

JRR-3 熱交換器ボール洗浄方式の効率化の検討

Improvement of Efficiency on Ball-Cleaning Method for JRR-3 Heat Exchanger

太田 和則 池亀 吉則 大和田 稔 福島 学
大場 敏充 竹内 真樹 今橋 正樹 村山 洋二

Kazunori OTA, Yoshinori IKEKAME, Minoru OHWADA, Manabu FUKUSHIMA
Toshinobu OHBA, Masaki TAKEUCHI, Masaki IMHASHI and Yoji MURAYAMA

東海研究開発センター
原子力科学研究所
研究炉加速器管理部

Department of Research Reactor and Tandem Accelerator
Nuclear Science Research Institute
Tokai Research and Development Center

March 2008

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行っ
ております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920

© Japan Atomic Energy Agency, 2008

JRR-3 熱交換器ボール洗浄方式の効率化の検討

日本原子力研究開発機構東海研究開発センター

原子力科学研究所研究炉加速器管理部

太田 和則、池亀 吉則、大和田 稔、福島 学、大場 敏充、竹内 真樹、今橋 正樹、村山 洋二

(2008 年 1 月 21 日受理)

JRR-3 熱交換器はシェルアンドチューブ型であり、管側を 2 次冷却材が流れる構造となっている。洗浄方法はボール洗浄方式であり、高圧力で流れる二次冷却材中に混入させたスポンジボールによって伝熱管内部の汚れを剥離する方法である。熱交換器の性能低下は、1 次冷却材炉心出口温度の上昇をもたらし、原子炉の安全安定運転に影響を与えるおそれがある。

これまでの洗浄データを基に、熱交換器洗浄方法の効率化の検討を行った。その結果、最適な洗浄ボールの種類や洗浄時間の決定方法等が明らかとなった。

Improvement of Efficiency on Ball-Cleaning Method for JRR-3 Heat Exchanger

Kazunori OTA, Yoshinori IKEKAME, Minoru OHWADA, Manabu FUKUSHIMA
Toshinobu OHBA, Masaki TAKEUCHI, Masaki IMAHASHI and Yoji MURAYAMA

Department of Research Reactor and Tandem Accelerator
Nuclear Science Research Institute
Tokai Research and Development Center
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 21, 2008)

JRR-3 uses shell and tube heat exchangers. The secondary coolant flushes into the tubes and the primary coolant flows outside of the tubes. The heat exchangers are cleaned with the ball-cleaning method, which is a method to clean inside of the tubes by passing the sponge balls with secondary coolant. Decline in the performance of heat exchanger could rise temperature of the primary coolant and then influence the safe and stable reactor operation. The effective way of ball-cleaning for JRR-3 heat exchangers is examined based on past cleaning data. The results show the optimal ball size and the way to determine the cleaning time.

Keywords : Research Reactor, JRR-3, Cooling System, Heat Exchanger, Ball-Cleaning
Over-all Heat Transfer Coefficient

目次

1. はじめに	1
2. JRR-3 の概要	2
3. JRR-3 熱交換器の洗浄	5
3.1 熱交換器洗浄装置	5
3.2 洗浄方法	5
3.3 洗浄目安の設計値	5
4. ボール洗浄方法の効率化	12
4.1 洗浄ボールの仕様	12
4.2 洗浄ボールの回収率試験	12
4.3 洗浄時間と熱貫流率回復値の関係	12
5. 考察	24
5.1 研究炉における熱交換器洗浄方法	24
5.2 ボール洗浄の利点	24
6. まとめ	26
謝辞	26
参考文献	26
付録	27

Contents

1.	Introduction	1
2.	Outline of the JRR-3	2
3.	Cleaning of the JRR-3 Heat Exchanger	5
3.1	Heat Exchanger Cleaning Equipment	5
3.2	Cleaning Method	5
3.3	Design Value in Cleaning Standard	5
4.	Improvement of Efficiency on the Ball-Cleaning Method	12
4.1	Specification of the Cleaning Ball	12
4.2	Collection Coefficient Test of the Cleaning Ball	12
4.3	Relation between Cleaning Time and Recovery Value of Over-all Heat Transfer Coefficient	12
5.	Consideration	24
5.1	Heat exchanger cleaning method for research reactors	24
5.2	Advantage of the Ball-Cleaning Method	24
6.	Summary	26
	Acknowledgements	26
	References	26
	Appendix	27

1. はじめに

JRR-3 (Japan Research Reactor No.3) の炉心で生じる熱は、熱交換器を介して1次冷却系から2次冷却系に伝えられ最終的に2次冷却塔において大気へ放出される。熱交換器の2次側伝熱管に付着するスライム及びスケール等により、熱交換器の性能は低下する。熱交換器の汚れは1次冷却材への熱交換性能を低下させ、1次冷却材温度の上昇につながる。このためJRR-3では、1次冷却材炉心出口温度の制限値を満足する為に、熱交換器の定期的な洗浄を行っている。熱交換器の冷却性能は熱貫流率で管理しており、冷却性能の回復方法としてボール洗浄を行っている。ボール洗浄とは、2次冷却材中に混入させたスポンジボールによって熱交換器伝熱管内部の汚れを剥離する方法である。熱交換器の洗浄回数や洗浄時間の長さ及び洗浄ボールの種類等、熱交換器洗浄方法の効率化の工夫を重ねることで、1次冷却材温度の制限値を超えるおそれが無くなり原子炉の安定運転に貢献している。

本書では、実績に基づく熱交換器ボール洗浄方式の効率化について報告する。

2. JRR-3 の概要

JRR-3 は、低濃縮ウラン軽水減速冷却プール型原子炉である。平成 2 年 11 月から最大熱出力 20MW で施設共同利用運転を開始し、設置された各種の利用設備は高い中性子束を利用者に提供している。また、冷中性子が利用できることも大きな特徴となっており、主に熱・冷中性子を用いたビーム実験、放射化分析、半導体用シリコン照射及びラジオアイソトープの製造に利用されている。

JRR-3 の冷却系は 1 次冷却系、重水冷却系、2 次冷却系から構成されている。JRR-3 冷却系統図を Fig.2.1 に示す。1 次冷却系は 1 次冷却材主ポンプ、1 次冷却材補助ポンプ、N-16 減衰タンク、1 次冷却材熱交換器等から構成され、1 次冷却材は炉室内の放射線量を低減するため炉心を通って下方へ流れる構造となっている。N-16 減衰タンクを通過後、熱交換器によって 2 次冷却系に伝熱し、再び原子炉プールへと循環する。重水冷却系は重水溢流タンク、重水ポンプ、重水熱交換器で構成され、中性子の反射材と減速材の両方の役割を担う重水に生じる熱を熱交換器で除去し、重水タンクへ流入する閉ループになっている。Fig.2.2 に 2 次冷却設備の系統図を示す。2 台の 2 次冷却材ポンプにより放出された 2 次冷却材は、1 次冷却系、重水冷却系、使用済燃料プール水浄化冷却系及び CRDM 冷却系を冷却し、各系統からの受熱を 2 次冷却塔のファンによって空冷し大気中へ放散している。

