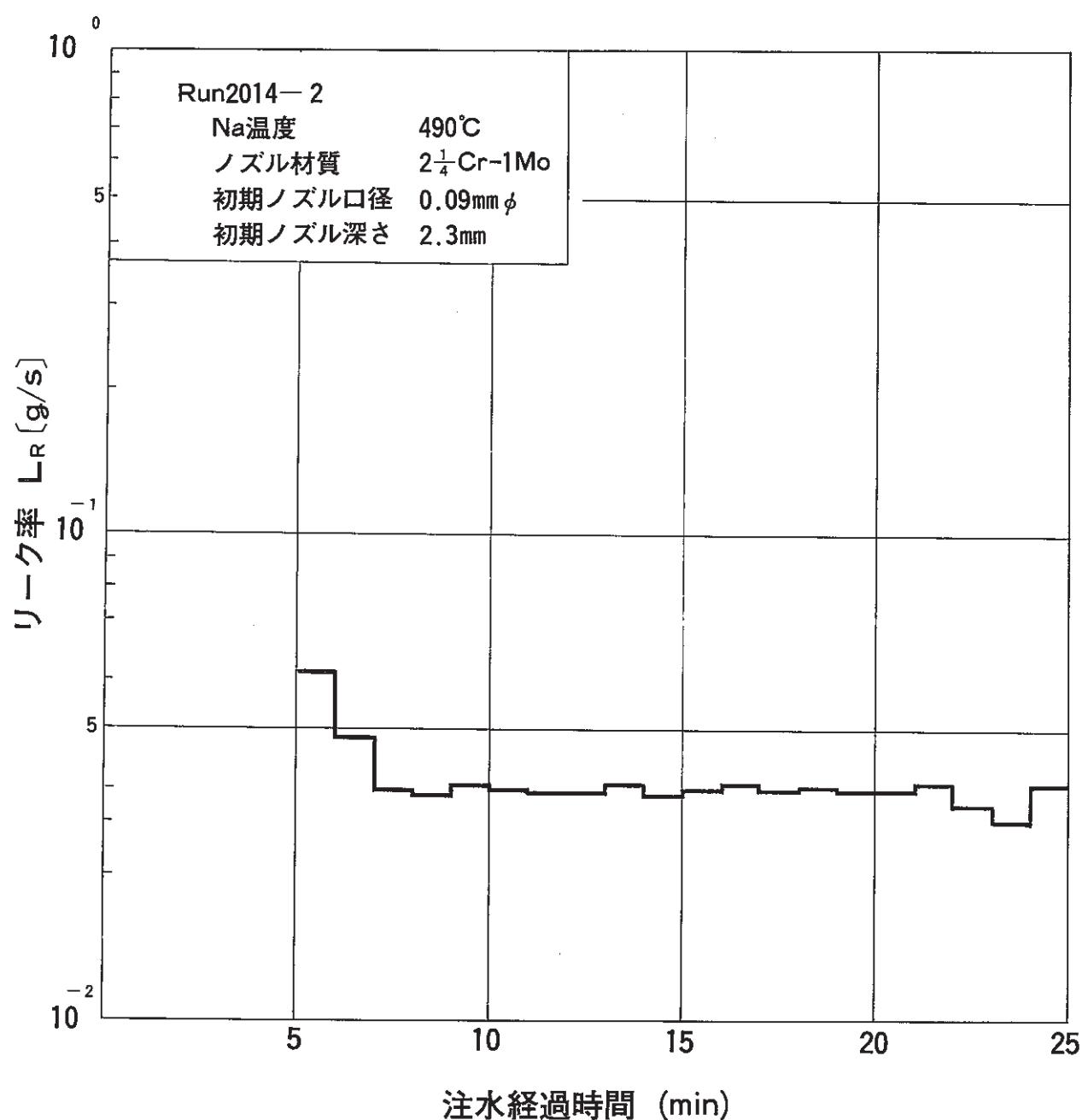
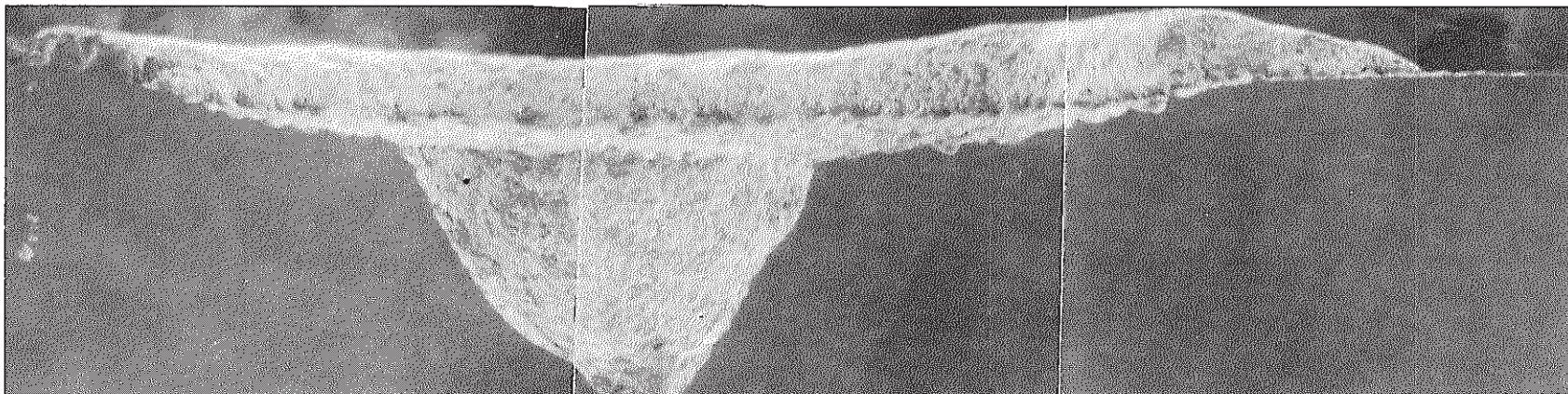
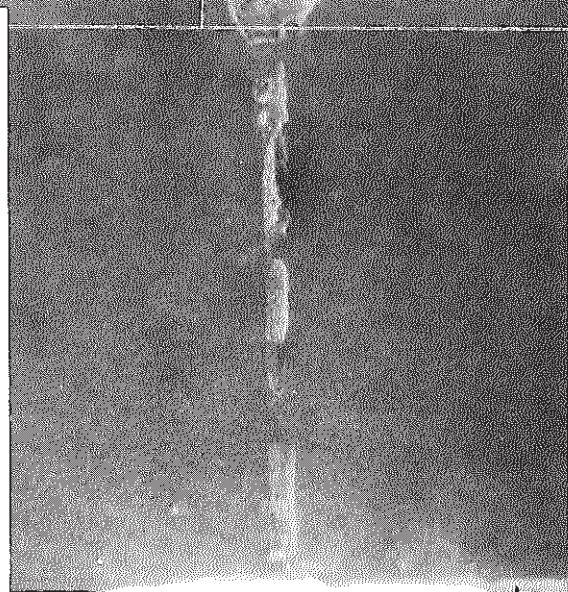


