

小リーク・ウェステージ研究プログレスレポート(その1)

(小リーク・ナトリウム水反応試験研究 第11報)

1977年11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)

1977年11月30日

小リークウェステージ 研究プログレスレポート（その1）  
 （小リーク・ナトリウム水反応試験研究 第11報）

報告者 鐘ヶ江 直道\*  
 大後美道\*  
 池本一郎\*  
 井上設生\*

堀 雅夫\*\*

要旨：

本プログレスレポートは、小リーク・ナトリウム水反応研究で得られた情報のうち、小リークウェステージに関するものを速報的に報告するもので、日本原子力学会の講演原稿をもととした全6編より構成されている。

各編の報告内容は以下のとおりである。

第1編； ウェステージに及ぼすノズル・ターゲット間距離の効果に関する報告であり、この距離を 5mm から 35mm まで変えた実験結果および考察についての報告である。同一注水率であっても距離L)が大きければウェステージ率は下がるが、ノズル径(D)との比 L/D が 25～40 の処にウェステージ率最大点が生ずる事等を測定した。

第2編； リーク孔拡大(セルフウェステージ)すなわち水がリークしている孔自体が時間とともに拡大して行く現象に対する考察を記した。これまでこの現象の報告はいくつかあったが、ここではこの拡大時間、拡大量等に対し定量評価を試み、内外の実験結果と比較評価した。

第3編； 第1編で報告したウェステージに及ぼす距離の効果の研究の続編であり、更に実験データを積み重ねた結果として、前報の内容の再確認と更にウェステージ断面部形状を表わす半実験式や、ウェステージの発生しない領域等に対する考察を述べた。

第4編； ウェステージデータ整理コード「SWAC-8」は全世界のウェステージ実験結果を収録し、各種パラメータの効果の評価およびそのパラメータを組合せた整理式の算出が行えるコードである。本項ではコードの内容および全データを基としたパラメータ評価および最小二乗法で求まったウェステージ整理式の提唱を行った。

\* 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

\*\* 大洗工学センター蒸気発生器開発部部長代理

第5編； ウェステージの生じたターゲット材に対し各種金属学的検査を施しウェステージ発生機構に関する考察を述べた。SWAT-2(小リーク), SWAT-1(中リーク)の使用ターゲットを検査対象とし、ウェステージ発生面のコロージョン程度およびエロージョンの程度の比較や、ノズルとの間隙の相異による両効果の比較によって機構の評価を試みた。

第6編；  $10^{-3} \sim 10^{-4}$  g/sec 程度のリーク率によるウェステージ試験結果に関する報告。このリーク率(微小リーク)ではターゲットウェステージのみならずノズルウェステージ(ノズル孔自身が拡大または閉塞する現象)が重要な検討対象となるが、両者に対する実験的評価を行いターゲットおよびノズル部のウェステージ観測結果について述べた。

## 目 次

まえがき.....	1
I ウェステージに対する距離の効果.....	3
II リーク孔拡大に関する考察.....	17
III ウェステージに対する距離の効果(その2).....	31
IV ウェステージ率整理式の検討.....	41
V ナトリウム-水反応によるSG伝熱管ウェステージの金属検査.....	51
VI 微小リークにおけるノズルおよびターゲットのウェステージ現象.....	63
付録：原子力学会前刷抜粋.....	73

## まえがき

Na 冷却高速増殖炉プラントに於ける蒸気発生器の開発研究の一部であるNa-水反応研究は安全性評価のみならず経済性の面からも重要な項目の一つであり、これまで内外多くの研究報告がなされている。

Na-水反応現象は大略、大リーク現象と小リーク現象に分けられ、前者がその発生確率は小さいと考えられるものの、その影響範囲、程度は大きい、また逆に影響範囲、規模は小さいが発生確率の大きい事を予想せねばならぬのが後者である。動燃の小リーク・ナトリウム-水反応試験装置(SWAT-2)を用いた試験はその名の示すとおり小リーク現象を対象として継続されているもので、リークにより隣接伝熱管の肉厚減少が生ずる現象である「ウェステージ」とリーク発生を極力早期に知るための「リーク検出計」と2つの研究を進めている。

本書はこの2つの研究項目のうち「ウェステージ研究」に関するもののみを速報的に報告する目的で作成するもので、以下の要領で記載している。

1. 学会(主に日本原子力学会)で口頭発表した項目毎にまとめる。
2. 口頭発表時の原稿に多少手を加えたものと、使用スライドのコピーとを一頁内に納め記述する形式とした。
3. 本文の各章に対応する学会の前刷集からの抜粋を付録として付けた。
4. 本書に記載した内容はあくまで速報を目的としたプログレスレポートであり、別報にて各項に対応する詳細報告書を出す予定(あるいはすでに出ていているものも本書には含まれる)であり、内容的に重複する部分も生ずる。
5. 本報はプログレスレポートの(その1)として作成したため昭和50年発表分から記載したが、

今後は年一回発刊しその年の発表分のみを載せる計画である。

本書の報告内容は目次からお判りになるとおり、ウェステージ研究として実施した、実験結果および金属学的検査結果の報告を中心とした、ターゲットウェステージ、ノズル・ウェステージ、ウェステージ発生機構およびウェステージ率評価式に関するものである。このうちI、II、IIIおよびV章に関してはすでに別の技術報告書でその詳細を報告すみであるが、IVおよびVI章については今後詳細の報告書を出す計画である。

## I. ウエステージに対する距離の効果

執筆：橋 口 功\*

本項は、日本原子力学会昭和50年分科会で「小リーク・ナトリウム-水反応試験（第13報）」として発表したものの講演原稿をもとにしてまとめたものである。

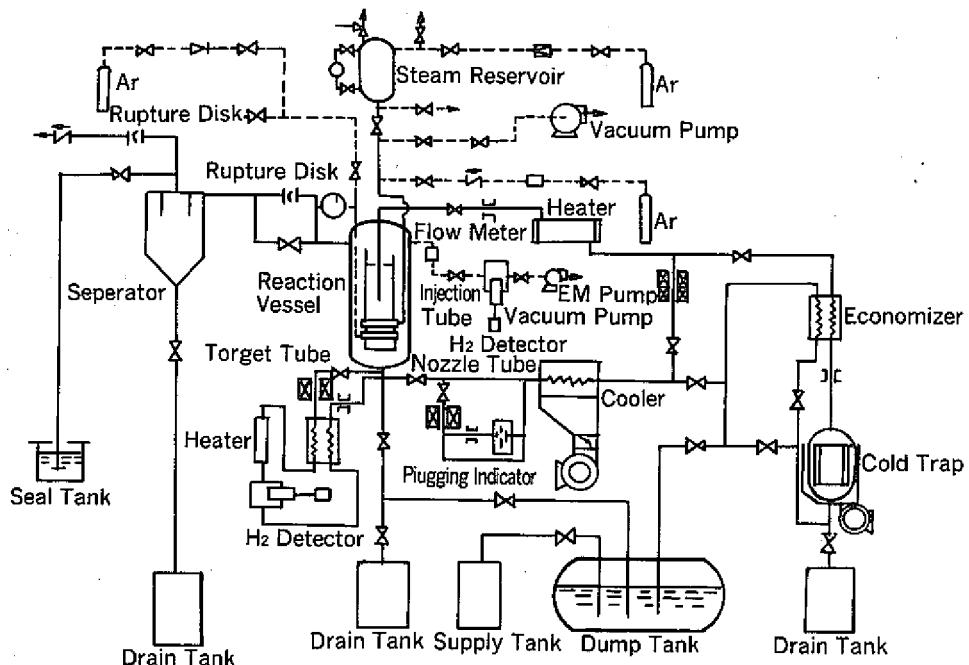
上記発表前刷を付録-I に示す。

## (1) 試験装置

これまで動燃では小リーク・ナトリウム水反応試験装置を用いて、原型炉蒸気発生器のヘリカルコイル部を想定してノズル・ターゲット間距離17.5 mmと一定にしたウェステージ試験を行なってきた。それ等の結果よりウェステージ率へのナトリウム温度、リーク率、ターゲット材質の影響が検討され、発表されている。実機蒸気発生器における伝熱管距離はヘリカルコイル部およびダウンカマ部で異なり、また同じヘリカルコイル部でも設計により異なった距離を用いているのもあり、ウェステージに対する距離の効果を調べることは極めて重要なことと考えられる。

本報告は、ウェステージへの距離の影響を調べるために、ノズル・ターゲット間距離を変えたウェステージ試験を行なって得られたウェステージに対する距離の効果を表わす知見について述べたものである。

注水試験は動燃の SWAT 2 試験装置を用いて行なわれた。本装置は小リーク・ナトリウム水反応によるウェステージ試験ならびにリーク検出計応答試験が行なえるようになっている。試験ループはそれぞれ、主循環系、純化系、注水系、放出系、リーク検出系などに分かれており、注水試験時には反応容器中の試験部へ蒸気加熱器で加熱、加圧された水蒸気が注水管を通して注水されるようになっている。注水量は水加熱器の注水前後の温度、圧力より計算により求め る。SWAT 2 試験装置の概略を下図に示す。



## (2) 試験条件および試験結果

本表は試験条件ならびに試験結果を示すものである。試験条件の概要は、ナトリウム温度480℃、Na流速0.24m/s、ターゲット材質 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼である。ターゲット材質とナトリウム温度は、今までの試験結果からウェステージのされやすい厳しい条件を選んだ。ノズルの注水方向は水平方向であり、ターゲットの中心部に直角にあたるようになっている。試験回数はNo.98～No.107の計10回行ない、ノズル径は0.3mmおよび0.5mmの2種類を使用した。ノズル・ターゲット間距離は本表のとおり5～35mmの範囲で変化させてウェステージ試験を行なった。注水率はそれぞれ0.3φで約0.5g/s、0.5φで約3g/sとなっている。

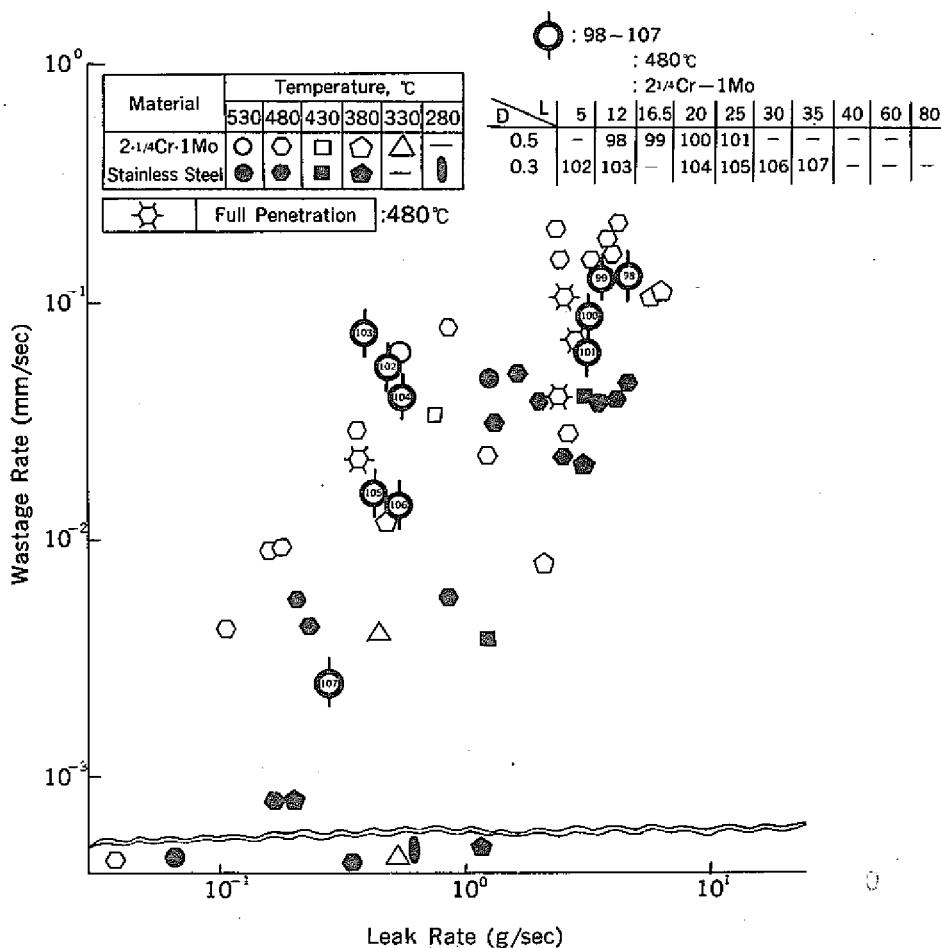
Sodium Temperature	480℃
Flow Rate	0.24m/s
Target Material	$2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo
Injection Direction	Horizontal

Test No	Nozzle Dia. (mm)	Spacing. (mm)	Leak Rate (g/s)	Wastage Rate (mm/s)	W.L. Rate(g/s)	Specific Wastage(mm/g)
98	0.5	12	4.44	0.133	$5.67 \times 10^2$	$30.0 \times 10^3$
99	0.5	16.5	3.76	0.124	5.879 "	33.0 "
100	0.5	20	3.25	0.0908	5.119 "	27.9 "
101	0.5	25	3.36	0.0656	3.374 "	19.5 "
102	0.3	5.	0.527	0.551	0.327 "	104.6 "
103	0.3	12	0.391	0.0738	0.678 "	188.7 "
104	0.3	20	0.543	0.0412	0.454 "	75.9 "
105	0.3	25	0.420	0.0160	0.153 "	38.1 "
106	0.3	30	0.507	0.0143	0.147 "	28.2 "
107	0.3	35	0.280	0.0025	0.052 "	8.9 "

## (3) ウェステージ率とリーク率の関係

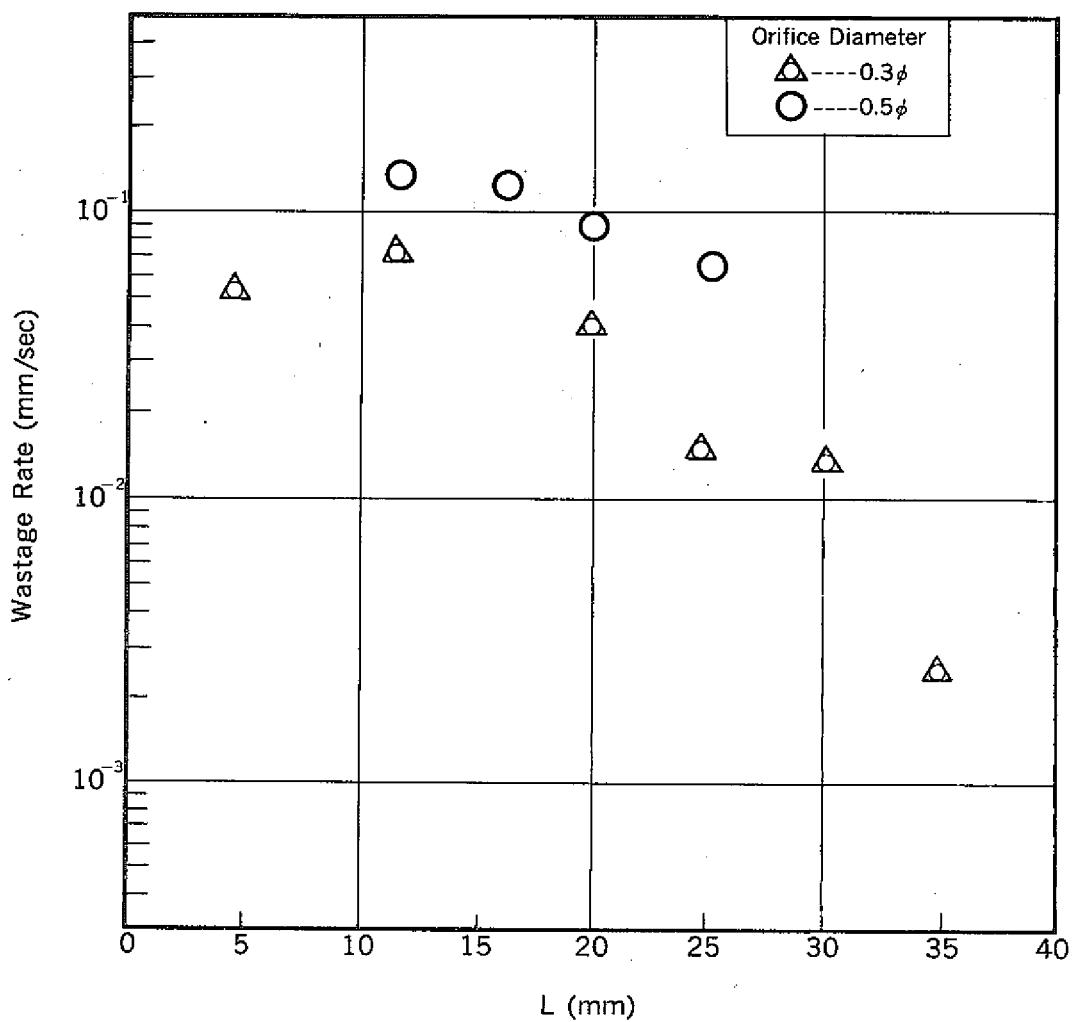
本図は横軸にリーク率、縦軸にウェステージ率（最大ウェステージ深さを注水時間で割ったもの）を取ってプロットした図である。

以前実施した距離一定試験結果もともに示してある。図中白ぬき印はターゲット材質がSUS 304 のデータを表わし、他は $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼を表わす。また図中の実線はNa 温度 480 °Cで、リーク率を変化させた $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼およびSUS 304 ターゲットのウェステージ率整理式を示す。今回の試験結果は太丸の中に数字を記入したもので示し、数字は試験番号を表わしている。今回の試験のノズル径と距離は図中の表の範囲にあり、リーク率では約 0.5g/s および 3g/s にある。0.5 φ のデータは第 99 回が最も以前のウェステージ試験の伝熱管距離に近く、また 0.3 φ では第 103 回、104 回が近くなっている。これらの試験ではいずれも、以前と同様なウェステージ率が得られ、リーク率に対するウェステージ率の値の再現性が確かめられた。さらに、図からも見られるように、試験番号 107 などのように、距離が充分大きくなると、ウェステージ率は減少することが認められる。



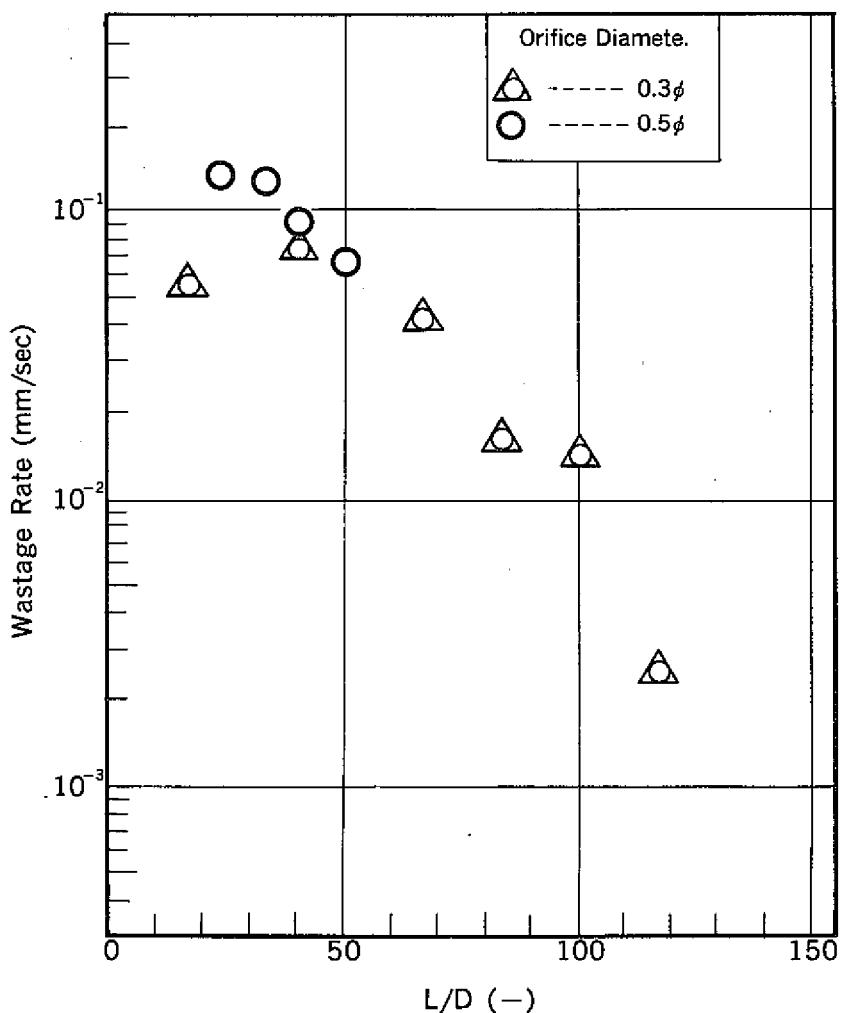
## (4) ウェステージ率におけるノズル・ターゲット間距離の影響

本図はウェステージ率へのノズル・ターゲット間の実距離の影響をみるため、横軸に実距離、縦軸にウェステージ率を取りプロットしたものである。距離が大きくなると、ウェステージ率は減少する傾向が見られる。ここで△印は $0.3\phi$ ノズルを、また○印は $0.5\phi$ のノズルを示している。次にノズルターゲット間距離にさらにノズル径の効果を入れると次のようになる。



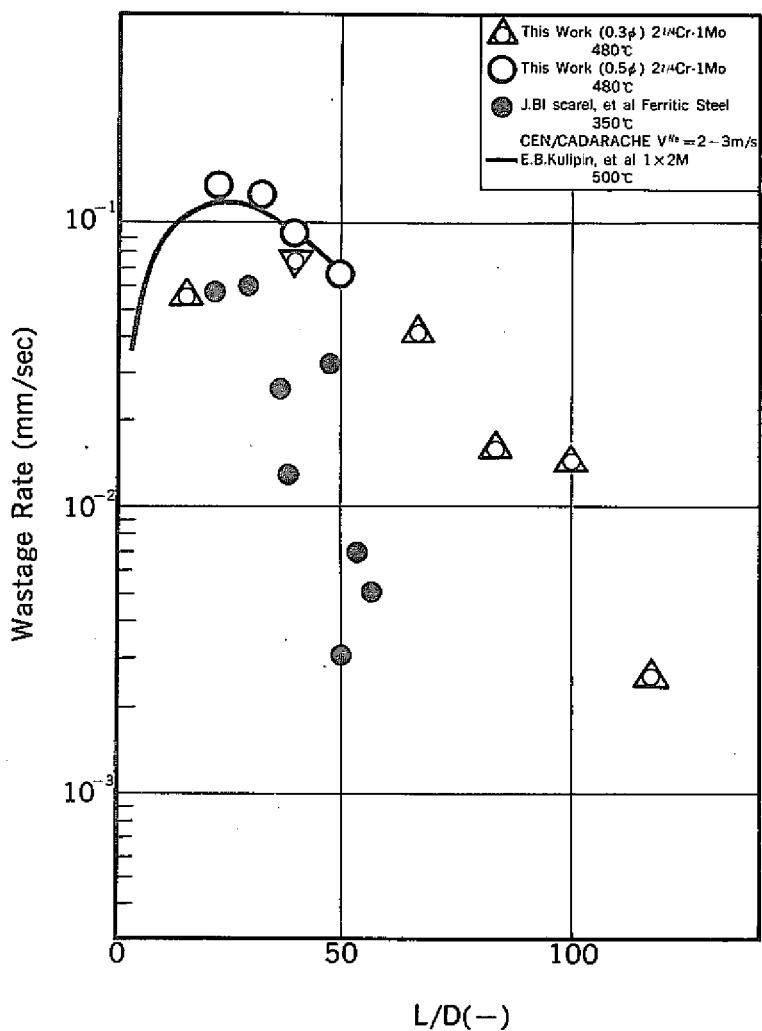
## (5) ウェステージ率におけるL/Dの影響

本図は横軸にL/D(ノズル・ターゲット間距離とノズル径の比)を、縦軸にウェステージ率を取りプロットしたものである。L/D = 25~40近傍で最大のウェステージ率を示し、L/Dが大きくなる程ウェステージ率が減少することがわかる。また、リーク率が異なるにもかかわらず、同じL/Dではほぼ同じウェステージ率を示すことがわかる。これを他の研究者の試験結果と比較すると次の図の様になる。



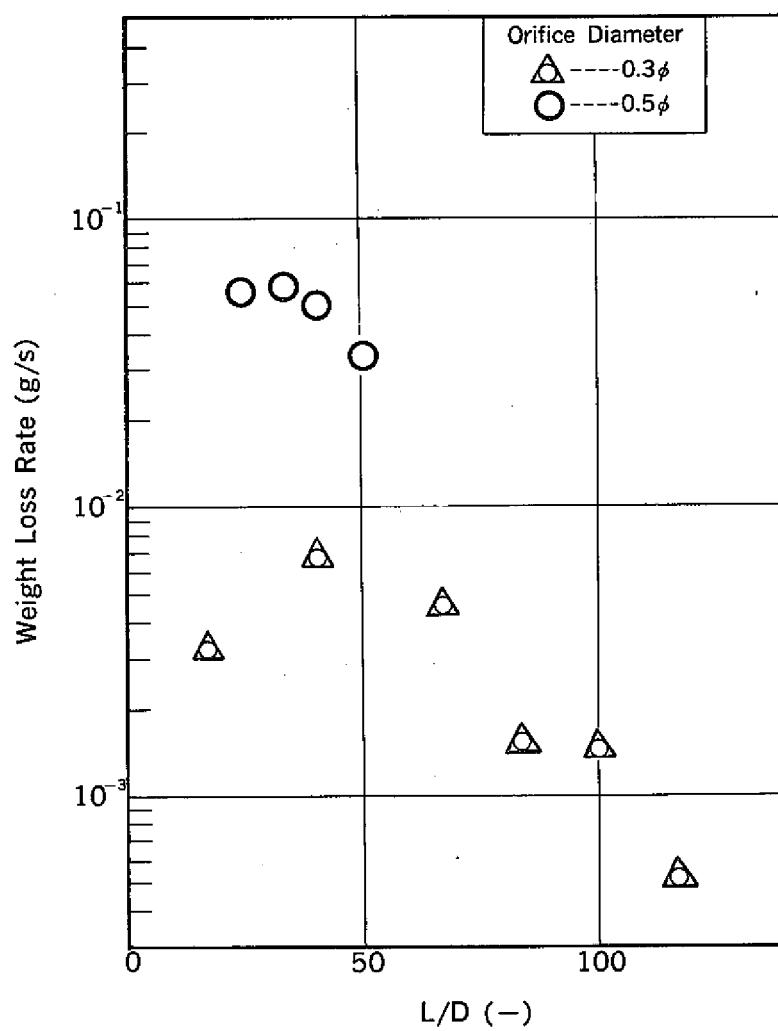
## (6) 他の研究者のデータとの比較

本図の横軸と縦軸は前図と同様に  $L/D$  とウェステージ率をとっている。図中の実線はソ連の Kulipin による  $500^{\circ}\text{C}$  Na 中のクロム・モリブデン鋼のウェステージ試験結果であり、黒丸印はフランスの Biscarel が行なった  $350^{\circ}\text{C}$  Na 中での Na 流速  $2 \sim 3 \text{ m/s}$  の条件下でのクロム・モリブデン鋼のウェステージ試験結果である。本実験結果はソ連の Kulipin のウェステージ測定結果にきわめて近くウェステージ率の最大値を与える  $L/D$  の値もほぼ一致している。なお G E の Greene らも  $L/D \approx 40$  に最大ウェステージ率が表われると報告している。フランスの試験結果では  $L/D \approx 30$ あたりからウェステージ率が単調に減少しており、距離に対しては同様の傾向を示しているが、Na 流速の早いことおよび Na 温度の低いことなどの理由により全体的に低いウェステージ率となっている。



