蒸気発生器爆着プラグ部の環境強度に関する研究*

加賀精一**, 藤井克弘***, 山本義秋****, 小川恒一*****, 藤岡芳博*****

Study on the Strength of Explosive Plugged Part in the Environment of Steam Generator

by Seiichi Kaga**, Katsuhiro Fujii***, Yoshiaki Yamamoto****,
Kouichi Ogawa***** and Yoshihiro Fujioka*****

Supposing the case in which leakage takes place in tubing of steam generator, the explosive plugging method was developed by Japan Welding Engineering Society etc. It was indicated by the researchers that this method is effective to the purpose.

It is not yet known whether the plugged parts keep the stable strength or not, during the long service period in the environment of steam generator.

Under the above consideration, following three tests on plugged part are conducted.

1. Thermal Shock Test
2. Stress Corrosion Cracking Test
3. Liquid Sodium Corrosion Test

Testing results are gained as follows.

1. Peeling occurs immediately after beginning of thermal shock test. Cracking occurs after 150~200 thermal cycles in SH, 200~400 thermal cycles in EV and 1000 thermal cycles in SG.
2. Residual stress in tube plate near the plug is compressive. SCC does not occur in the tube plate there. It occurs on the inner surface of plug.
3. The susceptibility to SCC of explosive bonded boundary is lower than that of base metal due to martensite in bonded boundary.
4. Explosive bonded boundary is somewhat weaker than base metal in the resistance to the sodium attack under the testing condition employed in liquid sodium corrosion test.

Key Words: Explosive Plugging, Thermal Shock Test, Stress Corrosion Cracking, Liquid Sodium Corrosion, Steam Generator, Fast Breeder Reactor

1. 緒 言

原子炉の蒸気発生器の伝熱管に洩れが発生した場合を想定して、日本溶接協会、動力炉・核燃料開発事業団、旭化成工業㈱によって爆着プラグ法が開発された^{1,2)}。

また爆着プラグ部の機械的強度については、日本溶接協会爆着プラグ評価委員会のメンバー²⁾によって、その健全性が調査された。しかし爆着プラグ部が原子炉蒸気発生器の中の環境の中で長期に使用された場合の強度の安定性については未だ検討されていない。

爆着プラグ部の環境強度は多面的に検討する必要があると考えられるが、著者等は次のようなものを考え、研究を行った。

- 1) 爆着プラグ部の形状的な特徴から応力集中部が存在すると考えられる。そこで原子炉運転中のバルブ類の操作ミスなどによる熱衝撃がかかった場合に対する特性の研究が必要である。

- 2) 爆着プラグ部には、爆着による残留応力が存在していると考えられる。そこでオーステナイトステンレス鋼の爆着プラグ部では応力腐食割れ特性に関する研究が必要である。

- 3) 蒸気発生器が現在我が国で開発中の高速増殖炉に使用される場合には爆着プラグ部の液体ナトリウム中の腐食特性に関する研究が必要である³⁾。

上記の三つ環境強度に関する研究を行った結果をまとめて報告する。

2. 供試材料および試験片

2.1 プラグおよび管板素材

供試材料は高速増殖炉の過熱器(SH)、蒸気発生器(EV)、および軽水炉の蒸気発生器(SG)を想定し、SUS 321 ステンレス鋼、2¼ Cr-1 Mo 鋼、SUS 304 ステンレス鋼を使用した。

化学成分、機械的性質を Table 1 に示す。

2.2 プラグおよび管板形状

Fig. 1 にプラグ断面形状を、Fig. 2 に模擬管板形状を示す。

2.3 熱衝撃試験

Table 2 に示す爆着条件により試験片を作製した。電気雷管、爆薬およびプラグのセット状況は、Fig. 3 に示す通りである。

今回用いた方法は低爆速爆薬を使用した方法で、少量の低爆速爆薬によるエネルギー不足を補い、管板端面近

*原稿受付 昭和62年5月12日 昭和63年度春季全国大会で論文発表

**正 員 大阪工業大学 Member, Osaka Institute of Technology

***非 会員 大阪工業大学 Osaka Institute of Technology

****正 員 摂南大学 Member, Setsunan University

*****正 員 大阪府立大学 Member, University of Osaka Prefecture

*****非 会員 京セラ(株) Kyocera Co.

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of materials used (Mill sheet)

