

## 「ふげん」重水系・ヘリウム系等のトリチウム除去

Tritium Removal of Heavy Water System and Helium System in FUGEN

瀧谷 啓晃 門脇 春彦 松嶋 聡 松尾 秀彦  
石山 正弘 荒谷 健太 手塚 将志

Hiroaki TAKIYA, Haruhiko KADOWAKI, Akira MATSUSHIMA, Hidehiko MATSUO  
Masahiro ISHIYAMA, Kenta ARATANI and Masashi TEZUKA

敦賀廃止措置実証部門  
新型転換炉原型炉ふげん  
廃止措置部

Decommissioning Project Department  
Fugen Decommissioning Engineering Center  
Sector of Tsuruga Decommissioning Demonstration

May 2020

本レポートは国立研究開発法人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 (<https://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Institutional Repository Section,  
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,  
Japan Atomic Energy Agency.  
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2020

## 「ふげん」重水系・ヘリウム系等のトリチウム除去

日本原子力研究開発機構 敦賀廃止措置実証部門

新型転換炉原型炉ふげん 廃止措置部

瀧谷 啓晃、門脇 春彦、松嶋 聡、松尾 秀彦、石山 正弘、荒谷 健太、手塚 将志

(2020年1月23日 受理)

日本原子力研究開発機構 新型転換炉原型炉施設「ふげん」(以下、「ふげん」という。)は、約25年間の運転を経て、2008年2月12日に廃止措置計画の認可を取得し、廃止措置に移行して解体作業を進めている。「ふげん」は、減速材として重水を使用しており、原子炉の運転に伴って重水素による中性子の吸収によってトリチウムが生成・蓄積されているため、炉心本体、重水系及びヘリウム系はトリチウムによって汚染されている。これらの設備の解体撤去に先立ち、環境へのトリチウムの放出量及びトリチウムによる内部被ばくリスクを低減するとともに、作業性を確保するため、廃止措置の第一段階である「重水系・ヘリウム系等の汚染の除去期間」の作業の一環として、これらの設備のトリチウム汚染を除去する作業を2008年度から開始し、2017年度に完了した。

本報告書では、炉心本体、重水系及びヘリウム系のトリチウム汚染の除去作業に当たって作業方法や作業の進捗管理等を検討し、実証した結果を報告する。

## **Tritium Removal of Heavy Water System and Helium System in FUGEN**

Hiroaki TAKIYA, Haruhiko KADOWAKI, Akira MATSUSHIMA, Hidehiko MATSUO,  
Masahiro ISHIYAMA, Kenta ARATANI and Masashi TEZUKA

Decommissioning Project Department, Fugen Decommissioning Engineering Center,  
Sector of Tsuruga Decommissioning Demonstration  
Japan Atomic Energy Agency  
Myojin-cho, Tsuruga-shi, Fukui-ken

(Received January 23, 2020)

Advanced Thermal Reactor (ATR) FUGEN was operated for about 25 years, and now has been proceeding decommissioning after the approval of the decommissioning plan in Feb. 2008. The reactor, heavy water system and helium system are contaminated by tritium because of neutron absorption of heavy water, which is a moderator. Before dismantling these facilities, it is necessary to remove tritium from them for not only reducing the amount of tritium released to surrounding environment and the risk of internal exposure by tritium but also ensuring the workability. In first phase of decommissioning (Heavy Water and Other system Decontamination Period), tritium decontamination of the reactor, heavy water system and helium system started in 2008 and completed in fiscal year 2017.

This report shows the results of tritium decontamination of the reactor, heavy water system and helium system.

Keywords: Tritium, Heavy Water, Removal, Decommissioning, FUGEN

目 次

1. 概要	1
2. 「ふげん」重水関連設備とトリチウム汚染	2
2.1 重水関連設備	2
2.2 トリチウムの発生源とその取扱い	3
3. トリチウム除去作業の概要	4
3.1 トリチウム除去の手順	4
3.2 残留トリチウム水の回収作業工程	4
3.3 残留トリチウム水回収のための通気乾燥装置	6
3.3.1 除湿ロータ式トリチウム除去装置	6
3.3.2 中空糸膜分離式トリチウム除去装置	6
3.4 残留トリチウム水回収のための真空乾燥装置	7
3.4.1 真空ポンプによる排気速度の上限値	7
3.4.2 その他の設計要件	8
3.5 トリチウム除去作業の完了判断基準	9
4. トリチウム除去作業の実績	12
4.1 はじめに	12
4.2 重水循環ポンプ用熱交換器のトリチウム除去作業	12
4.2.1 作業方法	12
4.2.2 作業結果	13
4.2.3 まとめ	14
4.3 ヘリウム浄化系室のトリチウム除去作業	15
4.3.1 作業方法	15
4.3.2 作業結果	15
4.3.3 まとめ	17
4.4 ポイズン供給系のトリチウム除去作業	17
4.4.1 作業方法	17
4.4.2 作業結果	17
4.4.3 まとめ	18
4.5 重水浄化系室のトリチウム除去作業	19
4.5.1 作業方法	19
4.5.2 作業結果	19
4.5.3 まとめ	20
4.6 劣化重水貯槽、重水貯槽等のトリチウム除去作業	21
4.6.1 作業方法	21
4.6.2 作業結果	21