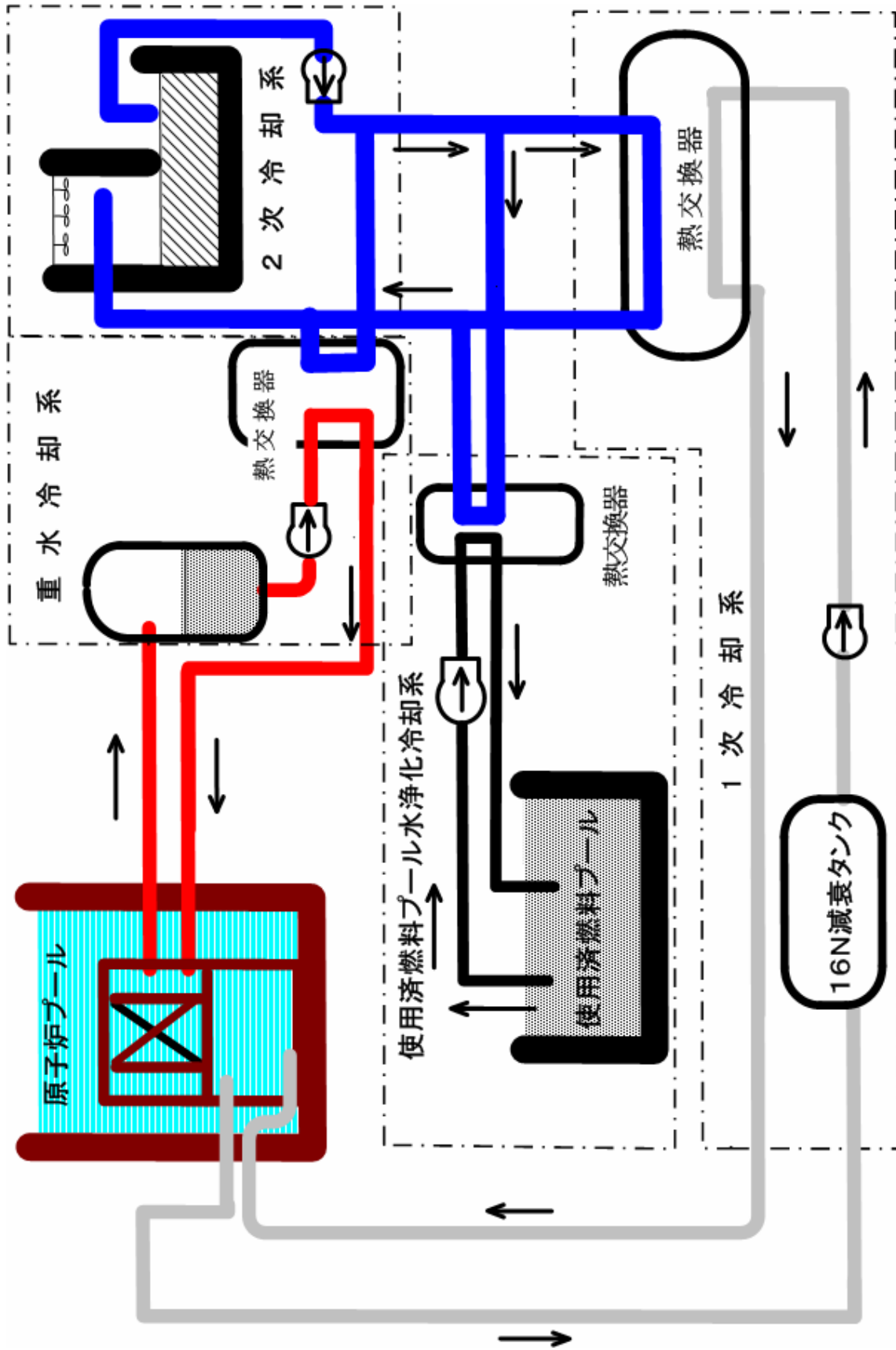


Fig. 2.1 JRR-3 冷却系統図

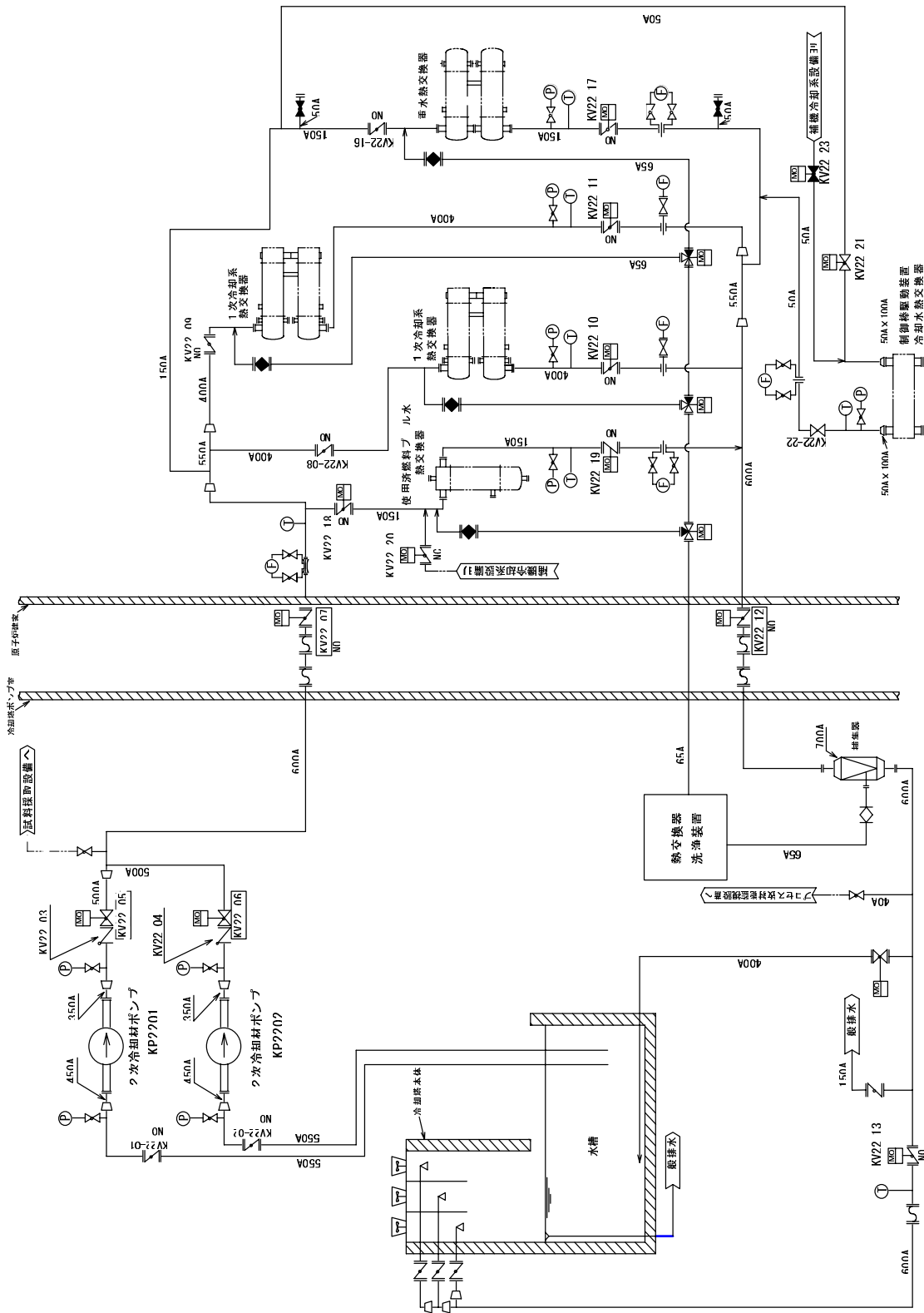


Fig. 2.2 2次冷却設備の系統図

3. JRR-3 熱交換器の洗浄

熱交換器の冷却性能を低下させる要因は、伝熱管内の汚れである。伝熱管内を通る 2 次冷却材は、2 次冷却塔において取り入れた外気によって熱除去を行なっているため外気中の塵埃を取り込んでしまう。塵埃とろ過水中の不純物及び微生物が作用し、腐食生成物やスライム及びスケール等が付着する。付着した汚れを除去し熱交換器の性能を維持させるために、JRR-3 ではボール洗浄を行なっている。熱交換器の冷却性能は、熱貫流率 ($W/m^2 \cdot K$) で管理している。

3.1 熱交換器洗浄装置

熱交換器洗浄装置概要図を Fig.3.1 に示す。熱交換器洗浄装置は、スポンジボールを 2 次冷却系へ送り出すボール循環ポンプと洗浄装置内のスポンジボールを回収及び投入するボール回収器、2 次冷却系配管内のスポンジボールを捕集し洗浄装置系統内に戻す捕集器や洗浄対象機器の切替えを行う分配器及びこれらボール循環ポンプや分配器の運転操作を行う熱交換器洗浄装置操作盤から構成される。

3.2 洗浄方法

熱交換器洗浄装置は 2 次冷却系に接続され、1 次冷却材熱交換器、重水熱交換器、使用済燃料プール水熱交換器の伝熱管内に、球形で伝熱管内径($\phi 17\text{mm}$)より僅かに大きい径を有するスポンジボールを挿入し、2 次冷却材と共に熱交換器伝熱管内を摩擦しながら通過する。それによって、伝熱管内に付着、蓄積された腐食生成物やスライム及びスケール等の汚れや異物を除去し、熱交換器の伝熱性能を維持させる。3 つの運転モードが選択できる設計となっており、全熱交換器を連続的に洗浄する自動モード、各熱交換器を単独にて洗浄する半自動モード、洗浄装置の各機器を個別に作動させる手動モードがある。

3.3 洗浄目安の設計値

2 次冷却材が流れる伝熱管に付着する腐食生成物やスライム及びスケール等による熱貫流率の低下は、原子炉の 1 次冷却材炉心出口温度の制限値を超えるおそれがあるため、原子炉の安定運転に大きく影響する。性能の維持において、熱交換器の汚れ有りの設計値を下回らないようにするために、熱貫流率の現状把握することが重要である。Table3.1 に各熱交換器の設計値を示す。熱貫流率維持を図るため、設計値を洗浄する目安として設定した。

サイクル毎の熱貫流率を Fig.3.2～Fig.3.5 に示す。1 次冷却材熱交換器 No.1、No.2 においては、10-04 サイクル以降、重水熱交換器、使用済燃料プール水熱交換器においては 11-01 サイクル以降の実績（洗浄ボールについて最適と認定した、標準ボール $\phi 17.5\text{mm}$ を使用してからの実績。詳細は第 4 章を参照）である。サイクル毎に熱貫流率を監視しながら伝熱管内部の汚れ状態によって洗浄時期や回数及び時間を決定しボール洗浄を行ってきた。このことにより外気の変動時においても、原子炉の安定運転に大きく貢献したものと考えられる。

Table3.1 各熱交換器の設計値

機器 熱貫流率	1 次冷却材熱交換器 No.1 及び No.2	重水熱交換器	使用済燃料プール水 熱交換器
汚れあり (W/ m ² · K)	1876	1583	1535
汚れなし (W/ m ² · K)	2288	1866	1800

