

JAERI-Tech

2005-001

JP0550085



JRR-4 热交換器の管理技術

2005年2月

堀口 洋徳・大山 光樹・石黒 裕大
平根 伸彦・伊藤 和博・亀山 巍

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課(〒319-1195 茨城県那珂郡東海村)あて、お申し越し下さい。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター(〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内)で複写による実費頒布を行っております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2005

編集兼発行 日本原子力研究所

JRR-4 热交換器の管理技術

日本原子力研究所東海研究所研究炉部

堀口 洋徳・大山 光樹・石黒 裕大・平根 伸彦・伊藤 和博・亀山 巍

(2005年1月4日受理)

JRR-4 では、1992 年に炭素鋼製からステンレス鋼製の熱交換器に更新した。その後、熱交換器の管理方法の検討を重ねてきた。その主なものが、熱交換器の洗浄技術である。旧熱交換器の冷却性能の回復には化学洗浄のみを行ってきたが、新たな方法として化学洗浄と乾燥洗浄を組み合わせた回復・維持を行っている。これは、伝熱管や配管への負担を軽減すると共に、コスト面にも大きな役割を果たしている。

本書では、実績に基づく熱交換器の管理技術のまとめとして、JRR-4 热交換器の性能管理办法、洗浄方法及び冷却水の管理方法について報告する。

Management Techniques of the JRR-4 Heat Exchanger

Hironori Horiguchi, Koji Oyama, Yasuhiro Ishikuro
Nobuhiko Hirane, Kazuhiro Ito and Iwao Kameyama

Department of Research Reactor
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 4, 2005)

After JRR-4 heat exchanger was renewed in made of stainless steel from carbon steel, it was examined how to manage the heat exchanger. The main subject is the cleaning technology of the heat exchanger. The recovery of old heat exchanger cooling performance has been by only chemical cleaning. Now we use chemical and dry cleaning as a new technique. It helps prevent of corosions of secondary pipes and reduce of management costs.

This report describes the performance management and cleaning technology of the JRR-4 heat exchanger and the management of the JRR-4 coolant.

Keywords : Research Reactor, JRR-4, Cooling System, Heat Exchanger, Over-all Heat Transfer Coefficient, Chemical Cleaning

目 次

1.はじめに -----	1
2. JRR-4 热交换器の仕様 -----	2
3. 热交换器の性能管理 -----	8
3.1 総括伝热係数 -----	8
3.2 総括伝热係数の変化傾向 -----	9
3.3 総括伝热係数の管理値 -----	10
4. 热交换器の洗浄 -----	15
4.1 化学洗浄について -----	15
4.1.1 洗浄工程 -----	15
4.1.2 化学洗浄による腐食量検査 -----	15
4.1.3 洗浄液の化学分析 -----	16
4.1.4 洗浄前後の伝熱管表面写真 -----	18
4.1.5 今後の化学洗浄 -----	18
4.2 乾燥洗浄について -----	18
4.3 1次冷却水側の洗浄 -----	19
5. 冷却水の管理 -----	24
5.1 1次冷却水の管理 -----	24
5.2 2次冷却水の管理 -----	24
5.2.1 補給水による水質管理 -----	24
5.2.2 防食剤の投入について -----	24
5.2.3 2次冷却水モニター -----	25
5.3 水質の管理記録 -----	26
6. まとめ -----	29
謝辞 -----	30
参考文献 -----	30
付録 1. 2次冷却系配管腐食調査 -----	31

Contents

1. Introduction -----	1
2. Specification of the JRR-4 Heat Exchanger -----	2
3. Performance Management of the JRR-4 Heat Exchanger -----	8
3.1 Over-all Heat Transfer Coefficient -----	8
3.2 Trend of Over-all Heat Transfer Coefficient -----	9
3.3 Management Value of Over-all Heat Transfer Coefficient -----	10
4. Recovery Techniques of Cooling Performance of the JRR-4 Heat Exchanger -----	15
4.1 Chemical Cleaning -----	15
4.1.1 Cleaning Process -----	15
4.1.2 Measurement of the Amount of Corrosion in Chemical Cleaning -----	15
4.1.3 Chemical Analysis of the Cleaning Liquid -----	16
4.1.4 Photograph on the Tube Surface before and after Chemical Cleaning -----	18
4.1.5 Further Chemical Cleaning -----	18
4.2 Dry Cleaning -----	18
4.3 Cleaning of Primary Cooling Side -----	19
5. Management of the JRR-4 Coolant -----	24
5.1 Management of Primary Coolant -----	24
5.2 Management of Secondary Coolant -----	24
5.2.1 Water Quality Management by Make-up Water -----	24
5.2.2 Use of the Anticorrosive -----	24
5.2.3 Secondary Coolant Monitor -----	25
5.3 Records of Coolant Quality -----	26
6. Summary -----	29
Acknowledgements -----	30
References -----	30
Appendix1. Inspection of Corrosion Conditions of Secondary Cooling Pipes -----	31

1. はじめに

JRR-4 は、最大熱出力 3500kW のスイミングプール型熱中性子炉で、冷却材には軽水を使用している。炉心で発生した熱は、熱交換器により 1 次冷却系から 2 次冷却系に伝えられ 2 次冷却塔で大気に放出している。

熱交換器の性能は、2 次側伝熱管への腐食生成物やスライム、スケール等の付着により低下する。冷却性能は、総括伝熱係数で管理しており、炉心出口アラーム設定値、スクラム設定値 (47°C, 60°C) を満足する為に、定期的に洗浄を行い冷却性能の回復を図っている。従来は化学洗浄による回復だけであったが、現在は、化学洗浄と乾燥洗浄により性能回復、維持を行っている。乾燥洗浄とは、熱交換器 2 次側を乾燥空気により乾燥させて、汚れを乾燥はく離させる洗浄方法である。乾燥洗浄により、化学洗浄の回数を減らせたことは、洗浄液による熱交換器や配管の腐食を軽減し、また、コスト面でも大きな役割を果たしている。本書では、実績を基にした熱交換器の管理技術、冷却水の管理について述べる。

2. JRR-4 热交換器の仕様

JRR-4 旧熱交換器は、1965 年建設当時からの長期の使用により胴側胴板 (SS41) の腐食が進み、必要厚さを割り込む怖れがでたため、1992 年 2 月に更新を行っている。主な更新内容は以下のようになる。^{[1],[2]}

- (1) 胴側胴板を SS41 製から腐食の少ない SUS304 製にした。
- (2) 旧熱交換器は、3000kW の熱交換量で設計製作されたが、その後、最大熱出力を 3500kW に上昇したため、熱的余裕が原子炉設置当時と比べ少なくなっていた。設計にあたり、燃料の熱的設計の安全余裕を約 2°C 向上させて、炉心出口温度を 50.0°C 以下に維持できるような伝熱面積 (142m²/基) を有することとした。
- (3) 冷却材の循環により生ずる流動振動により伝熱管の損傷を受けないように、2 次冷却水の入口側管台の直下に新たに緩衝板を設けた。また、バッフルプレート (2 次側流路の縦板部) の固定するスタッットボルト及びナットは、締め付けたのち溶接施工を行った。
- (4) 洗浄時の伝熱管表面の汚れを目視できるよう点検孔を設置した。
- (5) 2 次冷却系側には設置されていなかった、圧力計を 2 基ある熱交換器それぞれに設置して、適切な流量配分を行えるようにした。
- (6) 热交換器の出入口弁の更新を行った。玉形弁から操作性に優れていて軽量でコンパクトなバタフライ弁に更新した。特に、化学洗浄を考慮して、溶接にはステンレス鋼、シートリングにはテフロンシートを採用した。

Table2.1 に熱交換器の主な仕様を、Table2.2 に更新前後の仕様比較を示す。Fig.2.1、Fig.2.2 に熱交換器の全体図と冷却系統図を示す。研究炉の熱交換器仕様比較を Table2.3 に示す。特に、JRR-3 では、他の研究炉とは逆に胴側を 1 次冷却系が、伝熱管側を 2 次冷却系が流れる構造となっている。2 次側の洗浄に物理的な洗浄方法である、スポンジ球を流して伝熱管内を洗浄するボール洗浄を行うためであり、化学洗浄による伝熱管の負担軽減と経済性に優れた構造となっている。JRR-4 热交換器は、一般的な原子力施設と同様に管側が 1 次冷却系、胴側が 2 次冷却系であり、物理的な洗浄ができないので、定期的な化学洗浄により伝熱管外表面の汚れを落とす必要がある。しかし、化学洗浄を行うことは、伝熱管や配管を腐食させることから、洗浄回数は増やせず、また、経済的にも大きな負担となる。そこで、後述する乾燥洗浄を行うことにより、それらの負担の軽減を図っている。

Table2.1 変更後の熱交換器の仕様

1 次 冷 却 系 熱 交 換 器	型 式		向流型直管 1 折流 2 洞式	
	基 数		2 基	
	熱 交 換 量 (kcal/h/基)		1.5×10^6	
	伝 热 面 積 (m^2 / 基)		142	
	主 要 寸 法	洞側	外 径 (mm)	562
		洞板	厚 さ (mm)	6
		管 板 厚 さ (mm)		36
		管側	外 径 (mm)	562
		洞板	厚 さ (mm)	6
		管側平板厚さ (mm)		30
		伝熱管	外 径 (mm)	15.9
			厚 さ (mm)	1.2
		長 さ (mm)		5132
		洞 側 洞 板		SUS304
主要 材 料	管 板		SUS304	
	管 側 洞 板		SUS304	
	管 側 平 板		SUS304	
	伝 热 管		SUS304 LTB-S	
	1 次 冷 却 系 配 管		主要 寸 法	外 径 (mm)
				216.3φ(8B) 165.2φ(6B)
			厚 さ (mm)	6.5 5.0
	材 料		SUS304 TP	
2 次 冷 却 系 配 管	主要 寸 法	外 径 (mm)	267.4φ(10B)	216.3φ(8B)
		厚 さ (mm)	6.6	5.8
	材 料		SGP-E	

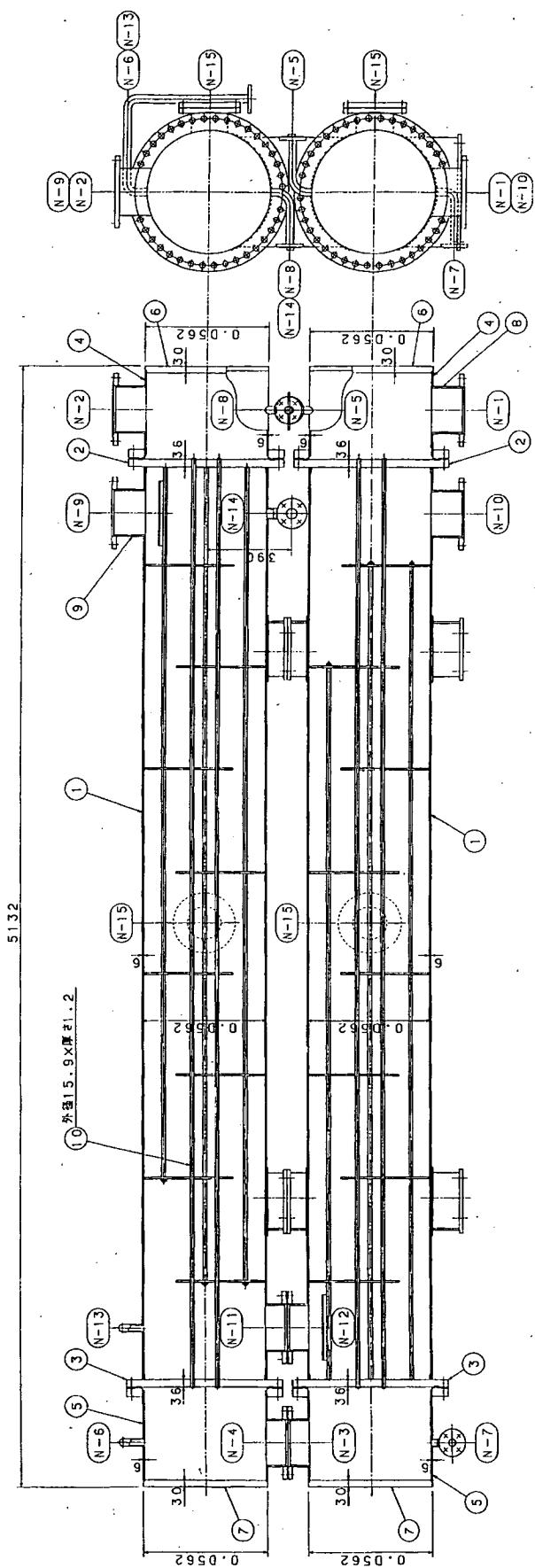
Table2.2 更新前後の熱交換器の比較

項 目		更 新 前	更 新 後
熱 交 換 器	伝熱管表面(m^2)	120 / 基	142 / 基
	寸法	胴外径(mm)	530
		伝熱管(mm)	15.9 φ × 1.2t × 4178ℓ × 300 本/基
		1 次側管台径(mm)	165.2(6B)
	材質	胴側胴板	SS41相当
		伝熱管	SUS304TP
		邪魔板	SS41相当
		スペーサー	SGP
		固定棒	SS41相当
2 次 系 配 管	緩衝板	なし	あり
	点検孔	なし	あり (6B)
	熱交換器出入口弁	玉形弁 (砲金)	バタフライ弁 (SUS、 テフロンシート)
	熱交換器入口圧力弁	なし	あり
温度計取付角度		流れ方向	流れと逆方向
熱交出口温度計取付位置		熱交換器 No.1、No.2 の出 口合流点より約 1m 下流	熱交換器 No.1、No.2 の出 口合流点より約 2.5m 下流