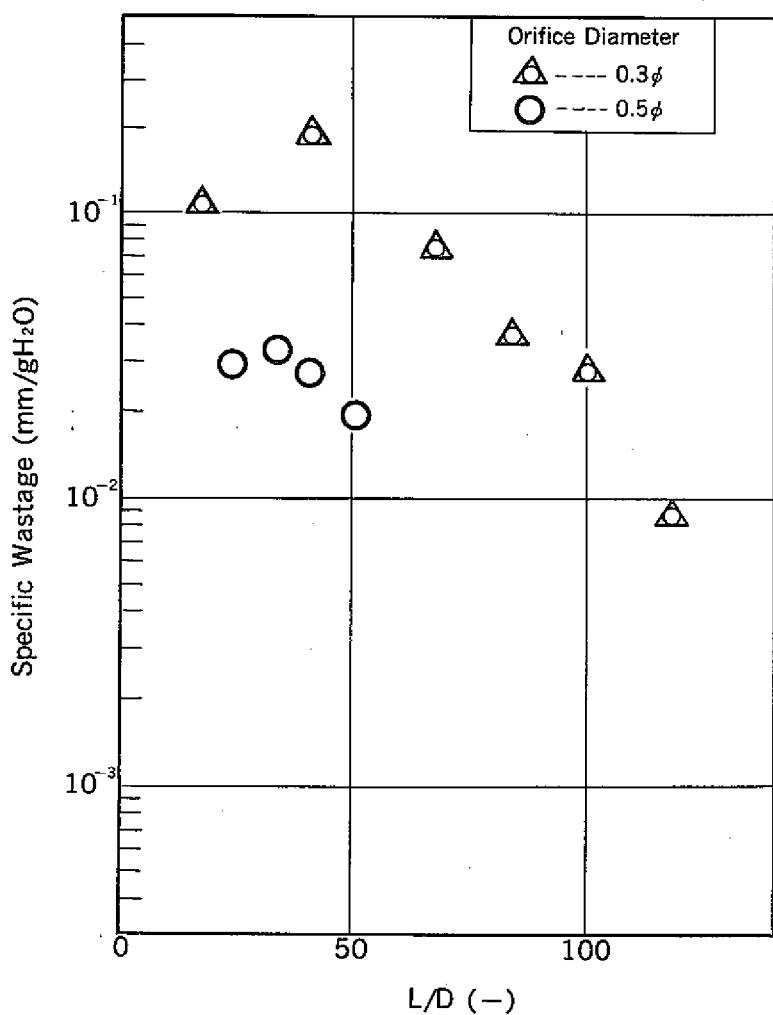
(7) 重量損率と $L/D$ の関係

本図は横軸に $L/D$ 、縦軸に重量損率(単位時間あたりのウェステージによるターゲットの重量損)をプロットしたものである。全体としてリーク率の大きな $0.5\phi$ ノズルによる試験結果が大きな重量損率を示している。またウェステージ率が最大となる $L/D$ すなわち $L/D = 25 \sim 40$  とほぼ同じ位置に最大重量損率が認められ、ノズル・ターゲット間距離が大きくなるにつれて、重量損率の値が小さくなっていることがわかる。



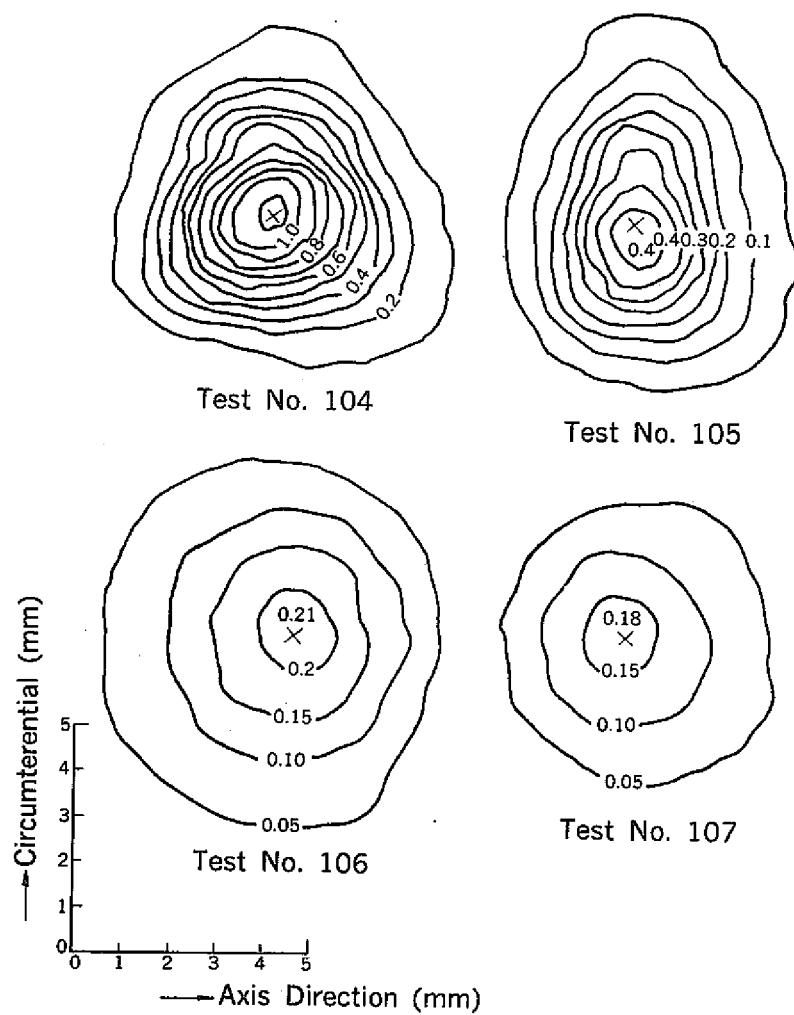
## (8) 損耗比とL/Dの関係

本図は横軸にL/D、縦軸に損耗比（単位注水量あたりのウェステージ深さ）をとってプロットしたものである。前図の重量損率とL/Dの関係とは逆にリーク率の小さい0.3φノズルの値が大きいことがわかる。すなわちリーク率の小さい方が単位注水量あたりのウェステージ深さが大きくなることを示しており、小注水率のリークの方が効果的にターゲットに損耗を与えることがわかる。



## (9) ウエステージ部の等高分布曲線

本図はウェステージ部の等高分布および最大深さを示す図である。ウェステージの等高分布および最大深さは表面測定器と、データ処理用の電子計算機を用いてプロットされる。横軸はターゲット管の軸方向、縦軸は周方向を示し、スケールは図下部に示してある。×印はウェステージの最大深さを示す。いずれの図もなめらかなピット状のウェステージを示している。

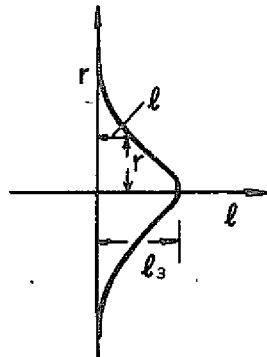


## (10) ウェステージ部の断面曲線の近似

ウェステージ部の断面曲線を正規分布曲線で表わすと深さ  $\ell$  は図中の一一番上の式すなわち  $\ell = \ell_0 e^{-\frac{r^2}{b}}$  で表わされる。ここに  $\ell$  は半径  $r$  の部分におけるウェステージ深さ,  $\ell_0$  は中心の最大深さ,  $b$  は広さを示す定数である。一方ウェステージ部体積  $V$  は  $2\pi r \ell dr$  を  $0 \sim \infty$  まで積分して求められ,  $V = \pi b \ell_0$  で表わされる。更にこの体積  $V$  に密度をかけると重量損が求まり, 重量損  $W_L$  は  $\pi b \ell_0 \rho$  となる。また最大深さ  $\ell_0$  を注水時間で割るとウェステージ率  $We$  であり, 重量損  $W_L$  を注水時間で割ると, 重量損率  $W_{LR}$  であることから重量損率  $W_{LR}$  は図中上より 4 番目の式  $W_{LR} = \pi \rho b We$  で表わされる。

以上の式のうち  $\ell_0$  は実測され, また 1 番目の式の  $\ell$  と  $r$  の関係より等高分布図を用いて広さをあらわす定数  $b$  が求まる。従って重量損  $W_L$  はこの  $\ell_0$  および  $b$  を用いて計算される。この重量損の計算値と試験前後のターゲット管の重量測定より求めた実測値を比較すると次の図の様になる。

## Weight Loss Rate Equation



$$\begin{aligned}\ell &= \ell_0 e^{-\frac{r^2}{b}} \\ V &= 2\pi \int_0^\infty r \ell dr \\ &= \pi b \ell_0 \\ W_L &= \pi b \ell_0 \rho \\ W_{LR} &= \pi \rho b We\rho\end{aligned}$$

$\ell$  : Depth of Crator (mm)

$\ell_0$  : Maximum Depth of Crator (mm)

$b$  : Constant ( $\text{mm}^2$ )

$V$  : Volume of Crator ( $\text{mm}^3$ )

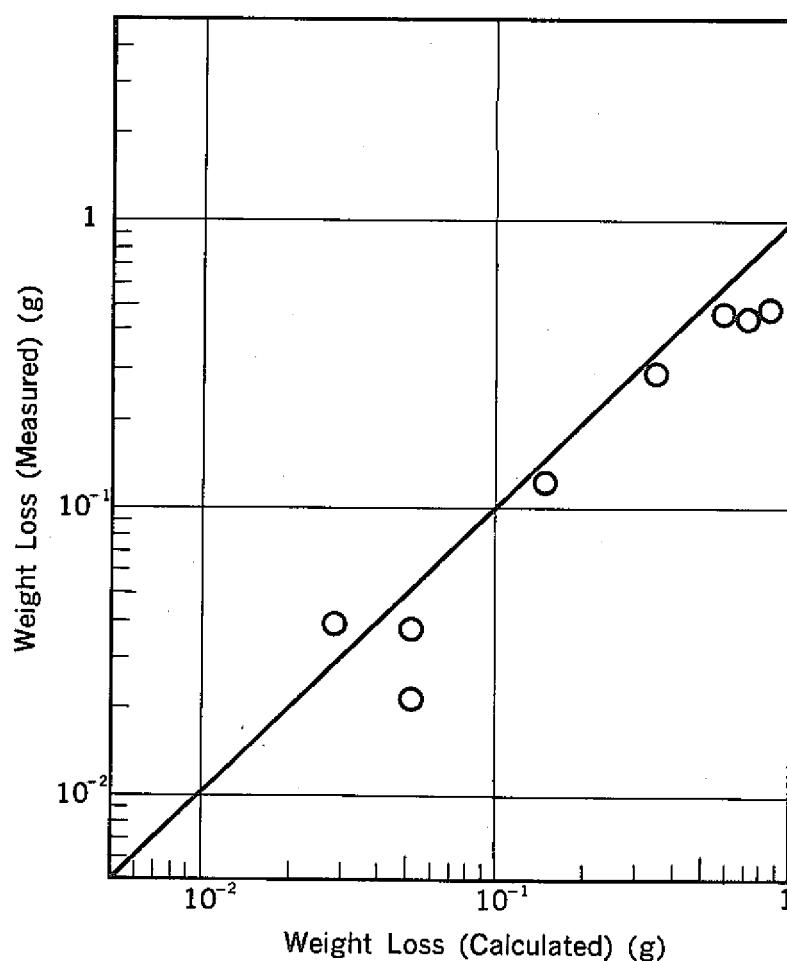
$\rho$  : Density of Target Material ( $\text{g/mm}^3$ )

$We$  : Wastage Rate ( $\text{mm/S}$ )

$W_{LR}$  : Weight Loss Rate ( $\text{g/s}$ )

(11) 重量損計算値と実測値の比較

本図において、横軸はウェステージ断面を正規分布曲線として計算したウェステージ管の重量損の計算値、縦軸は実測値である。図のように両者はよく一致していることがわかる。したがってウェステージ断面曲線を正規分布曲線で近似できることがわかる。



## (12) 重量損比とL/Dの関係

本図は横軸にL/D、縦軸に重量損比（単位注水量あたりの重量損率）をとりプロットしたものである。0.3 φノズルおよび0.5 φノズルの試験結果がほぼ同一の値を示している。このことから重量損比( $W_{LR}/G$ )は図上部の2番目の式のようにL/Dのみの関数で表わされることがわかる。したがって、3番目の式のように重量損率 $W_{LR}$ は同じL/Dのときは注水率に比例することになる。また重量損率 $W_{LR}$ は(10)で述べたように $\pi b We \rho$ で表わされ、ウェステージ率は一番目の式のようにL/Dと注水率Gの関数として表わされるため、ウェステージの広がりを示す定数bは第4番の式のように表わされる。

L/Dが一定のとき、ウェステージ率は(5)において述べたようにリーク率にあまり影響されないことから、広がりを表わす定数bはリーク率に比例することになる。

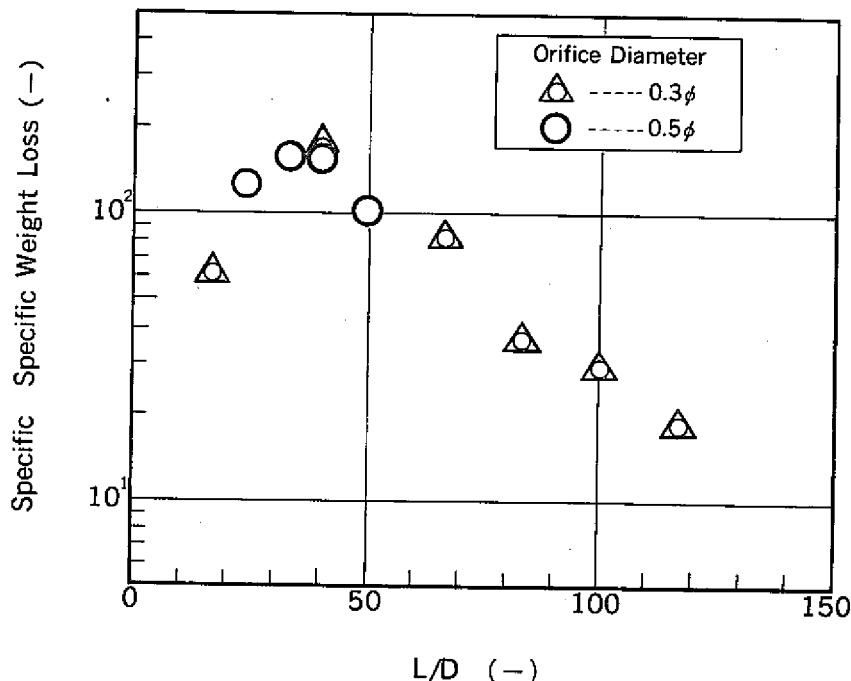
すなわち、L/Dは主としてウェステージ率に影響し、L/Dおよびリーク率はウェステージの広がりに影響を与えることになる。

$$We = f_1(L/D, G)$$

$$\frac{W_{LR}}{G} = f_2(L/D)$$

$$W_{LR} = f_2(L/D) \cdot G = \pi \cdot b \cdot We \cdot \rho$$

$$b = \frac{G}{\pi \cdot \rho} \cdot \frac{f_2(L/D)}{f_1(L/D, G)} = C \cdot F(L/D, G)$$



### (3) まとめ

ウェステージに対するノズル・ターゲット間距離の効果を調べるために行なった実験により次の結果を得た。

1. 注水率を2段階( $\approx 3$ ,  $\approx 0.5 \text{ g/sec}$ ), 距離(L)を5~35mm(従来は17.5mm一定)に変えて実験を行ない、これまで得られたウェステージ率と注水率の関係に対し同一距離近傍での結果は良い再現性を示した。
2. 注水率が一定の場合、ウェステージ率が最大となる距離が存在し、この位置はノズル径(D)により異なるが、 $L/D$ で評価すると  $L/D \approx 25 \sim 40$  の処にそのピークが生じていることが考えられる。
3. この結果はソ連およびフランスの結果と同様の特性を示していることが判った。
4. 本試験で得られたウェステージ等高分布曲線はほぼなめらかなピット状であることがわかった。
5. このウェステージ断面曲線を正規分布をみなして計算されたウェステージ部重量損と実測値は良く一致した。
6. 同じ  $L/D$ においては、ウェステージ率(深さ)に対し、注水率があまり影響せず、しかも重量損比(体積)も注水率によらないことから、ウェステージ部の深さに影響を与えるのは  $L/D$  で、広さに影響を与えるのは注水率であろうと考えられる。

今後更にデータを集積し評価する予定である。

## II. リーク孔孔拡大に関する考察

執筆：鐘ヶ江 直道

本項は、日本原子力学会昭和50年分科会で「小リーク・ナトリウム-水反応試験（第15報）」として発表したものの講演原稿をもとにしてまとめたものである。

上記発表前刷を付録-IIに示す。

## (1) 考察対象ノズル形状

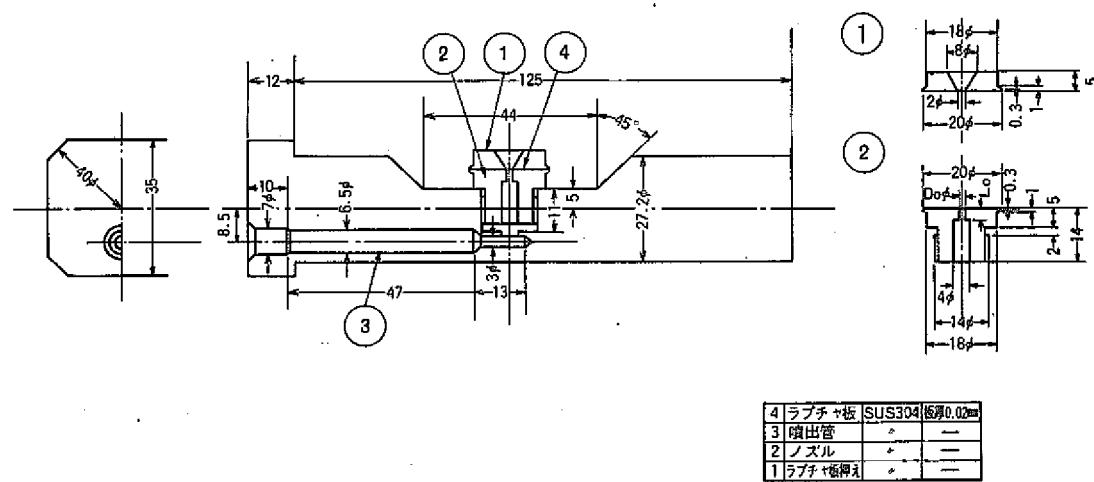
小リーカナトリウム-水反応によるウェステージ現象に関しては、内外の多くの研究の結果が集積され、SG設計にも反映出来るデータがほぼそろったと云っても過言でない状態となつた。しかし、リークが生じている孔自体が拡大し更に多量の水または蒸気の噴出を誘引する現象については、その現象の記述および定量的評価がわずかにされているにすぎない。

本報では、SWAT-2における注水ノズル部の材料検査から得た拡大ノズル部の形状から可能な範囲での孔拡大に対する定量評価を試み、報告するものである。

SWAT-2実験装置の概要は前章に記したとおりである。本検討の対象とした注水実験は前章で報告したもの前の前に行なつた約100回分であり、同一の注水ノズルで数回の注水を行なつてゐるので、本検討の対象となるノズルは11個である。

使用ノズル部形状を下図に示す。

図中②で示した部分が本検討の対象とした部分であり、材質はSUS304相当で、ノズル径 $D_0$ は0.15, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 1.5 mm $\phi$ の6種類であり、ノズル深さ $L_0$ は次項にも示すとおり0.8~4.5 mmの各種のものを用いていいる。



(2) 実験条件

本検討の対象となったノズルに対する、注水時間、注水量および平均注水率を下表に示すが、実験の主要条件範囲は次のとおりである。なお、実験は全て蒸気噴出実験である。

Na 温度 : 270~540 °C

蒸気温度 : 290~530 °C

蒸気圧力 : 20~166 atg

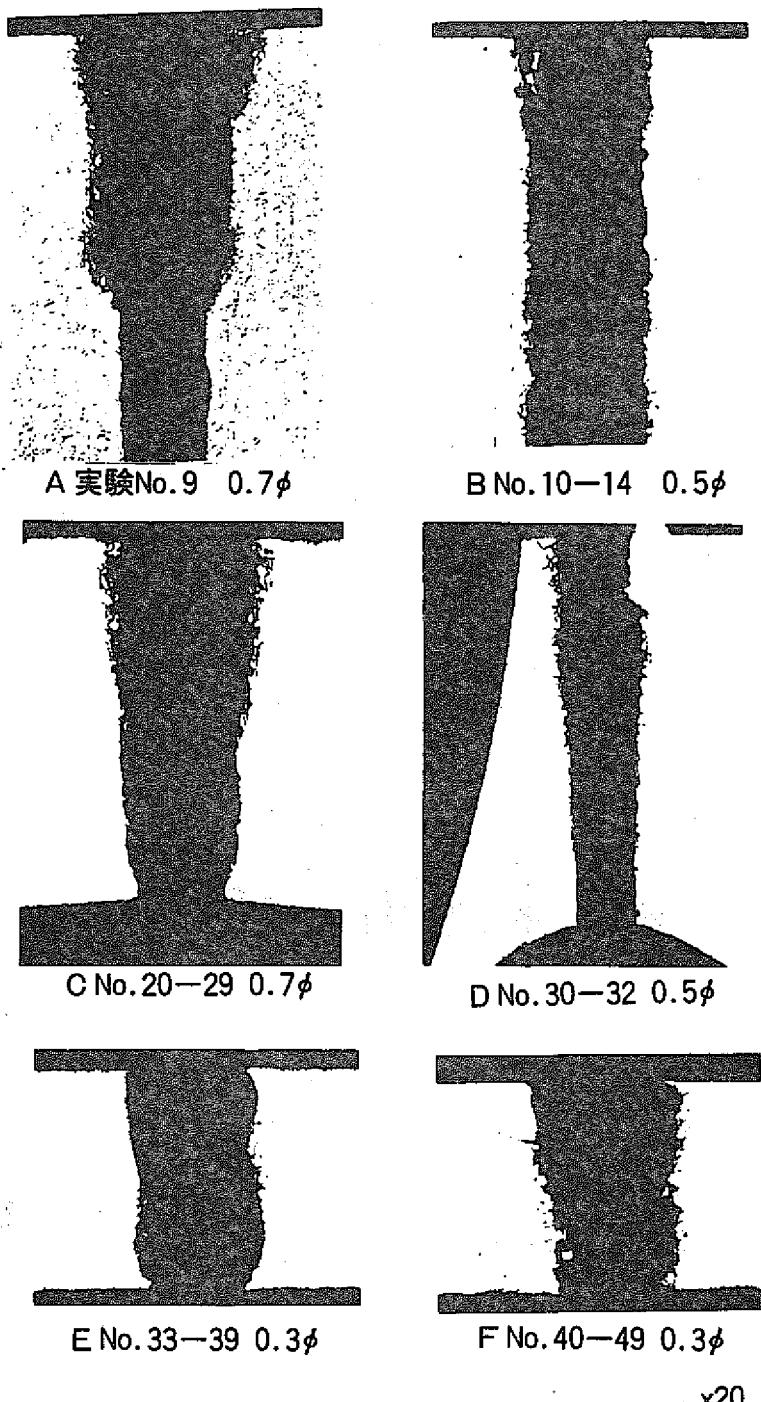
注水率 : 0.07~12.7 g/sec

- (1) Sodium Temperature ;270~540°C
- (2) Steam Temperature ;290~530°C
- (3) Sodium Pressure ;20~166atg
- (4) Steam Injection Rate ;0.07~12.7g/sec
- (5) Total Steam Injection Duration
  - For One Nozzle ;15.9~998.4sec
- (6) Nozzle Material ;JIS SUS304
- (7) Nozzle Diameter ;0.15,0.2,0.3,0.5,0.7,1.5mm
- (8) Nozzle Depth ;0.8~4.5mm

(3) ノズル断面の観察

本図は、使用すみノズルの断面を金属顕微鏡で観察した結果を示すものである。

これ等の写真から、ノズル拡大の定量評価を行なった訳であるが、これを見て判るとおり、  
Aのように拡大が途中まで進行しているもの、Fのように全ノズル深さまで進行しているもの、  
あるいはBのようにほとんど進行していないもの等が有ることが判った。



#### (4) 観察結果

以上の写真から得られた観察結果として次のことが云える。

- (1) 孔拡大は必ずNa側から生じている。
- (2) ノズル拡大の原因は、何らかの原因で注水時にノズル内側へNaの進入が生じ、そこに生ずる高温のNaOHによる腐食によるものである。
- (3) 蒸気あるいはArガスの噴出のみでは、同様の拡大現象は一般的には発生しない。

## 金属学的測定結果

- (1) 孔拡大は必ずNa側から生じている。
- (2) ノズル拡大の原因は、何らかの原因で注水時にノズル内側へNaの進入が生じ、そこに生ずる高温のNaOHによる腐食によるものである。
- (3) 蒸気あるいはArガスの噴出のみでは、同様の拡大現象は一般的には発生しない。

(5) ノズル孔拡大部測定モデル

さて、前の写真で観察したノズル断面部を本図のようにモデル化し各寸法を測定して見ることとする。

本モデル図では

$L_0$  ; 初期ノズル厚さ

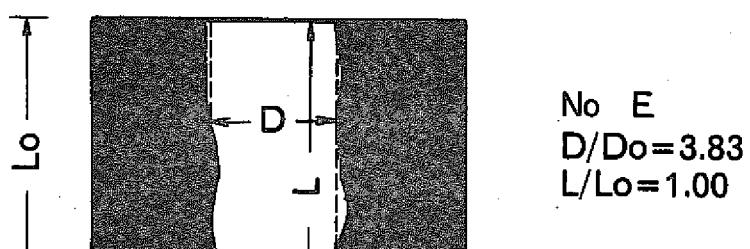
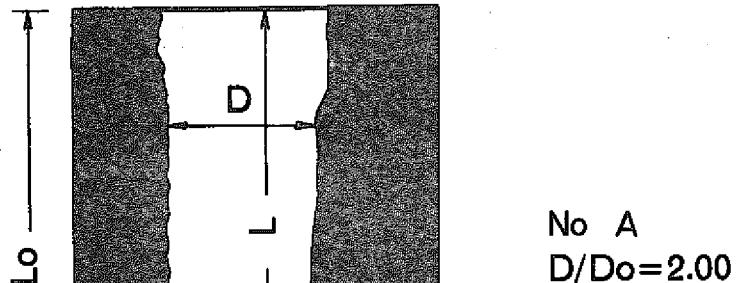
$L$  ; 拡大の生じている処までの深さ（全部拡大されている時は $L=L_0$ となる）

$D_0$  ; 初期ノズル径

$D$  ; 拡大されたノズル径（拡大が生じていない時は $D=D_0$ となる）

を示す。

以下この測定値を基に考察した結果について報告する。



$L_0, D_0$  : 初期ノズル深さ, 径

$L, D$  : 孔拡大部深さ, 径

## (6) ノズル孔拡大測定結果

本表は前項のような定義の基に測定した値の一覧を示すものである。

測定された拡大孔径 D と初期孔径  $D_0$  の比  $D/D_0$  (拡大比) の値から次のことが言える。

- (1) 拡大比は  $D_0$  の小さいもの程大きく、最大で 6 倍もある。
- (2)  $D_0 = 1.5 \phi$  には拡大が生じていない。
- (3) (1)および(2)の結果は、実験条件としてノズル径の小さいもの程、長い注水時間が得られたことによる測定結果であろう。
- (4) 一般に本測定結果では、 $D/D_0$  がある値になっていても、拡大がノズル全深さにまで達していないものもある。

また、拡大部の達している深さ L と初期深さ  $L_0$  の比  $L/L_0$  の値から次のことが言える。

- (5) 初期深さ  $L_0$  の全ての範囲にわたって  $L/L_0$  が 0 ~ 1 の値を示している。
- (6) 平均注水率  $\bar{G}$  に対してもかなり広い範囲にわたって  $L/L_0$  は 0 ~ 1 の値を示している。

上記観察および測定結果から、ノズル孔拡大現象に対し定量評価を行なう場合次の点に着目すべきことがわかった。

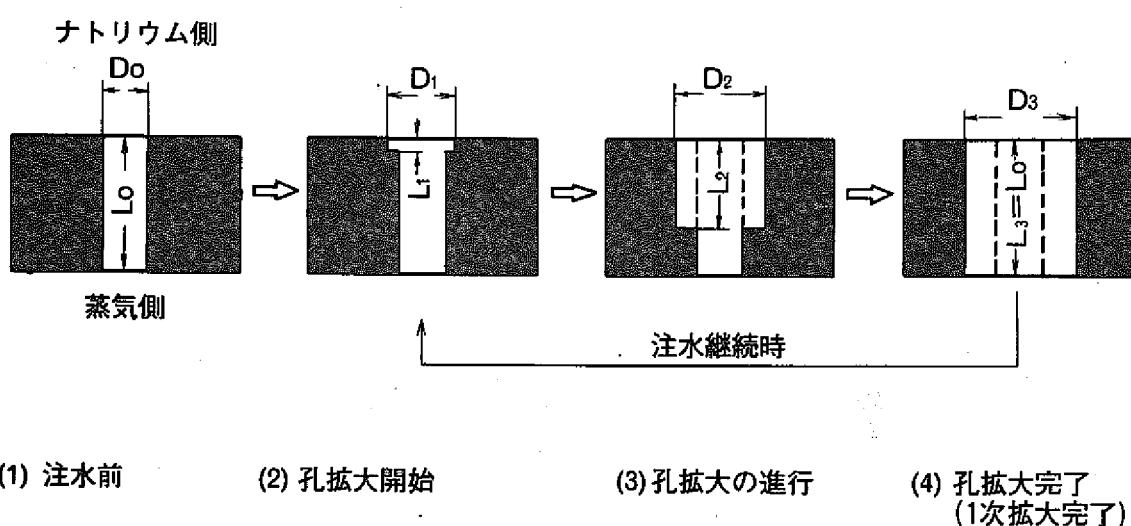
- (a) 拡大は、ある拡大巾で除々に深さが増大していく。この場合、拡大は必ずナトリウム側から始まる。
- (b) 拡大現象は、 $D/D_0$  と  $L/L_0$  の変化を同時に評価すべきである。
- (c) 整理パラメータとしては、注水時間  $t$  と平均注水率  $\bar{G}$  の両者を考えるべきであろうが、上記パラメータと一次的な関係は見出せない。