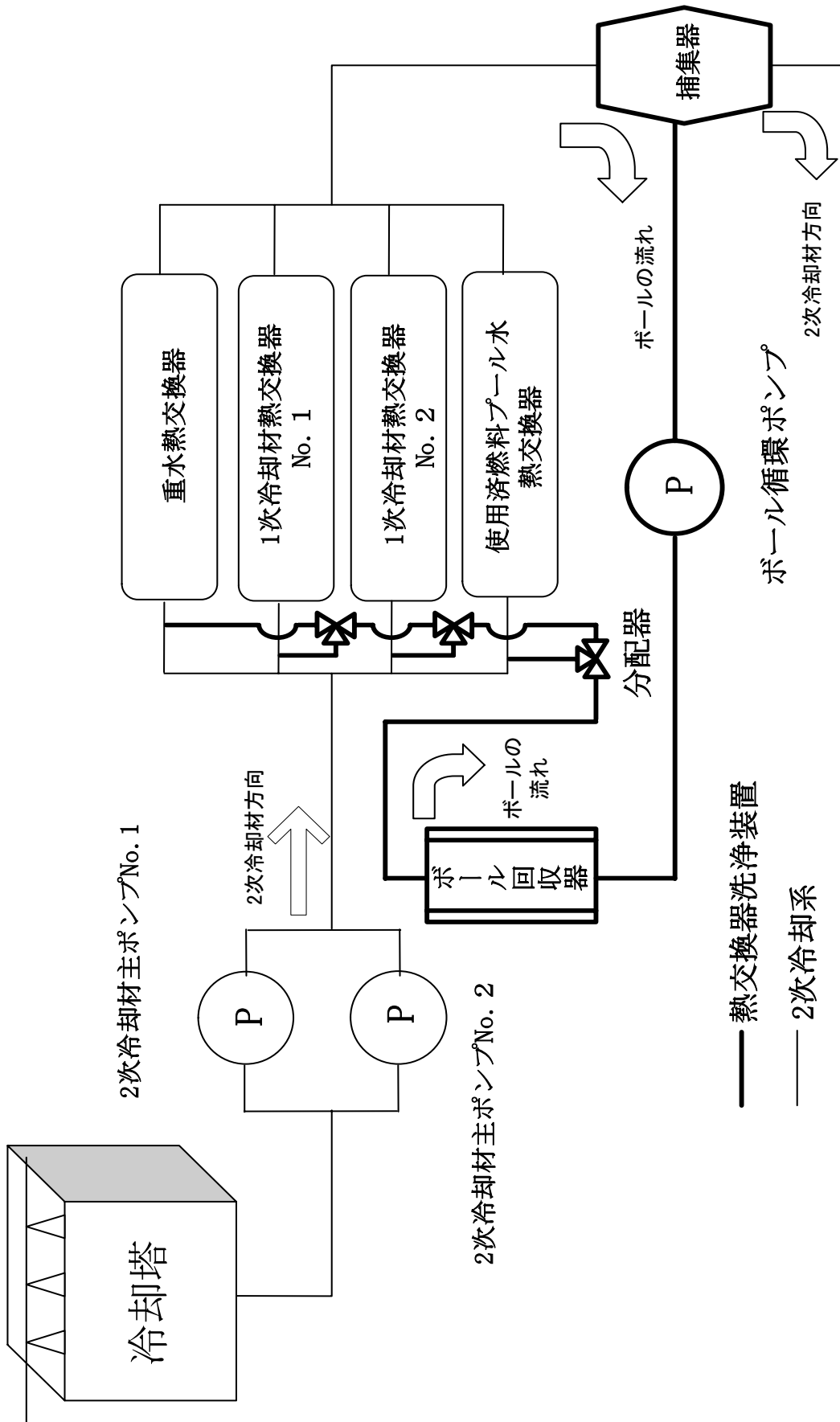


Fig.3.1 熱交換器洗浄装置概要図

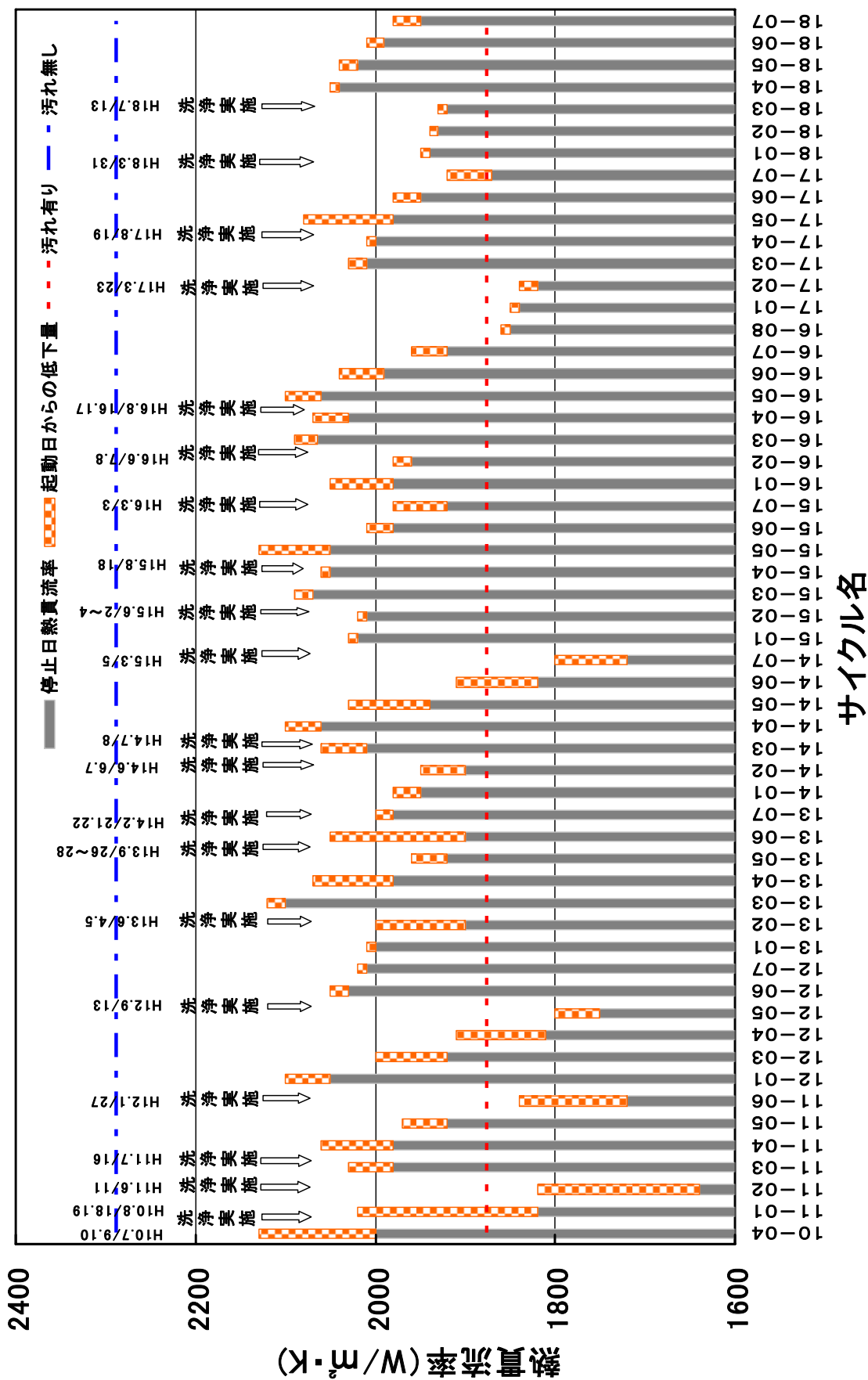


Fig.3.2 1次冷却材熱交換器 No.1 におけるサイクル毎の熱貫流率

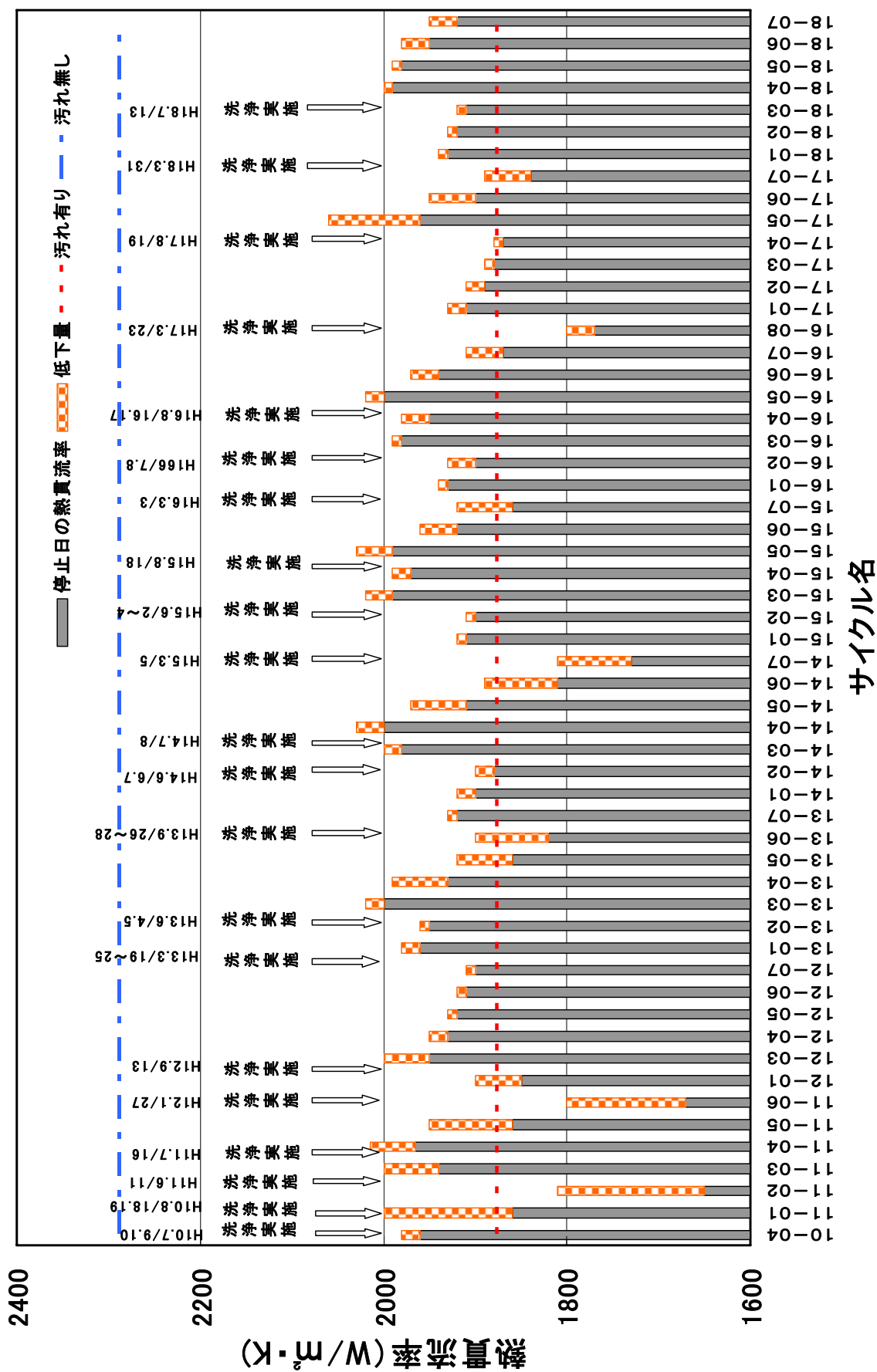


Fig.3.3 1次冷却材熱交換器 No.2 におけるサイクル毎の熱貫流率

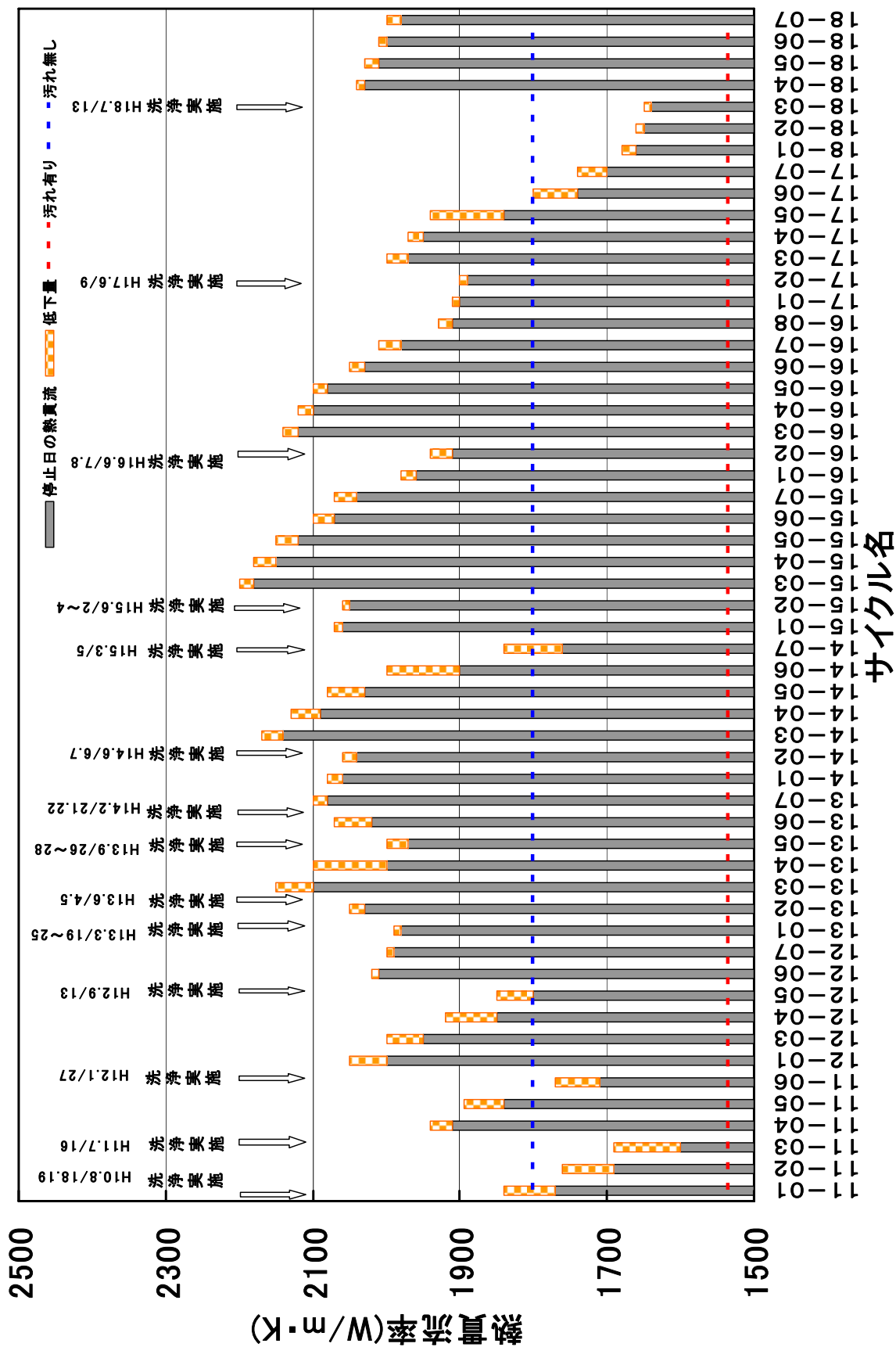


Fig.3.4 重水熱交換器におけるサイクル毎の熱貫流率

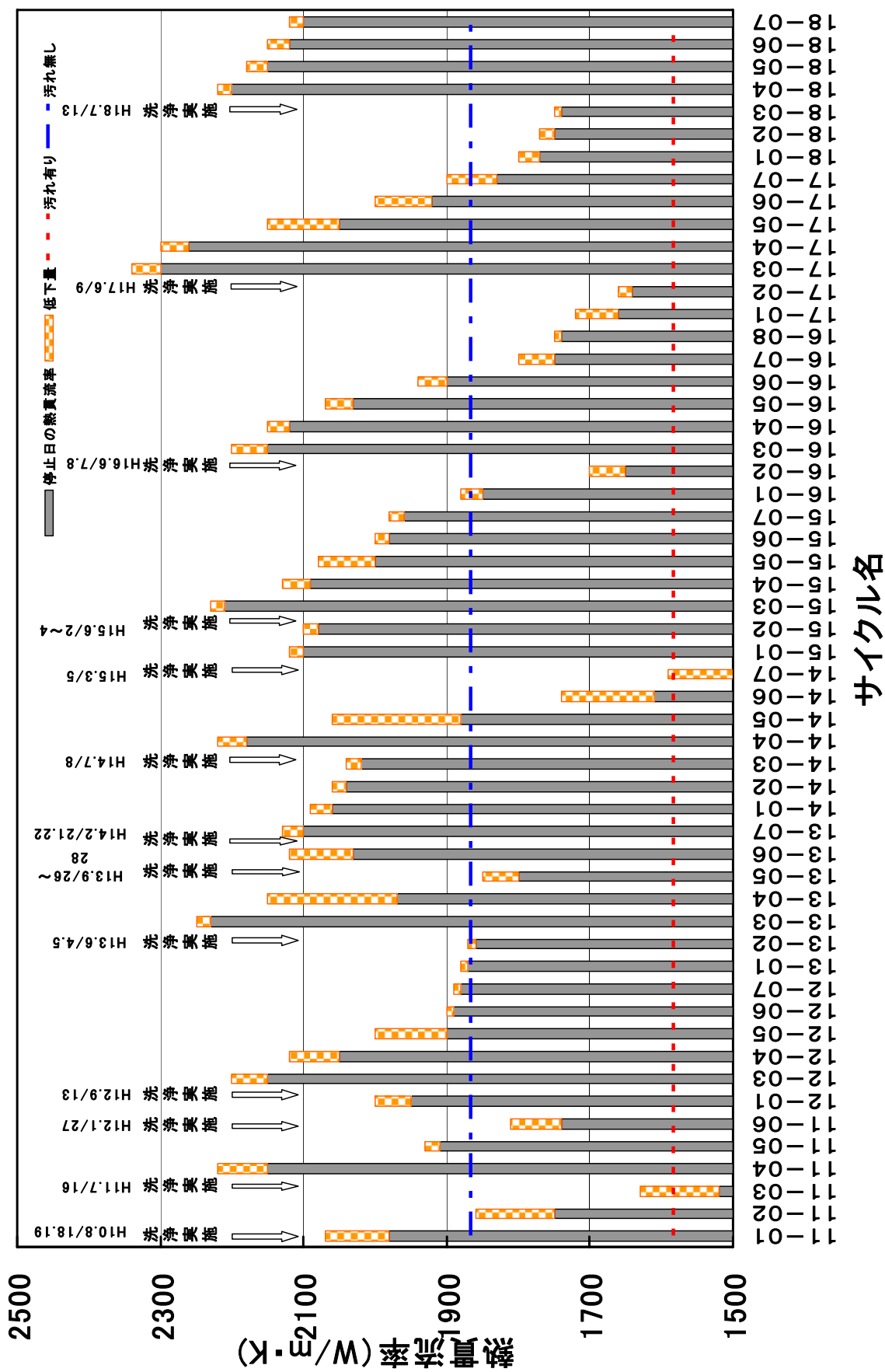


Fig.3.5 使用済燃料プール水熱交換器におけるサイクル毎の熱貫流率

4. ボール洗浄方法の効率化

JRR-3における熱交換器洗浄作業は平成3年5月20日に始まり、平成9年までの数年間は、洗浄ボールについての効率化がなされなかった。そこで平成9年の第4サイクル(以下R3-09-04)からの6サイクル(R3-09-04、09-06、09-07、10-02、10-04、11-01)に渡り様々な洗浄ボールを使用して、効率化のためのデータ収集を実施した。

4.1 洗浄ボールの仕様

洗浄ボールの効率化に当たり、2種類のボールを選定した。被覆無しスポンジボール(標準ボール)とプラスチックペレットコーティングボールである。これら洗浄ボールの仕様をTable4.1に示す。前者は、東京、東北、中部、北陸電力の原子力施設にて使用されている実績を有しており、後者は、スポンジボールに樹脂をコーティングしているため劣化は早い、伝熱管内のスケールやスラッジの除去に有効な利点を有している。

4.2 洗浄ボールの回収率試験

洗浄ボールの効率化において、6種類のボールを使用して試験を行なった。試験は、R3-09-04サイクル以降の6サイクル(R3-09-04、09-06、09-07、10-02、10-04、11-01)における回収率(ボール回収数/ボール投入数)を測定した。ボール回収器の設計上、85%以上の回収率を推奨しているが、JRR-3では90%以上の回収率を判定基準として設定した。そのため、90%以上の回収率を合格と判定した。伝熱管の内径が17mmであることより、スポンジボールの外径はそれ以上のものを対象として実施し、流量も変化させて行った。その結果をTable4.2に示す。

標準ボールφ19mmの場合、09-04サイクルに1次冷却材熱交換器No.2について行ったが判定基準である90%以上の回収率に対し82%の結果であり、回収率は良くなかった。標準ボールφ18mmの場合においても、09-06サイクルの1次冷却材熱交換器No.1、使用済燃料プール水熱交換器の回収率はそれぞれ62%、52%と共に非常に回収率が悪く、使用済燃料プール水熱交換器にいたってはR3-10-02において、流量を従来の160 m³/hから最大の198 m³/hに増大したにもかかわらず回収率結果は63%と良い結果が得られなかった。以上の結果より標準ボールφ18mm、φ19mmでは、伝熱管内径に対して大きすぎることが判明した。