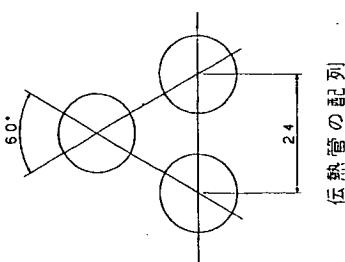
Table2.3 研究炉の熱交換器の仕様比較

		J R R - 4	J R R - 2	J R R - 3	J M T R
型 式		向流型直管 1折流2胴式	横型U字二重 管板2胴式	横型シェルアンド チューブ2胴式	豎型シェルアンド Uチューブ式
基 数		2	2	2	3
伝 热 面 積 (m ² /基)		142	266	1,060	1,100
水質	管 側	1次冷却水 (純水)	1次冷却水 (重水)	2次冷却水 (ろ過水)	1次冷却水 (純水)
	胴 側	2次冷却水 (ろ過水)	2次冷却水 (ろ過水)	1次冷却水 (純水)	2次冷却水 (ろ過水)
構 造 シ エ ル	胴 内 径 (mm)	550	950	1,650	1,600
	胴 長 (mm)	5,132	4,447	5,350	10,150
	最高使用圧力 (kg/cm ²)	5.0	5.27	8.0	5.0
	材 質	SUS 304	SUS 304	SUS 304L	SS 41
設 計 伝 熱 管	外 径 (mm)	15.9	15.9	19.0	19.0
	厚 さ (mm)	1.2	1.2	1.0	1.2
	長 さ (mm)	5,132	6,500	3,485	8,550
	本 数 (本/基)	341	825	5,496	1,152
	最高使用圧力 (kg/cm ²)	5.0	5.27	8.0	20.0
	材 質	SUS 304L	SUS 304L	SUS 316L	SUS 27
熱 的 的 計	原 子 炉 热 出 力 (kW)	3,500	10,000	19,500	50,000
	1 次 冷 却 水 流 量 (m ³ /h)	420	1,134	1,200	2,000
	入口温度 (°C) : Ti ₁	50.0	54.0	42.06	55.0
	出口温度 (°C) : Ti ₂	42.8	47.07	35.0	47.0
	2 次 冷 却 水 流 量 (m ³ /h)	432	772	1,450	1,300
	入口温度 (°C) : To ₁	32.3	27.5	30.0	31.0
	出口温度 (°C) : To ₂	39.3	38.7	35.83	43.0
	汚れ係数 (m ² h°C/kcal)	胴 側 0.0002 管 側 0.00015	0.0002 0.0001023	0.0001 0.0001	0.000276 0.000307
	総括伝熱係数 (kcal/m ² h°C)	1,117	1,256	1,613	1,252
	1 次冷却水温度効率 ⁹⁾⁾ : E ₁	0.41	0.26	0.59	0.33
熱出力/伝熱面積 (kW/m ²)		12.3	18.8	9.2	15.1

$$E_t = \frac{Ti_1 - Ti_2}{Ti_1 - To_1}$$



番号	品名	個数	呼び径	備考
部品表				
1	管側脇板	2	SUS304	板
2	管側脇板	2	SUS304	板
3	管側脇板	2	SUS304	板
4	管側脇板	2	SUS304	板
5	管側脇板	2	SUS304	板
6	管側脇板	2	SUS304	板
7	管側脇板	2	SUS304	板
8	管側脇板	2	SUS304	板
9	管側脇板	2	SUS304	板
10	伝熱管	341	SUS304LTB	



番号	品名	個数	材 料
部品表			
1	脇板	2	SUS304

Fig.2.1 JRR-4 热交換器

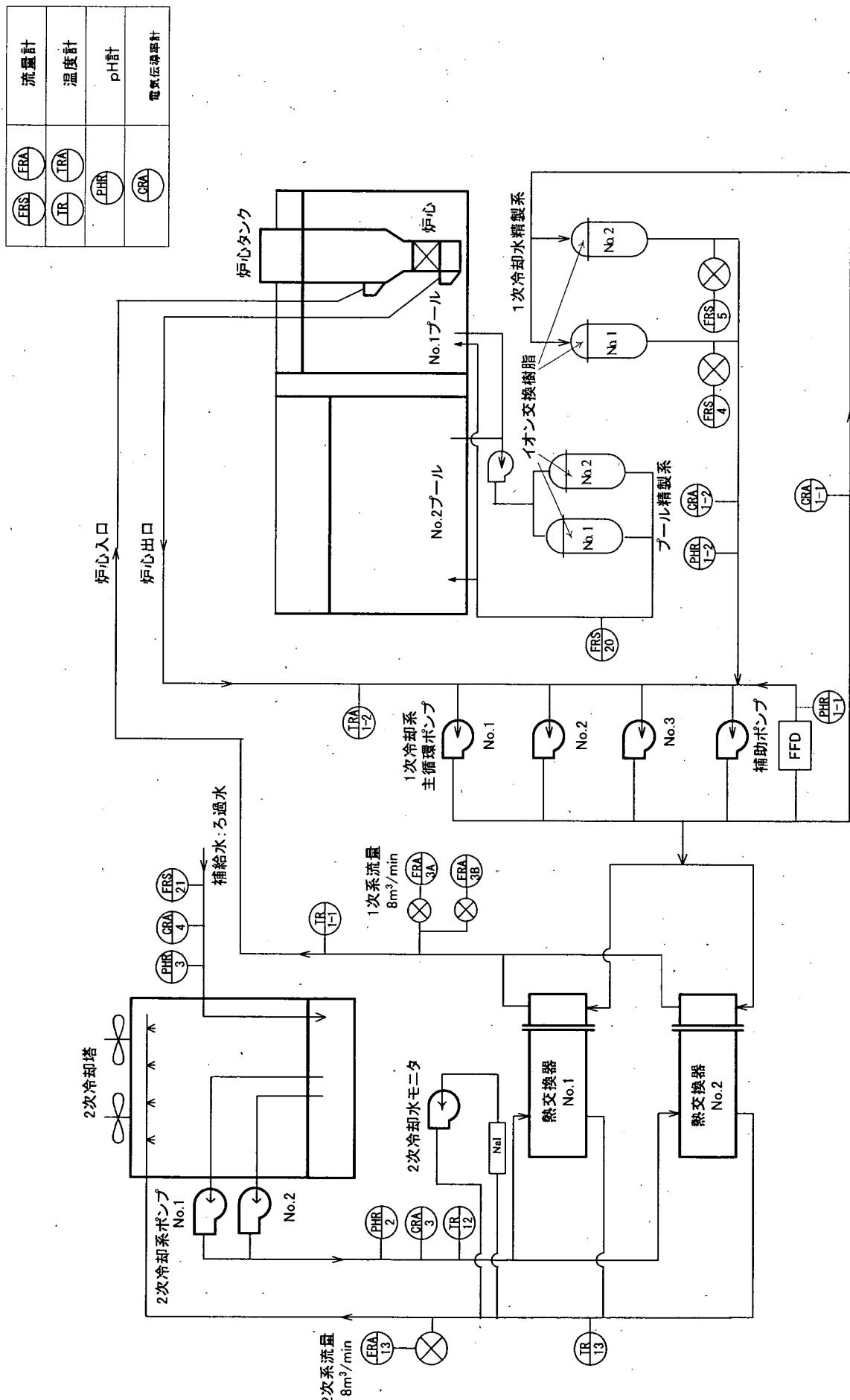


Fig.2.2 冷却系統図

3. 热交換器の性能管理

热交換器の冷却性能は、総括伝熱係数で管理を行っており、2次系の热交換器入口温度(TI-12)が上昇する夏期において、炉心出口温度をアラーム、スクラム設定値未満に保持できるように下限値を設定している。従来の管理では、アラーム設定値が55°Cであったため、TI-12を31.5°Cとした時の700 kcal/m²h°Cを下限値としていた。ただし、この条件では、1次冷却水が50°Cを超えて、プールからの蒸発量が増えるなどの施設管理上の問題があるため、炉心出口温度が約50°Cとなる900~1000 kcal/m²h°Cを目安に管理を行っていた。

3.1 総括伝熱係数

热交換器の冷却性能は総括伝熱係数(kcal/m²h°C)で管理されている。伝熱管のスライムやスケールの付着による総括伝熱係数の低下は、原子炉の炉心温度に影響を及ぼすため、定期的な洗浄が必要とされる。以下に総括伝熱係数の求め方を示す。Fig.3.1に対向流型热交換器における温度分布を示す。^{[3],[4]}

热交換量Qは(3-1)式から求める。

$$Q = W \cdot (t_1 - t_2) \quad (3-1)$$

総括伝熱係数Uは热交換器の伝熱の一般式である(3-2)式から求まる。

$$U = \frac{Q}{A \cdot \Delta T_m} \quad (3-2)$$

ただし

Q：単位時間当たり热交換量(kcal/h)

W : G·c

G : 流量(kg/h) G = 60(min/h) · 8(m³/min) · ρ_i

ρ_i : 水の密度(kg/m³) 992 kg/m³

c : 定圧比熱(kcal/kg°C) 0.999 kcal/kg°C

t₁ : 1次冷却水 热交換器入口温度(TR-1-2)

t₂ : 1次冷却水 热交換器出口温度(TR-1-1)

t'₁ : 2次冷却水 热交換器入口温度(TI-12)

t'₂ : 2次冷却水 热交換器出口温度(TI-13)

A : 伝熱面積(m²) A=284 m²

$$\Delta T_m : 対数平均温度差 \quad \Delta T_m = \frac{(t_1 - t'_2) - (t_2 - t'_1)}{\ln[(t_1 - t'_2)/(t_2 - t'_1)]} = -\frac{(t'_2 - t'_1) - (t_1 - t_2)}{\ln[(t_1 - t'_2)/(t_2 - t'_1)]} \quad (3-3)$$

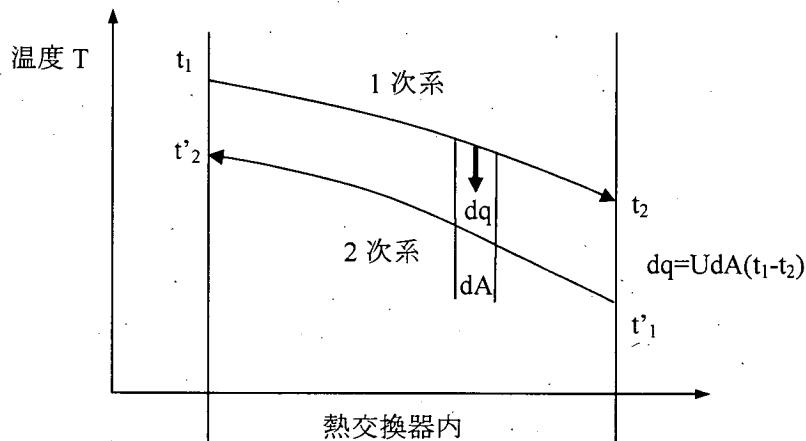


Fig.3.1 対向流型熱交換器における温度分布

(3-2)式から任意の熱交換量 Q に対して、総括伝熱係数 U と対数平均温度差 ΔT_m は反比例の関係にあることが分かる。つまり、伝熱管の汚れにより総括伝熱係数が低下した場合、対数平均温度差は大きくなる。定常状態の原子炉では、1次系の熱交換器出入口温度差(t_1-t_2)と2次系の熱交換器出入口温度差($t'_2-t'_1$)は原子炉出力、冷却水流量により決まるから、汚れにより総括伝熱係数が低下すると対数平均温度差が大きくなることにより、1次冷却水熱交換器入口温度と2次冷却水熱交換器入口温度との差 ($t_1-t'_1$) が大きくなる。これは、冷却性能の低下を意味する。

3.2 総括伝熱係数の変化傾向

総括伝熱係数は熱交換器の性能の指標となるもので、伝熱管に腐食生成物やスケール、スライムが付着すると低下する。JRR-4 の総括伝熱係数の変化は次のようなる。

(3-2)式より求めた総括伝熱係数の変化傾向を Fig.3.2 と Fig.3.3 に示す。Fig.3.2 は熱交換器の更新後から JRR-4 改造で原子炉を停止するまでの期間(1992年2月～1996年1月)の変化である。その間 1992 年 2 月～1994 年 5 月まで洗浄は行っていない。計算は、3500kW 運転時に出力到達 2 時間後のデータを使用している。

汚れの無い状態で $1908 \text{ kcal}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ (設計上は $1930 \text{ kcal}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}$) あった総括伝熱係数は約 2 年半後の 1994 年 5 月には $1200 \text{ kcal}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ 以下まで低下している。Fig.3.2 で洗浄を行っていない 1992 年 2 月～1994 年 5 月の $200 \text{ kcal}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ ごとの低下率を Table3.1 に示す。汚れが進み総括伝熱係数が低下すると、低下率は小さくなることが分かる。 $1800 \sim 1600 \text{ kcal}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ 間では、 $1.27 \text{ kcal}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C/day}$ であった低下率は $1400 \sim 1200 \text{ kcal}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ では $0.49 \text{ kcal}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C/day}$ と

半分以下になっている。これは、伝熱管のスケールやスライム等の付着層の厚みが運転時間に比例して増すとした場合よりも、付着層の厚みが増すことによる流れ抵抗により、汚れの剥離作用が増えているものと考えられる。

