各種高圧給水加熱器管材料の耐食性

——実機装着試験結果——

栄 幸雄** 鬼村 吉郎** 岡本 周三** 笹川 敏逸***

Field Test Results of High Pressure Feedwater-Heater
Tubing Materials of a Power Plant

Yukio Sakae, Kichirô Onimura, Shûzô Okamoto and Shôichi Sasagawa

Studies were carried out on the corrosion of high pressure feed water-heater tubing materials of a power plant in peaking service and the material selection of a high pressure feedwater heater from May 1962 to June 1965.

For this purpose, nine kinds of tubing materials were fitted in actual high pressure feedwater-heater of No. 1 and No. 2 units of Himeji No. 1 Thermal Power Station, Kansai Electric Power Co., Inc.

The results obtained are as follows:

1) Typical exfoliation type corrosion was formed on 70-30 cupro-nickel alloy.

2) 80-20, 90-10 cupro-nickel and 5% iron modified cupro-nickel did not form exfoliation type corrosion.

3) 70-30 nickel-copper alloy and the STC 52 A austenitic stainless steel formed a thin adherent oxide film and did not show measurable metal loss.

4) Three kinds of steel tubes were pitted in both drain and feedwater side, but not in the steam side. The pitting rates were about 0.3 mm/yr.

5) From the above results, the material in actual units was replaced with 90-10 cupro-nickel tube to prevent exfoliation type corrosion.

1. まえがき

昭和 30 年頃に建設された 66~75 MW 級プラントは、その後大型の新鋭火力が稼動するに至り、逐次 peak load station としての役割を果たすようになってきた。それとともに高圧給水加熱器管にも新しい形の腐食が発生し種々の検討がなされた。

これまでの研究結果によると、腐食原因はプラントの起動一停止時に系内に導入される空気中の酸素による酸化腐食であり、30% キュプロニッケルに特有の現象であることが明らかとなった¹⁾。

関西電力(株)姫路第一発電所 No. 1 ユニットおよび No. 2 ユニット (以下それぞれ 1U および 2U とする)においても、昭和 34 年頃より前記腐食が原因となった給水加熱器管の漏洩が頻発したので管の取り替えが計画され、それに先立って管材選定のための実機試験を行な

うこととなった。

供試材料としては経済性をも加味して材料の選定を行なう必要があるので、表 3 に示した 9 種を供試材料とすることに決定した。

これらの材料は 1U (No. 5 給水加熱器、以下 HTR とする) および 2U (No. 5 HTR) の加熱管群中に装着するため、要求される強度を計算の上、所定の U 字管に製作し管板に拡張とりつけのち、下記の長期間にわたり試験を行なった。

No. 1U (66 MW) 昭和 37 年 5 月~昭和 39 年 9 月 (途中 38 年 8 月に 1/2 を抜き取り調査)

No. 2U (75 MW) 昭和 38 年 6 月~昭和 40 年 6 月 (途中 39 年 5 月に 1/2 を抜き取り調査)

表 1 1U および 2U HP HTR の要目

ユ ニ ャ ッ ト	型 式	加 熱 面 積	蒸気入口温度	ドレン出口温度	給水入口温度	給水出口温度	竣 工
1U No.5 HTR	横置 U チューブ	170m ²	345°C	182°C	176°C	210°C	30.9.6
2U No.5 HTR	同 上	350m ²	379°C	189°C	184°C	226°C	32.9.2

* 昭和 40 年 11 月 10 日第 12 回腐食防食討論会 (名古屋) にて発表

** 三菱重工業(株)神戸研究所 (明石市魚住町清水字北沢 1106 の 4)

*** 関西電力(株)姫路第 1 発電所 (姫路市飾磨区中島 3058)

以下本報は建設以来装着使用されていた 30% キュプロニッケル管の腐食状況の概要と、試験材料について3ヵ年間にわたり実施した実機試験結果をとりまとめて報告する。表1に1U No. 5 HTR および 2U No. 5 HTR の要目を示す。

