

JAERI-Tech

JP0350094

2003-041



高温ヘリウム漏えい箇所特定システムの開発（共同研究）

第2報 光ファイバ温度センサのHTTRへの適応性の検討

2003年3月

坂場 成昭・中澤 利雄・川崎 幸三・浦上 正雄*・最首 貞典*

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、
お申し越しください。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おこなっております。

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, Ibarakiken 319-1195, Japan.

高温ヘリウム漏えい箇所特定システムの開発（共同研究）
第2報 光ファイバ温度センサの HTTR への適応性の検討

日本原子力研究所大洗研究所高温工学試験研究炉開発部
坂場 成昭・中澤 利雄・川崎 幸三・浦上 正雄*・最首 貞典*

(2003 年 1 月 31 日受理)

高温ヘリウム漏えい箇所特定システムの開発の第 2 段階として、光ファイバ温度センサの HTTR への適応性を検討した。光ファイバ温度センサは、漏えいしたヘリウムガスによる光ファイバの温度変化により漏えいの有無を検出する。本検討では、光ファイバ単体での検出方式に加えて、HTTR の高温機器用に保温材と一体となった検出方式の検討を行った。試験の結果、設定した目標時間 2 時間に對して、漏えい量が $5.0 \sim 20.0 \text{cm}^3/\text{s}$ では、60 分以内に漏えいを検知し、特に $20.0 \text{cm}^3/\text{s}$ の漏えいでは、より早い漏えい検知が可能であった。

本研究は日本原子力研究所と日本原子力発電株式会社との共同研究に基づいて実施したものである。

大洗研究所：〒311-1394 茨城県東茨城郡大洗町成田町新堀 3607

* 日本原子力発電株式会社

**Research and Development for the High-temperature Helium-leak
Detection System (Joint Research) -Part 2 Development of
Temperature Sensors using Optical Fibre for the HTTR-**

**Nariaki SAKABA, Toshio NAKAZAWA, Kozo KAWASAKI,
Masao URAKAMI^{*} and Sadanori SAISYU^{*}**

**Department of HTTR Project
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken**

(Received January 31, 2003)

In the second stage of the research and development for a high-temperature helium-leak detection system, the temperature sensor using optical fibres was studied. The sensor detects the helium leakage by the temperature increase surrounded optical fibre with or without heat insulator. Moreover, the applicability of high temperature equipments as the HTTR system was studied. With the sensor we detected 5.0-20.0 cm³/s helium leakages within 60 minutes. Also it was possible to detect earlier when the leakage level is at 20.0 cm³/s.

Keywords: Leakage, Event, Helium, Coolant, Detector, Optical Fibre, Monitoring, HTGR, HTR, HTTR

This work has been performed in JAERI as a joint research with The Japan Atomic Power Company.

^{*} The Japan Atomic Power Company

目次

1. 緒言	1
2. 光ファイバ温度センサの HTTR への適応性の検討	2
2.1 漏えい模擬試験装置	2
2.2 漏えい模擬試験装置の特性試験	2
2.3 保温材一体型温度センサの開発	19
2.4 単体型温度センサの開発	37
2.5 模擬試験装置による伝熱シミュレーション	60
2.6 評価	67
3. 結言	74
謝辞	74
参考文献	74
付録 HTTR におけるセンサの設置場所の検討	75

Contents

1. Introduction	1
2. Development of Temperature Sensors using Optical Fibre	2
2.1 Leakage Examination Device	2
2.2 Functional Tests of Leakage Examination Device	2
2.3 Leakage Detection by Temperature Sensors of Heat Insulation All-in-one Model	19
2.4 Leakage Detection by Single Type Temperature Sensors	37
2.5 Simulation by Mock Examination Device	60
2.6 Evaluation	67
3. Conclusion	74
Acknowledgement	74
Reference	74
Appendix	75

This is a blank page.

1. 緒言

高温ガス炉の冷却材に使用されるヘリウムガスは、水や炭酸ガス等に比べ分子の大きさが小さいため一般的に漏えいポテンシャルは高く、またヘリウムガスは無色透明の気体であるため、微小な漏えいが万が一発生した場合には、漏えい箇所の特定は困難である。日本初の高温ガス炉 HTTR⁽¹⁾⁽²⁾は、2001年12月に定格出力を達成し、世界で初めて原子炉から 850°C の熱を取り出すことに成功した。今後 HTTR は本格運転を実施していく計画であるが、本格運転を行う上で、ヘリウムガス漏えいに対する早期検知は、安全・安定運転のために非常に重要である。

本研究は、高温ガス炉で適用可能な高温環境下での高温ヘリウム漏えい箇所特定システムを開発することを目的とする。高温ヘリウム漏えい箇所特定システムは、フランジ等の機械締結箇所から漏えいする高温のヘリウムガスを光ファイバの温度変化により漏えいの有無を検知するものである。

本研究報告の第1報⁽³⁾では、開発の第一段階として、光ファイバによる高温ヘリウム漏えい検知技術の適用の可能性を調査するため、国内外における漏えい事故事例およびガス漏えい検知技術調査を行った。漏えい事故事例の調査の結果から、シール部あるいは溶接部からの漏えい報告が多く、原子炉のプラント形式に依存しない傾向があることが分かり、またガス漏えい検知技術調査から、多点同時計測が可能で、電磁波に対する耐ノイズ性が高い光ファイバ温度センサを選択することを決定した。具体的には、ヘリウムガスの漏えい検知に有用な手法と考えられる、β線による空気とヘリウムの阻止能の違いを用いて、β線計数率の比率を定量評価する新しい方法を提案した。

本報では、開発の第2段階として、光ファイバ温度センサの HTTR への適応の検討を行った結果を報告する。なお、本検討に先立ち実施した HTTR におけるセンサの設置場所の検討結果を付録に示す。

2. 光ファイバ温度センサの HTTR への適応性の検討

2.1 漏えい模擬試験装置

漏えいのメカニズム把握を目的とし、まずヘリウムガスの漏えい模擬試験装置を製作した。ヘリウム漏えい模擬試験装置は、漏えい量及び漏えいガス温度を設定するために、それぞれ流量調整弁およびガス加熱装置を設け、また漏えいガス量計測のための漏えい量測定器および光ファイバによる温度計測のためにガス補修器を設けた。ヘリウムガス漏えい模擬装置のブロックを図 1 に示す。

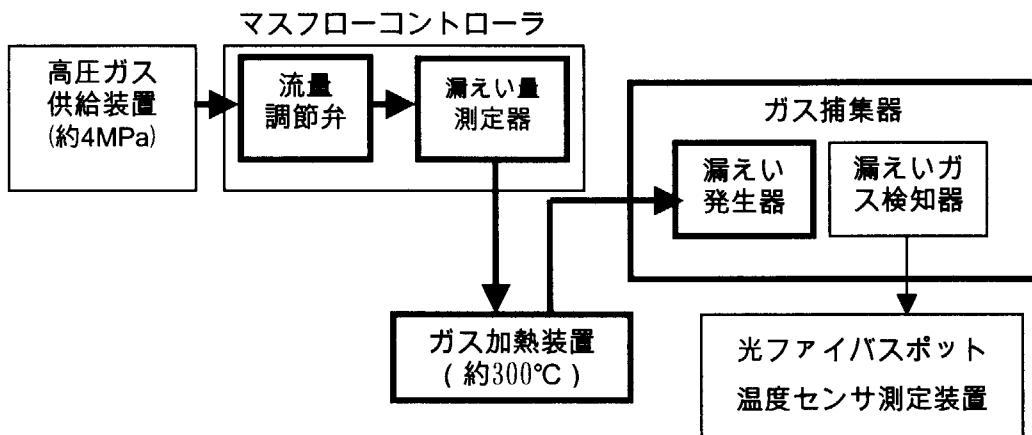


図 1 ヘリウムガス漏えい模擬装置のブロック図

漏えい量の調整のためにマスフローコントローラを使用した。マスフローコントローラの最大ガス圧力は HTTR の 1 次系圧力に対応するため 4MPa、また、流量調節範囲は HTTR で想定している小漏えい範囲としての 0.4~20cm³/s とした。ガス温度調整のために設置するガス加熱装置には、電気ヒータを使用した。電気ヒータは電力調整素子により温度制御が行われ、一定の温度に保持することが可能である。ヘリウムガス温度の最大は、300°C とし、HTTR の 1 次系の入口側を想定した。ガス補修器は、漏えい発生器および漏えいガス検知器により構成する。光ファイバ温度測定装置は、方式がループ方式、測定間隔が 1m、測定距離が最大 4km、温度精度が ±1~3°C、光ファイバが GI50/125 を使用し、コンピュータに接続することにより、自動的に測定データが保存される。

2.2 漏えい模擬試験装置の特性試験

ヘリウムガス漏えい模擬装置の特性確認のため、流量制御特性、温度分布特性試験および漏えいガス温度特性試験を実施した。

2.2.1 試験方法

(1) 流量制御特性試験

流量制御特性試験は、ヘリウムガス漏えい模擬装置から漏えいさせたヘリウムガスの体積を直接測定し、マスフローコントローラの流量調節機能の特性把握が目的である。

試験装置の構成図を図2に、試験方法を図3に示す。試験方法はヘリウムガス吹き出し口にチューブを接続し、漏えいさせたヘリウムガスを水中へ誘導し、メスシリンダで計測する。流量の判定は目視で確認する。

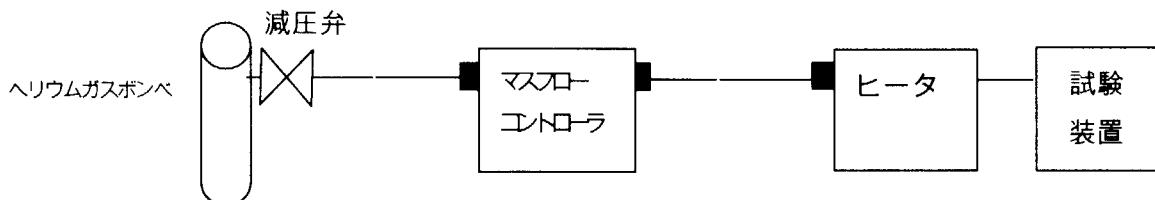


図2 ヘリウムガス漏えい模擬装置の構成

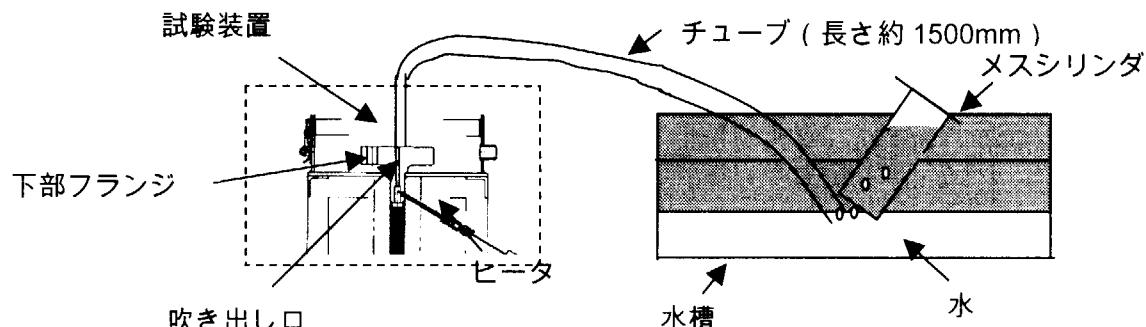


図3 試験方法

表1に漏えいさせるヘリウムガスの流量および測定時間等の試験条件を示す。各流量5回の測定を行う。ヘリウムガスの圧力は4MPaであり、測定温度は常温およびガス吹き出し口300°Cである。流量安定のために、マスフローコントローラの流量設定後、5min後に試験を開始する。マスフローコントローラの流量制御範囲は0.4~20cm³/sであり、精度は±1% of F.S(窒素ガス校正)である。試験の手順は以下のとおりである。

- ① 試験装置のヘリウムガス吹き出し口にチューブの一端を接続し、他端を水を張った水槽中へ導入する。
- ② マスフローコントローラで漏えい量のヘリウムガスを流す。
- ③ 水槽へ導入されたチューブから出てくるヘリウムガスをメスシリンダで採取し、目視によりその漏えい量を確認する。
- ④ ③の操作を5回繰り返す。

表1 流量調節試験試験項目

No	漏えい量 (cm ³ /s)	測定時間(s)	使用するメスシリンダ (cm ³)	ヘリウムガス温度(°C)	
1	0.1	30	50	常温、300°C	
2	0.2	30			
3	0.3	30			
4	0.4	20			
5	0.5	30			
6	0.6	30			
7	0.7	30			
8	0.8	30			
9	0.9	30			
10	1.0	20			
11	5.0	20	200		
12	10.0	10			
13	15.0	10	500		
14	20	10			

(2) 温度分布特性試験

温度分布特性試験は、ヒータを用いて試験装置を様々な温度に加熱し、ヘリウムガスを漏えいさせたのち、ヘリウムガスおよび試験装置の各箇所の温度変化を熱電対により計測し、その特性を把握することを目的とする。試験装置に設置した熱電対の試験条件および取付け図を表2および図4に示す。試験は、ヒータ出口温度100、200、300°C、ヘリウムガス圧力4MPaで行う。測定は45 min間(ヘリウムガス漏えい開始前15 min + 漏えい開始後30 min)、ヘリウムガス流量は0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、1.0、5.0、10.0、20.0 cm³/sとする。以下に本試験の手順を示す。

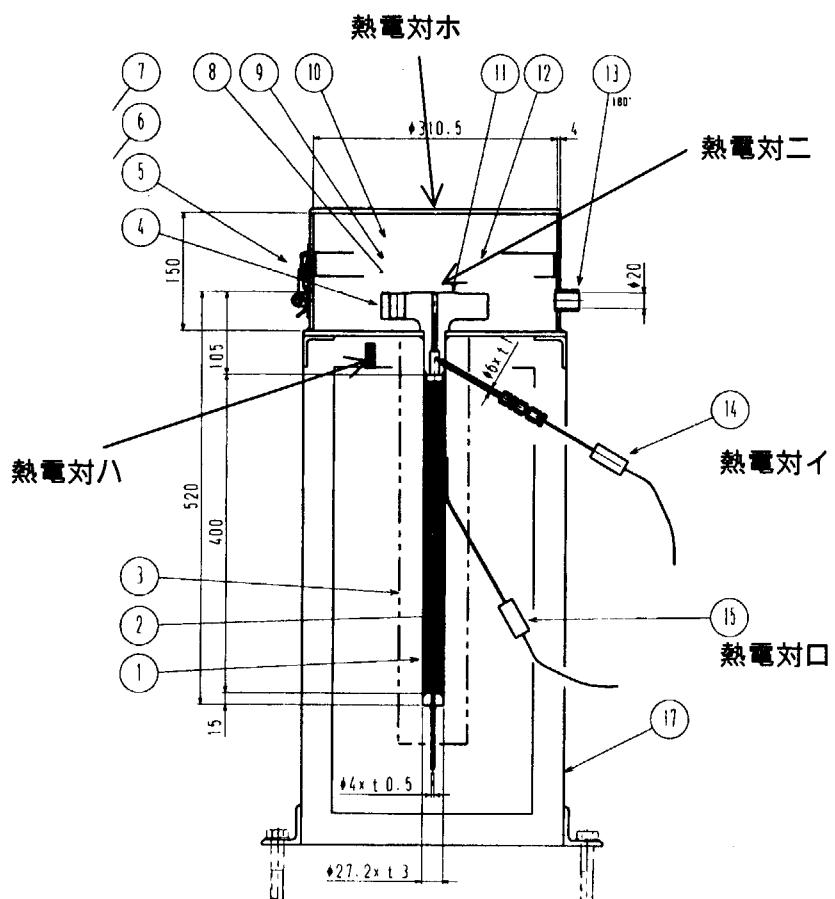
- ① 热電対をセットし、捕集器蓋をしめる。(上部フランジは外す。)
- ② 計器盤でヒータ内部温度を各設定温度に設定し、昇温する。
- ③ 設定温度で試験装置を連続運転する。
- ④ ヘリウムガス漏えい開始15 min前より、熱電対測定を開始する。
- ⑤ 計器盤でヘリウムガス流量を各流量に設定し、ヘリウムガスボンベを開き、漏えいを開始する。
- ⑥ ヘリウムガス漏えい後30 min後測定終了。

表 2 热電対設置対象

No.	取付け箇所	測定対象	設定温度	熱電対名称
1	ヒータ出口	雰囲気(ヘリウムガス温度)	100、200、300°C	熱電対イ
2	ヒータ内部	雰囲気(設定温度)	165、330、500°C	熱電対ロ
3	下部フランジ側面	フランジ	-	熱電対ハ
4	ガス吹き出し口	雰囲気	-	熱電対ニ
5	捕集器蓋	捕集器蓋	-	熱電対ホ

注) ヒータ内部温度 165°Cはヒータ出口温度 100°Cに対応し、200°Cは 330°C、500°Cは 300°Cに対応する。

品番	品名
1	加熱容器
2	充填材
3	シーズヒータ
4	フランジ
5	パチン錠
7	捕集器蓋
8	ボルト
9	座金
10	ナット
11	ガスケット
12	蓋板
13	ノズル
14	ガス温度熱電対
15	ヒータ制御熱電対
17	架台



注) 温度分布特性試験は、上部フランジを取り外して行う。

熱電対はクロメル - アルメルのK型熱電対である。

図 4 热電対取付図

(3) 温度特性試験(漏えいガス)

温度特性試験(漏えいガス)は、ヘリウムガスを漏えいさせたのち、吹き出し口、フランジ周囲および上部の雰囲気温度(ヘリウムガス温度)を測定し、ヘリウムガス漏えいにより、どの程度の温度上昇が見られるのかを熱電対により確認する。

a. 装置構成

試験装置に設置した熱電対取付け図を図5に、図6に熱電対取付け外観図を示す。

b. 試験方法

表3に各種熱電対測定の試験条件を示す。ヒータ出口温度は100、200、300°C、ヘリウムガス圧力4 MPaで行った。測定は45 min間(ヘリウムガス漏えい開始前15 min+漏えい開始後30 min)、ヘリウムガス流量は0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、1.0、5.0、10.0、20.0 cm³/sである。

表3 漏えいガス温度特性試験熱電対測定の試験条件

No.	取付け箇所	測定対象	熱電対名称
1	フランジ上部	雰囲気	熱電対A 1～A 7
2	フランジ周囲(パッキン部)	雰囲気	熱電対B 1～B 8

c. 試験手順

試験手順は、(2) 温度分布特性試験(試験装置)と同様である。

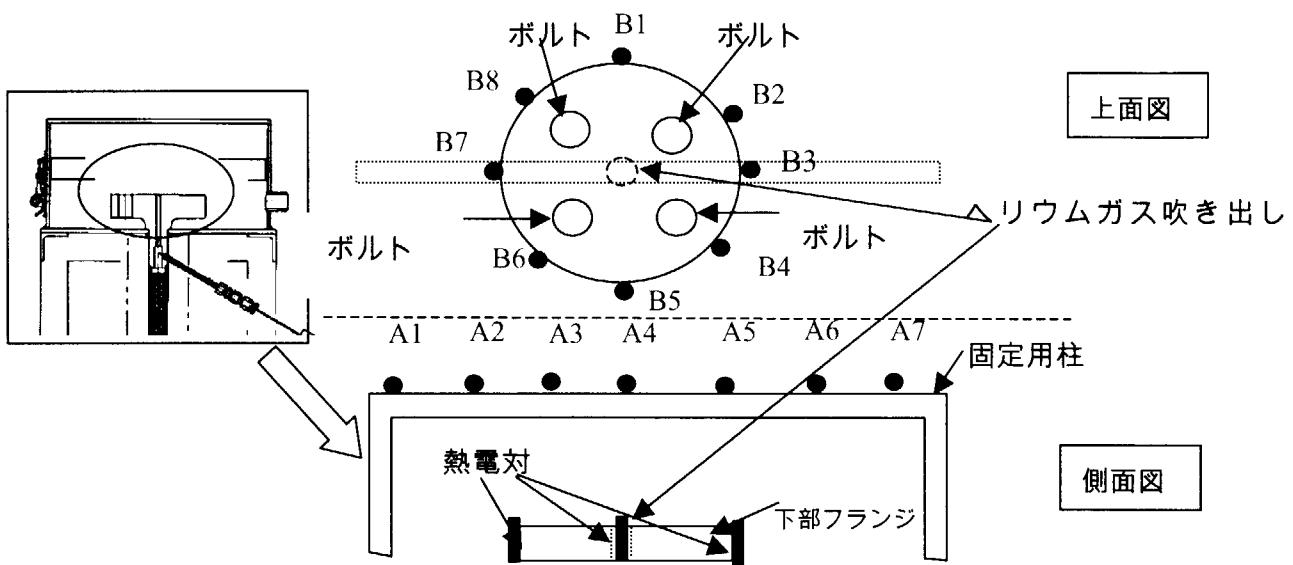


図 5 漏えいガス温度特性試験熱電対取付け図 (A1-A7, B1-B8 が設置した熱電対)

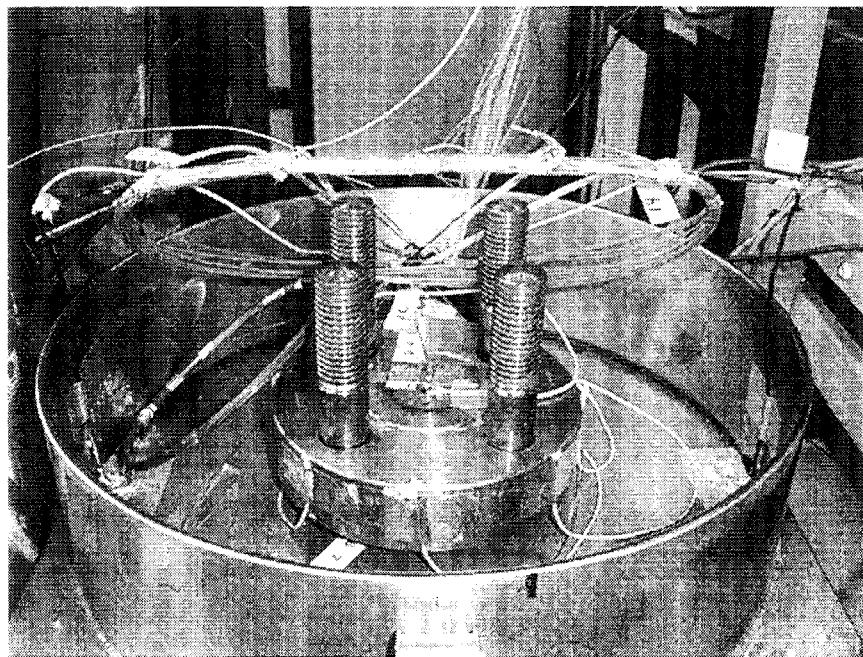


図 6 热電対取付け外観図

2.2.2 試験結果と考察

(1) 流量制御特性試験

表4および表5に測定結果を示す。

a. 直線性

実測したヘリウムガスの流量は良い直線性を示した。(表4、表5、図7、図8) 常温における各点の実測流量は、マスフローコントローラの指示値よりも、約10%高い数値を示した。指示値との差は0.2~0.4 cm³/sの低流量の範囲で大きく、0.4 cm³/s以上の流量では指示値との差は小さい傾向となった。これは流量制御範囲の設定値が0.4 cm³/s以上であるためであると考える。

300°Cに加熱した各点の実測流量は、常温におけるそれよりも指示値に近い値となった。当初、300°Cの試験では加熱されているため、常温時よりも多くヘリウムガスが流れると予想していたが、吹き出し部から約1500 mmのチューブで水槽に導入していることも有り、測定時には常温に戻っていたためと考えられる。300°Cにおいても常温時と同様に良い直線性を保っていた。一方、常温で見られた0.4cm³/sの特異点はなく、常温の0.4cm³/sは計測誤差であったと考える。

b. 制御範囲

本試験において0.4~20 cm³/sまでの流量制御範囲を確認した。また、装置としての流量制御下限である0.4cm³/s以下の0.2~0.4 cm³/sの範囲でもヘリウムガス漏えいを確認した。しかし、0.1 cm³/sの指示値においては、300°Cの試験においてもヘリウムガスの漏えいを実測できなかった。したがって、本試験装置の最少限界値は0.2 cm³/sであるといえる。

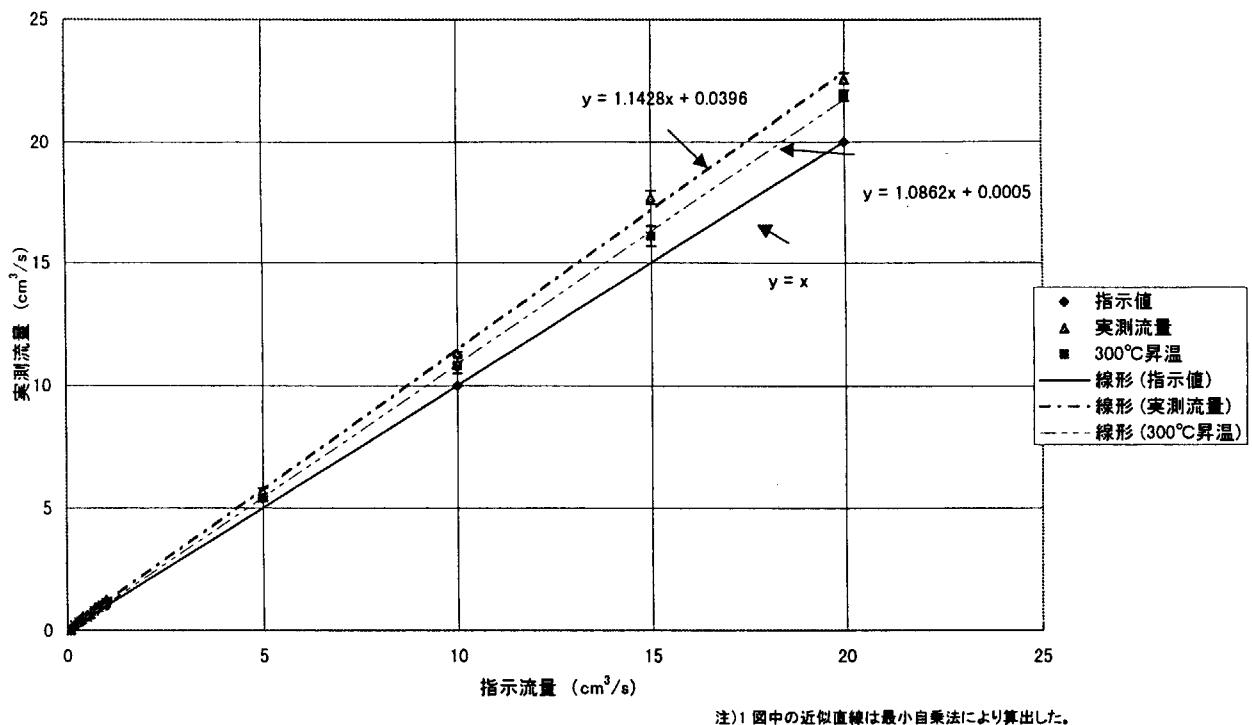
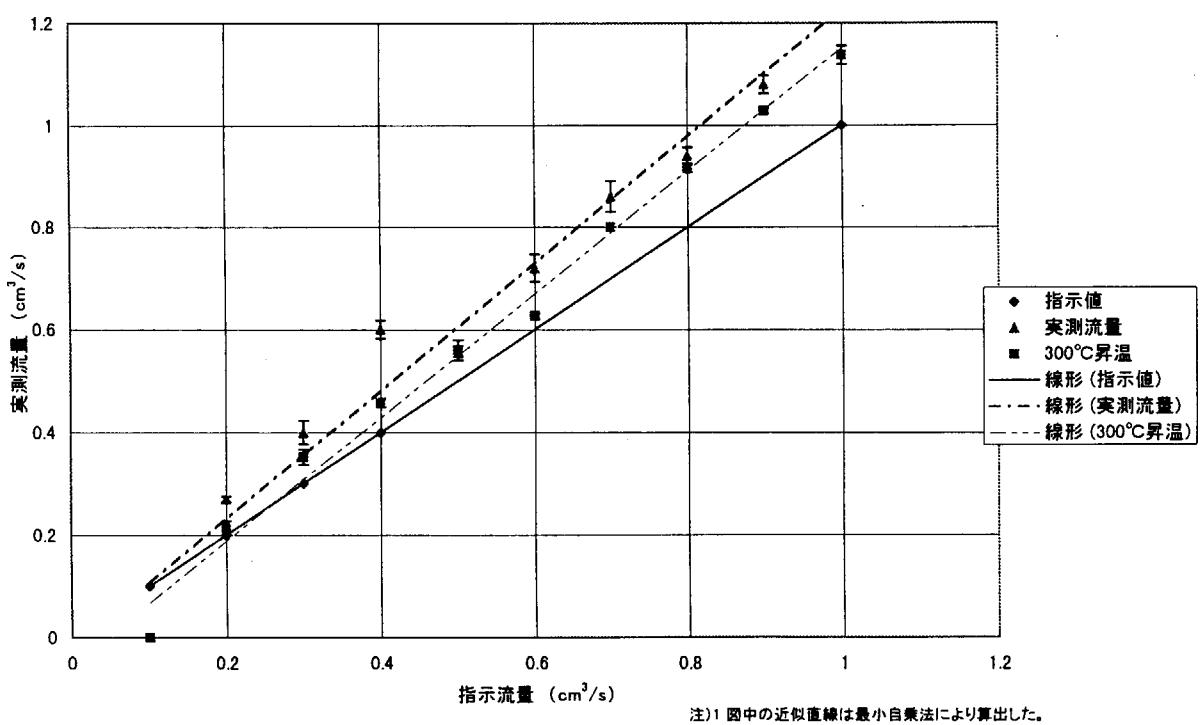
表4 流量調節試験結果(常温)

No.	流量 (cm ³ /s)	1回目 (cm ³ /s)	2回目 (cm ³ /s)	3回目 (cm ³ /s)	4回目 (cm ³ /s)	5回目 (cm ³ /s)	平均 (cm ³ /s)	標準偏差 1σ	標準偏差 3σ
1	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0.2	0.28	0.28	0.27	0.27	0.27	0.27	0.005477	0.016432
3	0.3	0.38	0.40	0.43	0.37	0.40	0.40	0.023022	0.069065
4	0.4	0.60	0.63	0.58	0.60	0.60	0.60	0.017889	0.053666
5	0.5	0.57	0.53	0.55	0.55	0.58	0.56	0.019494	0.058481
6	0.6	0.73	0.68	0.72	0.75	0.70	0.72	0.027019	0.081056
7	0.7	0.90	0.82	0.87	0.85	0.88	0.86	0.030496	0.091488
8	0.8	0.92	0.95	0.95	0.93	0.96	0.94	0.030496	0.049295
9	0.9	1.06	1.06	1.06	1.08	1.10	1.08	0.016432	0.053666
10	1.0	1.23	1.23	1.25	1.28	1.28	1.25	0.025100	0.075299
11	5.0	5.80	5.70	5.80	5.55	5.65	5.70	0.106066	0.318198
12	10.0	11.4	11.3	11.3	11.2	11.3	11.3	0.070711	0.212132
13	15.0	17.5	18.0	18.0	17.5	17.5	17.7	0.273861	0.821584
14	20.0	23.0	22.5	22.5	22.5	22.5	22.6	0.223607	0.67082

表5 流量調節試験結果(300°C)

No.	流量 (cm ³ /s)	1回目 (cm ³ /s)	2回目 (cm ³ /s)	3回目 (cm ³ /s)	4回目 (cm ³ /s)	5回目 (cm ³ /s)	平均 (cm ³ /s)	標準偏差 1σ	標準偏差 3σ
1	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0.2	0.22	0.20	0.20	0.23	0.22	0.21	0.013416	0.040249
3	0.3	0.37	0.36	0.35	0.33	0.35	0.35	0.014832	0.044497
4	0.4	0.45	0.47	0.46	0.46	0.45	0.46	0.008367	0.0251
5	0.5	0.55	0.57	0.57	0.55	0.55	0.56	0.010954	0.032863
6	0.6	0.63	0.62	0.62	0.63	0.63	0.63	0.005477	0.016432
7	0.7	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	1.05e-08	3.16E-08
8	0.8	0.92	0.92	0.92	0.90	0.92	0.92	0.008944	0.026833
9	0.9	1.03	1.02	1.03	1.03	1.03	1.03	0.004472	0.013416
10	1.0	1.13	1.13	1.13	1.17	1.13	1.14	0.017889	0.053666
11	5.0	5.4	5.4	5.3	5.5	5.4	5.40	0.070711	0.212132
12	10.0	10.4	11.2	10.8	10.6	11.0	10.8	0.316228	0.948683
13	15.0	16.0	16.5	16.0	16.5	16.5	16.1	0.418330	1.25499
14	20.0	21.5	22.0	22.0	22.0	22.0	21.9	0.223607	0.67082

注) ±1σの範囲に 68% の確率で平均値が含まれ、±3σの範囲に 99.73% の確率で平均値が含まれている。

図 7 指示値流量と実測流量の比較 (流量 0-25cm³/s)図 8 指示値流量と実測流量の比較 (流量 0-1.2cm³/s)

(2) 温度分布特性試験（試験装置）

測定した熱電対イ～ハの温度変化の例を図9および図10に示す。図中の時間0に漏えいを開始する。また、ガス吹き出し口のヘリウムガス流量に対する温度変化を図11に示す。

a . 設定温度の確認

300°C、20 cm³/s の条件下では、ヒータ内部は 500°C およびヒータ出口温度は約 300°C と、設定温度に達していることを確認した。（図9）また、300°C、0.2 cm³/s の条件下では、ヒータ内部は 500°C およびヒータ出口温度は約 280°C となり、低流量においてもほぼ設定温度が確保されていることを確認した。（図10）200、100°C の条件下では、設定に近い温度になっていることを確認した。

b . 吹き出し口の温度変化

ガス吹き出し口温度はヘリウムガス漏えい後に上昇し、300°C、20cm³/s の条件下では、約 10°C の上昇を検知した。吹き出し口の温度上昇の傾向は高温、高流量ほど顕著であるが、100°C で 0.5 cm³/s 以下の条件下では温度上昇は認められなかった。

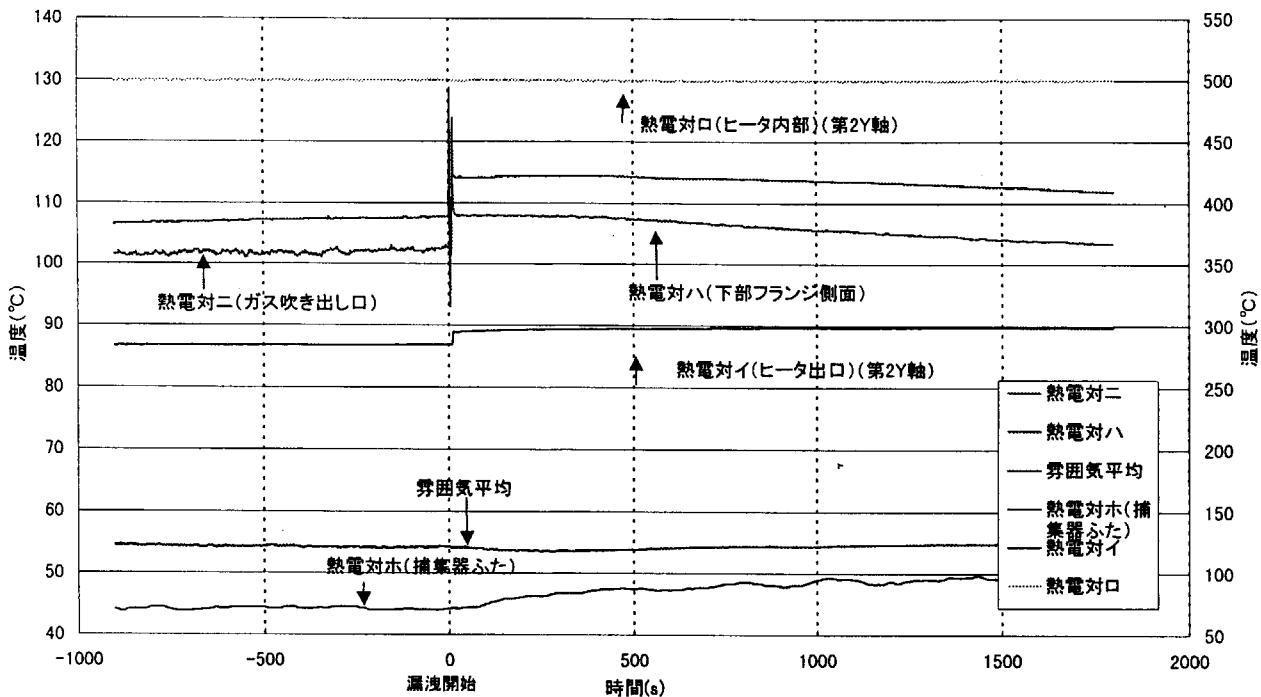
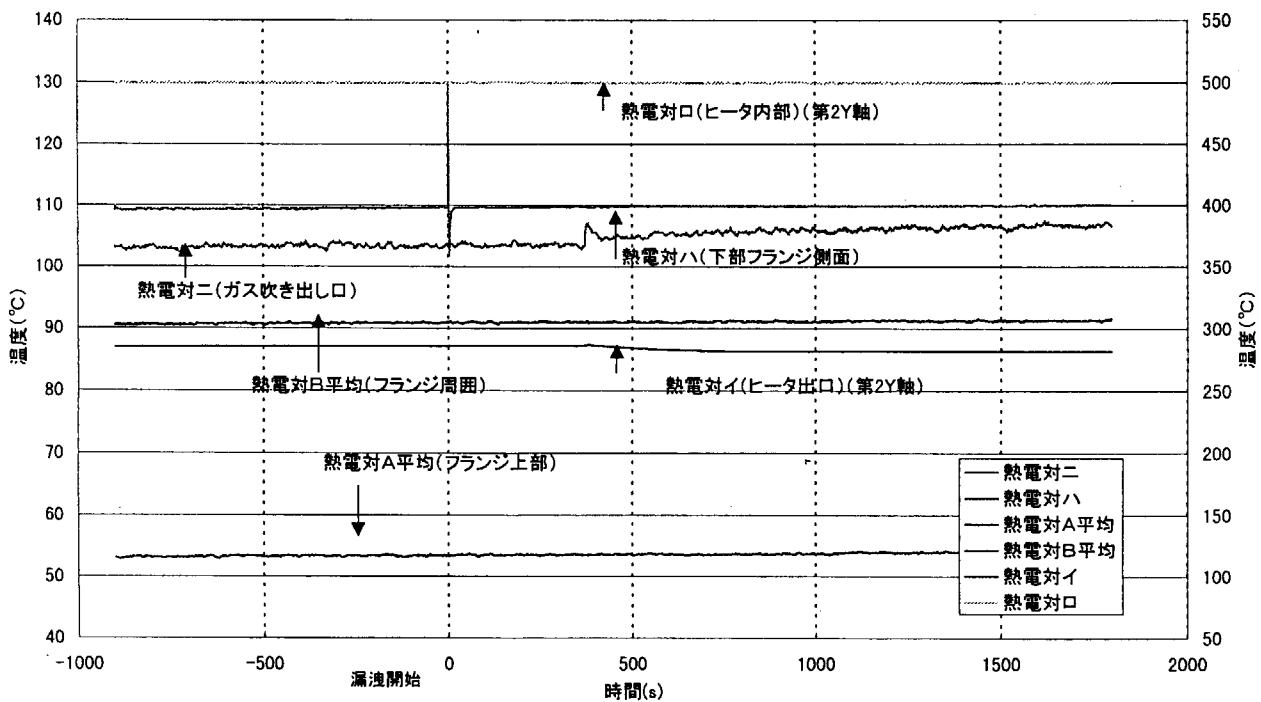
また、吹き出し口温度と下部フランジ側面の温度は、漏えい開始 1000 s 前後より下がる傾向を示す。この減少傾向は 300、200、100°C ともに 5.0 cm³/s 以上の漏えい条件で現れた。これは図9より、蓋の温度が漏えい開始後約 5°C 上昇していることから、ヘリウムガスの熱が蓋より外部へ放熱しているものと考えられる。したがって、光ファイバ温度センサの設計・製作については保温材を装着し外部への放熱を抑える必要がある。

c . 流量に対する温度変化

図11は漏えい開始 5 min 前±100 s の平均値を温度変化量 0 とし、漏えい開始後 1600～1800 s (30 min 後) の平均値の変化を示したものである。

漏えい開始 30 min 後の吹き出し口の温度は流量増加に伴い、上昇傾向を示す。一方、下部フランジ側面は減少傾向を示した。下部フランジ側面の減少傾向は外部への放熱によるものであると考えられる。

図11において流量 1.0 cm³/s を境目に吹き出し口温度および下部フランジ側面温度とも傾向が変化する結果について、再現性を確認するために 1.0 cm³/s 付近の流量で再試験を行った。流量は 20.0、5.0、3.0、2.0、1.0、0.9、0.7、0.4 の 8 ケースで行い、試験時間は 60 min である。本試験において増設した熱電対の設置箇所を表6に示す。

図 9 熱電対計測結果 (ヒータ出口設定温度 300°C、ヘリウム流量 20.0cm³/s)図 10 熱電対測定結果 (ヒータ出口設定温度 300°C、ヘリウム流量 0.2cm³/s)

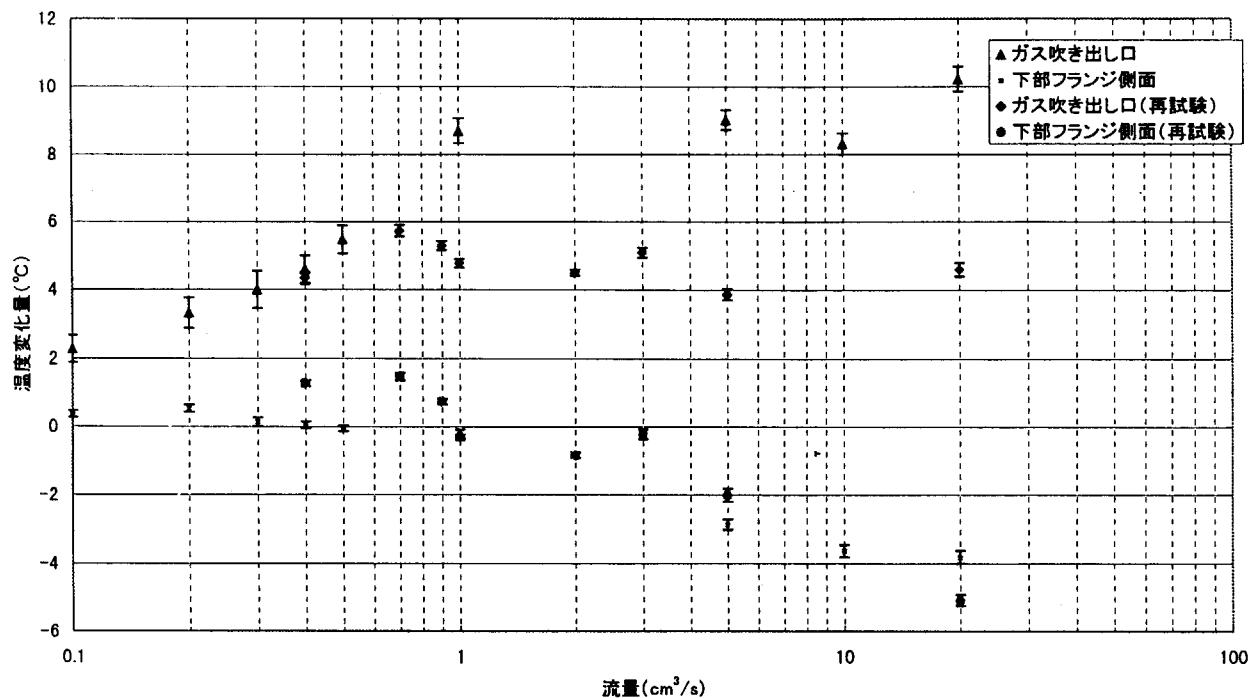


図 11 熱電対温度計測結果（ガス漏えい 30min 後、300°C）

表 6 増設した熱電対の設置箇所

No.	取付け箇所	測定対象	熱電対名称
1	捕集器内床	捕集器の底部	熱電対ホ
2	捕集器内蓋	捕集器の蓋の内側	熱電対ヘ
3	フランジ吹き出し口近傍	吹き出し口近傍の下部フランジ	熱電対ト
4	捕集器内側面	捕集器の内側の側面	熱電対チ
5	捕集器外蓋	捕集器の蓋の外側	熱電対リ

図 12 に設置構造図を示す。

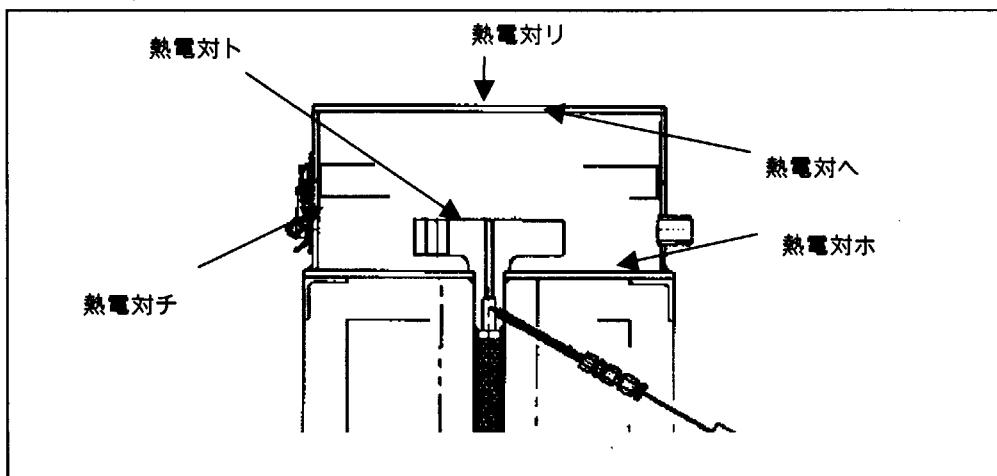


図 12 増設した熱電対の設置構造図

30 min 後の吹き出し口温度の温度変化量を図 11 に示す。図 11 より再試験の漏えい後の温度上昇は前回の値を下回った。漏えい前の温度はほぼ同じ温度であるが、漏えい後の温度上昇が小さい一方で、捕集器の蓋の外側温度（図 12：熱電対ホ）は再試験の方が高い上昇を示している。これは、本試験装置には現段階では保温材を巻くなどの放熱防止策を講じていないため、漏えい後のヘリウムガスが真上の蓋にぶつかり、外気によって冷却されたためであると考える。よって、流量 $1.0 \text{ cm}^3/\text{s}$ 付近に変曲が存在するということは、現段階では断定できないが、光ファイバ温度センサの設計・製作において保温材を巻くことにより、再度確認する。

d. ヒータ出口温度と流量の依存性

図 9 の $20.0 \text{ cm}^3/\text{s}$ におけるヒータ出口温度は漏えい後に上昇し、ほぼ 300°C に達している。

(3) 温度特性試験（漏えいガス）

測定した熱電対 A1～A7 および B1～B8 の温度変化の例を図 13 に示す。

a . 径方向の温度分布

図 13 より 300°C 、 $20 \text{ cm}^3/\text{s}$ の熱電対 A (フランジ上部雰囲気) 温度は、吹き出し口の真上付近に設置した熱電対の温度が捕集器外周付近の熱電対より高い結果となった。これはガス吹き出し口から真上方向へ、ヘリウムガスが漏えいすることを考えれば当然の結果であるといえる。同様の傾向は 300°C の際に顕著であり、 200°C 、 100°C になるにつれて、その差は少なくなる。

熱電対 A の捕集器外周付近の熱電対はヘリウムガス漏えい直後、温度が下がる傾向を示す。これは漏えい後、捕集器の蓋および外周壁にぶつかることにより冷却されたヘリウムガスを検知した結果と考えられる。そのため、捕集器の蓋の温度は上昇している。

b . 周方向の温度分布

熱電対 B (フランジ周囲雰囲気) 温度は 300°C 、 $20 \text{ cm}^3/\text{s}$ において漏えい後、一旦上昇傾向を示し、その後 1000 s 前後より一定または下がる傾向を示す。この傾向は 300°C 、 $5.0 \sim 20 \text{ cm}^3/\text{s}$ の範囲で顕著であり、それ以外では漏えい前後において温度変化はほとんどない。これは、高温、高流量のヘリウムガスはフランジ周囲雰囲気温度を一旦上昇させるが、しだいに捕集器の蓋および外周壁に熱を奪われたためと考える。また、漏えい前の熱電対の間に 300°C で約 15°C 、 200°C で約 10°C 、 100°C で約 5°C の温度差が存在する。この温度差は、“下部フランジ側面温度 (漏えい前の熱電対 B) - フランジ周囲雰囲気温度 (漏えい前の熱電対 B 平均) ”の温度差にほぼ対応している。

This is a blank page.