Fig.3.3 は熱交換器更新後の1回目の化学洗浄から2回目の化学洗浄までの期間(1998年9月～2004年10月)の変化である。その間の管理方法として、4.2で述べるように、2次冷却水を抜き、乾燥させて、付着物をはく離させる乾燥洗浄を行っている。図中、破線で示す総括伝熱係数の回復が乾燥洗浄によるものである。2003年、2004年の施設定期自主検査期間中は、乾燥空気を使った乾燥洗浄を行い、それまでの乾燥洗浄に比べ、乾燥期間が短かったににもかかわらず、総括伝熱係数は大きく回復した。乾燥空気の利用により、洗浄効率が上げることを確認した。乾燥洗浄については、4.2で詳しく述べる。

Table3.1 総括伝熱係数値と低下率

総括伝熱係数(kcal/m ² h°C)	低下率(kcal/m ² h°C/day)	
	1992年～1994年 (Fig.3.2)	1998年～2004年 (Fig.3.3)
1800～1600	1.27	1.90
1600～1400	1.05	1.37
1400～1200	0.49	1.05

乾燥洗浄を行った1998年9月～2004年2月の200 kcal/m²h°Cごとの低下率をTable3.1に示す。洗浄を行っていない場合と同様、係数の低下により低下率は小さくなるが、同じ総括伝熱係数の範囲の低下率は、乾燥洗浄を行った場合は大きくなる事が分かる。これは、伝熱管表面の剥離されなかつた残存スケール、スライム等に、汚れが付き易い状態になっていると考えられる。しかし、年に2回の乾燥洗浄を行うことで、原子炉の冷却性能を維持することが可能である。

3.3 総括伝熱係数の管理値

原子炉の炉心出口温度(TRA-1-2)のアラーム(47°C)、スクラム(60°C)設定値を満足するため、TI-12をパラメーターに、TRA-1-2を47°C未満に維持するのに必要な総括伝熱係数を求めた。なお、アラーム設定値は、当初の55°Cから47°Cに変更している。炉心入口最高温度を40°Cとして、定格出力3.5MW運転した場合の炉心出口平均温度がアラーム値47°Cである。

(3-1)式から熱交換量を求ると

$$Q = W \cdot (t_1 - t_2) = 60 \times 992 \times 0.999 \times 8.0 \times 6.3 = 2.997 \times 10^6 (\text{kcal} / \text{h})$$

となる。

定常状態の原子炉では、1次系の熱交換器出入口温度差(t_1-t_2)と2次系の熱交換器出入口温度差($t'_2-t'_1$)は原子炉出力、冷却水流量により決まる。TRA-1-2 (t_1')は、2次系熱交換器入口温度(TI-12)と総括伝熱係数から決まるから、TRA-1-2を47°C、TI-12をx、過去のデータの最高値から $t_1-t_2=6.3$ 、 $t'_2-t'_1=5.9$ として(3-3)式にあてはめると

$$\Delta T_m = \frac{(t_1 - t'_2) - (t_2 - t'_1)}{\ln [(t_1 - t'_2)/(t_2 - t'_1)]} = \frac{0.4}{\ln [(41.1 - x)/(40.7 - x)]}$$

となる。

これと(3-2)式から炉心出口温度を47°C未満にするのに必要な総括伝熱係数は

$$U = \frac{Q}{A \cdot \Delta T_m} = \frac{Q}{284 \cdot \frac{0.4}{\ln [(41.1 - x)/(40.7 - x)]}} \quad (3-4)$$

から求まる。

この結果をFig.3.4に示す。TI-12を近年最高の31°Cとした場合に必要な総括伝熱係数は、1066 kcal/m²h°Cと求まる。この値から総括伝熱係数の下限値を1100 kcal/m²h°Cと設定した場合、この値は近年における最高の値であるので、下限値 1100 kcal/m²h°Cは十分に安全側に余裕があると言える。出口温度をスクラム設定値の60°Cとした場合の結果もFig.3.4に示す。TI-12が31°Cで、必要な総括伝熱係数は345 kcal/m²h°Cである。スクラム設定値までには、さらなる余裕があることが分かる。

以上から、従来の総括伝熱係数の管理値である900~1000 kcal/m²h°Cでは、近年の夏期最高温度でアラーム設定値を超える可能性がある。今後は下限値 1100 kcal/m²h°Cでの管理が望ましい。

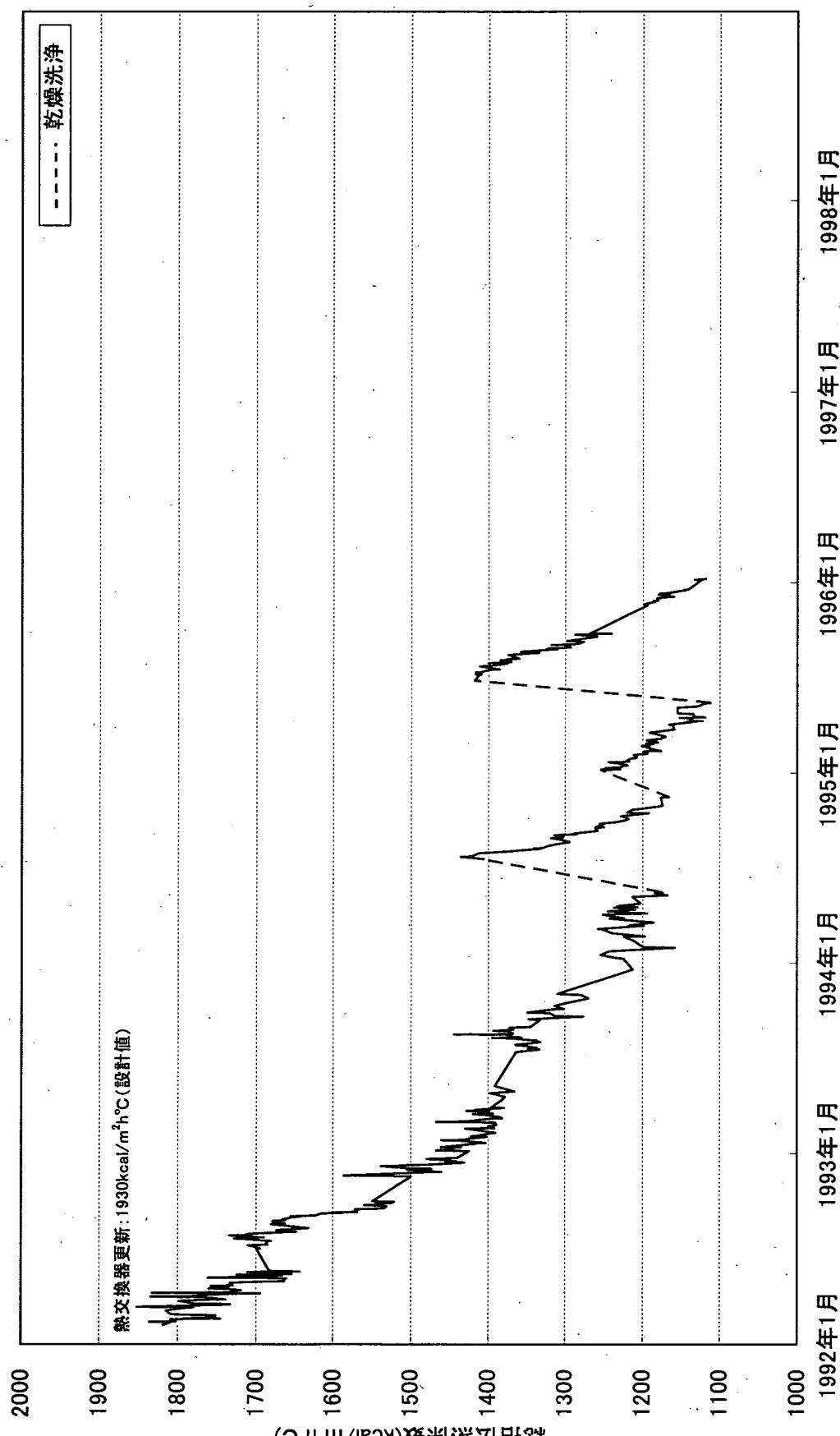


Fig.3.2 総括伝熱係数の変化(1992.2～1996.1)

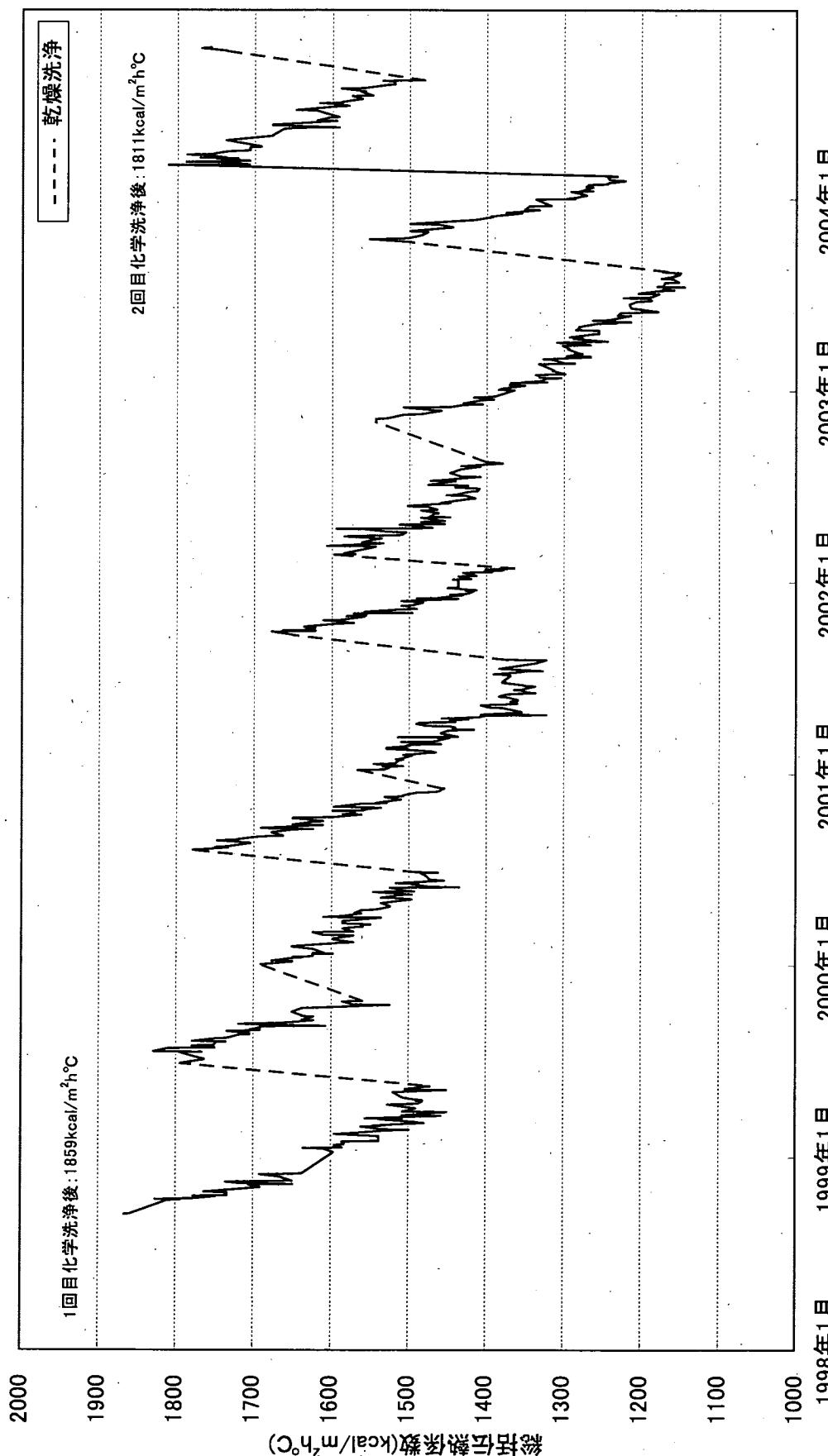


Fig.3.3 総括伝熱係数の変化(1998.9~2004.10)

