

表一六 試験数一覧

	IN738	René80	IN738+PtAl	René80+CoCrAlY	Al ₂ O ₃
700℃	3	3	2	3	1
900℃	3	3	3	2	1

6.1.2 試験片材種と化学成分

試験片素材はIN738とRené80の2種類で、それぞれの裸材とともに前者に白金アルミナイドコーティング、後者にPVDによるCoCrAlYコーティングがほどこされた計4種が供試材である。これらの化学成分と熱処理法を表一四、五に示す。

コーティング材について、以後ここでは前者をIP、後者をRCと呼ぶことにする。

金属と反応することなく、付着溶融塩のみを計測し、成分を分析するために不活性試験体として白金またはアルミナを用いることが求められており、ここでは99.5%アルミナを用いた。

これまでに行った試験数を表一六に示す。

7. 試験結果

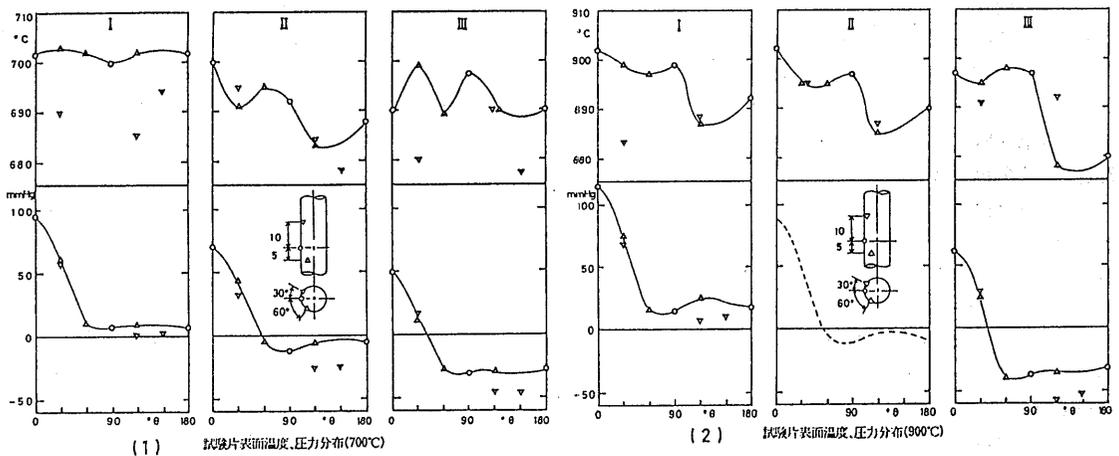
7.1 試験片表面温度分布と圧力分布

試験片取り付け場所3ヶ所での各試験片表面の温度、

圧力を試験温度700℃、900℃について計測した。ここで表面温度は先の予備試験の場合と同様にSUS304ステンレス鋼についてのものであるから、材料の種類によって、一定のガス温度に対するそれぞれの表面温度は異なるはずである。IN738, René80の裸材については熱伝導率はほぼ304鋼に近いので、ほとんど問題ないが、コーティング材についてはその断熱性のためやや表面温度が高くなるものと思われる。しかしながら、熱的物性値が不明なため、ここでは裸材と同じ扱いをした。結果を図一(1)、(2)に示す。

5.3.4で述べたように3ヶ所の取り付け場所について同時あるいは温度、圧力とも同時計測ではないこと、円周方向の各位置は試験片を順次回転させていること等により、温度と圧力のそれぞれの場所での相互関係は必ずしも正確とはいえない。しかしながら温度についてみればその時間的変動幅はせいぜい3-5℃程度とみられる。一方、静圧分布の変動は極めて小さかった。先の予備試験の時より流速が低いこともあって温度、圧力共比較的安定していた。

ここで試験片中心から5mm隔たった点を含めて1本の線で結んでいるが厳密にいえば正確ではない。内径40mmの流路に40mm×10mmφの円柱が流れを遮っているような状態であるから流路断面の直径方向の温