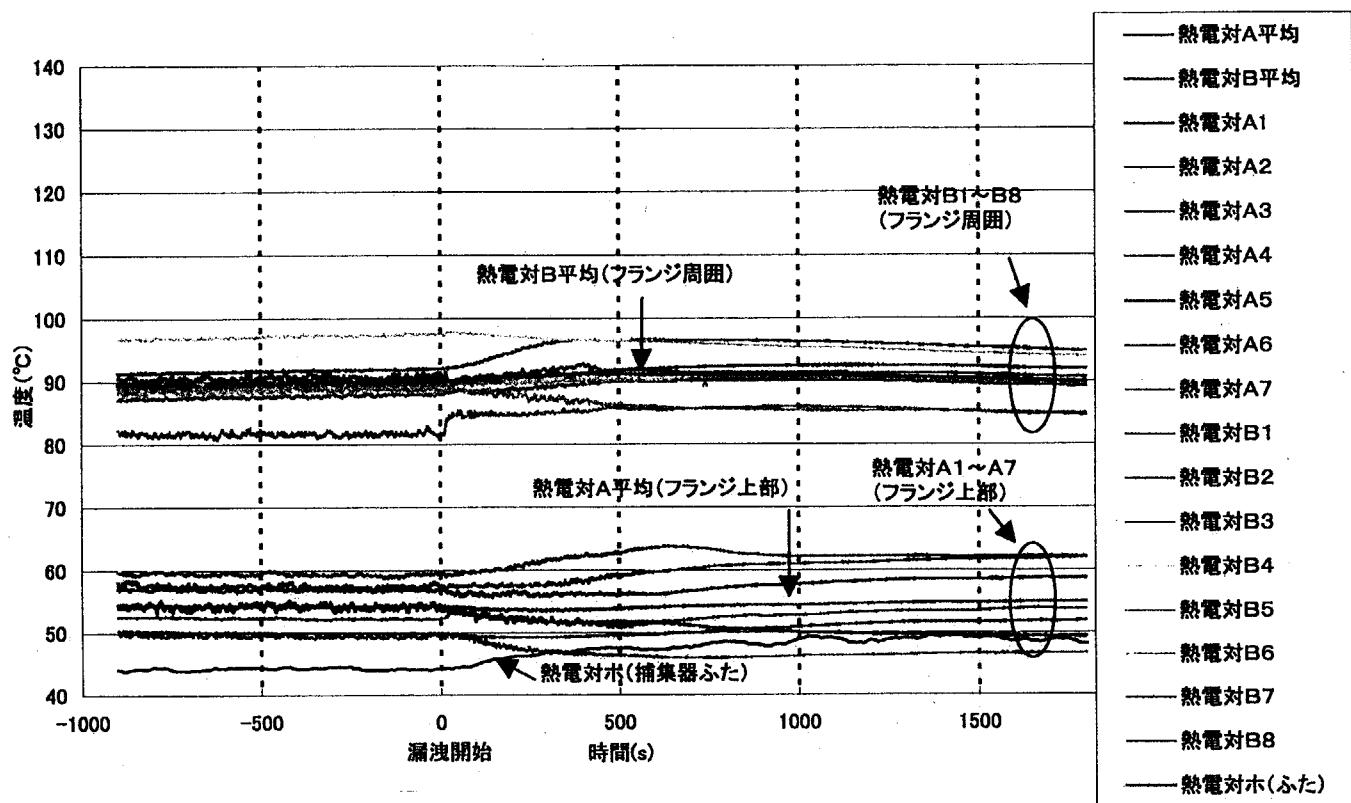


図 13 热电対計測結果 (ヒータ出口設定温度 300°C、ヘリウム流量 20.0cm³/s)

2.2.3まとめ

模擬試験装置に関して以下の情報を得た。

- 試験装置の流量調節機能の妥当性を確認した。0.2～20cm³/s の範囲で流量は良い線形性を示した。
- 試験装置の温度分布特性試験により漏えい模擬装置の温度調節機能を確認した。300°C、20cm³/s でヘリウムガス出口温度は約 300°C、0.2cm³/s では約 280°C に達することを確認した。
- 漏えいガス温度特性試験により、300°C、20cm³/s の条件下で雰囲気温度上昇を検知した。

This is a blank page.

2.3 保温材一体型温度センサの開発

2.3.1 設計・製作

(1) 設計仕様

光ファイバ温度センサを製作するにあたり、2.2 項の漏えい模擬装置特性試験に基づき以下の事項に留意した。

- ヘリウムガス漏えいによる温度上昇を効果的に捕らえるために、外部への放熱を防ぐこと。
- フランジ部のいかなる箇所からの漏えいにも対応し、温度上昇を検知できること。
- 容易に取りはずし可能な構造とすること。

上記の事項を検討した結果、以下の仕様の光ファイバ温度センサを製作することにする。

- 光ファイバを円柱状の保温材で挟み込む構造とし、フランジの上からかぶせるものとする。
- フランジのパッキン部に沿って光ファイバを設置する構造とする。
- 温度センサは捕集器に固定せず、取外し可能な構造とする。
- 使用する光ファイバケーブルは GI 50/125 を使用する。

表 7 に本試験で使用する光ファイバの仕様を示し、図 14 に設計した温度センサの構造図を示す。

表 7 光ファイバの仕様一覧

名称	ファイバ径 (μm)	心線構造 (μm)	伝送帯域 (MHz)	伝送損失 (dB / km)
GI ファイバ	コア径 : 50 クラッド径 : 125	ナイロン心線 外径 : 900	400	≤ 3

注) GI ファイバ: グレーデッドインデックス型ファイバ

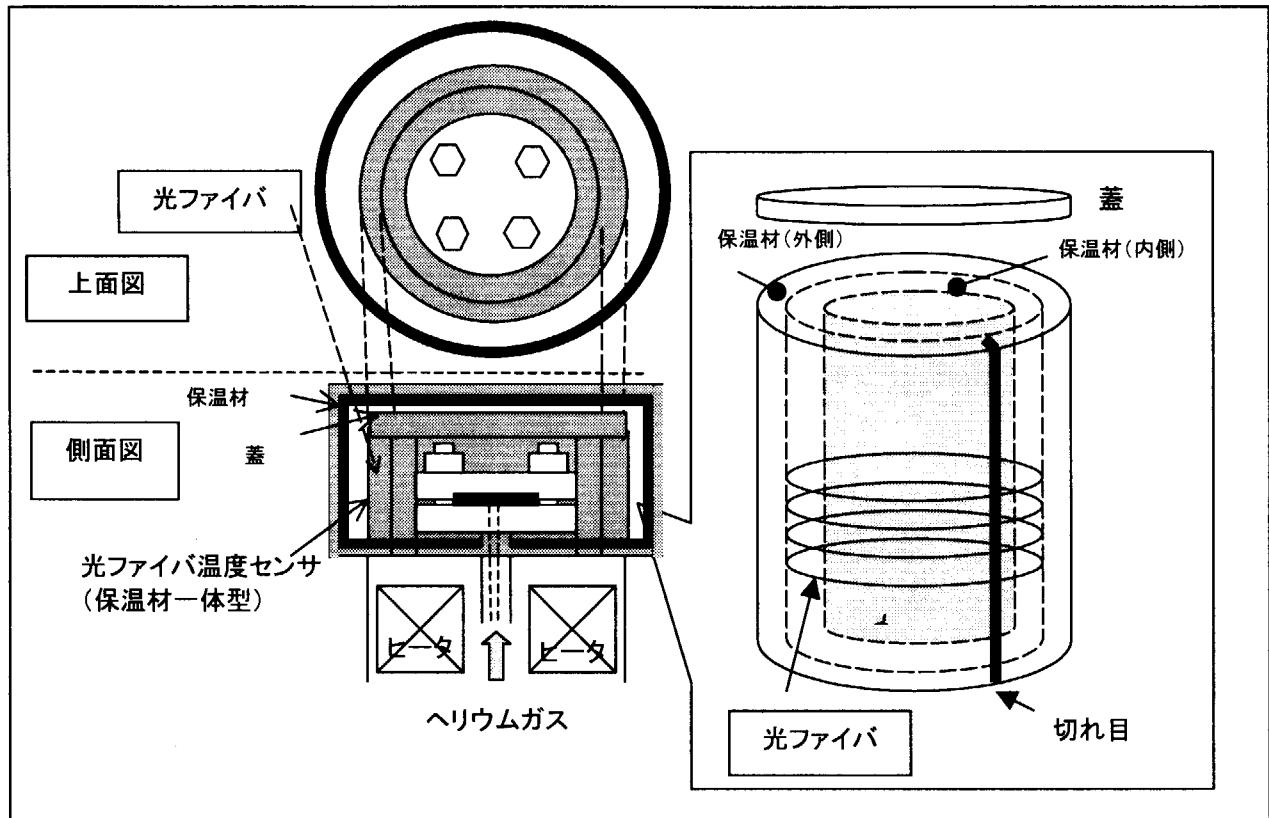


図 14 光ファイバ温度センサ構造図

(2) 製作

図 15 および図 16 に製作した光ファイバ温度センサを示す。

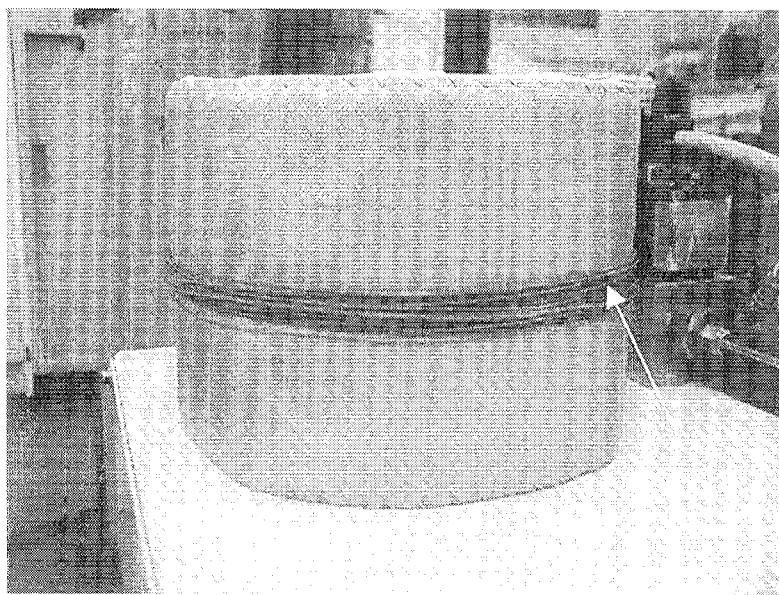


図 15 光ファイバ温度センサ(保温材内側)

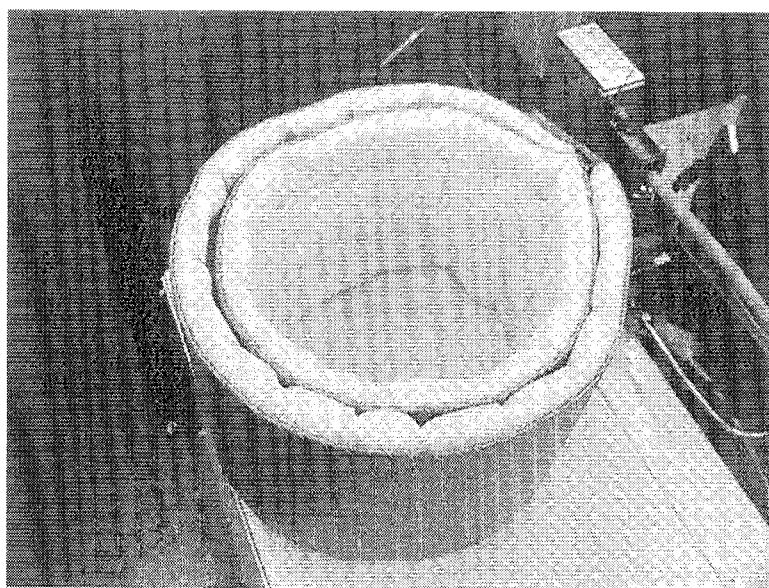


図 16 光ファイバ温度センサ(保温材外側含む)

(設置した光ファイバケーブルは、G I 50/125 タイプを使用し、長さは 20 m
(フランジ周囲の巻数 20 卷 = 10 m)とした。)

(3) 計測器

光ファイバ温度センサにより検知した温度を計測する計測器を選定した。計測方法は、実機敷設を想定し、ループ方式を採用した。ループ方式では、光ファイバの両端から測定することにより、光ファイバ全長の減衰率分布を正確に把握して、多数の接続点や、不連続な温度条件の下でも、常に正確な温度分布を得ることができる。また光ファイバが断線しても両端末から断線ポイントまでの測定を継続することができる特長を有している。

測定距離は数 km の長さが可能な機器を選定した。

a. 仕様

表 8 に選定した計測器の仕様を示す。

表 8 光ファイバ式温度分布計測器仕様

No	項目	仕様	備考
1	名称	D T S 8 0 0 S R	ワイオーシステム社製
2	測定温度範囲	-50 ~ 350°C	
3	温度分解能	±1°C	
4	サンプリング間隔	1m	
5	測定距離	4 km	
6	測定時間	10 秒 ~	
7	本体使用温度	10 ~ 35°C	
8	本体外形寸法	538mm×337mm×342mm	
9	本体重量	約 27kg	
10	伝送損失下限値	17 ~ 18 dB (分解能 1 m)	

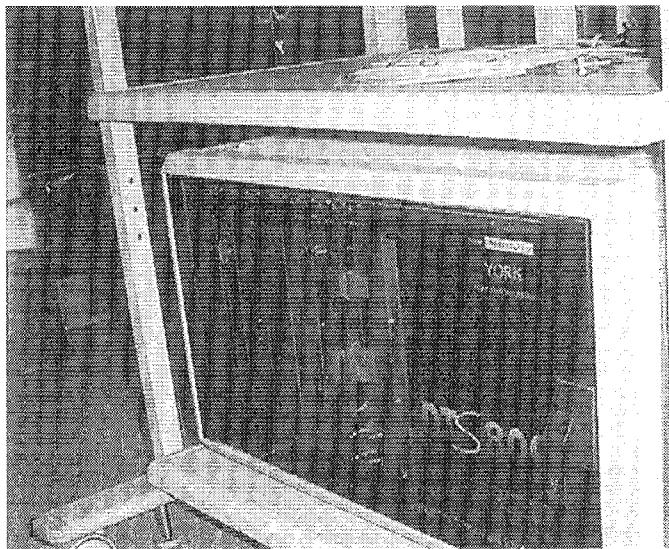


図 17 光ファイバ式温度分布計測器外観図

2.3.2 試験要領

本試験は光ファイバ温度センサにより、漏えいさせたヘリウムガスによる温度変化を検知することを目的とする。

(1) 装置構成

a. 全体構造

装置構成を図 18 に示す。

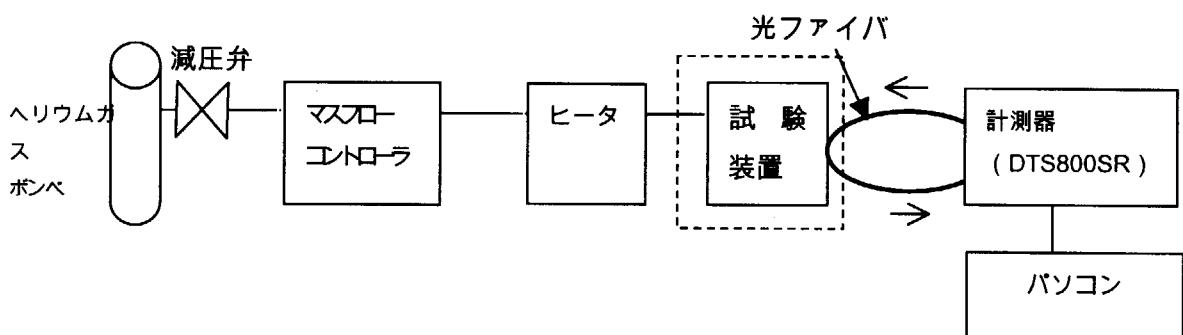


図 18 ヘリウムガス漏えい模擬試験装置構成図

パソコンからの指令により、計測器 (DTS800SR) がレーザーパルスを発射し、温度計測を開始する。漏えいさせるヘリウムガスはマスフローコントローラで流量調節し、ヒータで各設定温度に加熱した後、試験装置へ導入し捕集器内のフランジ部から漏えいさせる構造である。

b. ガスケットおよびフランジ

ヘリウムガス漏えいを模擬するために、切断機によりガスケット(材質: T# / 1834-R-GR、Φ75mm)に 1.5mm 幅の切り目を入れ、ヘリウムガスの流路を確保する。またガスケット設置後、上部フランジを乗せナットを締めて固定する。図 19 にガスケット設置図を、また図 20 に上部フランジの設置図を示す。

c. 光ファイバ温度センサ

光ファイバ温度センサの光ファイバケーブルは、接続コネクタを経由して計測器 (DTS800SR) に接続している。計測器から発せられたレーザーパルスはフランジ周囲に設置した光ファイバケーブルを伝播し、温度上昇が見られれば、ラマン散乱光の強度比により、それを検知する仕組みになっている。図 21 および図 22 に光ファイバ温度センサの設置状況を示す。

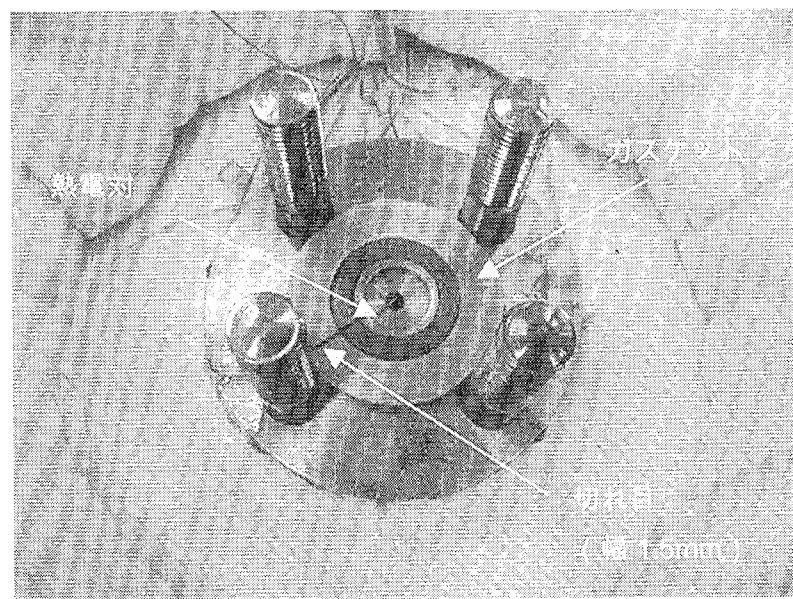


図 19 ガスケット設置状況

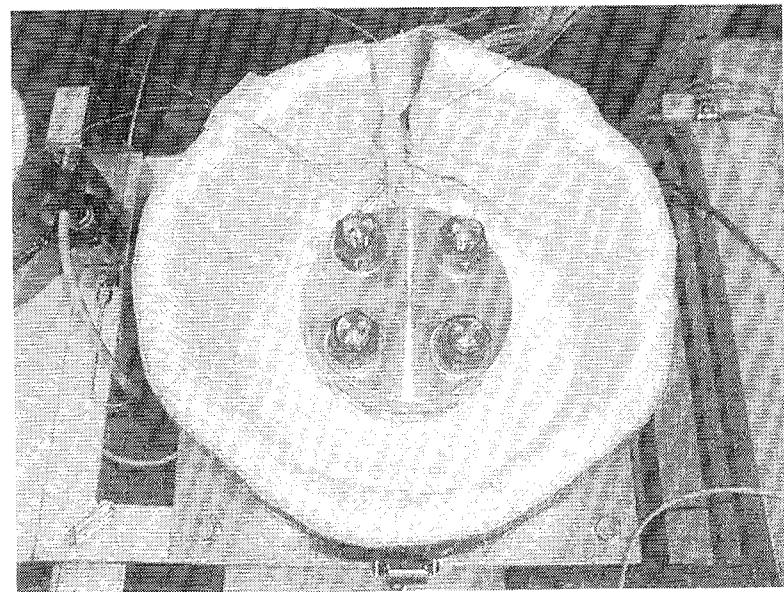


図 20 上部フランジ設置状況

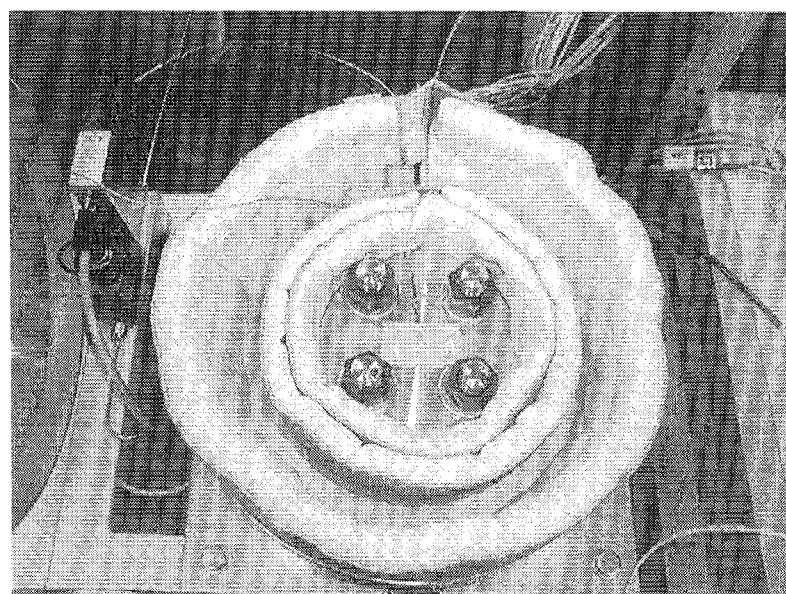


図 21 光ファイバ温度センサ設置状況（外側保温材有り）

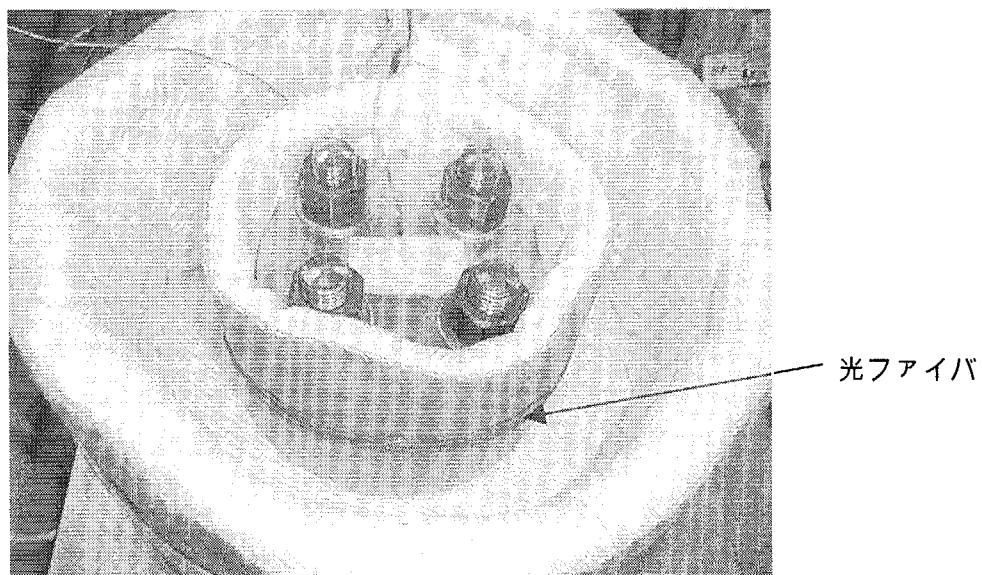


図 22 光ファイバ温度センサ設置状況（外側保温材なし）

d. 熱電対

光ファイバ温度センサによる値を比較するため、フランジの各周囲に 18 本の熱電対を設置した。表 9 に各熱電対の設置対象を示す。また設置箇所を図 23 に示す。

表 9 熱電対の設置箇所

No.	取付け箇所	測定対象	熱電対名称	備考
1	ヒータ出口	雰囲気 (ヘリウムガス温度)	-	K type
2	ヒータ内部	雰囲気 (設定温度)	-	K type
3	光ファイバ温度センサ周囲	光ファイバ温度センサ雰囲気	熱電対①	K type
4	下部フランジ側面	下部フランジ	熱電対②	T type
5	上部フランジ側面	上部フランジ	熱電対③	T type
6	ガス吹き出し口	ヘリウムガス温度	熱電対④	T type
7	上部フランジ上面	上部フランジ	熱電対⑤	K type
8	捕集器内蓋	捕集器の蓋	熱電対⑥	T type
9	捕集器内側面	捕集器の側面	熱電対⑦	T type
10	捕集器内床	捕集器の床	熱電対⑧	T type
11	フランジ周囲雰囲気	フランジ周囲雰囲気	熱電対 B1 (⑨)	K type
12	フランジ周囲雰囲気	フランジ周囲雰囲気	熱電対 B2 (⑨)	K type
13	フランジ周囲雰囲気	フランジ周囲雰囲気	熱電対 B3 (⑨)	K type
14	フランジ周囲雰囲気	フランジ周囲雰囲気	熱電対 B4 (⑨)	K type
15	フランジ周囲雰囲気	フランジ周囲雰囲気	熱電対 B5 (⑨)	K type
16	フランジ周囲雰囲気	フランジ周囲雰囲気	熱電対 B6 (⑨)	K type
17	フランジ周囲雰囲気	フランジ周囲雰囲気	熱電対 B7 (⑨)	K type
18	フランジ周囲雰囲気	フランジ周囲雰囲気	熱電対 B8 (⑨)	K type

注) No.11~18 の熱電対は、2.2 項漏えい模擬装置特性試験の熱電対 B 1 ~ B 8 に相当し、熱電対⑨はその平均値をとったものである。

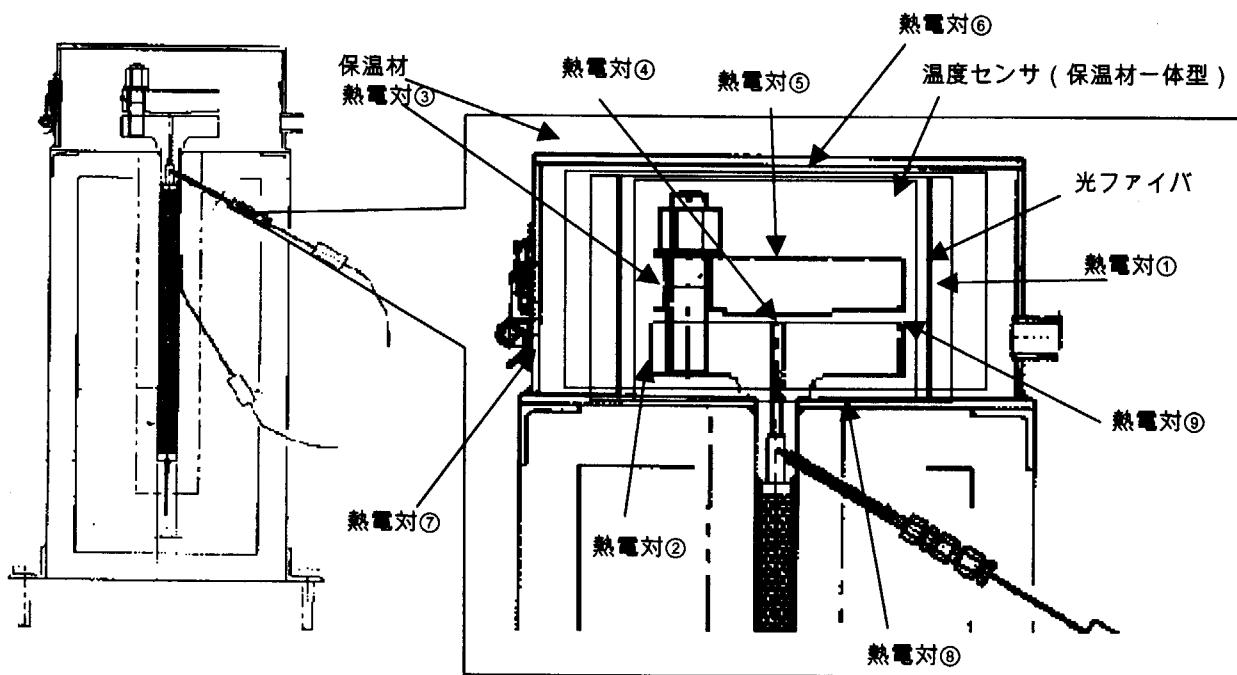


図 23 热電対設置箇所

(2) 試験方法および試験手順

a . 試験方法

温度は、ヒータ出口温度 100、200、300°C の 3 種類、ヘリウムガス圧力 4MPa で行う。測定時間は 75 min (ヘリウムガス漏えい開始前 15 min + 漏えい開始後 60 min)。ヘリウムガス流量は各温度において、0.4、1.0、5.0、20.0cm³/s である。サンプリング周期は、光ファイバ温度センサでは温度精度向上を考え 35s とし、熱電対では捕集器内の詳細な温度変化を把握するために、1s とする。

b . 試験手順

以下に試験手順を示す。試験は、100°C、200°C、300°C の順で行う。

- ① 光ファイバ温度センサおよび表 9 に示した熱電対を装着し、捕集器蓋を閉める。
- ② 計器盤でヒータ内部温度を各設定温度に設定し、昇温する。
- ③ 設定温度で試験装置を連続運転する。
- ④ ヘリウムガス漏えい開始 15min 前より、光ファイバおよび熱電対測定を開始する。
- ⑤ 計器盤でヘリウムガス流量を各流量に設定し、ヘリウムガスボンベを開き漏えいを開始する。
- ⑥ ヘリウムガス漏えい 60min 後に測定を終了する。

2.3.3 結果と考察

測定した光ファイバ温度センサおよび熱電対①～⑨の温度変化の例を図 24～図 35 に示

す。また、光ファイバ温度センサのヘリウムガス流量に対する温度変化を図 36 に示す。

(1) 漏えい量が多いケース (流量 5.0、20.0cm³ / s 以上)

光ファイバ温度センサとその近傍に設置した熱電対①の温度は約 2 ~ 3 °C の差があり、いずれも熱電対①が高い値を示した。これは熱電対①はヘリウムガス吹き出し口とガスケットの切れ目の延長線上に設置しており、漏えいしたヘリウムガスの流路上にあたり、ヘリウムガスの熱を最も受ける局所的な位置となることに対し、光ファイバの温度はフランジ周囲に巻いた 10m の平均温度であるため、高温になる局所的な熱電対①の温度より低い値を示すためであると考える。熱電対①と光ファイバは同じ温度傾向を示すため、両者とも適切に測定しているといえる。漏えい部の温度としては、局所的な値を測定している熱電対よりは、光ファイバの温度のほうがより真値に近いと考えられる。

光ファイバ温度センサを設置した付近の温度は、図 26、図 27、図 30、図 31、図 34 および図 35 に示すように漏えい開始後、1500s 以内で急激な温度上昇が見られた。特に 300°C、20.0cm³/s の条件下では、600s 付近で 5°C 程度の温度上昇の極大があった。一方、フランジやガス吹き出し口 (热電対②、③、④、⑤、⑨) では徐々に温度が下がっていく傾向を示し、熱電対⑥ (捕集器内蓋)、⑦ (捕集器内側面)、⑧ (捕集器床) の温度は上昇した。これは、漏えいした高温のヘリウムガスが捕集器に充満した後に、捕集器の外に漏えいしたためと考える。一般にこのような温度分布は装置構成に依存すると考えられるため、高温ガス漏えいによる捕集器内の温度分布の定性的な傾向として考えることができる。

(2) 漏えい流量が少ないケース (流量 0.4、1.0cm³/s)

図 24、図 25、図 28、図 29、図 32 および図 33 より、光ファイバ温度センサは少ない流量においても、漏えい後に温度上昇を検知した。漏えい後、徐々に上昇する傾向を示すが、高温 (300°C) 条件下で上昇が顕著であり、300°C、0.4 cm³/s では 5°C 程度の上昇を示した。

図 28 および図 29 の 200°C では、温度変化は 1、2 °C 程度の上昇であった。これは、少ない流量では 60min 間では漏えい発生を検知できない可能性を示し、漏えい検知には 2 h 程度の時間が必要であるといえる。

(3) 単位時間あたりに上昇する温度変化量

(1) および(2)に示したように、一定の時間で漏えい検知を把握することは温度の増減の推移により難しい。そこで、単位時間あたりの温度変化量により漏えい発生と判定する方法を検討する。

図 37 に示すように、2, 3, 5°C 上昇するのに要する時間は、高温、高流量の条件下ほど短い結果となった。100°C の温度条件では、3°C 以上の上昇は検知できなかった。光ファイバの温度分解能が ± 1 °C であることを考慮すると、60min の測定時間における漏えい発生の判定は 3°C 以上の温度上昇が必要であると思われる。この 3°C 以上の上昇を検知できたのは、300°C の全ケースと 200°C の 5.0cm³/s 以上のケースであるが、測定時間を長くすることにより 200°C、5.0cm³/s 以下の条件下でも検知できる可能性がある。また、光ファイバ温度

センサのサンプリング周期(35s)を長くすることにより、より精度の高い測定が可能となり、2°C程度の温度上昇で漏えい発生と判定することも可能であると思われるが、温度変化が少ないと、漏えい検知には時間がかかる。

2.3.4 まとめ

本試験によりヘリウムガス漏えい模擬試験に関し以下の情報が得られた。

- 漏えい量が大きいとき(5.0~20.0cm³/s)では、光ファイバ温度センサにより60min以内に漏えい検知が可能である。
- 特に20.0cm³/sの漏えいでは、より早い漏えい検知が可能である。
- 漏えい量が少ないとき(0.1~1.0cm³/s)では、漏えい検知に2h以上が必要である。