図4.19 サイトグラス液位から求めた注水率変化(Run2014-2)

ナトリウム側

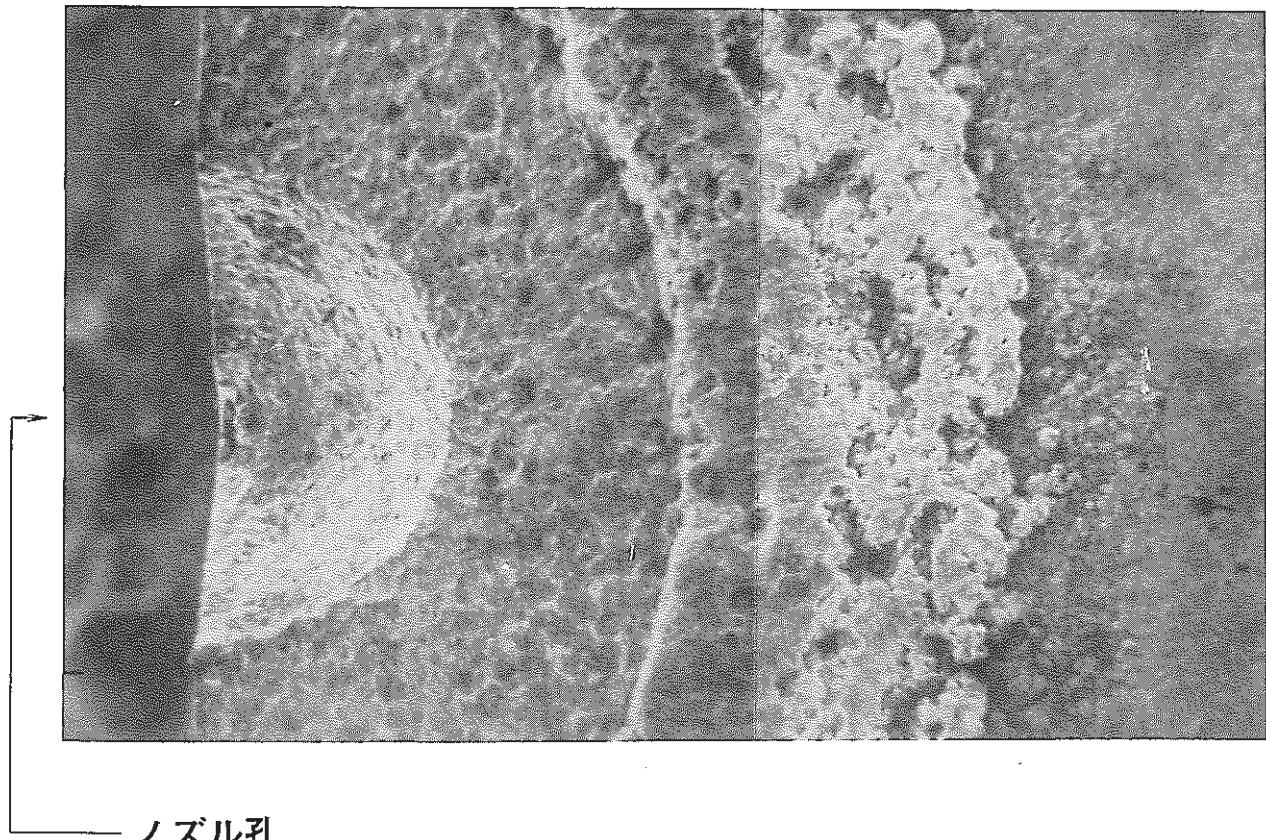


×28



蒸気側

写真4.12 Run2014-2 ノズル損耗部断面



ノズル孔

×32

写真4.13 Run2014-2 ノズル損耗部（ナトリウム側平面）

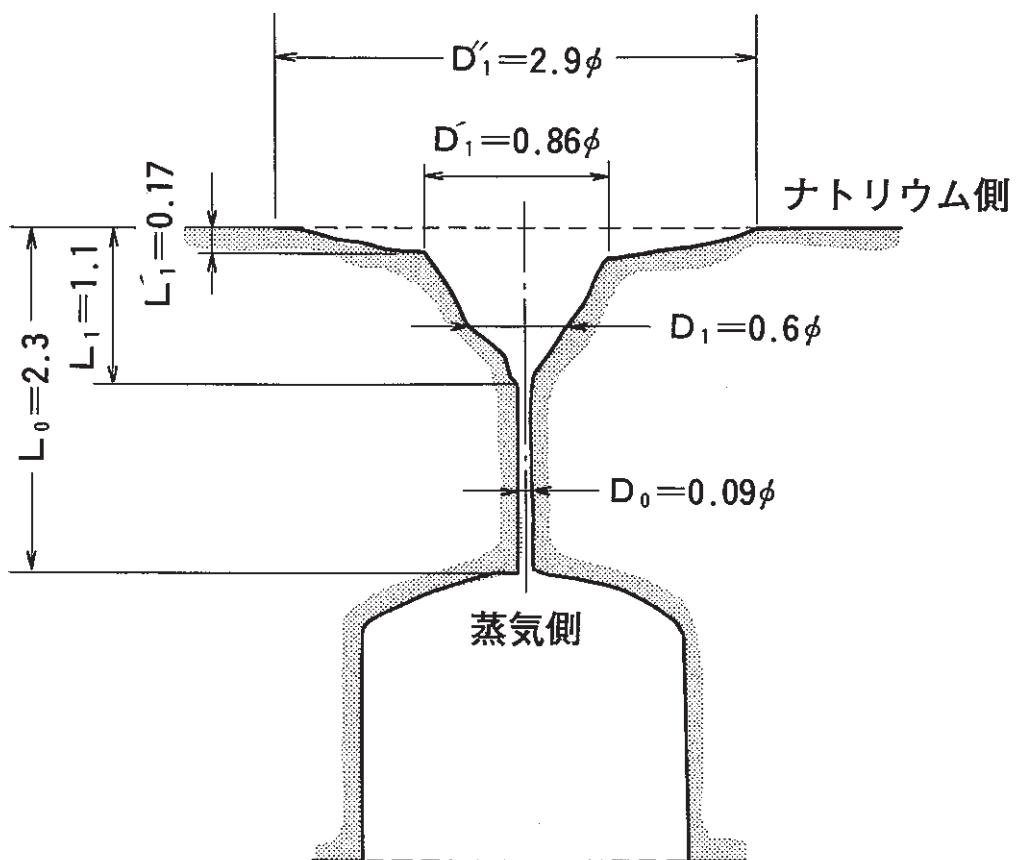


図4.20 ノズル損耗部断面寸法 (Run2014-2)