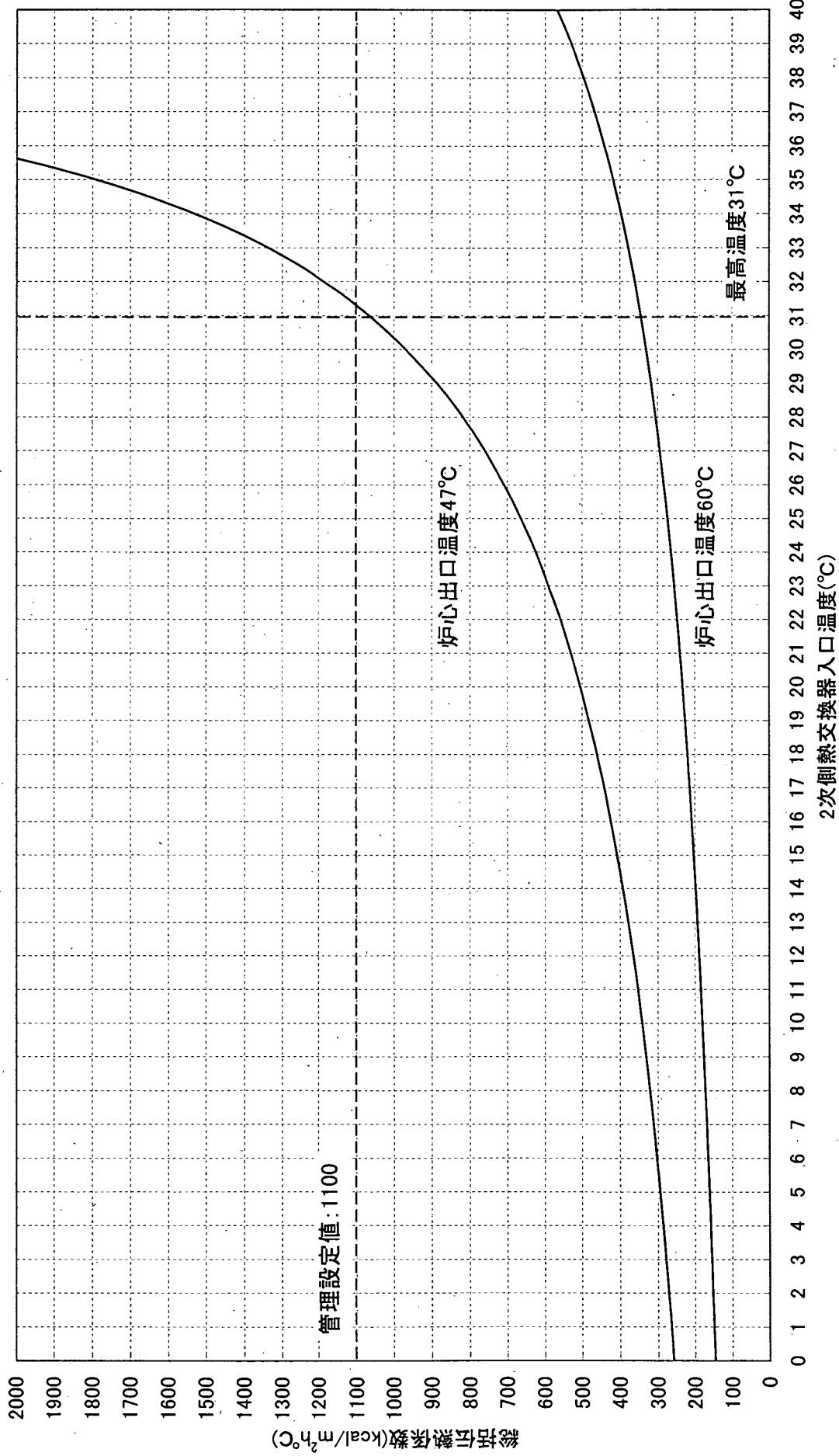


Fig.3.4 総括伝熱係数の管理値

4. 熱交換器の洗浄

総括伝熱係数を低下させる主な要因は、伝熱管外表面（2次冷却水側）の汚れである。2次冷却水は、2次冷却塔で外気を取り入れることで熱除去を行っているため、外気中の塵埃が2次冷却水に直接取り込まれる。塵埃とろ過水中の不純物や微生物が作用して、伝熱管外表面にスライムやスケールを形成する。それらの汚れを取り除くために、JRR-4では、2次冷却水側に対して化学洗浄、乾燥洗浄を行っている。

従来までは、2~3年毎に化学洗浄を行ってきたが、2回/年の乾燥洗浄を行うことにより、化学洗浄の期間を5年以上に延ばせることが分かった。

4.1 化学洗浄について

定期的に総括伝熱係数の回復のために化学洗浄（スライム洗浄、酸洗浄）を行っている。洗浄の目安は総括伝熱係数が $1700\text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ 以上に回復することである。スライム洗浄は3%過酸化水素でスライム除去を行い、酸洗浄は3%クエン酸モノアンモンによりスケール除去を行う。2004年2月に行われた化学洗浄を例に洗浄方法の説明を行う。この洗浄で、総括伝熱係数は $1240\text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ から $1811\text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ に回復した。

4.1.1 洗浄工程

洗浄の概要をTable4.1に示す。スライム洗浄は濁度と過酸化水素濃度が略一定となるまで行い、酸洗浄は溶出鉄イオン濃度が略一定となるまで行う。スライム洗浄は、合計2回行った。スライム洗浄の濁度変化をFig.4.1に、過酸化水素濃度変化をFig.4.2に示す。ただし、1回目のスライム洗浄中に、No.1とNo.2熱交換器の流量バランスが崩れていることが分かり、2回目のスライム洗浄では、1基ごとの通液、2基同時通液を繰り返し行っている。濁度が略一定になったことは、2基同時通液の結果より確認した。酸洗浄の鉄イオン濃度、温度、pH変化をFig.4.3に示す。

4.1.2 化学洗浄による腐食量検査

化学洗浄を行う場合、熱交換器、2次系配管と同質材料のテストピースを用いて、洗浄液による腐食量を測定する。その結果をTable4.2に示す。洗浄前後におけるステンレス鋼配管の重量差は微小であり、かつ目視による異常もないことから、化学洗浄による腐食は無いと言える。炭素鋼配管での腐食は、僅かながら生じているが、肉厚で換算すれば、 $3 \times 10^{-3}\text{ mm}$ 程度の減肉であり、問題にはならない。

Table4.1 化学洗浄の概要

工程	薬品名	仕様	処理条件	判断条件
本体水張り	—	—	常温	—
スライム洗浄 (2回)	過酸化水素 界面活性剤	3.0% 0.025%	常温	濁度、H ₂ O ₂ 濃度が一定となるまで 同じ作業を2回行う
水洗	—	—	常温	濁度が一定となるまで
本体水張り 昇温	—	—	温度 ~60°C	蒸気にて、2次系側を昇温
酸洗浄	インヒビタ クエン酸モノアンモン	0.3% 3.0%	温度 ~60°C	溶出鉄イオン濃度が一定となるまで
水洗	—	—	常温	全鉄イオン濃度が 50ppm 以下 pHが5程度になるまで
最終水洗	—	—	常温	濁度が一定となるまで

Table4.2 テストピース重量測定

番号 / 材質	表面積(cm ²)	前重量(g)	後重量(g)	減量(mg)	腐食量(mg/cm ²)
TP1 SUS304	24.2	22.0546	22.0546	0.0	0.000
TP2 SUS304	24.2	22.2481	22.2480	0.1	0.004
TP3 SS41	23.9	22.5042	22.4439	60.3	2.523
TP4 SS41	23.9	22.4944	22.4406	53.8	2.251

4.1.3 洗浄液の化学分析

1回目のスライム洗浄液の化学分析を行った。この洗浄液には、熱交換器の伝熱管表面や配管に付着した汚れが含まれており、分析は沈殿物と溶液に分けて行った。その結果をTable4.3とTable4.4に示す。

沈殿物の分析方法は、フッ素、塩素、硝酸、硫酸はイオンクロマトグラフィで行い、その他はICP発光分析法(ICP-AES)を使用した。洗浄液及び過水の分析には、フッ素、塩素、硝酸、硫酸はイオンクロマトグラフィで、その他はICP発光分析法(ICP-AES)を使用

した。沈殿物の主成分はケイ素、鉄、アルミニウムの酸化物である。これらは、2次冷却系配管や冷却塔の腐食によるもの、冷却塔から混入した土壌成分、ろ過水が濃縮して結晶化したもの等のスケールであると考えられる。アルミニウムは系内の材料に使用していないこと、ろ過水に含まれないことから、土壌成分によるものである。

その他、ナトリウム、マグネシウム、カルシウムは、冷却塔から混入した土壌成分と、ろ過水が濃縮して結晶化したものである。土壌成分は開放型である2次冷却塔から系内に混入てくる。

系内の腐食については、材料由来(SUS304、SS41等)の元素である鉄、ケイ素、マンガン、クロム、チタンが検出されているものの、その濃度は極めて低い。熱交換器に関してはSUS304に更新して10年であることから、腐食は起きていないものと考える。しかし、炭素鋼を用いている2次冷却系配管では、部分的に腐食が起こっていることも考えられるが、付録1に示す配管肉厚調査から、腐食量は少なく健全であることを確認している。

今後も化学洗浄を行う場合には、洗浄液や伝熱管表面の汚れを採集して成分分析を行う必要性がある。

Table4.3 スライム洗浄液中の沈殿物の分析結果

元素	定量値(%)	元素	定量値(ppm)
Fe	14.7±0.28	Cr	300±15
Si	16*	Ba	230±20
Al	5.13±0.12	Sr	130±4
Zn	1.34±0.05	F	<100
Mn	0.22±0.01	Cl	<100
Na	0.32±0.01	NO ₃	<100
Mg	0.50±0.02	SO ₃	<50
Ca	0.45±0.02		
Ti	0.21±0.01		

*:参考値

Table4.4 スライム洗浄液及びろ過水の分析結果

元素	Na	Mg	Ca	Mn	Zn	Sr
ろ過水	10±0.2	4.0±0.1	15±0.3	ND	0.04±0.01	0.08±0.01
スライム洗浄液	16±0.3	4.8±0.1	26±1	1.2±0.1	2.8±0.1	0.14±0.01
元素	Ba	Si	F	Cl	NO ₃	SO ₄
ろ過水	0.06±0.01	3.7±0.1	0.88±0.02	11±0.5	2.9±0.1	21±1
スライム洗浄液	0.10±0.01	7.1±0.2	7.2±0.2	8.6±0.4	4.8±0.2	27±1

4.1.4 洗浄前後の伝熱管表面写真

洗浄前後の2次側伝熱管表面の写真をFig.4.4、Fig.4.5に示す。洗浄前の伝熱管表面の茶褐色の付着物は、化学洗浄によって完全に除去されていることが確認できる。

4.1.5 今後の化学洗浄

今回、洗浄効率を上げるために以下のことが分かった。1回目のスライム洗浄は、2基の熱交換器を同時に行ったが、一方の熱交換器の濁度、 H_2O_2 濃度が平衡になるまでに時間を要した。これは、2基の熱交換器の流量バランスが崩れているものと推察され、洗浄効果に差が生じる可能性があるため、2回目のスライム洗浄と酸洗浄は1基ごと洗浄を行った。また、洗浄効率を上げるために2回目のスライム洗浄は40°C程度まで昇温して行った。今後は、1基ごと、40°C程度まで昇温(スライム洗浄)して行い、洗浄効率を上げる必要がある。

熱交換器内の点検孔からは観察できない深心部や端部等にスラッジが残っていることが考えられる。次回以降の洗浄には、スラッジを系外に放出するため、90m³/h以上の大量ポンプを使用して、洗浄を行うことが望まれる。

今回の洗浄範囲は、2基の熱交換器とそれに付帯する一部配管であったが、炭素鋼配管を使用している2次冷却系ポンプ廻りの配管の洗浄を行うことが望まれる。

化学洗浄の問題点をいくつか挙げると、コスト、洗浄液による管の腐食がある。これらは洗浄回数を減らすこと、洗浄効率を向上させることにより減らしていく。また、スラッジを含む廃液についても、環境面やコスト面で問題となり減量が求められる。県公害防止条例の排水基準値($pH: 5\sim 9$ 、COD: 40mg/l以下、SS: 65mg/l以下)を満たさないものについては、産業廃棄物として処理を行っている。(第2回化学洗浄では、28140kgの廃液を産業廃棄物として処理している。)

4.2 乾燥洗浄について

化学洗浄とは別に、熱交換器の冷却性能維持のために乾燥洗浄を行っている。Fig.3.2、Fig.3.3に破線で示す回復が乾燥洗浄によるものである。これは原子炉停止期間にも、伝熱管へのスライム等の付着が進み、冷却性能低下が起こるための対策として始まったものである。

乾燥洗浄は、熱交換器の2次側冷却水を抜き、熱交換器の点検孔を開放して伝熱管表面を乾燥させ、付着したスライム等を乾燥はく離し、循環水のフラッシングにより除去する方法である。従来は、点検孔を開放し、自然換気による乾燥を行っていた。2003年9月の施設定期自主検査では、開放による乾燥にプラスして乾燥空気を利用した乾燥を行い、2004年9月の施設定期自主検査では、送風機による通風を行い乾燥させた後、乾燥空気を利用した乾燥を行った。いずれの強制的な乾燥方法においても乾燥期間が短かったにも係らず、

総括伝熱係数の大きな回復が得られた。1週間ほどの乾燥で約400 kcal/m²h°C回復した。乾燥空気を使用していない場合は、2週間ほどの乾燥で100~300 kcal/m²h°Cである。

年2回乾燥洗浄を行った場合は、化学洗浄の周期は5年から6年と考えているが、乾燥洗浄が行えなかった等で総括伝熱係数の早期の低下が起こった場合は、より短い周期で化学洗浄を行う必要がある。1年間、乾燥洗浄が行えなかった場合は、総括伝熱係数は300~400 kcal/m²h°C下がると考えられるから、1100 kcal/m²h°Cを下回る可能性も出てくる。半年、1年先を考慮した管理が必要とされる。

乾燥空気を利用した洗浄方法をFig.4.6に、乾燥洗浄機器の主な仕様をTable4.5に示す。尚、乾燥空気源装置は、JRR-4の核計装設備に乾燥空気を供給するために使用されているものである。

Table4.5 乾燥洗浄機器の主な仕様

乾燥空気源装置	定格空気供給量：240 l/min 露点温度：30°Cで10°C以下
空気供給量	熱交換器2次側への空気供給量：17.6 l/min (核計装設備への空気供給量：75.8 l/min)
熱交換器2次側の容積	1400 l/基 × 2基
熱交換器2次側の乾燥回数	9.1回/日
送風機の風量	34 m ³ /min

4.3 1次冷却水側の洗浄

平成3年に熱交換器を更新してから、1次側の洗浄は行っていない。本来、純水を使用しているため、洗浄の必要性は少ないと考えている。Table4.6に旧熱交換器で2回行われた1次冷却水側の洗浄結果を示す。洗浄方法はナイロンブラシによるブラシ洗浄である。その回復は僅かであり、今後10年以内に洗浄の必要性は無いと考えている。2次冷却水側の洗浄での総括伝熱係数が十分であること、線量の上昇がないことから、1次冷却水側の汚れの付着が無いことを確認している。