ノズル 記号	試験番号	ノズル孔径(mm)			拡大部深さ(mm)			$L_0/D_0$	$V = \frac{L}{L_0} \left( \frac{D^2}{D_0^2} - 1 \right)$
		$D_0$	D	$D/D_0$	$L_0$	L	$L/L_0$		
A	No 9	0.7	1.4	2.00	4.5	2.75	0.611	6.43	1.83
B	10~14	0.5	1.25	2.50	3.5	3.5	1	7.00	5.25
C	20~29	0.7	1.2	1.71	4.5	4.5	1	6.43	1.94
D	30~32	0.5	0.8	1.60	3.85	3.05	0.792	7.70	1.24
E	33~39	0.3	1.15	3.83	2.2	2.2	1	7.35	13.69
F	40~49	0.3	1.25	4.17	2.2	2.2	1	7.33	16.36
G	69~73	0.2	1.2	6.00	0.8	0.8	1	4.00	35.00
H	81~83	0.5	0.95	1.90	2.9	1.5	0.517	5.80	1.35
I	84	0.15	0.18	1.2	0.9	0.68	0.756	6.00	0.33
J	86~90	1.5	1.5	1.0	3.25	0	0	2.17	0
K	91~95	0.5	0.65	1.30	2.9	1.05	0.363	5.80	0.25

## (7) 孔拡大進行モデル

前項に記した観察および測定結果を基とし、拡大現象を本図のようにモデル化する。すなわち孔拡大が次のように進行するものとする。

孔径  $D_0$  と深さ  $L_0$  のノズル（下図(1)）に注水を開始すると、ノズル端ナトリウム側からナトリウムの進入が生じ、腐食が発生しノズル孔拡大が始まる。（下図(2)）。更に注水が続くと深さ  $L$  の増大が進行する（下図(3)）。更に注水が進むと拡大孔径  $D$  が全深さまで達し（下図(4)）注水率の増大が生じ、注水が続ければ更に同図(2)の状態にもどり新たに拡大現象が続行する。



## (8) 拡大部体積と注水量の関係（その1）

さて、以上の考察をもとにモデル化された拡大部に対し次の2項で測定結果を整理評価する。

(1) 拡大部体積(体積比) $V$ に着目する。

$$V = \frac{L}{L_0} \cdot \frac{(D^2 - D_0^2)}{D_0^2} \quad (\text{III-4.1})$$

ただし  $D_0, L_0$  : 初期ノズル径、深さ(mm)

$D, L$  : 測定された拡大後の径、深さ(mm)

$V$  : 拡大部体積(比)(-)

すなわち、 $V$ は初期のノズル孔空洞の体積に対する、拡大により失われた鋼部体積の比を示すものである。

(2) 全注水量 $W$ (下図中では $Q$ を使用)に着目する。

$$W = G \times t \quad (\text{III-4.2})$$

ただし、 $G$  : 平均注水率(g/sec)

$t$  : 全注水時間(sec)

$W$  : 全注水量(g)(下図中では $Q$ を使用)

この $V$ と $W$ (下図では $Q$ )にSWAT-2のデータをあてはめることにより、次頁の図のように整理され、両者には下図の矢印の下の関係式が成立することが判る。

$$V = \frac{L}{L_0} \left( \frac{D^2 - D_0^2}{D_0^2} \right)$$

$D_0, L_0$ : Diameter & Depth Before Injection (mm)

$D, L$  : Diameter & Depth After Injection (mm)

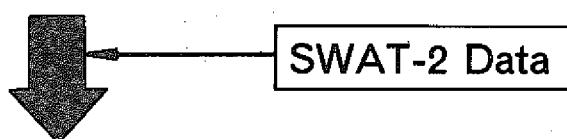
$V$  : Specific Volume of Enlargement Section(-)

$$Q = G \times t$$

$Q$ : Total Injected Weight (g)

$G$ : Injection Rate (g/Sec)

$t$ : Injection Duration (Sec)



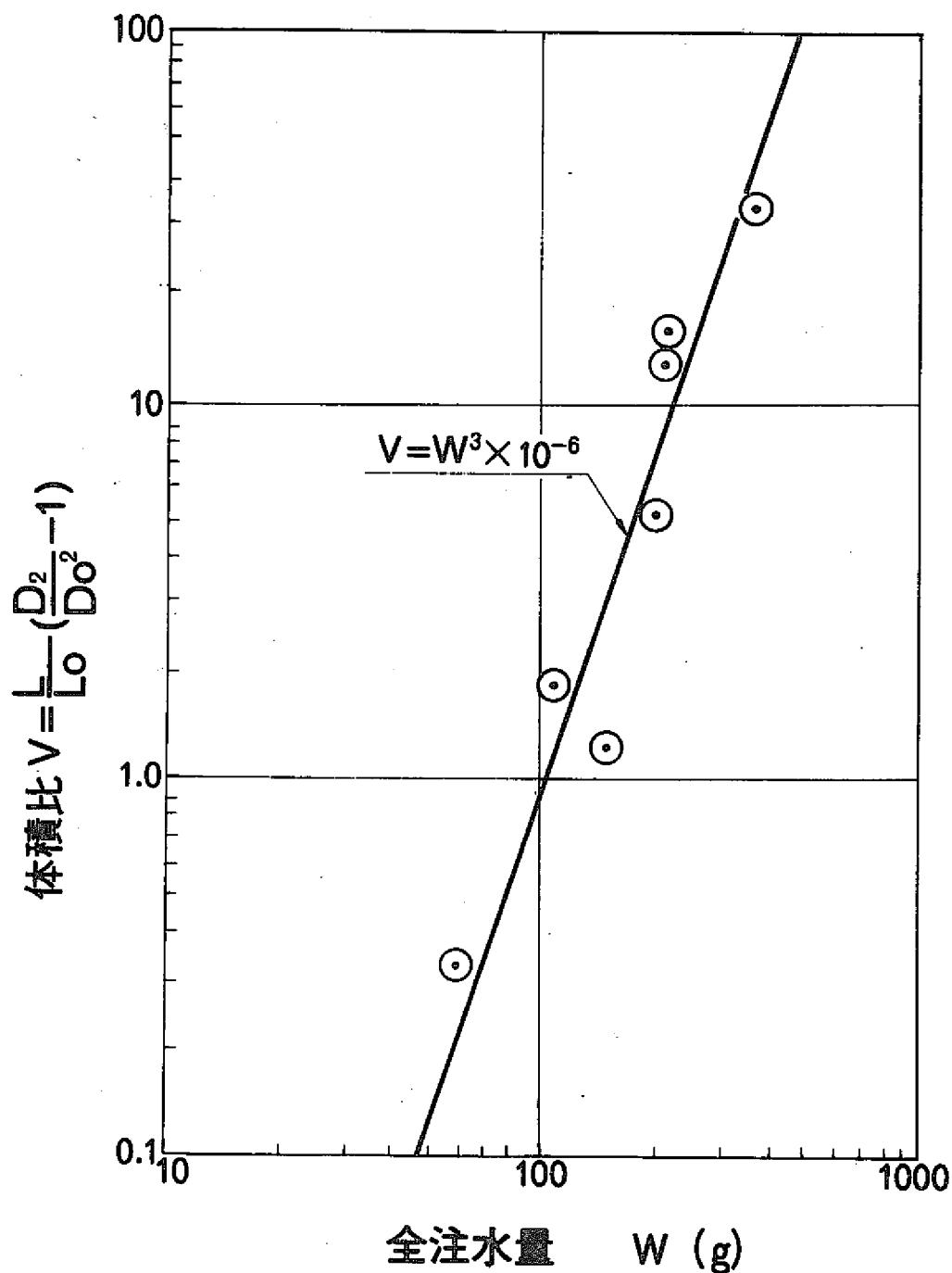
$$V = Q^3 \times 10^{-6}$$

## (9) 拡大部体積と注水量の関係（その2）

本図が前頁の定義から求めた体積比Vと全注水率Wをたて軸、横軸に取り図示したもので、両者の関係が図に示したように、

$$V = W^3 \times 10^{-6}$$

で表わされることが判る。



## (10) ノズル孔拡大比の考察

さらに、本図はたて軸に  $D/D_0$  すなわちノズル拡大孔径比と、よこ軸に  $L/L_0$  すなわち、拡大の生じている深さ比（いずれも初期値、 $D_0$ 、 $L_0$  をベースとした比）を示すものである。

前項(7)で示した「ノズル孔拡大進行過程のモデル」によれば、孔拡大現象により注水量の増大が生ずると考えられる。

$$L/L_0 = 1$$

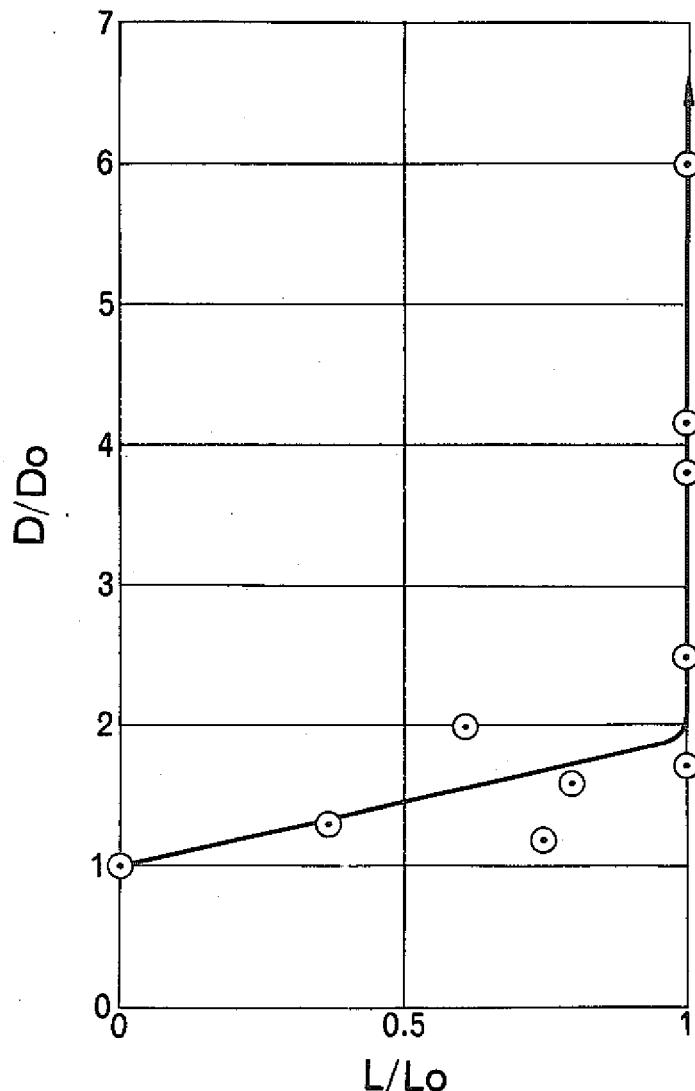
の点以前では、すなわち

$$L/L_0 < 1$$

では大略

$$D/D_0 < 2$$

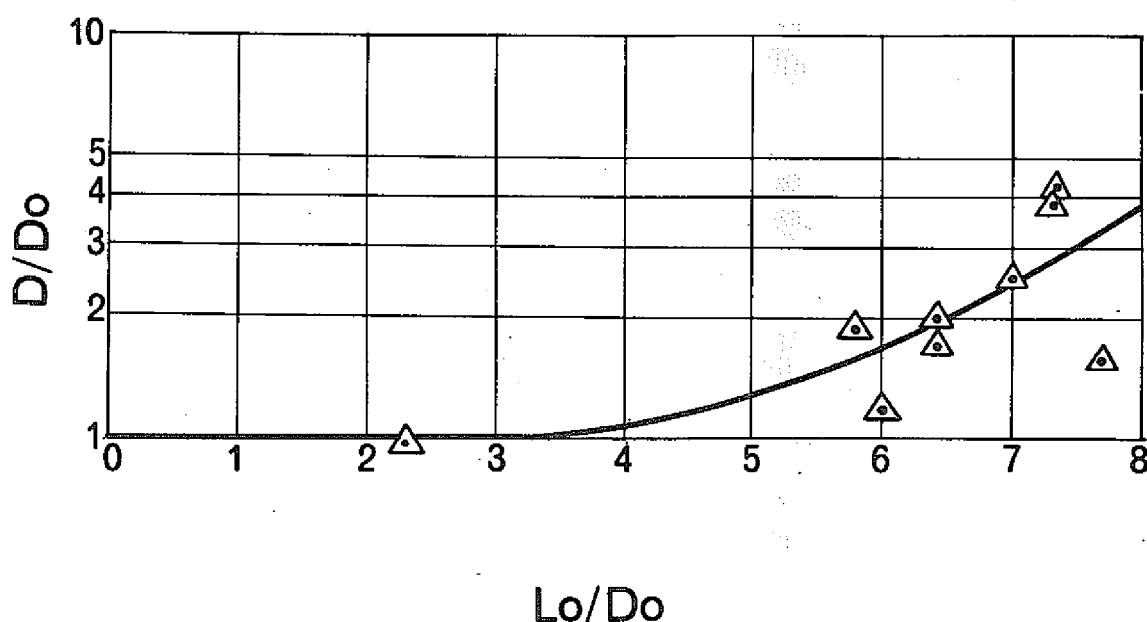
の関係が成立していることが判る。



## (11) 孔拡大の生じない領域

また、本図はたて軸に  $D/D_0$ 、よこ軸に  $L_0/D_0$  すなわち初期ノズルの深さ／孔径の値を取って示したものである。

データ数が必ずしも充分とは云えないが、本図から孔拡大が生じている時の  $L_0/D_0$  値は 4 ～ 5 以上であり、孔拡大が発生しないとみなせる範囲は次のように考えられる。すなわち、 $D/D_0 = 1$  は  $L_0/D_0 < 3 \sim 4$  の範囲で成立する。



## (12) 孔拡大時間の評価

以上の評価により次のことが云える。

- (1) 実機SGで小リーク発生した場合、ある時突然に漏洩率が増大する時点に最も興味が集中する訳であるが、これは  $L/L_0 = 1$  となった状態で発生すると考えられる。
- (2)  $L/L_0 = 1$  となった状態からは、注水が続くかぎり更にノズル拡大が持続すると考えねばならない。そこで初めて  $L/L_0 = 1$  となるまでの孔拡大を“1次拡大”と呼ぶこととする。
- (3) 1次拡大の範囲で、孔拡大比がどの程度になるかを知るために前項(10)の図を参照すればよい。同図中  $L/L_0 = 1$  線上にあるものは、2次、3次の拡大が生じているものと考えられる。すなわち、1次拡大完了の点では  $D/D_0 \approx 2$  が成立し、 $L/L_0 = 1$  と  $D/D_0 = 2$  が成立する点でリーク率の増大が発生するとみなせる。
- (4) この関係を  $V$  の定義式に代入すると、

$$V = 3$$

が求まり、この式を前項(9)で求めた実験式に代入すれば

$$W = 144 \approx 150 \text{ (g)}$$

が成立する。すなわち、約 150 g の注水が行なわれると、1次拡大が完了し、注水率の増大が生ずる。

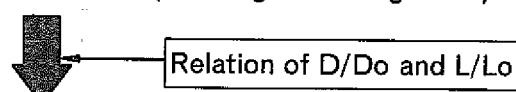
- (5) 以上の考察から、注水率増大までの時間  $\Delta t_1$  は次式で表わされる。

$$\Delta t_1 = 150 G^{-1}$$

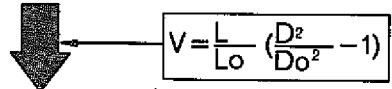
$\Delta t_1$  : 1次拡大完了時間 (sec)

$G$  初期漏洩率 (g/sec)

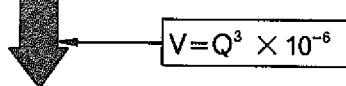
$L/L_0 = 1$  (1st Stage of Enlargement)



$D/D_0 \approx 2$



$V = 3$



$Q$  (at  $V=3$ )  $\approx 150$



$$\Delta t_1 = 150 G^{-1}$$

## (13) 外国報告例との比較

さて、以上求めた孔拡大への定量評価と、これまで外国で報告された測定例を比較してみる。

Greene は実験的に孔拡大時間求め、他の報告値も合わせ報告している。これは注水率の増大する時点までの時間を、横軸に初期注水率、縦軸に拡大時間を採り図示したもので、下図に本報告の結果も含め記載した。

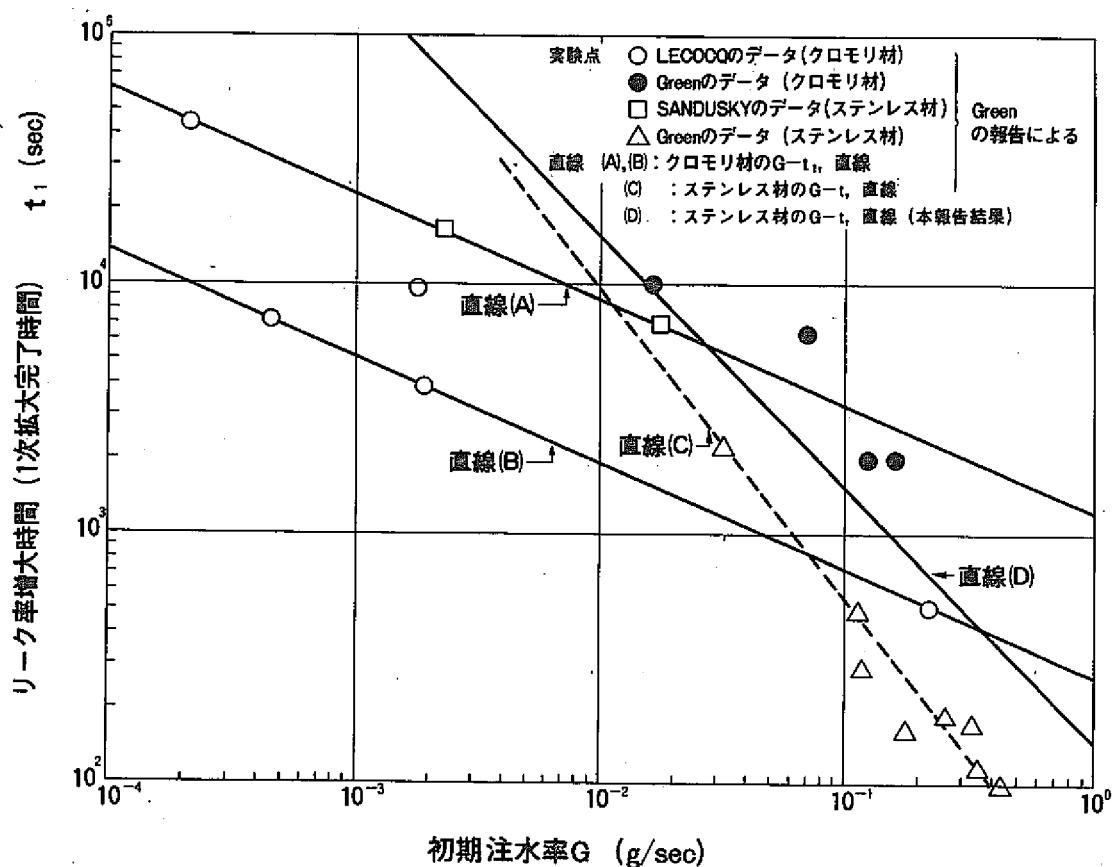
同図中の各直線の内容は次のとおりである。

直線 A,B : クロモリ材に対する結果

直線 C : ステンレス材に対する Greene の結果

直線 D : ステンレス材に対する本検討結果

本考察結果である直線D以外は全て実験的に小リーク試験時にNa中水素計指示値が急激に増大した点を拡大時間(たて軸)として測定したもので、ノズル自体を本報のように観察したものではないが、ステンレス材に対するそれ等実験結果と本検討結果は比較的良い一致を見ていることが判る。



## (14) 結論

本検討結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 孔拡大の体積(比) $V$ と給注水量 $W$ には次の関係が成立した。

$$V = W^3 \times 10^{-6}$$

- (2) 初期孔径 $D_0$ 深さ $L_0$ とした時、次の条件のなりたつノズルに対しては孔拡大が発生しなかった。

$$L_0/D_0 < 3 \sim 5$$

- (3) 初期リーク率からリーク率増大に生ずる時点(1次拡大完了点とよぶ)では、拡大後の孔径が初期の2倍になる。

- (4) 1次拡大完了点までの時間 $\Delta t_1$ は注水率 $G$ の逆数に比例し次式で表わされる。これはGreeneらの実験結果とも比較的良い一致を見た。

$$\Delta t_1 = 150 G^{-1}$$

- (5) 本検討結果から算出されるリーク率増大までの時間評価はGE等で行なわれた実験結果と比較的良い一致を見た。

### III. ウェステージに対する距離の効果(その2)

執筆：大後 美道

本項は、日本原子力学会昭和51年分科会で「小リーク・ナトリウム-水反応試験（第16報）」として発表したものの講演原稿をもとにしてまとめたものである。

上記発表前刷を付録-IIIに示す。

## (1) 緒 言

ナトリウム-水反応現象の中で重要な研究課題の1つであるウェステージについて動燃では蒸気噴出による小リーク・ナトリウム水反応試験をこれまで約100回実施し、それらの結果よりウェステージ率へのナトリウム温度、リーク率、ターゲット材質の影響を検討してきた。これらの試験はいずれも原型炉蒸気発生器のヘリカルコイル部を想定してノズル・ターゲット間距離17.5mmと一定としたものである。しかし実機蒸気発生器における伝熱管距離はヘリカル部及びダウンカマー部でことなり、また同じヘリカルコイル部でも設計により異なった距離を用いているものもあり、蒸気発生器のいかなる場所で生ずる小リークに対しても定量評価が可能となるためには、ウェステージに対する距離の効果をしらべることが極めて重要である。この距離の効果については前報その一部について実験結果を報告しているが本報はその後得られた試験結果を含め、ノズルターゲット間距離およびノズル径のウェステージ率におよぼす効果およびウェステージ形状におよぼす効果について検討を進めたのでその結果について述べる。

右表は試験条件を示したものである。

本試験の目的は主にノズル・ターゲット間距離とウェステージの関係を明確にすることである。従って実機蒸気発生器の諸条件を考慮して、ナトリウム温度480°C、ターゲット材質を $2\frac{1}{4}$ Cr-Mo鋼と一定条件としてある。ノズルの注水方向は水平方向でありターゲットの中心部に直角にあたるようにになっている。ノズル径(D)は0.2mm～1.5mm $\phi$ の6種類を用い、ノズル・ターゲット間距離(L)を5m～100mmまで変化させている。従ってL/Dは12～400となっている。平均注水率は0.07～13.8g/secである。

## 1.一定条件

- a) ナトリウム温度 ( $T_N$ ) ; 約480 (°C)
- b) ナトリウム液深 ( $L_N$ ) ; 約780 (mm)
- c) ナトリウム流速 ( $V_N$ ) ; 約0.24 (m/sec)
- d) ターゲット管材質 ; 2-1/4Cr-Mo鋼
- e) ターゲット管径、肉厚 ;  $26.5^{0.0} \times 3.2^t$  (mm)

## 2.可変条件

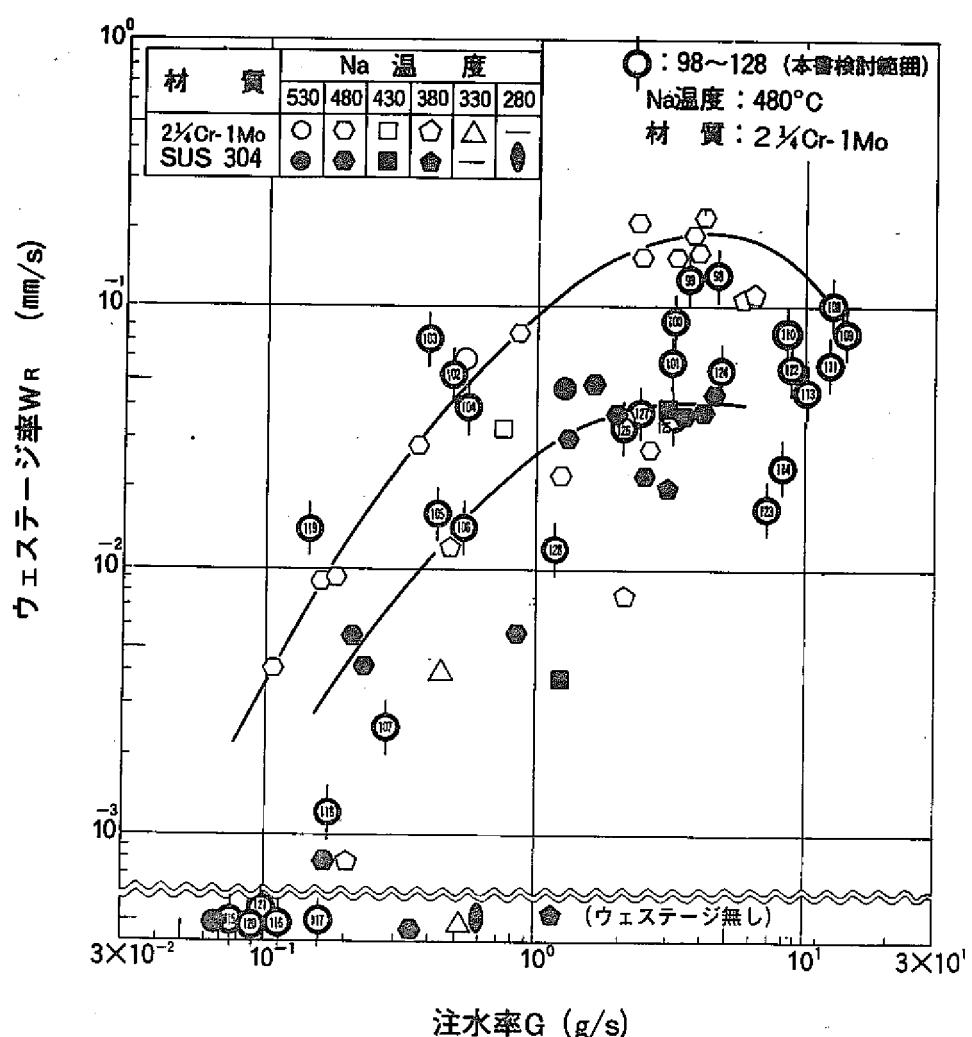
- a) ノズル径 (D) ; 0.2, 0.3, 0.5, 1.0, 1.5 (mm)
- b) ノズルターゲット間距離 (L) ; 5～100 (mm)
- c)  $L/D$  ; 12～400 (—)
- d) 蒸気温度 ( $T_s$ ) ; 362～510 (°C)
- e) 蒸気圧力 ( $P_s$ ) ; 21～174 (kg/cm<sup>2</sup>)
- f) 全注水量 (W) ; 4～64 (g)
- g) 注水時間 (t) ; 3～237 (sec)
- h) 注水率 ( $W_R$ ) ; 0.07～13.8 (g/sec)

## 3.同一ノズル径による試験条件一覧

試験番号	D (mm)	L (mm)	L/D (—)	G (g/sec)	平均注水率 $\bar{G}$ (g/sec)
98～101	0.5	12～25	24～50	3.3～4.5	3.27
102～107	0.3	5～35	16.7～117	0.28～0.55	0.45
108～114	1.0	12～80	12～80	8.41～13.8	10.8
115～121	0.2	12～80	60～400	0.073～0.19	0.13
122～128	1.5	32～100	21.3～66.7	1.15～8.58	4.19