2. 建設以来装着されていた管の腐食状況

(a) 蒸気側

(b) 曲管部外周

図1 漏洩個所の外観(邪魔板部近傍)

(a) Sample 25

(b) Sample 36

図2 漏洩部の組織写真

表2 1U No. 5 HTR に建設以来装着されていた管の機械的性質

ユニット	経過年月	管 No.	抗張力 (kg/mm ²)	降伏点 (kg/mm ²)	伸び (%)	抗張力 (kg/mm ²)	降伏点 (kg/mm ²)	伸び (%)
2U	5年11ヵ月		50.2 47.3	31.5 29.9	35.5 26.5	—	—	—
	6年8ヵ月	4	50.2 49.3	34.5 32.8	31.0 21.0	—	—	—
		5	46.6 46.1	28.9 27.2	36.0 34.0	—	—	—
1U	9年3ヵ月		試験片-1 (第1バップル近)			試験片-2 (第5バップル近)		
		25A	36.6	16.0	44.0	29.7	15.3	29.0
		34B	38.2	16.4	41.0	34.7	15.1	21.0
		36A	34.2	14.4	40.0	24.5	14.1	14.0
		48B	30.8	14.8	34.0	29.9	12.1	19.0
		49A	40.6	18.6	39.0	36.4	16.1	25.0
		50A	37.2	15.7	39.5	29.9	14.8	13.0
		61B	40.2	13.7	35.0	38.3	12.7	26.0
		65A	37.9	16.9	27.0	30.4	15.8	21.0
		66A	38.5	18.9	37.0	38.8	15.0	35.0
	規	格	>36		>30	>36		>30

2.1 管の腐食状況および機械的性質

図 1a) および b) に代表的例を示す。すなわち外観上よりは試料 No. 25, 34 および 36 のように腐食漏洩したものと、この漏洩が原因となり給水の噴射により二次的に損傷したものの 2 種類に大別される。

また漏洩部の組織写真を図 2a) および b) に示した。図 1 では管を HTR より抜きとるときにリン片状のスケールが剝離してしまったので、その状態を示すことができなかったが、図 2 a) および b) から次の点を認めることができる。

漏洩部には粒界の選択酸化現象が見受けられ、また試料 25 では割れの内部に金属銅の付着が認められる。管内面には腐食はほとんどないが、外面は exfoliation type の腐食により肉厚が減少し、給水圧力により内面より噴射にいたる状況が認められる。(図 2—b)

表 2 に 1U および 2U の各 No. 5 HTR に建設以来装着されていた管(輸入品)の機械的性質を示す。購入時の機械的性質は不明であるが 1U および 2U とも同一であるとすれば、1U 装着管の方が 2U 装着管よりも抗張力低下の度合は大である。

2.2 渦流探傷試験

HTR より抜き取った管に対して、渦流探傷試験を次の条件下で実施した。

試験器：三菱式渦流探傷試験器²⁾

周波数：1.5 kc, 位相：50°, ゲイン：8

標準振幅：13 mm (2 mm 径のテストホールに対して)

最近渦流探傷試験は熱交換器の保守管理によく用いられているが、欠陥の有無を主として定性的に識別する程度に止まっていると思われる。

そこで著者は前記の条件で行なった渦流探傷波形図を次のように整理し、腐食量と平均振幅度数の間に相関性のあることが明らかとなった。

- ① 対称な振れの場合はその振幅を測定する。
- ② 連続合成波形の場合にはそれらを分割して考える。
- ③ 振幅が 1 mm 未満の波形は測定器の精度より考えて除外する。
- ④ 振幅の目盛が端数の場合には四捨五入して整理した。
- ⑤ 以上のような方法で 1 mm ごとに振幅度数を求めた。
- ⑥ またこれと同時に渦流探傷実施部の腐食量を計算により求めた。