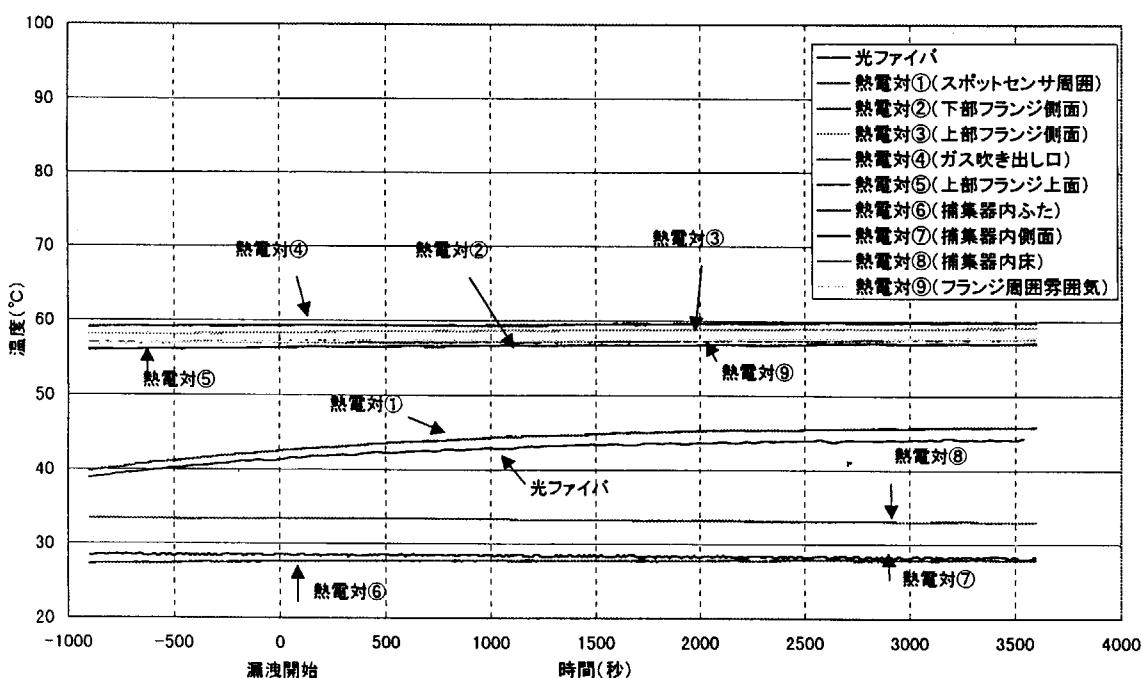
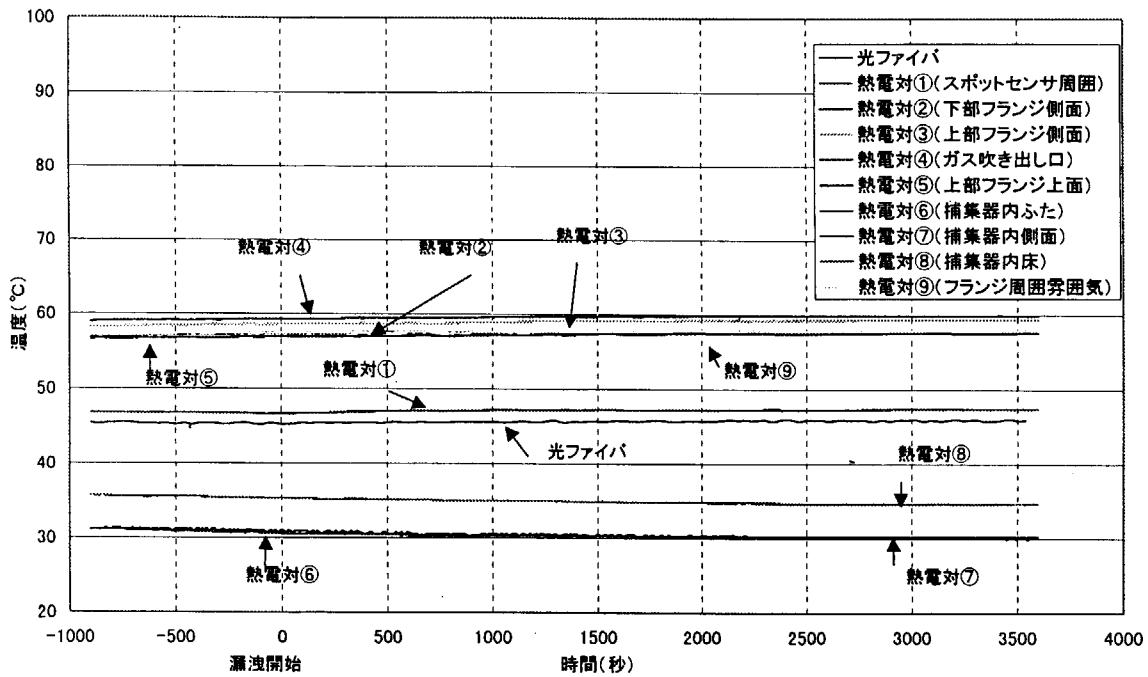
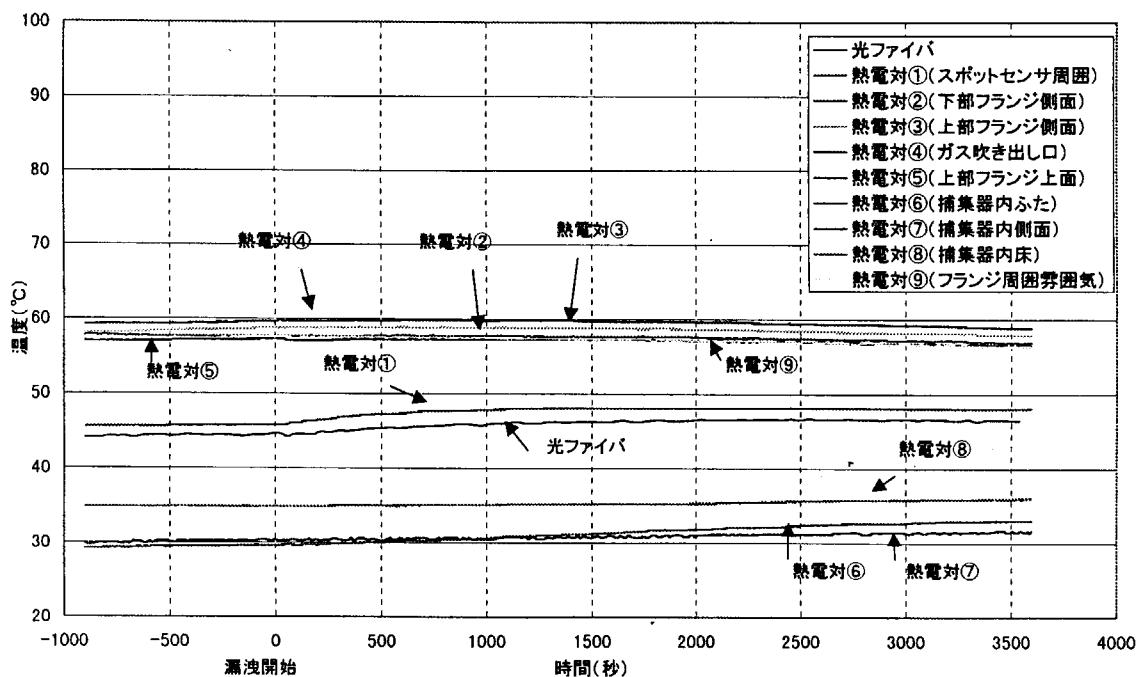
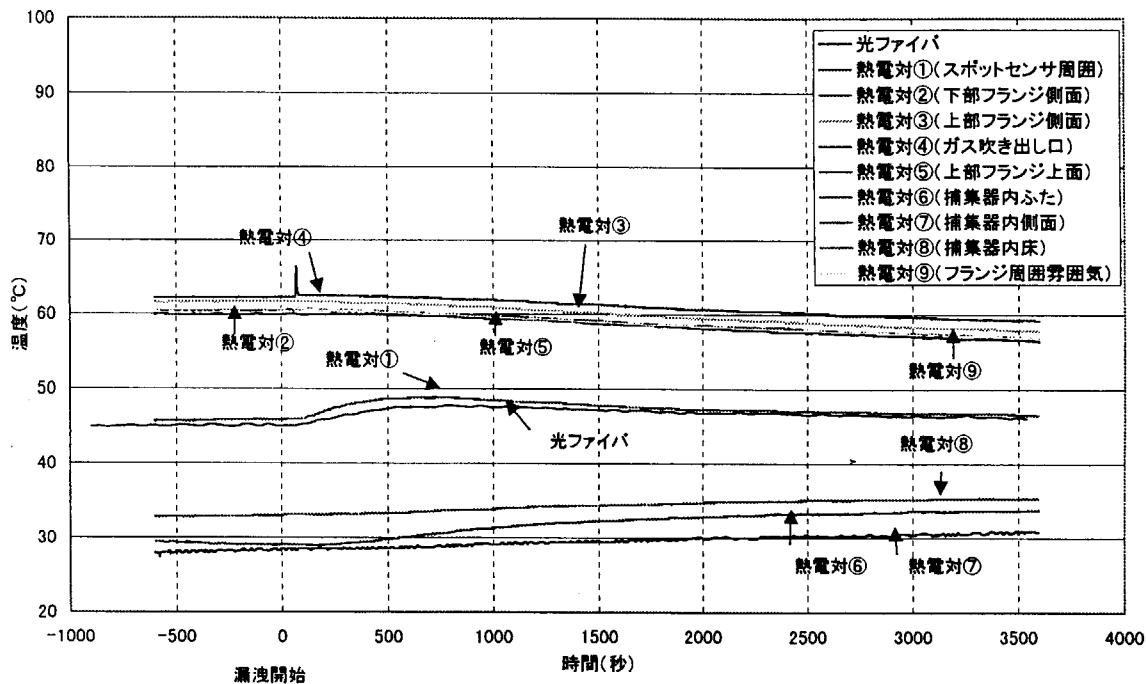
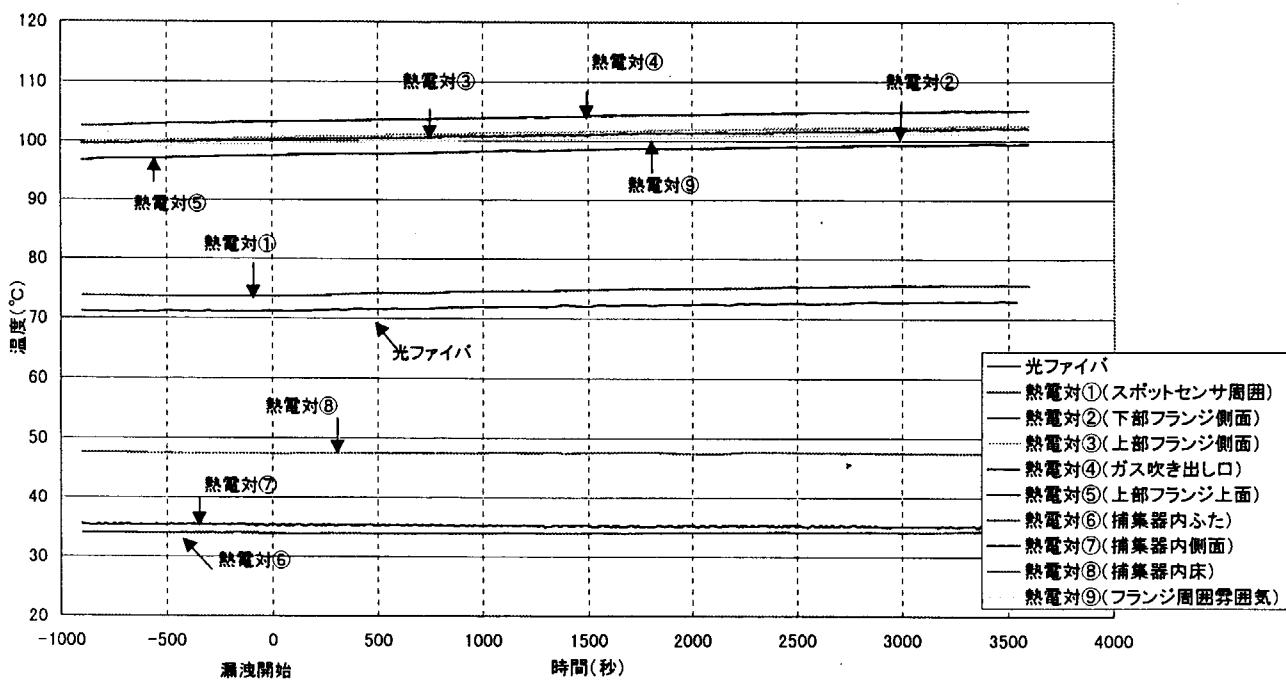
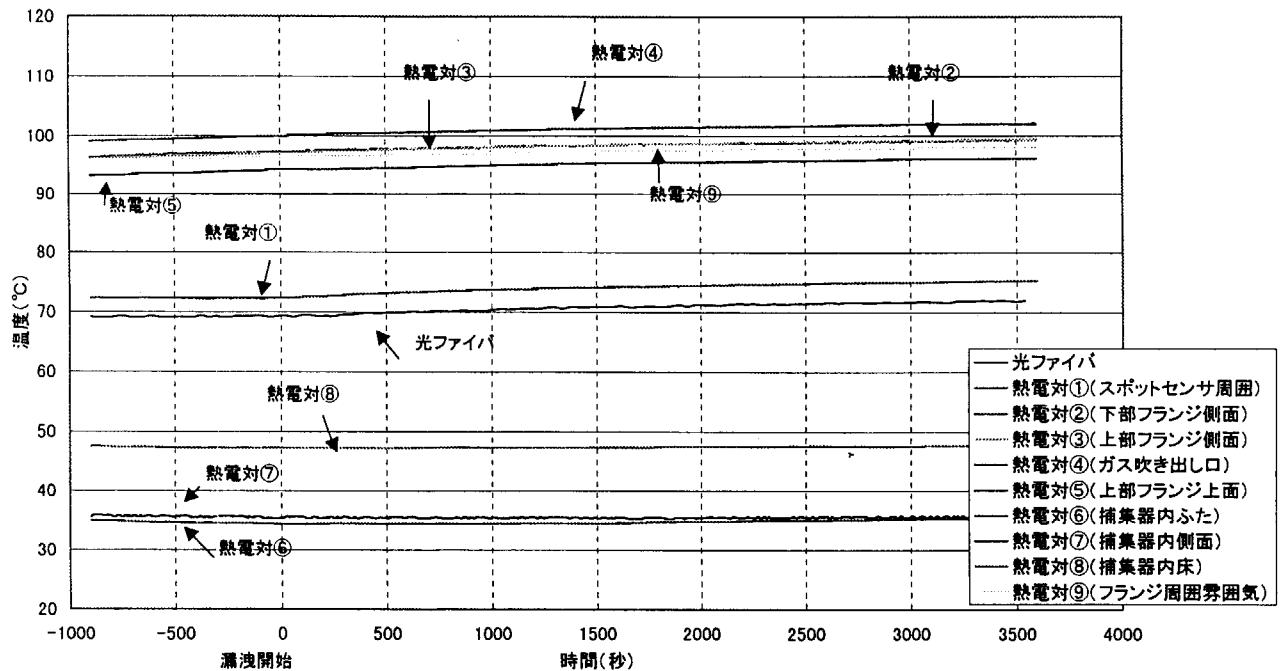
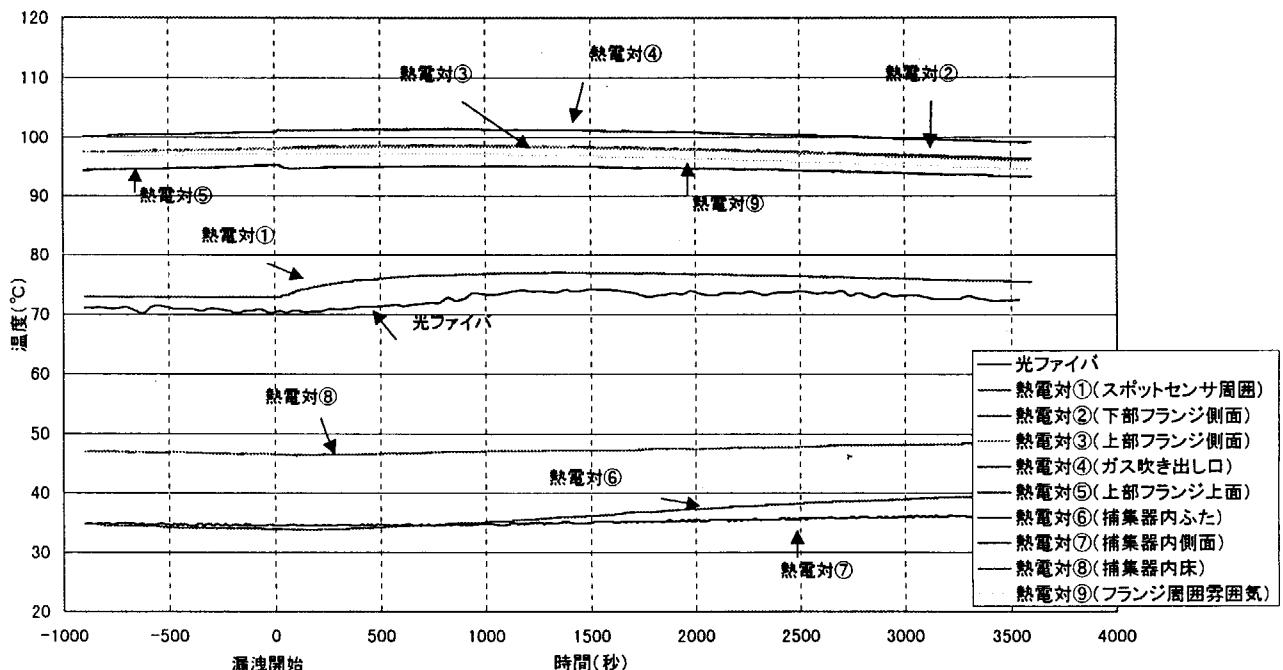
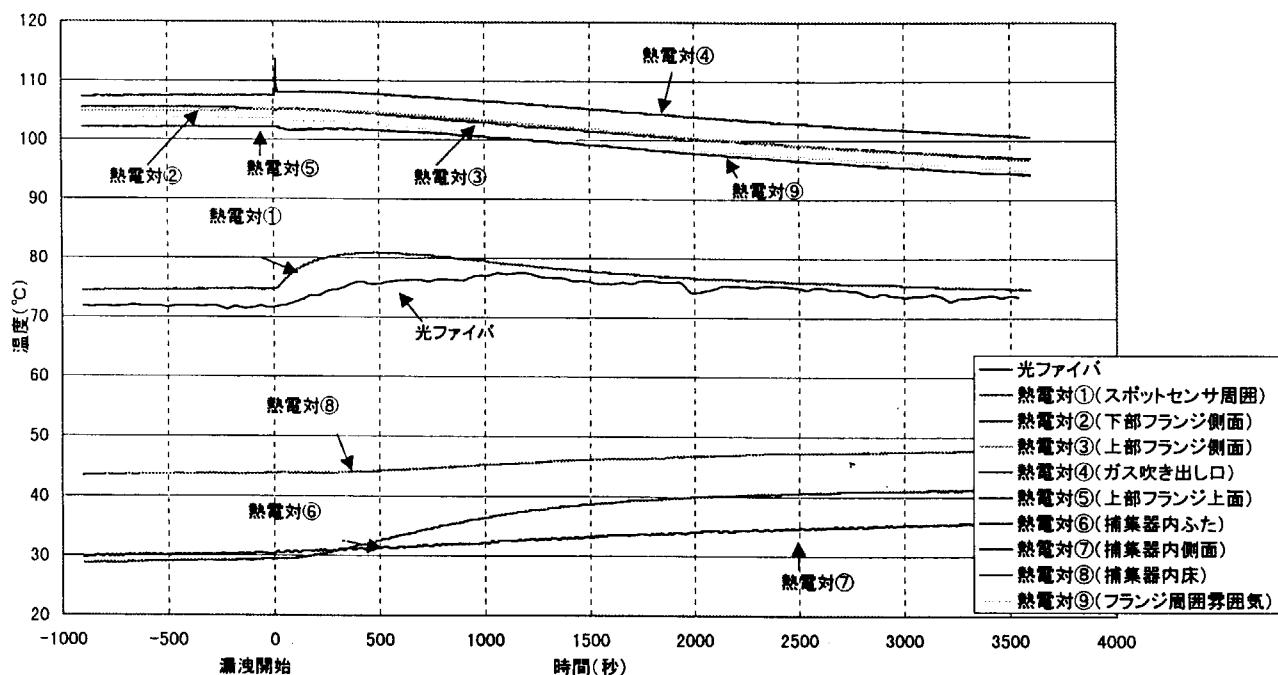
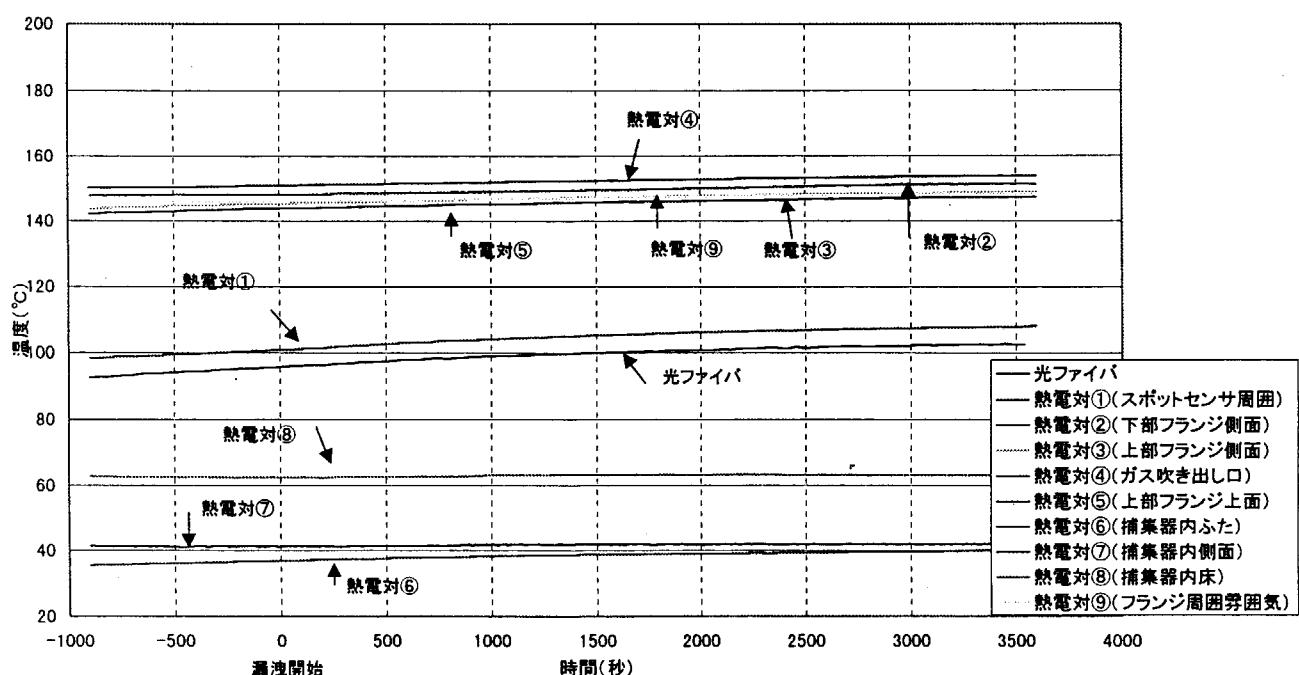


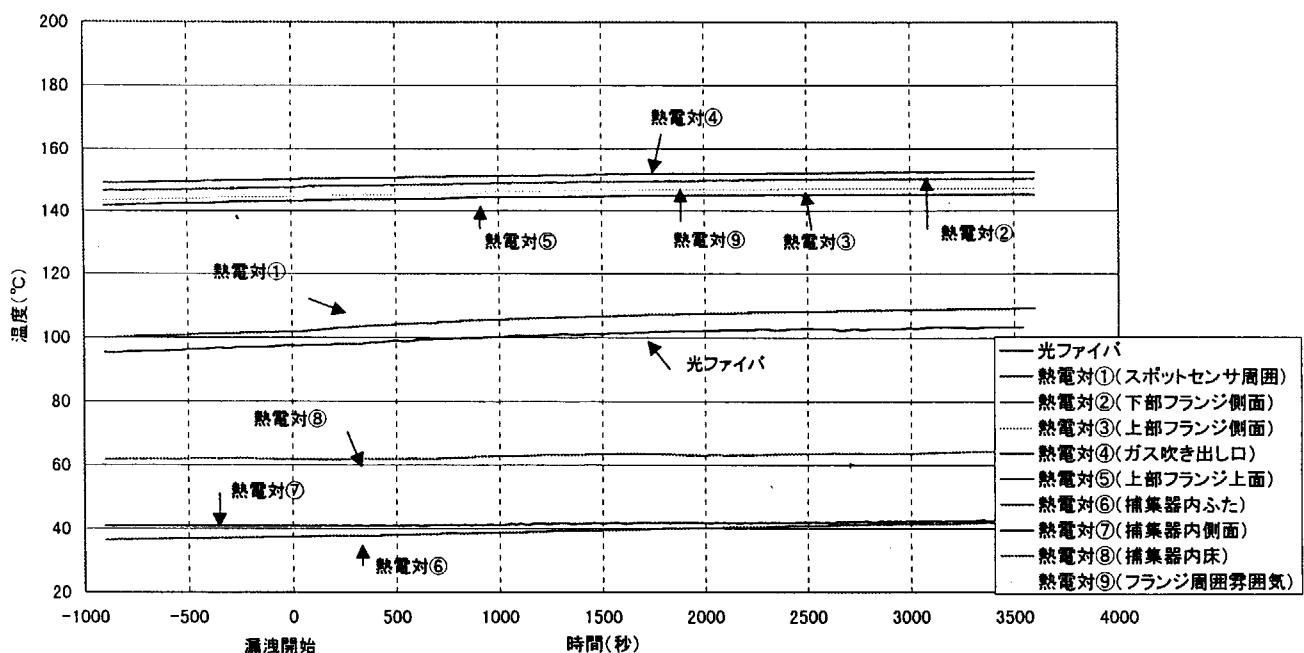
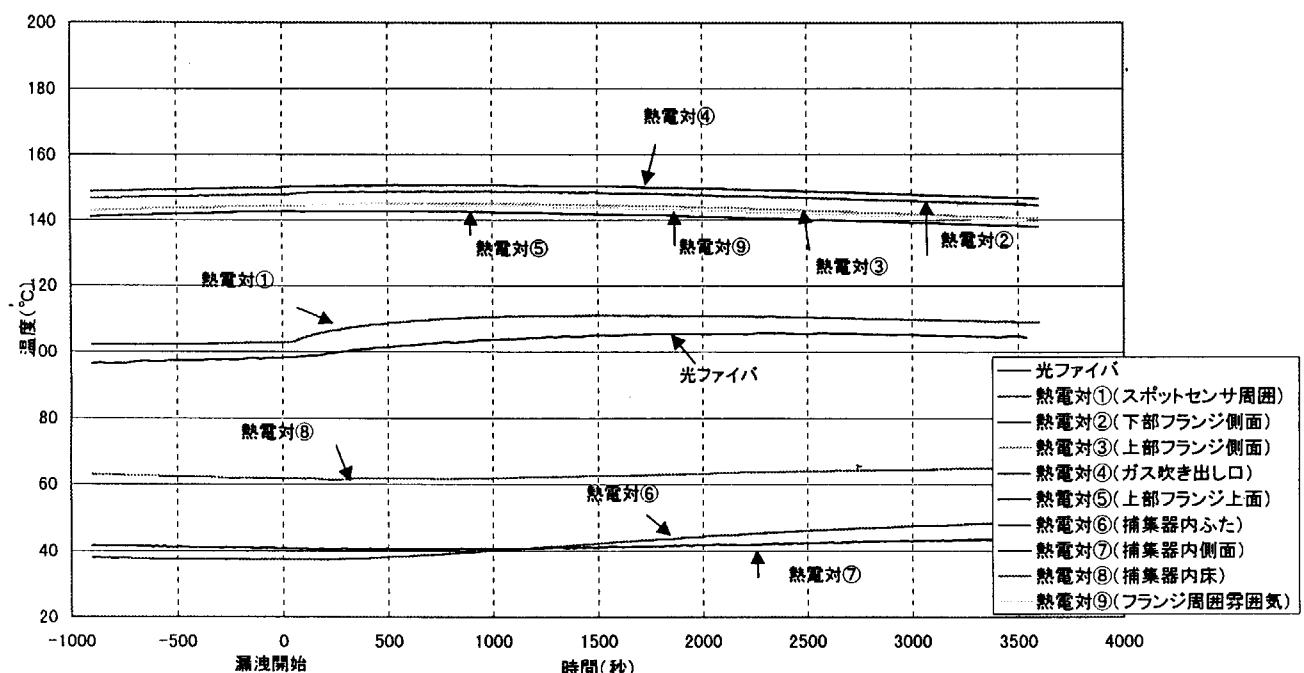
図 24 光ファイバ温度計測結果(ヒータ出口温度100°C、ヘリウム流量0.4cm³/s)

図 25 光ファイバ温度計測結果 (ヒータ出口温度 100°C、ヘリウム流量 1.0cm³/s)図 26 光ファイバ温度計測結果 (ヒータ出口温度 100°C、ヘリウム流量 5.0cm³/s)

図 27 光ファイバ温度計測結果 (ヒータ出口温度 100°C、ヘリウム流量 20.0cm³/s)図 28 光ファイバ温度計測結果 (ヒータ出口温度 200°C、ヘリウム流量 0.4cm³/s)

図 29 光ファイバ温度計測結果（ヒータ出口温度 200°C、ヘリウム流量 1.0cm³/s）図 30 光ファイバ温度計測結果（ヒータ出口温度 200°C、ヘリウム流量 5.0cm³/s）

図 31 光ファイバ温度計測結果（ヒータ出口温度 200°C、ヘリウム流量 20.0cm³/s）図 32 光ファイバ温度計測結果（ヒータ出口温度 300°C、ヘリウム流量 0.4cm³/s）

図 33 光ファイバ温度計測結果 (ヒータ出口温度 300°C、ヘリウム流量 1.0cm³/s)図 34 光ファイバ温度計測結果 (ヒータ出口温度 300°C、ヘリウム流量 5.0cm³/s)

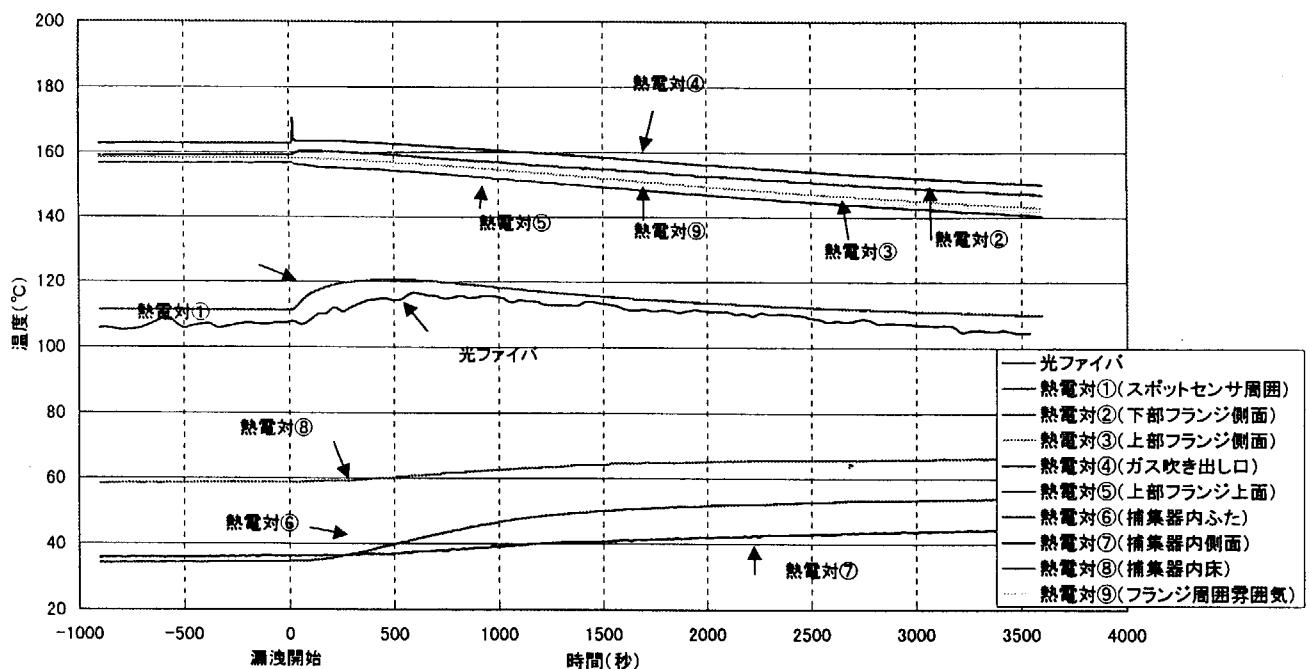
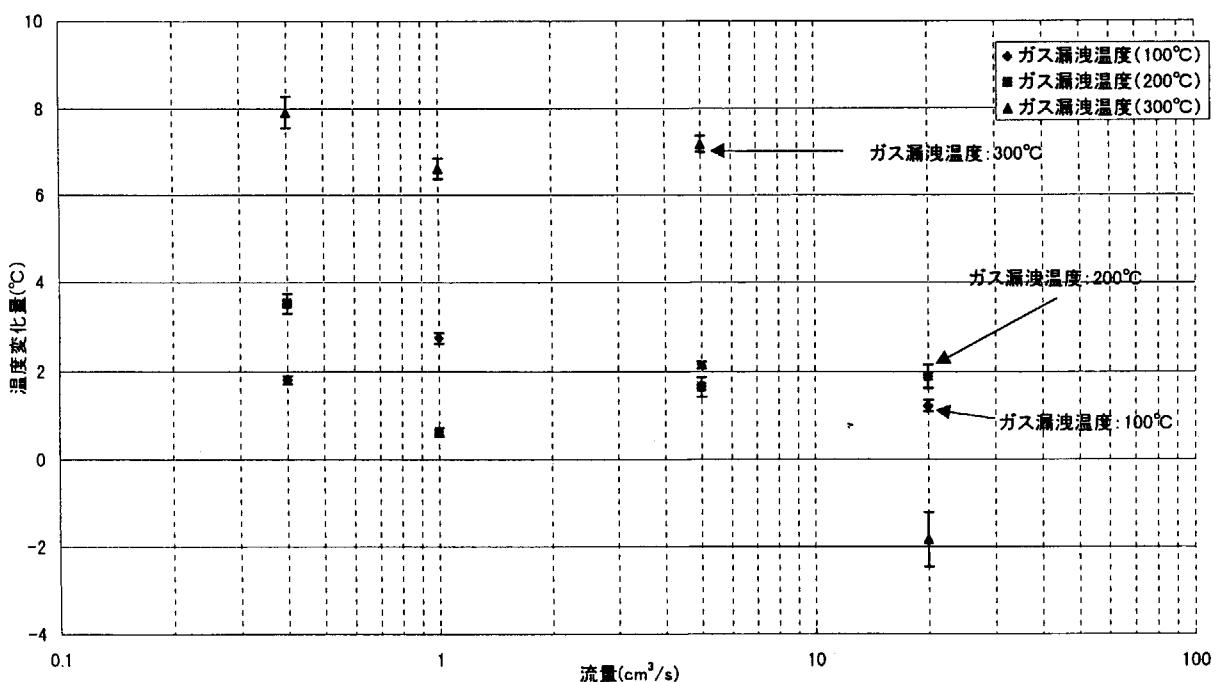
図 35 光ファイバ温度計測結果 (ヒータ出口温度 300°C、ヘリウム流量 20.0cm³/s)

図 36 光ファイバ温度計測結果 (ガス漏えい 60min 後)

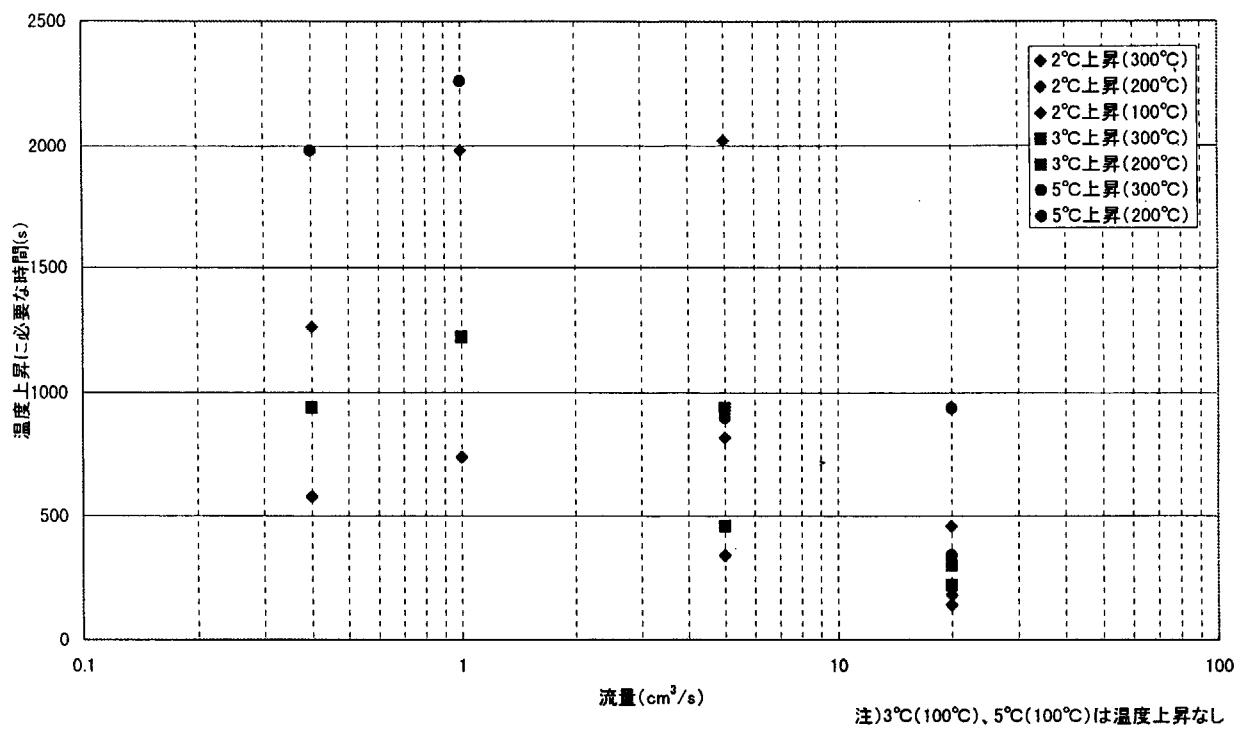


図 37 単位時間あたりの温度変化量

2.4 単体型温度センサの開発

2.4.1 設計・製作

(1) 設計仕様

単体型温度センサは実機適用に際し、配管のフランジや弁のパッキン部に捕集器と共に設置することを想定する。そのため、以下の特長を有する単体型温度センサを設計・製作する。

- 設置箇所の雰囲気条件下（温度精度： $\pm 1 \sim \pm 3^\circ\text{C}$ 、使用温度：0 ~ 300°C、雰囲気温度：~ 300°C）で温度測定が可能であること。
- 配管やフランジに取り付けられる構造を有すること。
- 漏えいしたヘリウムガスを効率的に検知する方法を探ること。
- ヘリウムガスは空気に対して軽いため、捕集器内の上部から充填されることを想定し、捕集器内部の温度分布を把握し、適切に検知できること。
- 定期検査等の作業に干渉しないよう、容易に取付け、取外しが可能な構造であること。

以上を検討した結果、以下の仕様の光ファイバ温度センサを製作する。

- 温度精度を高めるために、センサ部の光ファイバ長を長くし、そのためリング状の形状を採用し、ファイバを巻き付ける方式とする。
- 実機敷設における光ファイバ長は数百 m ~ 数 km となると予想されることから、使用する光ファイバ種として、伝送損失の少ない GI タイプ (50/125) を採用する。
- フランジやパッキン部の周囲に温度センサを設置し、さらに捕集器で覆う構造とし、漏えいしたヘリウムガスを充填させ、温度を計測する方法を探る。
- 捕集器内の雰囲気温度分布を把握するために、三相構造のリング状の温度センサをフランジの周囲に配置し、さらにヘリウムガス温度を直接測定するために、パッキン部の直近に温度センサを配置する。
- 容易に取付け、取外しが可能なように、三相構造のリング状の光ファイバは 3 本に分割し、コネクタにより接続する構造とする。

図 38 に設計した温度センサの構造図を示す。単体型光ファイバ温度センサはアルミ製のリングに光ファイバケーブルを巻き付ける構造をとる。リングの材質は比熱の大きいアルミ製とした（比熱：0.905 kJ/kg·K、27°C）。捕集器内の配置は、上下フランジのガスケット部の直近に 1 個（単体型 B）を、またフランジと捕集器側面の間に 3 つのリングを重ねて配置した（単体型 A）。単体型 A はヘリウムガス漏えいによる捕集器内の雰囲気温度の変化を計測し、単体型 B は漏えい箇所であるフランジのガスケット部の雰囲気温度変化を計測する。また、単体型 A の三相構造の内、下段のリングは下部フランジ下端を、また中段

のリングはガスケット部、上段のリングは上部フランジ上端の高さと同じくし、高さ方向の温度分布を把握する。

設置した光ファイバケーブルの長さは 20mとし、各センサ部の長さは 10mとした。(センサ部前後 5 mはコネクタによる反射の影響のため、温度計測できないの可能性があるため使用しない。) なお、使用的光ファイバは 4.2 項保温材一体型温度センサと同じものを使用し、仕様を表 10 に示す。

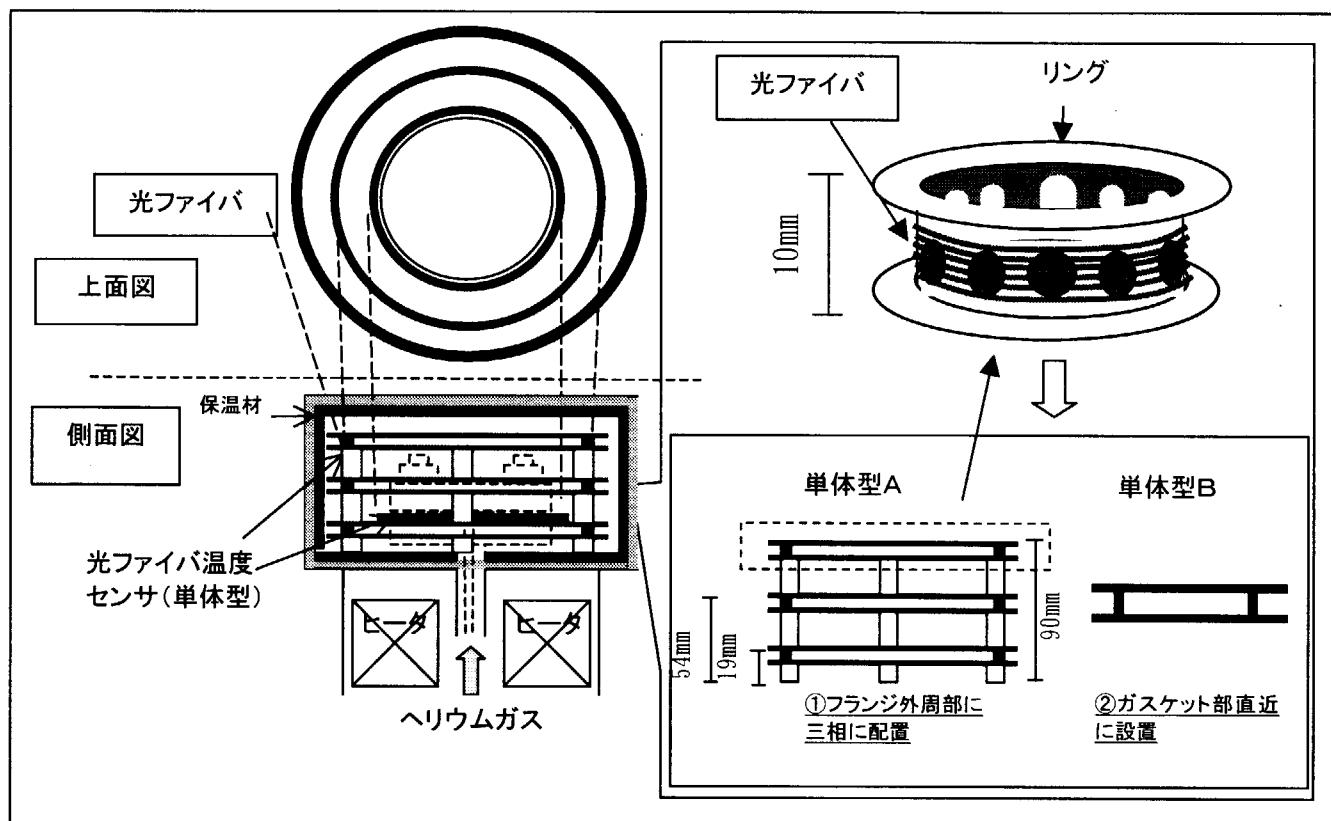


図 38 光ファイバ温度センサ(单体型)構造図

表 10 光ファイバ温度センサ（単体型）の仕様および機能一覧

No.	名称	設置箇所	機能
1	単体型A (下段)	・ 直径方向 フランジと捕集器側面の中間位置 ・ 高さ方向 下部フランジの下端	捕集器内の下部の雰囲気温度を計測
2	単体型A (中段)	・ 直径方向 フランジと捕集器側面の中間位置 ・ 高さ方向 上下フランジの中間	捕集器内の中間部（ガスケット部の高さ）の雰囲気温度を計測
3	単体型A (上段)	・ 直径方向 フランジと捕集器側面の中間位置 ・ 高さ方向 上部フランジの上端	捕集器内の上部の雰囲気温度を計測
4	単体型B	・ 直径方向 フランジ（ガスケット部）直近 ・ 高さ方向 上下フランジの中間	ガスケット部直近の雰囲気温度を計測

(2) 製作

図 39 および図 40 に単体型 A を図 41 および図 42 に単体型 B の外観図を示す。

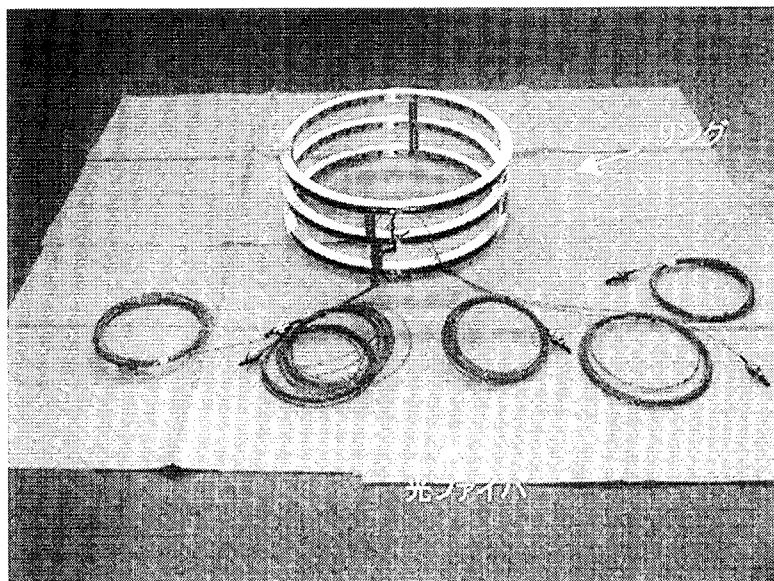


図 39 光ファイバ温度センサ（単体型 A）外観図（全体）

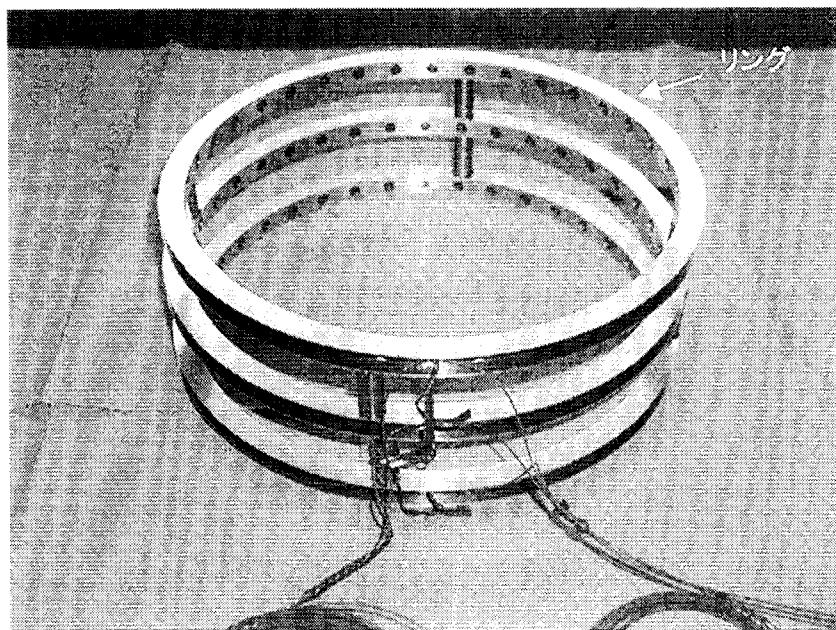


図 40 光ファイバ温度センサ(単体型A)外観図(リング)

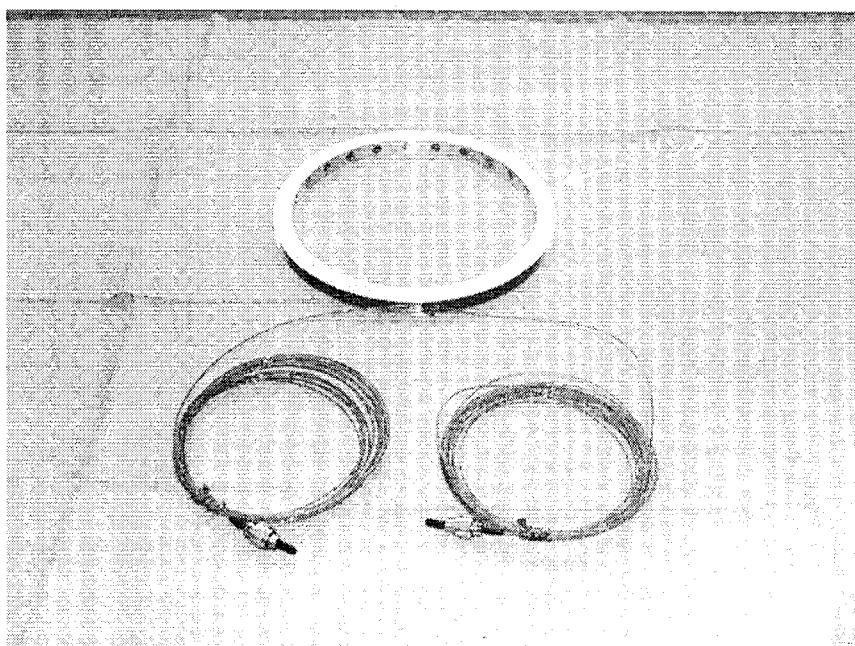


図 41 光ファイバ温度センサ(単体型B)外観図(全体)