4.6.3	まとめ	22
4.7	カランドリアタンク等のトリチウム除去作業	22
4.7.1	作業方法	22
4.7.2	作業結果	23
4.7.3	まとめ	24
4.8	除湿ロータ式トリチウム除去装置のトリチウム除去作業	24
4.8.1	作業方法	24
4.8.2	作業結果	24
4.8.3	まとめ	25
4.9	残留トリチウム水量の推定	25
4.9.1	残留水量の推定の概念	25
4.9.2	コールド試験	26
4.9.3	ホット試験	27
4.9.4	まとめ	27
5.	結言	28
	参考文献	29

## Contents

1. Overview .....	1
2. Heavy Water Treatment Facilities and Tritium Contamination .....	2
2.1 Heavy Water Treatment Facilities .....	2
2.2 Generation and Control of Tritium .....	3
3. Overview of Tritium Removal Work .....	4
3.1 Tritium Removal Procedure .....	4
3.2 Tritium Removal Work Process .....	4
3.3 Air-through Drying Device for Tritium Removal .....	6
3.3.1 Rotary Type Dehumidifier .....	6
3.3.2 Membrane Separation Type Dehumidifier .....	6
3.4 Vacuum Drying Device for Tritium Removal .....	7
3.4.1 Upper Limit of Exhaust Speed of Vacuum Pump .....	7
3.4.2 Other Design Conditions .....	8
3.5 Completion Judgment of Tritium Removal Work .....	9
4. Results of Tritium Removal Work .....	12
4.1 Introduction .....	12
4.2 Tritium Removal Work of Heat Exchanger of Heavy Water Circulation Pump .....	12
4.2.1 Working Methods .....	12
4.2.2 Results .....	13
4.2.3 Summary .....	14
4.3 Tritium Removal Work of Equipment in Helium Purification System Room .....	15
4.3.1 Working Methods .....	15
4.3.2 Results .....	15
4.3.3 Summary .....	17
4.4 Tritium Removal Work of Poison Supplying System .....	17
4.4.1 Working Methods .....	17
4.4.2 Results .....	17
4.4.3 Summary .....	18
4.5 Tritium Removal Work of Equipment in Heavy Water Purification System Room .....	19
4.5.1 Working Methods .....	19
4.5.2 Results .....	19
4.5.3 Summary .....	20
4.6 Tritium Removal Work of Heavy Water Storage Tank, etc. ....	21
4.6.1 Working Methods .....	21
4.6.2 Results .....	21
4.6.3 Summary .....	22

4.7 Tritium Removal Work of Calandria Tank and Peripheral Equipment .....	22
4.7.1 Working Methods .....	22
4.7.2 Results .....	23
4.7.3 Summary .....	24
4.8 Tritium Removal Work of Rotary Type Dehumidifier .....	24
4.8.1 Working Methods .....	24
4.8.2 Results .....	24
4.8.3 Summary .....	25
4.9 Quantity Estimation of Residual Tritiated Water .....	25
4.9.1 Residual Water Quantity Estimation Method .....	25
4.9.2 Cold Test .....	26
4.9.3 Hot Test .....	27
4.9.4 Summary .....	27
5. Concluding Remarks .....	28
References .....	29

表リスト

表 2.2-1	トリチウム防護具とその着用基準	30
表 3.3-1	除湿ロータ式トリチウム除去装置の仕様	30
表 3.3-2	中空糸膜分離式トリチウム除去装置の仕様	31
表 4.1-1	トリチウム除去作業の実績概略	33
表 4.6-1	空気置換後のトリチウム濃度の変化（劣化重水貯槽、重水貯槽等）	35
表 4.7-1	空気置換後のトリチウム濃度の変化（カランドリアタンク等）	35
表 4.9-1	コールド試験条件	36
表 4.9-2	コールド試験結果	36
表 4.9-3	ホット試験結果	37

図リスト

図 2.1-1	原子炉本体の概略	38
図 2.1-2	重水系及びヘリウム系の概略	39
図 2.2-1	原子炉運転期間における重水中のトリチウム濃度の変化	40
図 2.2-2	トリチウム防護対策	40
図 3.1-1	トリチウム除去の作業ブロック分けの概略	41
図 3.2-1	残留トリチウム水の回収工程	42
図 3.3-1	除湿ロータ式トリチウム除去装置の外観	42
図 3.3-2	除湿ロータ式トリチウム除去装置の構成概略	43
図 3.3-3	中空糸膜分離式トリチウム除去装置の外観	43
図 3.3-4	中空糸膜分離式トリチウム除去装置の構成概略	44
図 3.4-1	外気 - 残留トリチウム水間の熱移動モデル	44
図 3.4-2	設備の内表面積と排気速度の上限値及び入熱量の関係	45
図 3.4-3	実効排気速度と系内圧力の関係	45
図 4.2-1	トリチウム除去装置の概略（重水循環ポンプ用熱交換器）	46
図 4.2-2	常温通気乾燥時の露点、内圧及びトリチウム濃度の経時変化（B-熱交換器）	47
図 4.2-3	加熱通気乾燥時の露点、内圧及びトリチウム濃度の経時変化（C-熱交換器）	48
図 4.2-4	加熱真空乾燥時の内圧及びトリチウム濃度の経時変化（A-熱交換器）	49
図 4.2-5	空気置換時のトリチウム濃度の変化（A-熱交換器）	49
図 4.2-6	空気置換時のトリチウム濃度の変化（B-熱交換器）	50
図 4.2-7	空気置換時のトリチウム濃度の変化（C-熱交換器）	50
図 4.3-1	真空乾燥作業におけるブロック分けの概略（ヘリウム浄化系室）	51
図 4.3-2	真空乾燥装置の概略（ヘリウム浄化系室）	51
図 4.3-3	空気置換作業におけるブロック分けの概略（ヘリウム浄化系室）	52