Table4.6 1次側化学洗浄結果（旧熱交換器）

洗浄時期	総括伝熱係数 (kcal/m ² h°C)		
	洗浄前	洗浄後	回復値
1976年8月	1050	1300	250
1988年6月	1164	1235	71

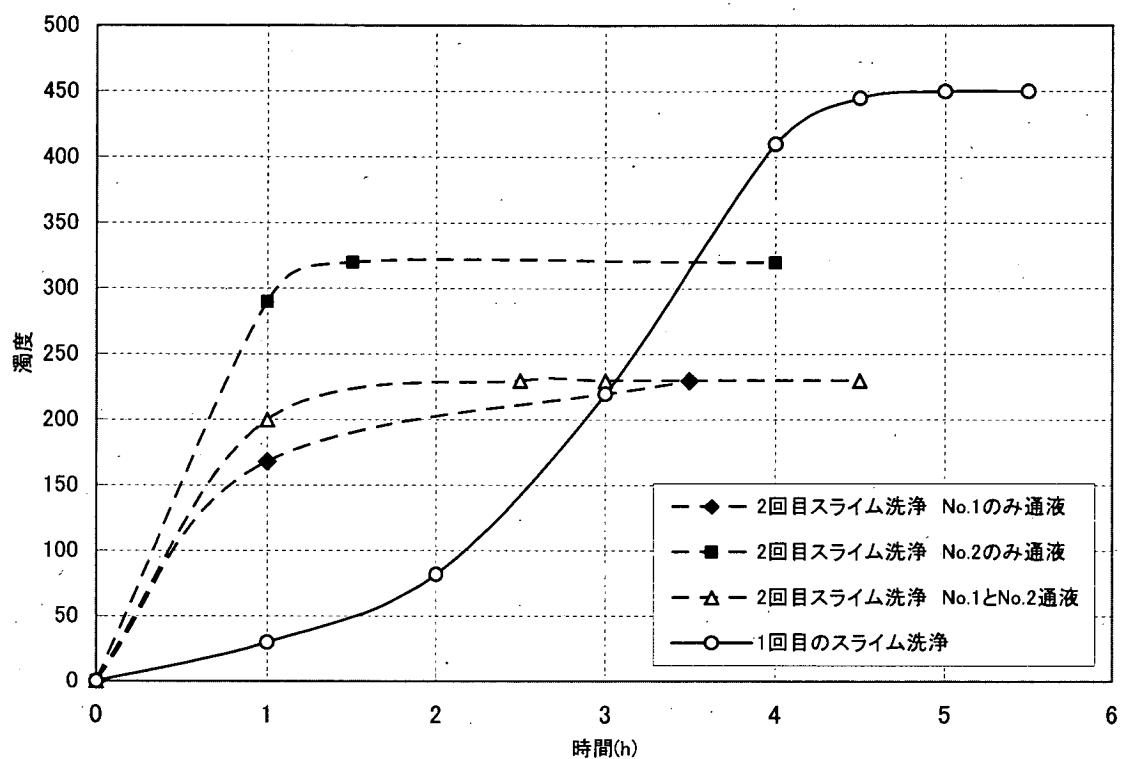


Fig.4.1 スライム洗浄濁度変化

1回目のスライム洗浄中に、No.1とNo.2熱交換器の流量のバランスが崩れていることが分かり、2回目のスライム洗浄からは、1基ごと洗浄を行っている。

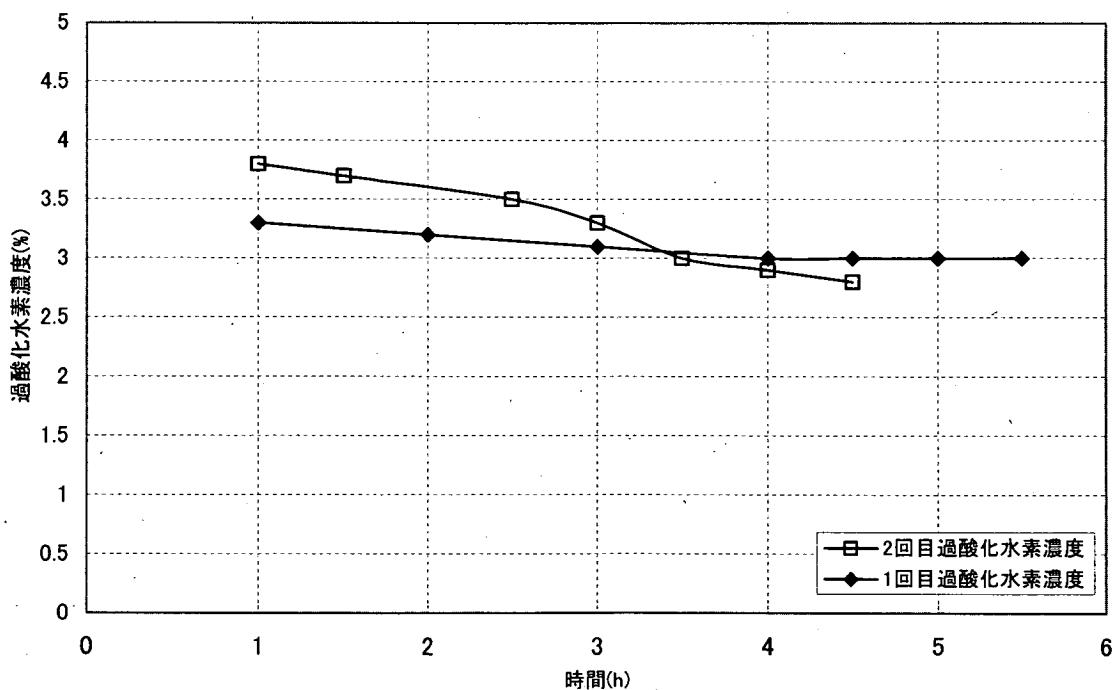


Fig.4.2 スライム洗浄過酸化水素変化

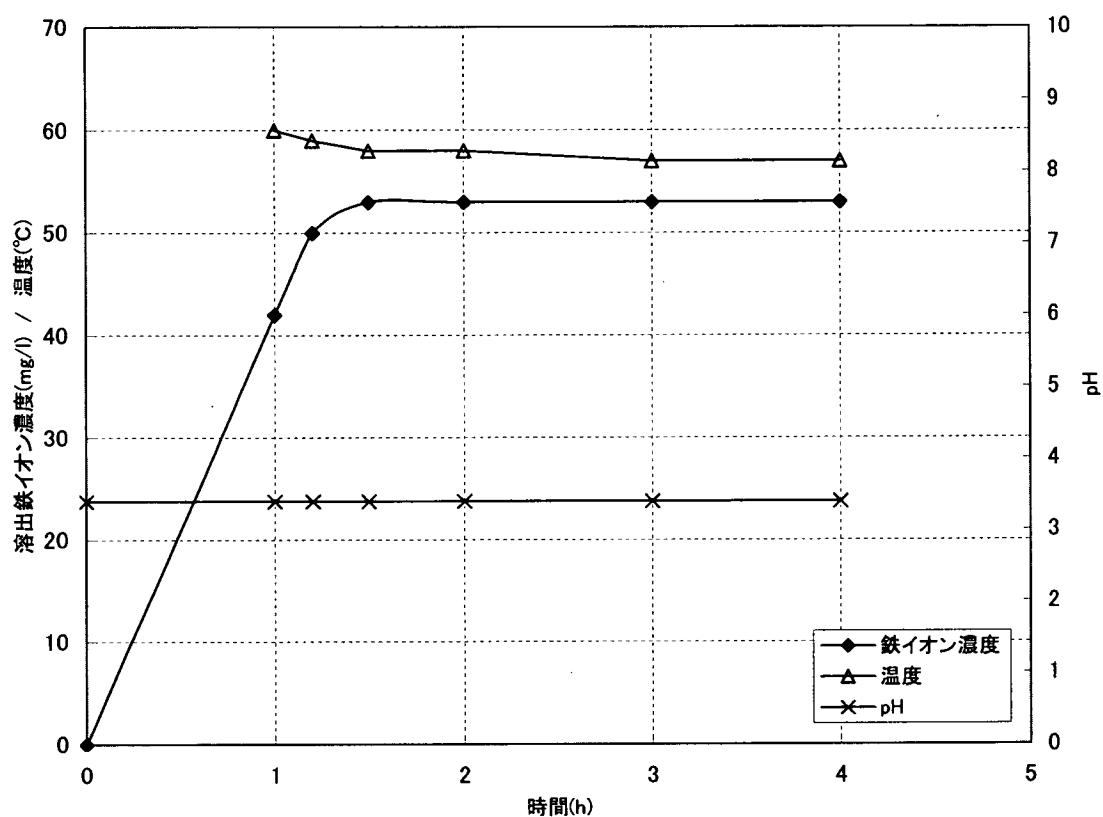


Fig.4.3 酸洗浄鉄イオン、温度、pH 変化

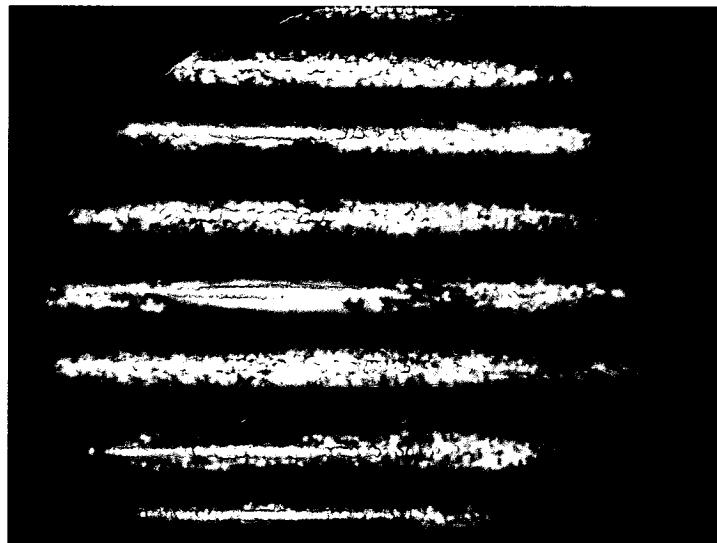


Fig.4.4 洗浄前の伝熱管表面

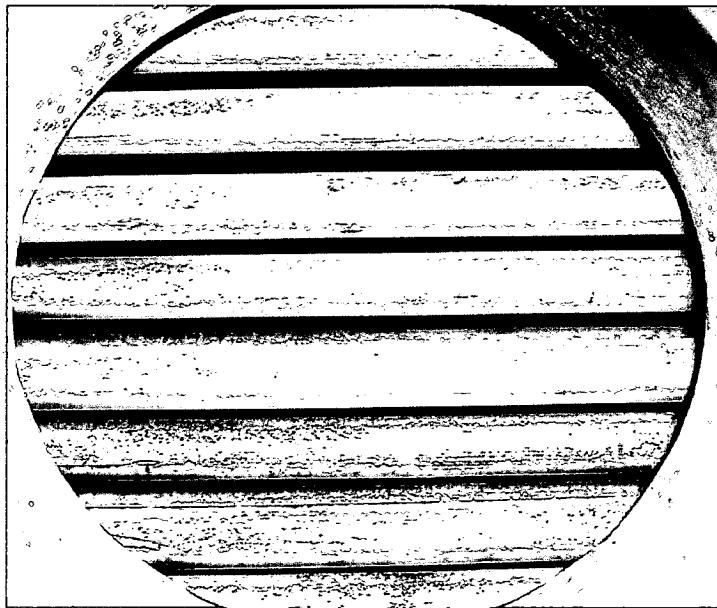


Fig.4.5 洗浄後の伝熱管表面

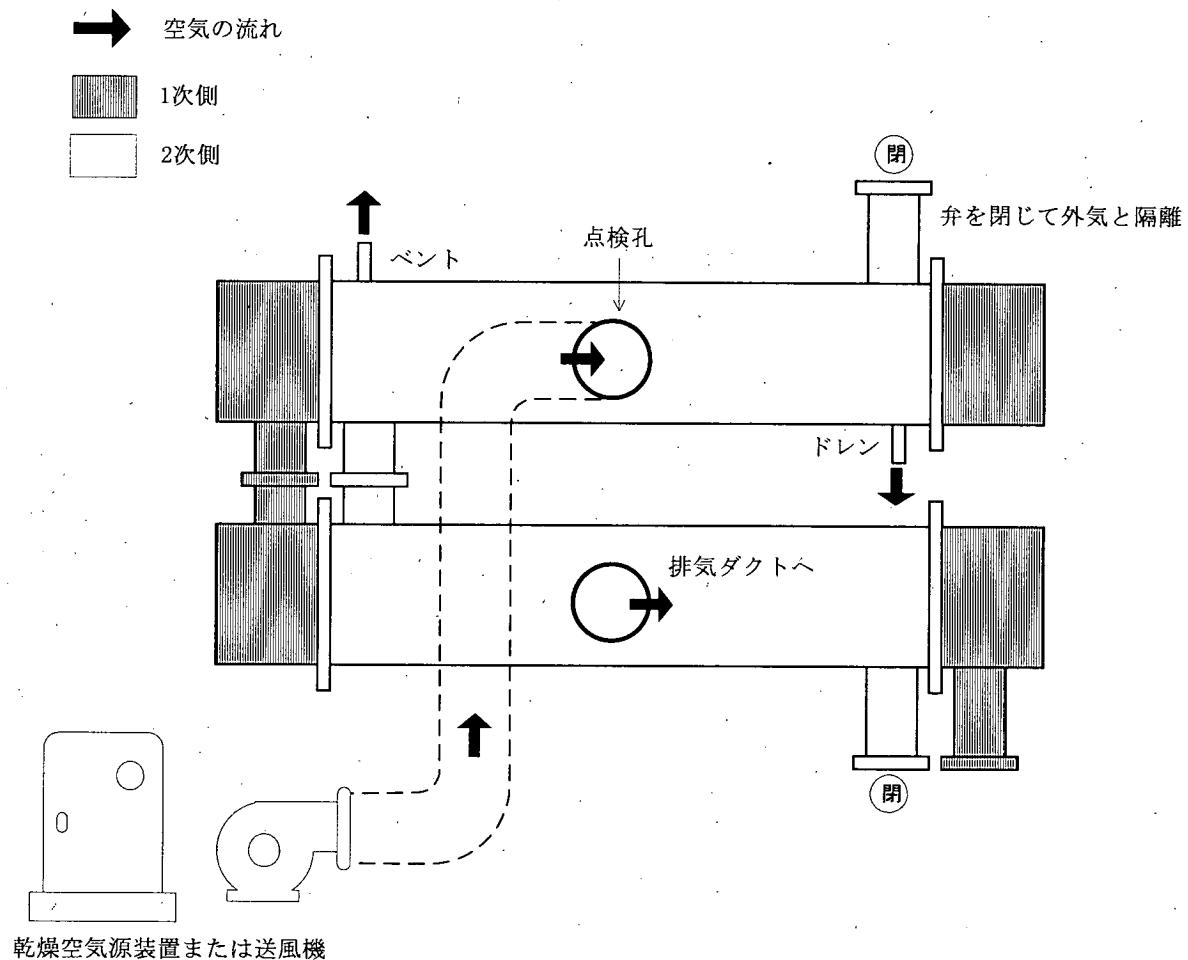


Fig.4.6 热交換器乾燥洗浄方法

5. 冷却水の管理

5.1 1次冷却水の管理

1次冷却水側は外部との接触がないために、スライムやスケールの問題はない。1次冷却水の管理は、炉心タンクやプール壁の材料であるアルミニウムの腐食防止のために、イオン交換樹脂により電気伝導率 $10 \mu \text{S}/\text{cm}$ 以下、pH 5.5~7.0 で管理している。

5.2 2次冷却水の管理

2次冷却水は、ろ過水を使用していること、2次冷却塔が開放型であることから、水質、温度（運転中 20~30°C 前後）ともスライムやスケールが発生しやすい環境となっている。JRR-4 では、2次冷却塔ポンドに強制的にろ過水を補給し、水質の維持に努めている。

5.2.1 補給水による水質管理

2次冷却水の水質管理は、スライム発生やスケール防止に必要である。そこで、水質維持のために、原子炉運転中（強制循環運転）に2次冷却塔ポンドへ $8 \text{m}^3/\text{h}$ のろ過水を補給し、2次冷却水の蒸発による水量減少とそれによるカルシウムやシリカ等のミネラル分の濃縮を防いでいる。汚れの指標である電気伝導率は $200 \sim 300 \mu \text{S}/\text{cm}$ 、塩によるアルカリ性への移行を防ぐために pH 6~9 で管理している。補給水 $8 \text{m}^3/\text{h}$ については次のように計算できる。

$$\text{補給水量 } (\text{m}^3/\text{h}) = \text{蒸発水量} + \text{飛散水量} + \text{プローダウン水量}$$

ここで、飛散水量とは冷却塔から冷却系外に排出される水滴を、プローダウン水量は、蒸発による冷却水のミネラル分の濃縮度を、望ましい状態に保つために必要な水量のことである。濃縮度は、2~3倍で管理することが望ましいとされている。^[5] 現在、濃縮度は約2倍であり、 $8 \text{m}^3/\text{h}$ の補給水量が適切であることが分かっている。

5.2.2 防食剤の投入について

2次冷却水のスケール発生を抑えるために、多くの研究炉では防食剤を加える管理を行っている。JRR-4 でも、旧熱交換器において、炭素鋼の腐食防止のために重合リン酸塩系防食剤（クリゼット 306／栗田 k·k）の使用を行った。メーカーの推奨する濃度 80~120ppm のところを、濃度約 40ppm で 2年間投入を行った。鉄分濃度がそれまでの値より減少し防食

効果が認められたが、濃度を約 60ppm まで増やしたところ、総括伝熱係数の急激な低下が生じた。防食剤投入により形成される防食皮膜が、胴板などの炭素鋼部だけでなく、ステンレス鋼製の伝熱管表面にも形成されて冷却性能の低下を招いたと判断された。Fig.5.1 は調査時に作成したグラフで、防食剤投入による総括伝熱係数の急激な低下が観測されている。^[1] 総括伝熱係数の低下がそれまでの 2 倍に達したため、防食剤の投入は中止した。5.2.1 に述べたように、pH、濃縮度ともに基準内であることから、今後も補給水 8m³/h での管理を継続していく。他の研究炉での管理は以下のようにになっている。

JRR-3 の 2 次冷却水の水質管理では、防食剤、防スケール剤、スライム防止剤による管理を行っている。ホスホン酸系の防食・防スケール剤（エバガード 1850）は、原子炉運転中 8ml/min（濃度 100mg/l）の連続注入で、年間約 3205kg 使用している。有機窒素系のスライム防止剤（エバサニー 4600）は、週に 1 度約 67l（濃度 100mg/l）を注入し、年間約 4500kg 使用している。スライム防止剤には、有機窒素系と塩素系のものがあるが、塩素系がステンレス鋼へ腐食性を示す恐れがあるので、有機窒素系は炭素鋼やステンレス鋼に対する腐食性は無い。水質は、pH6~9、電気伝導率 1000 μS/cm 以下で管理を行っている。