Materials	Chemical compositions (wt%)										Mechanical properties				
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Ti	Y.P. (MPa)	T.S. (MPa)	El. (%)	R.A. (%)	K_0
SUS 321 (Plug)	0.04	0.69	0.76	0.031	0.004	9.13	17.26	—	—	0.4	225.4	588	56	73	163
SUS 321 (Tube plate)	0.04	0.70	0.82	0.031	0.002	9.13	17.11	—	—	0.37	235.2	597.8	59	69	170
SFVA F 228 (Plug)	0.11	0.27	0.47	0.023	0.024	0.11	2.00	0.89	0.16	—	597.8	793.8	30	70	163
SFVA F 228 (Tube plate)	0.12	0.19	0.52	0.016	0.015	0.08	2.28	0.88	0.10	—	656.6	901.6	24	67	174
SUS 304 (Plug)	0.05	0.49	1.76	0.033	0.028	8.32	18.19	—	—	—	254.8	578.2	63	74	176
SUS 304 (Tube plate)	0.05	0.31	1.02	0.034	0.024	8.08	18.17	—	—	—	225.4	617.4	64	73	179

Fig. 1 Shape of plug **Fig. 2** Shape of tube plate

傍で爆速が上昇し、良好な爆着が得られるように逆起爆法を採用した。

2.4 応力腐食割れ試験

爆着プラグ部より試験片を採取することができなかつ

たので特別にクラッド鋼をつくりこのクラッド鋼より試験片を採取した。Fig. 4に試験片の採取方法を、Fig. 5に塩化マグネシウム溶液を用いる応力腐食割れ試験の形状を、Fig. 6に高温高圧水による応力腐食割れ試験の形状を示す。

2.5 液体ナトリウムによる腐食試験

前節と同様に爆着プラグ部より試験片を採取することができなかったため、クラッド鋼より採取した試験片の採取位置をFig. 7に、試験片の寸法、形状をFig. 8に示す。Type Aは爆着境界部を含むものである。爆着プラグ部とクラッド鋼より採取した試験片が大体同等の特性をもっていることは、使用した爆薬の爆速、使用量、爆着境界部に見られる波形の形成より判断できる。

Table 2 Explosive plugging conditions

	Kind of exp.	Weight of exp. (g)	S/O (mm)	Plug thickness (mm)	Surface
SH	L	6.0	1.5	2.4	#320
EV	L	5.0	1.4	2.5	#320
SG	L	6.0	1.5	2.5	#320

L: Low detonation velocity (Max. velocity 2000 m/s)

Fig. 3 Setup of explosive plugging **Fig. 4** Sampling of SCC test specimen for bonded boundary

Fig. 5 SCC specimen for $MgCl_2$ test

Fig. 6 SCC specimen for Autoclave test (Clad plate)

Fig. 7 Sampling of test specime for Na corrosion test

Fig. 8 Shape of test specimen for Na corrosion test

3. 実験方法

3.1 熱衝撃試験

試験は次の手順で行った。

- i 熱衝撃試験前の超音波検査
- ii 熱衝撃試験中の AE 波検出
- iii 熱衝撃試験後の超音波検査
- iv プラグ部の断面観察

Fig. 9 Ultrasonic test (Full immersion mt method)