図一九 試験片表面圧力、温度分布

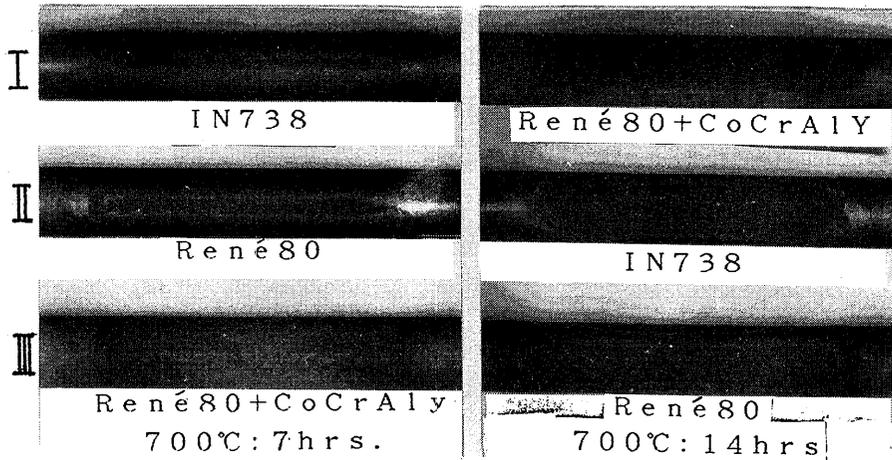


図-10 IN738, René80, René80+CoCrAlYの7,14時間後の前方岐点外観

度分布はかなり複雑であり、予備実験の項で述べたように流路の中心部直径10mmのコアの部分の温度分布（試験片が取り付けられていないとき、図-4）がほぼ平坦であるとしても問題は残る。

700℃、900℃共試験片中心から縦軸方向に±10mm離れたところと中心部との温度差は最大約20℃であるが溶融塩付着状態、損傷について目視の限りでは殆ど差は見られなかった。また、内径40mm全体にわたっては約50℃以上の温度差があると思われるが同様である。図-10はそれぞれ7時間及び14時間曝露後の前方岐点での外観であるが長さ方向に関して差は殆ど見られない。試験片取り付け位置を上流からI、II、IIIで表わしており、写真の右側は7時間曝露後に位置をずらした状態で示している。

7.2 曝露試験

7.2.1 溶融塩付着

それぞれ種類の異なる試験片を3本1組（以下バッチと称する）とし、試験片取り付け位置を1回7時間毎に順次ずらして15回、計105時間曝露させた。7時間毎の重量変化を表-7、図-11(1)から図-12(4)に示す。また、曝露後の表面状態を二、三の材料について写真（図-14～19）にしめす。取り付け場所による付着状態や重量の違いは図や写真から分かるように大きな差の無いことを示しており、予備実験でも示したようにこの方法で特に問題の無いことが分かった。

同じ材料を同じ条件で試験しながら結果に差があることについての最も大きな理由は塩水あるいはナトリ

ウムの供給量の差によるものと考えられた。すなわち図-11(1)と図-12(1)とはASTM代用塩水をそのまま供給し、その量は32ml/7hrs.であった。この量はポンプの制御能力から見て必ずしも正確に送られていない恐れもあると考えられたが、15回の間、特に大きな変動は見られないところを見ると必ずしもそうとはいえない。しかし、流量設定の容易さと誤差を極力少なくするため以降は3倍に希釈して量を多くして供給した。

さらにこれまで3回にわたってドラム缶入りの燃料を購入したためロット毎の差も少なくないと考えられ、ナトリウム含有量の分析を行った。その結果第1回分は3ppm、以下2ppm, 5ppmと判明した。これらの量は試験条件として与えたナトリウム流量4mg/cm²/hに対して5ppmの場合700℃で2.16mg、900℃で2.9mg余分に加わったことになる。

第1回分（3ppm）を用いた試験は図-11(1)、(2)、図-12(1)、(2)及び(3)の前半部分あたりまでであった。その後ナトリウム濃度の影響を確認するために燃料3種を3サイクル（21時間）ずつ使い分けて試験を行った。図-11(4)、700℃の場合第1回-第8回は2ppm、以下9-12は5ppm、13-15は3ppm、図-12(4)、900℃の場合7-9は3ppm、10-12は5ppm、1-6, 13-15は2ppmであるが、いずれもナトリウム濃度の影響があるようには見えない。