図 4.3-4	加熱真空乾燥時の内圧及びトリチウム濃度の経時変化（ヘリウム浄化系室、ブロック 1）	53
図 4.3-5	加熱真空乾燥時の内圧及びトリチウム濃度の経時変化（ヘリウム浄化系室、ブロック 2）	53
図 4.3-6	加熱真空乾燥時の内圧及びトリチウム濃度の経時変化（ヘリウム浄化系室、ブロック 3）	54
図 4.3-7	空気置換時のトリチウム濃度の変化（ヘリウム浄化系室、置換範囲①）	54
図 4.3-8	空気置換時のトリチウム濃度の変化（ヘリウム浄化系室、置換範囲②）	55
図 4.3-9	空気置換時のトリチウム濃度の変化（ヘリウム浄化系室、置換範囲③）	55
図 4.3-10	空気置換時のトリチウム濃度の変化（ヘリウム浄化系室、置換範囲④）	56
図 4.3-11	空気置換時のトリチウム濃度の変化（ヘリウム浄化系室、置換範囲⑤）	56
図 4.4-1	ポイズン溶解槽及び接続配管のブロック分けの概略	57
図 4.4-2	ホットカラム試験装置のブロック分けの概略	57
図 4.4-3	真空乾燥装置の概略（ポイズン供給系）	58
図 4.4-4	加熱真空乾燥時の内圧及びトリチウム濃度の経時変化（ポイズン溶解槽）	58
図 4.4-5	加熱真空乾燥時の内圧及びトリチウム濃度の経時変化（ホットカラム試験装置のブロック 1・2）	59
図 4.4-6	加熱真空乾燥時の内圧及びトリチウム濃度の経時変化（ホットカラム試験装置のブロック 3）	59
図 4.4-7	空気置換時のトリチウム濃度の変化（ポイズン溶解槽）	60
図 4.4-8	空気置換時のトリチウム濃度の変化（ホットカラム試験装置）	60
図 4.5-1	トリチウム除去範囲の概略（重水浄化系室）	61
図 4.5-2	常温通気乾燥時の露点及び室温の経時変化（B-重水浄化塔）	61
図 4.5-3	常温真空乾燥時の露点及び室温の経時変化（B-重水浄化塔）	62
図 4.5-4	常温真空乾燥時の露点及び室温の経時変化（重水浄化系室）	62
図 4.5-5	空気置換時のトリチウム濃度の変化（重水浄化系室）	63
図 4.6-1	真空乾燥装置の概略（劣化重水貯槽、重水貯槽等）	63
図 4.6-2	常温真空乾燥時の露点及び回収水量の経時変化（劣化重水貯槽、重水貯槽等）	64
図 4.7-1	通気ライン構成の概略（カランドリアタンク等）	64
図 4.7-2	真空乾燥装置の概略（カランドリアタンク等）	65
図 4.7-3	常温通気乾燥時の露点の経時変化（カランドリアタンク等、0～360 時間）	65
図 4.7-4	常温通気乾燥時の露点の経時変化（カランドリアタンク等、0～7,480 時間）	66
図 4.7-5	常温真空乾燥時の露点及び回収水量の経時変化（カランドリアタンク等）	66
図 4.8-1	再生運転時の露点の経時変化（除湿ロータ式トリチウム除去装置）	67
図 4.8-2	再生運転時のトリチウム濃度の経時変化（除湿ロータ式トリチウム除去装置）	67
図 4.9-1	残留水量推定のコールド試験体系	68
図 4.9-2	コールド試験結果（試験 No.1、ドラム缶）	68
図 4.9-3	コールド試験結果（試験 No.2、ドラム缶）	69

図 4.9-4	コールド試験結果（試験 No.3、ドラム缶）	69
図 4.9-5	コールド試験結果（試験 No.3、ペール缶）	70
図 4.9-6	コールド試験結果（試験 No.4、ドラム缶）	70
図 4.9-7	コールド試験結果（試験 No.4、ペール缶）	71
図 4.9-8	コールド試験結果（試験 No.5、ペール缶）	71
図 4.9-9	コールド試験結果（試験 No.6、ペール缶）	72
図 4.9-10	コールド試験結果（試験 No.7、ドラム缶）	72
図 4.9-11	コールド試験結果（試験 No.7、ペール缶）	73
図 4.9-12	コールド試験結果（試験 No.8、ドラム缶）	73
図 4.9-13	コールド試験結果（試験 No.8、ペール缶）	74
図 4.9-14	残留水量の推定精度と残留水－外気間の温度差の関係	74
図 4.9-15	ホット試験結果（1回目）	75
図 4.9-16	ホット試験結果（2回目）	75
図 4.9-17	ホット試験結果（3回目）	76

## Table list

Table 2.2-1	Wearing Standard of Tritium Protective Gear .....	30
Table 3.3-1	Specification of Rotary Type Dehumidifier .....	30
Table 3.3-2	Specification of Membrane Separation Type Dehumidifier .....	31
Table 4.1-1	Summary of Results of Tritium Removal Works .....	33
Table 4.6-1	Tritium Concentration Transition in Air Replacement Work (Heavy Water Storage Tank, etc.) .....	35
Table 4.7-1	Tritium Concentration Transition in Air Replacement Work (Calandria Tank and Peripheral Equipment) .....	35
Table 4.9-1	Cold Test Conditions .....	36
Table 4.9-2	Results of Cold Test .....	36
Table 4.9-3	Results of Hot Test .....	37