単位:mm

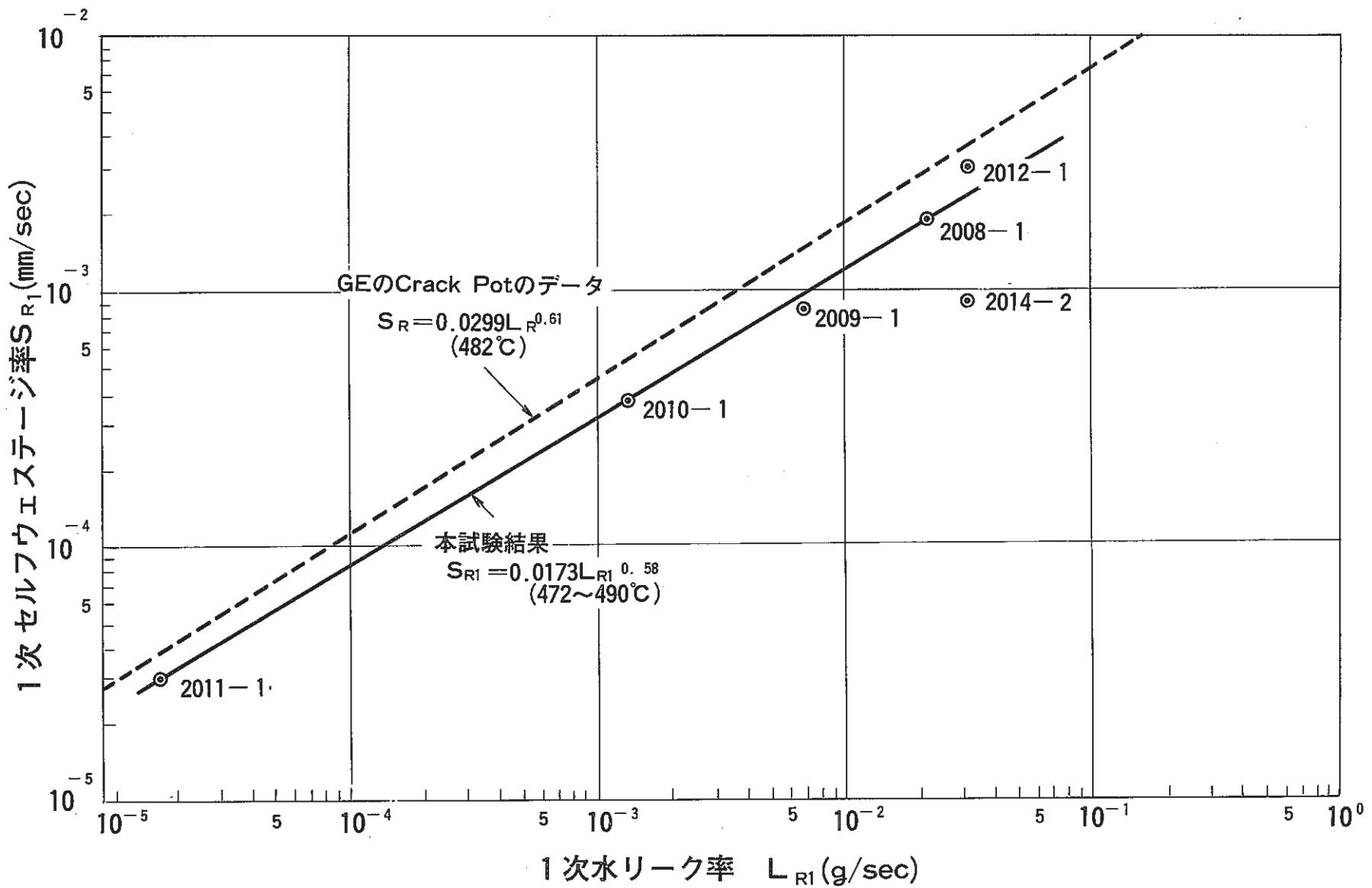


図5.1 1次水リーク率と1次セルフウェーステージ率の関係