Fig. 10 Sectional plan of apparatus for thermal shock test

Fig. 11 An example of heating-cooling cycle

以下に簡単に説明する。

- (1) 熱衝撃試験前後の超音波検査

測定方法として Fig. 9 に示すような水浸法を採用した。探触子としては特製のペンシル型のものを用いた。

(2) 熱衝撃試験

本試験に用いた試験装置の概略を Fig. 10 に示す。この装置では、ヒーターにより試験片を加熱し、試験片温度が上昇に達するとノズルからの水噴射により冷却が開始され、試験片温度が下限に達すると水噴射が停止し、冷却を終了、再び試験片が加熱されるようになっている。爆着部における冷却速度は $50 \sim 100^\circ\text{C}/\text{sec}$ である。Fig. 11 に試験片の加熱-冷却サイクルの一例を示す。

さて高速増殖炉「もんじゅ」の場合、熱衝撃の想定事象としては Table 3¹⁾ のようなものがある。本研究では、Fig. 12 のような「もんじゅ」の蒸気発生器各部の温度から考え、熱衝撃試験温度条件を Table 4 のように定めた。熱衝撃試験中の割れや、はく離の発生時期を明確に探知するためアコースティックエミッションの測定を行った。Fig. 13 に AE 検

Table 3 Supposing occasion of thermal shock test

Supposing occasion	Cooling rate ($^\circ\text{C}/\text{sec}$)	Temperature range ($^\circ\text{C}$)
* "Monju" EV * Feed-water side entrance nozzle cold shock * Misoperation main steam dump valve "Open"	1.5	240 ~ 156
* "Monju" EV * Steam side exit nozzle hot shock * Feed-water discharge regulating valve "Close"	0.5	90 ~ 83

Fig. 12 System drawing of steam generator (Monju)

Table 4 Temperature conditions for thermal shock test

	Max. temp. ($^\circ\text{C}$)	Min. temp. ($^\circ\text{C}$)
SH	500	200
EV	500	200
SG	300	100

Fig. 13 AE behavior during thermal shock test (R.M.S.)

波の一例を示す。Peeling off の発生、終了、Cracking と AE との対応については、試験中においてそれぞれの AE の発生直後に装着を停止し、試験片をとりはずして試験片を切断し、断面を観察することによって決めた。

3.2 応力腐食割れ試験

MgCl_2 溶液による実験としては、供試材料として SUS 304 鋼のみを使用した。これを 42% MgCl_2 沸騰溶液中に浸漬して引張一定荷重を加え破断までの時間を測定した。また実際の軽水炉の環境を模擬した試験として高温高圧水による応力腐食割れ試験を行った。実験方法としては、Fig. 6 の試験片を曲げ治具にとりつけ曲げ荷重を加えたまま、静止型オートクレーブに蒸留水とともに封入した。高温水は温度 $250^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ 、圧力 $42.6 \text{ kg}/\text{mm}^2$ とし、水中溶存酸素濃度を 100 ppm とした。また 100 時間ごとに蒸留水の交換および酸素の注入を行い、実験終了後切欠先端部を切り出し、割れの有無を観察した。

3.3 液体ナトリウムによる腐食試験

液体ナトリウムによる腐食試験を行うためには、高速増殖炉の二次ナトリウム系の環境条件を忠実に再現した「ナトリウムループ装置」を用いることが望ましいが、本研究ではいくつかの実験的な制約により、比較的簡単に小型の「ナトリウムループ」を試作して研究を行うこととした。このような関係より研究の目的も、爆着部と母材部の腐食抵抗を定性的に比較することにとどめた。

Fig. 14 に試作した「ナトリウムループ」のフローシートを示す。図中、TT は試験片を浸漬するテストタンクであり、CT は液体ナトリウムを融点直上まで冷却してナトリウム中の酸化物を析出させて捕集し、溶存酸素量を制御するためのコールドトラップである。その他、EMP はナトリウムを流動させるための電磁ポンプ、EMF は電磁流量計、VT はナトリウム蒸気を捕集するためのペーパートラップである。なお採用した試験条件は次のようである。