## Figure list

Fig. 2.1-1	Schematics of Reactor Core .....	38
Fig. 2.1-2	Schematics of Heavy Water System and Helium System .....	39
Fig. 2.2-1	Tritium Concentration Transition in Heavy Water in Whole Reactor Operation Period .....	40
Fig. 2.2-2	Tritium Protection .....	40
Fig. 3.1-1	Division of Tritium Removal Region .....	41
Fig. 3.2-1	Tritium Removal Work Process .....	42
Fig. 3.3-1	Rotary Type Dehumidifier .....	42
Fig. 3.3-2	Outline of Rotary Type Dehumidifier .....	43
Fig. 3.3-3	Membrane Separation Type Dehumidifier .....	43
Fig. 3.3-4	Outline of Membrane Separation Type Dehumidifier .....	44
Fig. 3.4-1	Heat Transfer Model between Residual Water and Air .....	44
Fig. 3.4-2	Relationship of Upper Limit of Exhaust Speed and Heat Input to Inner Surface Area of Facilities .....	45
Fig. 3.4-3	Relationship of Effective Exhaust Speed to Internal Pressure .....	45
Fig. 4.2-1	Outline of Tritium Removal Device (Heat Exchanger of Heavy Water Circulation Pump) .....	46
Fig. 4.2-2	Time-course of Dew Point, Internal Pressure and Tritium Concentration in Air through Drying under Room Temperature (B-Heat Exchanger) .....	47
Fig. 4.2-3	Time-course of Dew Point, Internal Pressure and Tritium Concentration in Air through Drying under Heating (C-Heat Exchanger) .....	48

Fig. 4.2-4	Time-course of Internal Pressure and Tritium Concentration in Air-through Drying under Heating (A-Heat Exchanger)-----	49
Fig. 4.2-5	Tritium Concentration Transition in Air Replacement Work (A-Heat Exchanger)-----	49
Fig. 4.2-6	Tritium Concentration Transition in Air Replacement Work (B-Heat Exchanger)-----	50
Fig. 4.2-7	Tritium Concentration Transition in Air Replacement Work (C-Heat Exchanger)-----	50
Fig. 4.3-1	Division of Tritium Removal Region in Vacuum Drying Work (Helium Purification System Room)-----	51
Fig. 4.3-2	Outline of Vacuum Drying Device (Helium Purification System Room)-----	51
Fig. 4.3-3	Division of Tritium Removal Region in Air Replacing Work (Helium Purification System Room)-----	52
Fig. 4.3-4	Time-course of Internal Pressure and Tritium Concentration in Vacuum Drying Work (Helium Purification System Room, Block 1)-----	53
Fig. 4.3-5	Time-course of Internal Pressure and Tritium Concentration in Vacuum Drying Work (Helium Purification System Room, Block 2)-----	53
Fig. 4.3-6	Time-course of Internal Pressure and Tritium Concentration in Vacuum Drying Work (Helium Purification System Room, Block 3)-----	54
Fig. 4.3-7	Tritium Concentration Transition in Air Replacement Work (Helium Purification System Room, Region ①)-----	54
Fig. 4.3-8	Tritium Concentration Transition in Air Replacement Work (Helium Purification System Room, Region ②)-----	55
Fig. 4.3-9	Tritium Concentration Transition in Air Replacement Work (Helium Purification System Room, Region ③)-----	55
Fig. 4.3-10	Tritium Concentration Transition in Air Replacement Work (Helium Purification System Room, Region ④)-----	56
Fig. 4.3-11	Tritium Concentration Transition in Air Replacement Work (Helium Purification System Room, Region ⑤)-----	56
Fig. 4.4-1	Division of Tritium Removal Region of Poison Dissolver-----	57
Fig. 4.4-2	Division of Tritium Removal Region of Hot Column Testing Equipment-----	57
Fig. 4.4-3	Outline of Vacuum Drying Device (Poison Supplying System)-----	58
Fig. 4.4-4	Time-course of Internal Pressure and Tritium Concentration in Vacuum Drying Work (Poison Dissolver)-----	58
Fig. 4.4-5	Time-course of Internal Pressure and Tritium Concentration in Vacuum Drying Work (Hot Column Testing Equipment, Block 1&2)-----	59
Fig. 4.4-6	Time-course of Internal Pressure and Tritium Concentration in Vacuum Drying Work (Hot Column Testing Equipment, Block 3)-----	59