## (2) ウェステージ率と注水率の関係

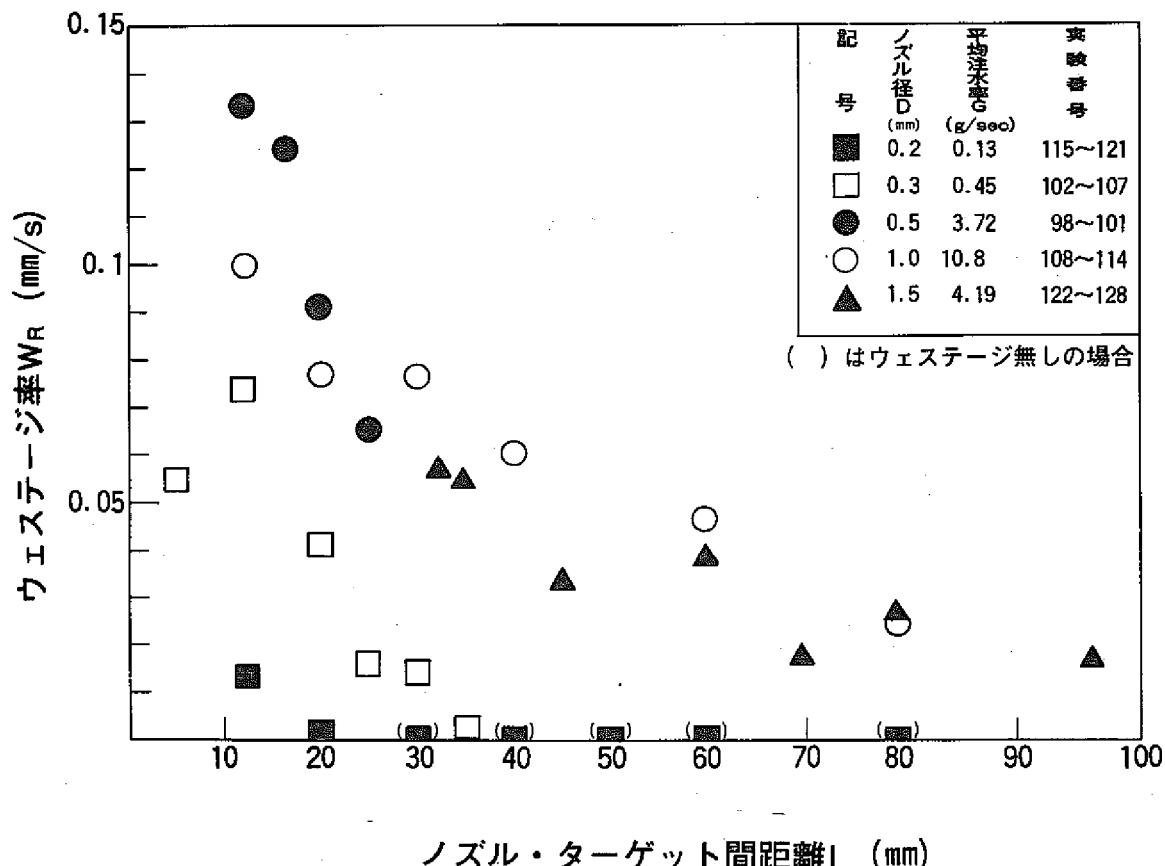
下図は最も一般的な整理法として、横軸に注水率、縦軸にウェステージ率を取って距離一定の試験結果とともに今回行なった試験結果をプロットしたものである。図中の黒印はノズル・ターゲット間距離が17.5mmと一定条件でSUS材の場合であり、他はクロモリ鋼の場合である。図中の上部実線はナトリウム温度480°Cの場合における距離17.5mmと一定条件のもとに六角印の実験データに対応して得られた実験式の曲線である。記号中数字の入っているものが今回行なった距離を変えて行なった実験データである。その内実験番号104, 99, 100はノズルとターゲット間距離が比較的17.5mmに近い条件のもので実線近傍に位置しており、再現性有る実験結果が得られていることがわかる。一方実験番号107, 128, 123はノズルターゲット間距離が大きい場合の実験結果であり、図に示すように低いウェステージ率を示しており距離の効果がでているものと考えられる。



## (3) ウェステージ率に対する距離の効果(その1)

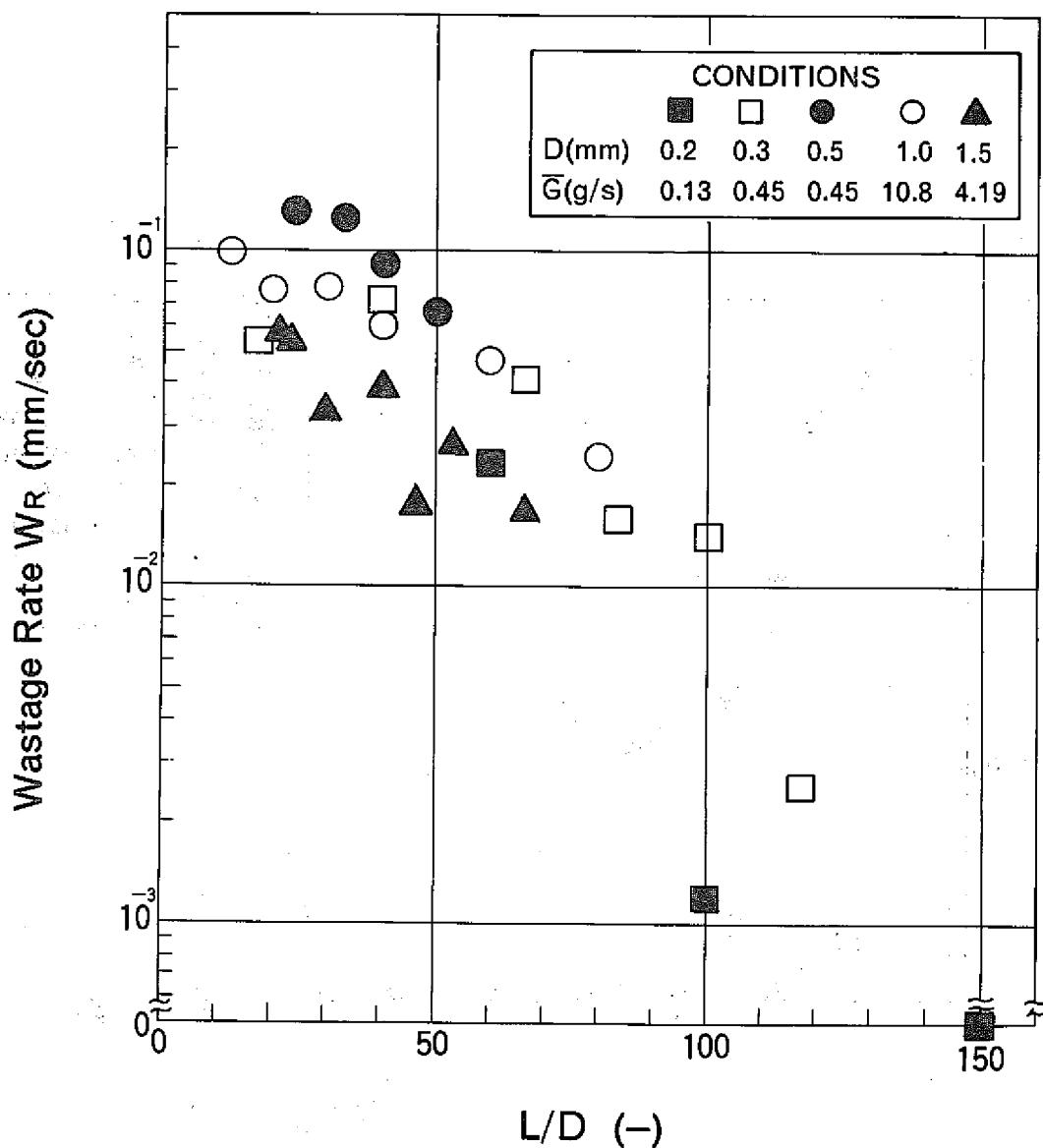
下図はウェステージ率に対する距離の効果を調べるために横軸にノズル・ターゲット間距離を取りウェステージ率をプロットしたものである。

各ノズル径ともノズル・ターゲット間距離が大きくなるにつれてウェステージ率が減少している様子が見られる。



## (4) ウェステージ率に対する距離の効果(その2)

下図は、ウェステージがノズルから噴出するジェットの構造と深く関係しているとして、乱流拡散炎の研究によるジェット炎の長さと噴出孔径の比が一定値であることを導入し、横軸をノズル・ターゲット間距離をノズル直徑で割った無次元距離( $L/D$ )でデータを整理したものである。図からいずれのノズル径においても $L/D \approx 20 \sim 30$ 付近でウェステージ率がピーク値を示し、 $L/D$ が大きくなるにつれて減少している。この領域のウェステージ形状はピット状であることが観測された。さらに $L/D > 150$ ではウェステージが観測されなかった。一方 $L/D < 20 \sim 30$ ではウェステージ率の増加はあまりみられずむしろ減少しているものもみとめられる。この領域のウェステージ形状はトロイダル状であることが観測された。



## (5) 実験式の検討（その1）

ウェステージの深さに関するノズルターゲット間距離やノズル径の効果についてさらに検討してみることにする。

ウェステージ率は同材質の場合、ナトリウム温度( $T_N$ )、ノズルターゲット間( $L$ )と注水率( $G$ )の関数としてあたえられます。ここでノズル径の効果は注水率が一般にノズル径と、水側圧力の関数として注水率の中にふくまれるとする。

これまでの距離一定の実験から、 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Moに対するウェステージ率の実験式はナトリウム温度 $T_N$ とリード率 $G$ の関数としてあたえられる。

本試験は温度一定であるため距離の効果を調べるためにあたり、ウェステージ率を注水率でノーマライズした式で整理するとノズル・ターゲット間距離 $L$ の効果が明らかになると予想される。以上の検討事項をまとめると以下の様になる。

## ウェステージの深さ(ウェステージ率) に関する検討

ウェステージ率 $W_R$ は同材質の場合次式のように温度 $T_N$ 、距離 $L$ 、および注水率 $G$ の関数であると考えられる。

$$W_R = F(T_N, L, G)$$

これまでの距離一定の実験から得られた $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo材に対する実験式

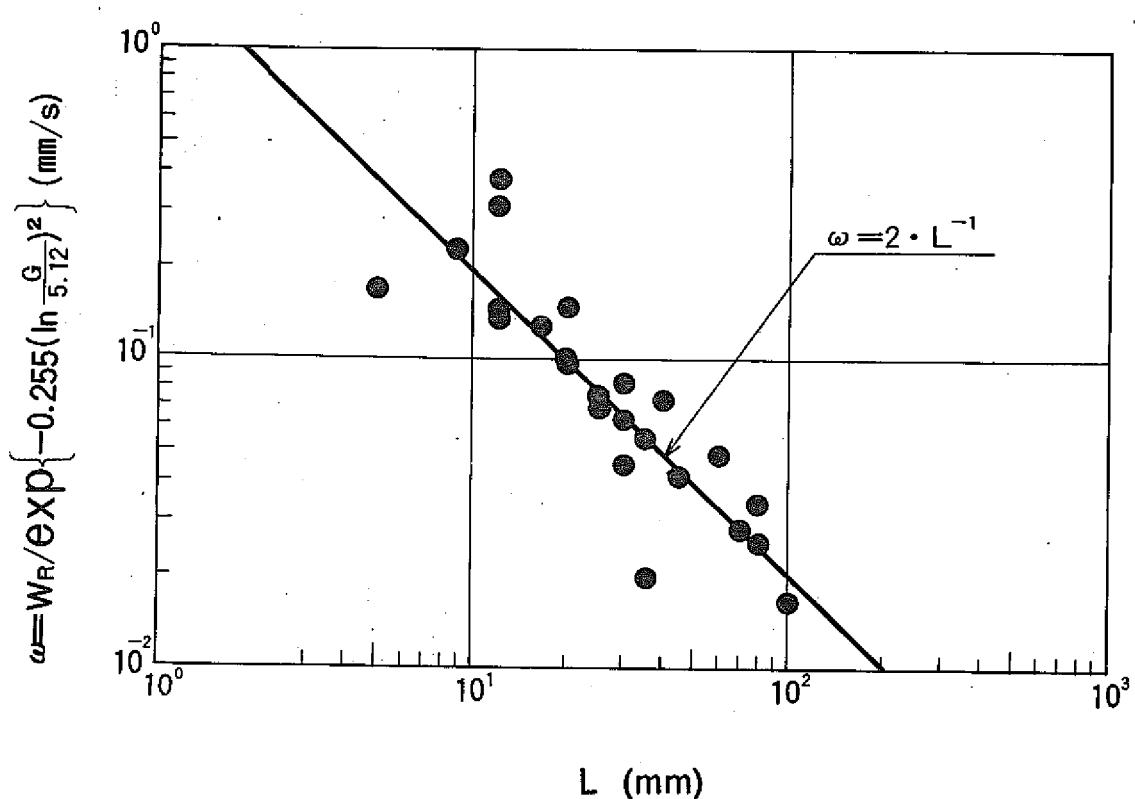
$$W_R = 252 \exp \left[ - \left\{ 0.255 \left( \ln \frac{G}{5.12} \right)^2 + \frac{5460}{T_N} \right\} \right]$$

温度一定で実施した本実験結果を次式で定義する $W$ で整理すれば、 $L$ のみの関数で与えられると予想される。

$$W = \frac{W_R}{\exp \left\{ -0.255 \left( \ln \frac{G}{5.12} \right)^2 \right\}}$$

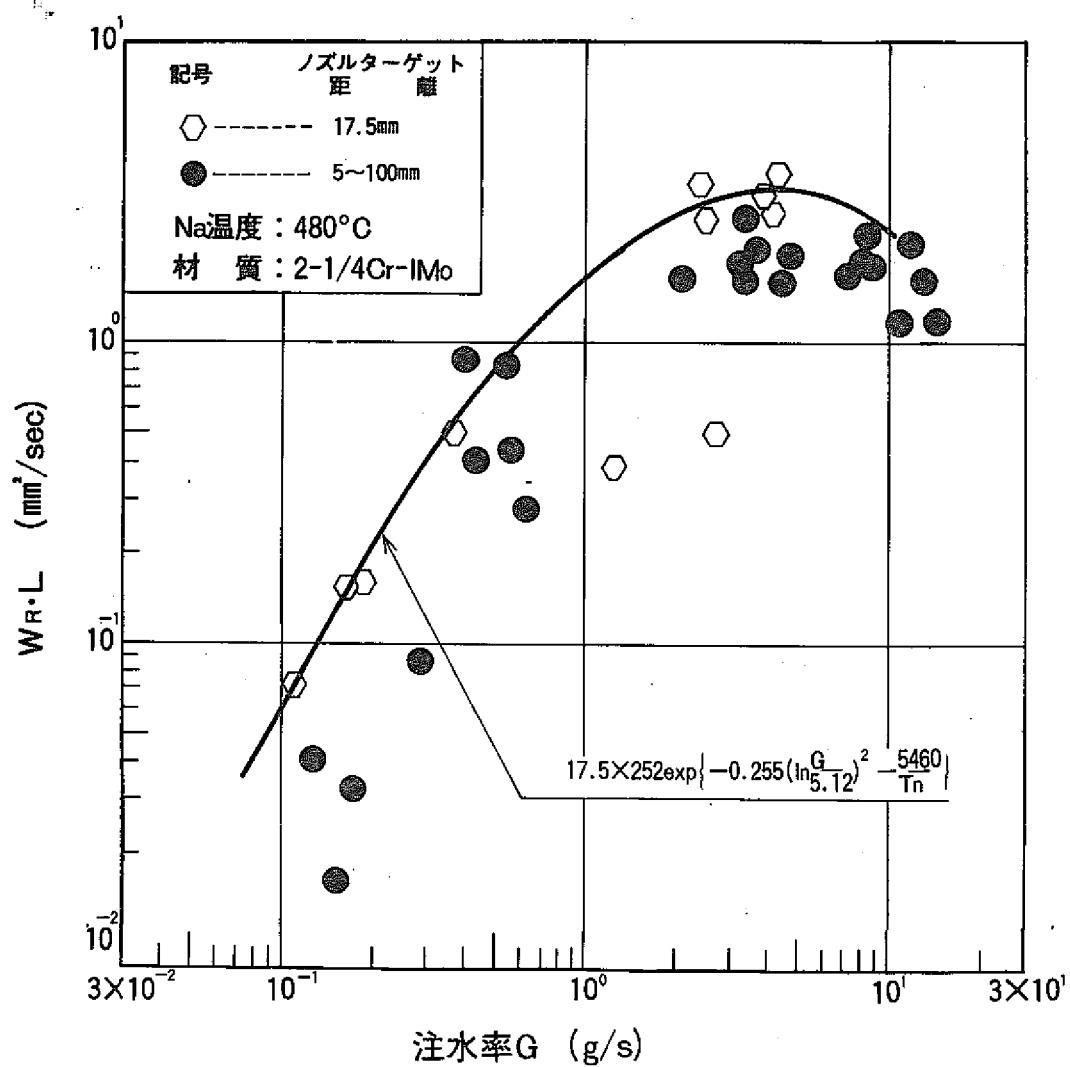
## (6) 実験式の検討 (その 2)

下図は縦軸にノーマライズしたウェステージ率、横軸にノズル・ターゲット間距離をとってプロットしたものである。図から実験値は、ウェステージ率がノズル・ターゲット間距離の逆数に比例していることがわかる。



## (7) 実験式の検討 (その3)

下図はこれまでの実験結果のうちナトリウム温度 480 °C ターゲット材質が 2 1/4 Cr-Mo 材の条件のものを全てプロットしたものである。縦軸はウェステージ率とノズル・ターゲット間距離の積を示している。図中の曲線は距離一定の条件から求めた実験式に本検討結果の L の効果を含めて導いた実験式であり、全データを良く表現している。



## (8) ウェステージ形状の検討（その1）

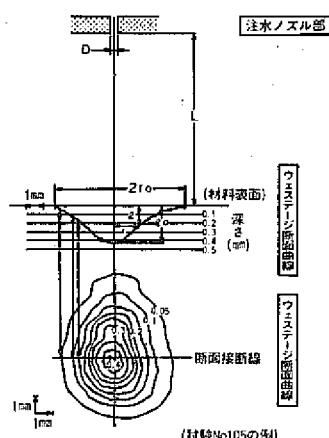
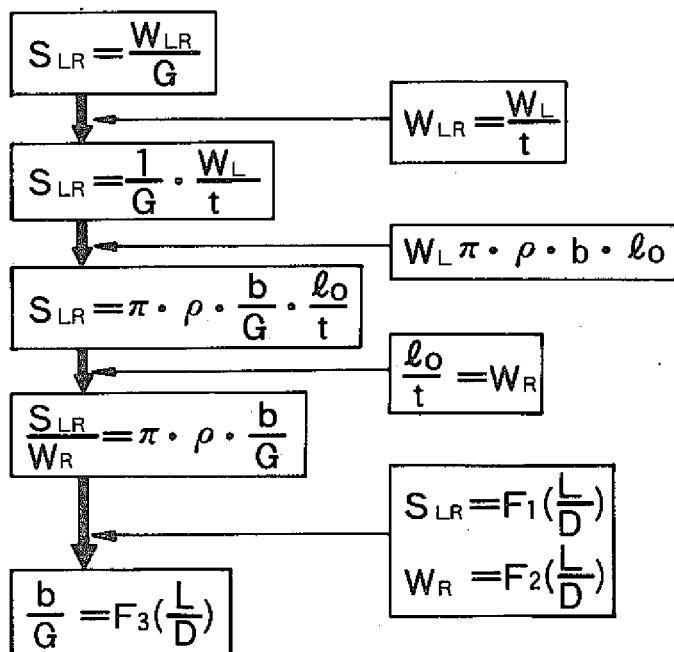
ウェステージ形状にあたえる効果について前報告後さらに検討を進めたので、その結果について述べる。

$L/D > 20 \sim 30$  のウェステージ形状がピット状になる領域では下図のようなウェステージ断面曲線が測定される。ここでウェステージ深さ  $\ell$  は下図右部に示す正規分布式であたえられるものと考えられる。この式の適用の妥当性はこの式から求まる重量損  $W_L$  の値と実験値結果から求めた実測値とがよく合うことによって確認している。

本報告は分布常数  $b$  の実験式を下記の様に求めた。考え方の流れを右図に示す。

ここで重量損率 ( $W_{LR}$ ) を注水率 ( $G$ ) で割った重量損比  $S_{LR}$  を導入します。重量損率は重量損 ( $W_L$ ) を導入しこの式となります。さらには正規分布式を積分して出した重量損 ( $W_L$ ) と分布常数  $b$  , ウェステージ量大深さ  $\ell_0$  との関係を導入しますとこの式となり、さらにウェステージ率を導入しこの式となります。ここで重量損比ならびにウェステージ率とも  $L/D$  の関数と考えられるので正規分布常数  $b$  と注水率  $G$  の比は  $L/D$  の関数と考えられる。

## 分布定数の実験式



$$\ell = \ell_0 \exp \left( -\frac{r^2}{b} \right)$$

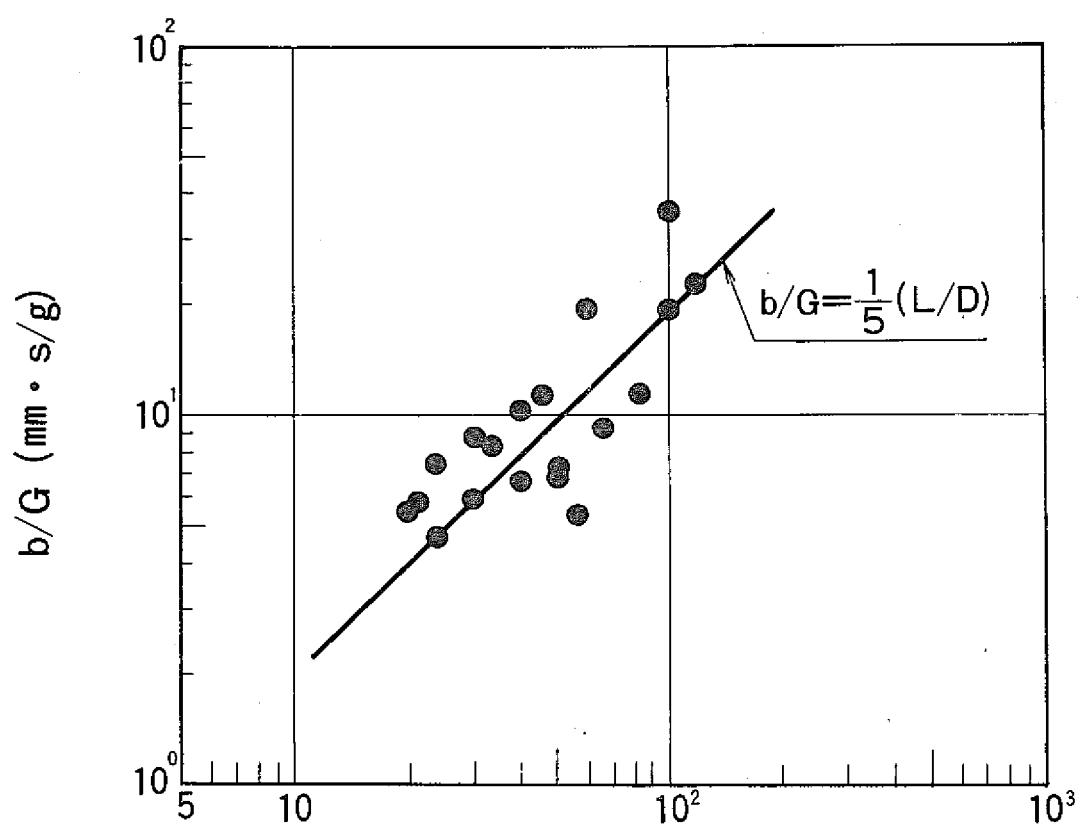
$$W_L = \pi \cdot b \cdot \ell_0 \cdot \rho$$

$b$  : 分布常数 ( $\text{mm}^2$ )

$W_L$  : ウェステージ部重量損 (g)

## (9) ウエステージ形状の検討（その2）

下図は前項で述べた  $b/G$  と  $L/D$  の関係を調べるため縦軸に  $b/G$ 、横軸に  $L/D$  を取って実験値をプロットしたものである。図より実験値は  $L/D$  の一乗に比例した式 ( $b/G = \frac{1}{5} \cdot L/D$ ) の上にほぼあることが判った。



ノズルターゲット間距離/ノズル径  $L/D$

(10) まとめ

本報告の検討内容をまとめると下記のようになる。

## 検討結果のまとめ

ノズル・ターゲット間距離を変えて実施した小リーク・ウェステージ実験結果から、次のことがわかった

(I)  $L/D \approx 20 \sim 30$  の処に最大ウェステージ率が発生する。

(II)  $L/D > 20 \sim 30$  の領域ではウェステージ部形状はピット型となりウェステージ率が  $1/L$  に比例して減少する。また、ウェステージ断面曲線は次式のように正規分布曲線で表わされる。

$$\ell = \ell_0 \exp(-r^2/b)$$
$$b = 1/5 \cdot L/D \cdot G$$

(III)  $L/D < 20 \sim 30$  ではウェステージ形状はトロイダル型となりウェステージ率がむしろ低下する傾向がある。

(IV) 本試験では  $L/D \geq 150$  の領域では、ウェステージは観測されなかった。

#### IV. ウェステージ率整理式の検討

執筆：池本 一郎

本項は、日本原子力学会昭和51年分科会で「小リーク・ナトリウム-水反応試験（第17報）」として発表したものの講演原稿をもとにしてまとめたものである。

上記発表前刷を付録-IVに示す。

## (1) 「SWAC-8」の概要

現在まで、世界各国において、Na-水反応による材料ウェステージ実験が行なわれ、多くのウェステージデータが集積されている。

また動燃事業団においても、大洗工学センターのSWAT-1, SWAT-2 装置により、主として、小リークおよび中リーク Na-水反応による材料ウェステージ実験が行なわれ、約 170 のデータが取られている。

しかし、ウェステージ率、つまり単位時間あたりのウェステージ深さは、影響を与える実験上のパラメータが多いことと、実験の性格上、データにかなりバラツキが多いことにより、ウェステージ率整理式は 2~3 の例を数えるのみで、ほとんど提示されておらず、全世界のウェステージ・データに対する整理式はまだ発表されていない。

本報告は、現在までに SWAT-2 装置の実験より得られたウェステージ整理式を、ウェステージデータ整理コード「SWAC-8」によりさらに発展させ、全世界のウェステージデータに対して、ウェステージ整理式の検討を行なったものである。

ウェステージデータ整理コード「SWAC-8」には、約 400 個のウェステージデータの各々に対し、研究機関、実験装置、Na 系条件、注水条件、ターゲット条件、ウェステージ関係のデータなど、計 25 項目のパラメータに関して、入手できるかぎりのデータが記録されている。

「SWAC-8」の機能としては、下表にあるとおり、第一に全ウェステージデータのうち任意の条件に合致するデータのみを取捨選択した後、ある任意の項目に注目し、その項目の大きいものあるいは小さいものから順に、ウェステージデータを配列してウェステージデータ表を作成することである。

第 2 に、今述べた任意の条件に合致するデータのみを取り出し、任意の項目、あるいは種々のパラメータを含む任意の関数を軸にとり、2 次元あるいは 3 次元的にプロットすることができます。

第 3 に、このプロットしたデータを、適当な関数を与えて、最小二乗法でフィットし、整理式を作成しプロットすることができる。

また、「SWAC-8」に収録されている約 400 のウェステージデータの内訳は現在のところ右表(2)のとおりである。

## (1) 機能

- ウェステージ・データ表の作成
- ウェステージ・データのプロットアウト
- 最小二乗法による整理式の作成とプロットアウト

## (2) 収録データ数

PNC	SWAT-1	66
	SWAT-2	105
APDA	RIG-10	57
	RIG-33	9
	RIG-43	13
CEA		24
GE	SOWAT	50
	INTERATOM	33
USSR		40

## (2) ウェステージ率と注水率の関係(全データ)

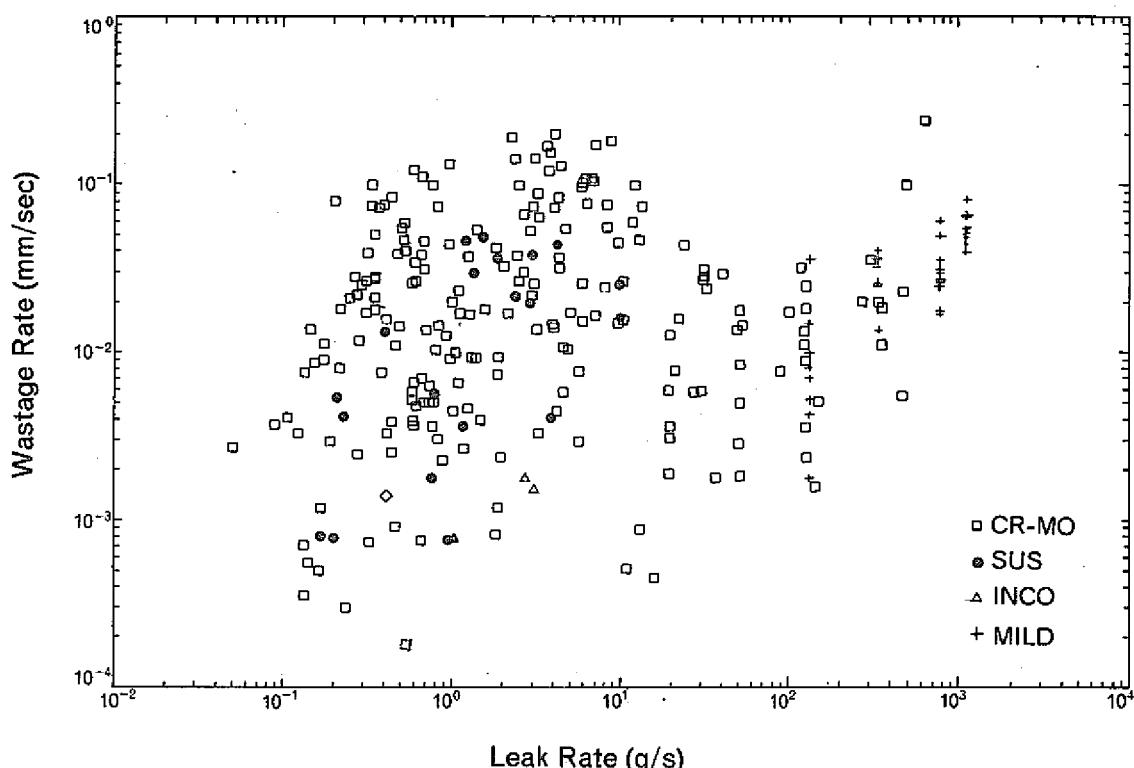
「SWAC-8」に収録されている全ウェステージデータに対して、ウェステージ率をたて軸にとり、注水率を横軸にとってプロットしたものを下図に示す。