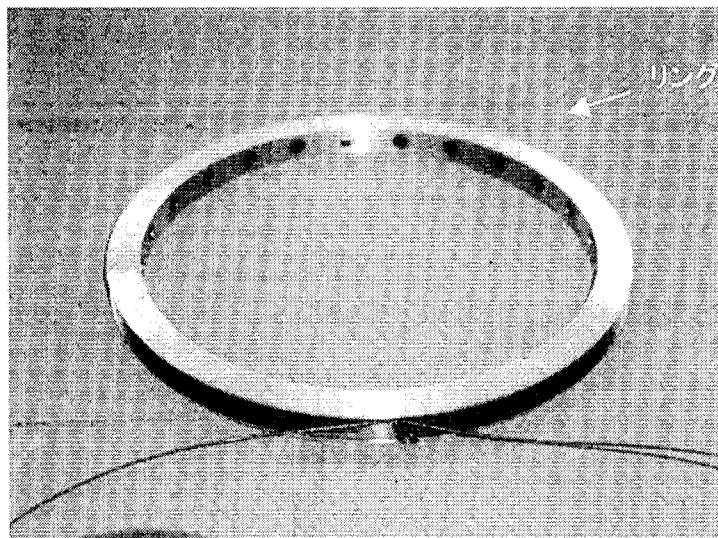


図 42 光ファイバ温度センサ(単体型B)外観図(リング)

(3) 計測器

光ファイバ温度センサにより検知した温度を計測する計測器は、保温材一体型の温度センサの漏えい模擬試験に使用した DTS800SR を使用した。

2.4.2 試験要領

本試験は光ファイバ温度センサ(単体型)を用いてヘリウムガスを模擬漏えいさせ、その温度変化を検知することを目的とする。

(1) 装置構成

a. 全体構造

本試験の装置構成を図 43 に示す。

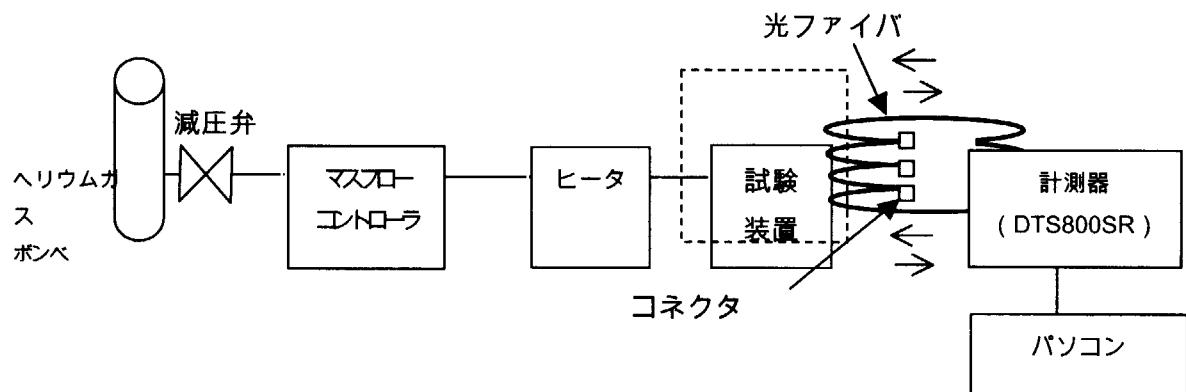


図 43 ヘリウムガス漏えい模擬試験装置構成図

本試験では、光ファイバを巻いたリングを 4 個使用しているため、各 20m の光ファイバ

を 4 本直列に接続する。各光ファイバはコネクタにより接続しているが、コネクタによる反射の影響により、コネクタ前後約 5 m は温度測定できない可能性が有る。そのため、温度計測対象外としてコネクタを含め前後 5 m ずつの光ファイバを試験装置（捕集器）の外へ導出する。

b . ガスケットおよびフランジ

ヘリウムガス漏えいを模擬するために、ガスケット（材質：T# / 1834-R-GR、 $\phi 75\text{mm}$ ）に切断機により 1.5mm 幅の切り目を入れ、漏えいを模擬しヘリウムガスの流路を確保した。ガスケット設置後、上部フランジを乗せナットを締めて固定する。比較対象のために切り込みなしの正常品のガスケットを使用した試験も合せて実施する。

図 44 に切込み有りガスケット設置図を、図 45 に切込みなしのガスケット設置図を示す。

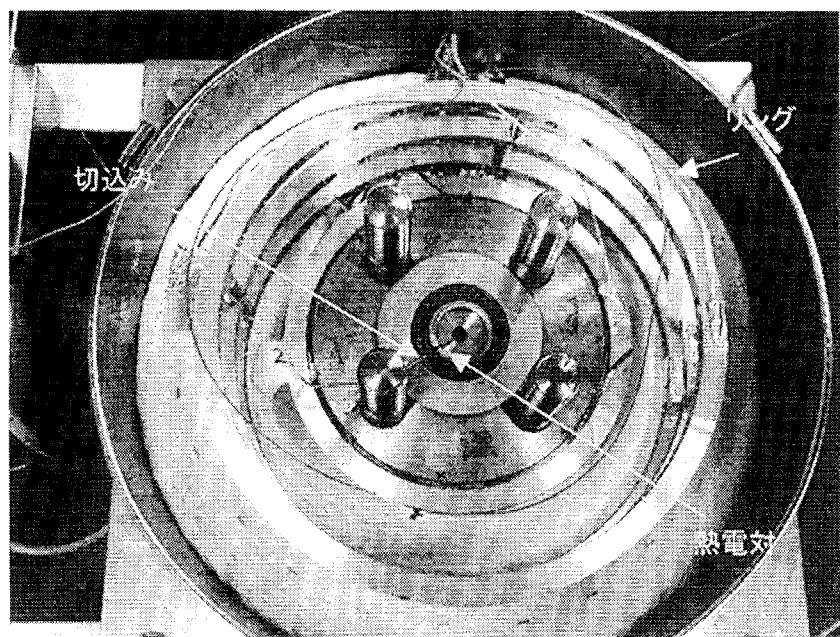


図 44 切込み有りガスケット設置状況

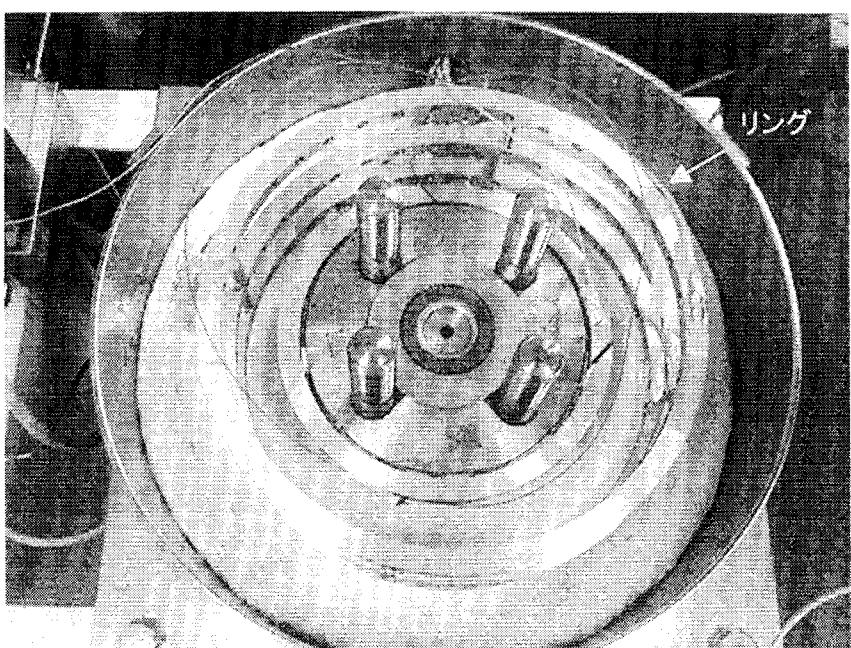


図 45 切込みなしガスケット設置状況

c. 光ファイバ温度センサ(単体型)

捕集器から外系への放熱を抑えるため、保温材一体型と同様に捕集器の側面、床、ふた

に保溫材を装着する。单体型Aは床の保溫材の上に置き、单体型Bはフランジのガスケット部と同じ高さに装着する。また、保溫材効果の比較のために、保溫材を装着しない試験を実施する。図46および図47に光ファイバ温度センサの設置状況を示す。

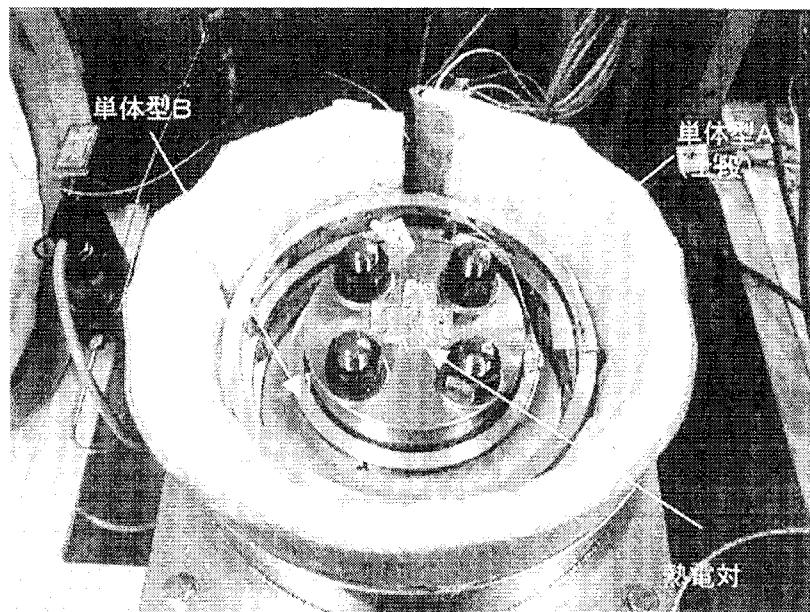


図46 光ファイバ温度センサ(单体型)設置状況

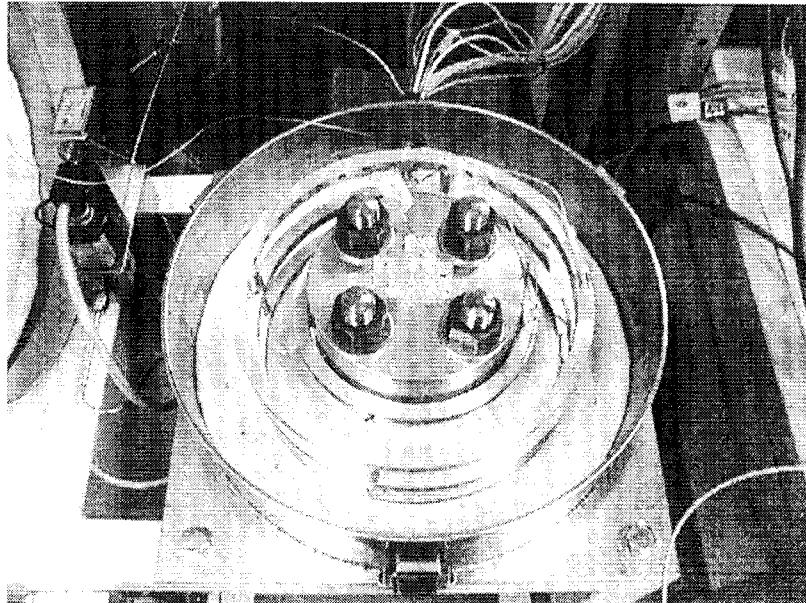


図47 光ファイバ温度センサ(单体型)設置状況(保溫材なし)

d. 热電対

光ファイバ温度センサの計測の比較対照として、フランジの各周囲に21本の热電対を設置した。表11に各热電対の設置対象を示す。また設置箇所を図48に示す。

表 11 熱電対設置箇所

No.	取付け箇所	測定対象	熱電対名称	備考
1	ヒータ出口	雰囲気(ヘリウムガス温度)	-	K type
2	ヒータ内部	雰囲気(設定温度)	-	K type
3	光ファイバ周囲 単体型A(中段)	光ファイバ周囲雰囲気 単体型A(中段)	熱電対①	K type
4	下部フランジ側面	下部フランジ	熱電対②	T type
5	上部フランジ側面	上部フランジ	熱電対③	T type
6	ガス吹き出し口	ヘリウムガス温度	熱電対④	T type
7	上部フランジ上面	上部フランジ	熱電対⑤	K type
8	捕集器内ふた	捕集器のふた	熱電対⑥	T type
9	捕集器内側面	捕集器の側面	熱電対⑦	T type
10	捕集器内床	捕集器の床	熱電対⑧	T type
11	フランジ周囲雰囲気	フランジ周囲雰囲気	熱電対B1(⑨)	K type
12	フランジ周囲雰囲気	フランジ周囲雰囲気	熱電対B2(⑨)	K type
13	フランジ周囲雰囲気	フランジ周囲雰囲気	熱電対B3(⑨)	K type
14	フランジ周囲雰囲気	フランジ周囲雰囲気	熱電対B4(⑨)	K type
15	フランジ周囲雰囲気	フランジ周囲雰囲気	熱電対B5(⑨)	K type
16	フランジ周囲雰囲気	フランジ周囲雰囲気	熱電対B6(⑨)	K type
17	フランジ周囲雰囲気	フランジ周囲雰囲気	熱電対B7(⑨)	K type
18	フランジ周囲雰囲気	フランジ周囲雰囲気	熱電対B8(⑨)	K type
19	光ファイバ周囲 単体型B	光ファイバ周囲雰囲気 単体型B	熱電対⑩	K type
20	光ファイバ周囲 単体型A(下段)	光ファイバ周囲雰囲気 単体型A(下段)	熱電対⑪	K type
21	光ファイバ周囲 単体型A(上段)	光ファイバ周囲雰囲気 単体型A(上段)	熱電対⑫	K type

注1) No.6 の熱電対④(ガス吹き出し口)はガスケット切込みなしの試験では装着しない。

注2) No.11~18 の熱電対は、4.2章漏えい模擬試験装置の特性試験の熱電対B1~B8に相当し、熱電対⑨はその平均値をとったものである。

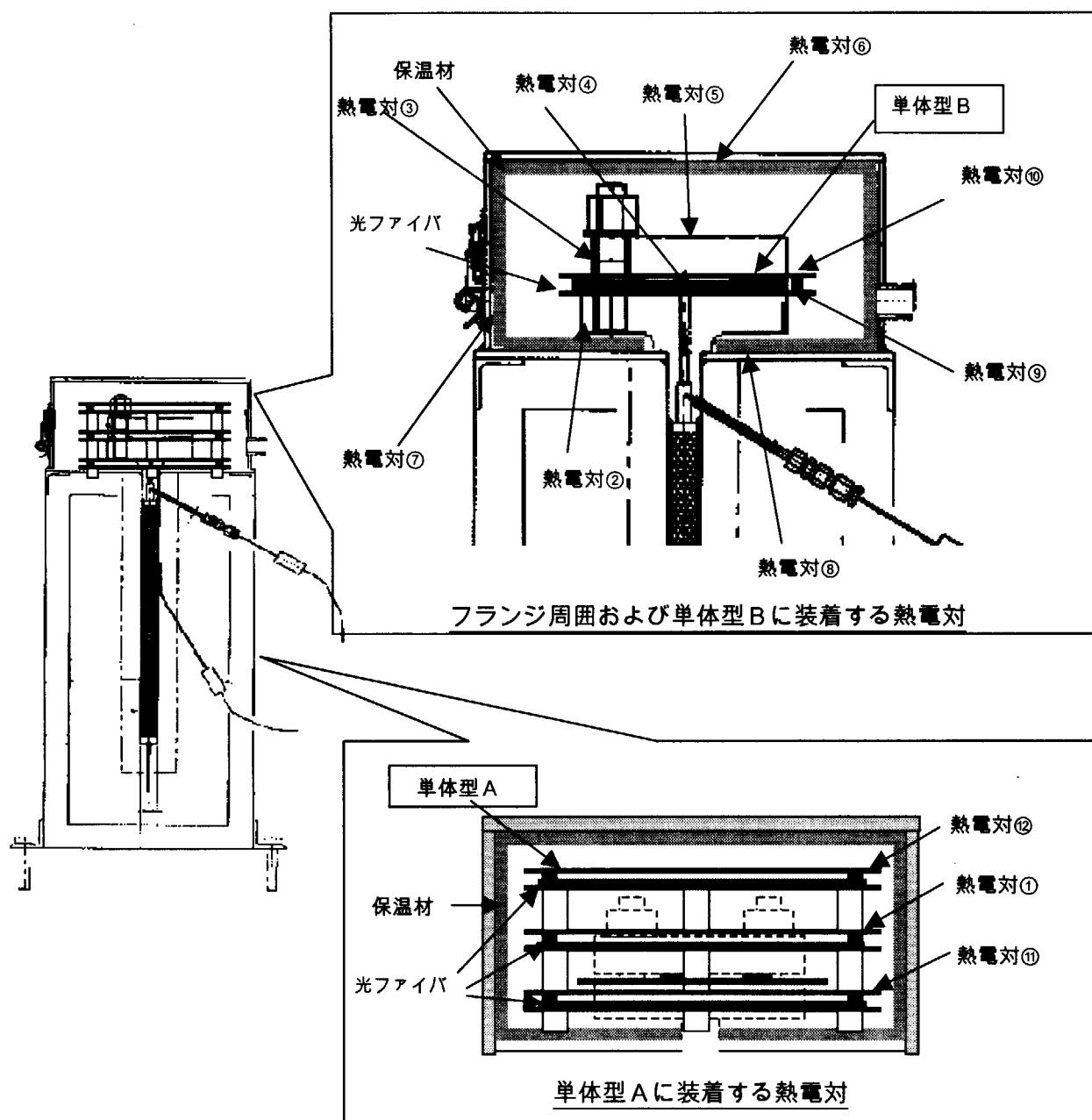


図 48 热電対設置箇所

(2) 試験手順

a . 試験方法

温度条件は、ヒータ出口温度 100、200、300°C の 3 種類、ヘリウムガス圧力 4 MPa で行う。測定は保温材一体型温度センサの試験と同様、75 min 間（ヘリウムガス漏えい開始前 15 min + 漏えい開始後 60 min）、ヘリウムガス流量は各温度において、0.4、1.0、5.0、20.0 cm³/s で行う。サンプリング周期は光ファイバ温度センサでは保温材一体型温度センサ試験時と同じく 35s、熱電対では 1s である。

b . 試験手順

以下に本試験の手順を示す。なお、試験は 100°C、200°C、300°C の順番で行う。

- ① 光ファイバ温度センサおよび熱電対をセットし、捕集器蓋をしめる。
- ② 計器盤でヒータ内部温度を各設定温度に設定し、昇温する。
- ③ 設定温度で試験装置を連続運転する。
- ④ ヘリウムガス漏えい開始 15min 前より、光ファイバおよび熱電対測定を開始する。
- ⑤ 計器盤でヘリウムガス流量を各流量に設定し、ヘリウムガスボンベを開き漏えいを開始する。
- ⑥ ヘリウムガス漏えい後 60min 後測定終了。

c . 試験ケース

表 12 に单体型光ファイバ温度センサの漏えい模擬試験の試験ケースを示す。まず、100 ~ 300°C で捕集器に保温材を装着した試験を 4 種類の流量で行い、また保温材効果の把握のために、保温材を装着しない試験を流量 20.0 cm³/s で行う。さらに、切込みの無い正品ガスケットを使用した試験により、漏えいの有無による温度変化の違いを確認する。

表 12 光ファイバ温度センサ(単体型) ヘリウムガス漏えい模擬試験ケース

温度	ガスケット切込み			
	有り		なし	
	保温材有り	保温材なし	保温材有り	保温材なし
100°C	0.4、1.0 5.0、20.0 cm ³ /s	-	-	-
200°C	0.4、1.0 5.0、20.0 cm ³ /s	-	-	-
300°C	0.4、1.0 5.0、20.0 cm ³ /s	20.0 cm ³ /s	20.0 cm ³ /s	-

注) 表内の数値はヘリウムガス流量である。

2.4.3 結果と考察

測定した光ファイバ温度センサおよび熱電対①～⑨の温度変化の例を図 49～図 60 に示す。また、ガスケットの切込みが無い温度変化を図 61 に示し、捕集器の保温材を取り外した試験での温度変化を図 62 に示す。光ファイバ温度センサのヘリウムガス流量に対する温度変化を図 63～図 66 に示す。

(1) 温度精度

表 13 に漏えい開始前後における光ファイバと熱電対の温度の差を示す。表 13 より光ファイバ温度センサ(①～④)とその近傍に設置した熱電対(①、⑩～⑫)の温度の差は±2°C 以内の範囲にあり、光ファイバの温度仕様の±1～3°C を満たしており、適切に温度を計測している。

表 13 漏えい開始前後の光ファイバと熱電対の温度差

No.	流量 (cm ³ /s)	時間	单体型 A (下段)(°C)	单体型 A (中段)(°C)	单体型 A (上段)(°C)	单体型 B (°C)
1	0.4	漏えい前 15min	-0.6	-0.3	0.1	1.0
		漏えい後 60min	-1.7	-1.5	-1.4	1.3
2	1	漏えい前 15min	-0.6	-0.5	-0.6	2.4
		漏えい後 60min	0.3	-0.6	-0.3	0.4
3	5	漏えい前 15min	-0.2	-0.2	-0.5	1.4
		漏えい後 60min	0.9	-0.4	0.0	0.5
4	20	漏えい前 15min	0.3	0.1	0.3	1.4
		漏えい後 60min	1.7	0.7	1.0	0.9

注) 表中の数値は光ファイバの温度から熱電対の温度を引いた値である。

(2) ガスケットに切込みがあるケース (条件温度 100, 200, 300°C、流量 0.4, 1.0, 5.0, 20.00cm³/s)

フランジの直近の光ファイバ温度センサ④の温度は、図 55、図 56、図 59 および図 60 に示すように高温、高流量の条件下では、漏えい開始後 1500s 以内に温度上昇が見られた。特に、300°C、20.0cm³/s の条件下では、600s 付近で 5°C 程度の温度上昇が確認できた。なお、1500s 以降ではいずれも減少する傾向を示す。一方、低温、少ない流量の条件下ではほとんど上昇が見られなかった。

フランジの外周に三相に設置した光ファイバ温度センサ①～③は高温、高流量の条件下で漏えい直後より温度が減少する傾向を示す。特に 300°C、20.0cm³/s の条件下では、漏えい前に比べて 10°C 程度も減少し、2000s 付近から一定に落ち着き始めた。

また、フランジやガス吹き出し口に設置した熱電対(熱電対②、③、④、⑤、⑨)は徐々に減少傾向を示し、熱電対⑥(捕集器内ふた)、⑦(捕集器内側面)、⑧(捕集器床)は上

昇傾向を示した。さらに、この傾向は図 63～図 66 に示すように、高温、高流量の条件下で顕著であった。フランジの周囲温度と、捕集器のふた、側面、床の温度は漏えい前には 40～80°C の差があったが、ヘリウムガス漏えい後には 30～70°C 程度と小さくなつた。これは捕集器に設置した保温材の効果により、漏えい前はフランジ周囲が高い温度に、捕集器側面付近では低い温度に保たれていたが、ヘリウムガス漏えい後、ヘリウムガスが捕集器内を充満することにより、その温度分布を均一化しようとした結果であると考える。加えて、ヘリウムガスは捕集器に充満した後、捕集器の外に漏えいすると考えられるため、外系への放熱効果も温度減少に寄与したと考えられる。

図 63～図 66 に示したように、漏えい前後における温度変化量は流量が大きいほど大きく（温度は減少）なる。この傾向は、光ファイバ温度センサ①～④で共通であるが、これは先に述べたようにヘリウムガスが熱伝達の媒体として捕集器内に充満して捕集器内の温度を均一化し、漏えい前に高温であった光ファイバ部の温度が下がつたものを検知した結果であると考える。

(3) ガスケット切込みがないケース（条件温度 300°C、流量 20.0 cm³/s）

切込みを入れないガスケットを使用して、300°C、20.0 cm³/s の条件下で試験を行つた。図 61 に示すように漏えい後の光ファイバおよび熱電対の温度に変化は見られなかつた。これはヘリウムガス漏えいの流路がないため、捕集器内への漏えいが無いためである。

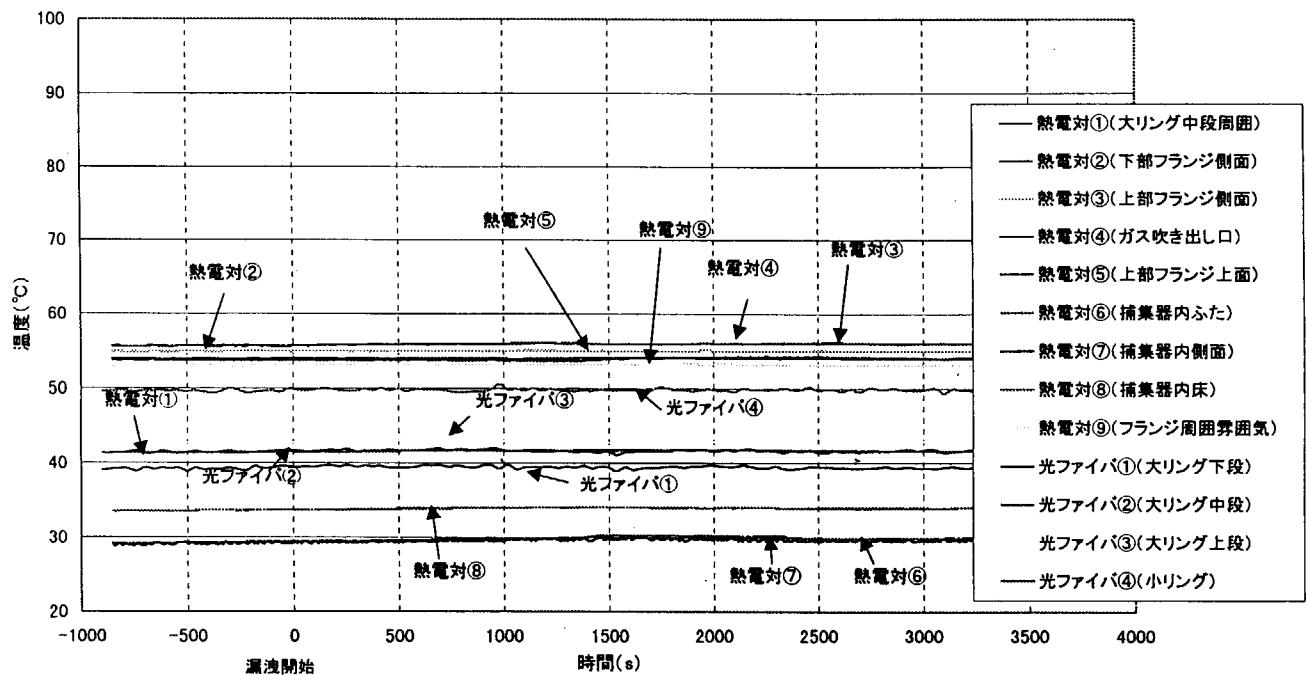
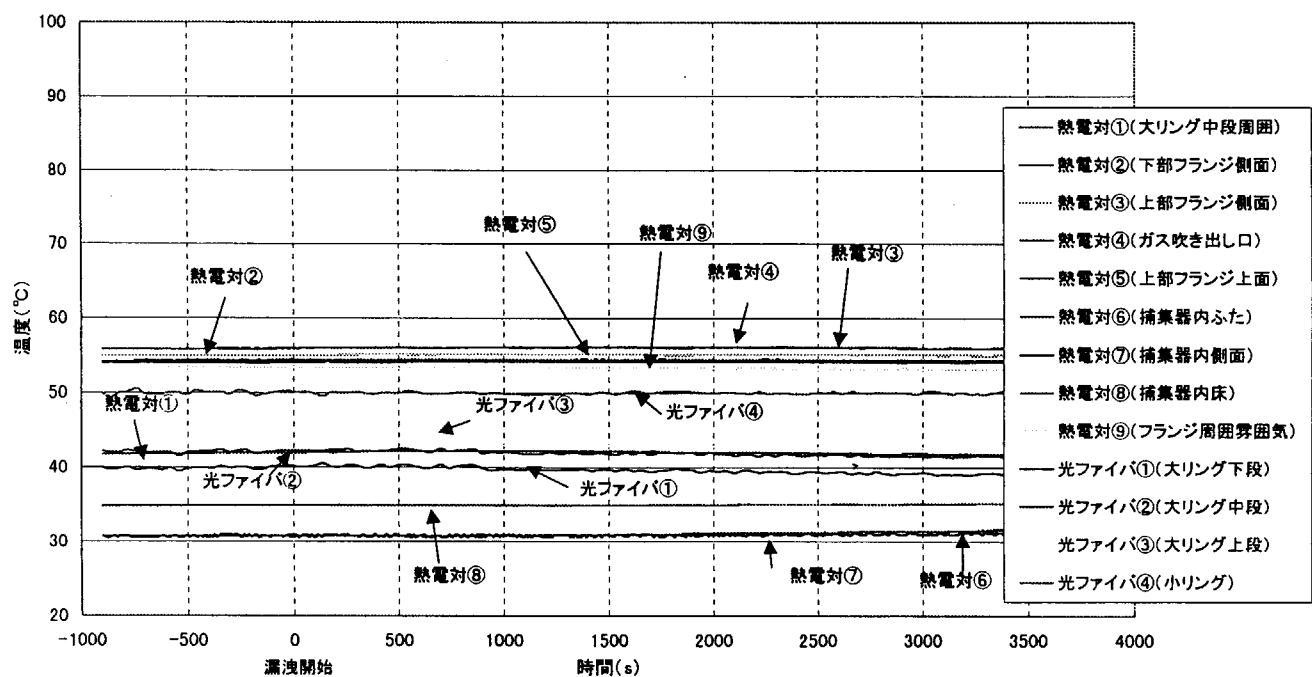
(4) 捕集器の保温材が無いケース

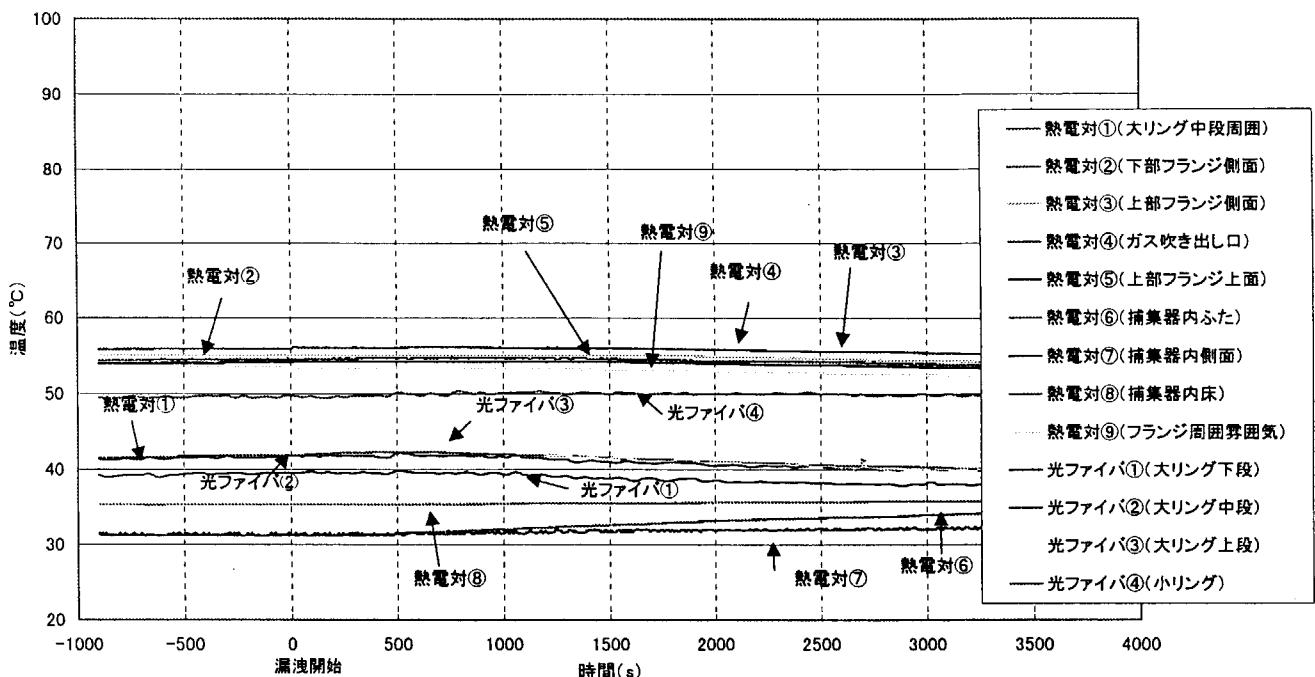
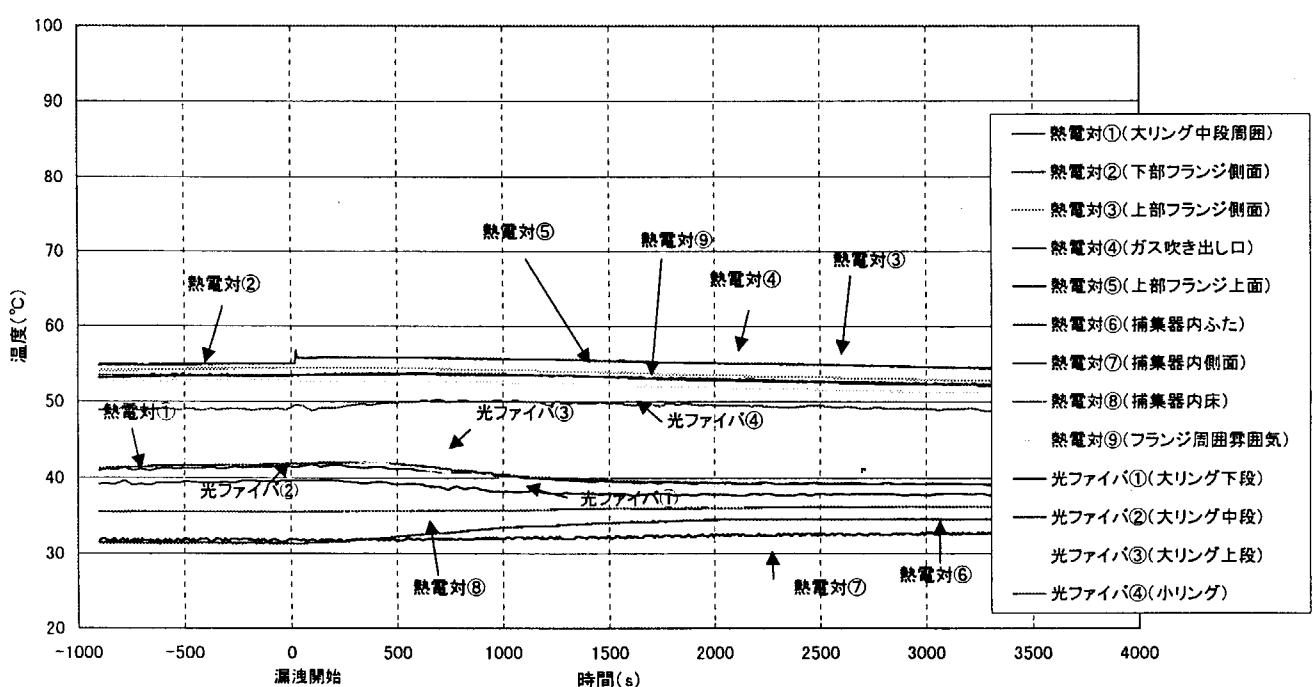
保温材の効果を調査するために、捕集器の側面、ふた、床に設置した保温材を取り外して、300°C、20.0 cm³/s の条件下で試験を行つた。図 62 に示すように、ヘリウムガス漏えい後、光ファイバ温度センサ④の温度は保温材装着時と同様に上昇傾向を示す。しかし、保温材装着時と比べ、1500s 以降でも減少傾向を示さなかつた。また、フランジ外周の光ファイバ温度センサ①～③の温度も漏えい直後は、一時的に減少傾向を示すが、1000s 前後より上昇し、保温材装着時とは異なる。一方、本試験ではフランジ周囲付近の温度（約 110°C）と捕集器側面周辺の温度（約 50°C）との温度差は、図 60 で示した保温材を装着している時（最大約 80°C）に比べて小さい。これは、保温材装着時のように捕集器内に大きな温度分布が無いため、ヘリウムガスによる、捕集器内温度の均一化の速度が、保温材を装着している時に比べて、緩やかであるためであると考える。

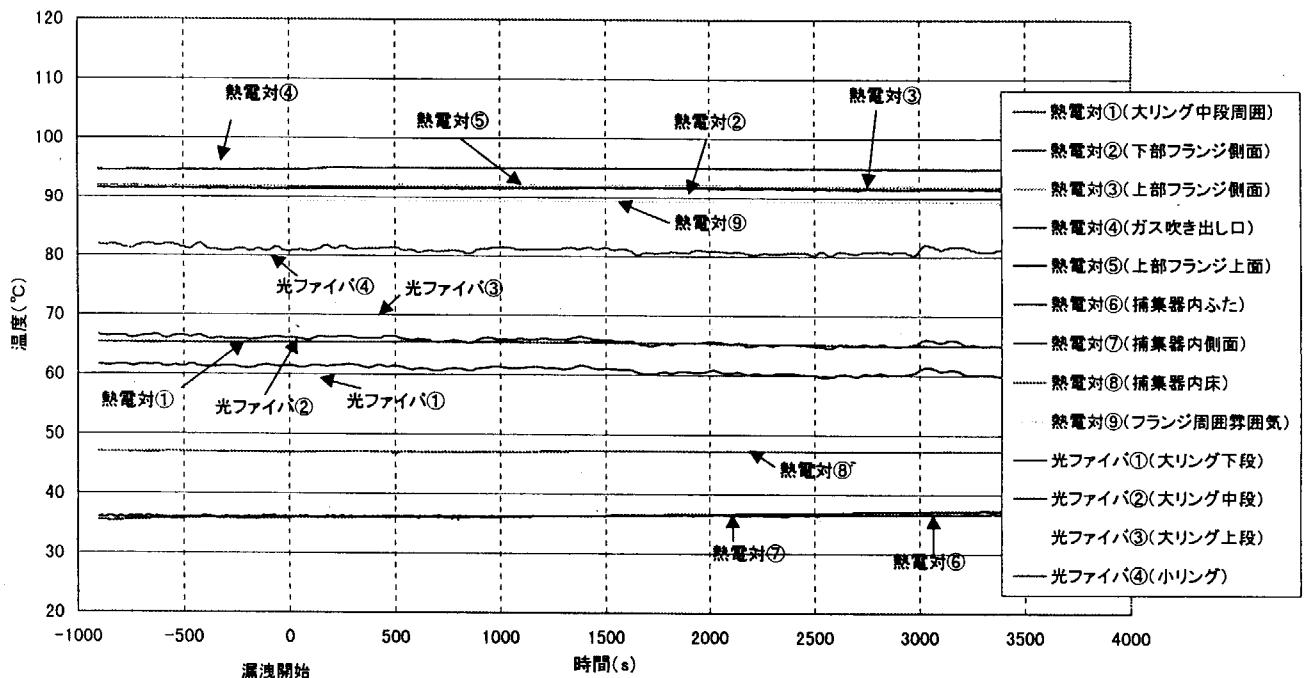
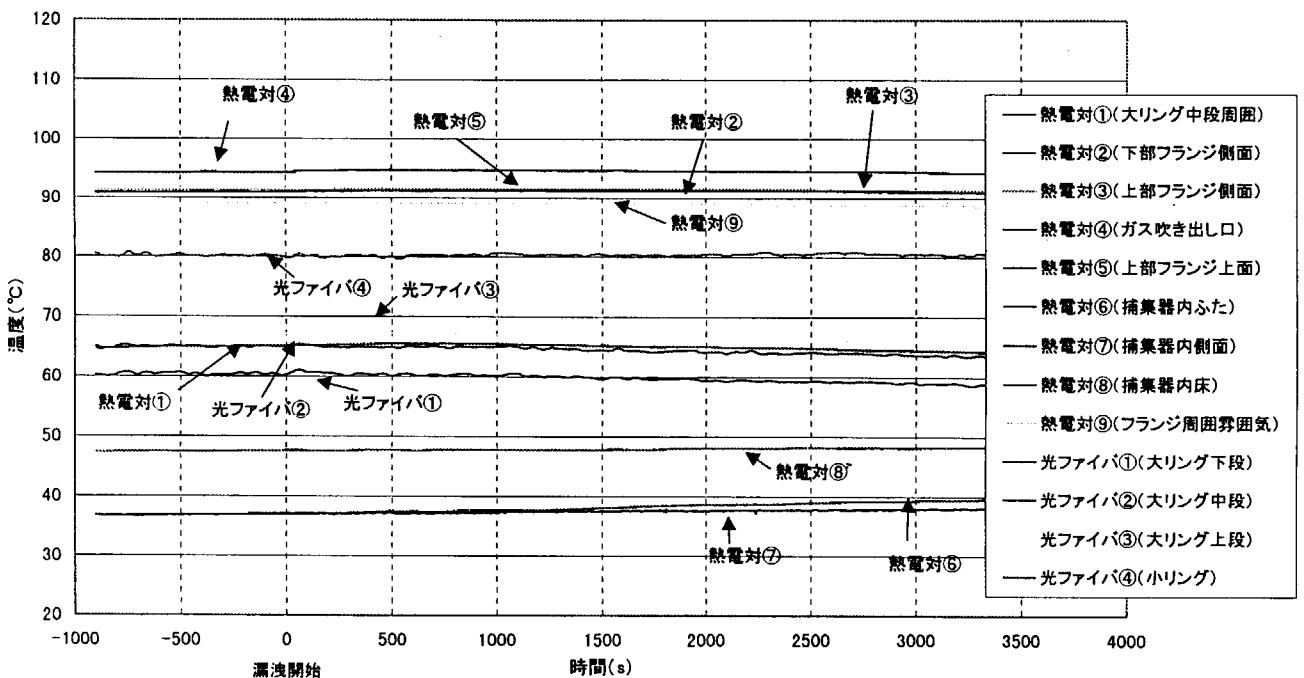
2.4.4 まとめ

本試験によりヘリウムガス漏えい模擬試験に関し以下の情報が得られた。

- フランジの直近の光ファイバ温度は上昇傾向を示した。
- フランジの外周の光ファイバ温度は下降傾向を示した。
- フランジから同じ距離に設置してある光ファイバでも高さ方向に温度分布がある。
- 捕集器内の雰囲気温度の変動をモニタすることにより、漏えいを検知できると考えられる。

図 49 光ファイバ温度計測結果(単体型)(ヒータ出口設定温度 100°C 、ヘリウム流量 0.4cm³/s)図 50 光ファイバ温度計測結果(単体型)(ヒータ出口設定温度 100°C 、ヘリウム流量 1.0cm³/s)

図 51 光ファイバ温度計測結果(単体型)(ヒータ出口設定温度 100°C、ヘリウム流量 5.0cm³/s)図 52 光ファイバ温度計測結果(単体型)(ヒータ出口設定温度 100°C、ヘリウム流量 20.0cm³/s)

図 53 光ファイバ温度計測結果(単体型)(ヒータ出口設定温度 200°C、ヘリウム流量 0.4cm³/s)図 54 光ファイバ温度計測結果(単体型)(ヒータ出口設定温度 200°C、ヘリウム流量 1.0cm³/s)