Fig. 4.4-7	Tritium Concentration Transition in Air Replacement Work (Poison Dissolver) -----	60
Fig. 4.4-8	Tritium Concentration Transition in Air Replacement Work (Hot Column Testing Equipment)-----	60
Fig. 4.5-1	Outline of Tritium Removal Region (Heavy Water Purification System Room) -----	61
Fig. 4.5-2	Time-course of Dew Point and Room Temperature in Air-through Drying Work (B-Heavy Water Purification Bed) -----	61
Fig. 4.5-3	Time-course of Dew Point and Room Temperature in Vacuum Drying Work (B- Heavy Water Purification Bed) -----	62
Fig. 4.5-4	Time-course of Dew Point and Room Temperature in Vacuum Drying Work (Heavy Water Purification System Room) -----	62
Fig. 4.5-5	Tritium Concentration Transition in Air Replacement Work (Heavy Water Purification System Room)-----	63
Fig. 4.6-1	Outline of Vacuum Drying Device (Heavy Water Storage Tank, etc.)-----	63
Fig. 4.6-2	Time-course of Dew Point and Collected Tritiated Water Quantity in Vacuum Drying Work (Heavy Water Storage Tank, etc.) -----	64
Fig. 4.7-1	Outline of Air-through Line (Calandria Tank and Peripheral Equipment) ---	64
Fig. 4.7-2	Outline of Vacuum Drying Device (Calandria Tank and Peripheral Equipment) -----	65
Fig. 4.7-3	Time-course of Dew Point in Air-through Drying Work (Calandria Tank and Peripheral Equipment, 0-360 hours) -----	65
Fig. 4.7-4	Time-course of Dew Point in Air-through Drying Work (Calandria Tank and Peripheral Equipment, 0-7,480 hours) -----	66
Fig. 4.7-5	Time-course of Dew Point and Collected Tritiated Water Quantity in Vacuum Drying Work (Calandria Tank and Peripheral Equipment)-----	66
Fig. 4.8-1	Time-course of Dew Point in Silica Gel Recharging Operation (Rotary Type Dehumidifier)-----	67
Fig. 4.8-2	Time-course of Tritium Concentration in Silica Gel Recharging Operation (Rotary Type Dehumidifier)-----	67
Fig. 4.9-1	Schematics of Cold Test for Quantity Estimation of Residual Water -----	68
Fig. 4.9-2	Results of Cold Test (Test No.1, Drum Can) -----	68
Fig. 4.9-3	Results of Cold Test (Test No.2, Drum Can) -----	69
Fig. 4.9-4	Results of Cold Test (Test No.3, Drum Can) -----	69
Fig. 4.9-5	Results of Cold Test (Test No.3, Pail Can)-----	70
Fig. 4.9-6	Results of Cold Test (Test No.4, Drum Can) -----	70
Fig. 4.9-7	Results of Cold Test (Test No.4, Pail Can)-----	71
Fig. 4.9-8	Results of Cold Test (Test No.5, Pail Can)-----	71

Fig. 4.9-9	Results of Cold Test (Test No.6, Pail Can)-----	72
Fig. 4.9-10	Results of Cold Test (Test No.7, Drum Can)-----	72
Fig. 4.9-11	Results of Cold Test (Test No.7, Pail Can)-----	73
Fig. 4.9-12	Results of Cold Test (Test No.8, Drum Can)-----	73
Fig. 4.9-13	Results of Cold Test (Test No.8, Pail Can)-----	74
Fig. 4.9-14	Relationship of Estimation Precision to Temperature Difference between Residual Water and Air-----	74
Fig. 4.9-15	Results of Hot Test (1st)-----	75
Fig. 4.9-16	Results of Hot Test (2nd)-----	75
Fig. 4.9-17	Results of Hot Test (3rd)-----	76

This is a blank page.

## 1. 概要

日本原子力研究開発機構 新型転換炉原型炉施設「ふげん」（以下、「ふげん」という。）は、熱出力 557 MWt、電気出力 165 MWe の重水減速沸騰軽水冷却圧力管型原子炉である。「ふげん」は、1978 年 3 月 20 日の最小臨界から 2003 年 3 月 29 日の運転終了までの約 25 年間にわたり安定運転を継続した。その後、原子炉等規制法に基づき、2008 年 2 月 12 日に廃止措置計画の認可を取得し、廃止措置に移行した上で現在、解体作業を進めている。

「ふげん」では、減速材として重水を使用しているため、重水素による中性子の吸収によってトリチウムが重水中に生成される。このため、重水を取り扱う設備である炉心本体（特に、カランドリアタンク）、重水系及びヘリウム系は、トリチウムで汚染されている。その汚染形態は、重水中に水分子として存在するトリチウムと機器・配管類の金属内面の酸化皮膜中の結晶水として存在するトリチウムが考えられる。これらの設備の解体撤去においては、環境へのトリチウムの放出及びトリチウムによる作業員の内部被ばくのリスク並びにそれらを低減するために解体作業時のトリチウム管理や防護装備を着用しての作業が必要となり、作業の負担が増加するため、あらかじめトリチウム汚染の除去（以下、「トリチウム除去」という。）を行い、これらのリスクと負担を軽減する必要がある。そのため、4 段階に区分した廃止措置の第一段階（重水系・ヘリウム系等の汚染の除去期間）の作業の一環として、カランドリアタンク、重水系及びヘリウム系のトリチウム除去作業を 2008 年度から開始し、2017 年度に完了した。

トリチウム除去作業は、ドレンアウト等の通常操作によって重水を設備から抜き出した後、系統内に残留している重水（以下、「残留トリチウム水」という。）を回収し、酸化皮膜中のトリチウムを低減するという手順で行った。残留トリチウム水の回収には、系統の容積や機器・配管等の設置場所等を考慮して複数のブロックに分割し、各ブロック内に乾燥した空気を送る方法（以下、「通気乾燥」という。）及び各ブロック内の空気を排気して減圧する方法（以下、「真空乾燥」という。）を採用した。この作業では、各ブロックの内容積やトリチウム汚染の程度等を考慮して分別範囲を決定し、各ブロックの残留トリチウム水の回収作業で得られた成果を次のブロックの作業に反映することで、作業の安全性の向上と作業方法の合理化を図った。また、酸化被膜中のトリチウムの低減には、空気中の水分との同位体交換等によって酸化皮膜から放出されるトリチウムを含んだ系内空気を外気で置換する方法（以下、「空気置換」という。）を採用した。