バナジウム含有量は各燃料共1ppm以下であった。

この問題に関しては、本プロジェクト終了後同一装

表-7 試験片重量変化

Material	Specimen No.	Batch No.	Test temp. °C	Weight of specimen (mg)	Weight change (mg)														
					Exposure time (hrs.)														
					0	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91	98
IN738	1	I	900	75,400.0	7.3	15.1	15.8	25.7	31.9	29.0	33.4	33.4	36.9	44.6	45.5	48.1	53.1	52.5	47.6
René 80	1	I	900	75,610.0	9.8	13.7	23.1	36.4	37.7	41.3	45.8	46.0	52.6	60.5	61.7	67.1	72.3	71.2	74.9
Al ₃ O ₃	1	I	900	35,262.0	4.8	10.6	15.8	16.0	19.9	19.8	19.4	21.1	26.7	29.9	33.0	36.4	36.5	39.3	39.9
IN738	2	II	700	75,460.5	7.7	28.3	37.3	40.2	39.1	51.2	62.2	77.8	96.2	101.0	116.9	131.2	102.4	73.7	66.8
René 80	2	II	700	75,637.0	7.2	20.1	13.8	26.3	19.4	8.7	1.0	-14.2	-21.0	-45.9	-57.7	-80.7	-126.7	-144.9	-193.8
Al ₃ O ₃	2	II	700	35,254.2	4.1	8.8	12.9	16.8	17.1	21.2	23.3	19.8	23.4	27.7	26.5	30.3	30.3	28.6	34.3
IP	1	III	700	75,093.0	12.2	22.1	34.4	52.4	60.9	70.5	87.0	102.2	117.8	136.1	151.6	163.2	179.8	190.8	198.8
RC	1	III	700	78,321.5	6.6	22.9	39.3	57.3	73.0	83.7	94.1	105.8	119.5	129.3	144.4	160.6	170.4	185.5	202.9
IN738	3	III	700	75,390.2	6.5	19.8	35.0	54.0	60.5	68.0	78.5	92.7	103.0	113.5	121.3	127.1	137.0	156.1	163.1
IP	2	IV	900	76,166.8	6.1	10.1	12.7	15.4	18.1	19.9	22.6	25.9	26.7	29.2	32.2	35.0	36.8	43.5	45.4
RC	2	IV	900	78,841.5	4.0	4.6	7.0	6.7	7.8	9.9	9.0	9.8	13.6	13.0	14.7	20.3	24.1	26.7	32.6
IN738	4	IV	900	75,438.3	3.2	2.5	2.7	-0.3	1.3	2.4	-0.5	2.2	-5.0	2.8	7.9	11.8	14.6	21.4	22.7
IP	3	V	900	76,026.5	6.3	11.0	23.1	34.6	41.9	45.9	47.4	48.9	43.4	45.2	45.8	45.5	48.6	49.9	49.9
RC	3	V	900	78,004.5	4.0	8.0	18.7	28.5	34.9	35.4	41.4	42.3	43.9	43.2	43.8	46.7	48.5	46.6	53.6
René 80	3	V	900	75,464.1	3.6	10.4	20.4	28.9	40.7	42.9	44.5	48.8	48.2	42.3	45.3	46.4	46.3	48.2	48.5
IP	4	VI	700	75,929.5	5.6	11.4	21.5	32.5	37.4	50.5	59.5	67.0	75.5	82.6	85.9	102.0	108.3	117.9	130.5
RC	4	VI	700	78,947.4	2.0	5.1	6.9	10.8	13.8	17.0	20.4	25.3	34.7	40.0	42.6	49.8	55.0	60.4	65.6
René 80	4	VI	700	75,633.6	4.4	9.4	16.4	25.4	-9.3	-3.6	5.1	-33.6	-32.1	-25.3	-54.4	-46.2	-31.3	-71.3	-75.1
IP	5	VI	900	76,004.6	5.3	8.9	13.0	18.1	22.6	26.7	29.9	34.9	38.2	42.4	45.2	48.8	52.2	55.6	63.4
IN738	5	VI	900	75,400.2	4.6	5.3	5.4	9.1	11.1	14.2	14.0	17.8	23.0	26.0	24.4	29.1	28.8	31.6	32.0
René 80	5	VI	900	75,607.5	3.7	7.3	11.2	15.3	22.8	29.8	31.3	36.5	37.9	40.5	40.8	42.7	39.7	37.5	37.1
IN738	6	VII	700	75,432.2	4.4	14.0	24.5	33.4	25.3	37.8	-28.5	-21.8	-10.2	1.1	-22.8	-15.6	1.5	-51.8	-51.4
René 80	6	VII	700	75,613.1	4.0	14.0	25.5	36.9	48.9	-24.1	-19.0	-3.6	-37.6	-33.9	-20.8	-51.2	-56.5	-65.4	-92.7
RC	5	VII	700	78,591.7	2.6	9.3	17.3	24.0	30.5	40.9	51.6	61.6	67.3	78.9	86.1	92.7	103.1	111.3	117.1