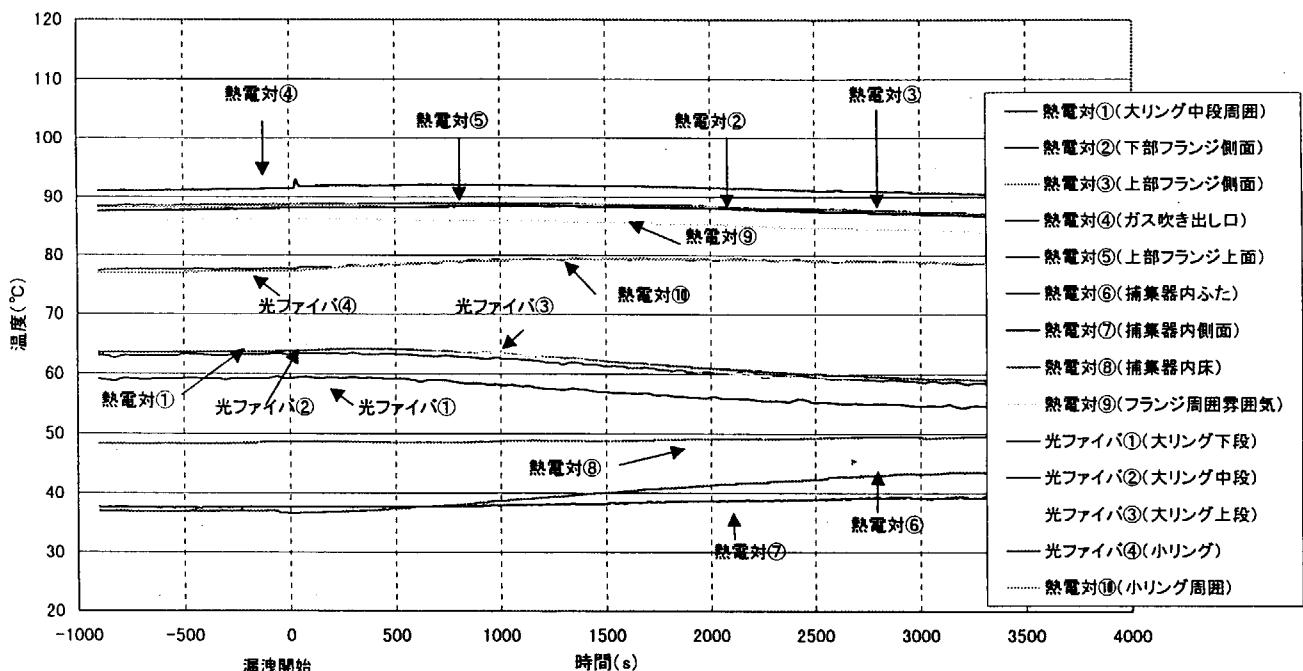


図 55 光ファイバ温度計測結果(単体型)(ヒータ出口設定温度 200°C、ヘリウム流量 5.0cm³/s)

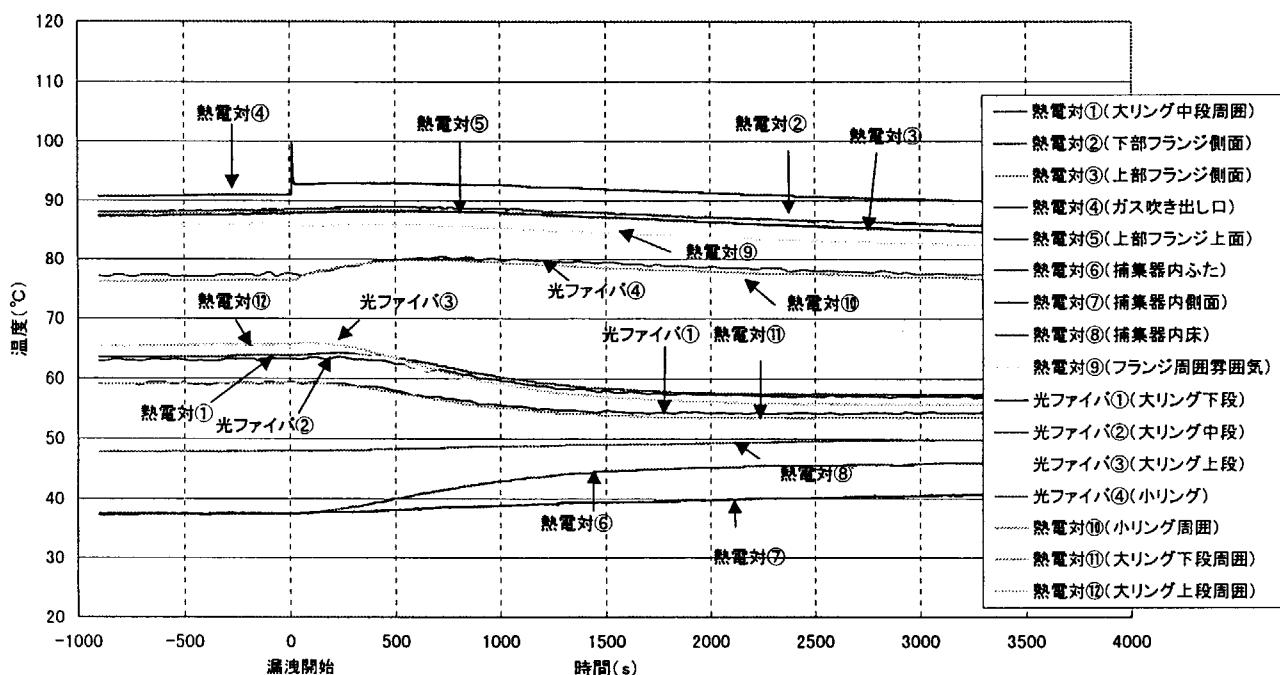
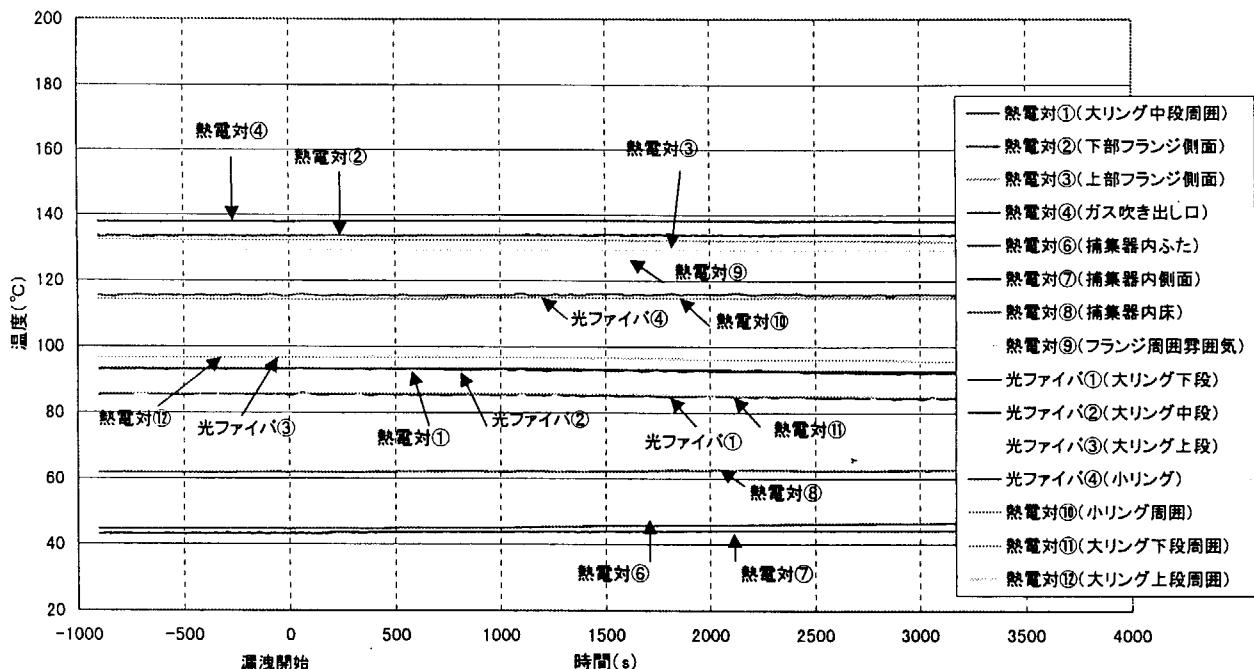
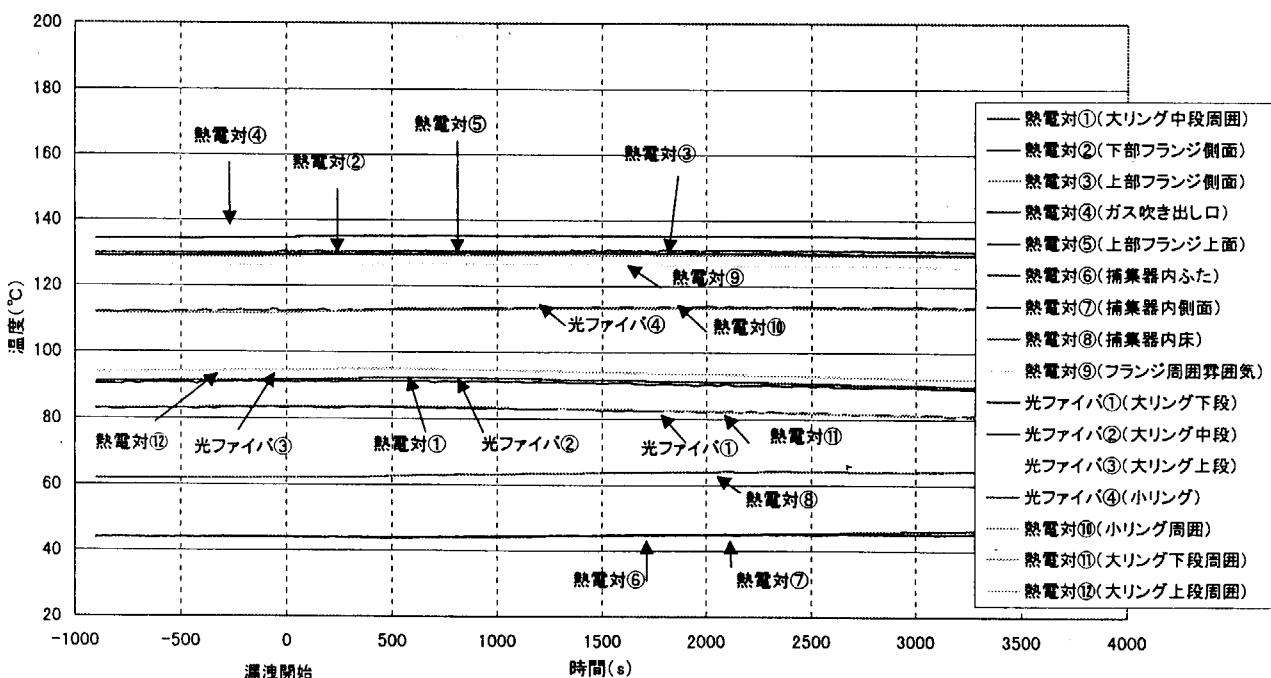
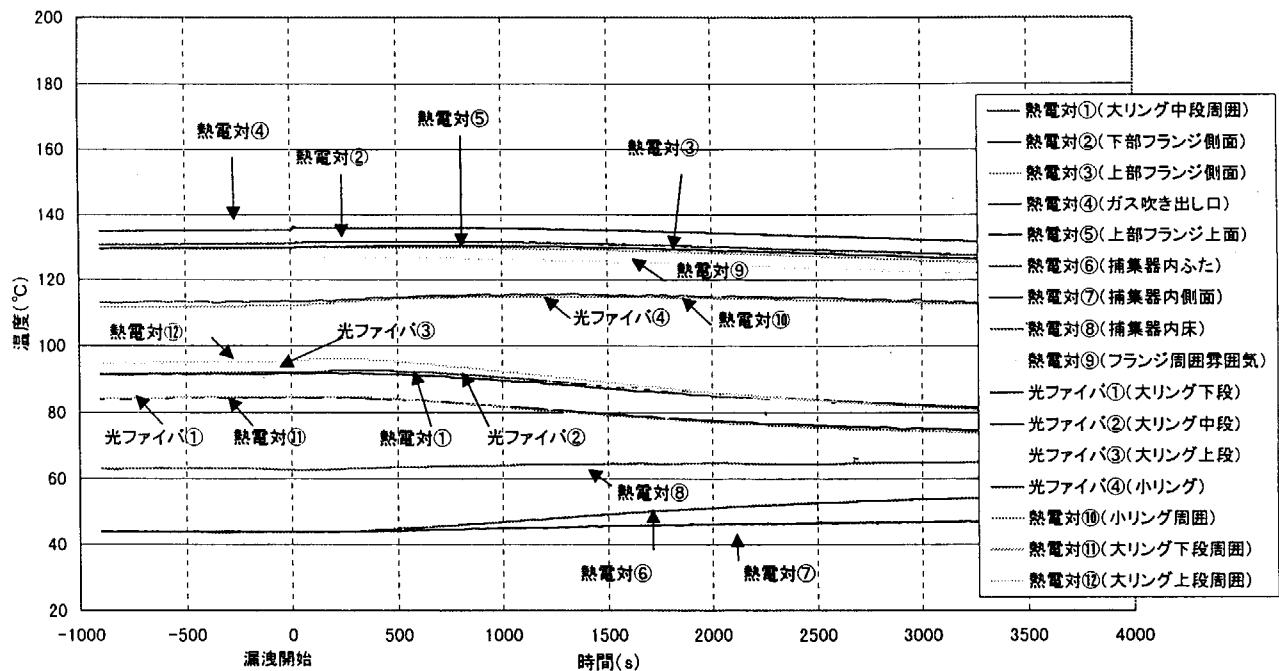
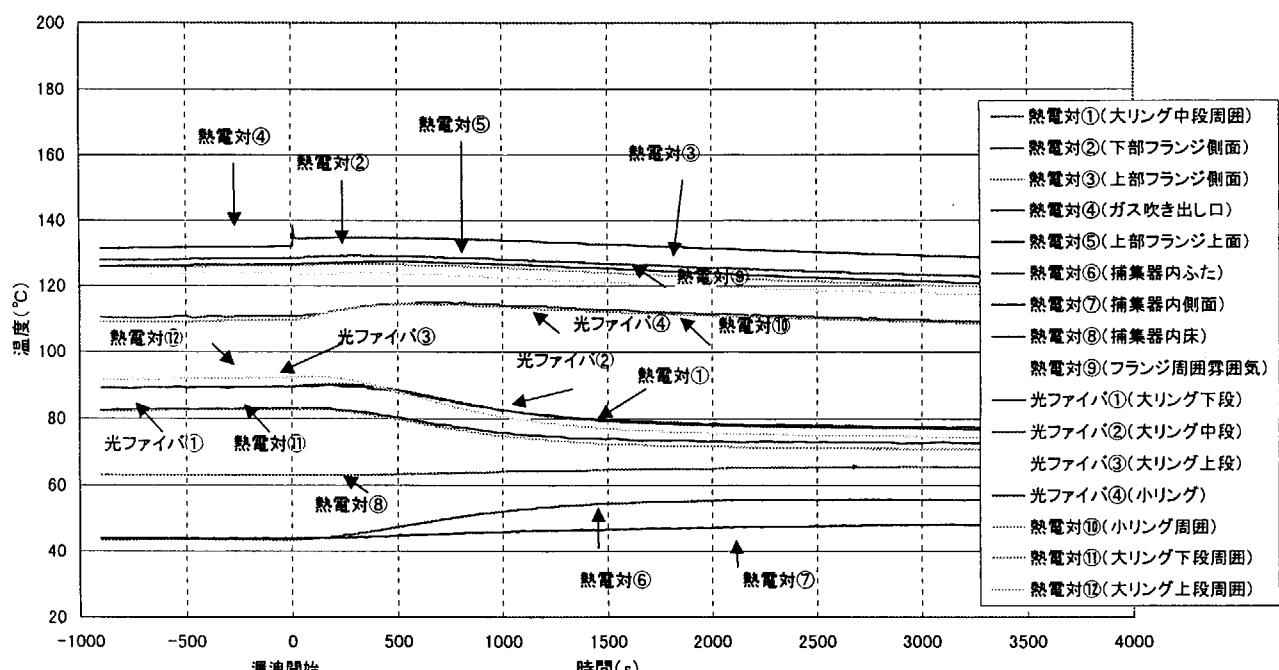


図 56 光ファイバ温度計測結果(単体型)(ヒータ出口設定温度 200°C、ヘリウム流量 20.0cm³/s)

図 57 光ファイバ温度計測結果(単体型)(ヒータ出口設定温度 300°C 、ヘリウム流量 0.4cm³/s)図 58 光ファイバ温度計測結果(単体型)(ヒータ出口設定温度 300°C 、ヘリウム流量 1.0cm³/s)

図 59 光ファイバ温度計測結果(単体型)(ヒータ出口設定温度 300°C、ヘリウム流量 5.0cm³/s)図 60 光ファイバ温度計測結果(単体型)(ヒータ出口設定温度 300°C、ヘリウム流量 20.0cm³/s)

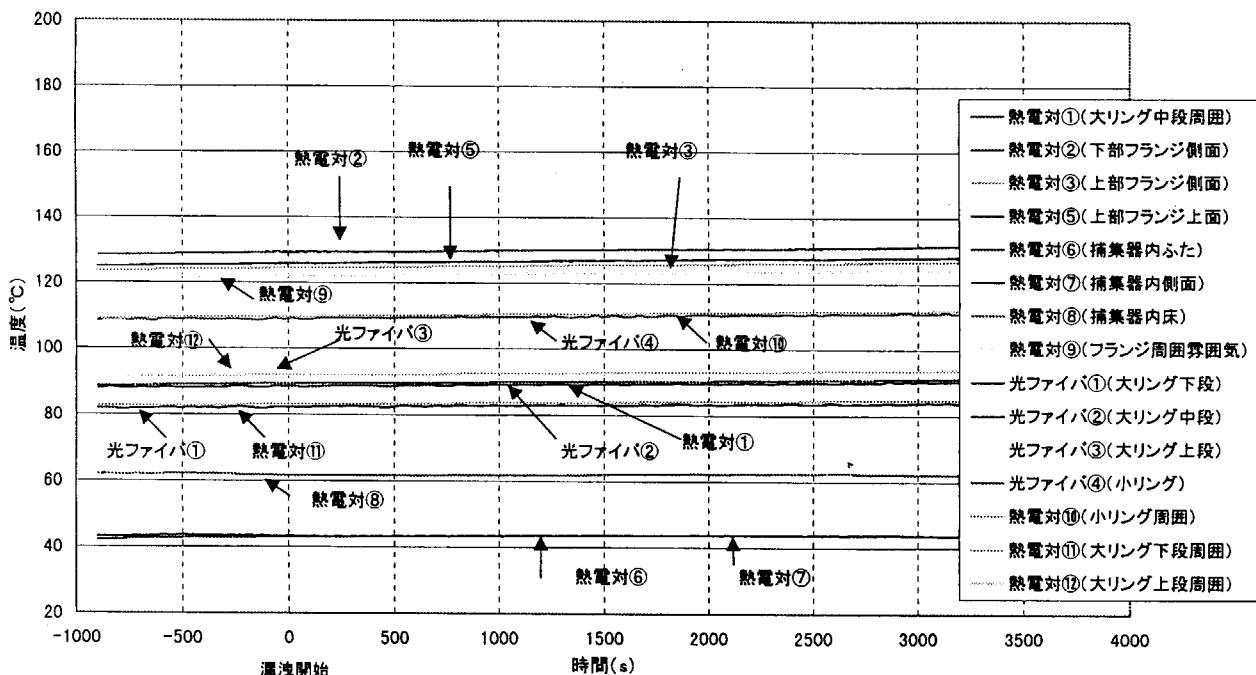


図 61 光ファイバ温度計測結果(単体型、ガスケット切込みなし)(ヒータ出口温度 300°C 、ヘリウム流量 20.0cm³/s)

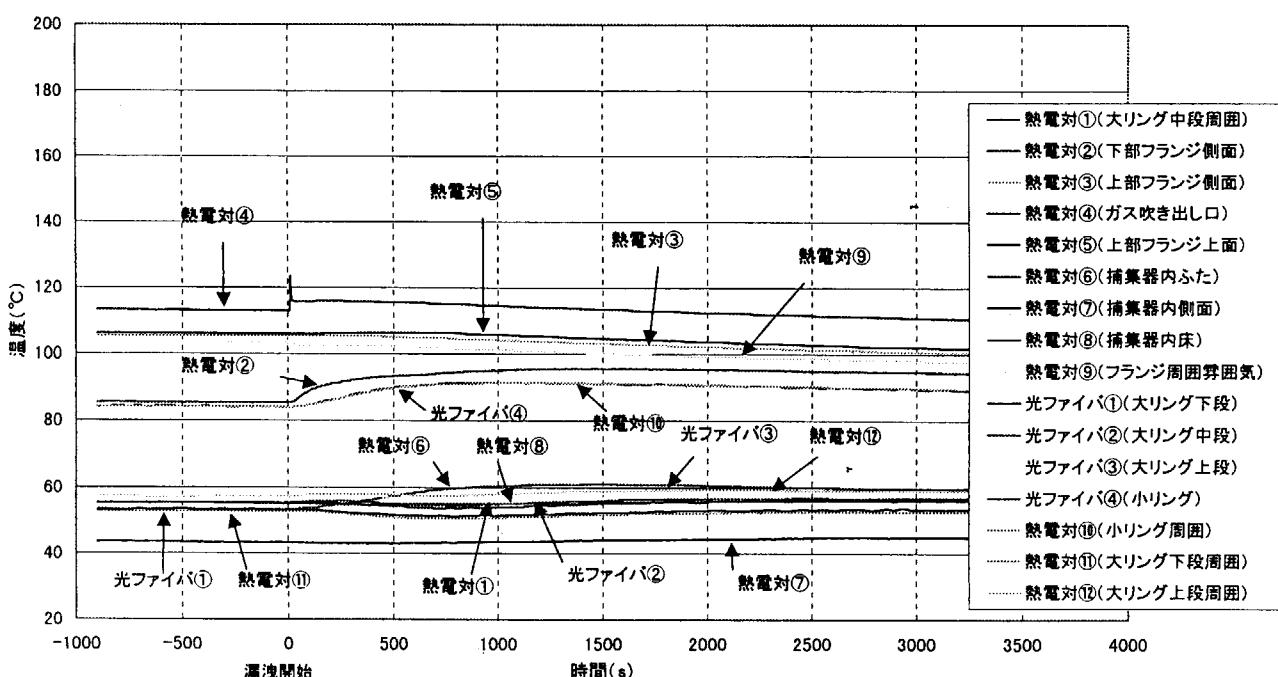


図 62 光ファイバ温度計測結果(単体型、保溫材なし)(ヒータ出口温度 300°C 、ヘリウム流量 20.0cm³/s)

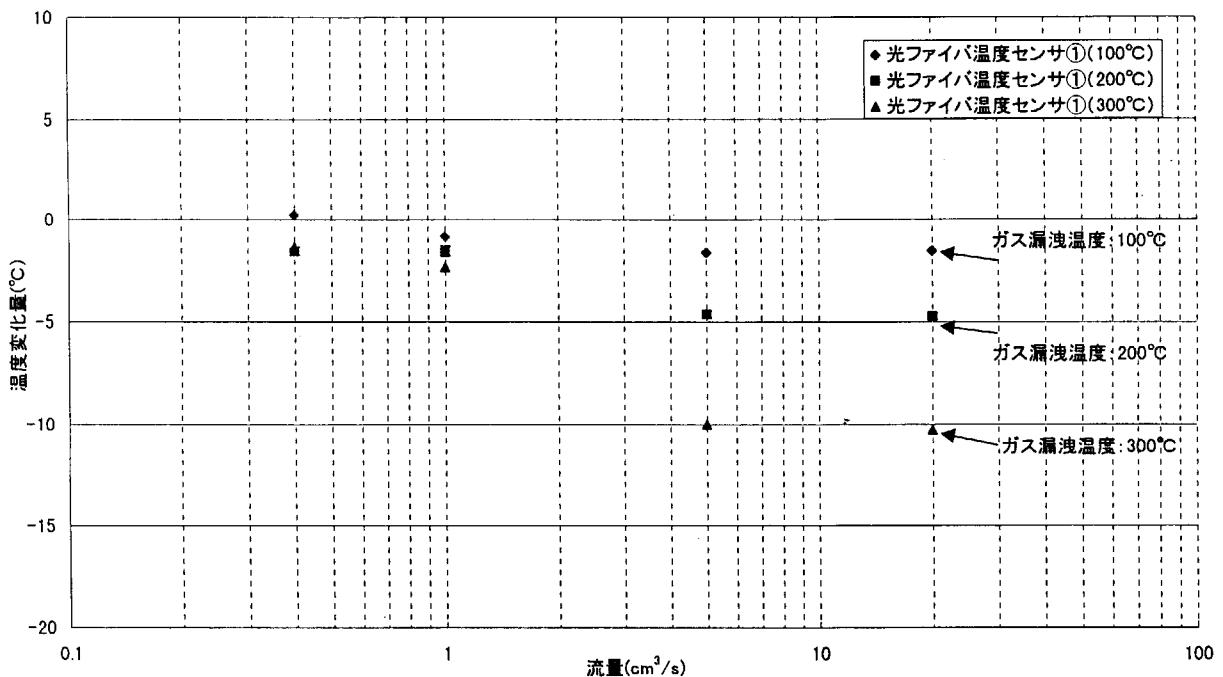


図 63 光ファイバ温度センサ①(フランジ外周下段) 計測結果 (漏えい 60min 後)

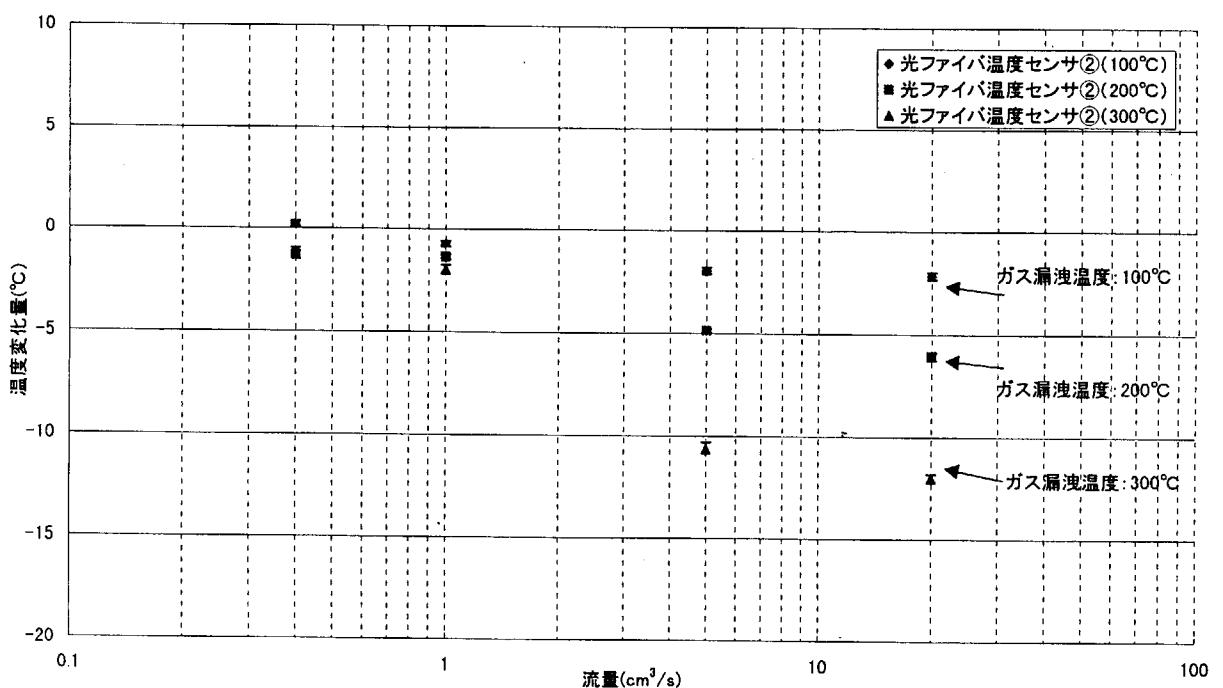


図 64 光ファイバ温度センサ②(フランジ外周中段) 計測結果 (漏えい 60min 後)

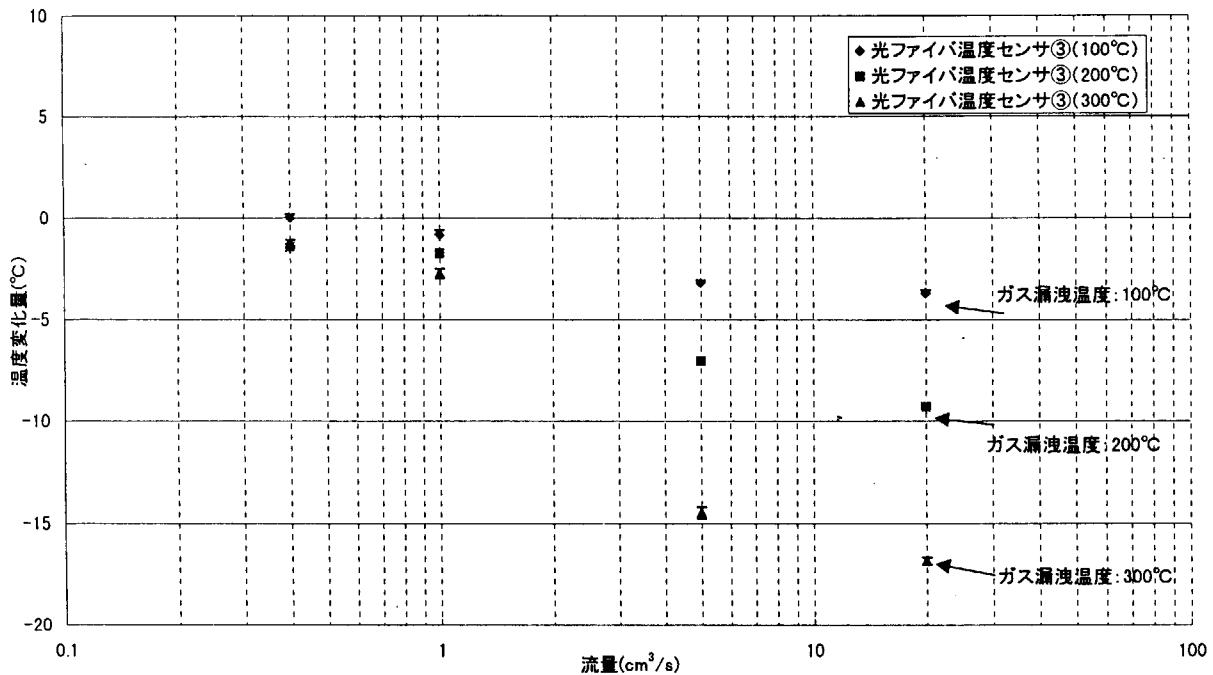


図 65 光ファイバ温度センサ③(フランジ外周上段) 計測結果 (漏えい 60min 後)

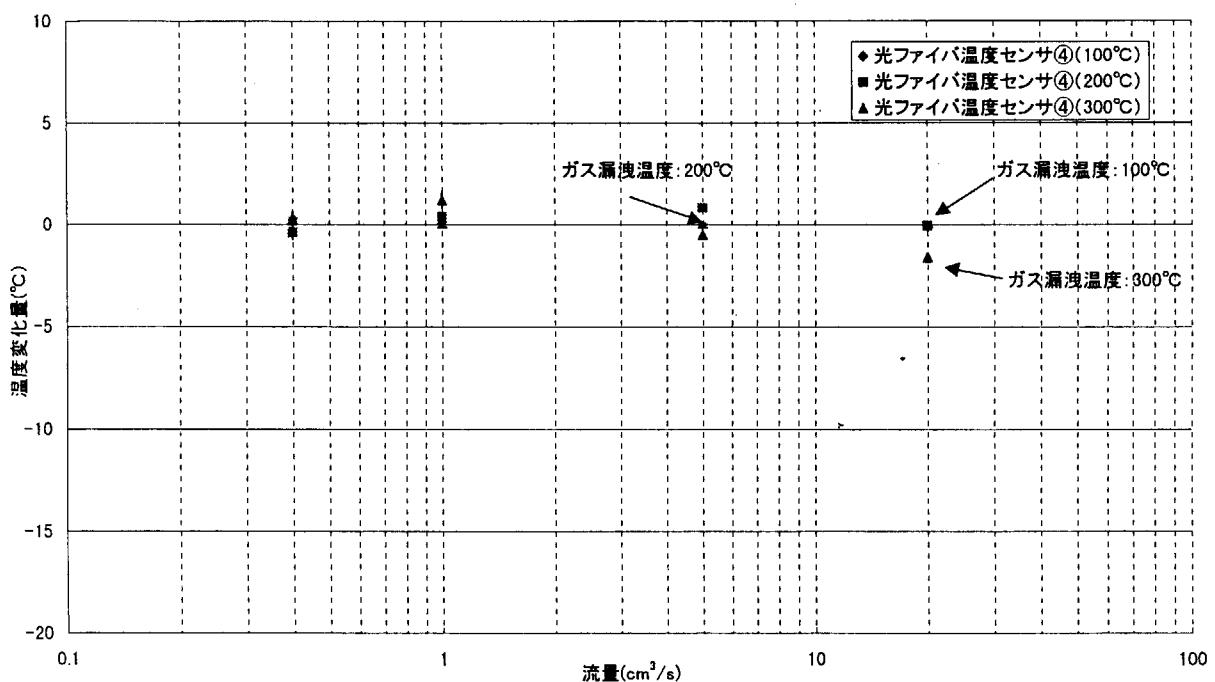


図 66 光ファイバ温度センサ④(フランジ直近) 計測結果 (漏えい 60min 後)

2.5 模擬試験装置による伝熱シミュレーション

(1) 概要

漏えい発生前後における模擬装置内の温度分布をもとに定常熱伝導の状態から、ヘリウムガス漏えい後に到達する新しい平衡状態までの熱伝達を検討し、評価して、模擬装置により得られた結果の評価を行う。

(2) 热平衡状態までの温度変化

模擬装置は 600W (200V 単相) のヒータを所持し、ヒータ出力はヘリウムガス加熱容器中央で計測しているヒータ温度によりフィードバック制御される。

ヘリウムガス加熱容器で発生した熱は熱伝導によりフランジおよび捕集器に伝わり、これらが発生した熱の放熱器となっている。実測の結果、ヒータ出口部で 280°Cまで昇温しても、フランジと加熱容器の結合部では加熱器側で 170°C、フランジ側で 130°Cとなり 40°C の温度差が発生している。この差はフランジと加熱容器の径の違いによる熱抵抗と捕集器からの放熱によるものと考えられる。したがって、ヒータ出口でヘリウムガスの温度が 300°C近くあっても、漏えい口のあるガスケットの温度はフランジの温度になるため漏えいするヘリウムガス温度はフランジ温度まで冷却される。(図 67 および図 68 参照)

ヘリウムガスの流れがないときのヒータ出口温度は 281°Cであるが、流れがあると 300°C近くになるのは、前者が空気の自然対流熱伝達によるものであり、後者は加熱容器内でヘリウムガスが強制対流によるものである。

また、製作した模擬装置が熱的に定常状態になるのは、加熱開始後約 30000s (8 時間 20 分) 後である。表 14 に熱平衡状態に達した時点でのヒータ出力値を、設定温度毎に示す。熱平衡時のヒータ出力は室温との相対値で評価する。

表 14 热平衡時のヒータ出力値 (室温 : 26 ~ 28°C)

ヒータ出口温度(°C)	ヒータ設定温度(°C)	熱平衡時のヒータ出力値(W)
100	170	140
200	330	200
300	500	260

(3) 漏えい発生前後の温度分布

漏えいは熱平衡状態が成立した時点で開始する。漏えい開始前後の各部位の温度分布を図 68~図 70 に示す。漏えい開始時漏えいガスの温度は一時的に高くなり、その後緩やかに上昇し (漏えい後約 400s まで) 下降して 8000s 付近で一定値に落ち着く。フランジの温度は下降して安定になり、捕集器の温度は側面も蓋の部分も上昇し安定になる。

漏えい開始直後の一時的な温度上昇は、流量が $20\text{cm}^3/\text{s}$ の場合に約 3s、 $5\text{cm}^3/\text{s}$ の場合に約 12s であり、それぞれが同じ約 60cm^3 の体積を持っている。

加熱容器の容積は 141cm^3 であり、その中に熱交換率を上げるために金属 (SUS316) の充填材を詰め込んでいる。この約 60cm^3 は加熱容器 300°C 、 141cm^3 の気体が漏えい口 135°C の温度に冷却された時の容積 62cm^3 に相当する。したがって、この一時的な温度上昇は、加熱容器に充満していた空気が試験開始までに十分加熱され暖められ、それがヘリウムガスに押し出されたためであると考えられる。

流量が $1\text{cm}^3/\text{s}$ や $0.4\text{cm}^3/\text{s}$ のように少ない場合は、漏えい開始時からヘリウムガスと空気が十分混合されるため、このような一時的な温度上昇は見られない。

また、漏えい開始後約 500s 間に温度上昇が見られる場所がある。(図 71) これはヘリウムガスが流れることにより、捕集器内にヘリウムガスの流路が発生し、それに伴いフランジ部付近に温度境界層が形成されたことにより、フランジ周辺の熱伝達率が大きくなり結果的にフランジ付近の温度とフランジの温度の差が小さくなつたと考えている。

図 72 および図 73 に漏えい口を基準とした横方向および縦方向の距離と温度の関係を示す。フランジと捕集器側壁の間では、熱は側壁を通して温度の低い捕集器外へ流れるため、温度境界層は側壁の近くにできる。そのため、フランジと捕集器側壁の中間点では捕集器側壁に近い温度になっている。

(4) 漏えいヘリウムガスによる新しい熱平衡形成

図 69～図 71 に示すように漏えい開始前は自然対流熱伝達により成り立っていた熱平衡が、ヘリウムガス漏えいにより強制対流熱伝達になり、新しい熱平衡状態に移行する。この移行に要する時間はヘリウムガスの漏えい量に依存し、漏えい量 $20\text{cm}^3/\text{s}$ の場合は図 69～図 71 の結果から 1 時間程度である。これよりも少ない漏えい量 ($0.4 \sim 5\text{cm}^3/\text{s}$ の範囲) では 1 時間以上かかる。

また、漏えい中に室温が変化すると、熱平衡を保持するために捕集器内部の温度分布も変化するが、熱平衡成立時は各箇所の温度差は変わらない。(図 70) つまり、捕集器内部の系が熱的に安定しているか否かは、捕集器内外の温度差が一定かどうかで判断できる。

(5) ヒータ出力とヘリウムガス漏えい量の関係

ヒータ出力は加熱容器の温度に対し、サイリスタ (SCR) によりフィードバック制御される。各部位の温度が時間的に変わらない定常状態は、熱平衡がとれているということである。したがって、発熱量(ヒータ出力値)=模擬装置からの放熱量、となる。ヘリウムガス漏えいを開始すると、ヘリウムガスの加熱と捕集器内に漏えいしたヘリウムガスが上記の熱平衡状態を崩すため、新しい平衡状態への移行が始まる。

$20\text{cm}^3/\text{s}$ を漏えいさせたときのヒータ出力、ヒータ出口温度および室温を図 74 に示す。定常状態では 270W と一定になっているヒータ出力が、漏えいを開始すると 15W 程度低下して 255W を示している。その後新しい平衡状態に移行する過程があり、 7000s 以上経過した時点では、室温の影響を受けたヒータ出力になっている。

$20\text{cm}^3/\text{s}$ のヘリウムガスを 20°C から 300°C に昇温するのに要する熱量は、

$$\text{密度 } (\rho) = 0.16253 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{比熱 } (C_p) = 5.193 \text{ kJ / (kg·K)}$$

より、4.7J/s (4.7W) となる。

このヒータ出力と漏えい量の関係は、模擬装置全体の熱収支とヘリウムガス漏えい量との関係に相似と考える。ヘリウムガス温度が 100、200、300°C の設定時のものに対して、漏えい量とヒータ出力の関係をまとめたのが表 15 である。光ファイバ温度センサの単体型試験、保温材一体型試験の結果であり、ヘリウムガスの温度に無関係で、漏えい量にのみ依存することが分かった。なお、漏えい量 0.4 および 1.0cm³/s に関しては顕著な変化が見られなかった。

表 15 漏えい開始時のヒータ出力減少値

漏えい量 (cm³/s)	保温材一体型試験			単体型試験		
	100°C	200°C	300°C	100°C	200°C	300°C
5	2	2	4	3	2	3
20	11	12	10	11	12	13

(単位 : W)

このようにヘリウムガスの温度に依存しない関係があれば、光ファイバ温度センサで捕集器内外の熱収支を求めることにより、ターゲットガスの漏えいを検知できると考える。

そのためには、あらかじめ使う捕集器の熱伝達率 h を求めておく必要がある。すなわち、熱量 q 、捕集器の表面積 A 、そして捕集器内外の温度差を T とし、 $q = h \cdot A \cdot T$ より熱量を求めることが可能になる。この熱量は捕集器の熱収支を求めるものである。課題は光ファイバ温度センサによる精度の高い温度を求ることである。熱伝達率 h や表面積 A はあらかじめ実験室にて求めることができるが、温度差 T は現場での確認が必要である。

なお、今回製作した模擬装置の 300°C における熱伝達率 h は、定常状態から求めた放熱量 Q 、表面積 A および室温と装置の表面温度の差 T とすると

$$\text{放熱量 } (Q) = 260\text{W}$$

$$\begin{aligned}\text{表面積 } (A) &= \text{捕集器の表面積 } (A_1) + \text{加熱容器の表面積 } (A_2) \\ &= (35.3 + 29.6) \times 10^{-2} \text{ (m}^2\text{)}\end{aligned}$$

$$\text{捕集器と室温の差 } (T_1) = 50 - 27 = 23 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$\text{加熱容器と室温の差 } (T_2) = 66 - 27 = 39 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$h = Q / (A_1 \times T_1 + A_2 \times T_2)$$

より、約 13W/(m²·K) であった。

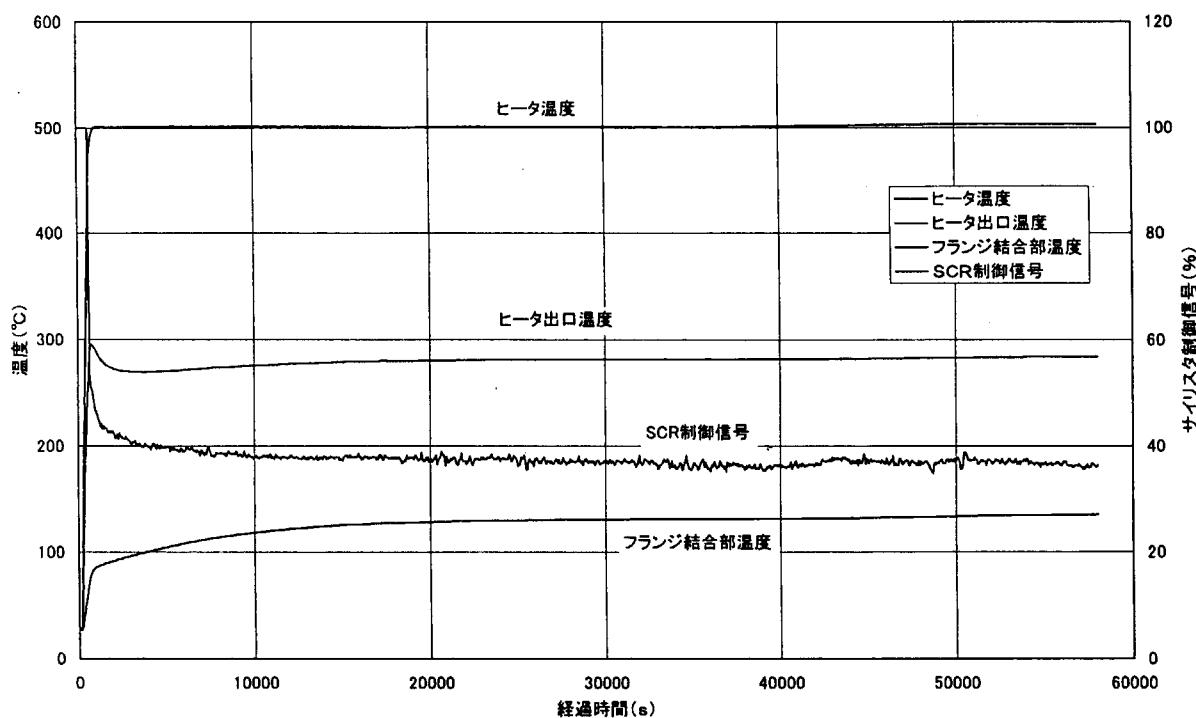


図 67 定常状態まで加熱時の温度分布

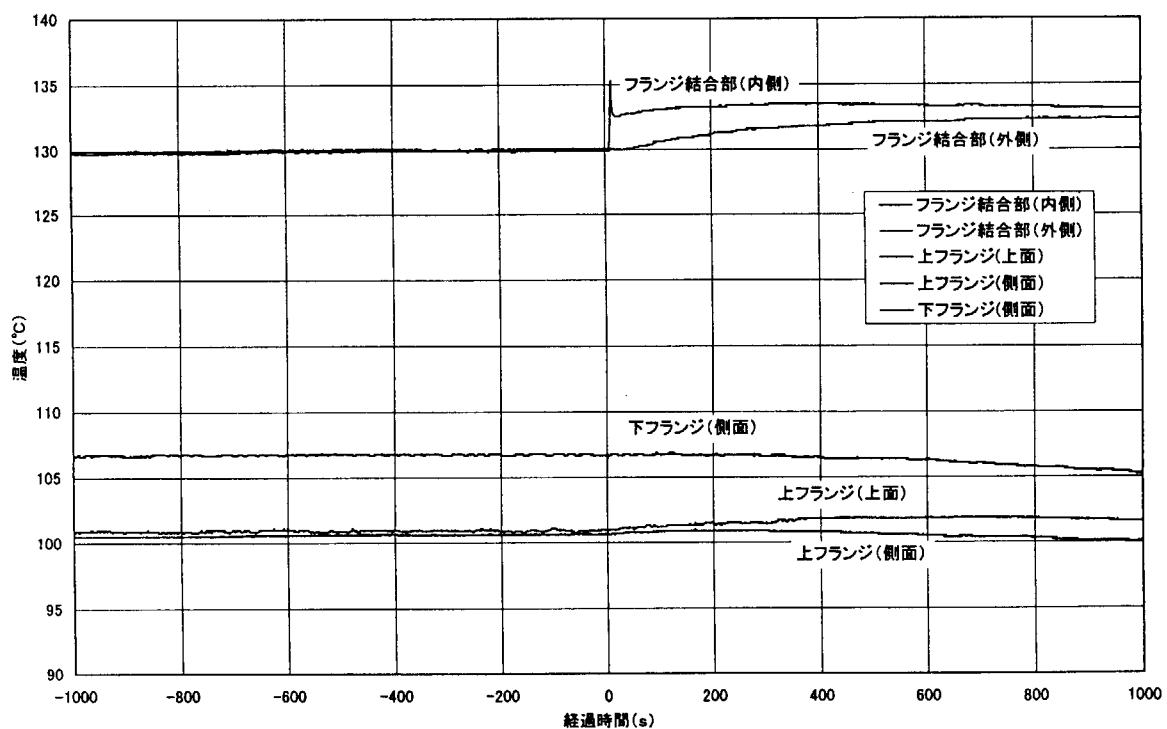


図 68 激しい開始前後の各部位温度分布(1)