なお、ウェステージ率が0のデータは省いてある。よく言われるように、注水率 50 g/sec 以下の小リーク領域においては、数 g/s ~ 10 g/s のあたりに最大ウェステージ率を示すリーク率が存在し、約 100 g/sec の中リーク領域で極小値を示し、再びウェステージ率が増大していく傾向が見られる。

この図で□印はクロム・モリブデン鋼、○印はステンレス鋼、△印は INCONNEL, INCOLOY の高 Ni 合金、+印は軟鋼のデータを示す。Na温度などの条件が異なるため、はっきりとは言えないが、一般によく言われるように、ステンレス鋼はクロム・モリブデン鋼に比べ、耐ウェステージ性が数倍高いことを示している。また、INCONNEL, INCOLOY の高 Ni 合金は、データの数が少ないため、明確ではないが、クロム・モリブデン鋼に比べて数10倍~100倍の耐ウェステージ性を示している。

この図を見ても、ウェステージ率は、注水率に対して、2~3オーダもバラツいており、注水率のみではうまく整理できないことがわかる。

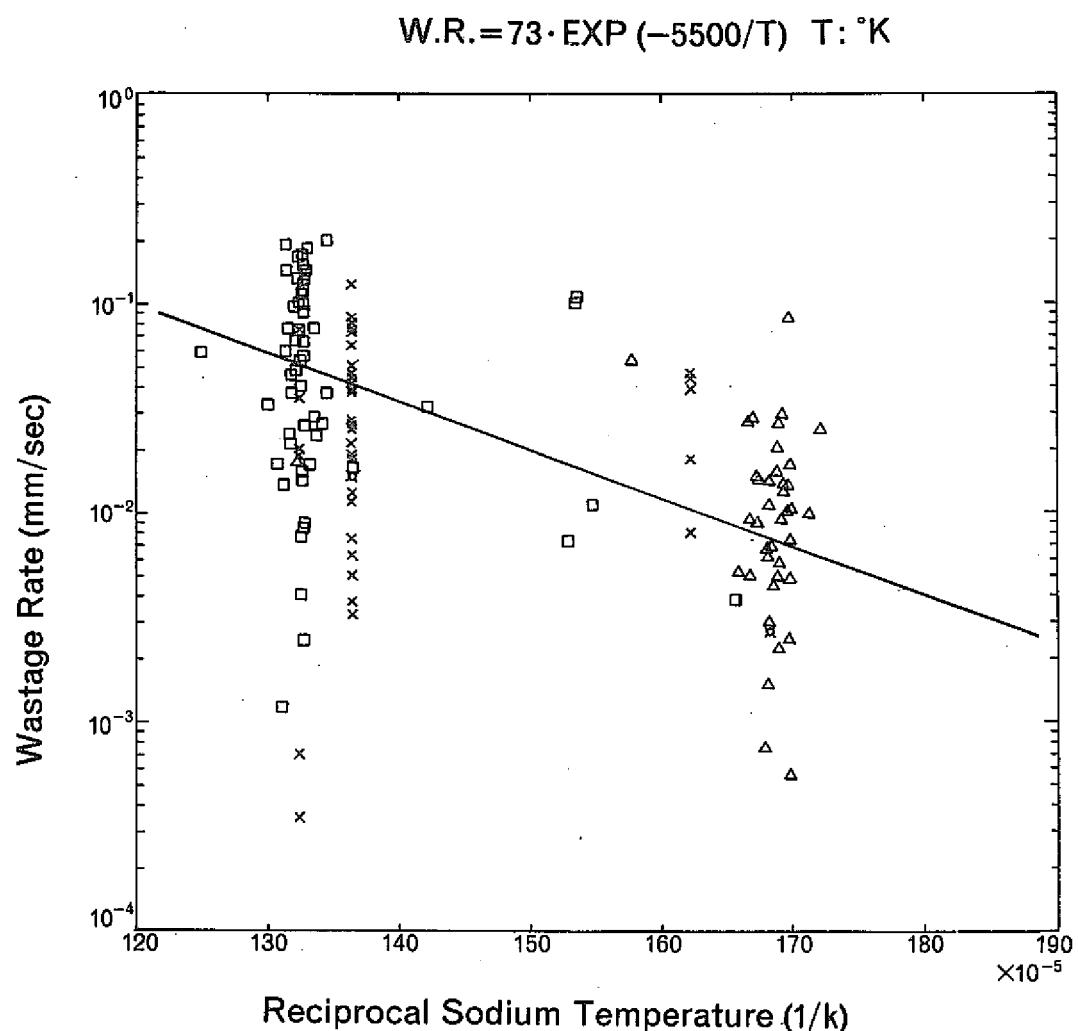
以下に「もんじゅ」の蒸気発生器の蒸発器の伝熱管材料に使用され、過熱器の伝熱管材料であるステンレス鋼よりウェステージされ易いクロム・モリブデン鋼の小リーク領域におけるウェステージ整理式の検討について報告する。



## (3) ウェステージ率に与えるNa 温度の影響

下図は、たて軸にウェステージ率、横軸にNa 温度の逆数をとり、全データをプロットしたものである。図中の実線はSWAT-2 装置の実験で温度依存性として示された $\exp(-5500/T)$  の関係を示す。この図も、Na 温度のみで整理したため、データがバラツいているが、SWAT-2 装置で得られた温度依存性の傾向がほぼ全データにおいて満たされていると言える。

なお、本図より後では、特にことわらないかぎり、図中のプロット点の图形は研究機関のちがいを示す。



## (4) ウェステージ率に与える注水率の影響

前の図で、温度依存性がほぼ  $\exp(-5500/T)$  に比例することが確かめられたので、次にウェステージ率を  $\exp(-5500/T)$  で割って、Na 温度の影響を消したデータ、すなわち Na 温度で規格化したウェステージ率をたて軸にとり、注水率を横軸にとったものがこの図である。

全データをプロットした図に比べ、明らかにまとまりが良くなり、両対数で 2 次曲線の形をしていることが認められる。このデータを最小二乗法により、両対数で 2 次曲線にフィットさせたところ、

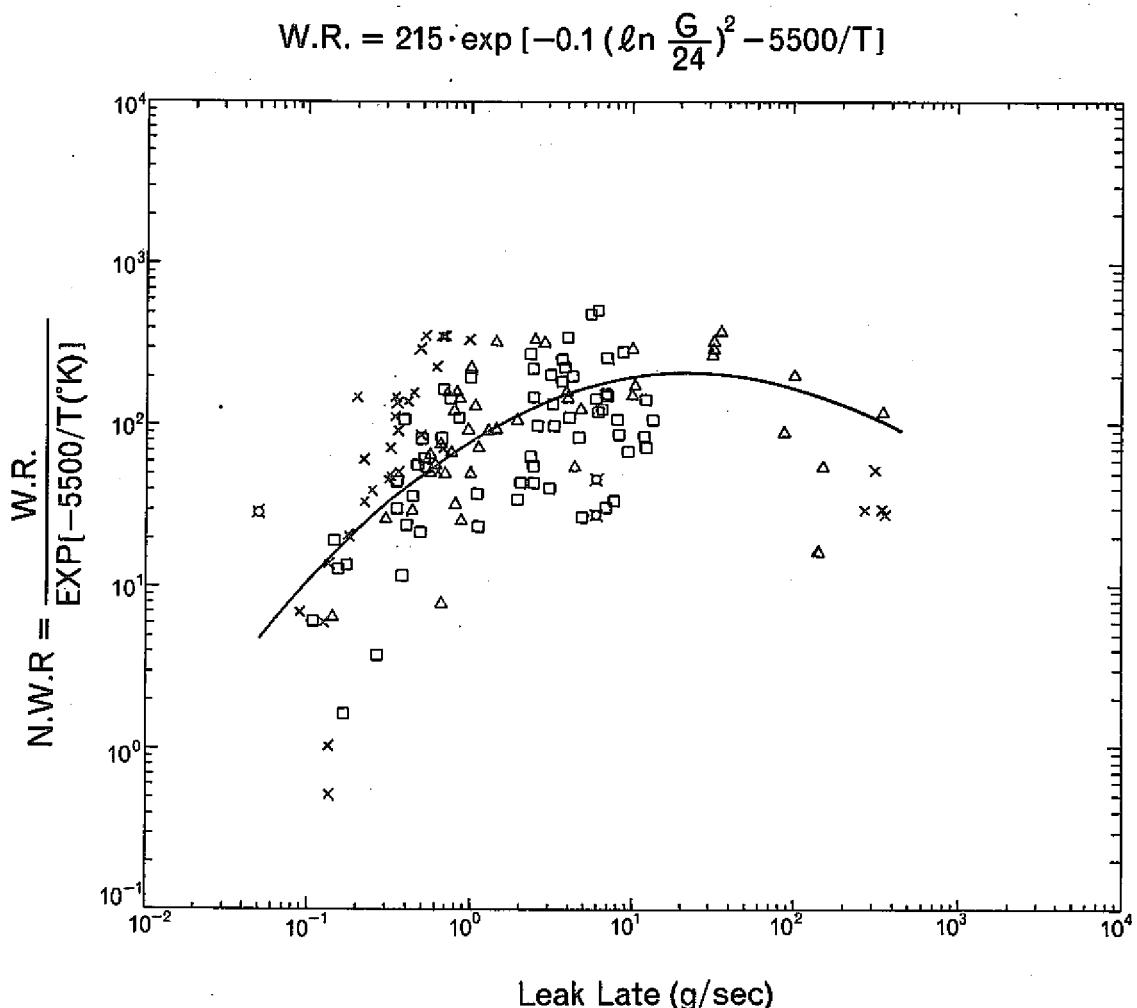
$$W.R. = 215 \cdot \exp \left[ -0.1 \left( \ln \frac{G}{24} \right)^2 - 5500/T \right]$$

ここで W.R. : ウェステージ率 (mm/sec)

G : 注水率 (g/sec)

T : Na 温度 (°K)

の関係が得られ、小リーク領域でウェステージ率が最大値を示すのは、注水率にして約 24 g/s のあたりであることがわかった。



## (5) ウェステージ率に与えるノズル・ターゲット間距離の影響

以上でウェステージ率に与えるNa 温度と注水率の影響が示されたので、次にウェステージ率をNa 温度と注水率で規格化したもの、すなわちウェステージ率を $\exp \left\{ -0.1 \left( \ln \frac{G}{24} \right)^2 - 5500/T \right\}$ で割ったものをたて軸にとり、ノズル・ターゲット間々隔Lを横軸にとって全データをプロットしたものが本図である。

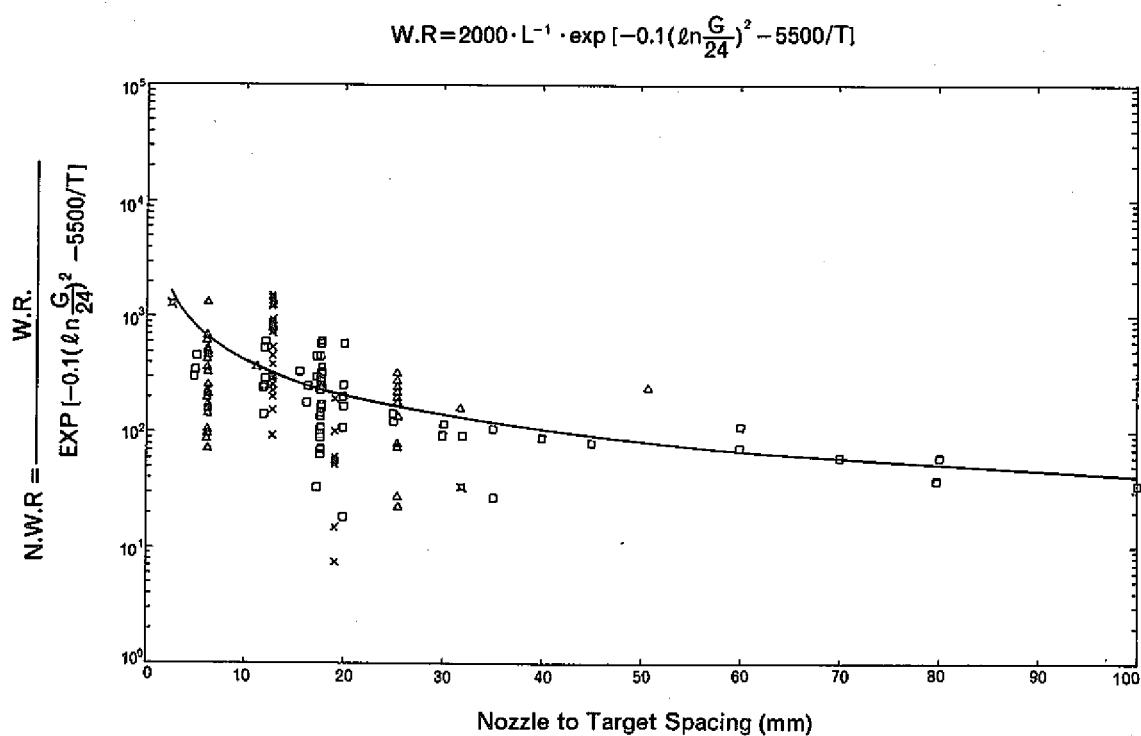
SWAT-2装置におけるノズル・ターゲット間隔を変えた実験により、ウェステージ率がノズル・ターゲット間隔Lに反比例することが示されているので、規格化されたウェステージ率に対してLに反比例する関係で最小二乗法によるフィッティングを試みたところ、

$$W.R. = 2000 \cdot L^{-1} \cdot \exp \left\{ -0.1 \left( \ln \frac{G}{24} \right)^2 - 5500/T \right\}$$

ここに L : ノズル・ターゲット間々隔 (mm)

となった。この関係を図中に実線で示す。

以上でウェステージ率に与えるNa 温度、注水率、ノズル・ターゲット間隔の効果を含んだウェステージ率整理式が求まったことになる。

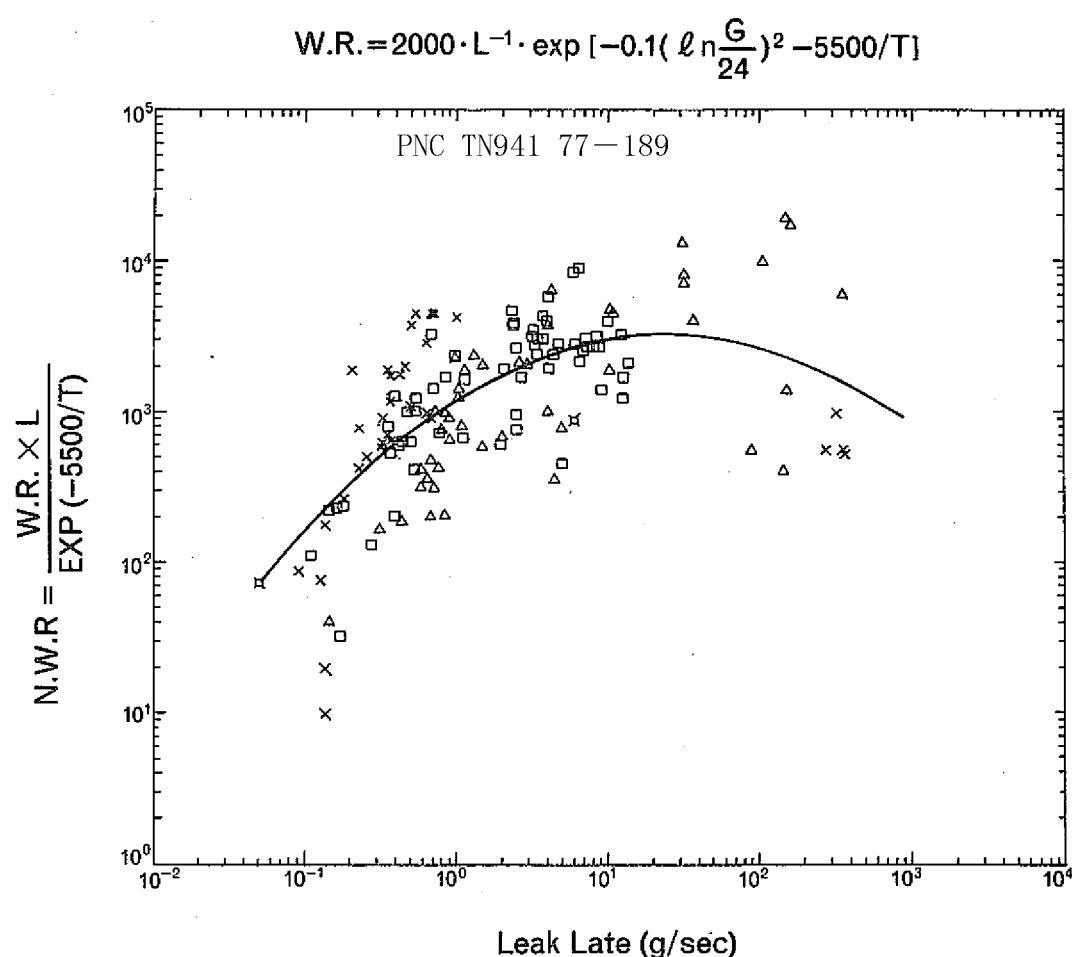


## (6) ウェステージ・データ整理式とウェステージ・データ

ここで、Na 温度とノズル・ターゲット間隔で規格化したウェステージ率をたて軸にとり、最初全データをプロットしたように横軸に注水率をとって、全データをプロットするとこの図のようになる。

最初の図でウェステージ率が、数オーダーにわたってバラツいていたことと比べると、かなりデータがまとまっているといえる。

次に、ウェステージ率に影響を与えると言われている他のパラメータの影響について検討した結果について説明する。

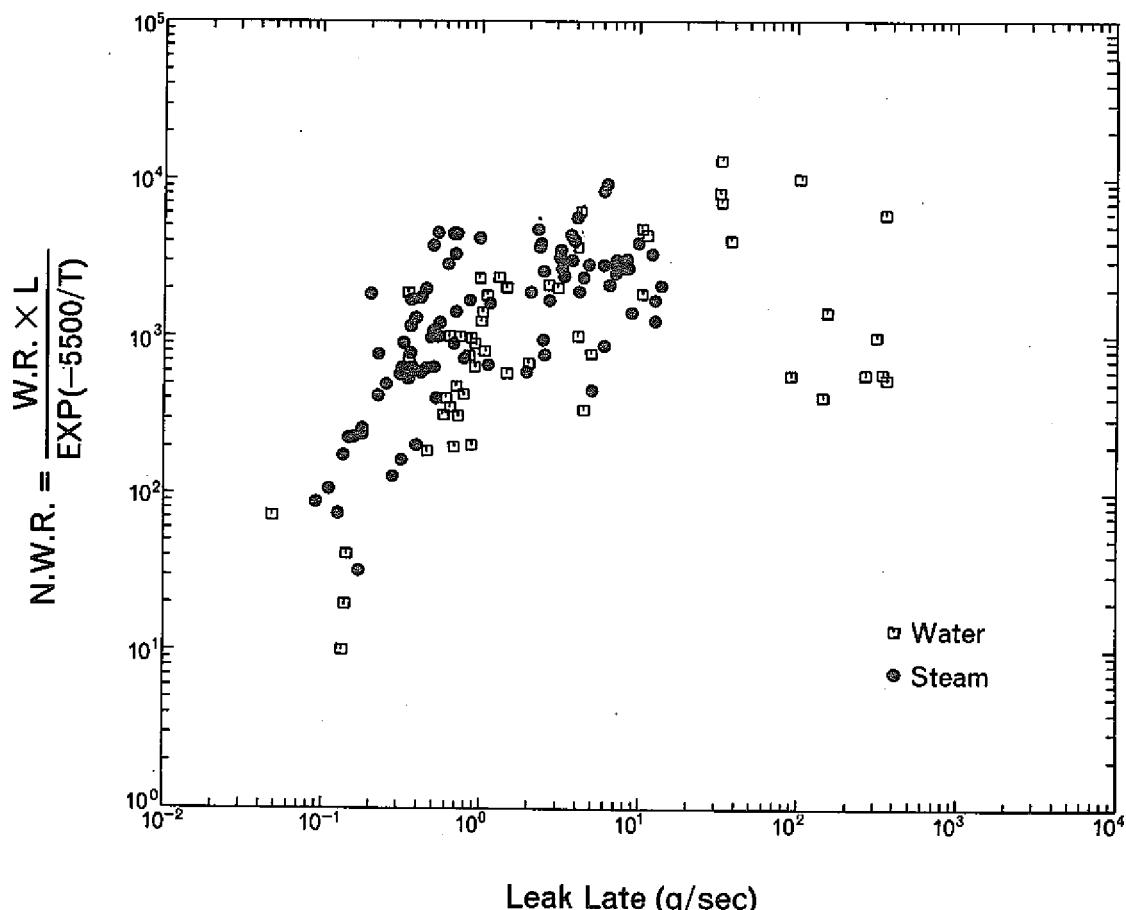


## (7) ウェステージ率に与える蒸気注入と水注入の相違

まず最初に、注水側の条件として、蒸気注入と水注入の相違について調べた結果を本図に示す。

図中、□印は水注入データを示し、●印は蒸気注入を示す。G E の Greene らが指摘したよ  
うな、蒸気注入と水注入によるウェステージ率極大値の明らかな違いはみられず、両者の差は  
あまりないということができる。

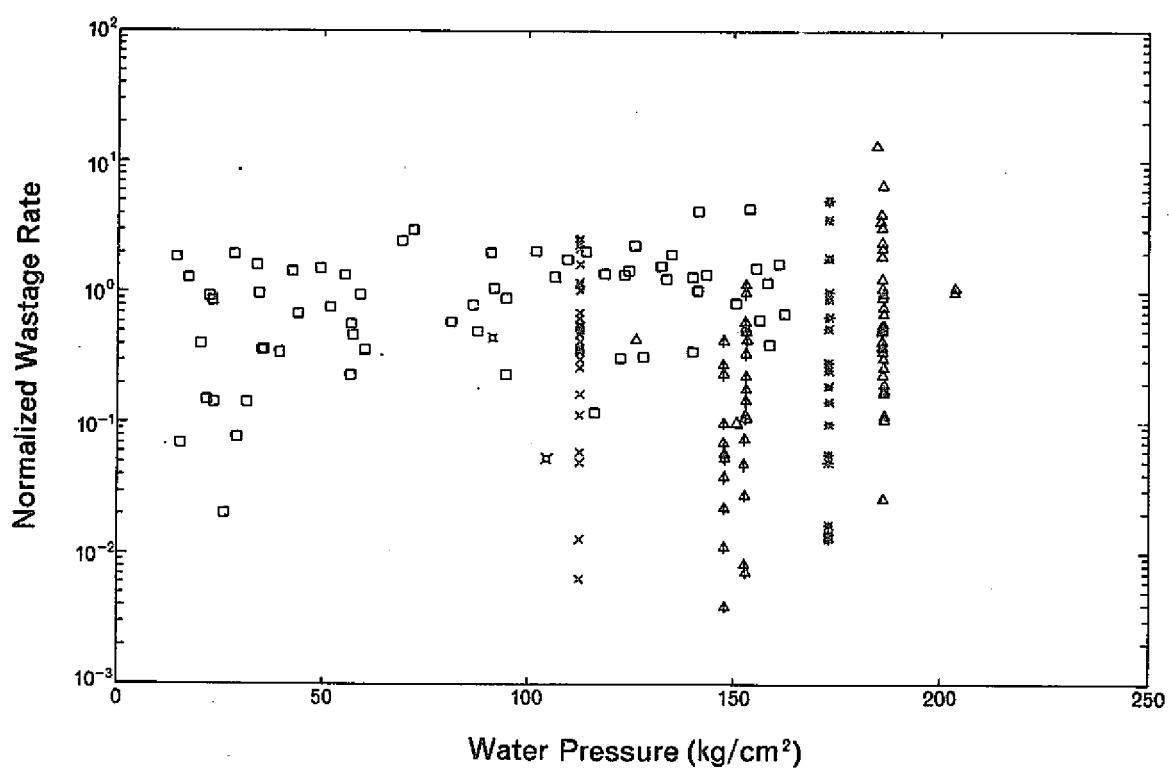
ただし、実験上の困難さから、注水率の大きい領域での蒸気注入のデータがないため、この  
領域での水注入-蒸気注入の差は不明である。



## (8) ウェステージ率に与える水注入圧力の影響

次に、水注入圧力の効果について調べた。たて軸にNa 温度、注水率、ノズル・ターゲット間隔で規格化したウェステージ率、横軸に水または蒸気注入圧力をとりプロットしたものが下図である。

図のように、圧力約  $15 \text{ kg/cm}^2 \sim 200 \text{ kg/cm}^2$  の範囲において、圧力の影響はみられない。



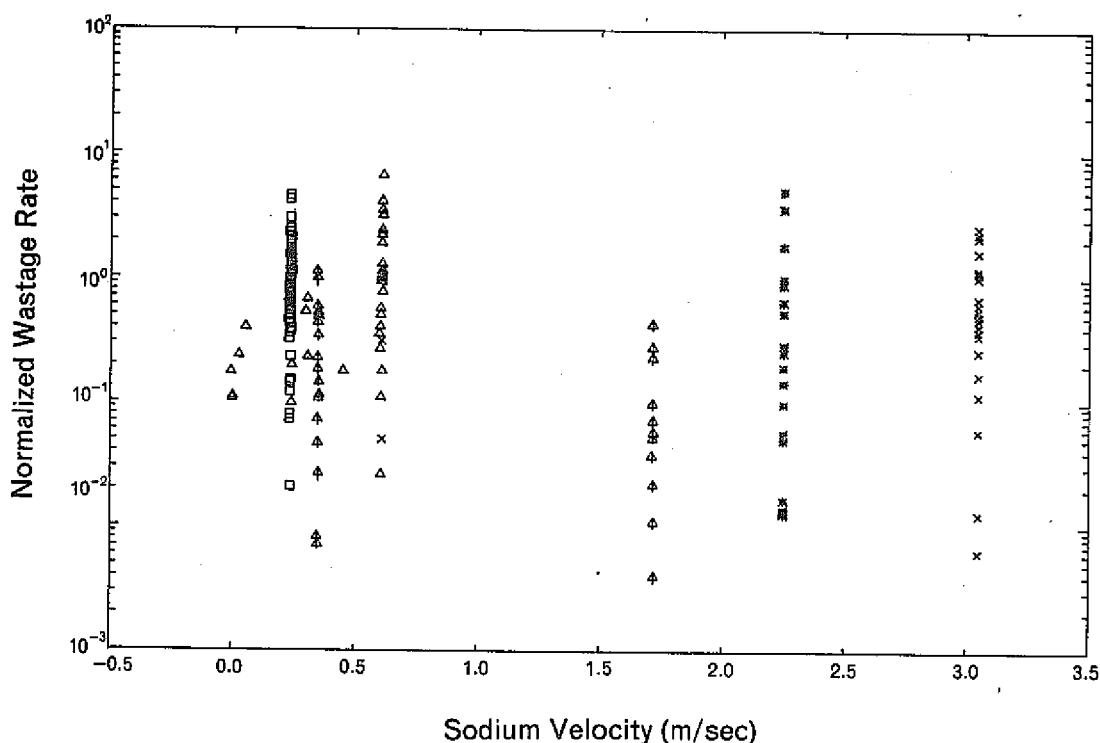
## (9) ウェステージ率に与えるNa流速の影響

次に、Na側のパラメータとして、ウェステージ部のNa流速による影響を調べたものを下図に示す。

たて軸は前の図と同じ規格化したウェステージ率、横軸にはNa流速をとっている。

Na流速は0～3m/sの範囲で変っている。

今までAPDA, GE, 日立の研究者たちは、Na流速とともにウェステージ率が増大すると報告し、INTERTOMではNa流速とともに減少すると報告しているが、この図では、データのバラツキが大きく確かなことは言えないが0～3m/sの範囲では、Na流速の影響は無いように見受けられる。