残留トリチウム水の回収作業では、その進捗状況を把握するために残留量を計測する必要があるが、実測することはできない。そこで、残留トリチウム水の回収作業中の残留トリチウム水からの熱の出入りに着目して、その残留量を推定する手法を検討し、その適用性を検証した。

本報告書は、これらのカランドリアタンク、重水系及びヘリウム系のトリチウム除去作業に係る成果をまとめたものである。

## 2. 「ふげん」重水関連設備とトリチウム汚染

### 2.1 重水関連設備

「ふげん」では、軽水と比較して中性子吸収が少なく、核分裂し易い条件を作ることができる重水を減速材として採用しており、冷却材には軽水を使用している。炉心部は、重水減速材を満たした堅型円筒状のカランドリアタンクにカランドリア管が一定間隔で 224 本配列され、そこに燃料集合体が装荷される圧力管が挿入された構造となっている（図 2.1-1）。また、カランドリアタンクには、重水の水質管理及び炉の緊急停止や重水素再結合等の機能確保のために、重水系（重水冷却系、重水浄化系、ポイズン供給系）とヘリウム系（ヘリウム循環系、ヘリウム浄化系）が接続されている（図 2.1-2）。

#### (1) 重水冷却系

圧力管とカランドリア管の間隙部には、熱絶縁のために炭酸ガスが満たされているが、中性子照射やγ線吸収等によって重水には熱が付加されるため、重水冷却系はこの熱を除去することを目的としている。重水は、重水冷却器で冷却され、制御棒と中性子検出器の冷却を兼ねながら炉心タンク内に供給されて、カランドリアタンクの出口での重水の温度を 70℃以下に保っている。当該系統を構成する主要な機器は、重水ダンプタンク（1 基）、重水冷却器（2 基）、重水貯槽（2 基）、重水ドレンタンク（2 基）、重水循環ポンプ（3 台〔内 1 台予備〕）である。

#### (2) 重水浄化系

運転に伴って腐食生成物をはじめとする不純物が重水中に混入し、応力腐食の発生や燃焼度の低下の原因となる。また、原子炉の余剰反応度を抑えるために、ポイズン（ホウ酸）を添加しており、燃料の燃焼度に応じてポイズンの濃度を安全に下げる必要がある。そのため、重水浄化系は、不純物やポイズンを重水から除去することを目的としている。当該系統を構成する主要な機器は、ポイズン除去塔（2 基）、重水浄化塔（2 基）、重水化塔（1 基）、樹脂洗浄塔（1 基）、浄化系重水貯槽（1 基）、劣化重水貯槽（2 基）、軽水貯槽（1 基）、樹脂交換用重水タンク（1 基）、再生熱交換器（3 基）である。

#### (3) ポイズン供給系

原子炉の余剰反応度を抑えるため、重水にポイズン（ホウ酸）を添加するための設備である。当該設備は、攪拌機と加熱器を有したポイズン溶解槽（1 基）となっている。

#### (4) ヘリウム循環系

カランドリアタンクには、図 2.1-1 に示すように、重水の水位を一定に保つためのオーバーフロースペースと異常時に原子炉を急速に停止するために重水をダンプするためのダンプスペースがあり、通常時はカバーガスの気圧を調整することで両スペースの水位差を保っている。また、原子炉の運転に伴って放射線により重水が重水素と酸素に分解される

ため、爆発の危険性が生じないように重水素の濃度を一定値以下に抑える必要がある。そのため、ヘリウム循環系は、カランドリアタンクにカバーガスとしてヘリウムを供給するとともに、放射線分解によって発生した重水素と酸素を再結合させることを目的としている。当該系統を構成する主要な機器は、再結合器（2基）、冷却器（1基）、気液分離器（1基）である。なお、再結合器には0.5%パラジウム含有アルミナペレット触媒が充填されている。

#### (5) ヘリウム浄化系

原子炉の出力上昇等により、系統の体系が膨張した場合には余分なヘリウムを排気することとなるが、湿分として重水が含まれている。また、原子炉の運転に伴って窒素、酸素等の不純物が混入し、ヘリウムガスの純度が低くなる。そのため、ヘリウム浄化系は、排気するヘリウムガスを脱湿する（重水を回収する）とともに、不純物を除去してヘリウムガスの純度を保つことを目的としている。当該系統を構成する主要な機器は、冷却器（1基）、脱湿器（2基）、活性炭吸着器精製器（1基）である。

### 2.2 トリチウムの発生源とその取扱い

減速材として使用している重水中では、重水素による中性子吸収反応 ( $n-\gamma$  反応) によって、水素の放射性同位体であるトリチウムが生成される。重水中のトリチウム濃度は、図 2.2-1 に示すように、運転に伴って上昇し、2003 年 3 月の運転終了時点で約  $2.6 \times 10^8$  Bq/cm<sup>3</sup> に到達した。そのため、カランドリアタンクを含む重水系・ヘリウム系はトリチウムによって汚染されている。その汚染形態としては、重水中に水分子として存在するトリチウムと機器・配管類の金属内面の酸化皮膜中の結晶水として存在するトリチウムが考えられる。