JRR-3 では、JRR-4 で見られたような防食剤による総括伝熱係数の急激な低下は起こっていない。その理由としては、JRR-3 では、年間 3 回ボール洗浄を行うことで、必要以上の防食皮膜の生成を防いでいると考えられる。また、防食剤の種類による影響もある。JRR-4 で使用した重合リン酸系の防食剤は、重合リン酸の加水分解により、伝熱管表面に必要以上の防食皮膜が形成されることがある。それに対し、ホスホン酸系の防食剤は加水分解され難く、必要以上の防食皮膜は形成されず、総括伝熱係数の大きな低下は起こり難いものと考えられる。

JMTR では、防食、pH 調整、塩素濃度管理を行っている。防食剤は、500ml/min で注入し、年間 16000kg 使用している。pH 調整には硫酸を使用し、pH7.5~7.9 に調整を行っている。硫酸の年間使用量は 8100kg である。塩素濃度の管理は、系内の藻の発生を防止するために使用され、塩素濃度が 0.5ppm 以下になると次亜塩素酸ソーダの注入を行っている。次亜塩素酸ソーダの年間使用量は 10500kg である。

5.2.3 2 次冷却水モニター

原子炉運転中に 2 次冷却水モニター(NaI シンチレーションカウンタ)で 2 次冷却水の放射能濃度（主に ²⁴Na）を監視することにより、熱交換器の健全性を確認している。蒸発や飛散による放射性物質の損失がなければ、 6×10^{-3} m³/day 程度の 1 次冷却水の漏洩を検出することができる。

5.3 水質の管理記録

JRR-4 では、次のようなタイミングで水・ガス点検を実施している。Table5.1 に点検表を示す。Fig.2.2 に計器配置を示す。

- (1) 3500kW 運転時に 1 回／週の点検をする。
- (2) 月例点検の時に、1 日目（月曜）は No.1 プール、2 日目（火曜）は No.2 プールの点検をする。1 日目に No.1 プールを 2 日目に No.2 プールを精製するからである。
- (3) プール水の pH が、5.5~7.0 の範囲を外れて、必要とされる場合に点検をする。

Table5.1 水・ガス点検表(例)

JRR-4 水・ガス点検表

運転サイクル: R4-16-01 出力: 3500 kW
 測定日: 平成 16年 4月 7日 水曜日 天気 晴れ

研究炉技術管理課		
課長	係長	担当

測定項目		実測値	制御室指示値	測定時刻	備考	測定者
1次冷却系	pH	樹脂塔入口(PHR1-1) 樹脂塔出口(PHR1-2)	6.50 6.50		:	
	電気伝導率 $\mu\text{S}/\text{cm}$	樹脂塔入口(CRA1-1) 樹脂塔出口(CRA1-2)		0.62 0.20	:	
	精製系流量 m^3/h	(FRS-4) (FRS-5)		0 9.57	:	
	積算精製量 m^3	(FRS-4) (FRS-5)		3974.25 44374.69	:	
	全 β 放射能 Bq/cm^3		8.20×10^1		:	
	全 γ 放射能 Bq/cm^3		1.22×10^2		:	
	破損燃料検出モニタ指示 min^{-1}		11.1			
	放射能濃度 Bq/cm^3	Na-24 ($\times 10^2$) Ar-41 ($\times 10^2$) Mn-56	0.67 1.44 5.66		:	
	pH	2次冷却水(PHR-3) 補給水(PHR-2)	7.01 7.75		:	
	電気伝導率 $\mu\text{S}/\text{cm}$	2次冷却水(CRA-4) 補給水(CRA-3)	122.0 219.0		濃縮倍数 (1.8)	
2次冷却系	温度 $^{\circ}\text{C}$	熱交入口(TR-12) 熱交出口(TR-13)	20.21 25.56		:	
	補給水量 m^3/h		7.90		:	
	炉プール水精製系樹脂塔入口	サンプリング日時 No.1 4月5日 14時6分 No.2 4月6日 14時10分	メジャーリング日時 4月5日 14時13分 4月6日 14時14分	pH 6.11 6.38	電気伝導率 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 1.14 1.17	測定者
	トリチウム濃度	測定対象 No.1プール水 No.2プール水 重水タンク水	サンプリング日時 4月5日 14時15分 4月6日 14時12分 月 日 時	メジャーリング日時 4月7日 14時19分 4月7日 14時49分 月 日 時	トリチウム濃度 Ba/ml 1.06 7.8×10^{-1}	測定者
備考:						
点検結果						

通知先: JRR-4管理課長、原子炉主任技術者

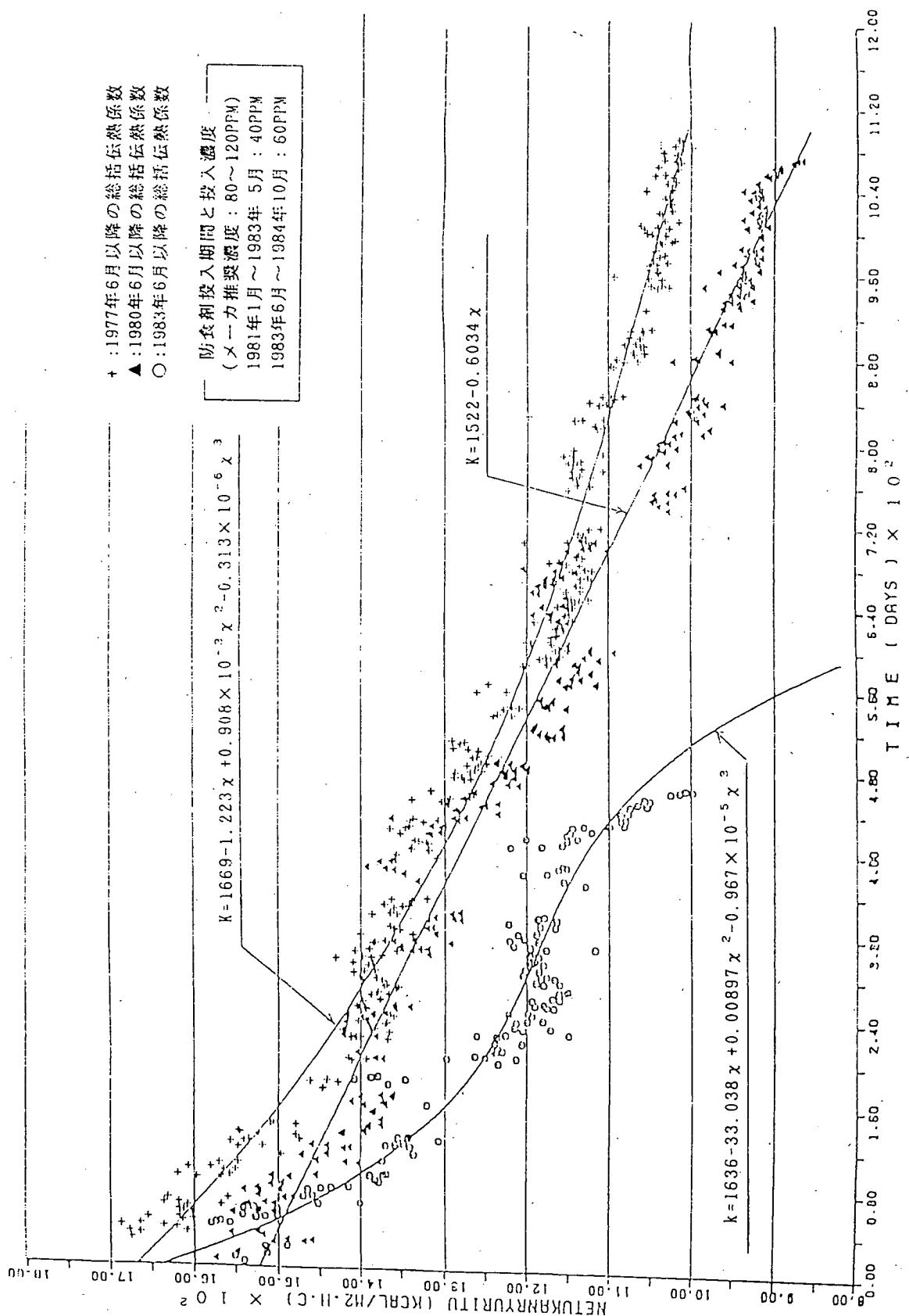


Fig.5.1 防食剤による総括伝熱係数の低下

6. まとめ

熱交換器の性能を維持するためには、総括伝熱係数の継続的な管理が必要である。JRR-4では、化学洗浄により熱交換器の冷却性能の回復を図り、乾燥洗浄により冷却性能の低下を緩和させてきた。また、乾燥洗浄により化学洗浄の回数を減らせたことは、伝熱管寿命を延ばすとともに、コスト面でも大きな役割を果たしている。その他、乾燥洗浄の改良、冷却水の管理、冷却系配管のメンテナンス、腐食調査などを継続してしていく必要がある。