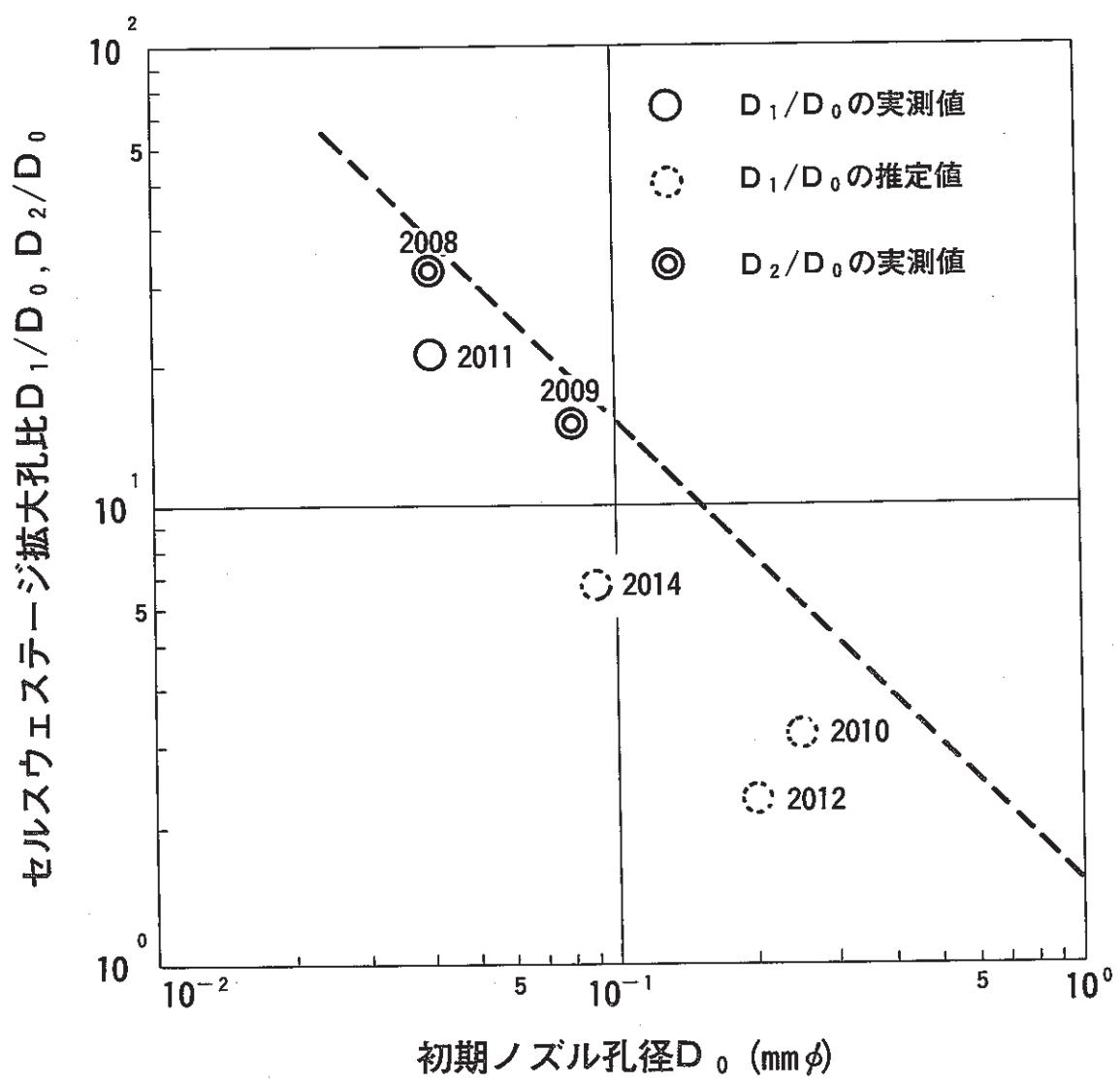


図5.2 初期ノズル孔径  $D_0$  とセルフウェステージ拡大孔径比  $D_1/D_0, D_2/D_0$  の関係