トリチウムを内包した系統を大気に開放する場合、図 2.2-2 に示すように、作業エリア以外の環境へのトリチウム放出を防止するために、ビニルシートを二重にしたクリーンハウスを設置し、トリチウム除去用換気系（以下、「非常用ガス処理系」という。）によってハウス内の空気を換気するとともに、ハウス内を負圧に維持する必要がある。また、作業者は、トリチウムによる内部被ばくを低減するために、表 2.2-1 に示すように、そのハウス内のトリチウム濃度に応じてトリチウム防護具（エアラインマスク及びトリチウム防護服）を着用し、厚手のゴム手袋を 2 重に装着しなければならない。さらに、非常用ガス処理系の換気量によって、クリーンハウスの容積やトリチウム防護具を着用してハウスに入ることができる作業者の人数が制限される。

そのため、重水系・ヘリウム系の解体撤去に先立って、環境へのトリチウムの放出量及びトリチウムによる内部被ばくリスクを低減するとともに、作業性を確保するため、カランドリアタンクを含む重水系・ヘリウム系等のトリチウム除去作業を 2008 年度から開始し、2017 年度に完了した。

### 3. トリチウム除去作業の概要

#### 3.1 トリチウム除去の手順

カランドリアタンクを含む重水系・ヘリウム系のトリチウム除去作業は、①重水の抜出し、②残留トリチウム水の回収、③酸化皮膜中のトリチウムの低減の3ステップで行った。

ステップ①では、ドレン操作や配管等の切断・穿孔等の方法によって、設備から重水を抜き出した。このステップで抜出した重水は、ステップ②において回収した残留トリチウム水の一部と合せて、Co-60を主としたγ核種の除去（放射能濃度1.85 Bq/cm<sup>3</sup>以下）及び水質基準に適合させるための処理（全有機炭素濃度2 ppm以下、電導度50 μS/cm未満）を行い、2014年4月までに「ふげん」の施設外へ全量（約270トン）を搬出した。

ステップ②では、系統の容積や機器・配管等の設置場所等を考慮して複数のブロックに分割し（図3.1-1）、通気乾燥及び真空乾燥によって残留トリチウム水を水蒸気として取り出し、コールドトラップ（凝縮器と熱交換器を含む）で回収した。通気乾燥では、空気の流路上に存在する水分は直接回収されるが、枝管内の水分は主通気ラインへの水蒸気の拡散による移動によって徐々に回収されるという特徴を有する。一方で、真空乾燥では、系統全体の空気を排出するために全体の水分を直接回収できるが、蒸発速度が速いために水温が低下して回収効率が低下する可能性があるという特徴を有する。このため本作業では、容積が大きく、残留トリチウム水が多量に存在すると考えられ、かつ主要な機器類を通る流路が確保できるブロックについては、通気乾燥により主要なラインを乾燥した後、真空乾燥により枝ラインを乾燥する方法を採り、それ以外のブロックについては真空乾燥を主とした方法を採用した。

ステップ③では、ステップ②で対象としたブロックについて、空気置換によって酸化皮膜中のトリチウムの放出を促して、その低減を図った。空気置換は、「3.5 トリチウム除去作業の完了判断基準」で述べるトリチウム除去作業の完了判断基準を満たすまで継続した。なお、酸化皮膜中のトリチウムは、高温に加熱すること及び物理的又は化学的に内表面を除去することでも取り除くことができるが、これらの方法は対象物の規模が極めて大きいことやアクセス性が悪いこと等の理由から現場で直接適用することができないため、ふげんでは空気置換による低減方法を採用した。

#### 3.2 残留トリチウム水の回収作業工程

本作業は、図3.1-1の各ブロックの内容積及びそのトリチウム汚染の程度等を考慮して、以下のように段階的に実施した。各ブロックの残留トリチウム水の回収の工程を図3.2-1に示す。各ブロックの作業で得られた成果は、次のブロックの作業に反映し、作業の安全性の向上と作業方法の合理化を図った。なお、各ブロックの詳細な作業内容及び作業実績については、「4. トリチウム除去作業の実績」において記述する。

##### ① 重水循環ポンプ用熱交換器の残留トリチウム水の回収

トリチウムで汚染された小型な実機器として重水循環ポンプ用熱交換器3基（約0.09 m<sup>3</sup>/基、図3.1-1中のブロック①）を対象として、それぞれに、外部からの特別な加熱を伴わない通気乾燥（以下、「常温通気乾燥」という。）、ヒータ等による対象機

器の加熱を伴う通気乾燥（以下、「加熱通気乾燥」という。）及びヒータ等による対象機器の加熱を伴う真空乾燥（以下、「加熱真空乾燥」という。）を行い、その適用性及び作業の進捗管理に係るパラメータを確認した。

② ヘリウム浄化系室の残留トリチウム水の回収

対象機器の規模拡大に当たって、作業の安全性（トリチウムの漏えいリスク）を考慮し、トリチウム汚染が少ない設備であるヘリウム浄化系及びヘリウム循環系について、原子炉補助建屋 ヘリウム浄化系室内に設置されている範囲（約 3.4 m<sup>3</sup>、図 3.1-1 中のブロック②）を対象に加熱真空乾燥を行い、より規模の大きい設備への適用性及び作業の安全性を確認した。

③ ポイズン供給系の残留トリチウム水の回収

ヘリウム浄化系と比較して、トリチウム汚染が多い設備であるポイズン供給系（約 1.2 m<sup>3</sup>、図 3.1-1 中のブロック③）を対象に加熱真空乾燥を行い、作業の安全性を確認した。