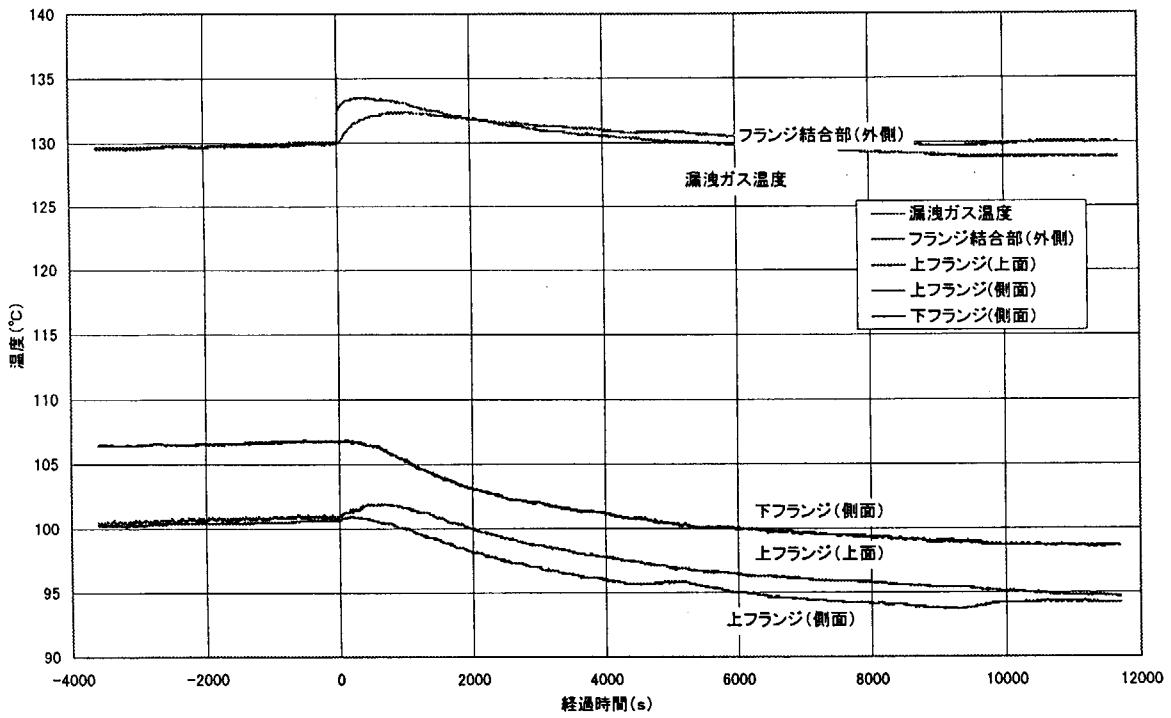


図 69 漏えい開始前後の各部位温度分布(2)

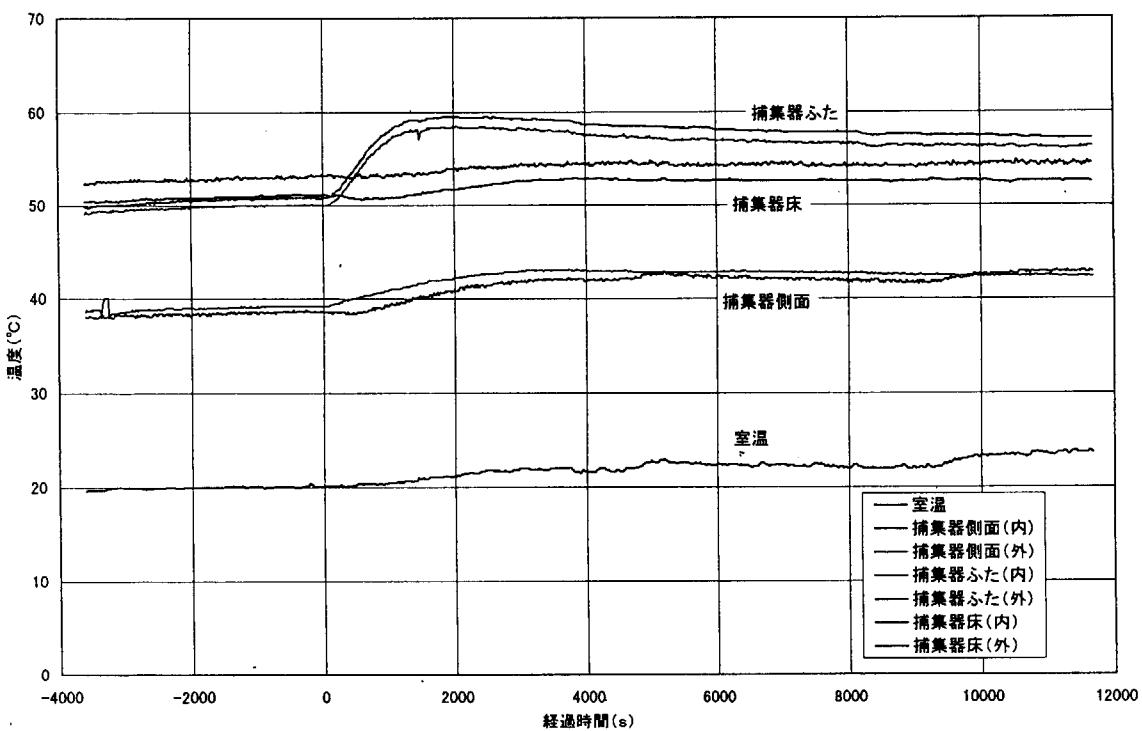


図 70 捕集器表面と室温の温度分布

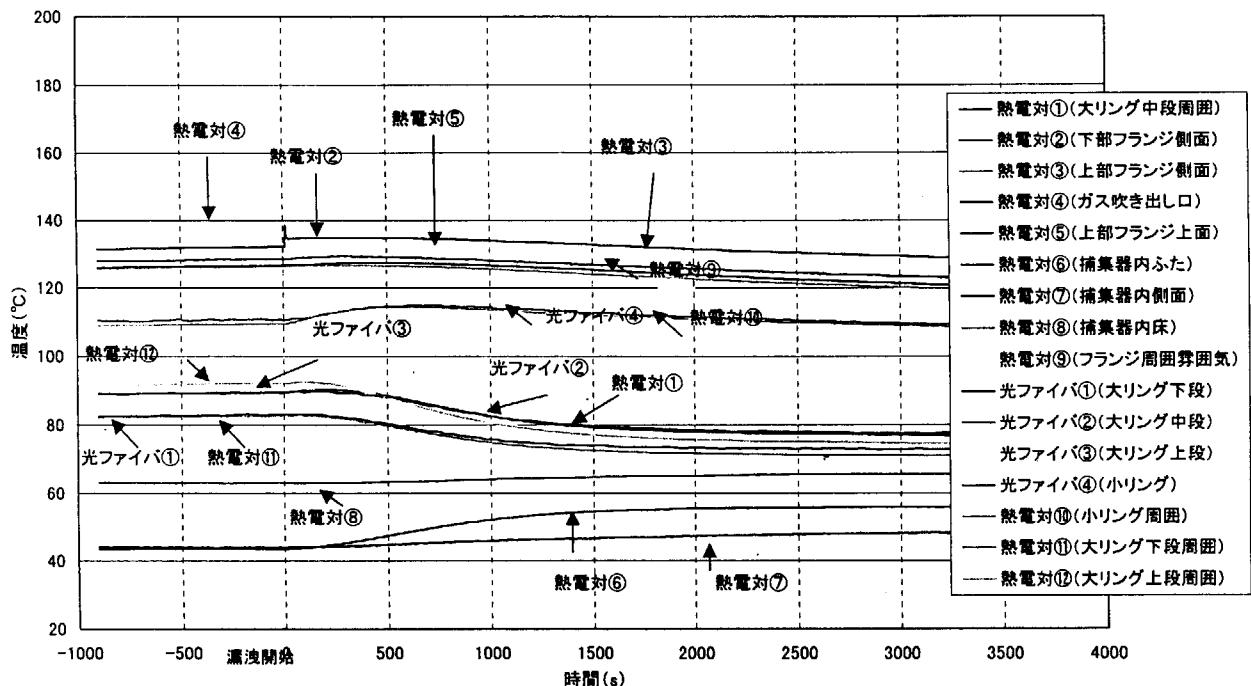


図 71 光ファイバ温度計測結果（単体型）（ヒータ出口設定温度 300°C、ヘリウム流量 20.0cm³/s）

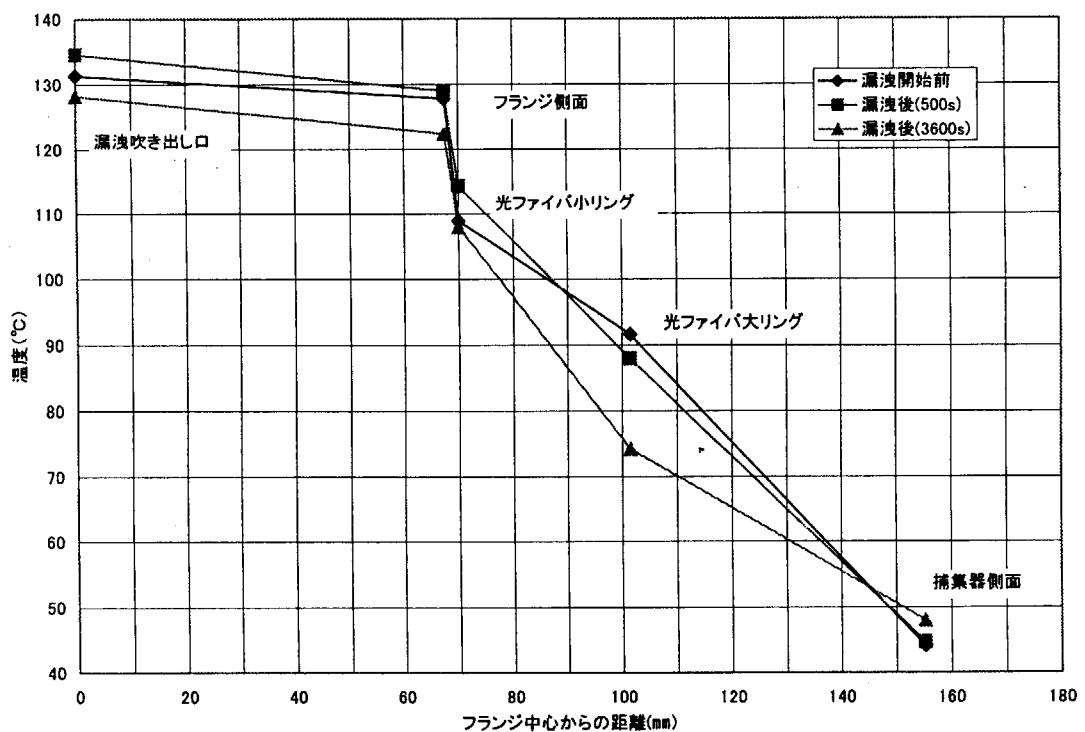


図 72 捕集器横方向の温度分布

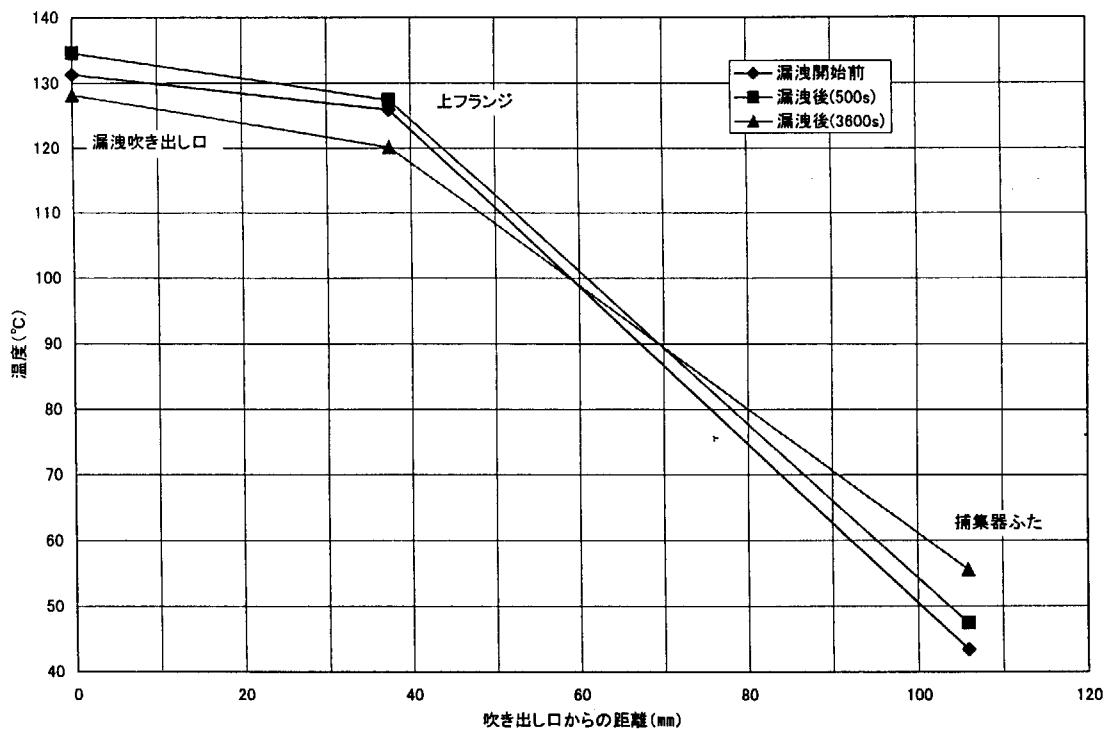


図 73 捕集器横方向の温度分布

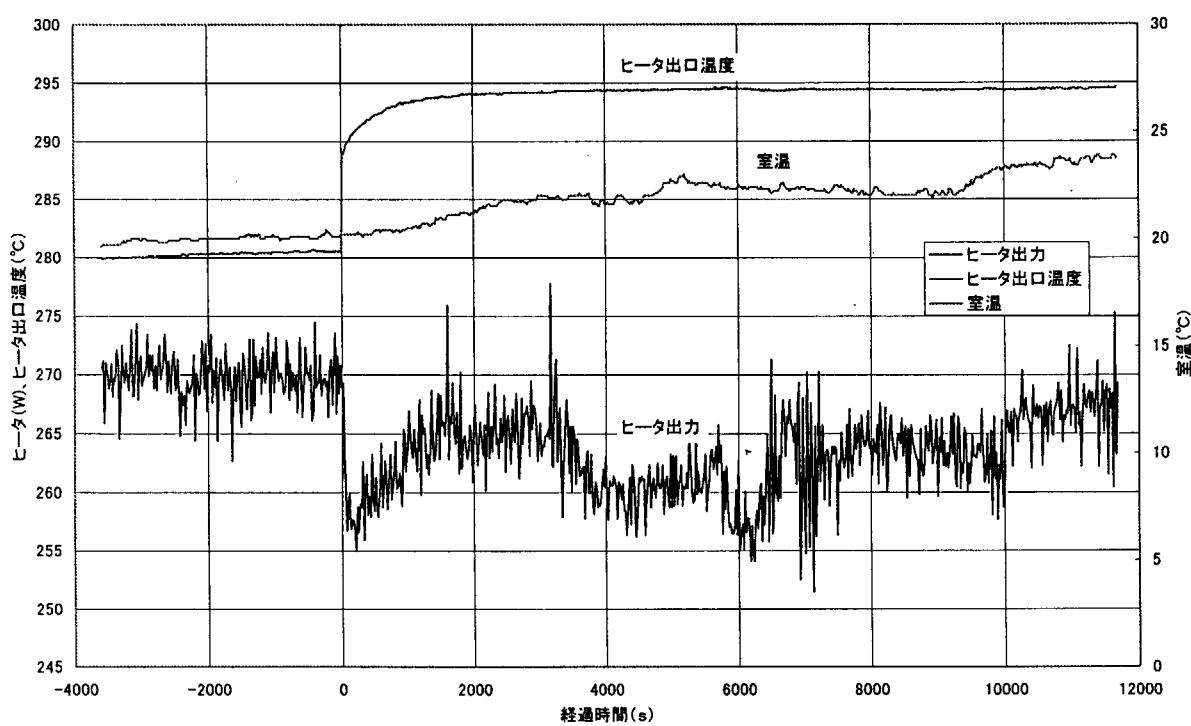


図 74 ヒータ出力とヘリウム温度

2.6 評価

2.6.1 漏えい検知技術の開発

以下に開発した光ファイバ温度センサによるヘリウムガス漏えい検知技術についてまとめる。

(1) 保温材一体型温度センサ

高温で多い漏えい量 ($20\text{cm}^3/\text{s}$ 以上) では、漏えい直後に 3°C (光ファイバの温度精度) 以上の温度上昇を検知し、これより、60min 以内に漏えい検知可能である見通しを得た。

低温で少ない漏えい量 ($1.0\text{cm}^3/\text{s}$ 以下) では、ほとんど温度変化は見られず漏えい検知には、2h 以上要する。

(2) 単体型温度センサ

高温で多い漏えい量において、漏えい後、温度が減少する傾向を示した。本傾向は保温材一体型温度センサとは異なる。これは、漏えいにより捕集器内の雰囲気温度が均一化されたものを検知した結果であると考えられる。条件温度 300°C 、流量 $20\text{cm}^3/\text{s}$ では約 10°C 減少し、高温で多い漏えい量では 60min 以内に漏えい検知可能である見通しを得た。低温で少ない漏えい量では、ほとんど温度変化は見られず漏えい検知には、2 h 以上要する可能性を得た。以上より実機において、保温材一体型温度センサは急激な温度上昇を検知することにより突発的な漏えいを検知し、単体型温度センサは捕集器内雰囲気温度の減少を検知することで、継続的な漏えいの検知が可能である。

(3) 今後の課題

実施した試験においては、フランジのガスケット部からの漏えいを模擬したが、今後、フランジの径に対する最適な捕集器の大きさ等の検討が必要である。

2.6.2 絶対温度による漏えい量算出モデル

光ファイバ温度センサによる漏えい量算出のため、2.3 および 2.4 項に示した漏えい模擬試験結果より、モデル式の導出を検討する。

まず、漏えい量の違いおよびヘリウムガス温度の違いによる光ファイバ温度センサの温度傾向は、図 75～図 77 に示す漏えい 60min 後の光ファイバ温度センサの温度に顕著に現れる。図 75～図 77 はヘリウムガス漏えい 60min 後の光ファイバ温度センサの温度を横軸に流量、縦軸に温度としてプロットしたものである。これによると $100\sim300^\circ\text{C}$ の温度で、漏えい量が増加するに従い、光ファイバ温度センサの温度が減少する傾向がある。これは、漏えい後のヘリウムガスによる強制対流により、捕集器内温度が均一化される傾向を示していると考える。さらに、各データの近似直線（最小二乗法により算出）の傾きは各温度内でほぼ一定であり、また高温 (300°C) ほどその値は大きくなる。また、単体型温度センサの高さが異なる 3 つの温度センサ（大リング下段、中段、上段）の近似直線は、傾きはほぼ同じであるが、切片（温度）がやはり温度に依存する傾向が有る。

以上より、傾き、切片はヘリウムガス温度に依存すると考えられ、よって、図中の近似直線は以下のように一般化することができる。

$$Y = f(T_0) \ln(X) + g(T_0) \quad (1)$$

ここで、 Y ：捕集器内温度（°C）、 X ：漏えい量（cm³/s）、 T_0 ：ヘリウムガス温度（°C）

(1) 傾き $f(T_0)$ について

(1)式より、傾き $f(T_0)$ はヘリウムガス温度の関数である。ここで、100°C、200°C、300°Cにおけるヘリウムガス温度は、図 49～図 60 より、約 45°C、95°C、135°Cである（熱電対④吹き出し口温度参照）。そこで、ヘリウムガス温度と図 75～図 77 の近似直線の傾きとの関係を図 78 に示す。

傾き $f(T_0)$ の回帰分析には、PEASON の積率相関係数 R を用い、R-2 乗値により、近似直線を決定した。表 16 に R-2 乗値を示す。

表 16 傾き $f(T_0)$ の積率相関係数

No.	温度センサ名称	線形近似	多項式近似 (2次)	対数近似
1	単体型大リング下段	0.7930	0.9997	0.9458
2	単体型大リング中段	0.8509	0.9991	0.9587
3	単体型大リング上段	0.8738	0.9965	0.9725
4	単体型小リング	0.8551	0.9993	0.9585
5	保温材一体型	-0.4839	-0.2777	0.0272

表 16 の結果より、図 78 の近似曲線の傾きは、 A_1 、 A_2 を定数として、

$$f(T_0) = A_1 T_0^2 + A_2 T_0 \quad (2)$$

で示される。図 75～図 77 より保温材一体型温度センサおよび単体型温度センサの定数 A_1 、 A_2 を表 17 に示す。

表 17 漏えい量算出モデル式の傾きの係数

No.	温度センサ名称	A_1 値	A_2 値
1	単体型大リング下段	-0.0002	0.0019
2	単体型大リング中段	-0.0002	-0.0041
3	単体型大リング上段	-0.0002	-0.0094
4	単体型小リング	-0.00007	-0.0018
5	保温材一体型	-0.00002	0.0058

(2) 切片 $g(T_0)$ について

(1)式より、切片 $g(T_0)$ もまたヘリウムガス温度の関数である。図 78 と同様に、ヘリウムガス温度と切片 $g(T_0)$ の関係を図 79 に示す。切片 $g(T_0)$ の回帰分析には、PEASON の積率相関係数 R を用い、R-2 乗値により、近似直線を決定した。表 18 に R-2 乗値を示す。

表 18 切片 $g(T_0)$ の積率相関係数

No.	温度センサ名称	線形近似	多項式近似 (2次)	対数近似	指数近似
1	単体型大リング下段	0.9980	0.9911	0.9714	0.9965
2	単体型大リング中段	0.9790	0.9932	0.9714	0.9960
3	単体型大リング上段	0.9808	0.9937	0.9717	0.9957
4	単体型小リング	0.9942	0.9969	0.9733	0.9940
5	保温材一体型	0.9941	0.9972	0.9744	0.9934

表 18 の結果より、図 79 の切片 $g(T_0)$ とヘリウムガス温度 T_0 との関係は、 B_1 、 B_2 を定数として、

$$g(T_0) = B_1 e^{B_2 T_0} \quad (3)$$

で示される。図 75～図 77 より保温材一体型温度センサおよび単体型温度センサの定数 A_1 、 A_2 を以下に示す。

表 19 漏えい量算出モデル式の切片の係数

No.	温度センサ名称	B_1 値	B_2 値
1	単体型大リング下段	23.853	0.0019
2	単体型大リング中段	24.681	0.0095
3	単体型大リング上段	25.057	0.0096
4	単体型小リング	28.881	0.0103
5	保温材一体型	26.264	0.0103

(2)式および(3)式を(1)式に代入すると、

$$Y = (A_1 T_0^2 + A_2 T_0) \ln(X) + B_1 e^{B_2 T_0} \quad (4)$$

Y : 捕集器内温度 (°C), X : 漏えい量 (cm³/s), T_0 : ヘリウムガス温度 (°C)
となる。

(4)式は、導出された漏えい量算出モデル式（実験式）である。(4)式により、温度センサ設置対象機器（配管）に流れるヘリウムガス温度 (T_0) がわかれば、光ファイバ温度センサによる測定温度 (Y) により、漏えい量 (X) を推定することが可能である。

表 17 の単体型 A (大リング上中下) の定数 A_1 は等しくなり、良く似た形状となった。なお、 A_1 値、 A_2 値の差は、漏えい箇所（ガスケット部）に対する各温度センサ設置箇所の高さの差に起因するものと考えている。

一方、同じ高さに設置している、表 19 の単体型 A (大リング中段) と単体型 B (小リング) の B_1 値、 B_2 値の差は漏えい箇所に対するフランジ水平方向の差に起因するものと考えられ、いずれも漏えい箇所からの距離の違いに起因するものであると考える。

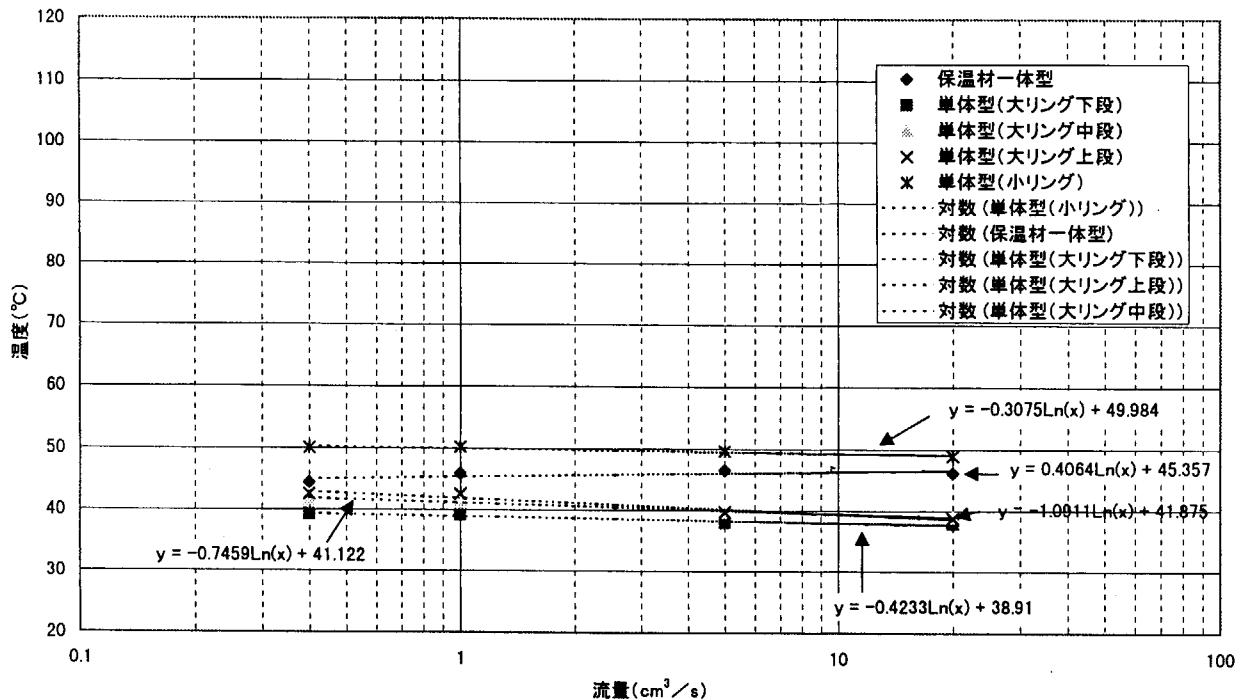


図 75 激えい 60min 後の光ファイバ温度センサ温度 (設定温度 100°C)

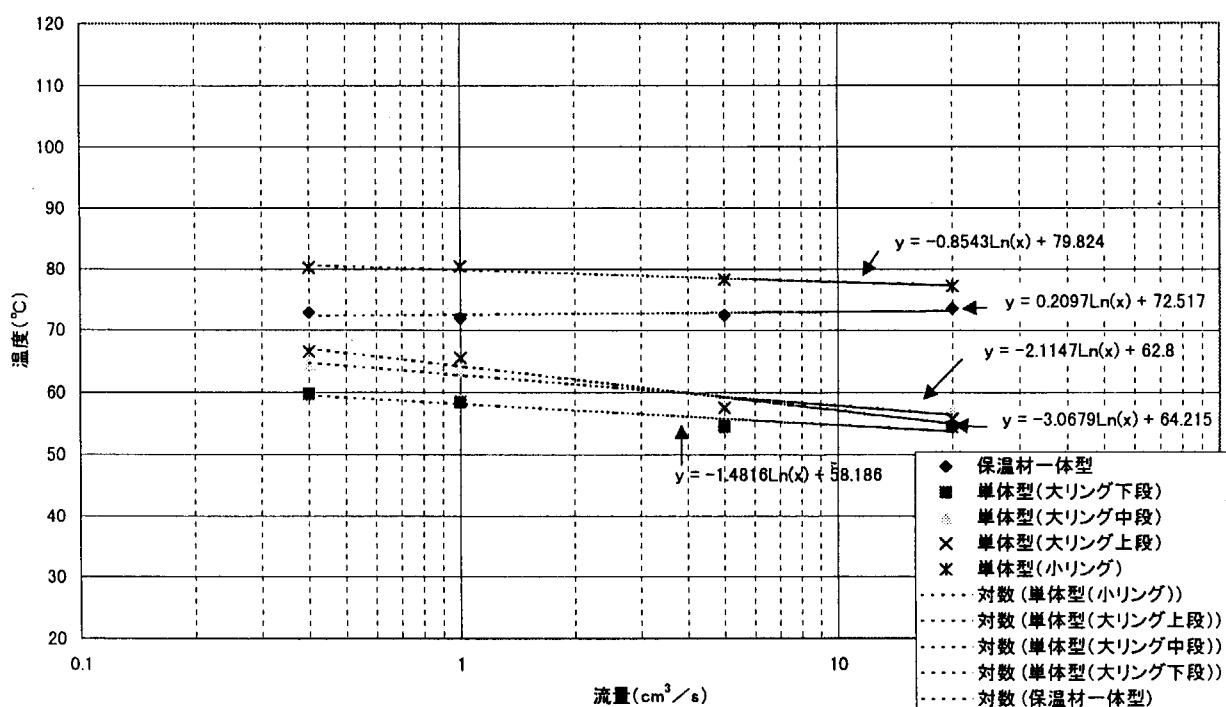


図 76 激えい 60min 後の光ファイバ温度センサ温度 (設定温度 200°C)

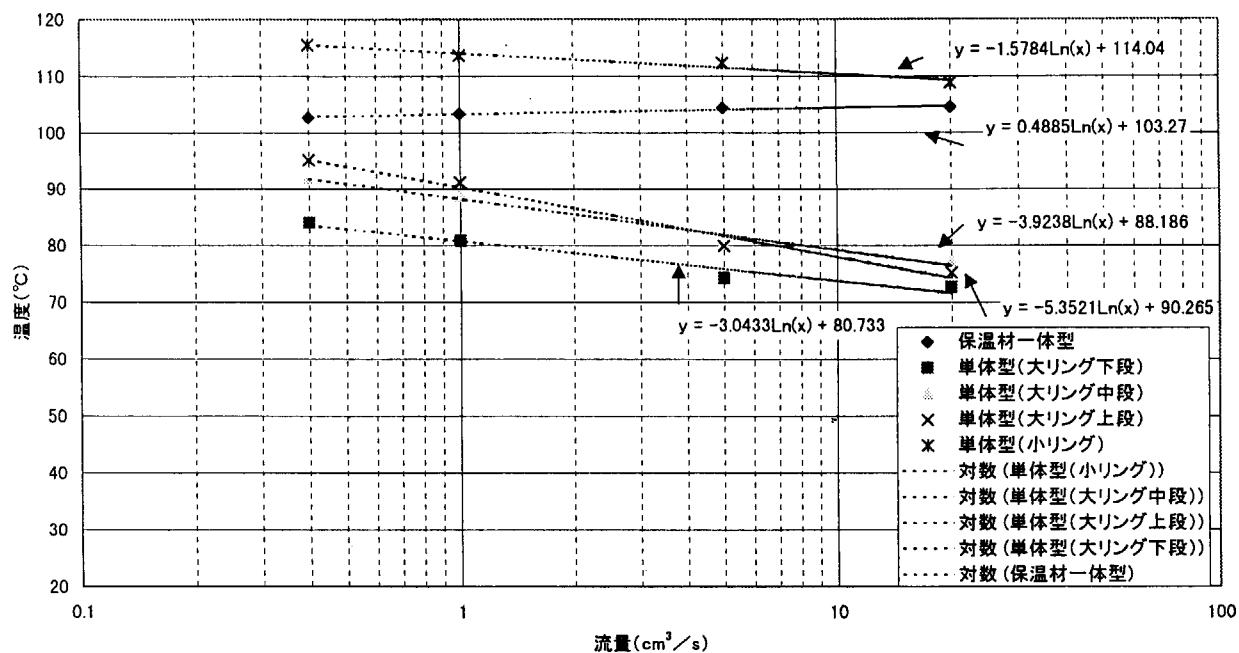


図 77 満えい 60min 後の光ファイバ温度センサ温度 (設定温度 300°C)

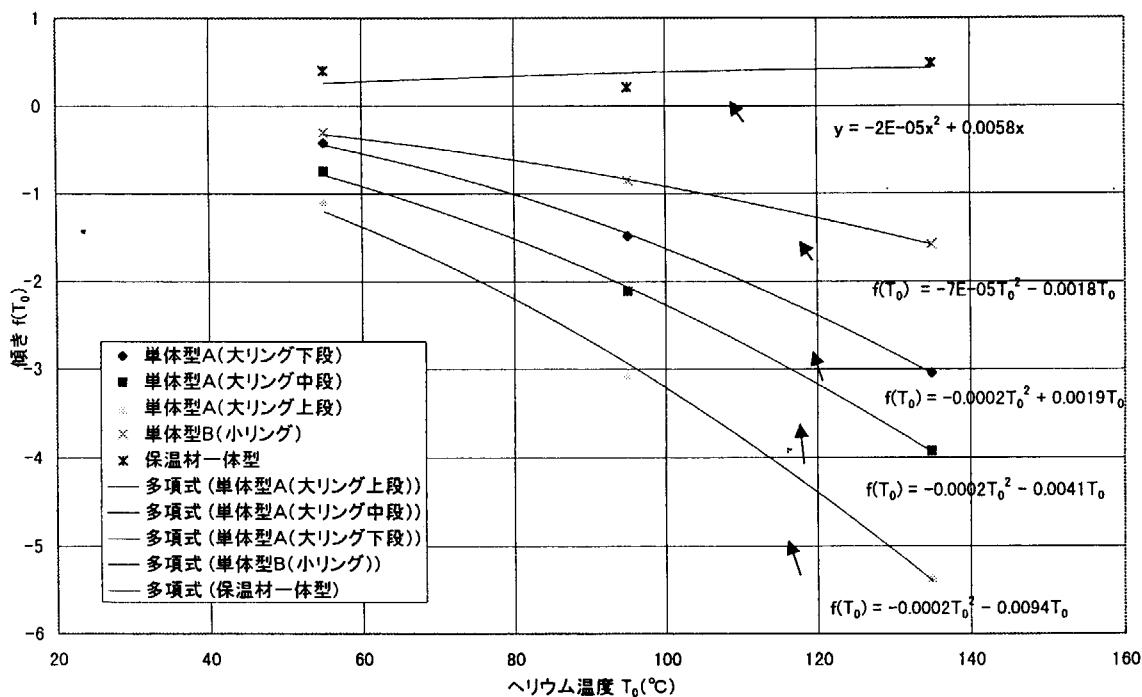


図 78 近似直線の傾き

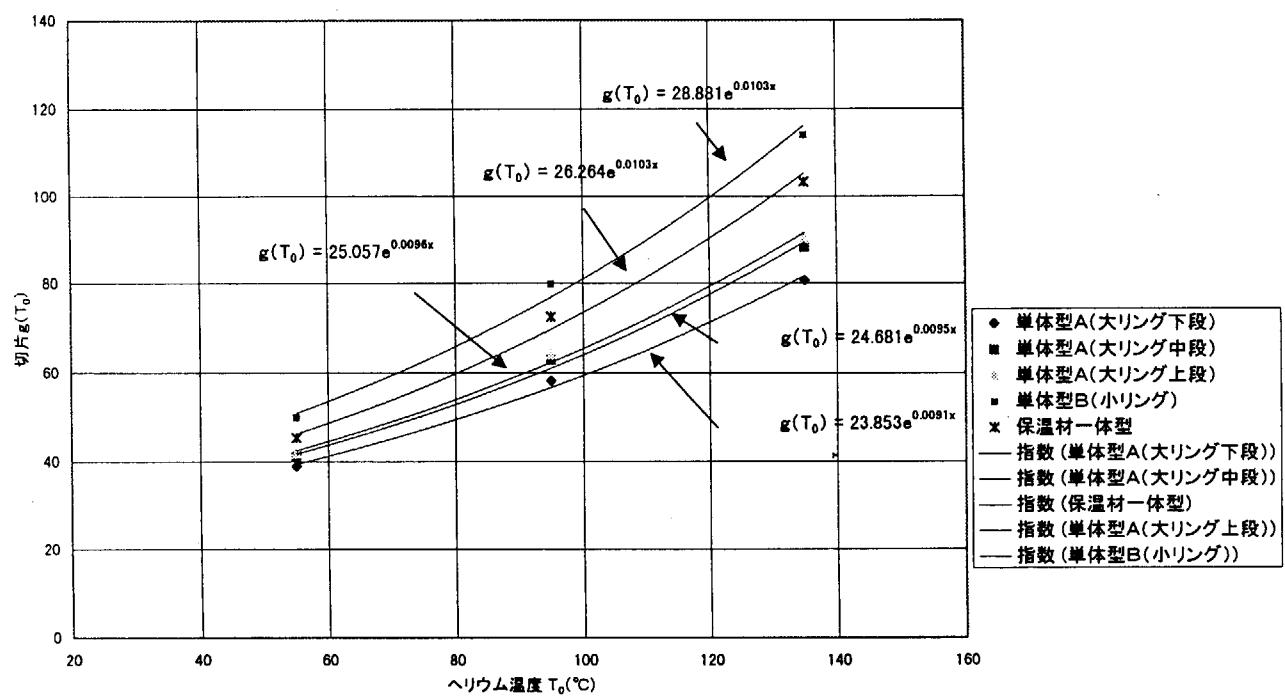


図 79 近似直線の切片

3. 結言

高温ヘリウム漏えい箇所特定システムの開発として、光ファイバ温度センサによる HTTR への適応性を検討した。

流量が $0.2 \sim 20\text{cm}^3/\text{s}$ の範囲で調節可能な、漏えい模擬試験装置を作成し実施した予備試験の結果、 300°C 、 $20\text{cm}^3/\text{s}$ でヘリウムガス出口温度は約 300°C 、 $0.2\text{ cm}^3/\text{s}$ では約 280°C に達することを確認した。また、 300°C 、 $20\text{cm}^3/\text{s}$ の条件下で雰囲気温度上昇を検知した。

光ファイバ温度センサによる漏えい検出時間の目標は 2 時間と設定した。光ファイバ温度センサのみによる単体型のタイプの検知器に加えて、HTTR の高温機器からの漏えい検知のため、光ファイバ温度センサを保温材に組み込んだ保温材一体型の検知器を試作した。

試験の結果、漏えい量が $5.0 \sim 20.0\text{cm}^3/\text{s}$ では、60 分以内に漏えいを検知し、特に $20.0\text{cm}^3/\text{s}$ の漏えいでは、より早い漏えい検知が可能であった。また、漏えい量が $0.1 \sim 1.0\text{ cm}^3/\text{s}$ では、漏えい検知に 2 時間以上を要した。

なお本研究は、2000 年度の日本原子力発電㈱との共同研究「高温ヘリウム漏えい箇所特定システムの開発」として実施されたものである。

謝辞

本 R&D の実施にあたり、貴重なご助言を頂いた日本原子力研究所大洗研究所長（前高温工学試験研究炉開発部長）馬場治氏、研究主幹（前同部次長）大久保実氏に深く感謝いたします。本報をまとめるにあたり貴重なご助言を頂いた、同部長藤川正剛氏、同部次長林秀行氏、HTTR 技術開発室長伊与久達夫氏に感謝いたします。査読いただいた核熱利用研究部主任研究員石原正博氏に感謝いたします。また本調査の実施にあたりご尽力頂いた、㈱日立製作所古内博氏および浅野保氏に深謝いたします。

参考文献

- (1) 原研：“日本原子力研究所大洗研究所設置許可申請書「HTTR（高温工学試験研究炉）原子炉施設の設置」”(1989).
- (2) 斎藤伸三他：“高温工学試験研究炉の設計と研究開発”,原子力誌,32[9],847-871(1990).
- (3) 坂場成昭他:JAERI-Review 2002-041, “高温ヘリウム漏えい箇所特定システムの開発（共同研究）第 1 報 漏えい事故事例およびガス漏えい検知技術の調査”(2002).