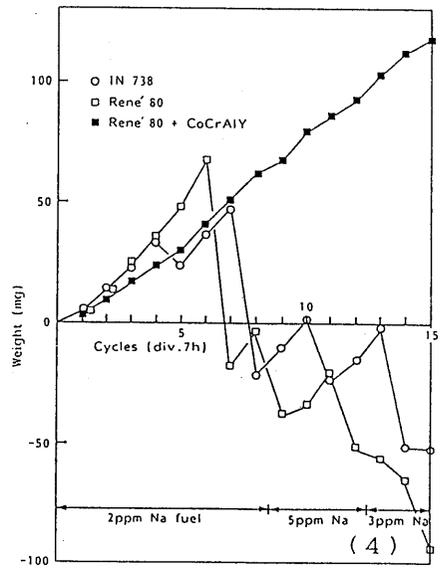
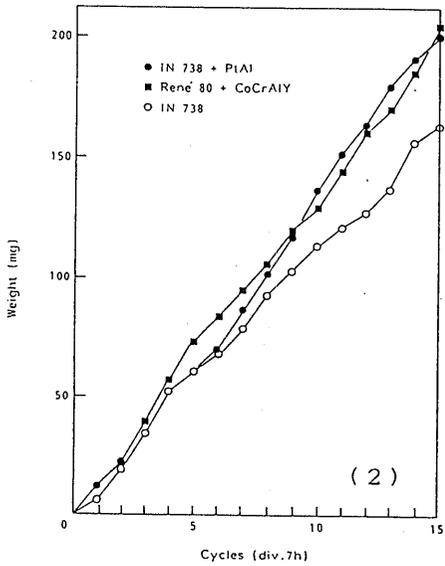
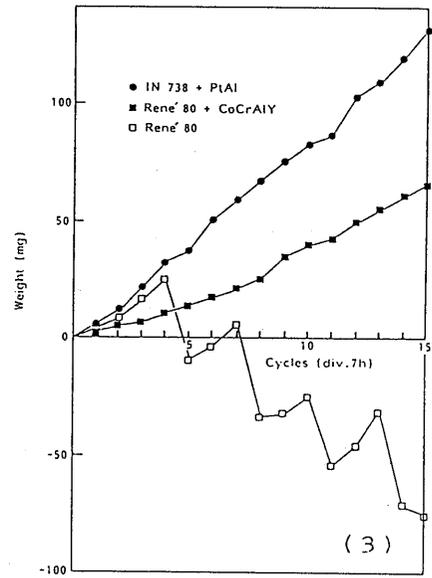
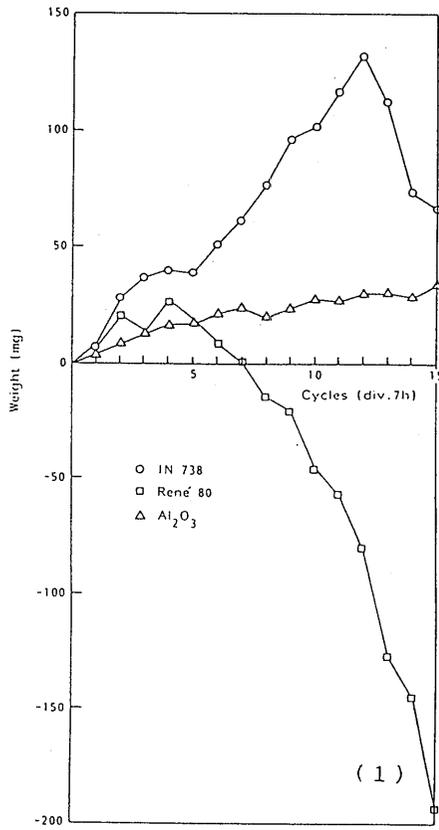