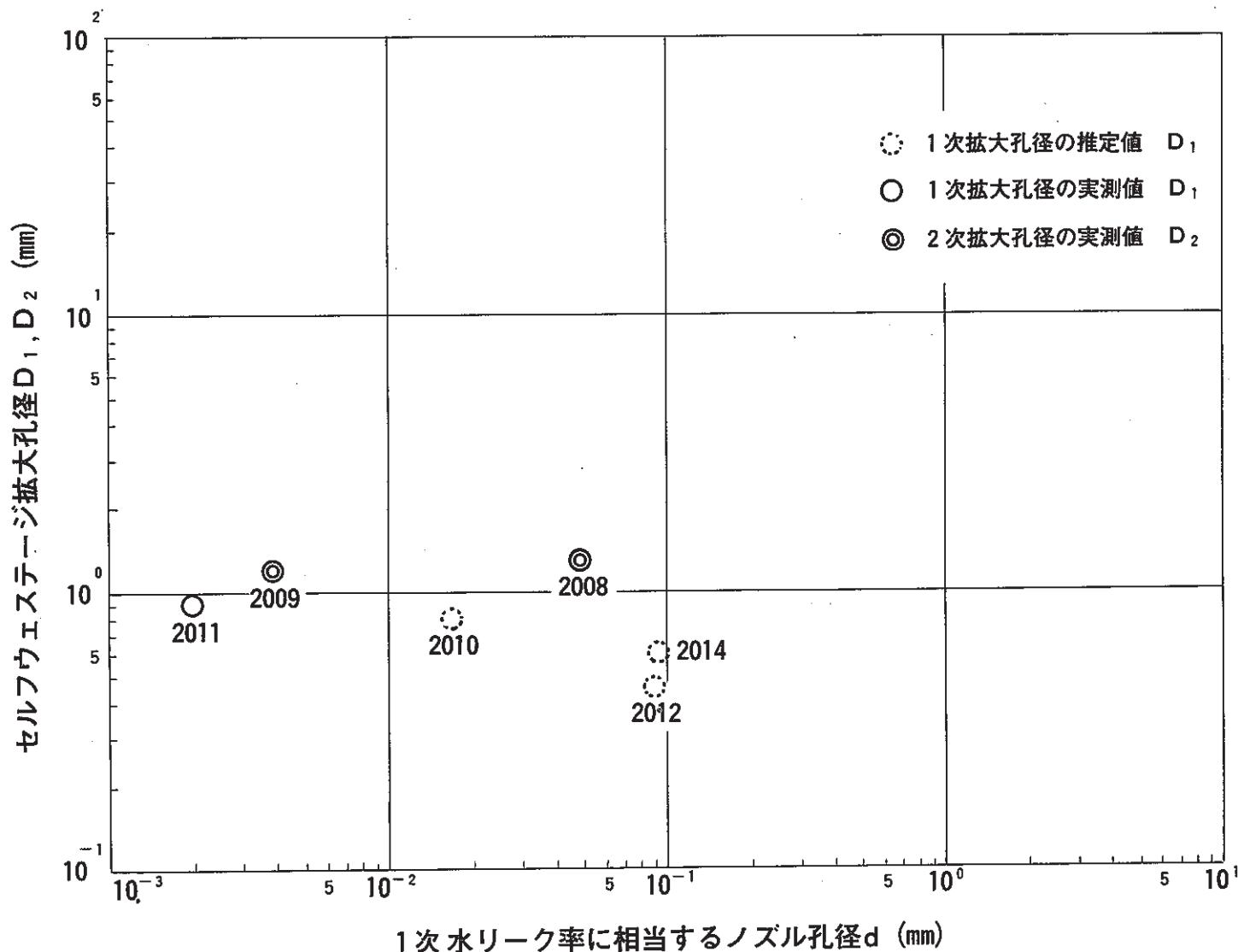


図5.3 水リーク率に相当するノズル孔径  $d$  とセルフウェーステージ  
拡大孔径  $D_1, D_2$  の関係