今後の管理値を以下のようなものにすることが望ましい。

(1) 热交換器の管理

総括伝熱係数・・・1100 kcal/m²h°Cを下限値とする。

洗 淨：・・・2次冷却水側に関して、2回/年の乾燥洗浄を行い、総括伝熱係数の下限値を満足するように定期的に化学洗浄を行う。

(2) 冷却水の管理

1次冷却水・・・原子炉運転中にイオン交換樹脂による精製を行う。

pH5.5~7.0、電気伝導率 10 μS/cm 以下を管理値とする。

2次冷却水・・・原子炉運転中に2次冷却塔へ8 m³/h のろ過水の補給を行う。

pH6~9、濃縮度3倍以下を管理値とする。

謝 辞

研究炉部桜井文雄部長のご指導のもと、JRR-4 管理課の方々に技術的な助言、協力を頂いた。化学分析では、環境科学部研究分析科学研究グループの伊藤光雄氏に貴重なご指導、ご協力を頂いた。ここに記して謝辞と致します。本報告をまとめるにあたり、ご指導を頂いた研究炉部小杉敏夫次長、研究炉技術管理課田中純利係長、JRR-3 管理課大和田稔係長、JRR-4 管理課新井信義係長にはここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 大橋信芳、他、“JRR-4 熱交換器の管理と更新に係る技術報告”、JAERI-Tech 94-016、(1994 年)
- [2] 研究炉部、“平成 5 年度研究炉部年報（運転・利用と研究・技術開発）”、JAERI-Tech94-024、(1994 年)
- [3] 日本機械学会、“伝熱工学資料”、日本機械学会、(1976 年)
- [4] 尾花英郎、“熱交換器ハンドブック”、工学図書、(1977 年)
- [5] 中山晴雄、他、“講習会テキスト－熱交換器の付着物（汚れ）洗浄技術と防止対策”、(株) 技術情報センター、(1992 年)
- [6] 日本規格協会、“JIS ハンドブック-6 配管”、日本規格協会、(2003 年)
- [7] 通商産業省資源エネルギー庁公益事業部原子力発電安全管理課、“解説 原子力設備の技術基準”、電力新報社、(1989 年)

付録 1. 2 次冷却系配管腐食調査

2 次系配管の腐食調査を平成 12 年度に行った。調査方法としては、超音波による配管肉厚測定と管カメラによる配管内の観察を実施した。平成 16 年 9 月には、関西電力（株）美浜原子力発電所 3 号機の 2 次冷却系配管破損事故に鑑み、2 次冷却系配管の肉厚測定を実施した。測定結果を以下に報告する。測定箇所は Fig.A1.1 に示す。

A1.1 平成 12 年度の調査

A1.1.1 超音波検査

超音波検査は、超音波探傷器を用いて、配管の残存肉厚を測定し、配管内面の腐食形態、腐食量を特定する検査である。調査部位を Fig.A1.1 (測定番号④、⑨、⑩)、FigA1.2、TableA1.1 に示す。測定エリア内をくまなく測定し、最小値及び最大値を測定した。最小値については、3 回以上の再測定を行った。但し、鉄管は、金属中に非金属介在物や空隙が多く欠陥エコーが出現して管厚測定が難しいことから最小値のみ測定した。超音波探傷器は、AD-3212A (エー・アンド・ディ社製) を使用した。調査結果を TableA1.2 に示す。

TableA1.1 超音波検査部位

番号	種別	部位	呼径	材質	使用年
④	往管 (露出配管)	立管	250A	白ガス管 (SGP-ZN)	10 年
⑨	還管 (露出配管)	横管	250A	白ガス管 (SGP-ZN)	10 年
⑩	往管 (埋設配管)	立管	250A	鉄管 (CIP)	38 年

番号は Fig.A1.1 を参照

TableA1.2 超音波検査結果

番号	規格	測定データ			解析データ			
		公称肉厚	最小値	最大値	平均値	最大腐食	残存管厚	腐食率
—	mm	mm	mm	Mm	mm	mm	%	mm/year
④	6.6	5.32	6.30	6.00	1.28	5.32	19.40	0.13
⑨	6.6	5.70	6.47	6.09	0.90	5.70	13.64	0.09
⑩	9.5	9.12	12.55	11.92	0.38	9.12	4.00	0.01

解析データは、以下のように求めた。

$$\begin{aligned}\text{最大腐食} &= \text{公称肉厚} - \text{最小値} \\ \text{残存管厚} &= \text{最小管厚} \\ \text{腐食率} &= (\text{最大腐食} \div \text{公称肉厚}) \times 100 \\ \text{腐食速度} &= \text{最大腐食} \div \text{使用期間}\end{aligned}$$

解析データから残存寿命を算出した。残存寿命とは、管厚が必要厚まで減肉するまでの期間のこと、算出は以下のように行った。

$$\text{残存寿命 (年)} = (\text{残存管厚} - \text{必要厚さ}) \div \text{腐食速度}$$

ただし、必要厚さは、「試験研究用原子炉施設に関する構造等の技術基準」より、「管の外径が 127mm 以上の炭素鋼钢管は 3.8mm 以上」であるから、残存寿命は 11.7 年 (④)、21.1 年 (⑨) と求められる。^{[6],[7]} 鋳鉄管 (⑩) に関しては、30 年以上前の規格が確認出来ないため必要厚さは求まらないが、仮に 3.8mm としても、腐食速度が小さいこと、腐食率が小さいこと、平成 2 年にライニング処理が行われていることから、漏水発生の危険は少ないと考えている。

A1.1.2 管カメラ検査

2 次冷却塔入口配管内部に管カメラ (TV2290A3) を挿入して、配管内の腐食状況、ライニング皮膜の劣化状況の検査を行った。結果を Fig.A1.3、Fig.A1.4、Fig.A1.5 に示す。配管内は薄茶色～茶色であり、全面に少量の錆が付着していた。また、配管内には $\phi 10\text{mm} \sim 20\text{mm}$ の腐食部が多数見られたが、錆やコブの高さは低く、钢管素地の腐食は比較的少なかった。

A1.1.3 調査結果

露出配管 (④、⑨) については、配管内に $\phi 10\text{mm} \sim 20\text{mm}$ の腐食部が多数見られたが、腐食量は 13%、19% であり健全である。埋設配管 (⑩) は、ライニング皮膜に亀裂等は無く健全である。腐食量も最大 4% であり、漏水発生の危険性は低い。また、ライニング施工により配管の腐食進行は抑制されているものと推測される。

A1.2 平成 16 年度の調査

平成 16 年度の施設定期自主検査期間に、配管の減肉の可能性が考えられる、次の箇所について健全性調査を行った。弁（流量調整弁）の下流部、オリフィスの下流部、曲がり部（エルボ、ティーズ等）。該当箇所は Fig.A1.1 の①～⑨である。測定方法を Fig.A1.6 に、結果を TableA1.3 に示す。平成 12 年度の調査とは、測定器、測定方法が異なるため、単純には比較は行えない。

結果は「試験研究用原子炉施設に関する構造等の技術基準」に定める必要厚さ（200A、250A 共に 3.8mm）を十分に満足する結果となった。^{[6],[7]} 平成 12 年度の結果と比べても、大きな減肉も無く健全性の維持を確認した。今後も、定期的な測定を行うことにより、健全性の確認を行う必要がある。