図-11 試験片重量変化 (700°C)

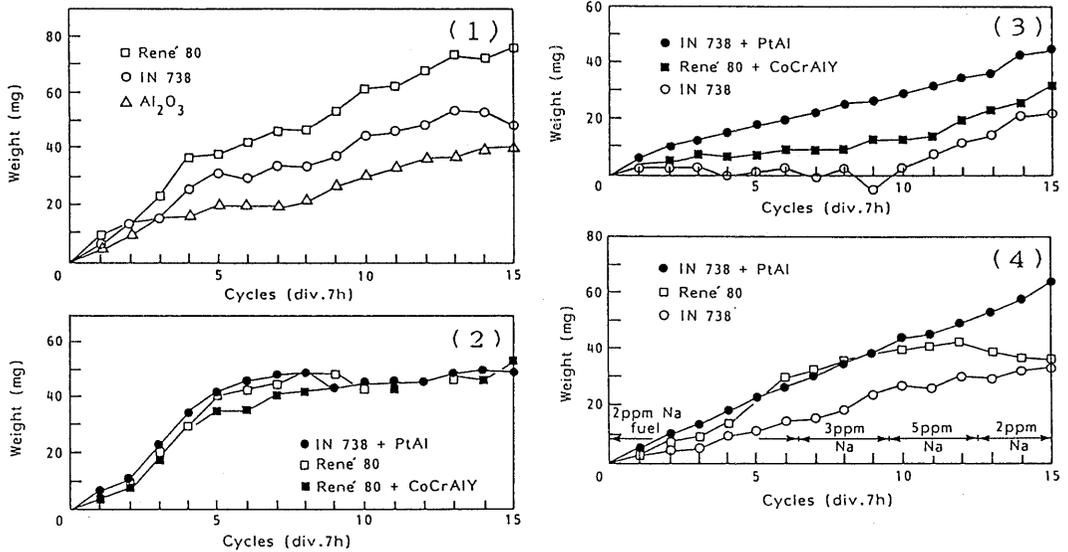


図-12 試験片重量変化 (900°C)