### (10) まとめ

以上の結果をまとめると、下表のようになる。

## ま　と　め

ウェステージ・データ整理コード「SWAC-8」により入手可能な全世界のウェステージ・データを整理した結果次のような結果を得た。

- (1) PNC「SWAT-2」のウェステージ・データに対する  
 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$  鋼の ウエステージ率整理式をもとにノズルターゲット間距離の効果を入れ、全データで整理したところ次式を得た。

$$W.R. = 2000 \cdot L^{-1} \cdot \exp \left[ -0.1 \left( \ln \frac{G}{24} \right)^2 - 5500/T \right]$$

- (2) ウエステージ率に対する注水圧力、Na流速、蒸気と水の相違の影響は見られない。
- (3) 今後さらに世界各国のウエステージ・データを収積し、より精度の高いウエステージ整理式を検討する予定である。

## V. ナトリウム-水反応によるSG伝熱管ウェスティングの金属検査

執筆：橋本 達也\*

本項は、日本原子力学会昭和51年分科会で「小リーク・ナトリウム-水反応試験（第22報）」として発表したものの講演原稿をもとにしてまとめたものである。

上記発表前刷を付録-Vに示す。

\* 三菱原子力工業（株）

## (1) 試験概要

動燃では、SWATプロジェクトの一環として、ナトリウム-水反応によってSG伝熱管に生ずるウェステージ現象を総合的に把握することに努めている。本報告は、小リークおよび中リーク試験で観察されたウェステージに関し、その現象の機構を捕える為、ウェステージを生じたSG伝熱管に金属学的検査を実施し、小リークおよび中リーク試験結果を比較検討したものである。

下表はナトリウム-水反応試験の実験条件を示している。SWAT-1とあるのが中リーク試験で、ナトリウム温度330°C、水蒸気温度325°C、ノズル・ターゲット間隔51.5mm、ノズル径1.0mm、リーク率20g/secである。また、SWAT-2とあるのが小リーク試験で、ナトリウム温度約480°C、水蒸気温度450~480°C、ノズル・ターゲット間隔5~60mm、ノズル径0.3, 0.7mm, L/D 7~200, リーク率0.8~9g/secである。

SODIUM WATER REACTION TEST CONDITIONSSWAT-1 TEST (RUN No.46)

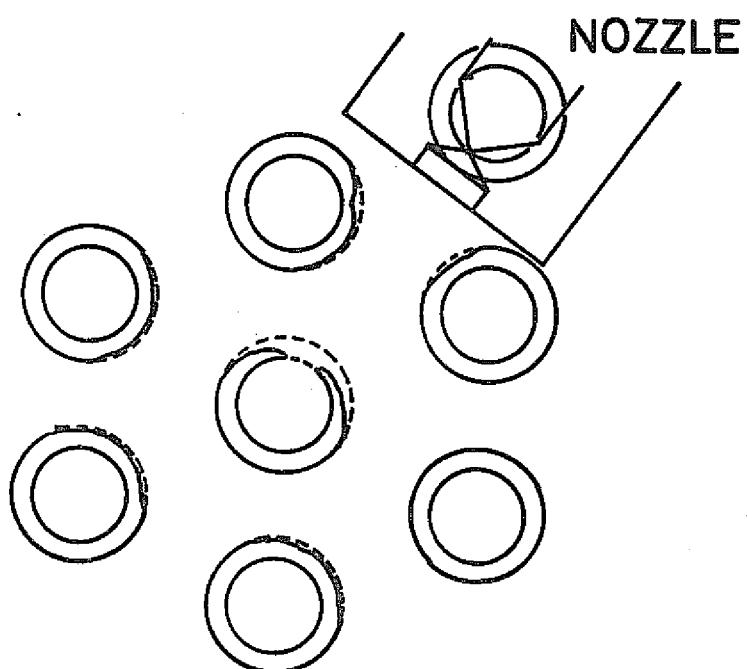
Na TEMPERATURE	330°C
STEAM TEMPERATURE	325°C
NOZZLE-TO-TARGET SPACING	51.5 mm
NOZZLE DIAMETER	1.0 mm
LEAK RATE	20 g/sec

SWAT-2 TEST

Na TEMPERATURE	~480°C
STEAM TEMPERATURE	450~480°C
NOZZLE-TO-TARGET SPACING	5~60 mm
NOZZLE DIAMETER	0.3, 0.7 mm
L/D	7~200
LEAK RATE	0.8~9 g/sec

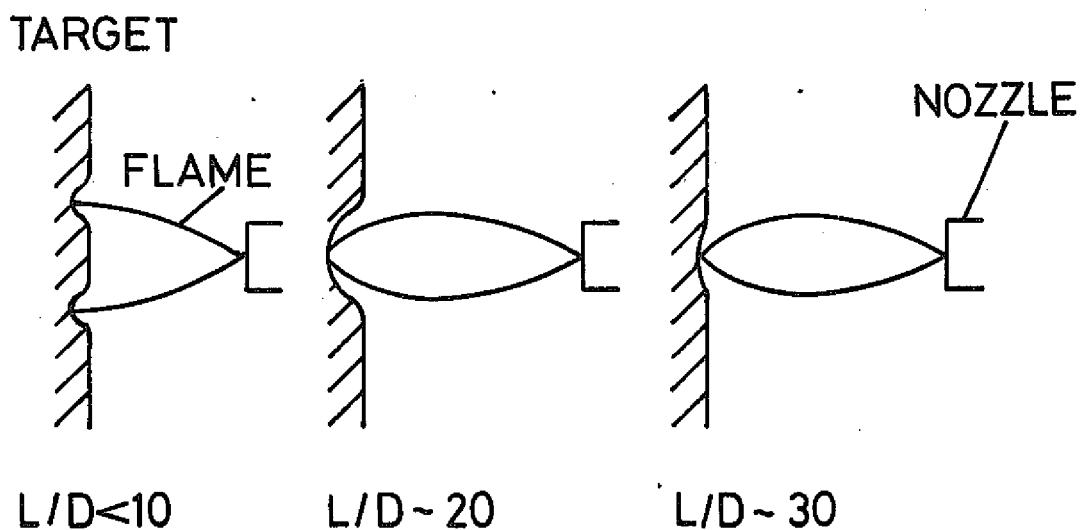
(2) 中リークのウェステージ状態

下図は、中リーク試験のノズルとターゲットの配置およびウェステージの状態を示したものである。ノズル正面のターゲットは激しいウェステージを生じ、管の肉厚を通して貫通している。ウェステージは、ノズルから離れるにしたがって軽微となり、全くウェステージを生じていないターゲットもある。



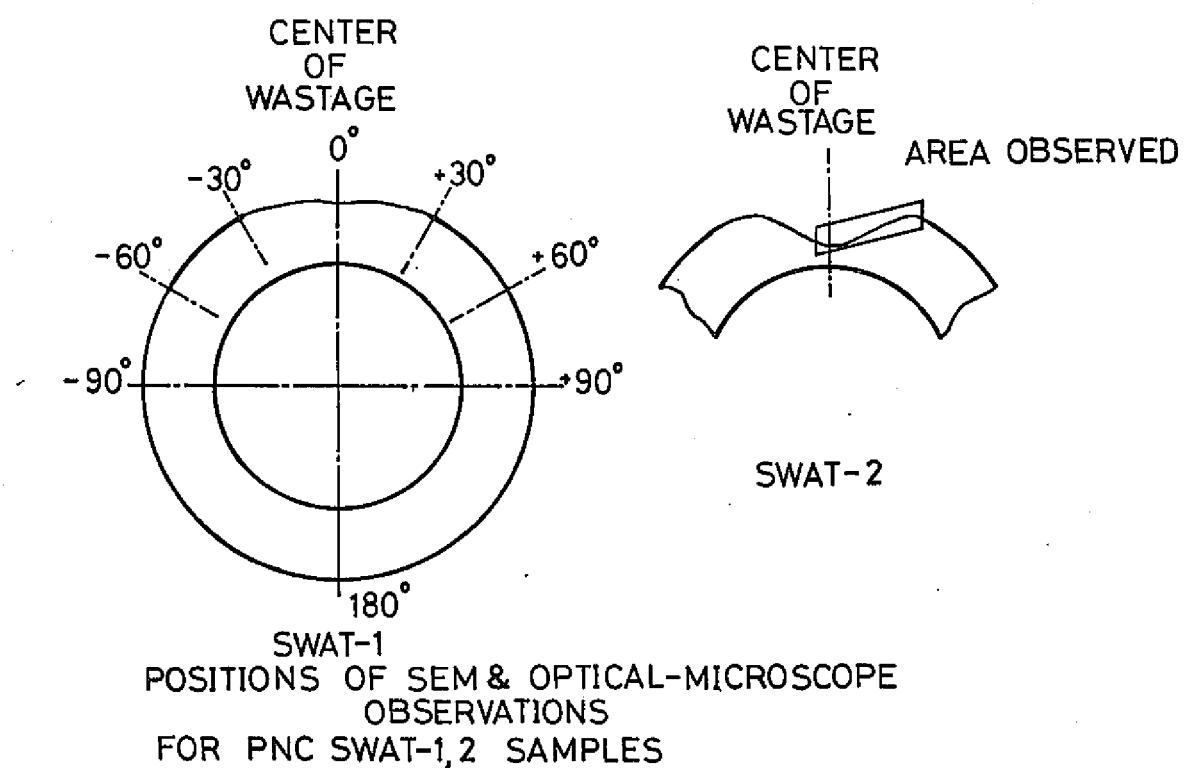
## (3) 小リークのウェステージ状態

下図は、小リーク試験におけるターゲットとノズルの配置による相互作用の相違を推定して描いたものである。L/Dが10以下の場合は、ターゲットに近づくほど炎の形状が変化する。L/Dが20付近ではピット型、L/Dが30以上になるとピット型ではあるが、その深さが浅くなり、200近くになると深さ方向には殆んど侵食されず全面が軽く侵食される様である。今回の実験ではL/Dの変化に伴う、ウェステージ部の侵食の変化に注目して検査を実施し、その結果を小リーク試験結果と比較した。



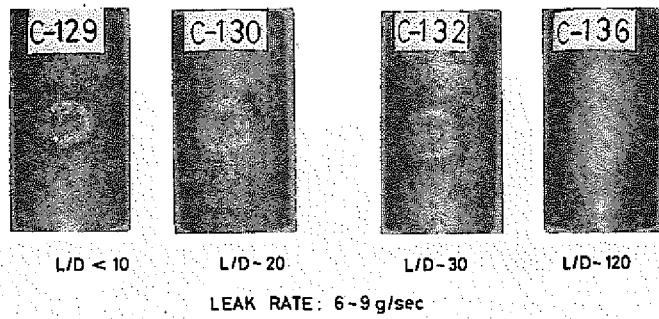
(4) 試験片の観察位置

下図は、小リークおよび中リーク試験片の SEM および先頭観察の観察位置を示すものである。小リーク試験片では、ウェステージ中心部からウェステージを殆んど生じていない部分までを SEM と先頭により連続観察し、中リーク試験では、ウェステージ部の中心および中心から  $\pm 30^\circ$ ,  $\pm 60^\circ$ ,  $\pm 90^\circ$ ,  $180^\circ$  の点を観察した。

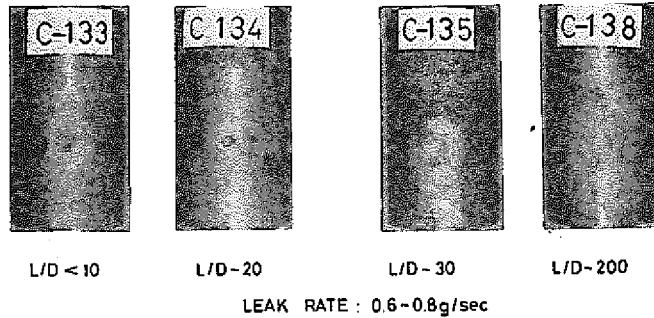


## (5) ウエステージ形態

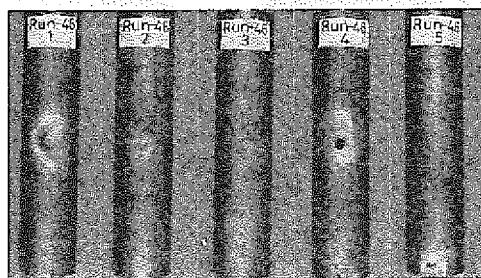
下の写真は、小リーク試験、リーク率 $6 \sim 9 \text{ g/sec}$  のL/Dの相違による、巨視的なウェステージ形態の変化を示したものである。L/Dが10以下、20、30では、トロイダル型のウェステージを生じている。また、L/Dが120の試片は表面が軽くウェステージされているのみである。本試験片の表面にはサビの発生が認められるが、ウェステージ部が選択的にサビているのが認められる。



下の写真は、リーク率 $0.6 \sim 0.8 \text{ g/sec}$  の試片のL/Dの変化によるウェステージ形態の変化を示したものである。この条件では、L/Dが10~30までの試片にピット型のウェステージが生じている。L/Dが200では、殆んどウェステージを生ぜず、軽く表面が侵食されている程度である。これらの試片の場合、リーク率 $6 \sim 9 \text{ g/sec}$  の試片と異なり、サビの発生がウェステージ部には認められない。



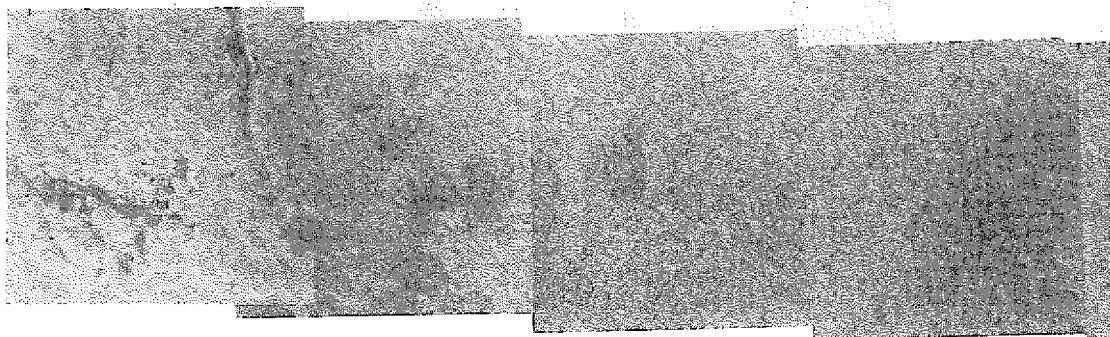
下の写真は、中リーク試験片の外観を示したもので、ノズルの正面にあった4番のターゲットには貫通を生じている。また、1、2番のターゲットはジェットの衝突具合で非対称なウェステージを生じています。ウェステージ面は小リーク試片に比べて、滑らかでありサビの発生も殆んど認められない。



TARGET RUN No.46  
ORIFICE DIA.: 1.0mm , q: 20 g/sec

## (6) SEM観察結果（その1）

下の写真は、 $L/D$ が20の小リーク試験片C-130のSEM観察によるウェステージ表面を示す。ウェステージ中心では径が200  $\mu$ 程度の円形の凹凸を生じ、中心から離れるにつれ円形が伸びた形となりウェステージ周辺では細い凹凸のウェステージになっている。本試片に認められたウェステージは、この検査で最も特徴的なものであり中リーク試片のウェステージとの比較の際、基準となる試片としてあつかった。



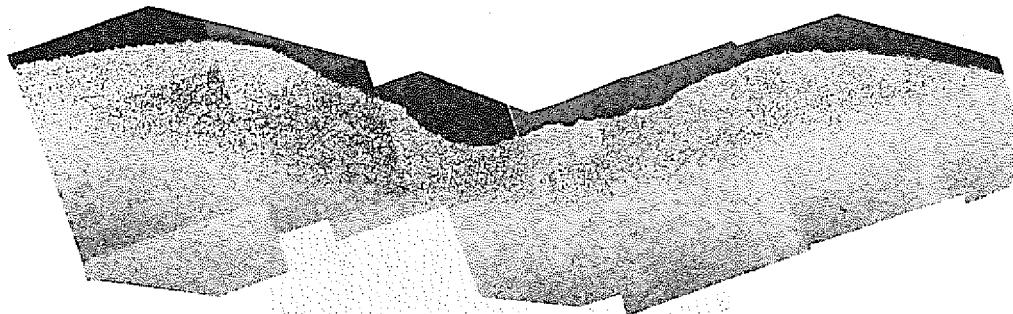
TARGET No.C-130

X 50

L/D = 20

下の写真は、先ほどのウェステージ部分の横断面の組織を示すものである。表面に認められるウェステージの形態は従来認められている鋸歯状の凹凸のあるものである。ウェステージ部分には組織変化が認められ、その組織はベーナイトであった。

さらに反応炎との関連で考察してみると、ウェステージの中心部では比較的大きいナトリウムの滴あるいは反応生成物が衝突し、周辺では細い粒径のものが衝突しているものと考えられる。これら衝突する粒子の径と共に、SEM観察による表面状態から判断すると、ウェステージ中心では、エロージョン作用が強く、ウェステージ周辺ではコロージョン作用が強く働いているものと考えられる。



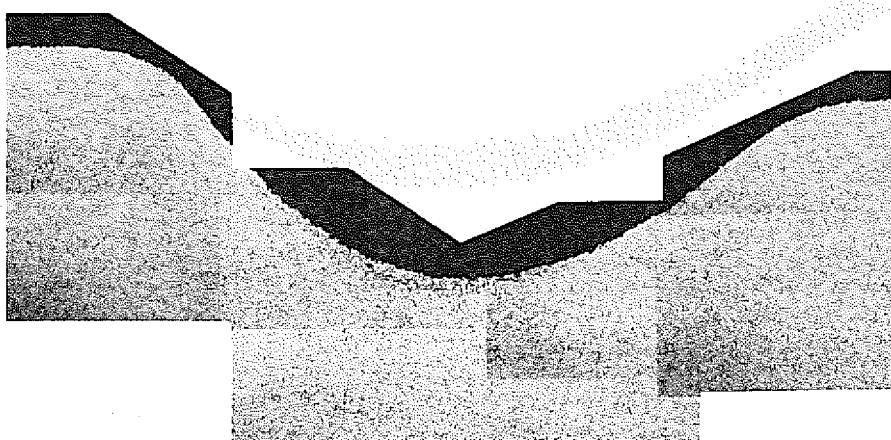
TARGET No. C-130

X 50

L/D = 20

(7) SEM観察結果（その2）

下の写真は、前述の試片と L/D が等しい、C-134 試片のウェステージ表面を示すものである。この場合、リーク率は 0.6~0.8 g/sec と低くなっている。この試片のウェステージ中心部は、先程の C-130 試片に認められた様な大きい凹凸は認められず、先程の試片のウェステージ部周辺に認められた細い凹凸が認められる。

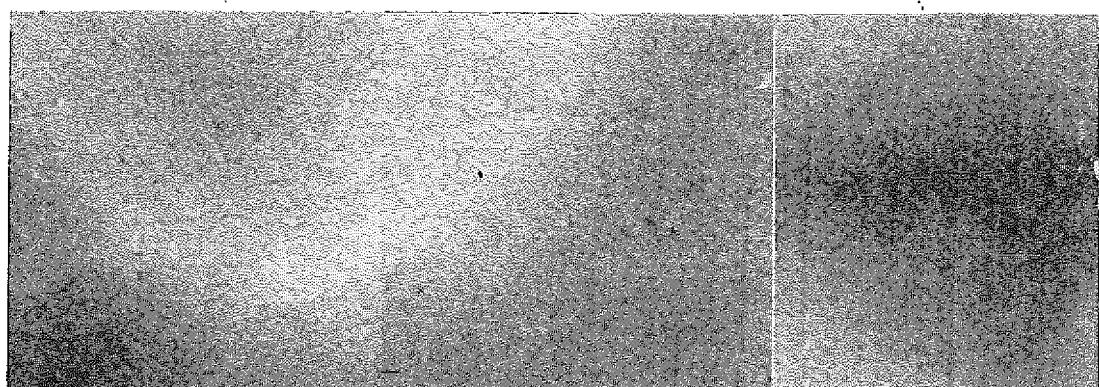


X 50

TARGET No. C-134

L/D~20

下の写真は、同一箇所の組織を示している。表面のウェステージ形態は鋸歯状であり特徴はないが、リーク率 6~9 g/sec の試片と異なりウェステージ部全域に渡った変態は認められない。ウェステージ中心にわずかに変態が認められるのみである。

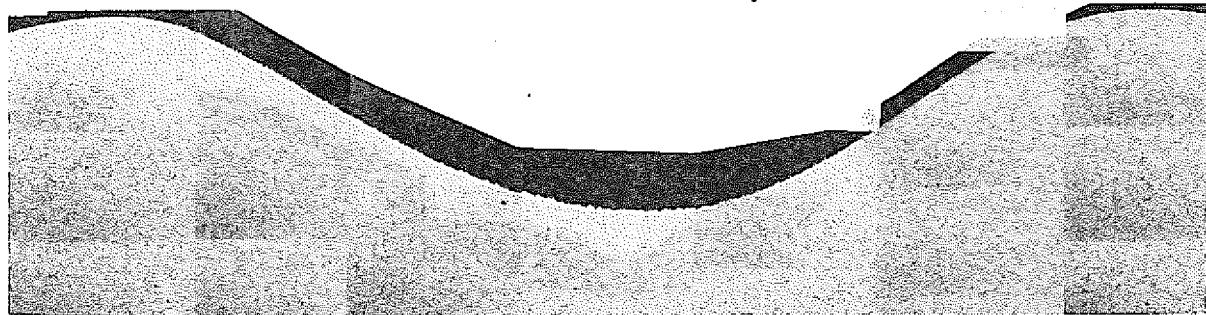


TARGET No. C-134

L/D~20

(8) SEM観察結果（その3）

下の写真は、 $L/D$ が30、リード率0.6~0.8 g/sec のC-135 試片のウェステージ表面を示すものです。ウェステージ中心は細い凹凸を示している。このウェステージの状態はC-130 試片のウェステージ部周辺の状態に類似している。

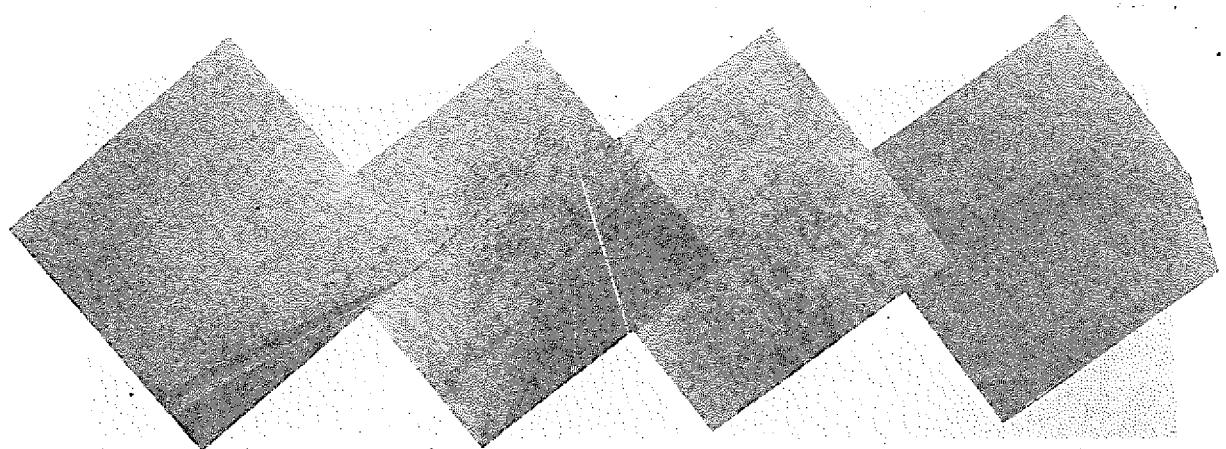


TARGET No. C-135

$L/D \sim 30$

X 50

下の写真は、C-135 の横断面の組織を示すものです。ウェステージ表面の状態は $L/D$ が30の試片と変りありません。ただ、この試片では全く変態を生じておません。この様に、リード率が小さいと変態を生じないか、生じても少ない様です。



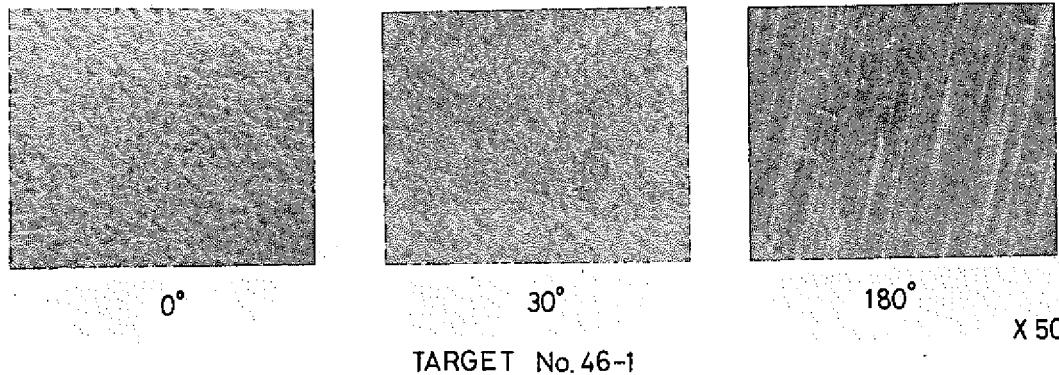
X 50

TARGET No. C-135

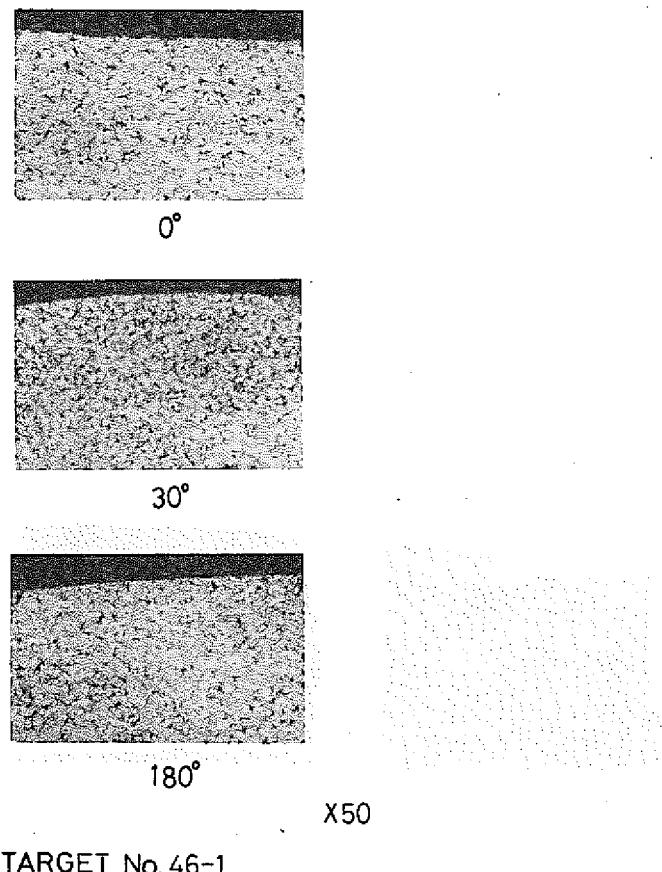
$L/D \sim 30$

(9) SEM観察結果(その4)

下の写真は、中リーク試験のノズルに近い試片の表面状態を示すものである。 $0^\circ$ とあるのはウェステージの中心で、細い凹凸を生じており、この状態は小リーク試片C-130のウェステージ部周辺の状態に類似している。 $180^\circ$ と示してあるウェステージ中心の反対側では殆んどウェステージを生じておらず、表面仕上げの状態が残っている。