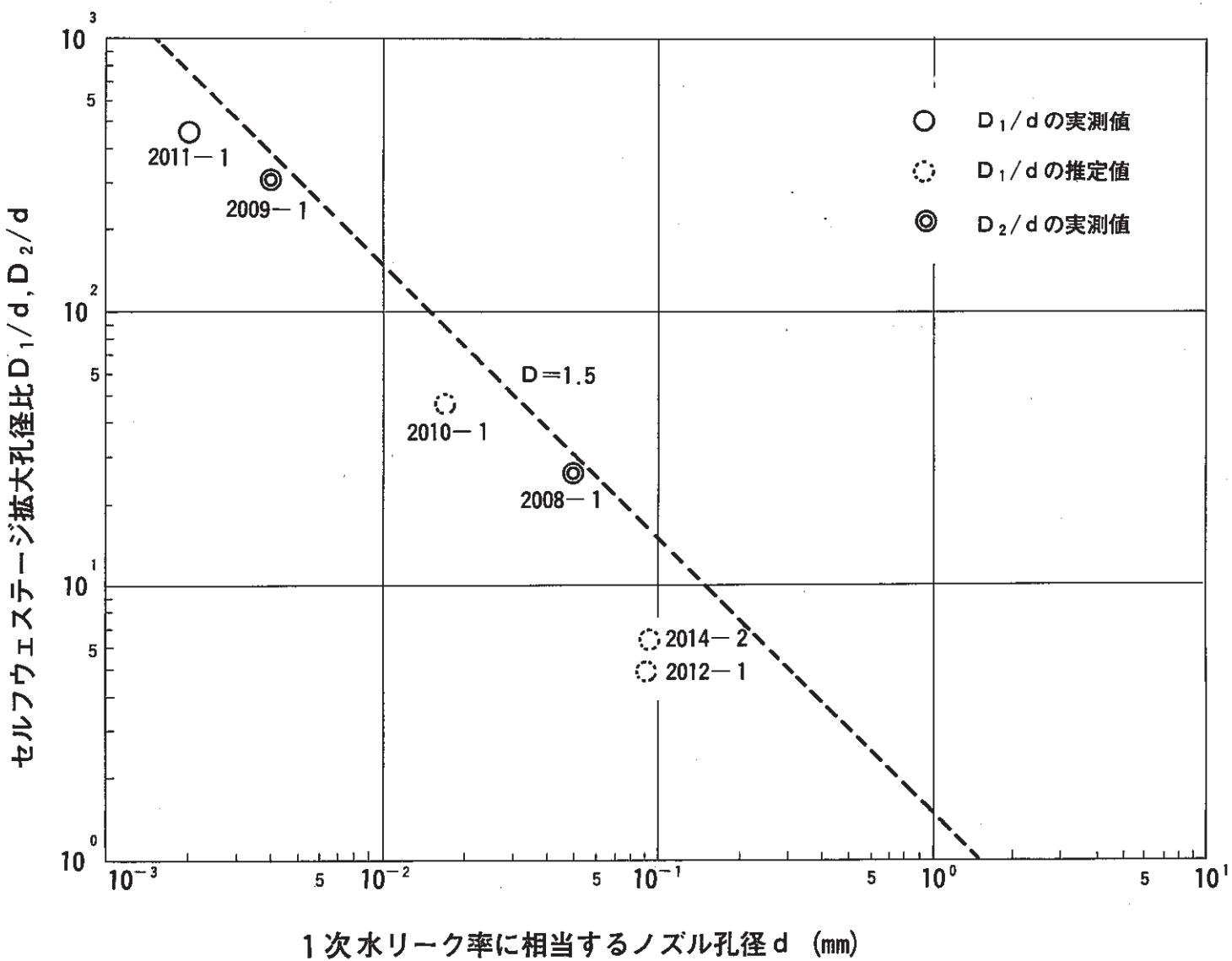
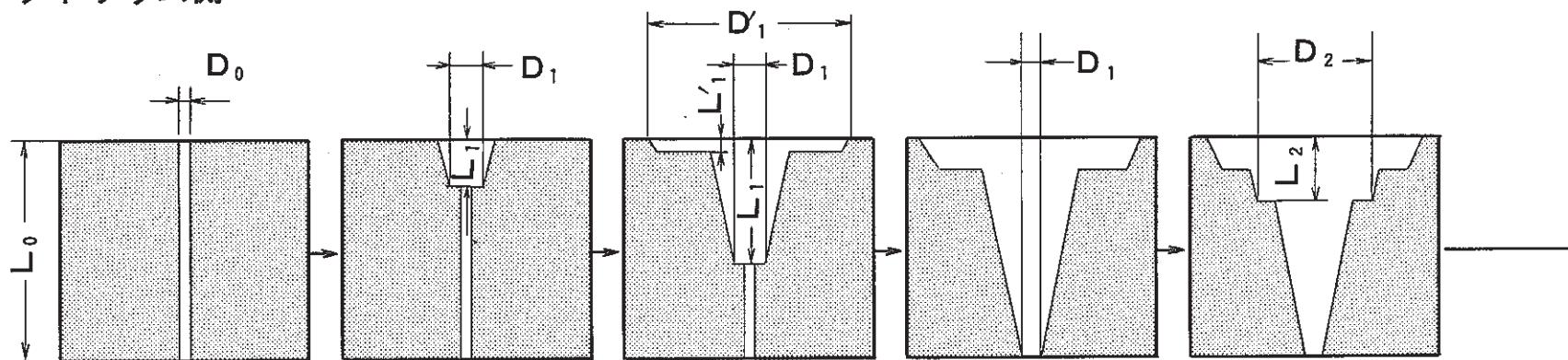