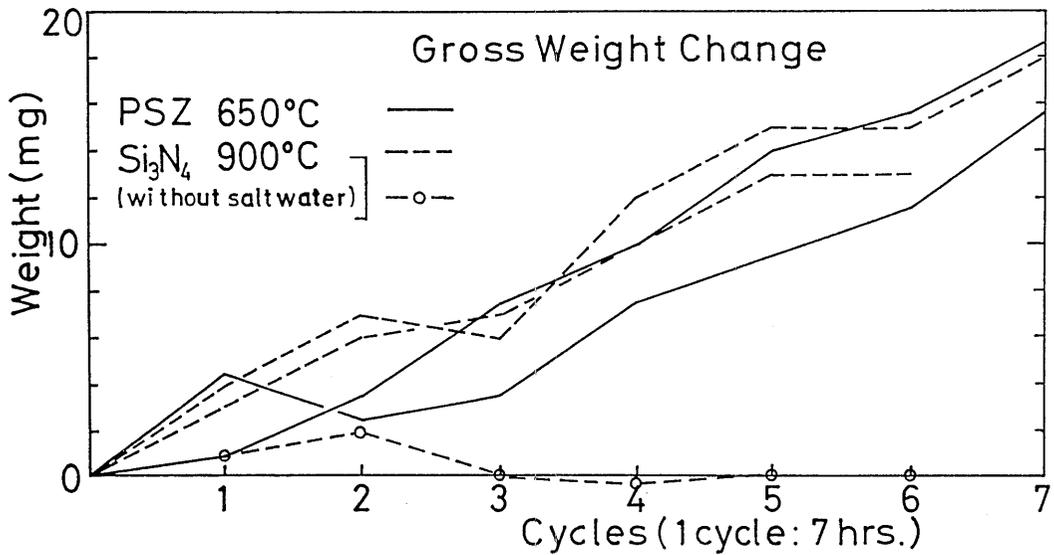


図-13 部分安定化ジルコニア、窒化珪素の融融塩付着

置を用いて同じガス条件すなわち流量 $4\text{mg}/\text{cm}^2/\text{h}$ のナトリウムと硫黄1%含有の燃料を用いて、試験片表面温度が 900°C の燃焼ガスの中で亀裂を有する窒化珪素の引張試験を行い、強度が平滑材と同程度になることを見いだしているが、この中で次のような実験結果

を得た。⁵⁾

部分安定化ジルコニア(PSZ)を 650°C 、常圧焼結窒化珪素を 900°C でそれぞれ1回7時間の曝露を7回繰り返して融融塩付着量を計測したところ図-13のような結果を得た。ここで代用塩水を添加しない場合は全

サイクルを通じて±1 mg程度の付着量しか得られず、殆ど計測誤差の範囲に入っており、燃料中にすでに含まれていた5 mgのナトリウムの影響は熔融塩付着には全く影響を与えていないことが分かった。

また、G. J. Santaro等⁶⁾の高速バーナーリグを用いた実験に次のようなものがある。ナトリウム量を一定にして Na_2SO_4 , NaCl , NaNO_3 , 代用塩水をそれぞれ燃焼ガスに添加したとき一定温度に保ったコレクタにそれぞれどれほどの Na_2SO_4 が付着するかを種々の温度について調べ、添加する各化合物によって付着量が異なることを示している。

以上の例から見て本試験において燃料中に含まれているナトリウムは熔融塩付着に殆ど影響を与えていないと考えられる。

それぞれ異なる材料3本を一組として曝露したなかで、同種の材料でありながらパッチが異なる時付着量に差を生ずることについての理由として最も大きなものとして、上記のナトリウム量以外に燃焼状態悪化に伴う噴射弁近くの内壁に付着したカーボンの剥離によるエロージョンが考えられる。すなわち運転中カーボンの堆積と剥離がある時期周期的に起こっているのが観測されたこともある。これは常時発生しているものではなく、噴霧空気と燃料の温度が低いとき噴射弁ノズルや空気旋回羽根に塩分等の固形物が付着し、これによる気流の乱れが燃料の均一な霧化を妨げ、燃焼状態を悪くしていたものと考えられる。

また、予備実験の段階で分かったことであるが、アルミナ・セメントでできた燃焼器内壁表面の一部が剥離して、流路の一部に大きなものは1mm立方程度の粒子が見いだされたこともあった。このため本実験を開始するまえに内壁を補修したがそれでも微粒子剥離が皆無ということにはならなようであった。

ここで次のような実験事実もある。すなわちA, B 2種の材料を同時に曝露するときパッチが異なる場合、A, B相互の熔融塩付着状態に差があるということである。

図-11の(2)と(3)、図-12の(2)と(3)は共にIP, RCを含む異なるパッチでの結果を示したものであるが(2)は両材料共ほぼ同じ付着量を示しているのに対し(3)ではRCはIPの1/2にしかなっていない。図-11(1)、(4)、図-12(1)、(4)の関係も同様である。本来ならパッチが異なっても当該材料の相対的な関係は変わらないはずであるが図に見られるようにその差はかなり大きい。1パッチ15回のサイクルの中