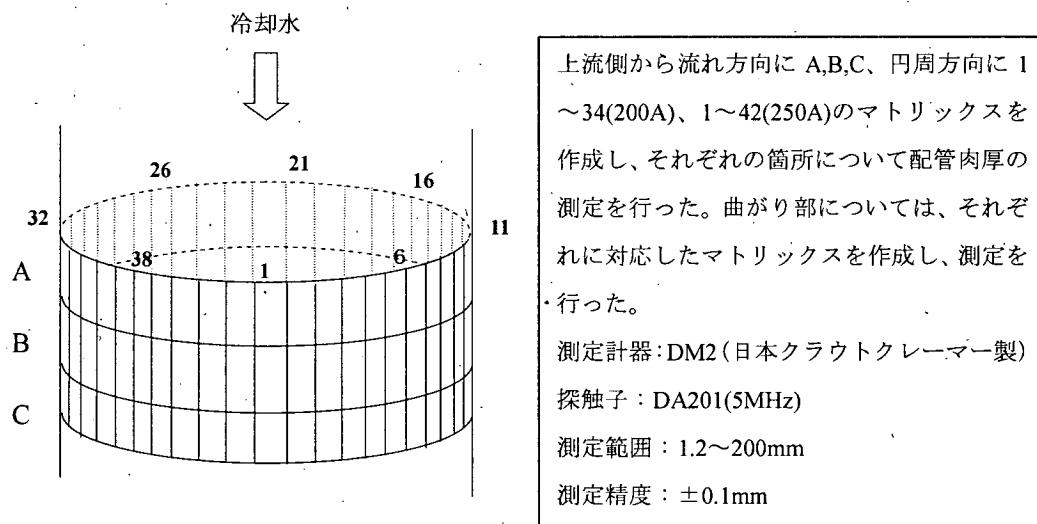


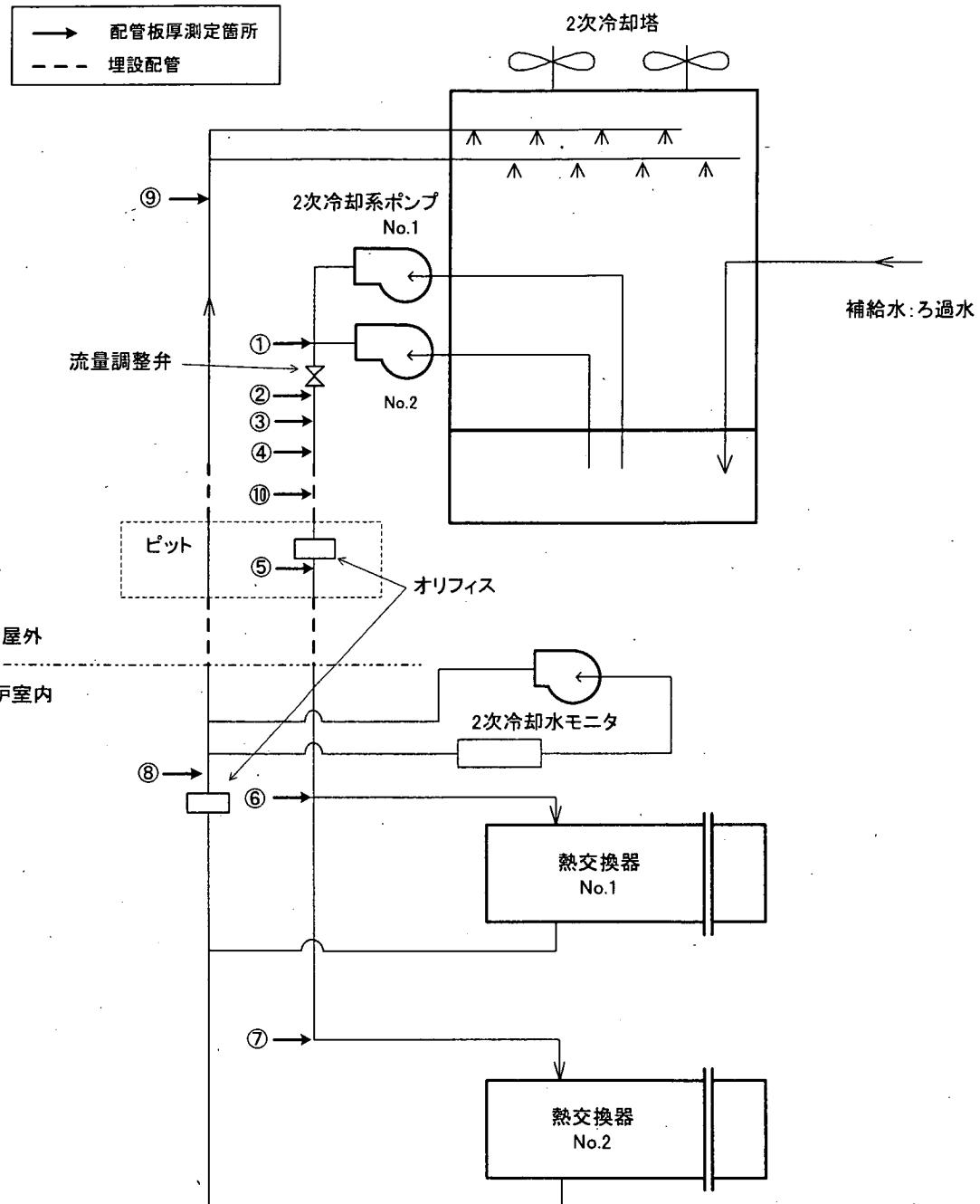
Fig.A1.6 肉厚測定方法

Table A1.3 超音波測定結果（平成16年9月）

①2次冷却塔ポンプ出口ティーズ (250A)								
測定箇所	1	6	11	16	21	26	32	38
A	<u>6.2</u>	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6	6.7
B	6.5	6.5	—	6.6	6.6	6.6	6.5	6.8
C	6.3	6.3	—	6.6	6.7	6.5	6.4	6.6
②2次冷却塔流量調節弁下流 (250A)								
測定箇所	1	6	11	16	21	26	32	38
A	6.5	6.4	6.3	<u>6.2</u>	6.3	<u>6.2</u>	<u>6.2</u>	6.4
B	6.4	6.5	<u>6.2</u>	6.3	6.3	<u>6.2</u>	<u>6.2</u>	6.5
C	6.3	6.4	<u>6.2</u>	6.3	<u>6.2</u>	<u>6.2</u>	<u>6.2</u>	6.4
③2次冷却塔出口エルボ (250A)								
測定箇所	1	6	11	16	21	26	32	38
A	7.1	7.2	7.0	<u>6.8</u>	7.5	6.9	7.3	7.0
B	7.3	7.1	7.1	<u>6.8</u>	7.7	<u>6.8</u>	7.1	7.1
C	7.7	7.0	7.0	<u>6.8</u>	—	—	7.3	7.1
D	7.3	7.0	7.0	—	—	—	—	7.1
E	7.7	7.0	—	—	—	—	—	7.0
④2次冷却塔出口直管 (250A)								
測定箇所	1	6	11	16	21	26	32	38
A	6.1	6.2	5.9	6.0	<u>5.4</u>	6.2	6.2	6.3
B	5.7	6.2	6.3	6.1	5.9	6.2	6.2	6.2
C	5.9	5.9	6.1	5.9	6.0	6.2	6.0	6.2
⑤屋外ピットオリフィス下流 (250A)								
測定箇所	1	6	11	16	21	26	32	38
A	7.1	6.6	6.9	—	—	—	7.4	6.5
B	6.9	6.9	7.2	—	—	—	6.9	<u>6.0</u>
C	6.6	6.3	7.1	—	—	—	7.5	6.1

⑥冷却機器室熱交換器入口ティーズ (200A)								
測定箇所	1	5	9	13	17	22	26	31
A	6.0	5.6	5.6	5.6	5.8	5.6	5.5	<u>5.4</u>
B	5.8	5.6	5.6	5.5	5.8	5.5	5.6	5.5
C	5.9	5.6	5.6	5.5	5.9	5.6	5.5	<u>5.4</u>
⑦冷却機器室エルボ (200A)								
測定箇所	1	5	9	13	17	22	26	31
A	6.5	6.0	<u>5.9</u>	<u>5.9</u>	6.7	<u>5.9</u>	6.0	6.3
B	6.3	6.0	<u>5.9</u>	—	—	—	6.0	6.1
C	6.3	<u>5.9</u>	—	—	—	—	6.2	6.0
⑧冷却機器室オリフィス下流 (250A)								
測定箇所	1	6	11	16	21	26	32	38
A	6.4	6.2	<u>5.9</u>	6.2	6.0	6.2	6.0	6.1
B	6.5	6.3	6.2	6.3	6.3	6.4	6.1	6.2
C	6.4	6.3	6.1	6.3	6.2	6.4	6.1	6.1
⑨2次冷却塔直管部 (250A)								
測定箇所	1	6	11	16	21	26	32	38
A	6.5	<u>6.4</u>	<u>6.4</u>	<u>6.4</u>	6.6	6.8	6.5	<u>6.4</u>
B	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.6	6.6
C	6.5	<u>6.4</u>	6.5	6.6	6.5	<u>6.4</u>	6.5	6.7

太字は最小値を示す。



測定番号	部品	材料	口径	備考
①	ティーズ	SGP-ZN	250A	2次冷却塔ポンプ出口ティーズ
②	弁下流	SGP-ZN	250A	2次冷却塔流量調整弁下流
③	エルボ	SGP-ZN	250A	2次冷却塔出口エルボ
④	直管	SGP-ZN	250A	2次冷却塔出口直管
⑤	オリフィス	SGP-ZN	200A	屋外ピットオリフィス下流
⑥	ティーズ	SGP-ZN	200A	冷却機器室熱交換器入口ティーズ
⑦	エルボ	SGP-ZN	250A	冷却機器室熱交換器入口エルボ
⑧	オリフィス	SGP-ZN	250A	冷却機器室オリフィス下流
⑨	直管	SGP-ZN	250A	2次冷却塔直管部
⑩	直管	CIP	250A	2次冷却塔出口埋設配管

Fig.A1.1 2次冷却系配管における健全性調査箇所

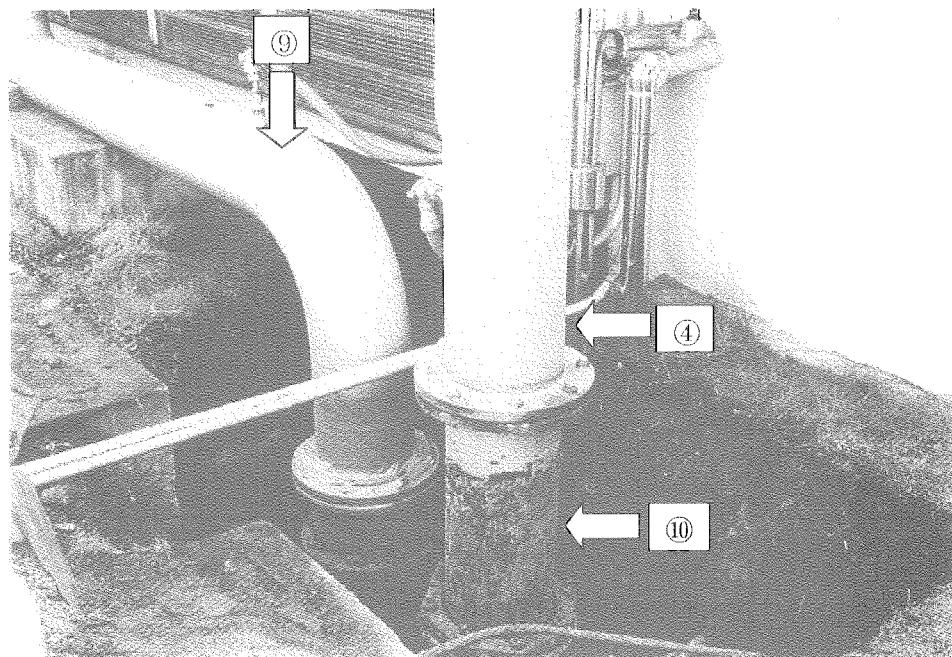


Fig.A1.2 超音波調査箇所

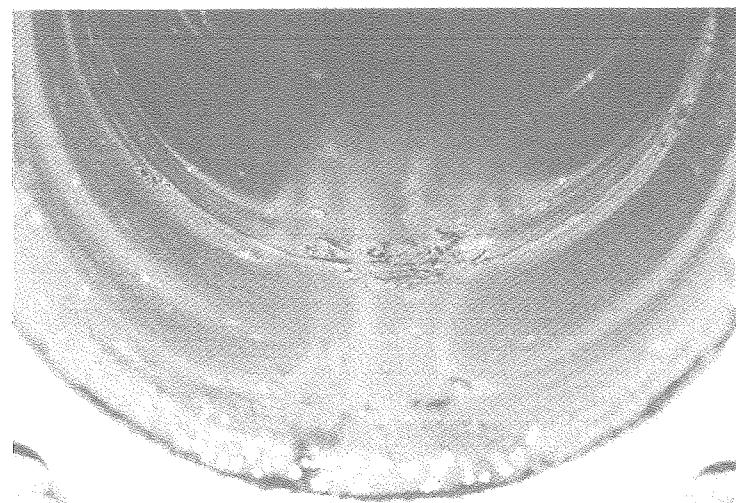


Fig.A1.3 配管内部（露出配管）

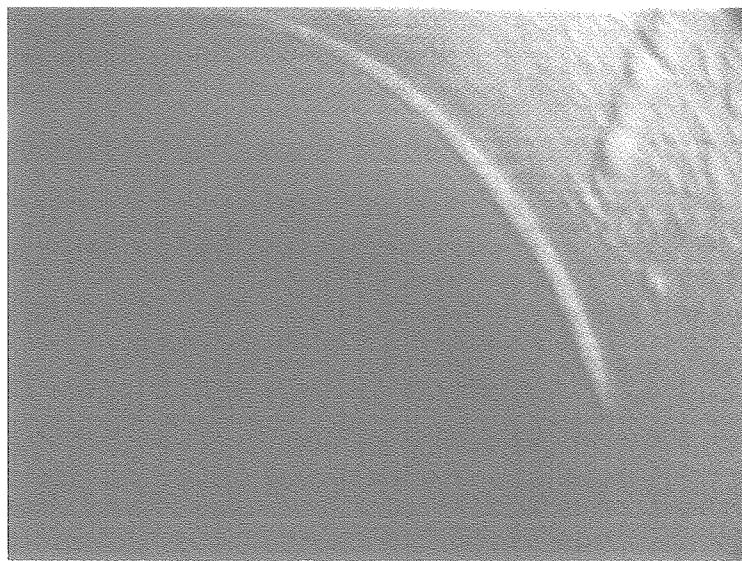


Fig.A1.4 配管内部（露出配管）

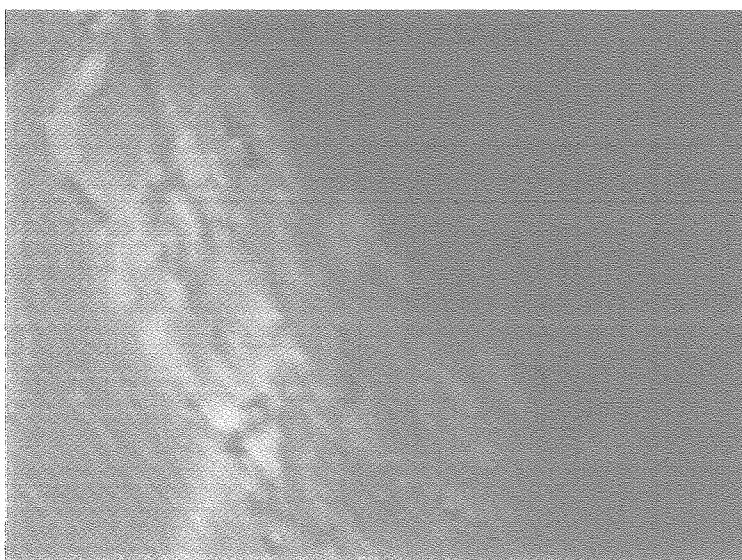


Fig.A1.5 配管内部（露出配管）

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光强度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
工率、放熱束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ′, ″
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
ペーソン	b
ペール	bar
ガル	Gal
キュリー	Ci
レンントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10^{18}	エクサ	E
10^{15}	ペタ	P
10^{12}	テラ	T
10^9	ギガ	G
10^6	メガ	M
10^3	キロ	k
10^2	ヘクト	h
10^1	デカ	da
10^{-1}	デシ	d
10^{-2}	センチ	c
10^{-3}	ミリ	m
10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-9}	ナノ	n
10^{-12}	ピコ	p
10^{-15}	フェムト	f
10^{-18}	アト	a

(注)

1. 表1~5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。

2. 表4には海里、ノット、アール、ヘクトールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。

3. barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリに分類されている。

4. EC開催理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリに入れている。

換算表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s(N·s/m²) = 10 P(ポアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴St(ストークス)(cm²/s)

圧	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062×10^3	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322×10^{-4}	1.35951×10^{-3}	1.31579×10^{-3}	1	1.93368×10^{-2}
	6.89476×10^{-3}	7.03070×10^{-2}	6.80460×10^{-2}	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)		
								熱化学	15 °C	国際蒸気表
	1	0.101972	2.77778×10^{-7}	0.238889	9.47813×10^{-4}	0.737562	6.24150×10^{18}	$= 4.184 \text{ J}$	$= 4.1855 \text{ J}$	$= 4.1868 \text{ J}$
	9.80665	1	2.72407×10^{-6}	2.34270	9.29487×10^{-3}	7.23301	6.12082×10^{19}			
	3.6×10^6	3.67098×10^5	1	8.59999×10^5	3412.13	2.65522×10^6	2.24694×10^{25}			
	4.18605	0.426858	1.16279×10^{-6}	1	3.96759×10^{-3}	3.08747	2.61272×10^{19}	仕事率 1 PS(仏馬力)		
	1055.06	107.586	2.93072×10^{-4}	252.042	1	778.172	6.58515×10^{21}	$= 75 \text{ kgf} \cdot \text{m/s}$		
	1.35582	0.138255	3.76616×10^{-7}	0.323890	1.28506×10^{-3}	1	8.46233×10^{18}	$= 735.499 \text{ W}$		
	1.60218×10^{-19}	1.63377×10^{-20}	4.45050×10^{-26}	3.82743×10^{-20}	1.51857×10^{-22}	1.18171×10^{-19}	1			

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad	照射線量	C/kg	R	線量当量	Sv	rem
				1	100		1	3876		1	100
	1	2.70270×10^{-11}								0.01	1
	3.7×10^{10}	1		0.01	1						

(86年12月26日現在)