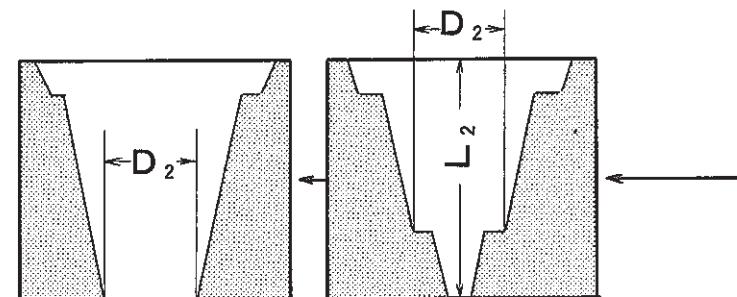
図5.4 水リーク率に相当するノズル孔径  $d$  とセルフウェステージ拡大孔径比  $D_1/d, D_2/d$  の関係

ナトリウム側



蒸気側

- (イ) 注水前      (ロ) 1次リーク孔  
                        拡大開始      (ハ) 1次リーク孔 拡大進行      (二) 1次リーク孔拡大  
                        完了      (ホ) 2次リーク孔拡大開始



- (ト) 2次リーク孔拡大  
                        完了      (ヘ) 2次リーク孔拡大  
                        進行

図5.5 セルフウェステージによるリーク孔拡大進行過程のモデル