で仮に多少の運転上の、また、それによるガス状態の変動があったとしても、それは全体の傾向を大きく変えるものとは思えない。付着量に最も大きな影響を与えるものは供試材1本1本の持っている特性か、あるいは或きっかけで初期のうちに持ち込まれた表面状態がその後の性質を決定するようになったのではないかと考えられる。

前述のように3本一組として1サイクル、7時間毎に位置をずらし(15回の間に5回ずつ同じ場所にある)ているので取り付け場所による差は考えられない。コーティング材であればコーティング厚さの影響も考えられ、個々について皮膜の厚さに差もあったが付着量との間に明確な相関関係は認められなかった。

IN738, René80のような裸材であれば表面状態は全く変わらないはずであるから以上のようなことが何故生ずるのか今のところ分からない。

熔融塩付着に関しては別に興味深い以下のような現象が見いだされた。

図-14, 15(写真)に示すようにアルミナとRCの700℃の試験において試験片の上下端の流れの剥離域付近でそれぞれ左右一対の熔融塩の点状の付着が見られたことである。この点状付着物はパッチによって生じ初めの時間、回数に差があるもののアルミナとRCの700℃に限って見られるものであった。

点状付着物は時間経過に伴ってそれ自体成長することは無く、周囲に流れるように拡散している。後に述べるようにこのような付着が損傷に対して直接影響を与えているかどうかについて、今回の試験では一部明らかになったところもあるが、不明な点もあった。いずれにしても長時間の運転によって熔融塩付着が広範囲に及ぶと云うのは望ましいことではない。また、図-16に見られるように流れ出た熔融塩が表面に拡散してゆくとき、試験片取り付け場所が変わって流れ場の状況が変化しているにもかかわらず一旦付けられた道筋をたどりつづけるということである。これはガラス面を伝わる雨滴の流れに似ており、表面状態が何らかの影響をあたえているものと考えられる。とくに上流に位置する試験片の後流の影響を少なからず受けると思われるにもかかわらず表面上の特定の位置に熔融塩が流れ続けるということは表面力がガスの流体力より卓越していることを示している。すなわち、このように特定の材料のみにみられるというのは試験片表面の表面張力あるいは熔融塩との界面張力の影響によるものと考えられる。

Material: Al₂O₃ # 2 Test temp.: 700 °C Batch No. II

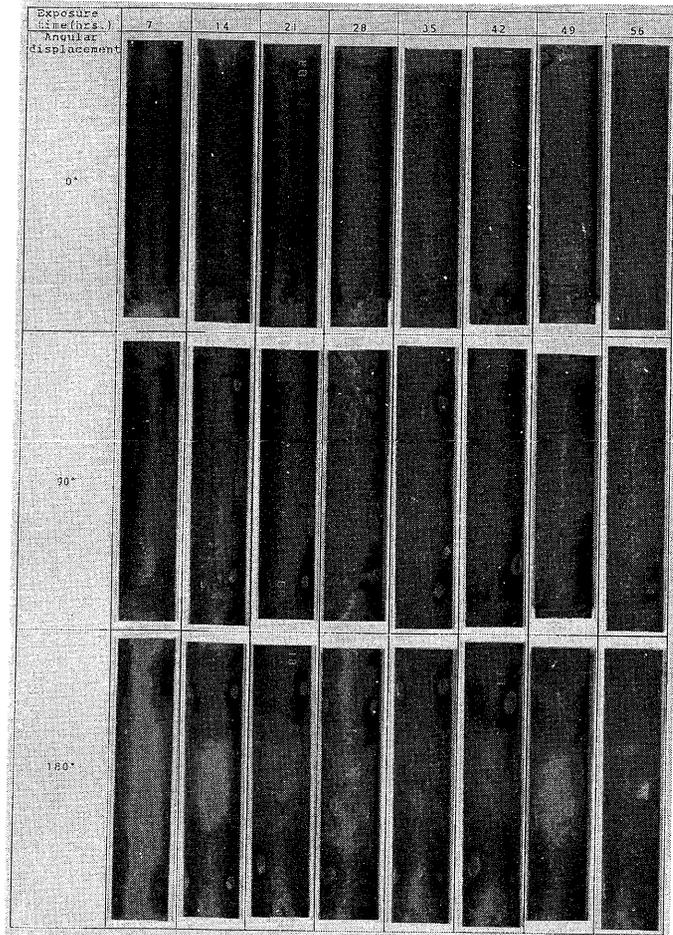
Exposure time (hrs.)	7	14	21	28	35	42	49	56
Angular displacement								
0°								
90°								
180°								