また、09-04、09-07における樹脂コーティングボールのφ18mm、φ17mmを使用した場合、回収率は良い結果が得られたがボールの破損が確認され、耐久性に劣ることが判明した。

次に、伝熱管内径と同じ標準ボールφ17mmを使用した場合であるが、09-04サイクル、10-02サイクルにおける1次冷却材熱交換器No.1について、流量を変えて回収率を測定した。09-04サイクルの結果は判定基準の90%を満足せず、10-02サイクルにおいては09-04サイクルより流量を増大したにもかかわらず回収率がさらに悪く、使用するに当たり不適合であると判断した。

標準ボールφ17.5mmを使用した場合、10-04、11-01サイクルにおける全ての熱交換器について測定した。全ての熱交換器において回収率94%以上の良好な結果が得られ、使用済燃料プール水熱交換器にいたっては通常流量の160 m³/hである場合でも100%の回収率結果が得られた。

以上の結果より、標準ボールφ17.5mmが最適であることが明らかとなった。なお、使用した標準ボールの追跡調査を容易にする為に、10-04サイクルより複数色の洗浄ボールの使用を開始した。7色の標準ボール(緑、桃、白、赤、黄、橙、ベージュ)を洗浄するサイクル毎に色分けして使用することで、回収時に使用サイクルが明確になった。それまでは白色及び赤色の2色しか使用していなかったため、前々回洗浄時のボールが回収され、いつ使用したボールであるのか識別するのが困難であった。現在でも、標準ボールについて継続した追跡調査を行なっている。標準ボール追跡調査の結果をTable4.3に示す。

4.3 洗浄時間と熱貫流率回復値の関係

ボール洗浄を実施するに当たり次に検討しなければならない事は、洗浄対象熱交換器の洗浄時間である。洗浄前の汚れ状態からどれだけ熱貫流率の回復が望めるかを認知、予測することが必要となり、それによって洗浄時間は決定される。過去の実績より、洗浄前の熱貫流率における熱

貫流率回復値をおおよそ予測することができる。洗浄ボールについて最適と認定した標準ボールφ17.5mmを使用してからの、各熱交換器における洗浄前の熱貫流率と熱貫流率回復値をTable4.4～Table4.7に示す。1次冷却材熱交換器No.1、No.2においては、10-04サイクル以降、重水熱交換器、使用済燃料プール水熱交換器においては11-01サイクル以降の実績であり、洗浄前の熱貫流率においては小さい値（汚れ度合いが大きい）から順番に記載した。それに基づく、各熱交換器における1時間洗浄時の熱貫流率回復値をFig.4.1～Fig.4.4に示す。1時間以上洗浄する場合は、時間数倍に比例して熱貫流率が回復するとは限らないため、洗浄時間を1時間と決定した場合に限定するものである。