付録 HTTR におけるセンサの設置場所の検討

1. 概要

高温ヘリウム漏えい検知を精度よく行うために、漏えい監視を適用すべき機器を検討し、具体的な検出器の設置場所等を検討した。検討の結果適用すべき機器として、ヘリウム系主要部であるスタンドパイプ、30/20MW切替バルブ、ヘリウム循環機フィルタおよび1次ヘリウム純化設備を選んだ。さらに、これら機器に設置されている設計条件（温度計の設計条件、機器の設計仕様、構造等）を考慮して、漏えいする可能性が高いと考えられる部位を選択した。また、本システムの設置場所を特定するために漏えいの可能性が高いと考えられる部位について、出力上昇試験時に、温度を実測した。以上の検討を踏まえて、光ファイバによる高温ヘリウム漏えい検知システムの HTTR への適用可能性について検討・評価し、最適と考えられる設置箇所および設置数を提案する。

2. 漏えい確認対象機器の検討

高温ヘリウム漏えい箇所特定システムによる高精度の漏えい監視を行うために、まず、漏えい対象機器を検討し、さらに機器の計測条件、構造および設置数などを調査べた。付図 2.1 に HTTR 原子炉冷却設備の系統図を示す。概略検討の結果、漏えい監視対象設備は点線の橢円で囲んだ設備の中から選定することとした。

2.1 監視対象機器

ヘリウムガスの漏えい監視箇所として、溶接以外の接合部を対象とし、以下の(1)から(4)を選定した。

(1) スタンドパイプクロージャ

スタンドパイプクロージャは原子炉上部のスタンドパイプ室に設置されており、制御棒用や燃料交換用など使用頻度が高い機器である。ヘリウムガスはクロージャの D リング部からの漏えいが大きいと考えられる。

(2) 30/20MW切替バルブ

30/20MW切替バルブは1次加圧水冷却器ガス循環機回りシステムに設置されている手動のグローブ弁である。ヘリウムガスは以下の箇所からの漏えいが大きいと考えられる。

- 熱腐食が考えられるガスケット部
- 热腐食や駆動部の摩耗による劣化が考えられるグランドパッキン部

(3) ヘリウム循環機フィルタ

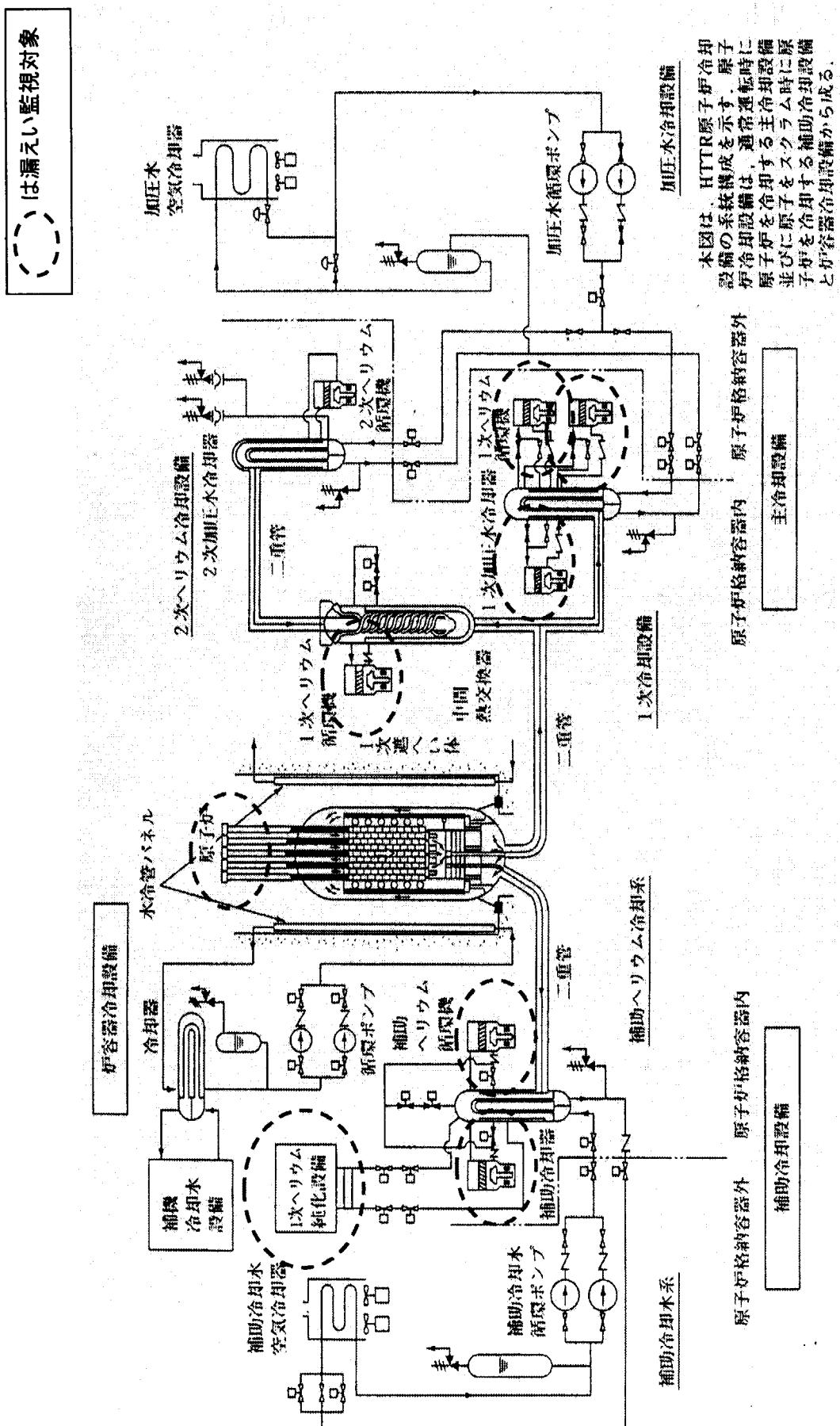
ヘリウム循環機フィルタはフィルタ取付部がフランジ構造となっており、ヘリウムガスの漏えいポテンシャルが高いと考えられる部位である。ヘリウムガスはフィルタ取付部からの漏えいが大きいと考えられる。

(4) 1次ヘリウム純化設備

1次ヘリウム純化設備は主にサービスエリア内に配置され、ヘリウムガスを純化し、再び1次系へ戻す。ヘリウムガスは下記の箇所からの漏えいが大きいと考えられる。

- 接続端がフランジ形のラプチャディスク安全弁
- 入口フィルタ、ガス循環機用フィルタ、酸化銅反応筒のフランジ
(モレキュラーシーブトラップおよびコールドチャコールトラップエリアは配置上隔離された部屋に設置されているため、本検討の対象外とした。)

以上について、温度条件確認のため、対象機器の設計条件、対象機器の構造および設置数、ならびに温度計の設計条件を確認する。対象機器の設計条件としては、対象機器の設計上の最高使用温度および使用上想定されている最大温度を、対象機器の構造および設置数としては、最も漏えいが高いと考えられる部位の構造、大きさおよび設置数を、温度計の設計条件としては、対象機器の近傍に設置されている既設の温度計の設計条件、使用温度範囲および計算機への入力の有無を確認する。



2.2 検討結果

温度計や対象機器の設計条件(最高使用温度および使用温度)および計算機入力有無を付表2.3に示す。対象機器の雰囲気温度、放射線量および漏えいポテンシャルの高い部位の寸法および設置数を付表2.4に示す。

(1) スタンドパイプクロージャ

スタンドパイプクロージャは原子炉上部のスタンドパイプ室に31本が設置されている。

- 配管の温度

スタンドパイプには温度計が3点設置されており、計算機に伝送されている。温度計の最高使用温度は150°Cである。

- 対象機器の温度

スタンドパイプの最高使用温度は150°Cである。

- 対象機器の構造

31本のスタンドパイプクロージャの配置構造を確認し寸法を把握した。スタンドパイプは使用目的により、9種類に区分され、さらにスタンドパイプ室に放射状に配置されている。Dリングの径は最大約500mmである。

なお、本システムを敷設する場合には、作業スペースの確保が必要不可欠であり、温度計や放射線量計を設置するスタンドパイプの選定、温度計および放射線量計の設置方法を十分に検討する必要がある。スタンドパイプ室から原子炉格納容器内への予備スリーブを用いて、計測線をスタンドパイプ室外へ出すのが有効な方法の一つになると考えられる。

(2) 30/20MW切替バルブ

- 配管の温度

3系統からなる1次加圧水冷却器循環機廻りの配管温度計は、6点計算機に伝送されている。配管温度計の設計条件は、最大温度430°C、使用温度390°Cである。

- 対象機器の温度

30MW除熱用止め弁および20MW除熱用止め弁の設計条件は最大温度430°C、使用温度は390°Cである。

- 対象機器の構造

30MW除熱用止め弁にはガスケットおよびパッキンが1個ずつ、20MW除熱用止め弁にはガスケットが2個ならびにパッキンが1個の計3個が装着されている。

(3) ヘリウム循環機フィルタ取付部

ヘリウム循環機フィルタは、1次加圧水冷却器に3機、中間熱交換機に1機、補助ヘリウム循環機に2機、2次加圧水冷却器に1機、計7機設置されている。

- 配管の温度

各循環機の入口側配管温度は、1次加圧水冷却器用ヘリウム循環機入口温度など7機のフィルタ全てに温度計が設置され、データは伝送されている。温度計の設計温度は430°C、

使用温度 390°Cである。

- 対象機器の温度

最高使用温度は 430°Cである。

- 対象機器の構造

ヘリウム循環機フィルタの寸法は、外径 813mm、内径 753mm、全長 2060mm である。

(4) 1次ヘリウム純化設備

1次ヘリウム純化設備内の全ての弁型式、接続端の形状を調査した。その結果、弁 318 基のうち、ゲート型やグローブ型は全て溶接されており、漏えいの可能性は少ない。これ以外の接続端がフランジ形のラプチャディスク（4基）および安全弁（8基）を測定対象とする。また、弁以外にフランジを使用している入口フィルタ、ガス循環機用フィルタ、酸化銅反応筒を対象とする。なお、モレキュラーシーブトラップおよびコールドチャコールトラップは配置上の理由から対象外とする。

- 配管の温度

ラプチャディスク 4 基のうち 2 基および安全弁 8 基のうち 2 基に、温度計が設置されており、計算機に伝送されている。1 基のラプチャディスク、3 基の安全弁には、付近に温度計が設置されていないため、付近の差圧計や圧力計の設計温度より配管温度を推定した。さらに、1 基の安全弁には、差圧計あるいは圧力計が設置されていないため、設計仕様をもとに温度を推定した。また、1次ヘリウム純化設備内には加熱器および冷却器など、それぞれの使用目的に応じて温度が定められており、その範囲は、12.5°C～365°Cと幅がある。

- 対象機器の温度

ラプチャディスク、安全弁、入口フィルタなど、最高温度が 60～400°Cと目的に応じて定められている。

- 対象機器の構造

将来実機へ温度センサを設置する場合には、1次ヘリウム純化設備には 322 台の機器があるため、全てに設置することは現実的ではない。また、設置にあたっては、定期検査のスペースを確保するなど、配置上干渉しないように考慮する必要がある。これらを総合的に判断して、設置場所、設置方法等を定める必要がある。

付表 2.1 対象漏えい機器の計測条件 (1)

No	対象機器 (TAGNO)	対象機器 温度設計条件 (°C)		既存設置 温度計 信号名	計算機入力 の有無	既存設置 温度計 設計条件 (°C)		参照図面
		最高温度	使用温度			最高温度	使用温度	
1	スタンドバイクロージャ							G11-1322F-101
	(制御棒 (A) 型)	150	~150	スタンドバイワット温度1	有	150	—	G27-2416F-101
	(制御棒用 (B) 型)	150	~150	スタンドバイワット温度2	有	150	—	
	(燃料交換用 (A) 型)	150	~150	スタンドバイワット温度3	有	150	—	
	(燃料交換用 (B) 型)	150	~150					
	(点検用 (D5) 型)	150	~150					
	(サーベンス用 (D4) 型)	150	~150					
	(照射用 (D2) 型)	150	~150					
	(中性子検出用 (D1) 型)	150	~150					
	(照射用 (C) 型)	150	~150					
2	30/20MW切替バルブ							
	(133V1A)	430	390	一次PWC単独運転配管 (A) 入口温度	有	430	390	G13-1338M-101
	(133V1B)	430	390	一次PWC単独運転配管 (B) 入口温度	有	430	390	G27-2421M-101
	(133V1C)	430	390	一次PWC単独運転配管 (C) 入口温度	有	430	390	
	(133V3A)	430	390	一次PWC並列運転配管 (A) 入口温度	有	430	390	
	(133V3B)	430	390	一次PWC並列運転配管 (B) 入口温度	有	430	390	
	(133V3C)	430	390	一次PWC並列運転配管 (C) 入口温度	有	430	390	
3	ヘリウム循環器							
	フィルタ							D33-1333M-101
	(1330FL1A～1C)	430	—	1次PWCヘリウム循環器A入口温度	有	430	390	
	(1330FL2)	430	—	1次PWCヘリウム循環器B入口温度	有	430	390	G27-2421M-101
	(1411FL1A～1B)	—	—	1次PWCヘリウム循環器C入口温度	有	430	390	G27-2424F-101
	(1340FL1)	—	—	中間熱交換器ヘリウム循環器入口温度	有	430	390	G27-2422M-101
				補助ヘリウム循環器A入口温度	有	430	395以下	
				補助ヘリウム循環器B入口温度	有	430	395以下	
				2次PWC出口ヘリウム温度	有	350	279	

付表 2.2 対象編成機器の計測条件(2)

No	対象機器 (TAGNO)	対象機器温度設計条件 (°C)			既存設置温度計信号名	計算機入力 の有無	既存設置温度計 設計条件(°C)		参照図面
		最高温度	使用温度	最高温度			最高温度	使用温度	
4.1次純化設備 ラブチャティスク	(161VR1)	400	280	入口加熱器出口温度	有	300	280	G13-1610M-101	
	(161VR11)	400	350	戻り加熱機出口温度	有	400	365		
	(161VR15)	400	280	再生系加熱器出口温度	無	350	170~300	NO2-1611M-109	
	(161VR17)	60	常温	再生系充填Heライン 安全弁入口圧力	無	60	—		
	安全弁							G11-2431M-101	
	(161VR2)	400	常温	入口加熱器出口温度	有	300	280		
	(161VR12)	400	常温	戻り加熱機出口温度	有	400	365		
	(161VR16)	400	常温	再生系加熱器出口温度	無	350	170~300		
	(161VR18)	60	常温	再生系充填Heライン 安全弁入口圧力	無	60	—		
	(161VR19)	60	15	再生系冷却器出口温度	無	60	15		
再生系酸素ガス供給圧力	(161VR20)	60	常温	再生系酸素ガス供給圧力	無	60	—		
	(161VR50)	60	常温	膨張タンク圧力	無	60	—		
	(161VR51)	60	12	なし	無	—	—		
	入ロフィルタ	—	—	入ロフィルタ差圧	無	150	—		
ガス循環器用フィルタ	(161FL1)	—	—						
	(161FL6)	60	12.5	ガス循環器入口温度	有	60	12.5		
酸化銅反応筒	(161TR2A~B)	—	—	酸化銅反応筒(A)入口温度	有	300	200~300		

付表 2.3 対象機器の計測条件調査(3)

No.	設備	対象環境	重点温かい監視部位	温かい対象機器	径 [mm]	実機設置数(台)	参考図面
1	スタンダパイプ クロージャ	温度 雰囲気温度	0.リシング 及びクロージャ 周開	制御塞 (A)型 制御塞用(B)型	504.65 444.65	7 9	D33-1322F-101
	放射線量	原子炉運転中 原子炉停止時	60 μ Sv/h 以下	燃料交換用(A)型 燃料交換用(B)型	504.65 444.65	1 1	
				点検用 (D5)型	349.65	2	
				サベシス用 (D4)型	349.65	3	
				照射用 (D2)型	349.65	2	
				中性子検出用(D1)型	349.65	3	
				照射用(C)型	424.65	3	
				—	—	31	
	小計	—	—	—	—	—	613-1338W-102
2	3.0/20MW 切替バルブ	温度 雰囲気温度	①ガスケット ②バッキン	30MW 除熱用止め弁 ガスケット バッキン	297 88	3 3	
		20~30°C		20MW 除熱用止め弁	—	—	
				ガスケット 29a	297	3	
				ガスケット 29b	340	3	
				バッキン	88	3	
				—	—	15	
	小計	—	—	—	—	—	
3	ヘリウム循環機 フィルタ取付け部	温度 雰囲気温度	フィルタ上部 フランジの ガスケット部	1次加圧水冷却器 1次ヘリウム循環機用 中間熱交換器 1次ヘリウム循環機用	外溝 813 内溝 733 外溝 813 内溝 733	3 3 3 1	H01-1330M-101 H01-1411F-101 H01-1340M-001
		20~30°C		補助冷却器	—	2	
				2次加圧水冷却器	—	1	
				2次ヘリウム循環機用	—	1	
				補助ヘリウム循環機用	—	7	
				ラブチャティスク	3/4B	6	G13-1610M-101
				安全弁	1/2, 1, 1/2B	12	G13-1610M-102
				チエック弁	—	23	
				クローブ弁 (手動)	—	188	
				クローブ弁 (空気作動)	—	71	
				ゲート弁	—	6	
				ニードル弁	—	1	
				三方弁	—	2	
				電磁弁	—	9	
				入口フィルタ	—	1	N02-1611M-109
				フランジの ガス循環器用フィルタ	—	1	
				③絶縁鋼反応筒	—	2	
				小計	—	322	
	5 指定対象の台数(合計)	—	—	合計	—	375	

3. 検出器の設置箇所および設置数の検討

漏えい確認対象箇所の温度および放射線量（あるいは放射線量率）などの物理量計測方法を調べ、HTTR の実測温度等（以下、プロセスデータという）から検出器の設置箇所および設置数を検討する。

3.1 漏えい確認対象箇所の環境

HTTR の出力上昇試験（出力 50% および 60% の単独運転および並列運転）時に、実測された運転中プロセスデータから、測定された温度範囲および運転出力と温度との関係を確認した。

付表 3.1 に使用したプロセスデータを示す。表中の PID NO は、個々のプロセス値につけられた番号である。温度計は以下の通り選定した。

- スタンドパイプクロージャ 既設温度計（3点）
- 30/20MW 切替バルブ バルブの入力温度（6点）
- ヘリウム循環機フィルタ フィルタの入口温度（7点）
- 1次ヘリウム純化設備
 - ・ ガス循環機 入口温度（1点）
 - ・ 酸化銅反応筒 入口温度（1点）
 - ・ ラブチャディスク 加熱器の出口温度（2点）
 - ・ 安全弁 加熱器の出口温度（2点）

付表 3.2 は出力上昇試験における、系統および機器毎に最も高い温度を示した値である。同一出力では、単独運転と並列運転で、各機器とも大きな温度差は見られない。

付表 3.1 濾えい対象機器プロセスデータ一覧表

No	設備	温度計信号名	PID NO
1	スタンドパイプクロージャ	スタンドパイプ温度1	24A437
		スタンドパイプ温度2	24A438
		スタンドパイプ温度3	24A439
2	30/20MW切替バルブ	1次PWC単独運転配管 (A) 入口温度	13A145
		1次PWC単独運転配管 (B) 入口温度	13A146
		1次PWC単独運転配管 (C) 入口温度	13A147
		1次PWC並列運転配管 (A) 入口温度	13A148
		1次PWC並列運転配管 (B) 入口温度	13A149
		1次PWC並列運転配管 (C) 入口温度	13A150
		1次PWCヘリウム循環機A入口温度	13A151
		1次PWCヘリウム循環機B入口温度	13A152
		1次PWCヘリウム循環機C入口温度	13A153
		中間熱交換器ヘリウム循環機入口温度	12A161
3	ヘリウム循環機 フィルタ	補助ヘリウム循環機A入口温度	14A003
		補助ヘリウム循環機B入口温度	14A004
		2次PWC出口ヘリウム温度	13A310
		ラブチャヤディスク：入口加熱器出口温度	16A051
		ラブチャヤディスク：戻り加熱機出口温度	16A075
		安全弁：入口加熱器出口温度	16A051
		安全弁：戻り加熱機出口温度	16A075
4	1次ヘリウム純化設備	ガス循環機入口温度	16A072
		酸化銅反応筒(A)入口温度	16A056

PWC : 加圧水冷却器

付表 3.2 漏えい対象機器の実測温度

(単位: °C)

No.	設備	プロセスデータ機器名称	最高温度 (設計値)	実測温度(最大値)		
				50% (単独運転)	50% (並列運転)	60% (単独運転)
1	スタンドパイプクロージャ	スタンドパイプ温度 1~3	150	35.3	34.0	47.6
2	30/20MW 切替バルブ	PPWC 単独運転配管 (A)~(C)入口温度	430	205.3	183.4	315.2
		PPWC 並列運転配管 (A)~(C)入口温度	430	199.2	170.0	302.5
3	ヘリウム循環機 フィルタ	PPWC 用ヘリウム循環機 A~C 入口温度	430	208.3	198.9	319.6
		IHX 用ヘリウム循環機 入口温度	430	172.0	198.8	259.9
		補助ヘリウム循環機 A,B 入口温度	430	65.8	62.5	93.0
		SPWC 出口温度	350	100.5	155.2	156.6
4	1次ヘリウム純化設備	ラブチャティスク	300	292.5	291.1	295.1
		安全弁	300	292.5	291.1	295.1
		ガス循環機用フィルタ	60	11.3	11.4	15.5
		酸化銅反応槽	300	283.4	282.6	286.3
						284.4

PPWC : 1次加圧水冷却器 SPWC : 2次加圧水冷却器 IHX : 中間熱交換機

付図 3.1～付図 3.16 は、運転出力 50% 時と 60% 時の単独運転と並列運転の温度と出力をプロットしたものである。なお、出力は、以下の計算式より算出した。

- ・広領域中性子束[単位%] (PID NO.24A000～24A002) の 5%以下の値を採用

$$\text{出力} = ((24A000+24A001+24A002)/3)/100*30 \quad [\text{MW}]$$

- ・出力領域中性子束[単位%] (PID NO.24A003～24A005) の 5%以上の値を採用

$$\text{出力} = ((24A003+24A004+24A005)/3)/100*30 \quad [\text{MW}]$$

(1) スタンドパイプ

同一出力では単独運転および並列運転とも、温度に大きな差が見られない。出力を上昇させると 3 点とも温度が上昇し、出力と温度との間に相関関係がある。

(2) 30/20MW 切替バルブ

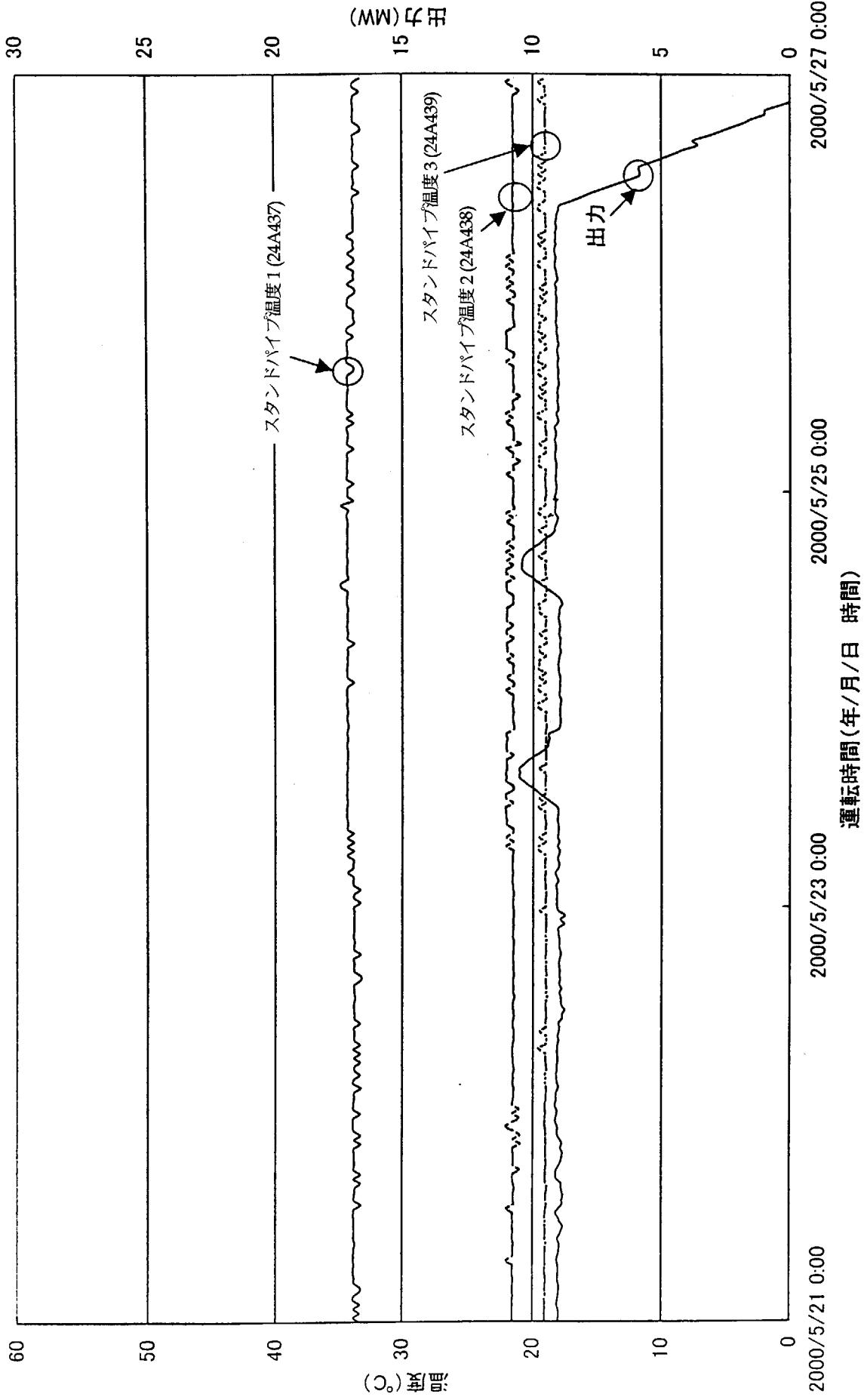
同一出力では単独運転および並列運転とも、温度に大きな差が見られないが、出力を上昇させると一様に温度が上昇している。また、同一出力においては、単独運転の方が並列運転に比較して、切替バルブの温度が全体的に高くなる傾向が見られる。これは、単独運転では 1 次加圧水冷却器のみで除熱を行うため、1 次加圧水冷却器廻りの 30/20MW 切替バルブに熱が集中するため、温度が全体的に高くなると考えられる。また、出力と 30/20MW 切替バルブ温度との間には、強い相関関係がある。

(3) ヘリウム循環機フィルタ

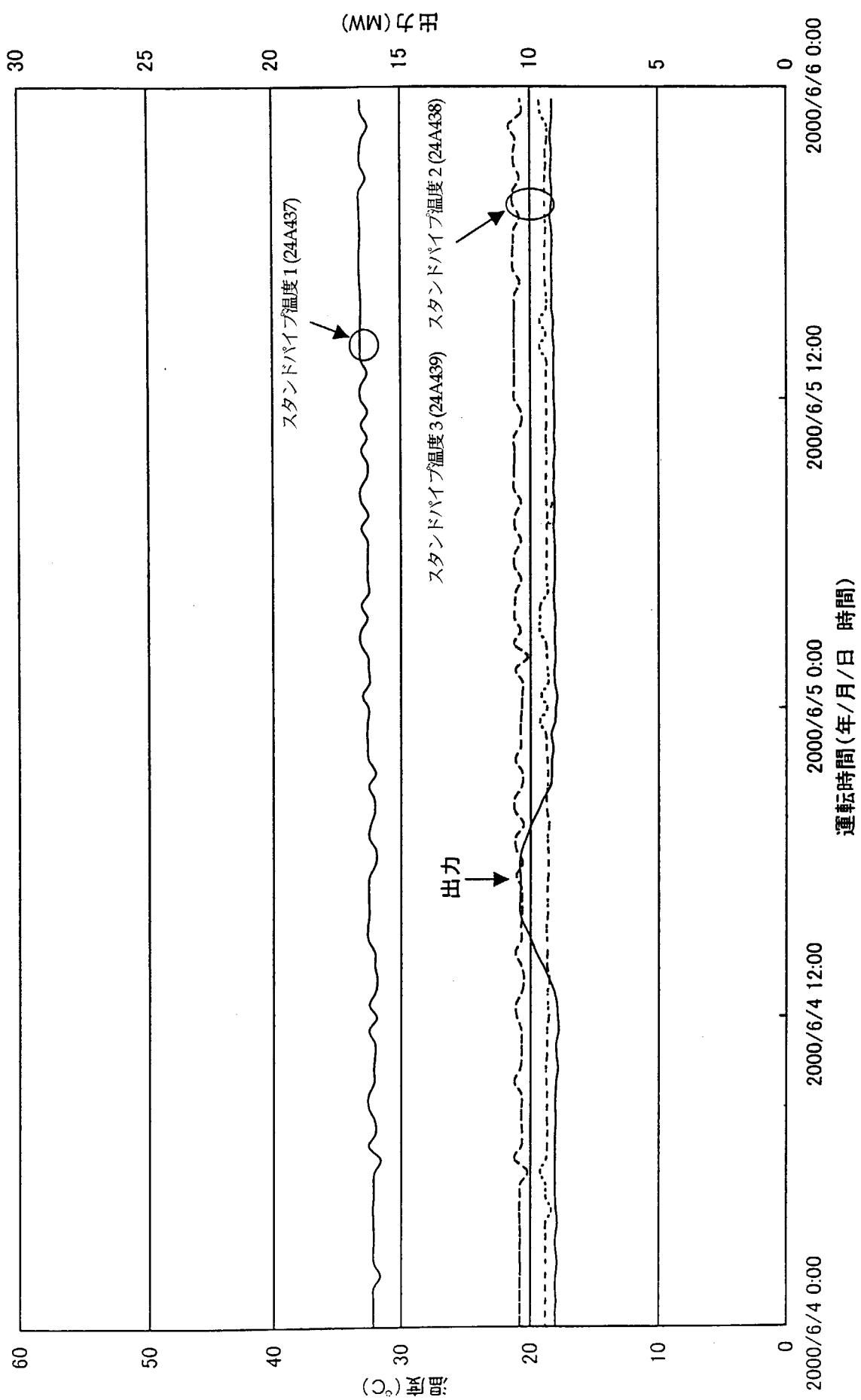
中間熱交換器用ヘリウム循環機の入口温度 (13A161) と 2 次加圧水冷却器出口ヘリウム温度 (13A310) は、同一出力において単独運転と比較して並列運転の方が上昇している。これは、中間熱交換器は並列運転に使用し、単独運転の場合には使用しないため並列運転時の方が高くなるためである。また、並列運転時、中間熱交換器ヘリウム循環機入口温度と 1 次加圧水冷却器ヘリウム循環機入口温度 A、B、C (13A151, 13A152, 13A153) との差が小さい。また、補助ヘリウム循環機 A、B と出力との間には、強い相関関係があることが分かった。これは、通常運転時、補助ヘリウム冷却系の補助ヘリウム循環機は停止しているが、原子炉スクラム時に補助冷却設備起動時の熱衝撃を緩和するために、1 次ヘリウム純化設備の 1 次冷却材を流して余熱していることから、出力との間で相関が現れるためである。

(4) 1 次ヘリウム純化設備

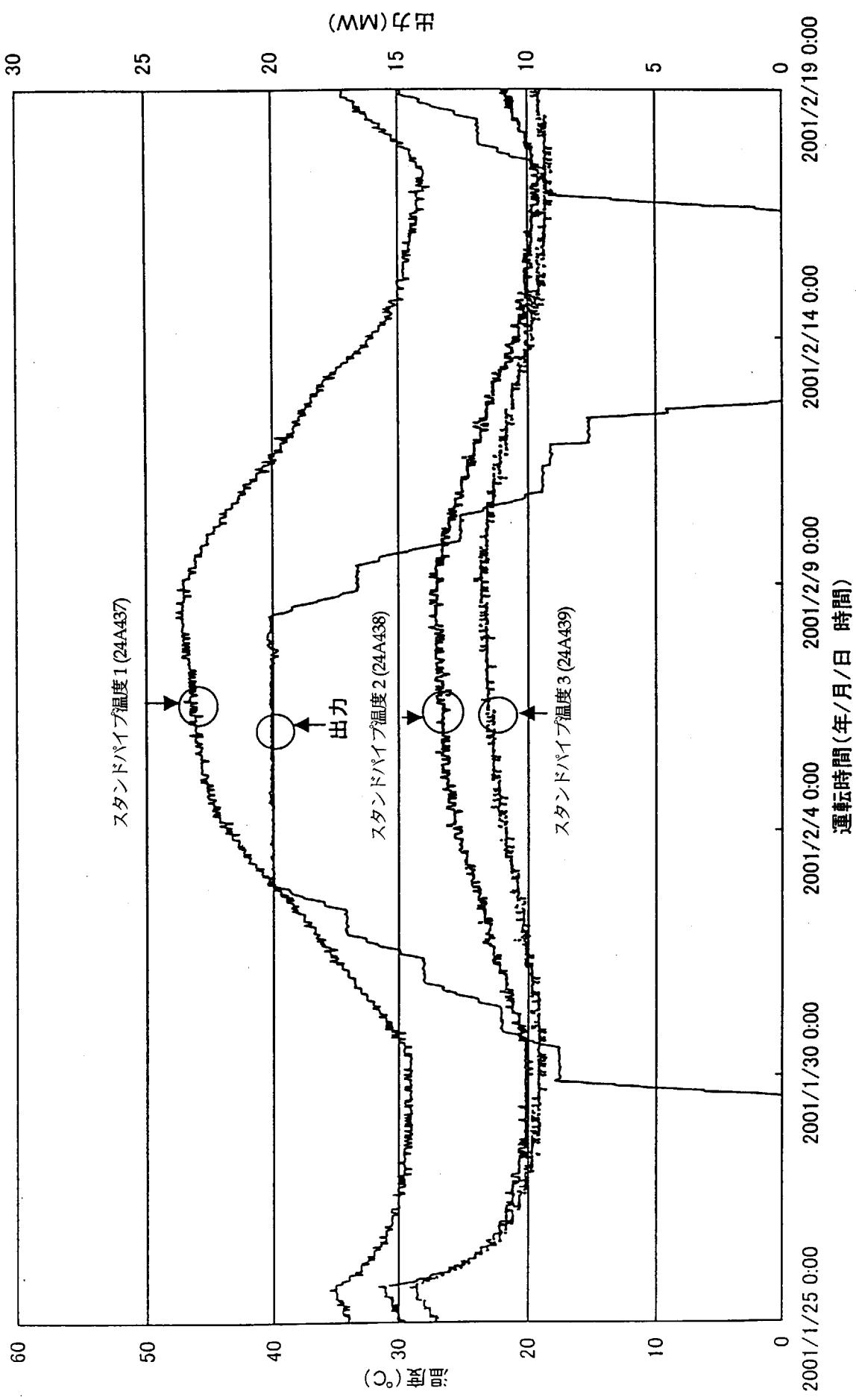
入口加熱器出口温度 (16A051)、酸化銅反応筒入口温度 (16A056) およびガス循環機入口温度 (16A072) は単独運転・並列運転および出力に関係なく大きな変化が見られない。