Material: Al₂O₃ # 2 Test temp.: 700 °C Batch No. II

Exposure time (hrs.)	63	70	77	84	91	98	105	Section loss
Angular displacement								
0°								
90°								
180°								

図-14 アルミナ (700 °C) : 外観及び損傷部断面

Material: René 80+CoCrAlY #1 Test temp.: 700 °C Batch No. III



Material: René 80+CoCrAlY #1 Test temp.: 700 °C Batch No. III

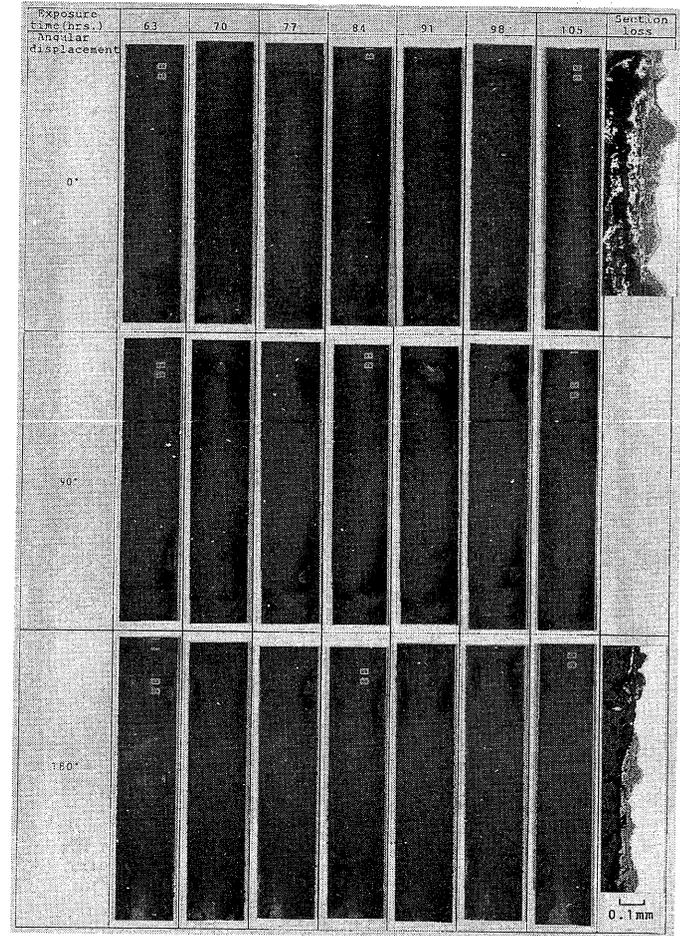


図-15 RC-1 (700 °C) : 外観及び損傷部断面

Material: René 80+CoCrAlY # 5 Test temp.: 700 °C Batch No. W

Exposure time (hrs.)	7	14	21	28	35	42	49	56
Angular displacement								
0°								
90°								
180°								

Material: René 80+CoCrAlY # 5 Test temp.: 700 °C Batch No. W

Exposure time (hrs.)	63	70	77	84	91	98	105	Section loss
Angular displacement								
0°								
90°								
180°								

0.1mm

図-16 RC-5 (700 °C) : 外観及び損傷部断面

Material: IN738 # 6 Test temp.: 700 °C Batch No. W

Exposure time (hrs.) Angular displacement	7	14	21	28	35	42	49	56
0°								
90°								
180°								

Material: IN738 # 6 Test temp.: 700 °C Batch No. W

Exposure time (hrs.) Angular displacement	63	70	77	84	91	98	105	Section loss
0°								
90°								
180°								 0.1 mm

図-17 IN738-6 (700°C) : 外観及び損傷部断面