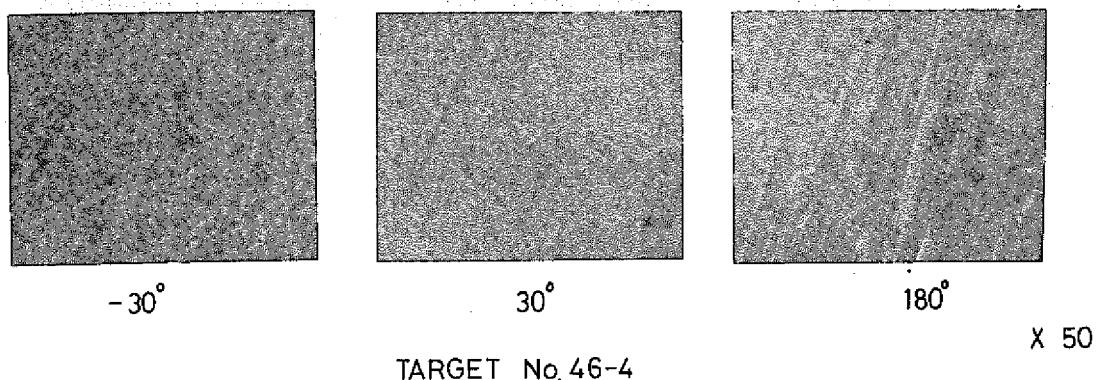


下の写真は、同一箇所の組織写真である。表面は比較的滑らかで、また変態をわずかに生じている。

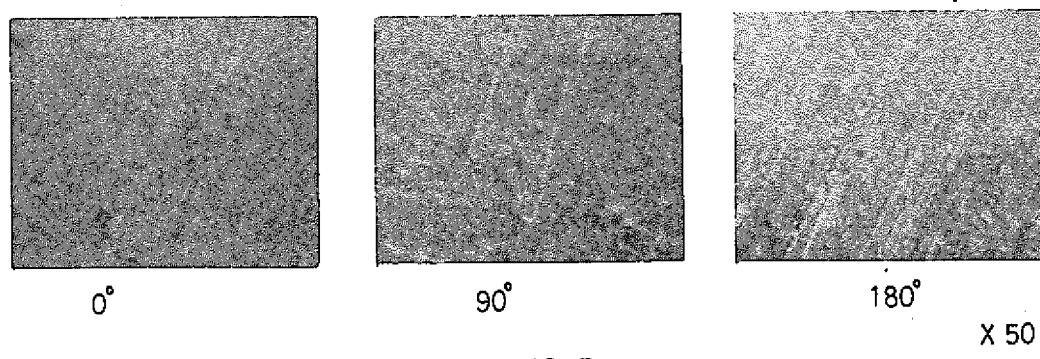


## (10) SEM観察結果（その5）

前述の試片はノズルから近い位置に在ったものですが、下の写真はノズル正面にあり貫通を生じた試片のウェステージ状態を示すものである。ウェステージ中心から±30°の位置では細い凹凸のウェステージを生じており、その状態はやはりC-130のウェステージ部周辺の状態に類似している。また、180°の方向では先程の試片と同様に殆んどウェステージを生じていない。



下の写真は、ノズルから離れてジェットが殆んど衝突しないターゲットの表面状態を示すものである。表面は殆んどウェステージを生ぜず、表面仕上げのあとが残っている。



### (11) まとめ

以上の検査結果から、次の様なことが明らかとなった。

- 1) 一般に、小リーク試験の場合、異ったL/Dに対し、巨視的なウェステージ形態はピット型、トロイダル型等の形態をとるが、微視的な形態を調べた結果ウェステージ最深部ではエロージョン作用の大きい侵食が、ウェステージ領域周辺では、コロージョン作用の大きい侵食が認められた。この結果を中リーク試験と比較すると、中リーク試験のウェステージ形態は、小リーク試験のL/Dが20~30の試片に生ずるウェステージに対応していた。また、中リーク試験では、ノズルに近接したターゲットに、エロージョンとコロージョンが同等に作用した侵食を、ノズルから離れたターゲットにコロージョン作用の大きい侵食を生じていた。
- 2) 通常、ウェステージを受けている間、 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼はナトリウム-水反応による反応熱によりAC<sub>3</sub>点以上に昇温し、その後急冷され変態を生ずるが、本試験片には小リークおよび中リーク試験共にベーナイト変態が認められた。また、硬度測定から推測すると一部にマルテンサイト変態も生じている様であった。しかしながら、変態は総ての試片に認められるものではなく、小リーク試験において同一のL/Dの試片であっても変態を生じない場合があり、この傾向はリーク率の低い試験条件の試片に認められた。

## VII. 微小リークにおけるノズルおよびターゲットのウェステージ現象

執筆：大後 美道

本項は、日本原子力学会昭和52年分科会で「小リーク・ナトリウム-水反応試験（第23報）」として発表したものの講演原稿をもとにしてまとめたものである。

上記発表前刷を付録-VIに示す。

## (1) 試験概要

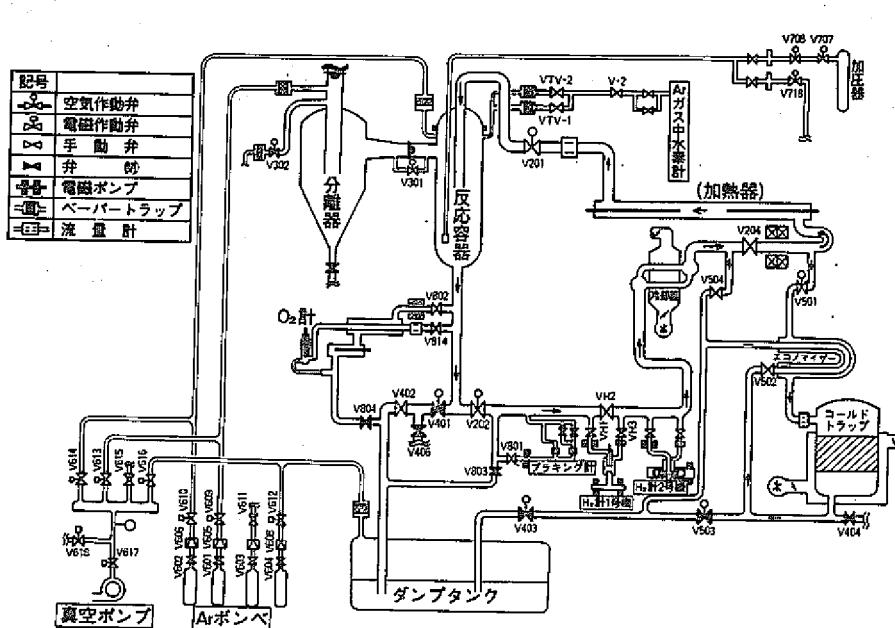
動燃ではこれまで SWAT-2 装置を用いて、リーク率  $0.038 \text{ g/sec}$  以上の小リーク領域を主体としてウェステージ関係試験を実施し評価をあたえて来た。その後更にリーク率の低い領域のウェステージ関係試験を現在実施している。試験の目的は、1に実機 SG の伝熱管構造でターゲットウェステージの生じないリーク率 (Non Damage Leak Rate) の確認を行なうこと、2にセーフティマップへの同領域におけるセルフウェステージ曲線の導入を可能とするためのデータ集積にある。

ここではリーク率が  $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{ g/sec}$  の微小リーク領域でのセルフウェステージ現象およびターゲットウェステージ現象についてその基礎試験結果を記述する。

下図は、SWAT-2 試験装置を示すものである。Na 中へ噴出される蒸気は、図中の加圧器により製造され所定の条件後、注水系内のスケールによるノズル孔のつまりをふせぐため  $10 \mu$  フィルターを通して反応容器内のノズルより Na 中へ噴出される。注水していない時は、ノズル孔保護のため Ar ガスを噴出させている。注水系は加圧器以後全部で独立に 6 系統もっている。

水リークの状態は、ループに取付けられてある。W.H. 社製の Na 中酸素計、PNC 型 Na 中水素計 1 号機、2 号機の指示により監視している。特に水リーク率の算定は、水 1 モルから水素 1 モルが発生するとし、また以前報告したようにリーク率が  $10^{-3}$  と微小であることから Na 中への水素溶解割合を 1 として、この PNC 型 Na 中水素計 1 号機による水素濃度上昇率から出している。

尚、水リーク試験中は純化系を切離している。

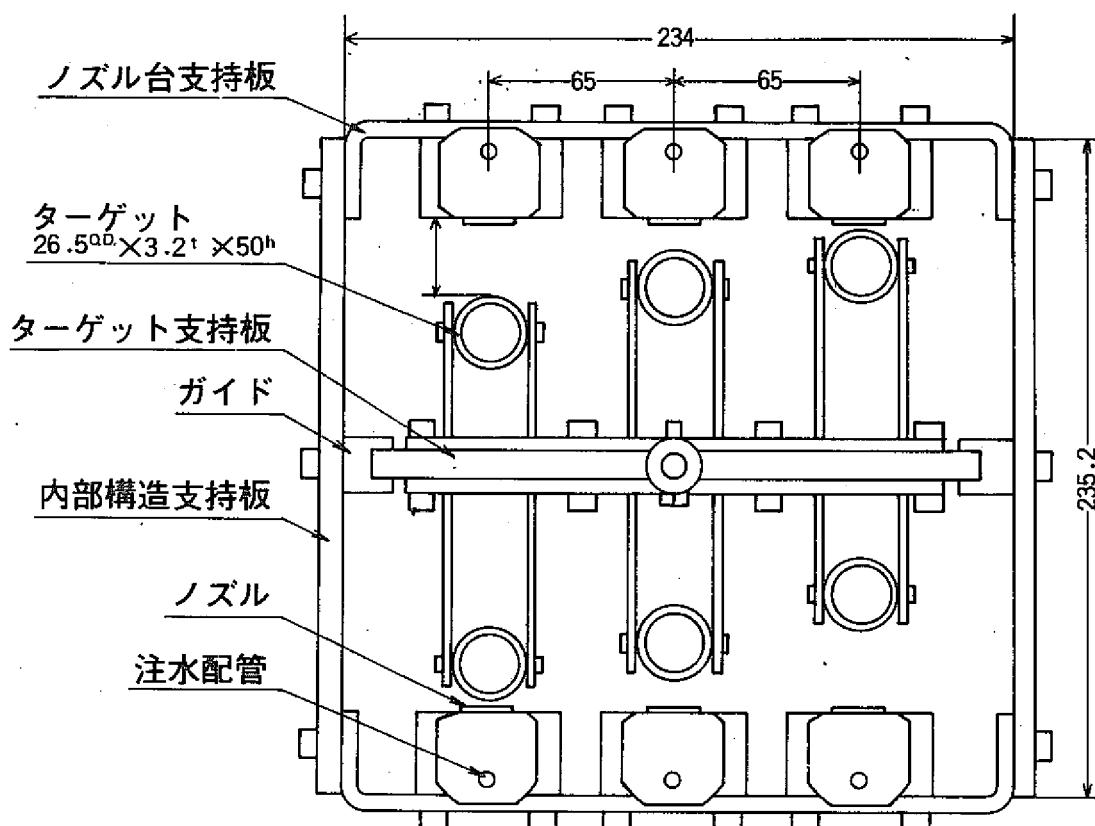


## (2) 装置 (その1)

下図は反応容器内に設置された微小リーク試験装置のノズルターゲット構造部の断面を示したものである。

本装置はセルフウェステージ現象の進展追跡をするための長時間連続微小リーク試験ができることと、1回の試験で数種のノズル径による注水試験ができるという特長をもっており、又1回の試験中数多くターゲットウェステージ試験ができるよう設計されている。従って図に示すように注水ノズルは縦235.2 mm、横234 mmに囲まれたNa流動部内に最大6個まで取付けられるようになっている。

ターゲットは各ノズルに対応して取付けられており、それぞれノズルターゲット間距離を任意にとることができる。

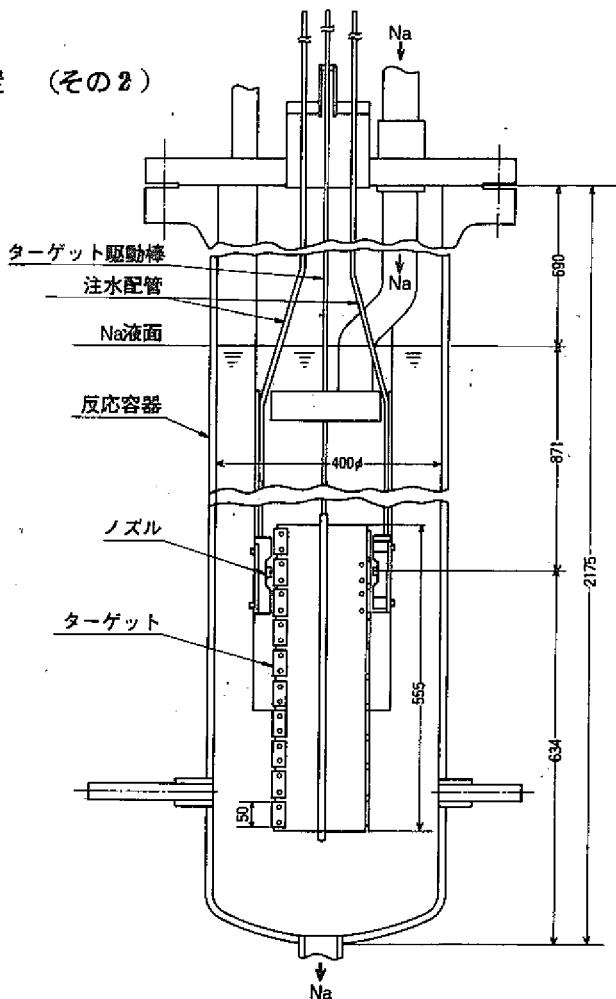


## (3) 装置 (その2)

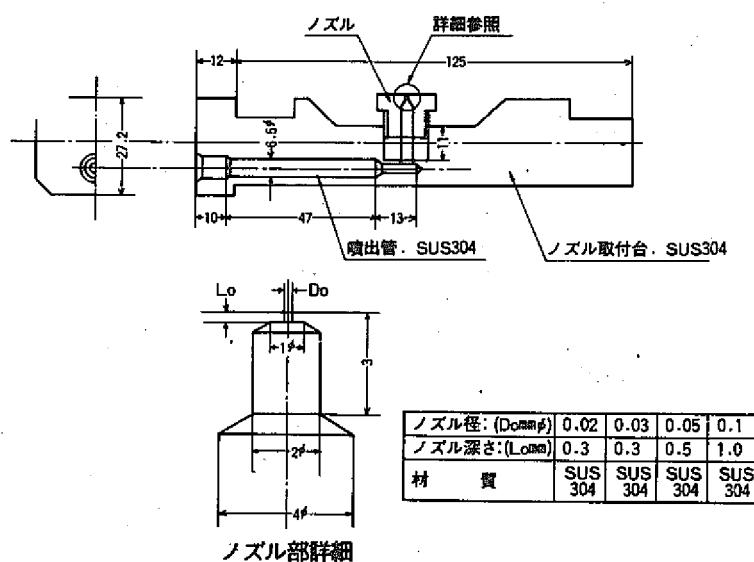
右図は、微小リーク試験装置を内蔵した反応容器の断面を示したものである。

ナトリウムは入口配管より入り四角内筒内を通り、ノズル部を通過して出口配管方向に流れる。

ノズルはNa自由液面より871mmの深さに設置されている。各ノズルに対応したターゲットは軸方向に最大10段取付けられるようになっており、ターゲット位置がこのターゲット駆動棒により試験中上下に自由に移動できるようになっている。従ってノズルとターゲットの組合せが数多く取れるようになっている。



下図は本試験に使用した注水用ノズルの詳細を示したものであります。ノズル径は、以前小リーク試験で用いた $1.5\sim0.2\text{ mm}\phi$ よりも小さく $0.1\text{ mm}\phi$ 以下 $50\mu, 30\mu, 20\mu$ の4種類を用いている。ノズル深さは小リーク試験では $0.8\sim4.5\text{ mm}$ でありましたが、今回の試験ではノズル径が小さいことから製作上の制約により $0.3\text{ mm}\sim1\text{ mm}$ とかなり浅いものとなっている。材質は全てSUS 304である。



## (4) 試験条件

下表は、微小リーク基礎試験の条件を示したものである。

一定条件として、ナトリウム温度は480 °C, ナトリウム流速は0.08 m/sec, ターゲット材質は2 1/4 Cr-1 Mo, ノズル材質はSUS 304, 蒸気温度は480 °Cである。

可変条件として、ノズル径は0.02~0.1 mm $\phi$ , ノズルターゲット間距離は、ごく接近した0.2 mmのものから実機相当をふくむ35.7 mmまで, 注水時間は、180~40000 (sec), 初期リーク率;  $2.2 \times 10^{-4} \sim 3.2 \times 10^{-3}$  (g/sec) である。

以下試験結果を、最初にノズル孔拡大の基礎結果、次にターゲットウェステージ結果の順に示す。

## 1.一定条件

a)ナトリウム温度 ( $T_N$ )	; 約480 (°C)
b)ナトリウム液深 ( $L_N$ )	; 約871 (mm)
c)ナトリウム流速 ( $V_N$ )	; 約0.08 (m/sec)
d)ターゲット管材質	; 2-1/4Cr-1Mo鋼
e)ターゲット管径, 肉厚	; 26.5 <sup>0D</sup> × 3.2t (mm)
f)ノズル材質	; SUS304
g)蒸気温度 ( $T_s$ )	; 480 (°C)

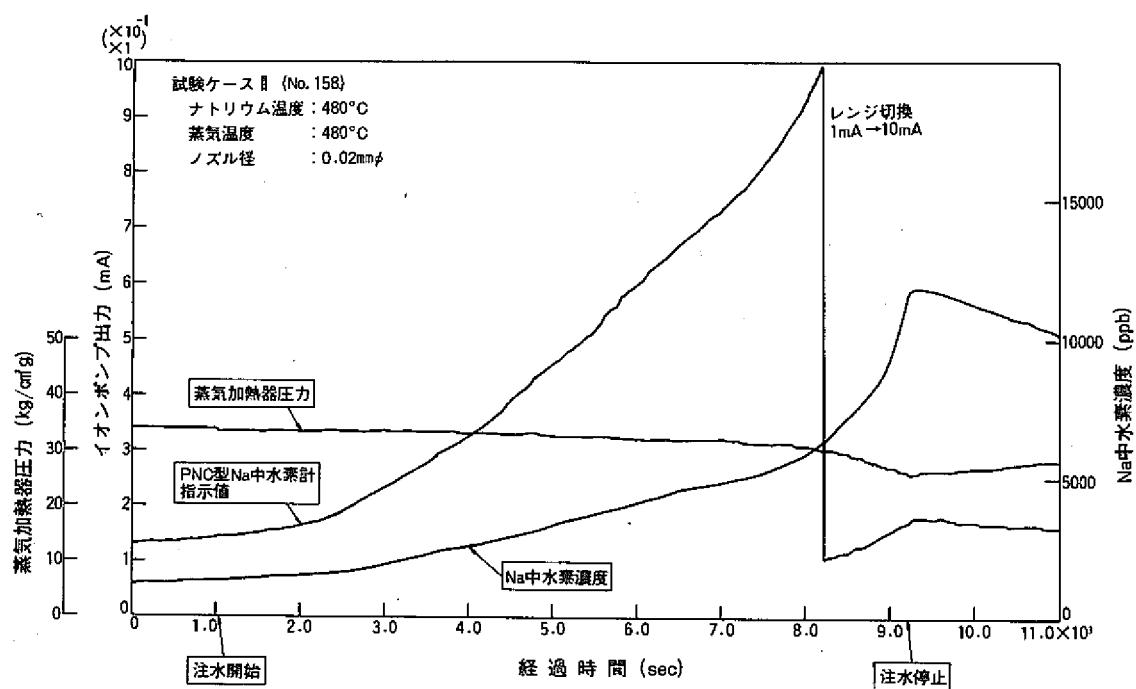
## 2.可変条件

a)ノズル径( $D$ )	; 0.02, 0.03, 0.05, 0.1 (mm $\phi$ )
b)ノズルターゲット間距離( $L$ )	; 0.2~35.7 (mm)
c) $L/D$	; 4~357
d)蒸気圧力 ( $P_s$ )	; 98~22.8 (kg/cm <sup>2</sup> g)
e)注水時間( $t$ )	; 180~40000 (sec)
f)初期リーク率 ( $W_0$ )	; $2.2 \times 10^{-4} \sim 3.2 \times 10^{-3}$ (g/sec)

## (5) 試験時の検出計応答

下図は、微小リーク試験時のPNC型水素計イオンポンプの指示と蒸気加熱器内圧力指示の変化記録を示したものである。

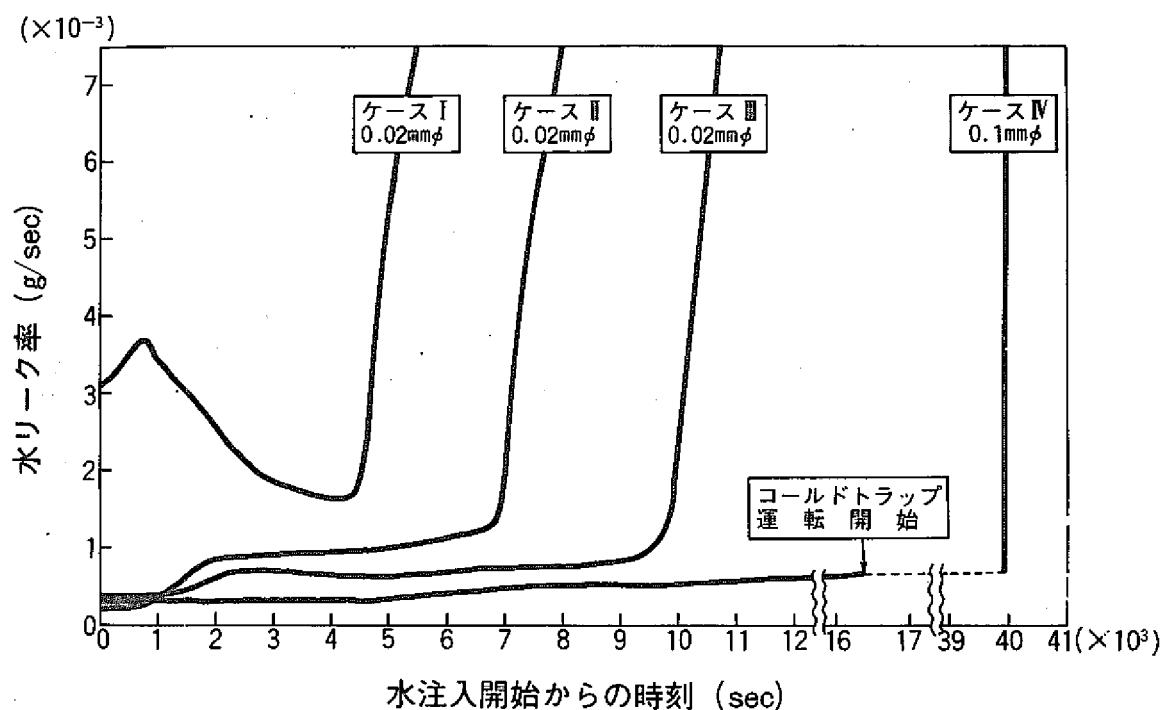
本試験の条件は、ナトリウム温度  $480^{\circ}\text{C}$ 、蒸気温度  $480^{\circ}\text{C}$ 、使用したノズルの径は  $20\mu$  である。図の縦軸はPNC型Na中水素計1号機のイオンポンプ出力値と蒸気加熱器圧力を示しており、横軸は試験経過時刻を示している。又図中Na中水素濃度を示す実線はPNC型Na中水素計1号機の出力値から較正曲線を用いて算出したNa中水素濃度値を示している。水素濃度は注水開始より徐々に増加していく様子を示し、注水後約7000 sec（約2時間）経過した付近より水素濃度の上昇割合がだいに増加していることを示している。又それとともに蒸気加熱器圧力の下降割合も増加していることを示している。すなわちこの付近からノズル孔拡大による水リーク率の増加が始まったことを示している。



## (6) リーク率変化

下図は、ほぼ定量的によく把握された試験ケース4つについて、その時のリーク率の変化の様子を示したものである。横軸は注水開始からの時刻を示し、縦軸は注水率を示している。注水率はNa中水素濃度から水1モルに対し水素1モルが発生するとし、又Na中への水素溶解割合を1とした場合に500secごとの濃度勾配を遂次計算して出したものである。各ケースともNa温度、蒸気温度とも480°Cの場合である。ケースI, II, IIIはノズル径20μの場合であり、初期の蒸気圧力は、それぞれ42, 32, 85kg/cm<sup>2</sup>である。ケースIは、初期リーク率がほぼ蒸気圧力にみあう値を示し、しばらくしてセルフプラグぎみになりその後急にノズル孔拡大によるリーク率の上昇を示している。ケースII, IIIは注水開始からセルフプラグぎみでありノズル孔拡大までケースIよりも時間がかかっている。ケースIVはノズル径が0.1mmφの場合であり、初期蒸気圧力は他のケースより高く90kg/cm<sup>2</sup>の場合であります。蒸気圧力とノズル径からして初期リーク率はかなり低い結果となっているが、特にこのケースの場合注水系に10μフィルターを配置していなかったため注水系のスケールがノズル孔につまることに起因してリーク率が低かったと思われ、またリーク孔拡大までかなりの時間を要したものと考えられる。

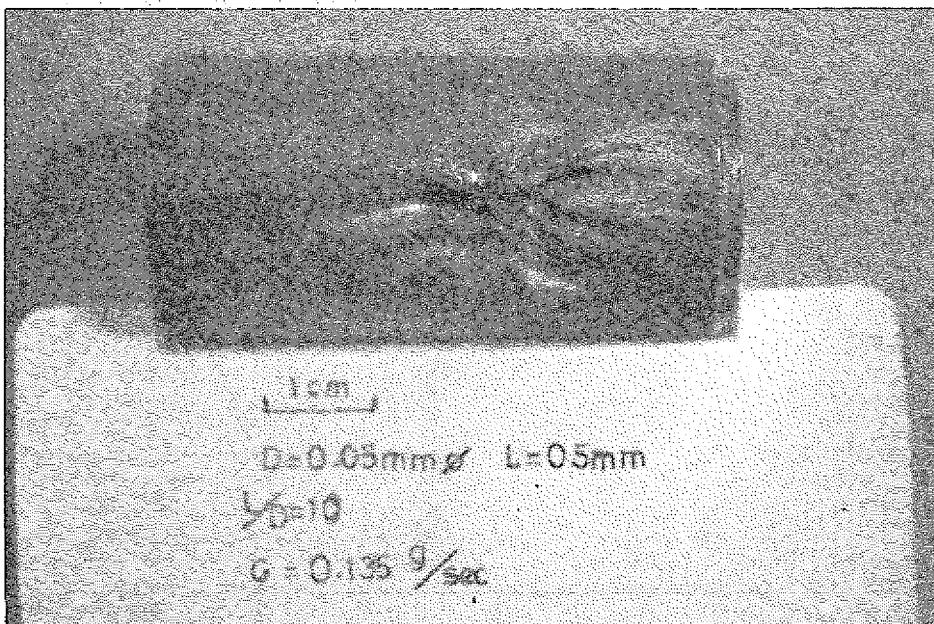
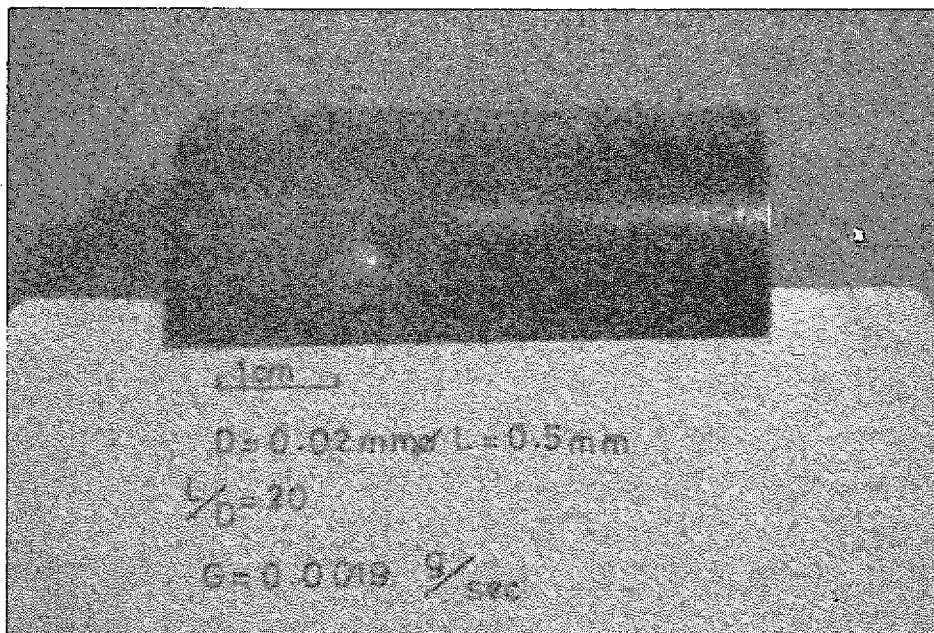
本試験ではケースIVを除けば初期リーク率が10<sup>-3</sup>~10<sup>-4</sup>でリーク孔拡大時間は、数時間程度であることを示し、以前行なったリーク率0.038g/sec以上の小リーク試験結果の想定値よりノズル深さが浅いことにより早い結果となっている。