洗浄時間と回復値の関係は、洗浄時間が長ければ熱貫流率の回復値は大きくなるが、ある時間に達すると回復値はさがる。そのため1時間以上の洗浄時間を要する場合は、過去の実績から熱貫流率回復値がほぼ同等な値に着目し、それに対応する洗浄時間により評価した。なお、確実に回復することを考慮するために洗浄時間の長い方で評価した。各熱交換器における熱貫流率回復値と洗浄時間の関係をTable4.8に示す。

Table4.1 洗浄ボールの仕様

種類		被覆無しスポンジボール (標準ボール)	樹脂コーティングボール
用途		通常洗浄用ボール	標準ボールで除去できない比較的硬いスケールの除去に有効
仕様	形状	球体	球体
	材質	天然ゴム発泡体	母材:天然ゴム コーティング材:ポリカーボネート+ABS
	比重	含水率 : 1.15～1.16	含水率 : 1.06～1.14
		非含水率 : 0.35～0.40	非含水率 : 0.30～0.40
	弾性値	300～400 g (25%圧縮)	350～500 (20%圧縮)
	吸水性	3回(手もみ回数)で沈降	10回(手もみ回数)で沈降
	製作公差	呼び径寸法に対し0～-1mm	呼び径寸法に対し±2.0mm
	性質	内部まで吸水できる均一な連続気泡	内部まで吸水できる均一な連続気泡
	加速擦過テスト (ボール寿命)	50,000m異常なし	50,000m異常なし
機能と特徴		耐摩耗性に優れた天然ゴムを原料とし水流に乗せて流す為、水よりも若干大きい比重(含水時)にしてある。管内に付着したスライム、スラッジなどの異物を除去し、伝熱性能を改善する。	耐摩耗性に優れ、変質せず使用流体に有害物質が溶出ししない。水よりも若干大きい比重(含水時)にしてある。管内に付着した比較的硬いスライム、スラッジなどの異物を除去できる。

Table4.2 洗浄ボールの回収率試験結果

洗浄ボールの種類	投入数	回収数	回収率	サイクル No	洗浄機器	流量 (m ³ /h)	備考
標準φ19	100	82	82	R3-09-04	1次冷却材熱交換器 No.2	3200	
樹脂コーティングφ18	50	50	100	R3-09-04	1次冷却材熱交換器 No.1	3200	ボールが破損
標準φ18	100	62	62	R3-09-06	1次冷却材熱交換器 No.1	3200	
	50	26	52	R3-09-06	使用済燃料プール水熱交換器	160	
	100	63	63	R3-10-02	使用済燃料プール水熱交換器	198	
樹脂コーティングφ17	192	174	90.6	R3-09-07	1次冷却材熱交換器 No.2	3500	ボールが半分に破損
標準φ17	100	89	89	R3-09-04	1次冷却材熱交換器 No.1	3200	
	100	83	83	R3-10-02		3500	
標準φ17.5	100	94	94	R3-10-04	1次冷却材熱交換器 No.1	3500	
	100	97	97	R3-11-01	1次冷却材熱交換器 No.2	3500	
	50	50	100	R3-11-01	重水熱交換器	160	
	50	50	100	R3-11-01	使用済燃料プール水熱交換器	160	

Table4.3 標準ボールの追跡調査結果 (1/2)

単位：個

ボール色 回収日	緑	黄	ピンク	赤	白	オレンジ	ベージュ
H10.7.9	95	—	—	—	—	—	—
H10.7.10	95	—	—	—	—	—	—
H10.8.18	5	142	—	—	—	—	—
H10.8.19	—	149	—	—	—	—	—
H11.6.8	—	—	92	—	—	—	—
H11.6.11	192	—	6	—	—	—	—
H11.7.16	3	—	290	—	—	—	—
H12.1.27	—	—	—	290	—	—	—
H12.9.13	—	—	—	3	147	—	—
H13.1.11	—	91	—	—	1	—	—
H13.1.12	—	156	—	—	—	—	—
H13.1.15	—	1	—	—	—	—	—
H13.6.4	133	—	—	—	—	—	—
H13.6.5	148	—	—	—	—	—	—
H13.6.6	8	—	—	—	—	—	—
H13.9.26	4	—	—	—	—	145	—
H13.9.27	—	—	—	—	—	130	—
H13.9.28	1	—	—	—	—	17	—
H14.2.22	—	—	148	—	—	—	—
H14.4.30	—	—	1	—	—	—	—
H14.6.6	—	—	4	131	—	—	—
H14.6.7	—	—	—	94	—	—	—
H14.7.8	—	—	3	3	242	—	—
H14.8.21	—	—	—	1	1	—	—
H15.3.5	—	262	—	—	—	—	—
H15.3.6	—	32	—	—	—	—	—
H15.6.2	—	—	—	—	146	—	—
H15.6.4	—	—	—	—	141	2	—
H15.8.18	193	—	1	—	—	—	—
H15.8.19	4	—	1	—	3	—	—
H16.3.3	—	—	—	—	—	—	177
H16.3.4	2	—	—	—	—	—	18
H16.6.7	—	—	137	—	—	2	3
H16.6.8	—	—	133	—	1	—	—
H16.8.16	—	—	17	—	—	87	—
H16.8.17	—	—	1	—	—	98	—
H17.3.23	—	88	3	—	—	7	2

Table4.3 標準ボールの追跡調査結果 (2/2)

ボール色 回収日	緑	黄	ピンク	赤	白	オレンジ	ベージュ
H17.6.9	130	6	3	—	—	1	—
H17.6.10	17	3	1	—	—	—	—
H17.8.19	3	—	—	—	188	—	—
H18.3.31	—	—	—	—	8	88	—
H18.7.13	137	—	—	—	—	6	—
H18.7.14	150	—	—	—	—	2	—
回収数合計	1320	930	988	522	878	587	200
投入数合計	1350	950	1000	550	900	600	200
未回収数	30	20	12	28	22	13	0

Table4.4 1次冷却材熱交換器 No.1 における洗浄前の熱貫流率と熱貫流率回復値

洗浄前の熱貫流率 (W/ m ² · K)	熱貫流率回復値 (W/ m ² · K)	洗浄時間 (h)
1640	390	2
1720	310	1
1820	210	4.5
1870	80	1
1875	255	5
1900	100	3
1900	160	4
1920	80	3
1920	130	1.5
1920	130	2
1960	130	2
1980	75	1
1990	130	4
1990	130	3
2000	80	1
2010	80	3
2010	90	2
2030	70	3
2050	80	3

Table4.5 1次冷却材熱交換器 No.2 における洗浄前の熱貫流率と熱貫流率回復値

洗浄前の熱貫流率 (W/ m ² · K)	熱貫流率回復値 (W/ m ² · K)	洗浄時間 (h)
1650	350	2
1730	190	1
1770	160	4
1800	180	5
1820	110	3
1840	175	1
1850	150	3
1860	80	3
1860	60	2
1870	190	4
1880	120	4
1900	80	2
1900	100	4
1900	120	3
1910	90	1.5
1950	70	3
1950	70	4
1970	60	3
1980	50	2

Table4.6 重水熱交換器における洗浄前の熱貫流率と熱貫流率回復値

洗浄前の熱貫流率 (W/ m ² · K)	熱貫流率回復値 (W/ m ² · K)	洗浄時間 (h)
1500	340	1
1595	345	0.67
1640	400	1
1710	340	0.67
1760	310	1
1910	230	3
1970	100	1
2020	80	1
2030	120	1
2040	130	2
2050	150	1

Table4.7 使用済燃料プール水熱交換器における洗浄前の熱貫流率と熱貫流率回復値

洗浄前の熱貫流率 (W/ m ² · K)	熱貫流率回復値 (W/ m ² · K)	洗浄時間 (h)
1490	630	0.67
1520	700	1
1620	450	1
1640	700	1
1650	550	0.67
1740	260	1
1740	480	1
1800	320	1
1860	390	1
1950	220	3
2020	200	1
2030	100	1
2080	150	1

Table4.8 各熱交換器における熱貫流率回復値と洗浄時間の関係

1 次冷却材熱交換器 No.1

洗浄前の熱貫流率 (W/ m ² · K)	熱貫流率回復値 (W/ m ² · K)	洗浄時間 (h)
～1720	300～400	2
1730～1875	200～250	5
1880～1900	100～160	4
1910～1990	80～130	3
2000～2050	80	3

1 次冷却材熱交換器 No.2

洗浄前の熱貫流率 (W/ m ² · K)	熱貫流率回復値 (W/ m ² · K)	洗浄時間 (h)
～1650	350	2
1660～1850	110～190	5
1860～1910	60～190	4
1920～1980	50～70	4

重水熱交換器

洗浄前の熱貫流率 (W/ m ² · K)	熱貫流率回復値 (W/ m ² · K)	洗浄時間 (h)
1500～1760	310～400	1
1770～1910	230～	3
1920～2050	80～150	2

使用済燃料プール水熱交換器

洗浄前の熱貫流率 (W/ m ² · K)	熱貫流率回復値 (W/ m ² · K)	洗浄時間 (h)
～1520	630～700	1時間で十分洗浄可能
1530～1650	450～700	
1660～2020	200～480	
2030～2080	100～150	