上記方法により求めた平均振幅度数と腐食量について、常法により相関分析を行ない回帰直線を求めると、腐食量 (y) と振幅度数 (x) の間には $y = 1.25x + 57$ が得られる。この関係を散布図とともに図 3 に示す。

3. 各種給水加熱器用管材の実機試験

図 3 散布図および回帰直線

(a) 2U No. 5 HTR

(b) 1U No. 5 HTR

図 4 試験管装着位置 (●印)

3.1 試験用給水加熱器

すでに述べたように今回試験用の材料を装着した給水

表 3 供 試 材 料

No.	規 格	材 質	外 mm 径	肉 BWG 厚	抗 張 力 (kg/mm ²)	降 伏 点 (kg/mm ²)	伸 (%) び
1	JISG 3436	STB 35	15.875	#18	44.47	34.33	32.36
2	"	STB 42B	15.875	#18	54.44	36.34	32.31
3	"	STB 42D	15.875	#18	49	35	36
4	"	STC 52A	15.875	#18	62	36	56
5	ASTMB 163	Ni-Cu合金	15.875	#18	53		45
6	JISH 3632	CNTF 3-0	15.875	#15	47		39
7	"	CNTF 2-0	15.875	#14	37		46
8	"	CNTF 1-0	15.875	#14	35		40
9	—	5%Fe入り CNTF 3-0	15.875	1U #15 2U #18	*50~60		*30~40

* 推定値

加熱器は、1Uおよび2Uとも No. 5 HTR でその加熱管群の詳細を図 4 a) および b) に示す。この図から明らかなように、1U では各試験管が蒸気側およびドレン側に区別されているのに反し、2U では1本の管が蒸気側、ドレン側に装着される構造のものである。

3.2 装着材料リスト

表 3 に示す9種類の給水加熱器管材料である。これらの材料はいずれも規定の購入仕様書により製作された。表 3 に購入時の機械的性質の一例を示す。

3.3 装着位置および試験期間

装着位置は図 4 a) および b) に示した通りである。すなわち建設時に装着されていた管を規定の本数だけ抜き取り、その後へ試験用U字管をいずれも拡張により取り付け付けた。このように取り付けられた管は内面が給水、外面が蒸気（ドレン）と接し、実際に全く同一条件下で試験されている。試験の開始はそれぞれ下記のようにプラントの定期検査時に装着ならびに抜き取りを行なった。

1U 37年5月定期検査時装着～38年8月定期検査時
抜き取り（15ヵ月）

37年5月定期検査時装着～39年8月定期検査
抜き取り（27ヵ月）

2U 38年6月定期検査時装着～39年5月定期検査時

抜き取り（11ヵ月）

38年6月定期検査時装着～40年6月定期検査時
抜き取り（24ヵ月）

3.4 運 転 状 況

図 5 に 1U の運転状況の一例を示した。この図の特長は peak load 用 plant として使用されている様子を明確に示している。37年5月から38年8月までの起動停止回数は169回に及び、平均すると1回の停止時間は約10時間となっており、このことは2Uについてもほぼいえることである。

4. 実機試験結果

4.1 管の寸法変化

1Uおよび2Uの各 No. 5 HTR に装着した試験管とも、外観上は鉄鋼系、キuproニッケル系で著しく差があるにもかかわらず、管外径をノギスで測定した結果は、寸法変化として認めるほどの差は見出せなかった。

図 6 に 1U No. 5 HTR 蒸気側に装着され、27ヵ月経過後の鉄鋼系材料の肉厚をダイヤルゲージで測定した結果を示した。1Uおよび2Uとも鉄鋼系材料以外にはこのような点食は認められなかった。図 6 より判明したことは STB 35～42 D で点食に対する抵抗性にほとんどその差を認め得ないことである。この場合 STB 35 で