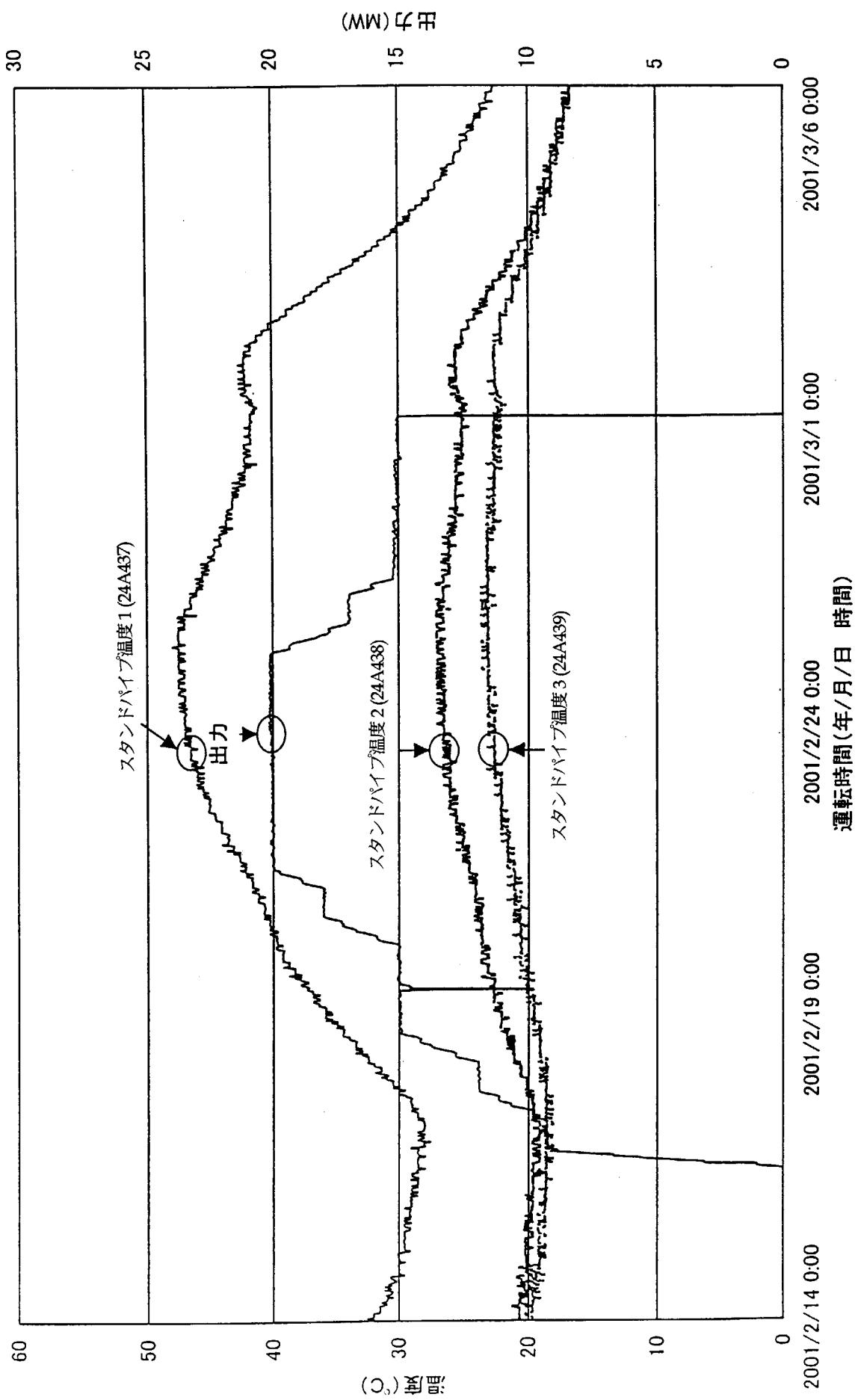
付図 3.1 スタンドパイプ実測温度（単独運転・出力 50%）



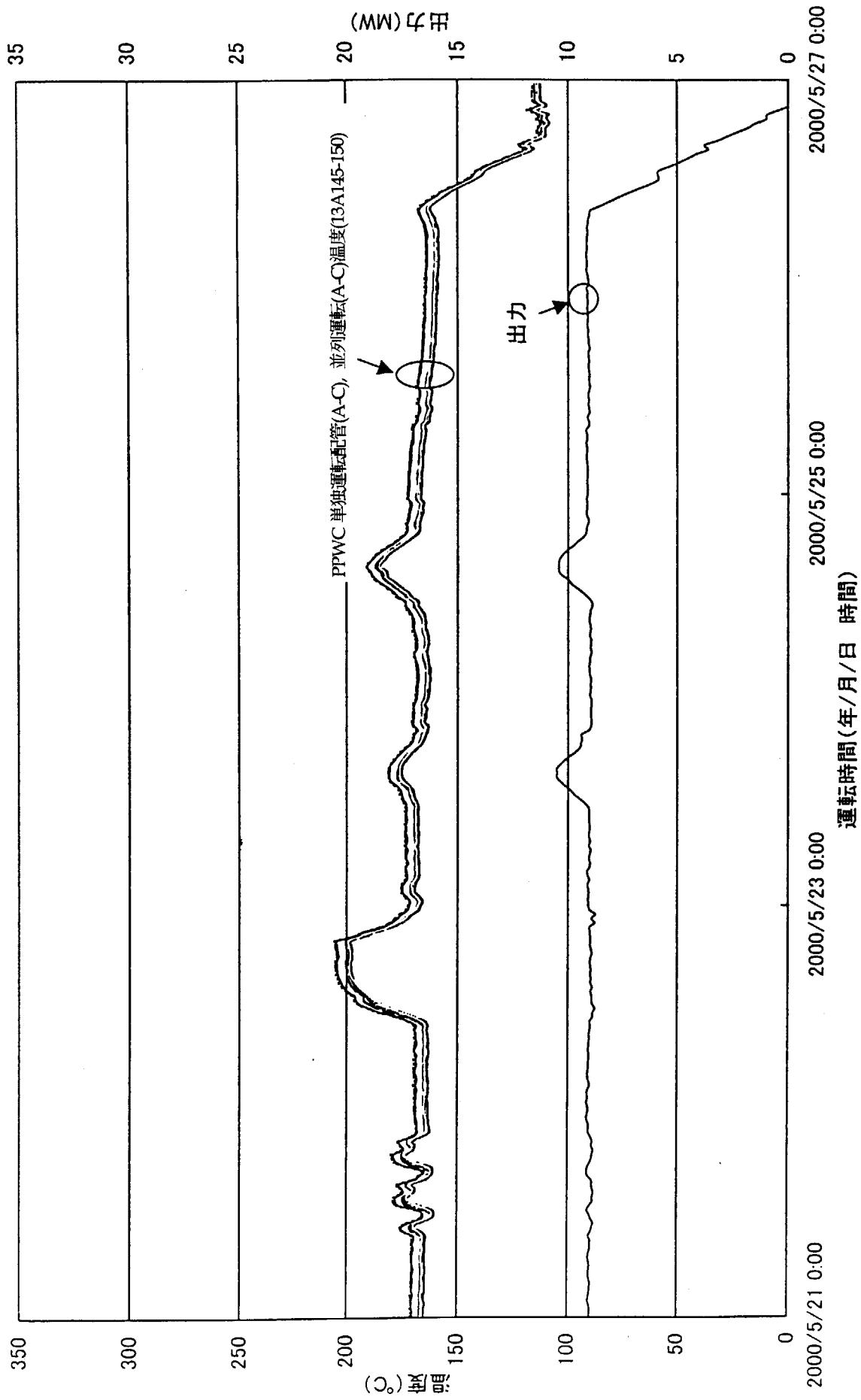
付図3.2 スタンドパイプ実測温度（並列運転・出力50%）

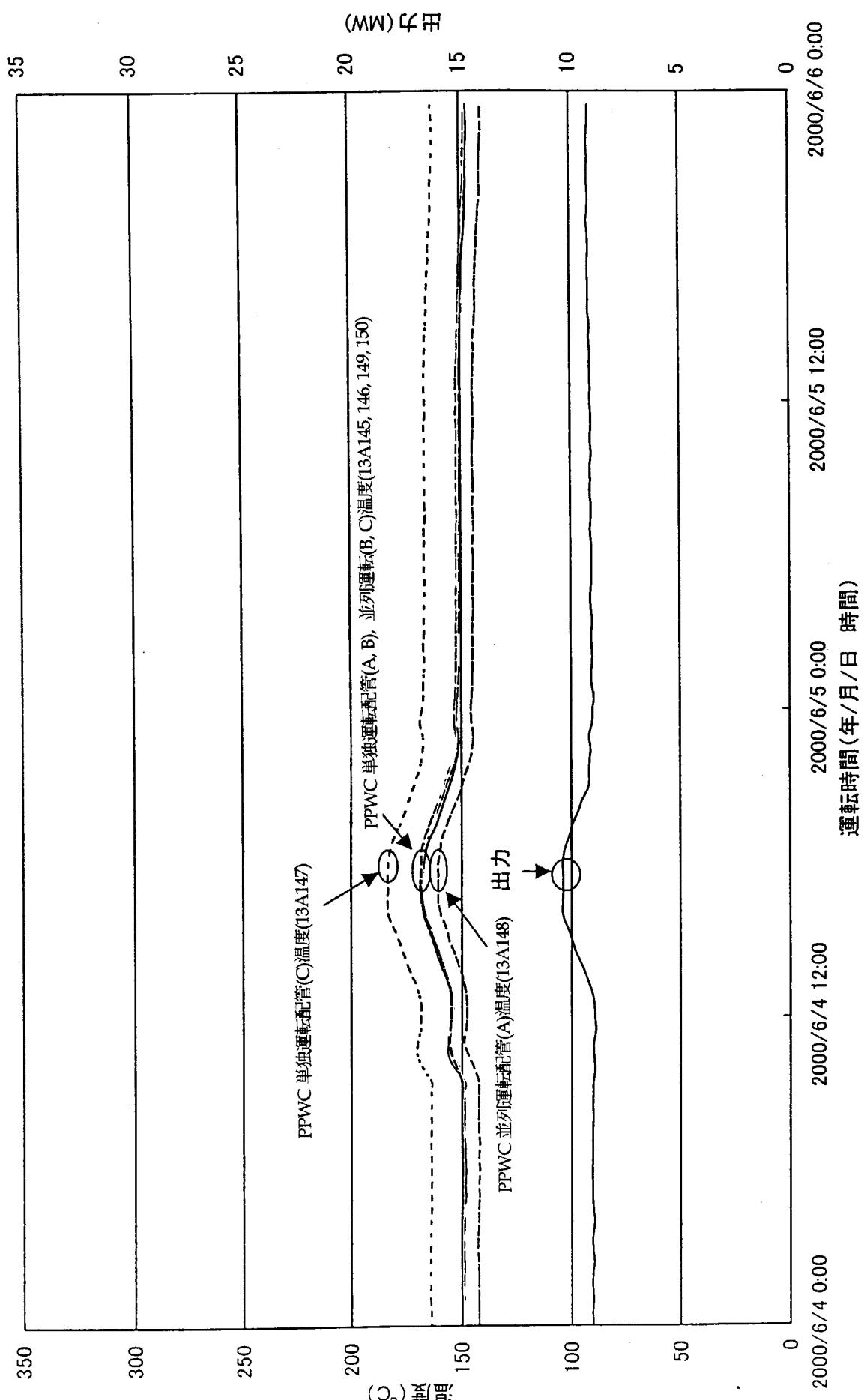


付図 3.3 スタンドパイプ実測温度（単歛運転・出力 60%）

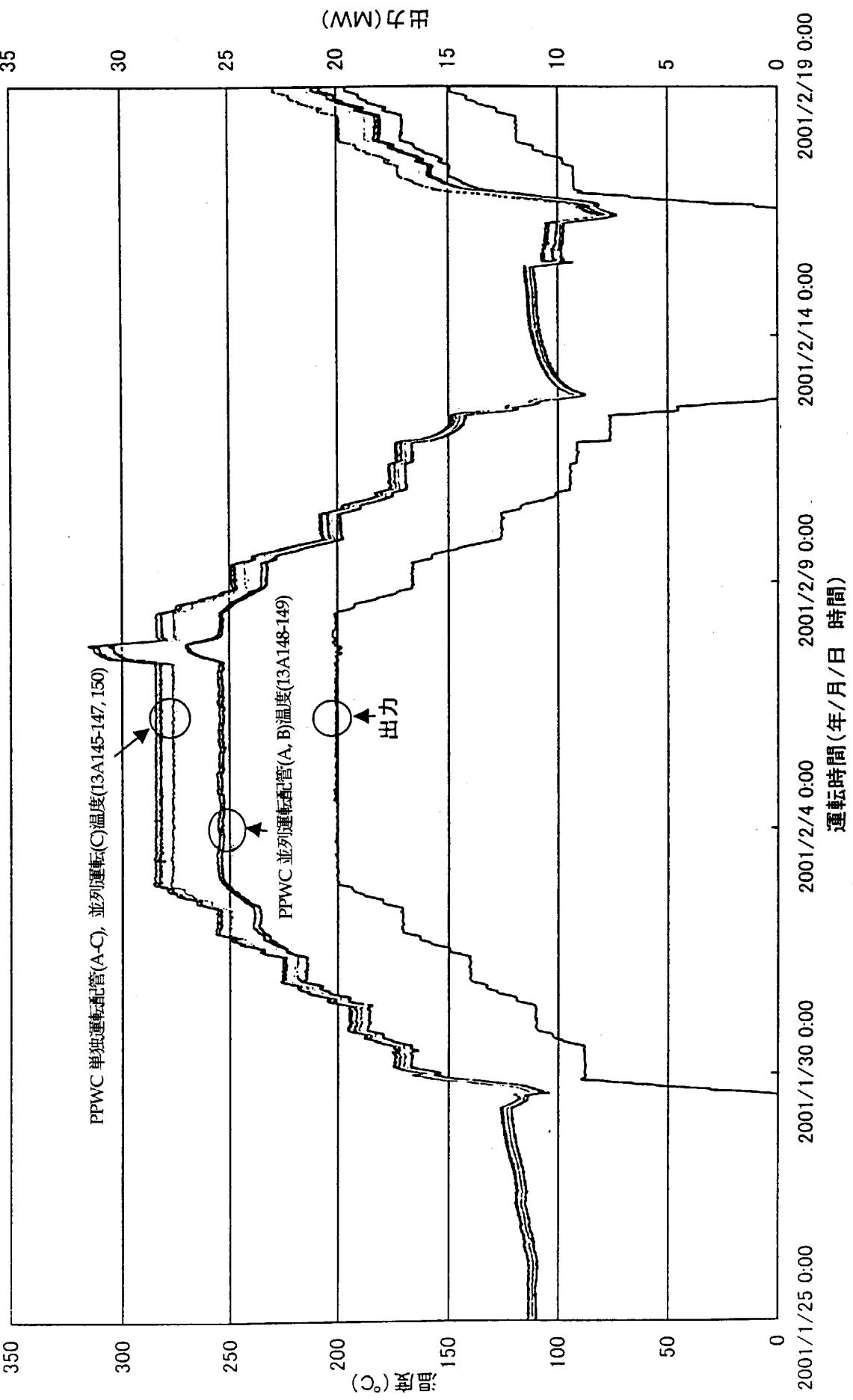


付図34 スタンドパイプ実測温度（並列運転・出力60%）

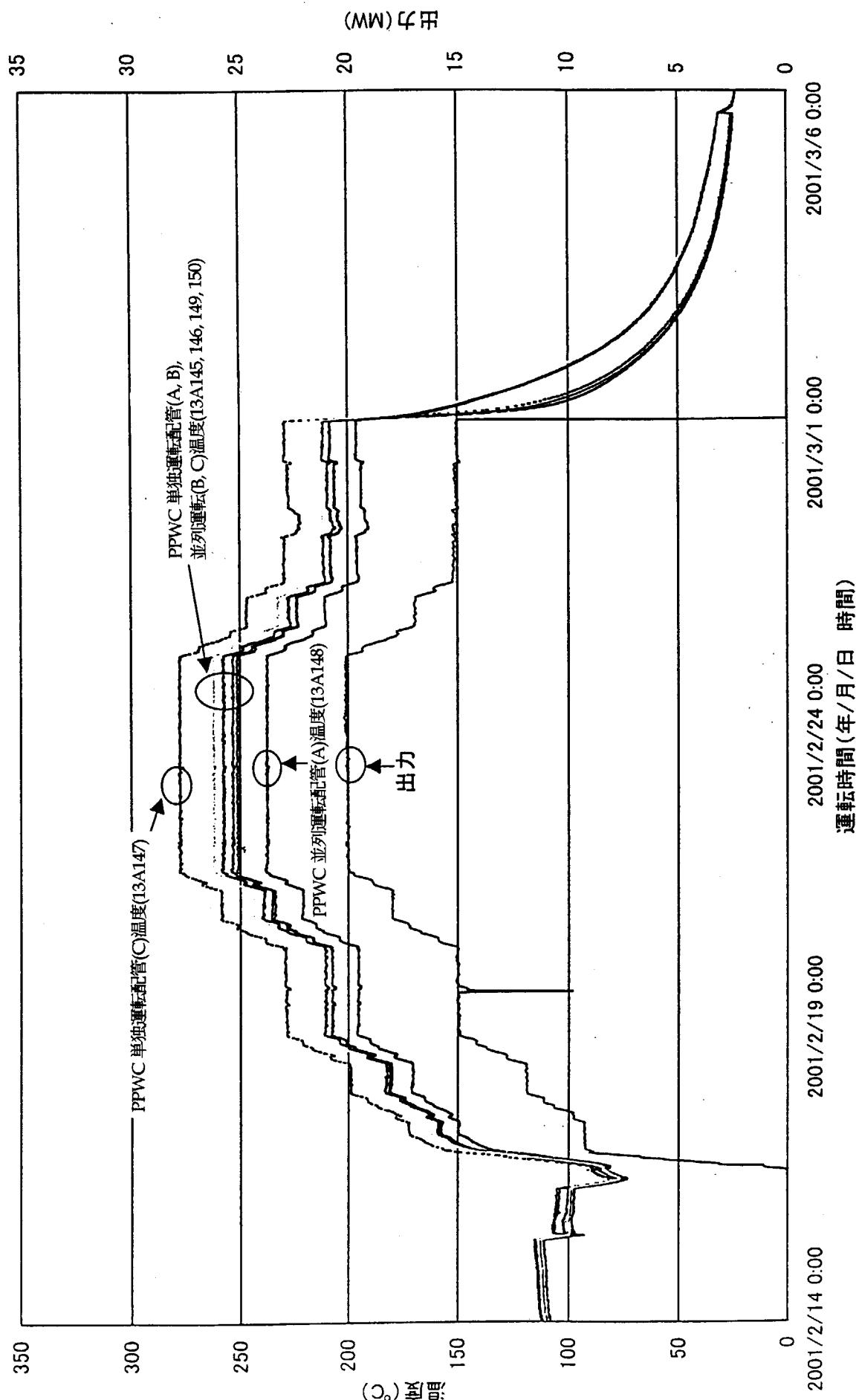




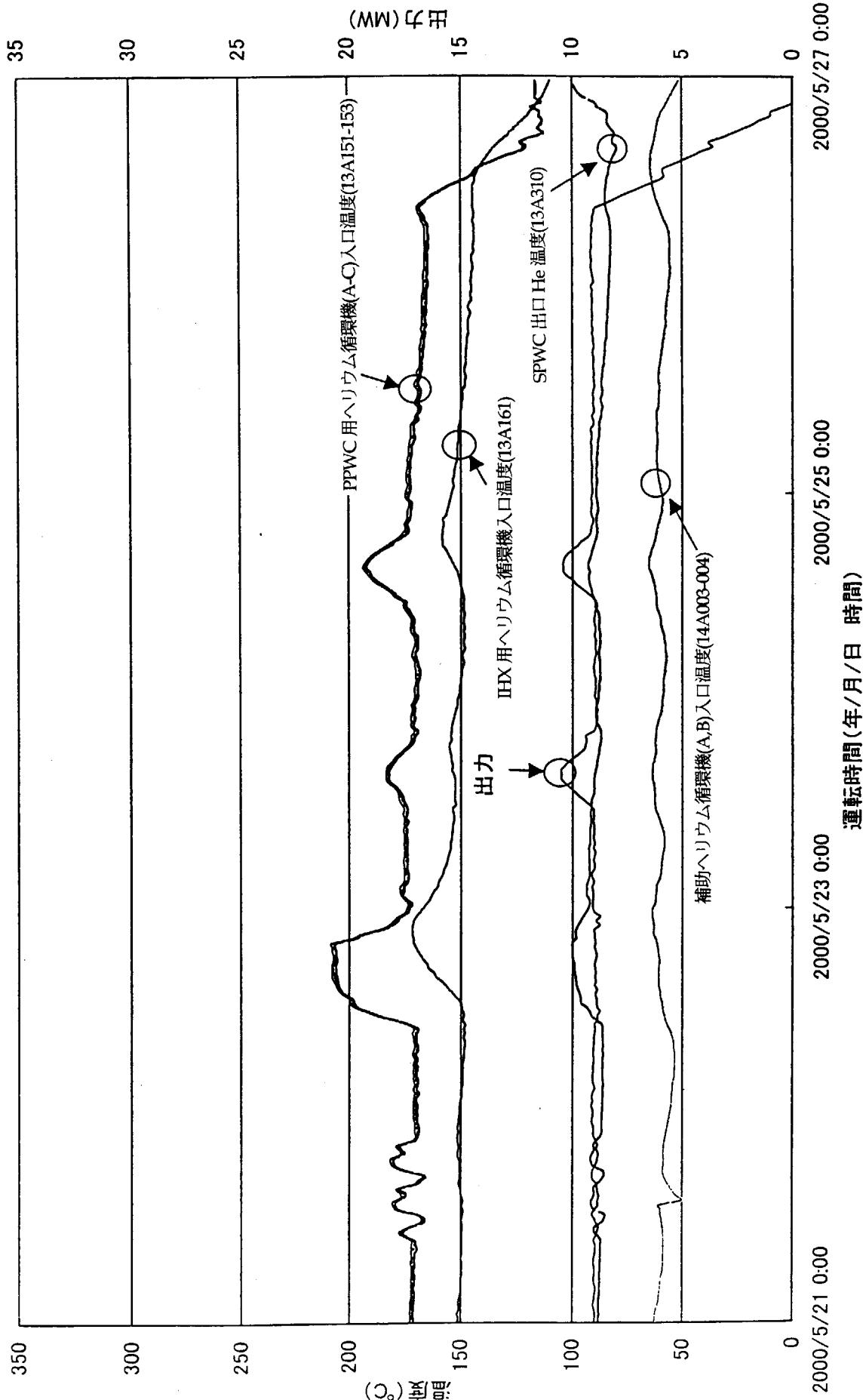
35

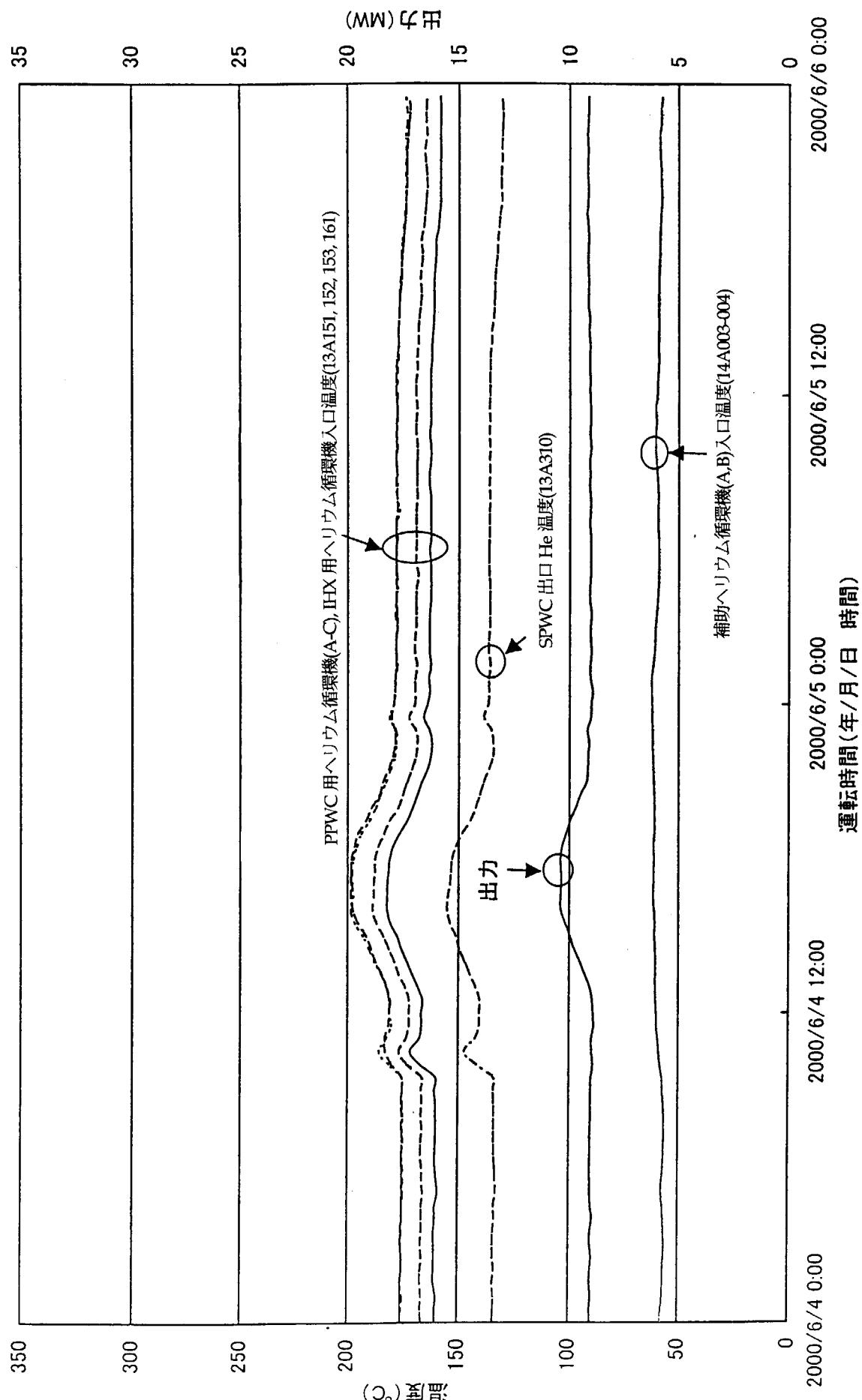


付図 3.7 20/30MW 切替バルブ実測温度（単独運転・出力 60%）



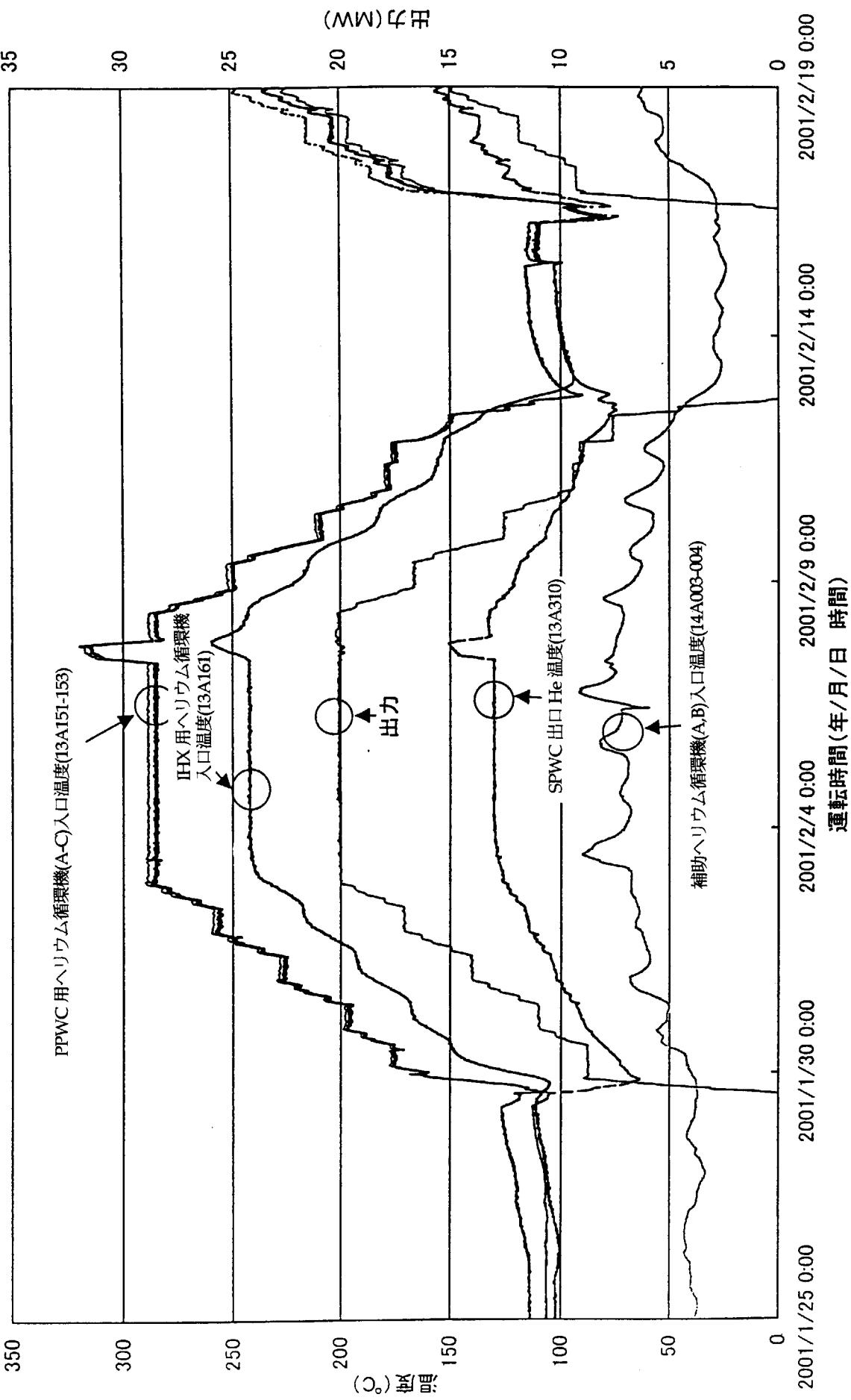
付図 3.8 20/30MW 切替バルブ実測温度（並列運転・出力 60%）





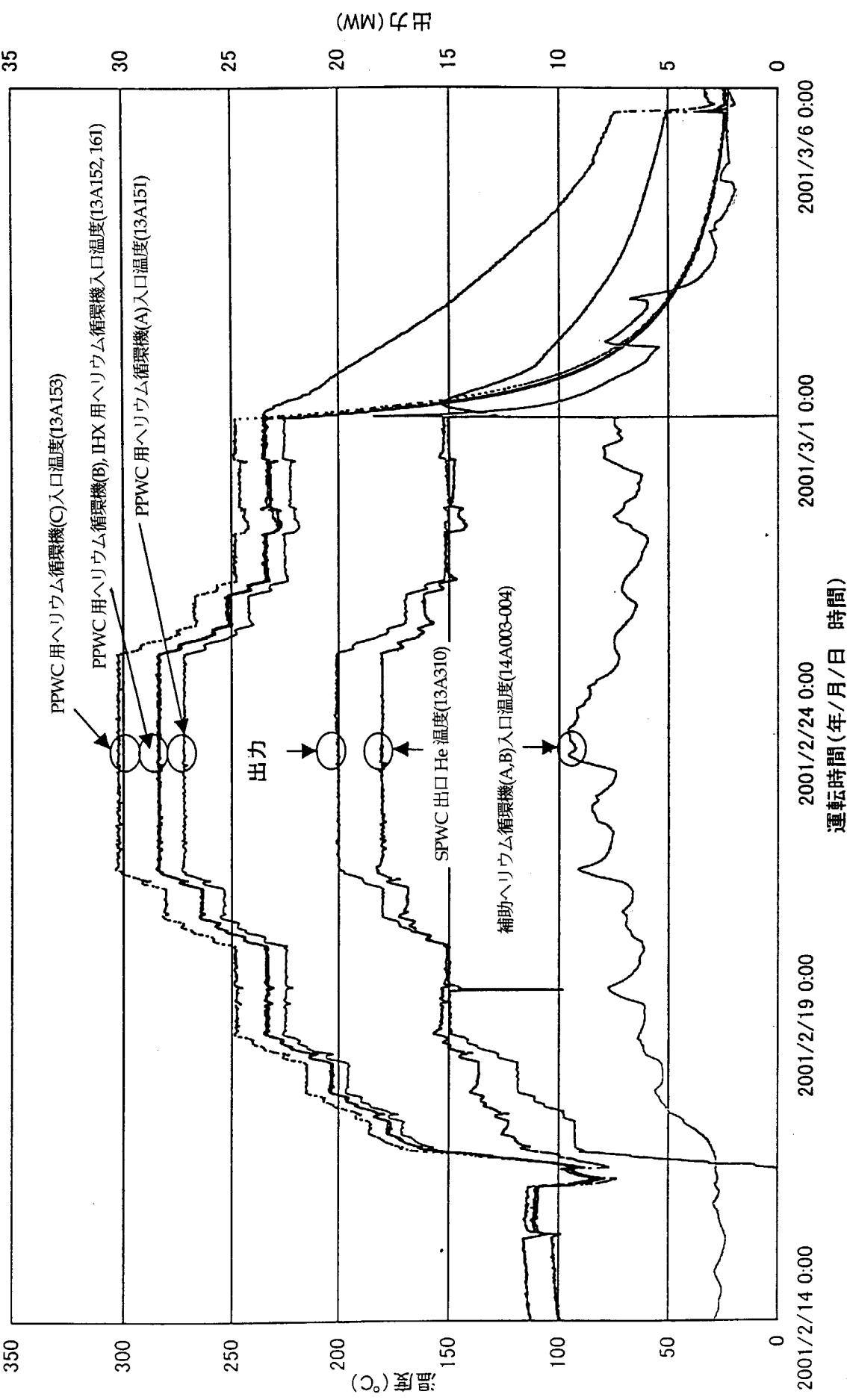
付図3.10 ヘリウム循環機フィルタ実測温度（並列運転・出力50%）

35

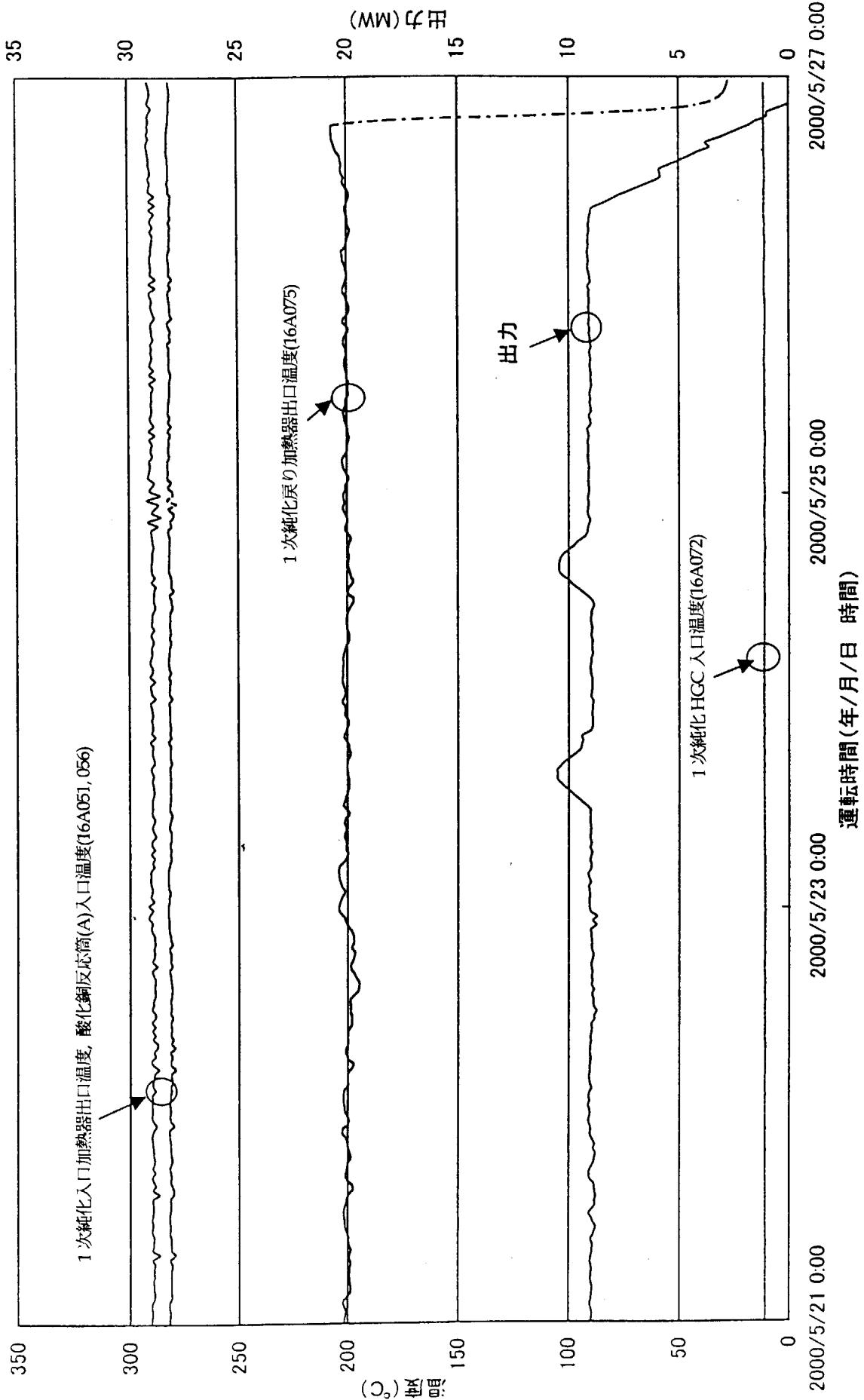


付図 3.11 ヘリウム循環機フィルタ実測温度（単独運転・出力 60%）

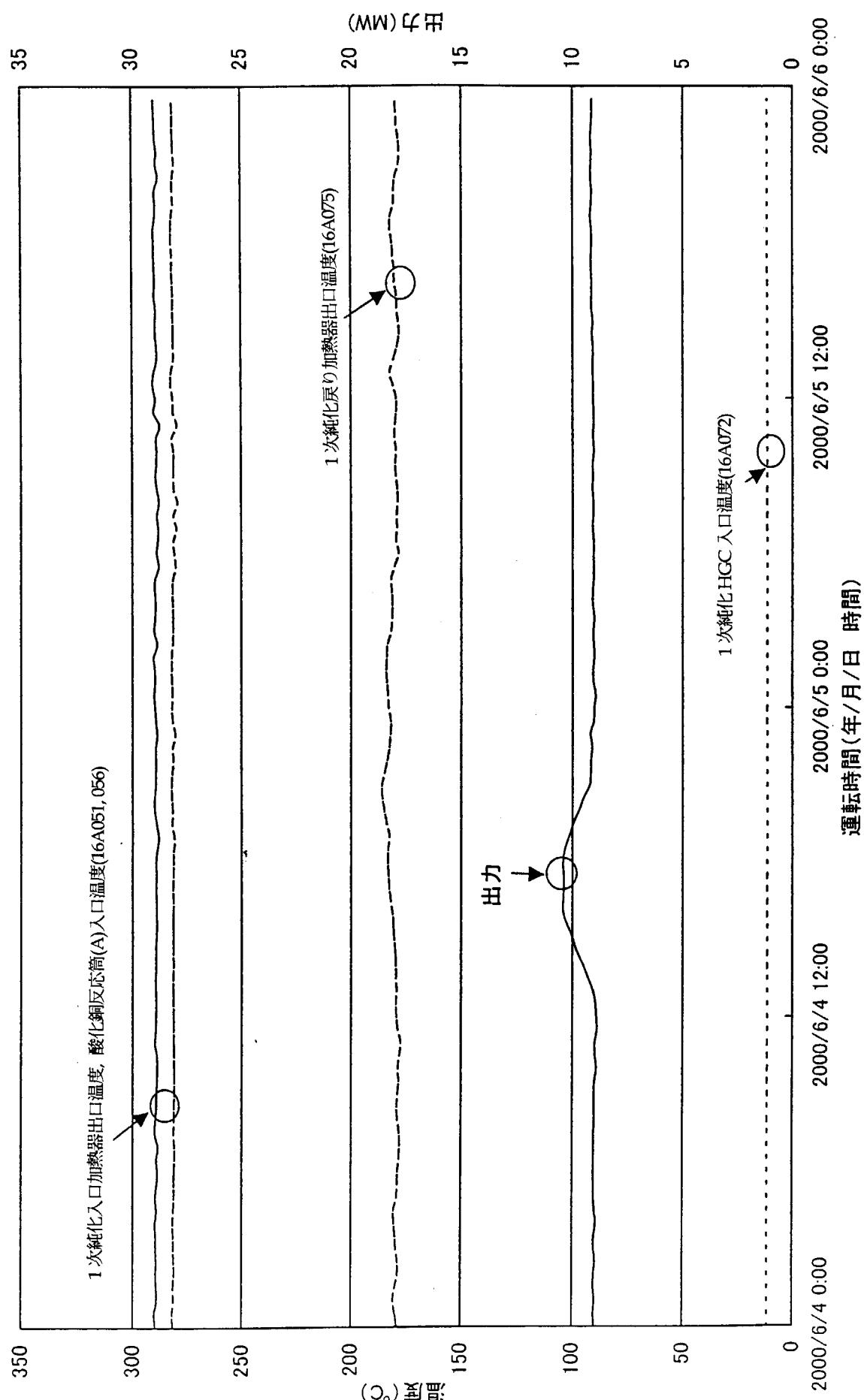
35



付図 3.12 ヘリウム循環機ファイル実測温度（並列運転・出力 60%）

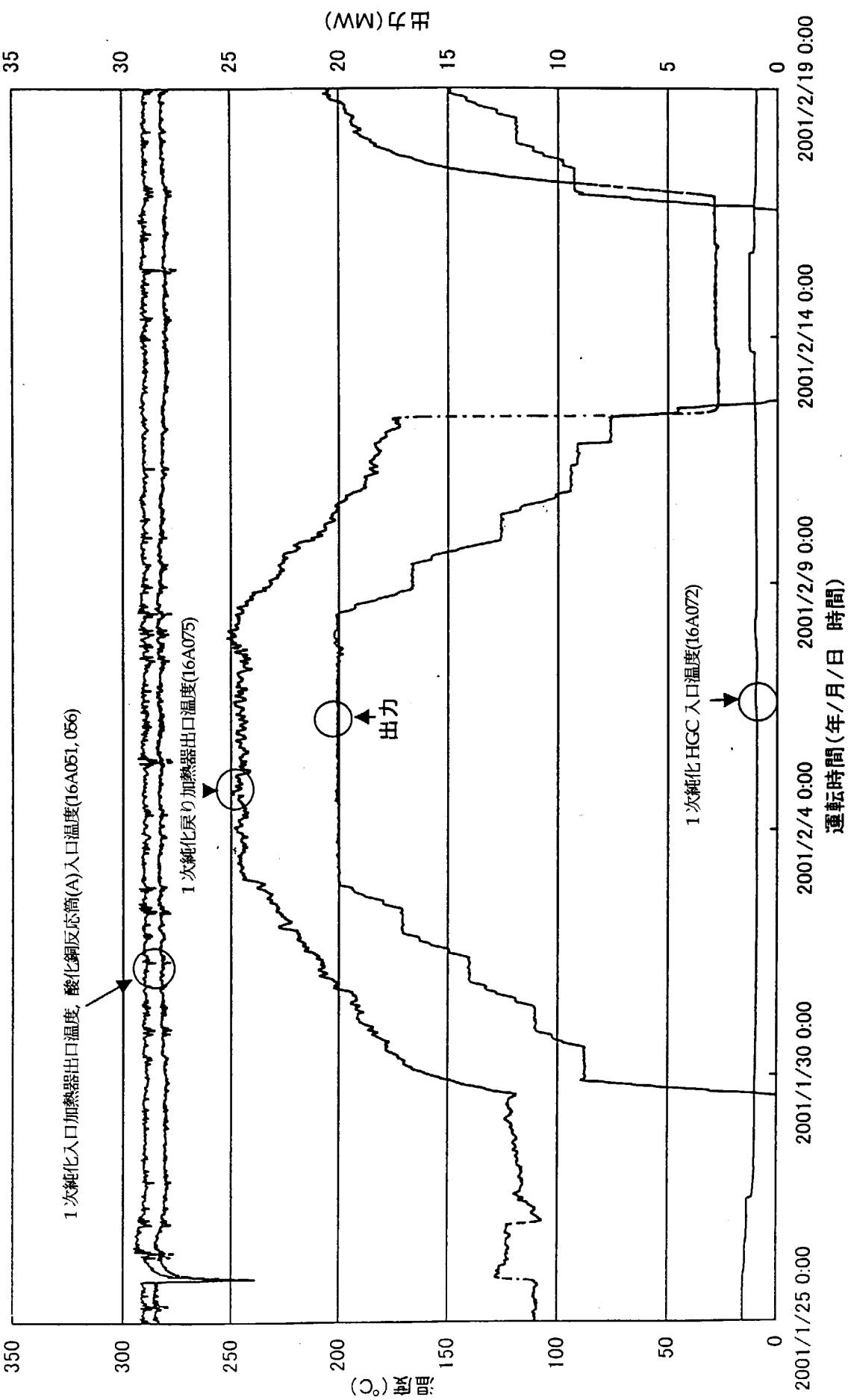


付図 3.13 1次ヘリウム純化設備実測温度（単独運転・出力 50%）



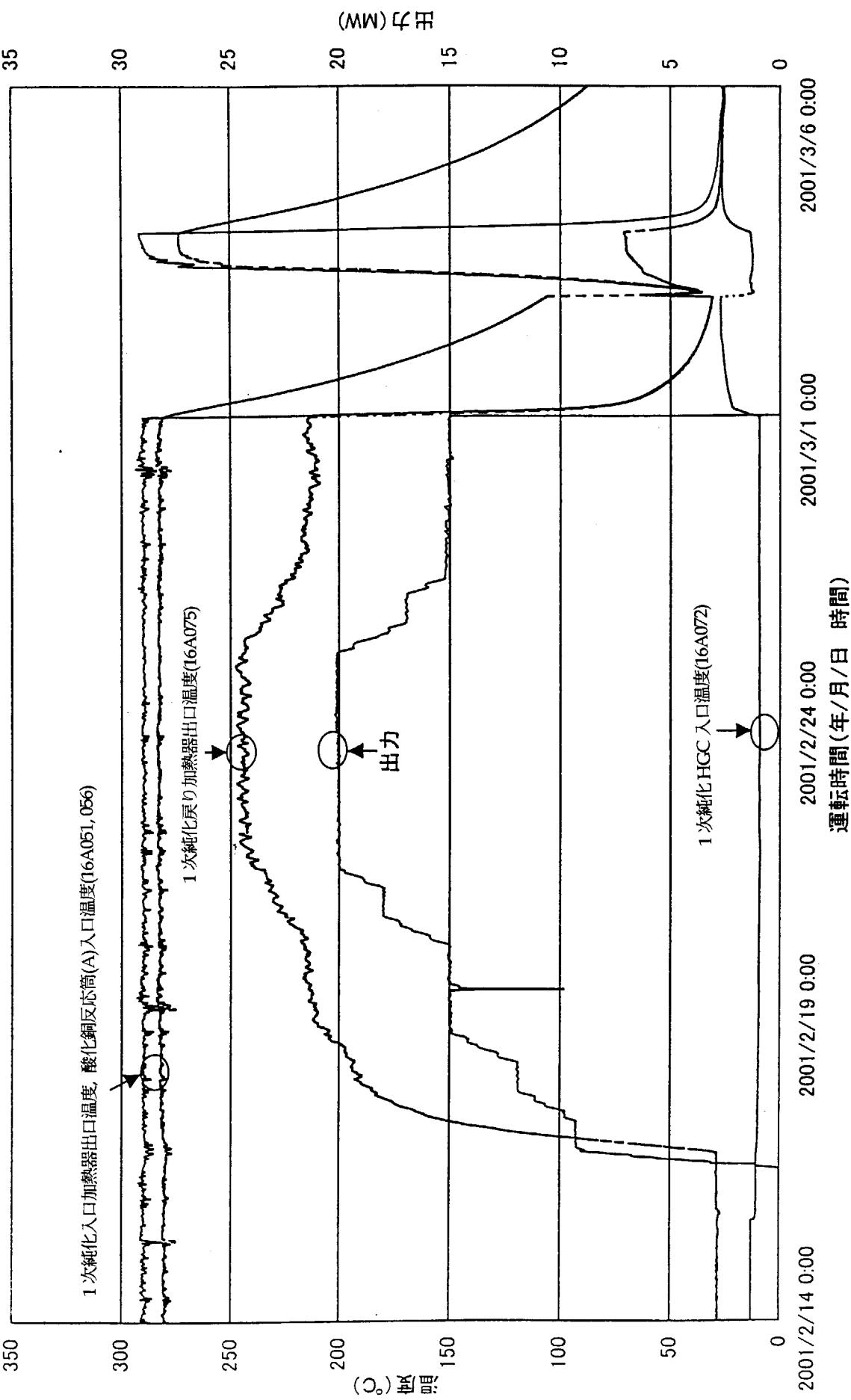
付図3.14 1次ヘリウム純化設備実測温度（並列運転・出力50%）

35



付図 3.15 1次ヘリウム純化設備実測温度（単独運転・出力 60%）

35



付図 3.16 1次ヘリウム純化設備実測温度（並列運転・出力 60%）

また、入口加熱器出口温度（16A051）、酸化銅反応筒入口温度（16A056）は、同じ系統に属しているので、単独運転・並列運転や出力に関係なく同じ変化を示している。特に、戻り加熱器出口温度（16A075）は、1次ヘリウム純化設備の1次冷却材を余熱して、補助ヘリウム冷却系に送り出していることから、出力と強い相関関係が現れていると考える。

(5) 全プロセスデータ

付録の表1から表11に入力点名称とPID番号を対応付けた一覧表を示す。なお、単独運転および並列運転の期間は、以下の通りである。

- ①単独運転：2000/5/21, 0:00 ~ 2000/5/26, 23:59
- ②単独運転：2000/6/4, 0:00 ~ 2000/6/5, 23:59

プロセスデータの入力点総数は593点で、入力点の内訳は以下の通りである。

- | | | | |
|-------|--------|--------|-------|
| ①温度 | : 401点 | ⑥放射線濃度 | : 8点 |
| ②流量 | : 27点 | ⑦放射線計数 | : 36点 |
| ③圧力 | : 84点 | ⑧回転数 | : 2点 |
| ④液位 | : 6点 | ⑨中性子束 | : 8点 |
| ⑤線量当量 | : 19点 | ⑩その他 | : 2点 |

3.2 漏えい検出対象機器の提案

漏えいを検出する対象機器を以下のように提案し、付表 3.3 にまとめた。

(1) スタンドパイプクロージャ

光ファイバはスタンドパイプ本体に設置された、リーク検出配管用座に捕集器を設置して漏えいを監視する。光ファイバの設置は敷設作業を考慮し、外周部の制御棒用、点検用、サーベランス用、照射用および中性子検出用クロージャのそれぞれ代表 1 本（合計 6 本）を当面の検出対象とし、妥当性を確認した後に、グルーピング等の方法を用いて全数検出するのが適切と考えられる。

(2) 30/20MW 切替バルブ

光ファイバはガスケット部およびパッキン部周辺に設置して漏えいを監視する。また、光ファイバは、3 系統の 1 次加圧水冷却器ガス循環機廻りの 1 系統（合計 5 個所）を当面の検出対象とし、妥当性を確認する。これらの弁には保温材が装着されているので、補集器の設置、並びに保温材一体型のスポットセンサの使用が望ましい。

(3) ヘリウム循環機フィルタ

光ファイバはフランジ面のガスケット部に設置して漏えいを監視する。対象機器は、1 次加圧水冷却器、中間熱交換器、補助ヘリウム冷却器および 2 次加圧水冷却器のうち代表 1 個（合計 4 個所）を当面の検出対象とし、妥当性を確認する。これらのフィルタには保温材が装着されているので、補集器の設置、並びに保温材一体型のスポットセンサの使用が望ましい。

(4) 1 次ヘリウム純化設備

光ファイバはフィルタのフランジ部周辺およびラップチャディスクや安全弁のガスケット部、パッキン部周辺の溶接以外の接合部（合計 15箇所）を検出対象とする。フィルタ、ラップチャディスクおよび安全弁の形状は簡単ではないため、捕集器やスポットセンサの構造検討が加えて必要になる。

付表 3.3 漏えい検出対象機器の提案

No.	設備	計測内容	重点漏洩監視点	リード検出配管用座	漏洩対象機器	実機設置数(台)	予定設置数(台)
1	スタンダードパイプ クローラージャ	温度 放射線		制御棒(A)型 制御棒(B)型	漏洩対象機器	7	1
				燃料料交換用(A)型 燃料料交換用(B)型		9	1
				点検用(05)型 リードシス用(04)型		1	0
				照射用(02)型 中性子検出用(01)型		2	0
				照射用(C)型		3	1
	小計	—	—	—		31	6
2	30/20MW 切替バルブ	温度	①ガスケット ②パッキン	30MW除熱用正め弁 (ガスケット) (パッキン)		3	1
				20MW除熱用正め弁 (ガスケット29a) (ガスケット29b) (パッキン)		3	1
	小計	—	—	—		3	1
3	ヘリウム循環器 フィルタ	温度	フィルタ上部 フランジの ガスケット部	1次加圧水冷却器 1次ヘリウム循環機用 中間緊交換器 1次ヘリウム循環機用		3	1
				補助冷却器 補助ヘリウム循環機用 2次加圧水冷却器 2次ヘリウム循環機用		1	1
	小計	—	—	—		15	5
4	1次純化設備	温度	①弁のガスケット 及びパッキン部	ラブチャティスク 安全弁 チエック弁 グローブ弁(空気作動) ニードル弁 三万弁 電磁弁		6 12 23 188 1 7 9	4 8 0 0 0 0 0
				②フィルタ上部 フランジの ガスケット部	入口フィルタ	71	0
				③酸化鉄反応筒	ガス循環器用フィルタ	1	1
	小計	—	—	-103 =	—	—	—
5	漏洩対象機器および光ファイバ予定設置数合計	—	—	—	2 322 375	1 15 30	1 15 30

4. おわりに

漏えい監視対象機器を検討し、検出器の設置場所等を提案した。提案する対象機器は、HTTR のヘリウム系の主要部である、スタンドパイプ、30/20MW切替バルブ、ヘリウム循環機フィルタおよび1次ヘリウム純化設備である。これらについて、機器の設計条件等をもとに、漏えいポテンシャルの高いと考えられる部位を選択し、選択された部位について、出力上昇試験の実測データから、温度変化を確認した。将来、本システムを HTTR に適用し据付ける場合には、作業スペースの確保、定期検査時に干渉しないよう考慮すること等が必要である。設置にあたっては、これらを総合的に判断して、設置場所、設置方法等を定める必要がある。特に、スタンドパイプについては、予備のスリーブを用いて、計測線をスタンドパイプ室外に出すのが有効な方法である。

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	$m \cdot kg/s^2$
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、放射束	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	ウェーバー	Wb	$V \cdot s$
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	$^{\circ}C$	
光束	ルーメン	lm	$cd \cdot sr$
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	$^{\circ}, ', ''$
リットル	L, L
トントン	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)

- 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。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタ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。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換 算 表

力	$N(=10^5 \text{ dyn})$	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

粘度 $1 \text{ Pa} \cdot \text{s}(N \cdot \text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ポアズ)}(\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s}))$

動粘度 $1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)}(\text{cm}^2/\text{s})$

圧力	MPa($=10 \text{ bar}$)	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($=10^7 \text{ erg}$)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)
1	0.101972	2.77778×10^{-7}	0.238889	9.47813×10^{-4}	0.737562	6.24150×10^{18}	$= 4.184 \text{ J (熱化学)}$	
9.80665	1	2.72407×10^{-6}	2.34270	9.29487×10^{-3}	7.23301	6.12082×10^{19}	$= 4.1855 \text{ J (15 }^{\circ}\text{C)}$	
3.6×10^6	3.67098×10^5	1	8.59999×10^3	3412.13	2.65522×10^6	2.24694×10^{25}	$= 4.1868 \text{ J (国際蒸気表)}$	
4.18605	0.426858	1.16279×10^{-6}	1	3.96759×10^{-3}	3.08747	2.61272×10^{19}	仕事率 1 PS(仮馬力)	
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		
	1	2.70270×10^{-11}		
	3.7×10^{10}	1	0.01	1

照射線量	C/kg	R	
	吸収線量	1	3876
	2.58×10^{-4}	1	

線量当量	Sv	rem	
	吸収線量	1	100
	0.01	1	

(86年12月26日現在)



古紙配合率100%
白色度70%の再生紙を使用しています