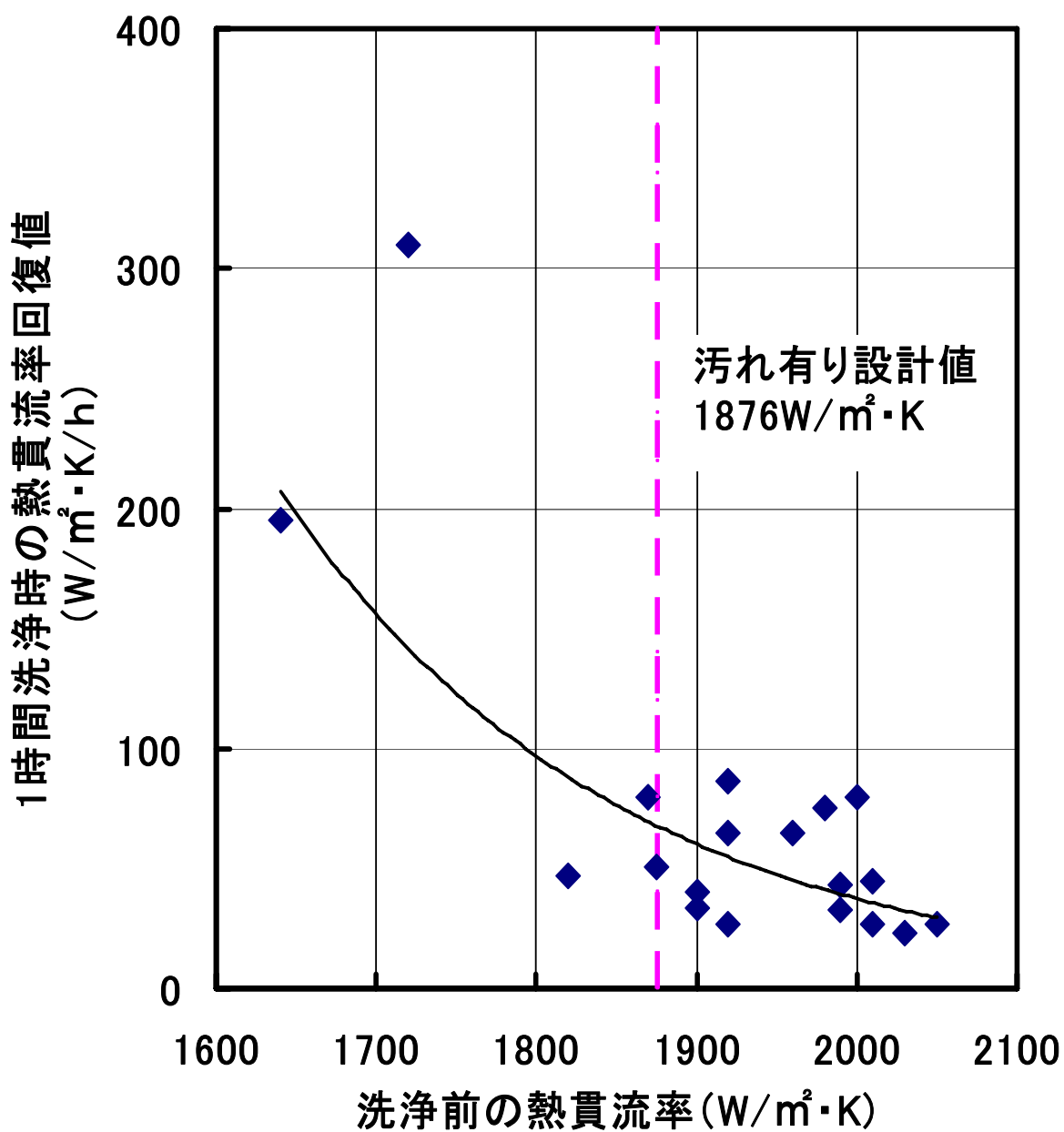


Fig.4.1 1次冷却材熱交換器 No.1 における 1 時間洗浄時の熱貫流率回復値

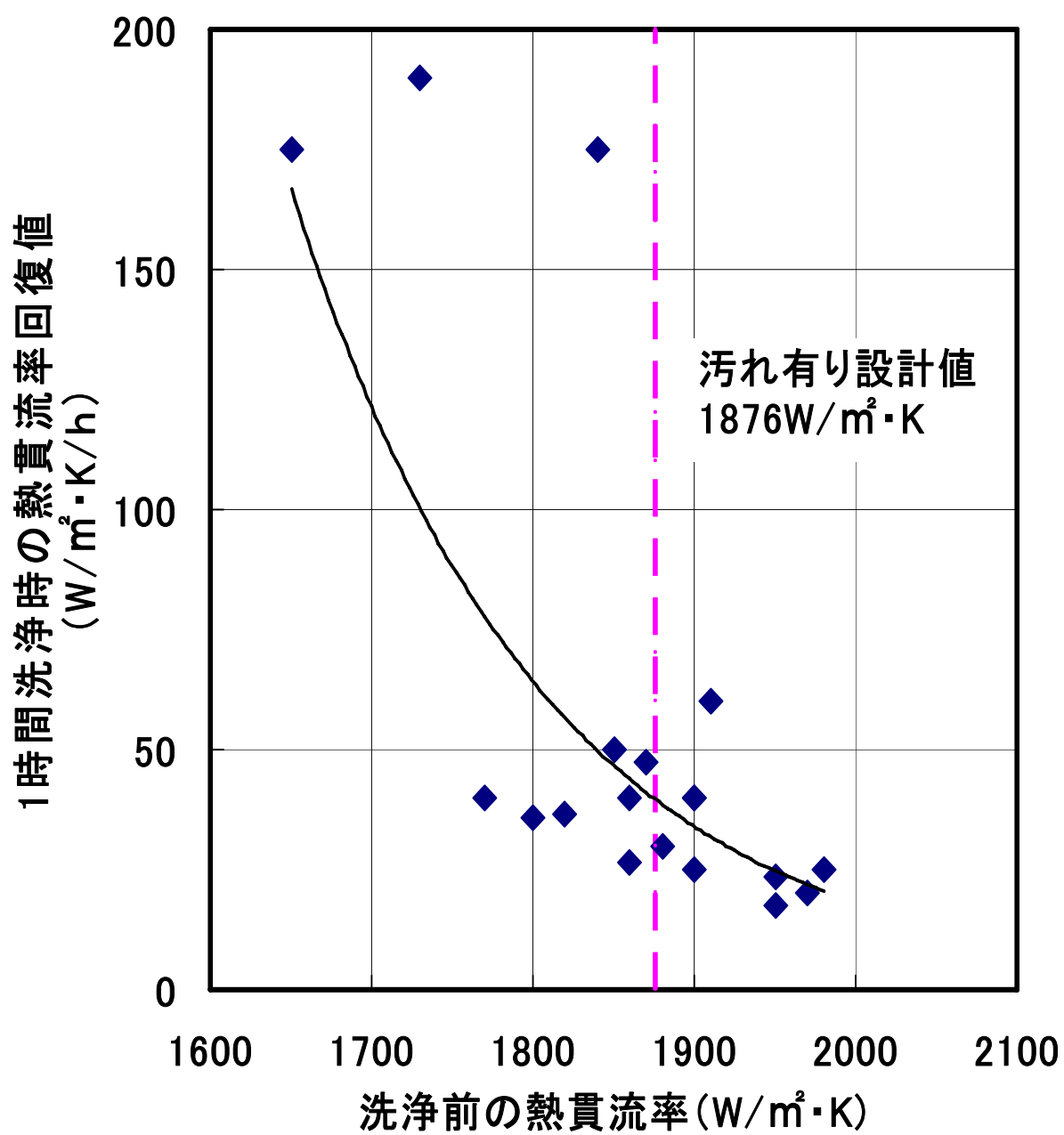


Fig.4.2 1次冷却材熱交換器 No.2 における 1 時間洗浄時の熱貫流率回復値

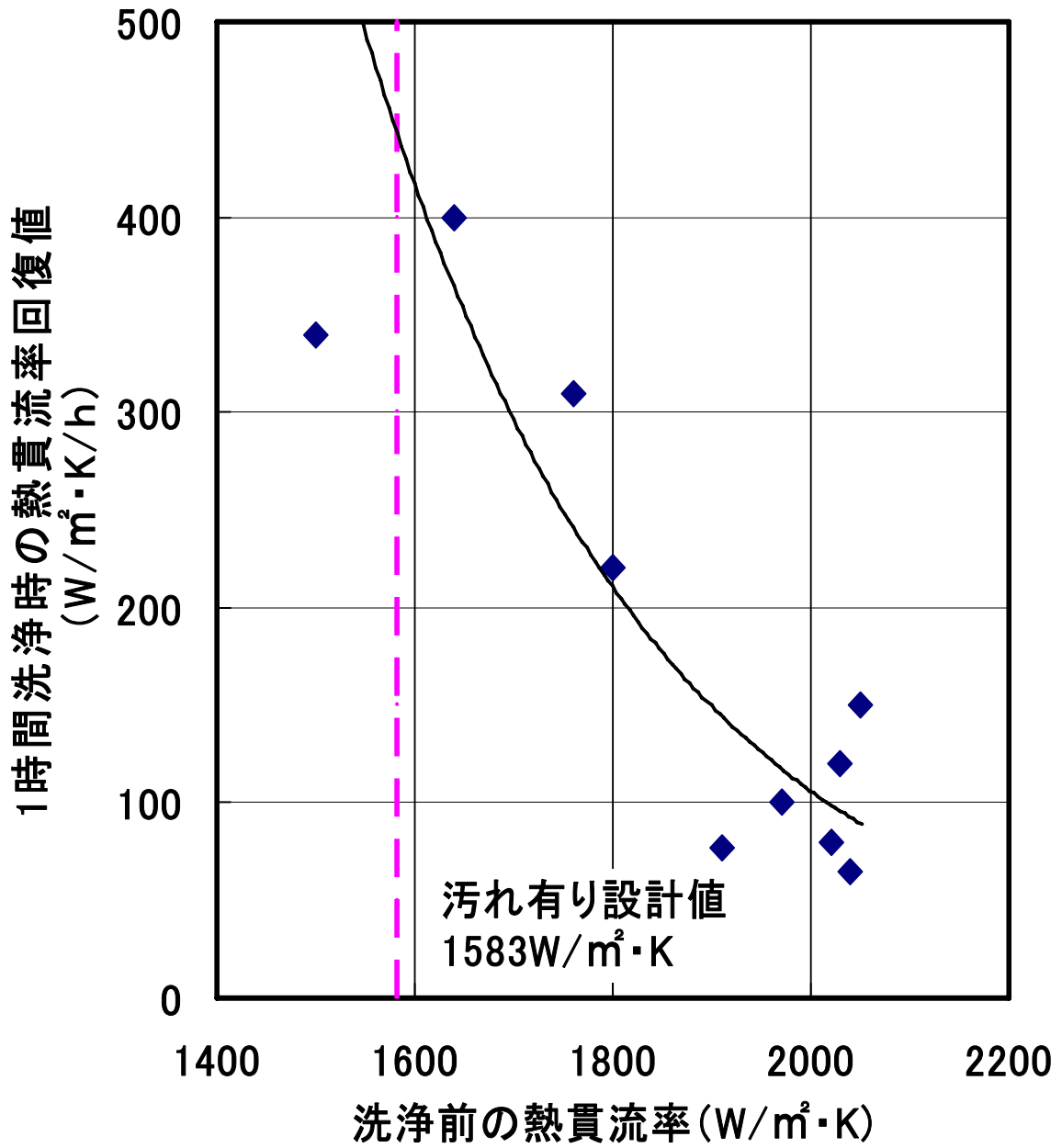


Fig.4.3 重水熱交換器における 1 時間洗浄時の熱貫流率回復値

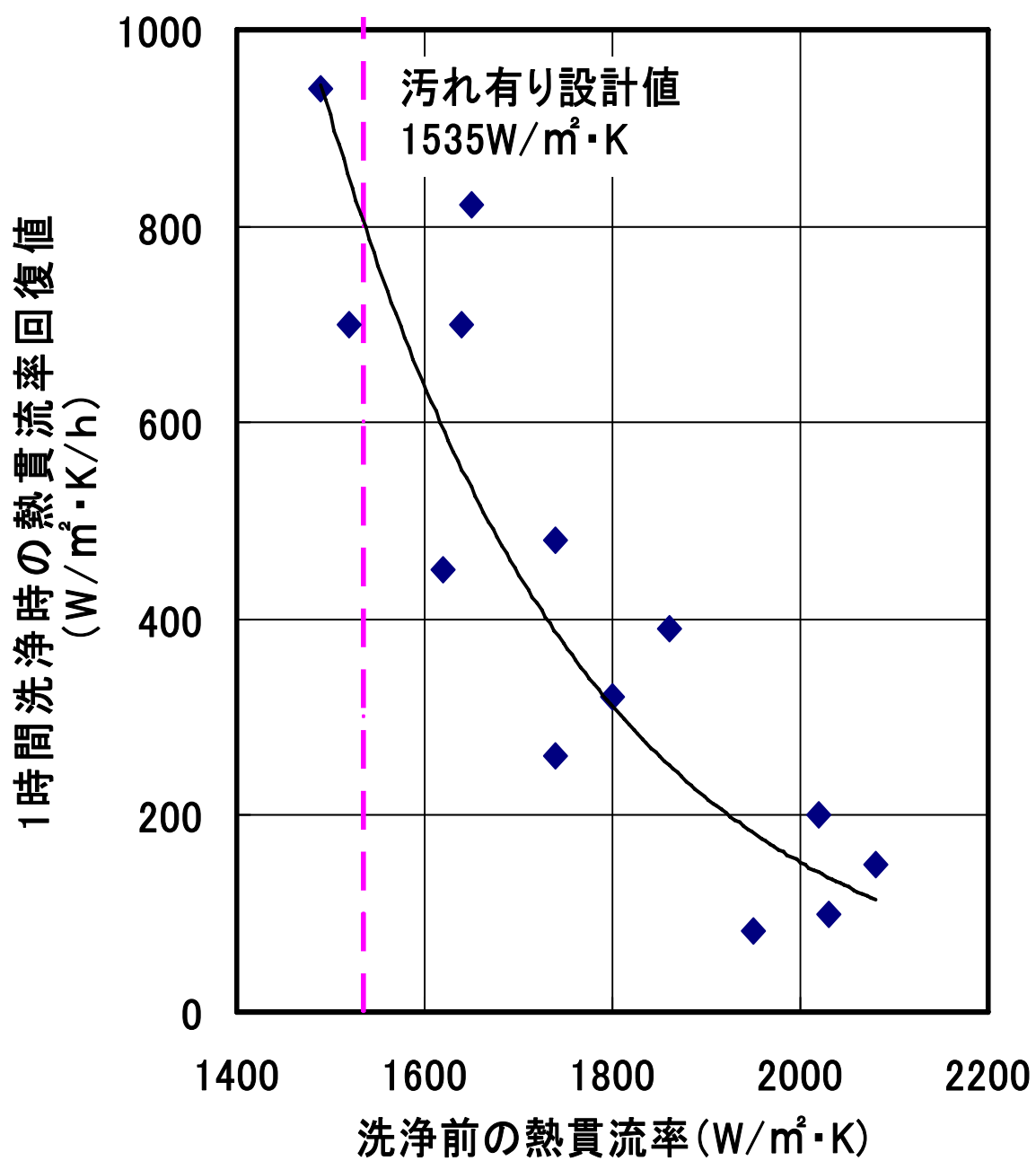


Fig.4.4 使用済燃料プール水熱交換器における 1 時間洗浄時の熱貫流率回復値

5. 考察

5.1 研究炉における熱交換器洗浄方法

研究炉で用いられている代表的な熱交換器洗浄方法を Table5.1 に示す。

5.2 ボール洗浄の利点

Table5.2 に 研究炉における 1 次冷却系熱交換器の仕様比較¹⁾を示す。JRR-3 は、胴側を 1 次冷却水が、伝熱管側を 2 次冷却水が流れ、他の研究炉とは逆の構造になっている。他の研究炉における熱交換器洗浄方法としては、ボール洗浄のように物理的な洗浄が不可能なため化学洗浄や乾燥洗浄を定期的に行い、伝熱管の外側表面の汚れを落としている。スライム洗浄剤及びスケール防止剤等の薬液の経済的な負担も大きくなり、更に化学物質を含む廃液が発生するため環境汚染の可能性も考えられ、加えて薬液によって伝熱管や系統配管を腐食させることで洗浄回数は制限されることが考えられる。一方で、スポンジ洗浄は化学洗浄を行なわないために伝熱管寿命を長くする事ができ、薬剤費用や廃液処分費用等コスト面でも優れている。更に、化学洗浄に比べて薬液による環境汚染物質を生じるおそれも無く、環境に優しい利点を有している。

Table5.1 研究炉における熱交換器洗浄方法

洗浄方法名	内容
化学洗浄	スライム洗浄及び酸洗浄方法があり、スライム洗浄は過酸化水素等によりスライム除去を行い、酸洗浄においてはクエン酸モノアンモン等によりスケール除去を行っている。 シェルアンドチューブタイプの熱交換器における伝熱管側を 1 次冷却材が流れ、胴側を 2 次冷却材が流れる。
乾燥洗浄	熱交換器の 2 次冷却材を抜き、送風機等により通風を行った後、乾燥空気を供給し伝熱管表面を乾燥させ付着したスライム及びスラッジ等を剥離する。その後、循環水のフラッシングにより除去する。 シェルアンドチューブタイプの熱交換器における伝熱管側を 1 次冷却材が流れ、胴側を 2 次冷却材が流れる。
ボール洗浄	高圧力の 2 次冷却材中に混入させたスポンジボールが、熱交換器伝熱管内を摩擦しながら通過する。それによって、伝熱管内に付着、蓄積されたスケールやスラッジ等の汚れを剥離する

Table5.2 研究炉における1次冷却系熱交換器の仕様比較^[1]

		JRR-3	JRR-2	JRR-4	JMTR	
型 式		横型シェルアンドチューブ 2 胴式	横型 U 字二重管板 2 胴式	向流型直管 1 折流 2 胴式	横型シェルアンド U チューブ 式	
基 数		2	2	2	3	
伝 熱 面 積 (m ² /基)		1060	266	142	1100	
水 質	管 側	2 次冷却水 (ろ過水)	1 次冷却水 (重 水)	1 次冷却水 (純 水)	1 次冷却水 (純 水)	
	胴 側	1 次冷却水 (純 水)	2 次冷却水 (ろ過水)	2 次冷却水 (ろ過水)	2 次冷却水 (ろ過水)	