0.3 mm, STB 42 B で 0.2 mm, STB 42 D で 0.3 mm が平均点食深さであるが、最高値はいずれも 0.5 mm 程度である。なお 1U No. 5 HTR のドレン側に装着したものは 15ヵ月後測定した値として、STB 35<0.2 mm, STB 42<0.3 mm, STB 42 D<0.3 mm が点食深さとして得られている。

4.2 外 観

図 7 に 1U 蒸気側に装着されていた鉄鋼系材料の 27ヵ月経過後の外観を示す。図 6 の点食深さとの関係でも述べたように、鉄鋼系材料以外の供試材には特に変化が認められなかった。鉄鋼系材料でも蒸気に接する面には点食の発生は認められないが、管内面（給水側）ではドレン中に見られるような点食の発

図 5 1U の運転状況一例

図 6 点食部肉厚 (1U, No. 5 HTR, 蒸気側, 27 ヶ月後) (深いもののうち, 6個の最高と最低)

図 7 1U No. 5 HTR 蒸気側 (27 ヶ月後) (酸洗後)

図 8 点食部の断面マクロ写真 ×1

生を見ている。鉄鋼系材料の点食部のマクロ写真は図 8 の通りで、その深さは前項点食深さの測定結果とほぼ一致する。

鉄鋼系以外の材料の外観変化としては次の点があげられる。すなわち供試材として装着したキュプロニッケル系材料およびモネルメタルの内面には詳細に調べると銅の付着が認められ、その程度は 30% キュプロニッケルが最も顕著であり、他のものは酸洗過程中注意して観察すれば銅の付着を認めることができる。

4.3 供試材の機械的性質

図 9 a)~k) に機械的性質の経年的変化を示した。これより各材料ごとに機械的性質の変化を考察すれば次の通りである。

1) 鉄鋼系材料 (STB 35, 42 B, 42 D)

供試材のうちで抗張力および伸びの変化が最も大きかったもので、測定精度を加味しても腐食の影響をなおか

つ受けているものと推定される。図 9 a)~c) で共通していることはドレン中での伸びの変化が顕著で、これら 3 種類の材料はほぼ経年的に伸び率の低下傾向を示していると考えられる。

2) キュプロニッケル系材料

鉄鋼系材料ほど機械的性質の変化は認められず、10% および 20% キュプロニッケルの 2 種類はほぼ装着時の値を示しているものと考えられる。しかし 30% キュプロニッケルでは経年的な伸び率低下の傾向が認められる。これらのことは実験室的試験結果および給水加熱器開放時に確認された 30% キュプロニッケルの外観状態とも一致するものである。

3) 5% Fe 入り 30% キュプロニッケル

給水加熱器の開放時に金属光沢を呈している材料は本材料と Ni-Cu 合金および STC 52 A のみであった。機械的性質の変化は図 9 k) のようにきわめて安定してい

図 9 装着管の機械的性質の変化 (a)~(k)

ることが確認された。

4) Ni-Cu 合金系材料

今回の試験には材料入手の都合上 SR 材 [図 9 h)] と AN 材 [図 9 i)~j)] の 2 種類を装着したが、いずれも安定した性能を示した。

5) STC 52A

外観的には全く変化が認められなかったが、15ヵ月 (ドレン中) と 24ヵ月 (蒸気中) 後の伸び率のみが図 9 d) に示したように著しく減少した。組織的にも特に粒

界腐食を蒙っているなどの異常は認められず、現在のところこの伸び率減少についての原因は不明である。

4.4 供試材料の耐食性

1) 66~70 MW 級プラントの事業用火力プラントで、主としてピークロード用として使用されるものについては、特別の防食対策 (たとえば N_2 シール、蒸気シールなど停止時の処置および給水処理) が確立されているものの以外は鉄鋼系材料の使用は不適当と思われる。鉄鋼系材料の腐食形態は今回の場合点食であり、その速度は