温度 600°C , 700°C 酸素濃度 1~2 ppm
流速 2.5 cm/sec

4. 実験結果

4.1 熱衝撃試験

実験結果を Fig. 15 に示す。試験結果は横軸にサイクル数（注水回数）をとり、縦軸にプラグ部の温度変化の範囲を示して整理した。はく離は試験開始直後から起きていると思われるが、亀裂の発生までにはある程度時間

Fig. 14 Flow sheet of Na loop

Fig. 15 Results of thermal shock test

を要し、またこの亀裂がプラグ内側もしくは、管板外側まで伝播するためにはかなりのサイクル数が必要と思われる。また熱衝撃試験終了後、試験片を切断して破壊の模様を観察した。観察結果の概略については、5.1で述べる。

4.2 応力腐食割れ試験

MgCl₂ 溶液中の定荷重引張試験における試験結果を Fig. 16 に示す。また高温高圧水による応力腐食割れ試験の結果を Fig. 17 に示す。

Fig. 16 から母材部よりも爆着境界部の方が応力腐食割れ感受性が低いことがわかる。また Fig. 17 より高温高圧水中での試験では、この場合応力腐食割れは発生していないことがわかった。

4.3 液体ナトリウムによる腐食試験

液体ナトリウムによる腐食試験の結果を Fig. 18, Fig. 19 に示す。これらの結果では縦軸に試験片の単位表面積当たりの腐食減量を示している。Fig. 18 より爆着境界部を含む Type A 試験片は、母材を代表する Type B 試験片よりもわずかながら腐食減量が多い傾向にあるこ

Fig. 16 Result of MgCl₂ test

とがわかる。また Fig. 19 より 700°C における腐食減量はこれら二つの材料においては 600°C における腐食減量にくらべ非常に大きくなることがわかる。「もんじゅ」の二次ナトリウム系の温度は Fig. 12 より 500°C 程度と考えるとこれらの試験温度は現実の場合より高く加速試験的な条件であることがわかる。

5. 考 察

5.1 熱衝撃試験

Peeling off の発生、Cracking の時期は、材質と試験条件の両者によって異なると思われる。例えば Fig. 15 の(C)の場合 Peeling off の発生時期が他の場合より遅いのは、熱衝撃の温度差が他の場合より小さいことが関係していると思われる。

爆着プラグ部の熱衝撃におけるはく離および亀裂発生メカニズムとしては Fig. 20 に示す三つの型があると考えられる。1 は爆着の始端部で爆速の立ち上がりがないために起因する接着不良部がはく離し、この部分より亀裂がおこる場合、2 は爆着の終端部の非圧着部より亀裂がおこる場合、3 は圧着境界部に出来た熔融部から、熱衝撃により、放射状に亀裂が発生し次第に境界線に沿って進行して行く場合である。

5.2 応力腐食割れ試験

爆着プラグ後の模擬管板端面の残留応力分布を歪解放

Fig. 17 Results of Autoclave test

Fig. 18 Weight loss vs. time in Na corrosion test

Fig. 19 Weight loss vs. temperature in Na corrosion test

法により測定してみると Fig. 21 のようになる。当然のことであるが半径方向および円周方向の応力はプラグ近傍では圧縮であり、この部分に応力腐食割れは発生しない。一方試験片全体を $MgCl_2$ 溶液に浸漬してみると Fig. 22 に示すように割れが発生した。爆着による残留引張応力は、プラグの軸方向に作用していたものと思われる。

Fig. 16 にみられるように $MgCl_2$ 溶液による応力腐食

Fig. 20 Mechanisms of peeling off and crack

Fig. 21 Residual stress distribution in tube plate for SUS 304 explosive plugged tube

割れ試験の結果、爆着材は母材に比較して応力腐食割れ感受性は低いといえる。これは主として爆着によって生じた加工誘起マルテンサイトに関係するものと思われる^{6,7)}。また Fig. 17 によれば高温高压水による応力腐食