構 造 設 計	シ エ ル	堂内径 (mm)	1650	950	550	1600
		胴 長 (mm)	5350	4447	5132	10150
		最高使用圧力(kg/cm ²)	8.0	5.27	5.0	5.0
		材質	SUS304L	SUS304	SUS304	SS41
	伝 熱 管	外径 (mm)	19.0	15.9	15.9	19.0
		厚さ (mm)	1.0	1.2	1.2	1.2
		長さ (mm)	3485	6500	5132	8550
		本数(本/基)	5496	825	341	1152
		最高使用圧力(kg/cm ²)	8.0	5.27	5.0	20.0
		材質	SUS316L	SUS304L	SUS304L	SUS27
		原子炉熱出力 (MW)	20	10	3.5	50
	一 次 冷 却 水	流 量 (m ³ /h)	1200	1134	420	2000
		入口温度 (°C) : Ti ₁	42.06	54.0	50.0	55.0
		出口温度 (°C) : Ti ₂	35.0	47.07	42.8	47.0
二 次 冷 却 水	流 量 (m ³ /h)	1450	772	432	1300	
	入口温度 (°C) : To ₁	30.0	27.5	32.3	31.0	
	出口温度 (°C) : To ₂	35.83	38.7	39.3	43.0	
汚 れ 係 数 (m ² h °C/kcal)	胴 側	0.0001	0.0002	0.0002	0.000276	
	管 側	0.0001	0.0001023	0.00015	0.000307	
総括伝熱係数 : (kcal /m ² h°C)		1613	1256	1117	1252	
1 次冷却水温度効率* : E ₁		0.59	0.26	0.41	0.33	
熱出力/伝熱面積 (k W/m ²)		9.2	18.8	12.3	15.1	

$$* : E_1 = \frac{T_{i1} - T_{i2}}{T_{i1} - T_{o1}}$$

6. まとめ

ボール洗浄による熱交換器の性能維持にあたり、各熱交換器の熱貫流率を継続して監視する必要がある。熱交換器の汚れ状態によって、洗浄対象熱交換器や洗浄時間を決定する管理を行ってきたが、今後も継続的にその管理を行っていくことが重要である。

今回の検討結果で明らかとなった、下記に示す熱貫流率を目安とする熱交換器の洗浄方法を提案することで、更なる JRR-3 の安定運転に貢献できると考えられる。

- | | | |
|---------------|-----------------------|-------------------------------|
| (1) ボールサイズ | : 標準ボール ϕ 17.5mm | |
| (2) 熱貫流率の洗浄目安 | : 1次冷却材熱交換器の下限値 | : 1876 W/ m ² · K。 |
| | 重水熱交換器の下限値 | : 1583 W/ m ² · K。 |
| | 使用済燃料プール水熱交換器の下限値 | : 1535 W/ m ² · K。 |
| (3) 洗浄時間の目安 | : Table4.8 により決定する。 | |

謝 辞

本報告をまとめるにあたり技術的な助言、協力を頂いた研究炉加速器管理部山下清信部長に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 堀口洋憲、他 “JRR-4 熱交換器の管理技術”、JAERI-Tech 2005-001、(2005 年)
- [2] 日本機械学会、“伝熱工学資料” 日本機械学会、(1976 年)