STB 35, 42 B および 42 D とほぼ 0.3 mm/yr であった。

2) 鉄鋼系材料の点食発生原因は酸素および銅イオンであると考えられ、これらの因子を除去すれば点食速度も前記 0.3 mm/yr の 1/10 以下になることが実験室試験³⁾ 結果より推定される。上記の条件が満たされた場合については鋼管製給水加熱器の実用実績も次第に増加しつつある。

3) 起動停止の多いプラントで 30% キュプロニッケル管を使用した高圧給水加熱器管に腐食事故を発生していることは種々の文献に見られている通りで、これの対策としても各種の方法があげられている。G. C. Wiedersum⁴⁾ のモデルプラントテストは今回の方法と類似のもので、キュプロニッケル系 3 種類のうちでは 30% キュプロニッケルが exfoliation type の腐食を生じたのに対し、20% および 10% キュプロニッケル管は本報同様固着性の酸化皮膜を生じるのみで腐食量は測定されなかったとしている。20% および 10% キュプロニッケルが起動停止の多い条件で耐食性のあることは、すでに報告した実験室の試験結果とも一致する。

4) 20% および 10% キュプロニッケル以外の材料では、Ni-Cu 合金、5% Fe 入り 30% キュプロニッケルおよび STC 52 A の耐食性は今回の試験でも良好であった。このうち 5% Fe 入り 30% キュプロニッケル管の耐食性は、この種使用条件ではきわめてすぐれた性能を示すことが確認された。

5) 建設以来装着されていた 30% キュプロニッケル

に見られたほどの顕著な粒界選択酸化腐食（深さ 10/100 mm 以下）は、供試 30% キュプロニッケルには見出せなかったがその傾向は認められた。

5. 結 言

66~75 MW 級高圧給水加熱器管に発生している腐食問題の解明と、管を取り替えるための材質選定目的のため本試験を実施した。

本実機試験の結果は、すでに報告した実験室の試験結果並びに内外の文献に発表されている例ときわめて良く一致するものであった。すなわち 30% キュプロニッケルは 20% および 10% キュプロニッケルと比較し、起動停止の多いプラント中で exfoliation type の腐食を発生する。この種雰囲気では exfoliation type の腐食を生じないのは 20%, 10%, 5% Fe 入りの各キュプロニッケル、ステンレス鋼および Ni-Cu 合金等であった。

また鉄鋼系材料は今回のような条件下では点食を発生するので、その防止対策が確立されない限りこの級のプラントでは使用不適と考えられる。

今回の試験結果より関西電力(株)姫路第一発電所の 1 U No. 5 HTR および 2 U No. 5 HTR はすでに 10% キュプロニッケル管に換装された。

(昭和 41 年 5 月 20 日受理)

文 献

- 1) 中沢, 栄, 鬼村: 新三菱重工技報, 4, 29 (1962)
- 2) 山口, 遠藤: 非破壊検査, 10, 23 (1961)
- 3) 鬼村, 白木: 新三菱重工技報, 6, 10, (1964)
- 4) G. C. Wiedersum, et al.: ASME 64-WA/CT-3

Glossary of Terms used in Maintenance Painting (19)

profile—surface contour as viewed from edge.

profile depth—average distance between tops of peaks and bottom of valleys on the surface.

proprietary—available on open market under brand name.

protective life—interval of time during which a paint system protects substrate from deterioration.

pulsation—surging.

pump bypass—recirculating line which returns fluid to container.

pump ratio—multiplier of input pressure which indicates output pressure; ratio of air piston area to fluid piston area.

Q

quick release fittings—snap-lock fittings.

R

reaching (spray gun)—extending spray stroke too far.

rebound—paint spray deposit bounced back.

recoat time—time interval required between application of successive coats.

red label goods—flammable or explosive materials with flash points below 80°F(26.7°C).

reducer—a material which lowers viscosity but is not necessarily a solvent for the particular film former; thinner.

reflectance—degree of light reflection.

repainting—repetition of a complete painting operation including surface preparation.

Mater. Prot., 4, No. 1, 73~78 (1965) Jan.