## (7) ウエステージ形状

下に示す写真は、ノズルターゲット間距離率Lが0.7 mm, ノズル径 $0.02\text{ mm}\phi$ , リーク率が $1.9 \times 10^{-3}\text{ g/sec}$ の時と, L=0.5 mm, D=0.05 mm $\phi$ の時のウェステージの様子を示します。このように鋭い孔状のものや、又花ビラ状にウェステージされるものが観測されました。又L/Dが150~200以上ではノズル孔拡大が生じない範囲でウェステージは観測されませんでした。

次にこれらのウェステージ結果について定量的に評価をしてみることにします。

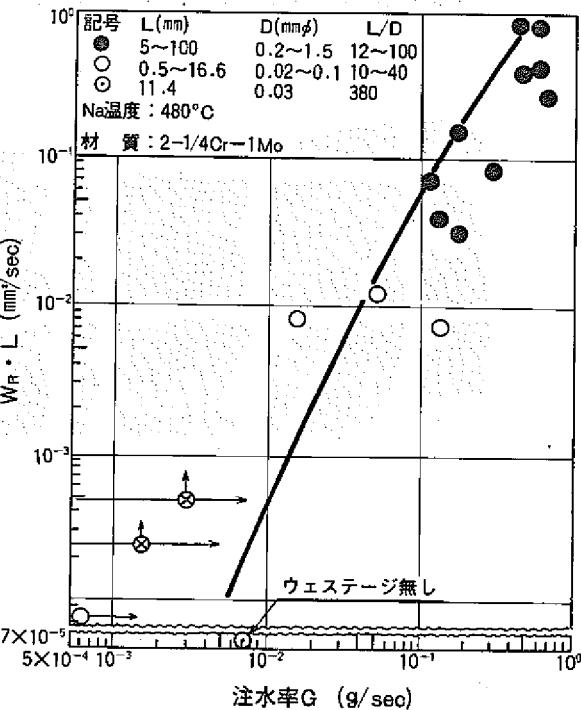
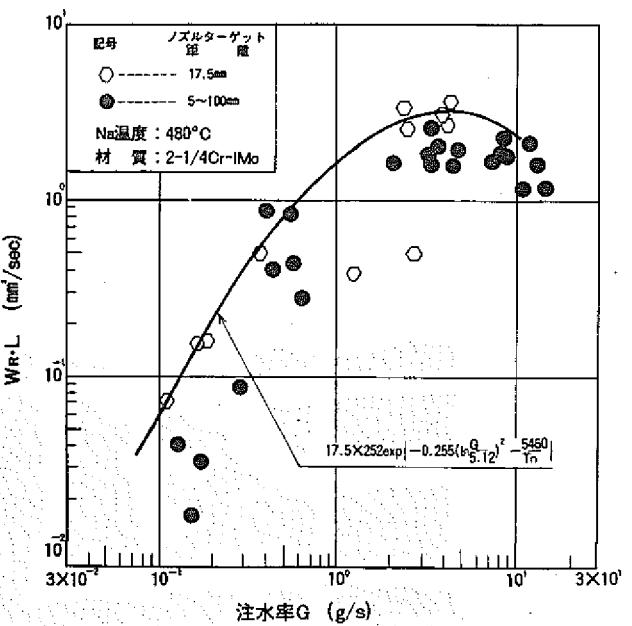


## (8) ウェステージ率

右上部の図は以前報告した小リーク試験

結果である。縦軸はウェステージ率とノズル・ターゲット間距離の積を示し、横軸はリーク率を示す。図中の実線はノズル・ターゲット間距離の効果を考慮したウェステージ整理式である。

右下部図は右上部図の内低リーク率領域を拡張したものである。図の○印は小リーク試験データであり○印、⊗印、◎印は今回の試験結果であります。データの内←○→は試験中ノズル孔が拡大したものであり、⊗印はウェステージが貫通穴となったものである。◎はL/Dが380の時のデータであり、ウェステージが観測されなかったものである。このデータを除くと、ほぼデータはノズル・ターゲット間距離を考慮した式(実線)付近に小リーク試験結果と同じばらつきである。



### (9) まとめ

以上微小リーク基礎試験結果から下表のまとめに記すように以下のことことが判明した。

#### ① ノズル孔拡大について

- リーグ率  $10^{-3} \sim 10^{-4}$  g/sec のノズル孔拡大時間は 0.038 g/sec 以上で行なった小リーク試験結果の想定値より早く数時間であった。又セルフプラグぎみになることも認められた。

#### ② ターゲットウェステージについて

- $L/D \geq 150 \sim 200$  の実機伝熱管距離範囲では、ウェステージが観測されなかった。
- $L/D \approx 10 \sim 40$  の極接近した所ではウェステージ形状に鋭い孔状のものや、花ビラ状のものが観測された。

又、リーグ率とウェステージ率の関係は小リーク試験で得た距離の効果を考慮したウェステージ曲線上にあった。

今後ノズル深さが深いものや、 $2\frac{1}{2}$ Cr-1Mo材のノズルを用いた微小リーク領域でのウェステージ関係試験を実施していく予定である。

## ま　と　め

### (I) ノズル孔拡大について

- ノズル拡大時間； 想定値より早く数時間  
ノズル深さに影響

- セルフプラグ； プラグぎみ

### (II) ターゲット・ウェステージについて

- $L/D \geq 150 \sim 200$  ; ウェステージ無し

- $L/D \approx 10 \sim 40$  ; 鋭い孔状  
花ビラ状

- リーグ率とウェステージ率；  
ウェステージ率曲線上  
にあり

## 付録：原子力学会前刷抜粹

本項には、本書で記載した各章に対応する原子力学会発表前刷を学会前刷集より転載し参考とする。

- 付録-I : 日本原子力学会 50 年分科会前刷集 D-40 抜粹
- 付録-II : 日本原子力学会 50 年分科会前刷集 D-42 抜粹
- 付録-III : 日本原子力学会 51 年分科会前刷集 C-46 抜粹
- 付録-IV : 日本原子力学会 51 年分科会前刷集 C-47 抜粹
- 付録-V : 日本原子力学会 52 年分科会前刷集 E-22 抜粹
- 付録-VI : 日本原子力学会 52 年分科会前刷集 E-23 抜粹

## 付 錄 I

ハリ-ク・ナトリウム-水反応試験(第15報)  
リ-ク孔拡大に関する考察

動 燃 ° 鎌ヶ江直道、池本一郎 橋口功

## 1. 緒言

ハリ-ク・Na-水反応によるターゲット材のウェステージに関しては、実機SG設計へ反映可能な多くの実験データの集積が行なわれて来た。しかしリ-ク発生孔自体が拡大する現象(Self-Wastage といふ)についてはその観察結果がわずかに報告されているにすぎない。本報告はオ12報に示した15WAT-Z用ノズル部の金属学的検査から得られた結果を基としてステンレス材(SUS 304)の孔拡大に対する定量評価を行ったものである。

## 2. 観察結果およびモデル化・評価

ノズル部断面の顕微鏡観察によれば、孔拡大は必ずMa側からはじめており、何らかの原因で孔内に進入したNaと水の反応で発生した高温のNaOHによる腐食が主原因で、ノズル深さの途中まで進行したものと、全深さまで到達したものがあること等が判った。これ等の観察結果を基に図-1のように孔拡大現象の進展をモデル化することを試み、拡大部の径および深さについて測定し、実験条件である注水率、時間等との関係を評価した。

孔拡大により失われた部分の体積を無次元化した値V(1式)と実験による全注水量Q(g)を図示すれば図-2のとおりとなり、両者には(2式)の関係が成立することが判った。

$$V = \frac{L}{L_0} \left( \frac{D^2}{D_0^2} - 1 \right) \quad (1)$$

但し、 $D_0, L_0$ :初期ノズル径深さ、 $D, L$ :測定された拡大部の径、深さ(図-1参照)

$$V = Q^3 \times 10^{-6} \quad (2)$$

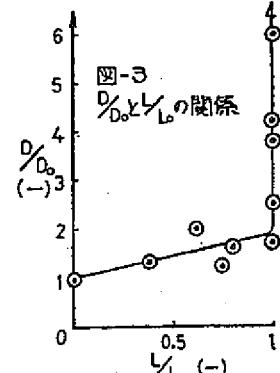
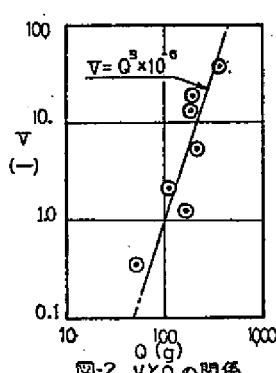
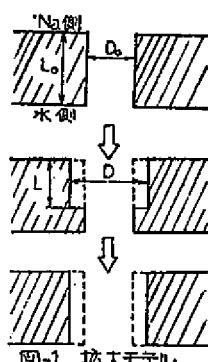
一方、孔拡大により、初期の注水率が急激に増大する点は  $\frac{L}{L_0} = 1$  となつた時点(1次拡大完了点と呼ぶ)であるが、 $D/D_0$  と  $\frac{L}{L_0}$  には図-3に示す関係が見出された。すなわち1次拡大完了時には  $D/D_0 \approx 2$  が成立する。この事と(2)式により、孔拡大による注水率増大までの時間At(sec)は(3)式で示される。

$$At \approx 150 G^{-1} \quad (\text{但し } G: \text{注水率} (\text{kg/sec})) \quad (3)$$

3. 結論 孔拡大現象では、拡大部体積は全注水量の3乗(2式)に比例し、注水率増大の時間は注水率の逆数に比例(1式)する事が判った。この結果は、Greeneの実験結果とも比較的良いい一致を見た。

① 4年 対応分析 D-22

② IAEA Beusberg Meeting Report (1974)



## 付 錄 II

小リーコナトリウム水反応試験研究(第13報)  
ウェステージに対する距離の効果

動燃 鐘江直道, 池本一郎, 橋口功, 大内義弘, 井上設生

1. 緒言、動燃ではこれまでに、リーコ孔とターゲット管距離を原型炉蒸気発生器のコイル部寸法から、 $17.5\text{ mm}$  と一定とし、Na温度( $280^{\circ}\text{C} \sim 530^{\circ}\text{C}$ )、リーコ率(約 $0.04\%$ ~ $10\%$ )、ターゲット材質( $2\frac{1}{2}\text{Cr}-1\text{Mo}$ , SUS304)等のパラメーターを変化させ、ウェステージ率を測定してきた。今回、異なった伝熱管間隔やダウンカマーパーに対するデータを得るために、ウェステージに対する距離の効果を調べた。実験はSWAT-2装置で、図-1に示すテスト部を用い、リーコ率を2段階に変化させ、距離を変えたウェステージの測定を行った。

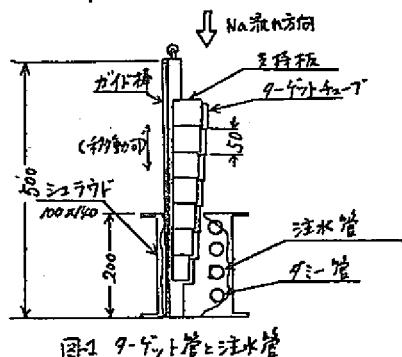
2. 試験条件、ターゲット材質： $2\frac{1}{2}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 鋼、Na温度： $480^{\circ}\text{C}$ 、流速： $0.24\text{ m/s}$ 、蒸気条件は $480^{\circ}\text{C}$ 、 $130\sim163\text{ atm}$ ( $0.34\text{ MPa}$ )、 $25\sim60\text{ atm}$ ( $0.54\text{ MPa}$ )とし、リーコ率及びノズルとターゲット管距離は表1の通りとした。

3. 試験結果、試験結果を表1に示す。本試験結果では、すべてのターゲット管にウェステージが観察され、ターゲットの距離が長くなるとウェステージ率は低くなり、基準距離の $17.5\text{ mm}$ のウェステージ率に対する、 $35\text{ mm}$ ではウェステージ率は一桁小さく $10\%$ 事わからず。さらに、この結果をもとに整理した結果を図2に示す。最大ウェステージ率は $\gamma/\gamma = 25\sim40$ 附近に観察され、ソ連のKУЛБИЧ<sup>2)</sup>、GEのGreen<sup>3)</sup>等の結果と良い一致を示した。

表1 ウェステージ率測定値( $10^3\text{ mm/s}$ )

D	6.0	5	12	16.5	17.5	20	25	30	35
0.3°(0.3~0.6%)	5.51	7.38		1.73~9.87	4.12~1.60	1.93	0.25		
0.5°(3~5%)			12.3	12.4	1.9~2.9	9.08~6.56			

( )内はリーコ率の範囲を示す。  
※  $18.5\text{ mm}$ の値は標準距離の実験式より求めた。\*



1.) M. Hori et al IAEA Bensberg Meeting Report ('74) 2.) B. B. Kулбич et al IAEA Bensberg Meeting ('74)

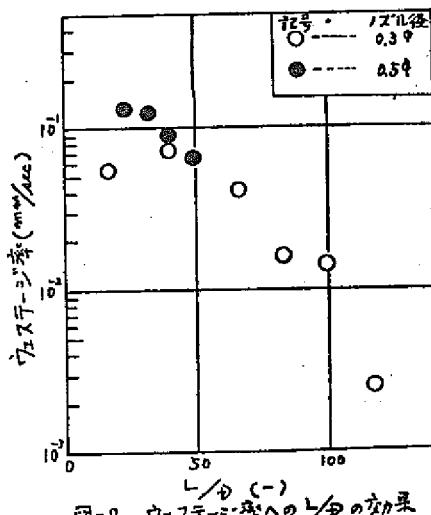


図-2 ウェステージ率への距離の効果

3.) D. A. Greene IAEA Bensberg Meeting ('74)

## 付 錄 III

小リード・ナトリウム-水反応試験研究(第16報)  
— ウエステージに対する距離の効果(第12) —

動燃 鎌ヶ江直道 橋口 功(現社長) 地本一郎 大後英道  
大内義弘 井上謙生 堀雅之

1. 緒言 動燃 SWAT-2 装置による首題関係試験結果の一部については、本第13報にくわへて発表したが、本報告はその後得られた結果を含め(全31回)、ノズル-ターゲット間距離( $L$ )およびノズル径( $D$ )等のウエステージ率、ウエステージ形状における効果に関する検討結果である。

2. 試験条件 一定とした条件は、Na温度:約480°C, Na液深:約780mm, 注水流速:約0.24m/sec, ターゲット管材質:2.5%Cr-1Mo材(JIS STB A24相当材), ターゲット形状:26.5° × 3.2"であり、注水は全て蒸気(温度362~510°C, 壓力21~174atg)を行った。その他の条件は表-1に示した範囲となりである。

3. 結果と検討 図-1は得られたウエステージ率 $WR$ (m/sec)と $L/D$ との関係を示すもので、ウエステージ発生部観察結果と合わせ評価すると (1)  $L/D < 20 \sim 30$  には最大ウエステージが生ずる。(2)  $L/D > 20 \sim 30$  ではウエステージ部形状はピット型となる。また、これより得られた結果である注水率半の効果<sup>2)</sup>で正規化した本領域内ウエステージ率値 $\omega$ を立て軸に、距離 $L$ を横軸にヒリ示すと図-2のようになり注水率、温度が一定の場合 $WR$ は $\omega$ に比例して減少することが判った。

(3)  $L/D < 20 \sim 30$  ではウエステージ形状はトロイダル型となり、ウエステージ率は減少する傾向がある。また (4)  $L/D \geq 150$  の領域ではウエステージは観測されなかつた。

一方、 $L/D \geq 20 \sim 30$  の領域で、ウエステージ部断面の形状は(1)成のように正規分布曲線を表わされ、分布常数 $b$ (mm)は本試験結果から(2)成のように表わされることが判った。

$$l = l_0 \exp(-r^2/b) \quad (1)$$

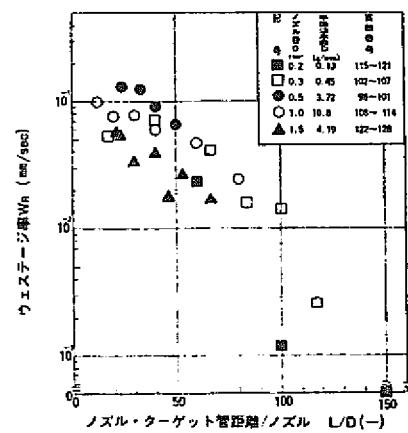
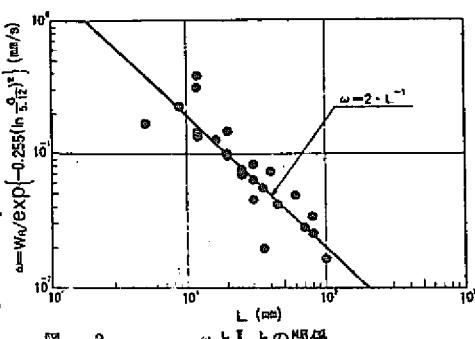
$$b = 1/5 \cdot L/D \cdot G \quad (2)$$

ここで、 $r$ は深さ $l$ の外での半径、 $l_0$ は最大深さである。

1) 50年炉工分科会 (1) D-40 (2) H. Nei et al., ANS Topical Meeting on Fast Reactor Safety Report (1974)

表-1. 同一ノズル径による試験条件一覧

試験番号	D (mm)	L (mm)	L/D (-)	G (g/sec)	平均注水率 $\bar{G}$ (g/sec)
98-101	0.5	12~25	24~50	3.3~4.5	3.72
102~107	0.3	5~35	16.7~117	0.28~0.55	0.45
108~114	1.0	12~80	12~80	8.41~13.8	10.8
115~121	0.2	12~60	60~400	0.073~0.19	0.13
122~128	1.5	32~100	21.3~66.7	1.15~8.58	4.19

図-1 ウエステージ率 $WR$ と $L/D$ の関係図-2  $\omega$ と $L$ との関係

## 付 錄 IV

ナリーケ・アトリウム-水反応試験研究(第1ク報)  
—ウェステージ率、整理式の検討—

動燃 池本一郎、鐘ヶ江直道、坂雅夫

1. 緒言 LMFBR蒸気発生器の設計検討において、ウェステージ率に関する整理式の作成は重要な課題であり、種々の実験パラメータを含む整理式がいくつか発表されている。本報告では、ウェステージデータ整理コード「SWAC-8」を用いてさらに広範囲のデータを対象にして行なったウェステージ率整理式の検討結果について述べる。

2. 「SWAC-8」の概要 「SWAC-8」に現在収録されているウェステージデータは、全世界のNa-水反応実験装置で得られた約400のデータ(動燃: 182, APDA: 79, GE: 50, 仏: 24, 独: 33, ソ連: 40)である。本コードによる主なデータ整理機能は以下のようなものである。

- (1) 任意に与えられた実験パラメータの範囲に適合するデータのみを取捨選択できる。
- (2) 重んだデータを任意のパラメータ、あるいはパラメータを組合せた関数による計算値を軸にし、2次元あるいは3次元的にプロットすることができる。
- (3) プロットした結果に対して、最小二乗法による近似式の作成ができる。

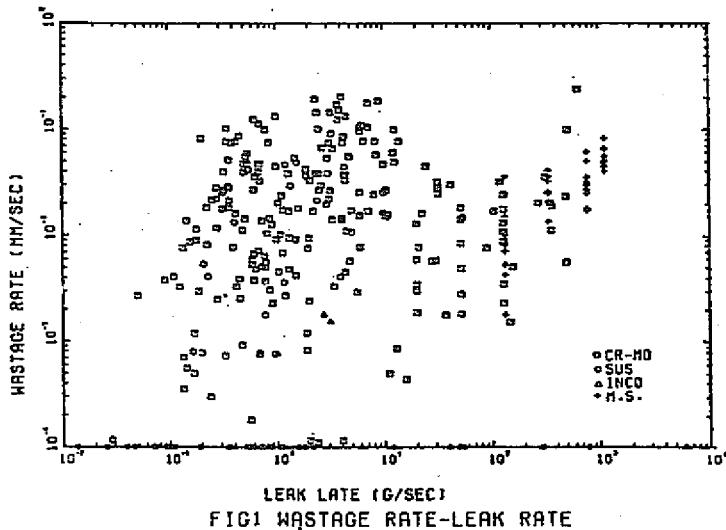
3. ウェステージデータの整理 「SWAC-8」に収録されている全データのウェステージ率と注水率の関係を示したもののが図1である。また動燃ではSWAT-2装置におけるウェステージ実験によって、Na温度、注水率、材料および距離の影響を調べ、ウェステージ整理式を作成して来た。これらの結果を基に、「SWAC-8」により上記全データの最小二乗法による整理を行ない、2.4Cr-1Mo材に対しては(1)式を得た。

$$WR = 2 \times 10^3 \cdot L^{-1} \cdot \exp \left\{ -0.10 \left( \ln \frac{G}{24} \right)^2 - 5500/T \right\} \quad (1)$$

ただし、単位および適用範囲は、WR(ウェステージ率, %/sec), L(1ズーム-タゲット間距離, mm) = 5 ~ 100, G(注水率, g/sec) = 0.09 ~ 363, T(Na温度, °K) = 583 ~ 800, である。

今後内外のデータ数を増やすと同時に、個々のデータの信頼性を上げ、整理式の精度をさらに向上させる予定である。

- (1) H. Nei et.al., ANS Topical Mtg. Fast Reactor Safety (1974)
- (2) K. Eng et.al., Trans. ANS vol. 19 (1974) (3) 47年炉工分科会 C-28, (4) 48年炉工分科会 C-17, (5) 50年炉工分科会 D-40, (6) 51年炉工分科会 本第16報



## 付 錄 V

### ナトリウム-水反応による SG 伝熱管ウェステージの金属検査 —小リーク・ナトリウム-水反応試験研究 第22報—

MAP I ○橋本達也, 中島宣雄, 西沢千父  
動燃 堀雅夫, 鎌ヶ江直道, 錦見正和

1 目的 動燃では、SWATプロジェクトの一環として、ナトリウム-水反応によつてSG伝熱管に生ずるウェステージ現象を総合的に把握することに務めている。(1),(2) 本報では小リーク( $0.039\sim17.2\text{ g/sec}$ )および中リーク( $14.4\sim15.5\times10^3\text{ g/sec}$ )試験で観察されたウェステージに関し、その現象の機構を捕える為、ウェステージを生じた SG 伝熱管に金属学的検査を実施し、小リークおよび中リーク試験結果を比較検討した。

2 実験方法 実験方法は、ウェステージ部の外観検査、SEMによるウェステージ部表面の連続観察およびSEM観察と対応した位置の配管断面の光頭観察とし、ウェステージ形態の直観的变化および組織変化を調べた。尚、硬度測定を実施して、変態の種類を推定し、光頭観察との対応を調べた。

3 結果 ナトリウム-水反応によりウェステージを生じた  $21/40r-1M_0$  鋼に金属学的検査を実施した結果、以下の点が明らかとなつた。

1) 一般に、小リーク試験の場合、異つた L/D(ノズル・ターゲット間距離/ノズル径)に対し、巨視的なウェステージ形態はピット型、トロイダル型等<sup>(3)</sup>の形態をとるが、微視的な形態を調べた結果、ウェステージ最深部ではエロージョン作用の大きい侵食が、ウェステージ領域周辺では、コロージョン作用の大きい侵食が認められた。この結果を中リーク試験と比較すると、中リーク試験のウェステージ形態は、小リーク試験の L/D が 20~30 の試片に生ずるウェステージに対応していた。また、中リーク試験では、ノズルに近接したターゲットに、エロージョンとコロージョンが同時に作用した侵食を、ノズルから離れたターゲットにコロージョン作用の大きい侵食を生じていた。

2) 通常、ウェステージを受けている間、 $21/40r-1M_0$  鋼はナトリウム水反応による反応熱により  $\Delta T_{\text{g}}$  点以上に昇温し、その後急冷され変態を生ずるが、本試験片には小リークおよび中リーク試験共にペーナイト変態が認められた。また、硬度測定結果から推測すると一部にマルテンサイト変態も生じている様であつた。しかしながら、変態は統一的試片に認められるものではなく、小リーク試験に於いて同一の L/D の試片であつても変態を生じない場合があり、この傾向はリーク率の低い試験条件の試片に認められた。

### 参考文献

- (1) 根井, 他, 原子力学会 昭和48年分科会 C-17
- (2) 鎌ヶ江, 他, 原子力学会 昭和50年分科会 D-40
- (3) 鎌ヶ江, 他, 原子力学会 昭和51年年会 C-46

## 付 錄 VI

微小リークにおけるノズルおよびターゲットのウェステージ現象  
—小リーク・ナトリウム-水反応試験研究 第23報—

動 慶 大後美道、池本一郎、井上設生、鎌ヶ江直道

1. 概要. 動燃ではこれまで SWAT-2 装置によりリーク率  $0.038\%/\text{sec}$  以上の小リーク領域を主体としたウェステージ関係試験を実施し、評価をあたえて来たが、その後更に低リーク率におけるウェステージ関係試験を実施している。ここでは、リーク率が  $10^{-3} \sim 10^{-4}\%/\text{sec}$  の微小リーク領域で基礎試験を実施したものと、その時のノズル孔拡大現象およびターゲットウェステージ現象について報告する。

2. 装置. 微小リーク試験装置は、これまでの SWAT-2 装置を改良したものと、ノズル 6 個を設えている。またターゲットは上下に移動できるようになり、各ノズルに対応し最大 10 個まで設置できる。従ってノズルヒターゲットの組合せが数多く取れるようになっている。試験に使用したノズルの材質は SUS304 であり、ノズル径は  $0.1\text{mm} \sim 0.02\text{mm}$  のものを使用した。またターゲットの材質は  $2\frac{1}{2}\text{Cr}-1\text{Mo}$  を使用した。

3. ウェステージ現象の観察測定結果. (I) ノズル孔拡大について；図-1 は水注入開始からの水リーク率変化を記録したものである。尚水リーク率は、PNC 型 Na 中水素計による水素濃度上昇率を  $500\text{cc}/\text{min}$  ことに、水素溶解割合を 1 として算出しに値である。図に示すように注水後数時間でノズル孔拡大により水リーク率が急激に上昇してからものが認められる。これらのノズル孔拡大時間はこれまでの SWAT-2 試験報告による小リーク領域での値から想定してかなり早いものである。この原因は使用したノズルの深さが浅い ( $0.02\text{mm}$  /ノズルで深さ  $0.3\text{mm}$ ) ためで、以前の報告で指摘したようにノズル深さがノズル孔拡大時間に対する重要なパラメータであると考えられる。(II) ターゲットウェステージについて；実験 SG に近いノズル・ターゲット間距離  $L = 25 \sim 30\text{mm}$  ( $\gamma_0 = 150 \sim 200$ ) では、これまでの報告どおりウェステージは生じなかった。一方  $L/D = 30$  附近の、ノズルターゲット間距離が数 mm 以内に接近している場合、キリ穴を開けたような鋭い孔状のものや、水ジェットの壁流による効果と考えられるような、ターゲット上の広い範囲にウェステージが現われているものがあつた。このようにノズル・ターゲット間距離を極端に近づけると、これまでに観測されたターゲットウェステージを生ずることが観察された。

今後ノズル孔が深いものや、 $2\frac{1}{2}\text{Cr}-1\text{Mo}$  のノズルを用いた微小リーク領域でのウェステージ関係試験を実施していく予定である。

## 参考文献

- (1) 50年炉工分科会 D-42
- (2) 51年炉工分科会 C-46

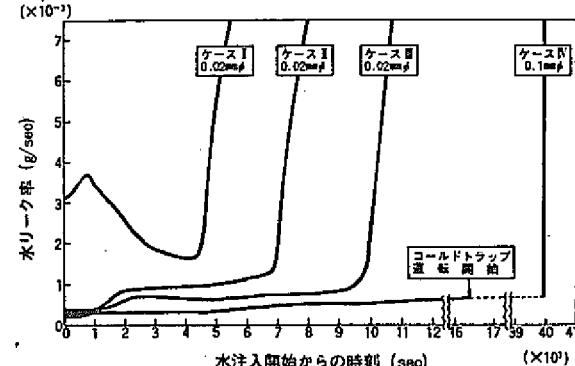


図-1 微小リーク試験時のリーク率変化記録