Fig. 22 General view of specimen after corrosion test (3000h)

割れ試験では母材、爆着材とも割れの発生は認められなかったが、これは爆着の割合、熱の発生が非常に少なく材料が鋭敏化されないためと思われる。

5.3 液体ナトリウムによる腐食試験

Fig. 18 において爆着材は母材よりわずかながら腐食減量の多いことが認められたが、このことはナトリウム腐食の機構⁸⁾より考えると次のように解釈できる。ナトリウムによる腐食の場合、Ni, Mn などは液体ナトリウム中に直接溶解するが、Fe, Cr などは介在する微量の酸素ならびにナトリウムによる三成分酸化物の生成、溶解によって減少するといわれている。爆着境界部では母材部よりも酸化物が多く、これより生じる酸素が腐食を促進させるのではないかと考えられる。

6. 結 論

- (1) 爆着プラグ部の熱衝撃試験を行ったところ、はく離はくり返し試験開始直後から生じるが、このはく離から亀裂が発生するには相当のくり返し数を要す。亀裂発生のかり返し回数は、高速増殖炉の過熱器で 150~200 cycle、高速増殖炉の蒸発器で 200~400 cycle、軽水炉の蒸気発生器では 1000 cycle 位である。
- (2) $MgCl_2$ 溶液による応力腐食割れ感受性は母材よ

りも爆着材の方が低い。

- (3) 高温高圧水中では応力腐食割れは今回の実験では認められなかった。
- (4) 液体ナトリウムによる腐食試験では、爆着部の方が母材部よりもわずかながら腐食減量が多いようである。

謝 辞

本研究を遂行するに当たり、研究に対する多くの討論、アドバイスをいただいた大阪工業大学機械工学科、井川 博教授に深甚の謝意を表したい。また応力腐食割れ試験について懇切な討論をいただいた大阪大学向井喜彦教授および「ナトリウムループ装置」の試作に関し、熱心な指導をいただいた金属材料技術研究所鈴木正室長にも心からのお礼を申し上げる。

さらに大阪工業大学大学院において本研究の実行に当たった佐久間宏輔君 (ガイセル化学)、日并正治君 (立石電機)、森本裕介君 (川崎重工) に感謝する。最後に本研究は文部省科学研究費 (一般研究 B) によるものであることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 動力炉・核燃料開発事業団 “蒸気発生器伝熱管爆着プラグ方法の開発” PNC SN 941 80-170 (1980)
- 2) 日本溶接協会, “蒸気発生器伝熱管プラグ方式の開発 (V)”, EPE 委員会成果報告書, PNC SJ 225 82-01 (1982)
- 3) 加賀精一, 藤井克弘, 藤岡芳博, 山本義秋, 小川恒一 “小型ナトリウムループの試作と爆着プラグ部のナトリウム腐食に関する研究” 溶接学会論文集, 第 5 巻, 第 3 号
- 4) IHI “爆着プラグ部の熱衝撃試験” 日本溶接協会爆着プラグ部の評価委員会資料 (1982)
- 5) 鈴木正他 “材料試験用ナトリウムループの試作” 科学技術庁金属材料技術研究所研究報告集 4, P.324~P.334 (1983).
- 6) 村田雅人, 向井喜彦 “種々の環境下における SUS 304 鋼の応力腐食割れの力学的分類” 日本金属学会誌, 第 44 巻, 第 3 号, (1980) P.230~P.238
- 7) M. WATANABE and Y. MUKAI “Effect of Cold Working on Stress Corrosion Cracking of Austenitic Stainless Steel and Their Welded Joints”, Technology Reports of the Osaka University, Vol.20, No.917, (1970) P.99~p.120
- 8) 鈴木正, 野田哲二 “液体アルカリ金属中の金属材料の腐食 (I)” : 防食技術, 24 (1975), 593. 他