付 録

A1 JRR-3 熱交換器の仕様

JRR-3 における各熱交換器の仕様を TableA1.1～A1.3 に示す。

TableA1.1 1次冷却材熱交換器機器仕様

項 目		単 位	管 側	
型 式		—	横型シェルアンドチューブ式2胴熱交換器	
基 数		基	2	
流 体		—	軽水 (2次冷却材)	軽水 (1次冷却材)
放射能濃度		$\mu\text{ci}/\text{cm}^2$	1未満	1未満
定常 運轉時 (夏 季)	流量	m^3/h	1450	1200
	入口温度	$^{\circ}\text{C}$	30	42.06
	出口温度	$^{\circ}\text{C}$	35.83	35
	設計熱交換量	MW/h	9.75 (8.39×10^6 kcal/h/基)	
定常 運轉時 (冬 季)	流量	m^3/h	1450	1200
	入口温度	$^{\circ}\text{C}$	30	42.06
	出口温度	$^{\circ}\text{C}$	20.83	35
	設計熱交換量	MW/h	9.75 (8.39×10^6 kcal/h/基)	
低出力 運轉時	流量	m^3/h	1450	270
	入口温度	$^{\circ}\text{C}$	30	35.14
	出口温度	$^{\circ}\text{C}$	30.12	35
	設計熱交換量	kW	200 (1.72×10^6 kcal/h)	
伝熱面積		m^2	1060 (1081) / 2胴 *1	
折流数		—	6	2
全長		mm	5110	
胴体 内径×板厚		mm	$\phi 1650 \times 14$	
水室 内径×板厚		mm	$\phi 1650 \times 14$	
水室鏡板 板厚		mm	16	
管 板 板厚		mm	90	
伝熱管 外径×板厚		mm	$\phi 19 \times 1.0$	
伝熱管 本数		本	5496 / 2胴	
管 端 処 理		—	拡 管	
重 量		kg	機器重量	36900
			運轉時重量	59500

*1 : () 内は有効伝熱面積を示す。

Table A1.2 重水熱交換器機器仕様

項 目		単 位	管 側	
型 式		—	横型シェルアンドチューブ式2胴熱交換器	
基 数		基	1	
流 体		—	軽水 (2次冷却材)	重水
放射能濃度		$\mu\text{ci}/\text{cm}^2$	1未満	1以上
定常 運轉時 (夏 季)	流量	m^3/h	140	70
	入口温度	$^{\circ}\text{C}$	30	42.43
	出口温度	$^{\circ}\text{C}$	34.15	35
	設計熱交換量	kW/h	670 (5.77×10^5 kcal/h/基)	
定常 運轉時 (冬 季)	流量	m^3/h	140	70
	入口温度	$^{\circ}\text{C}$	15	42.43
	出口温度	$^{\circ}\text{C}$	19.15	35
	設計熱交換量	kW/h	670 (5.77×10^5 kcal/h/基)	
低出力 運轉時	流量	m^3/h	140	70
	入口温度	$^{\circ}\text{C}$	30	35.11
	出口温度	$^{\circ}\text{C}$	30.06	35
	設計熱交換量	kW	10 (8.6×10^3 kcal/h)	
伝熱面積		m^2	69 (70) / 2胴 *1	
折流数		—	8	2
全長		mm	2980	
胴体 内径×板厚		mm	$\phi 600 \times 8$	
水室 内径×板厚		mm	$\phi 600 \times 9$	
水室鏡板 板厚		mm	9	
管 板 板厚		mm	50	
伝熱管 外径×板厚		mm	$\phi 19.0 \times 1.0$	
伝熱管 本数		本	600/2胴	
管 端 処 理		—	拡 管 + 溶 接	
重 量		kg	機器重量	3970
			運轉時重量	5750

*1 : () 内は有効伝熱面積を示す。

Table A1.3 使用済燃料プール水熱交換器機器仕様

項 目		単 位	管 側	
型 式		—	縦型シェルアンドチューブ式熱交換器	
基 数		基	1	
流 体		—	軽水 (2次冷却材)	軽水 (1次冷却材)
放射能濃度		$\mu\text{ci}/\text{cm}^2$	1未満	1未満
定常 運轉時 (夏季)	流量	m^3/h	150	70
	入口温度	$^{\circ}\text{C}$	30	35
	出口温度	$^{\circ}\text{C}$	30.72	33.45
	設計熱交換量	kW/h	125 (1.08×10^5 kcal/h/基)	
定常 運轉時 (冬季)	流量	m^3/h	150	70
	入口温度	$^{\circ}\text{C}$	15	18.05
	出口温度	$^{\circ}\text{C}$	15.72	16.5
	設計熱交換量	$\text{kW}/\text{基}$	125 (1.08×10^5 kcal/h/基)	
伝熱面積		m^2	23 (24) *1	
折流数		—	2	1
全長		mm	3013	
胴体 内径×板厚		mm	$\phi 550 \times 8$	
水室 内径×板厚		mm	$\phi 550 \times 9$	
水室鏡板 板厚		mm	9	
管 板 板厚		mm	55	
伝熱管 外径×板厚		mm	$\phi 19 \times 1.0$	
伝熱管 本数		本	244	
管 端 処 理		—	拡 管	
重 量		kg	機器重量	1700
			運轉時重量	2330

*1: () 内は有効伝熱面積を示す。

A2 熱貫流率の算出方法

熱交換器の冷却性能は、熱貫流率 ($W/m^2 \cdot K$) で管理している。以下に、熱貫流率の算出方法を示す。²⁾

熱交換量 Q は、(3-1)式から求める。

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

熱貫流率 k は、(3-2)式から求める。

$$k = \frac{Q}{A \cdot \Delta T_m} \times 1.1629 \quad (3-2)$$

ただし

Q : 単位時間当たりの熱交換量(kcal/h)

W : $G \cdot c \cdot \rho$

G : 流量(kg/h) $G = 1200 \text{ m}^3 \cdot \rho$ 1次冷却材熱交換器 No.1 及び No.2
 $G = 70 \text{ m}^3 \cdot \rho$ 重水熱交換器
 $G = 140 \text{ m}^3 \cdot \rho$ 使用済燃料プール水熱交換器

c : 定圧比熱(kcal/kg $^\circ\text{C}$) $c = 0.998$ 1次冷却材熱交換器、使用済燃料プール水熱交換器
 $c = 1.008$ 重水熱交換器

ρ : 密度(kg/m 3) 水 992.8(kg/m 3) 1次冷却材熱交換器、使用済燃料プール水熱交換器
 重水 1100(kg/m 3) 重水熱交換器

t_1 : 1次冷却水 熱交換器入口温度 ($^\circ\text{C}$)

t_2 : 1次冷却水 熱交換器出口温度 ($^\circ\text{C}$)

t'_1 : 2次冷却水 熱交換器入口温度 ($^\circ\text{C}$)

t'_2 : 2次冷却水 熱交換器出口温度 ($^\circ\text{C}$)

A : 伝熱面積(m^2) $A = 1060 \text{ m}^2$ 1次冷却材熱交換器 No.1 及び No.2
 $A = 69 \text{ m}^2$ 重水熱交換器
 $A = 23 \text{ m}^2$ 使用済燃料プール水熱交換器

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

$$= - \frac{(t'_2 - t'_1) - (t_1 - t_2)}{2.303 \log_{10} [(t_1 - t'_2) / (t_2 - t'_1)]}$$

1.1629 : (kcal/ $\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$)から($W/ \text{m}^2 \cdot K$)への換算係数

This is a blank page.

A3 洗浄手順

伝熱性能を維持させる洗浄作業方法を以下に示す。作業準備として、洗浄ボールの色を決定し、あらかじめ含水しなじませておく。2次冷却材の温度が15°C以下の場合、原子炉建屋内配管の結露を防止するために中央制御室及び現場の蒸気弁を開けて蒸気を投入する。洗浄対象熱交換器の系統ラインを確保する為に、原子炉建屋内及び2次冷却塔の対象弁を開操作する。ここで重要な操作として、系統流量を通常より増大させる為に2次冷却塔入口弁を通常開度50%を100%全開状態にする。特に1次冷却材熱交換器 No.1、No.2 を洗浄する場合には熱交換器出口弁を通常開度の33%から57%まで大きくし、系統流量を通常3200m³/hから3400m³/h以上に上昇させる。同様に使用済燃料プール水熱交換器を洗浄する場合においても、熱交換器出口弁を通常開度の41%から46%まで大きくし系統流量を通常170m³/hから195m³/h以上に上昇させる。洗浄装置操作盤内のタイマーにより、洗浄時間は最長5時間、回収時間は最長1時間の自動運転が可能である。洗浄中は、中央制御室にて、流量、弁開度、系統における状態を監視する。回収において、回収率が90%以下である場合、更に手動モードにて30分間回収を延長する。作業終了後、開度を変更した弁を調整前状態に戻す。なお、熱交換器出入口間にある程度の差圧（流速表示で通常1.3m/s以上）があるとスポンジボールは水流に乗って自動的に管内を通過する。系統流量上昇に伴い、熱交換器出入口間の差圧は低下するため、弁開度上昇の設定は流速を考慮して設定した。

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	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
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度 (質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
質量体積 (比体積)	立法メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量の) 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	(数の) 1	1

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad		m ⁻¹ ・m ¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m ¹ ・kg ¹ ・s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ・kg ¹ ・s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg ¹ ・s ⁻²
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg ¹ ・s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s ¹ ・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg ¹ ・s ⁻³ ・A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² ・kg ¹ ・s ⁻³ ・A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg ¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg ¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg ¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		K
光照射度	ルーメン	lm	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
放射能	ベクレル	Bq	lm/m ²	m ² ・m ⁻⁴ ・cd=m ⁻² ・cd
(放射性核種の) 放射能吸収線量, 質量エネルギー分与, カーマ線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	グレイ	Gy	J/kg	m ² ・s ⁻²
	シーベルト	Sv	J/kg	m ² ・s ⁻²

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときにいくつかの用例は表4に示されている。
 (b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。
 (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
 (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘着力のモーメント	ニュートンメートル	N・m	m ² ・kg ¹ ・s ⁻²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg ¹ ・s ⁻²
表角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m ¹ ・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m ¹ ・m ⁻¹ ・s ⁻² =s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg ¹ ・s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² ・kg ¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー	ジュール毎キログラム	J/(kg・K)	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
質量エネルギー (比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	m ¹ ・kg ¹ ・s ⁻³ ・K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ ・kg ¹ ・s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m ¹ ・kg ¹ ・s ⁻³ ・A ⁻¹
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s ¹ ・A
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s ¹ ・A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m ¹ ・kg ¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg ¹ ・s ⁻² ・mol ⁻¹
モルエントロピー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg ¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹
モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg ¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ ・s ¹ ・A
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m ² ・s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ ・m ⁻² ・kg ¹ ・s ⁻³ =m ² ・kg ¹ ・s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² ・sr)	m ² ・m ⁻² ・kg ¹ ・s ⁻³ =kg ¹ ・s ⁻³

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	l, L	1 l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1 Np=1
ベル	B	1 B=(1/2) ln10 (Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1 u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1 ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	海里	1 海里=1852m
ノット	ノット	1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バール	b	1 b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm ² =0.1Pa・s
ストークス	St	1 St=1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G ≅ 10 ⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe ≅ (1000/4π) A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx ≅ 10 ⁻⁸ Wb
スチルブ	sb	1 sb=1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガル	Gal	1 Gal=1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位	X	1 X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ	fm	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 metric carat = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