④ 重水浄化系室の残留トリチウム水の回収

重水浄化系について、原子炉補助建屋 重水浄化系室内に設置されている範囲（約 8.65 m<sup>3</sup>、図 3.1-1 中のブロック④）を対象として、対象設備全体の加熱が困難であるブロック（図 3.1-1 中のブロック⑤とブロック⑥）への適用を検討している、外部からの特別な加熱を伴わない真空乾燥（以下、「常温真空乾燥」という。）の適用性を確認した。なお本範囲については、常温通気乾燥により主要な機器から残留トリチウム水を回収した後に常温真空乾燥により残りの残留トリチウム水を回収するため、狹隘箇所で使用することができる中空糸膜分離式トリチウム除去装置（「3.3 残留トリチウム水回収のための通気乾燥装置」参照）を製作し、B-重水浄化塔を対象としてその適用性を確認したが、塔内に残留するイオン交換樹脂のために通気乾燥では回収効率が悪いことが判明したため、対象設備全体に対しては常温真空乾燥のみを適用した。

⑤ 劣化重水貯槽、重水貯槽等の残留トリチウム水の回収

「重水浄化系室の残留トリチウム水の回収」で得られた成果及び「3.4 残留トリチウム水回収のための真空乾燥装置」の検討結果を踏まえて、原子炉補助建屋に設置されている重水冷却系及び重水浄化系の残りの範囲（約 220 m<sup>3</sup>、図 3.1-1 中のブロック⑤）を対象に常温真空乾燥を行った。

⑥ カランドリアタンク等の残留トリチウム水の回収

カランドリアタンクと重水冷却系及びヘリウム循環系の原子炉建屋に設置されている範囲（約 280 m<sup>3</sup>、図 3.1-1 中のブロック⑥）については、主要な機器（カランドリアタンク、重水ドレンタンク、重水冷却器 2 基及び重水循環ポンプ 3 台）が大口径配管（12～16 インチ）により接続されており、かつ重水浄化系室における常温真空乾燥の適用性の確認に時間を要するため、常温通気乾燥により主要な機器及び大口径配管内の残留トリチウム水を回収した。その後、残りの範囲にある残留トリチウム水については、「重水浄化系室の残留トリチウム水の回収」で得られた成果及び「3.4 残留トリチウム水回収のための真空乾燥装置」の検討結果を踏まえて、真空乾燥装置を用い

て常温真空乾燥により回収した。なお、本範囲は容積が大きいため、通気乾燥には風量の大きい除湿ロータ式トリチウム除去装置（「3.3 残留トリチウム水回収のための通気乾燥装置」参照）を使用した。

### 3.3 残留トリチウム水回収のための通気乾燥装置

#### 3.3.1 除湿ロータ式トリチウム除去装置

除湿ロータ式トリチウム除去装置の外観を図 3.3-1、構成の概略を図 3.3-2、仕様を表 3.3-1 に示す。本装置は、プレクーラ及び除湿ロータにおいて水分を除去し、乾燥空気（最高到達露点 $-20^{\circ}\text{Cdp}$ 以下）を風量  $500\text{ Nm}^3/\text{h}$  で供給する大型装置である。除湿ロータには、ダイキン工業株式会社製のハニードライ（HPM-05CEW）を使用しており、ハニカム構造のセラミック繊維ペーパーに吸着剤としてシリカゲルを化学結合させた製品である。この除湿ロータは、空気中の水分を取り除く「吸湿ゾーン」とシリカゲルに吸着された水分を取り除く「再生ゾーン」に分かれており、所定の時間でロータが回転することで吸湿ゾーンと再生ゾーンが入れ替わり、連続して水分を除去できるシステムとなっている。また、装置内の圧力は、各種ファンの運転とヒータによる加熱のために大気圧より高くなることから、作業環境へのトリチウムの漏えいを防ぐことを目的として、各種ファン、再生ヒータ及び除湿ロータをステンレス製の密閉ボックスで覆い、そのボックスを装置の処理ラインに接続し除湿する構造となっている。

#### 3.3.2 中空糸膜分離式トリチウム除去装置

中空糸膜分離式トリチウム除去装置の外観を図 3.3-3、構成の概略を図 3.3-4、仕様を表 3.3-2 に示す。本装置は、除湿ユニットに中空糸状ポリイミドの水分選択透過膜を採用したことで、除湿ロータ式トリチウム除去装置のように吸着剤を再生する機構を持たないため、小型で可搬性の高い装置となっている。また、内蔵された真空ポンプを用いることで真空乾燥を行うことが可能となっている。

本装置には、大学共同利用機関法人自然科学研究機構の有する特許<sup>2)</sup>に係る除湿システムを使用している。これは、湿潤空気を凝縮器及び中空糸膜モジュールを通して除湿し、その一部を中空糸膜モジュールの透過側（パージ側）へ送り、水分を含んで排出されたものを空気圧縮機の手前に戻すシステムである。中空糸膜モジュールでは、湿潤空気が中空糸膜の内側（処理側）を通過する際に、中空糸膜の外側（パージ側）との圧力差によって水分がパージ側へ移行することで、湿潤空気が除湿される。通常、この圧力差は空気圧縮機を用いて処理側を加圧することで大きく取られるが、その場合、装置内が正圧となってトリチウム漏えいのリスクが高くなる。そのため、本装置では真空ポンプを用いてパージ側を減圧にすることで、処理側の圧力を低く抑えられている。この減圧方式における処理側及びパージ側の圧力や流量等の最適な運転条件とその除湿性能については、株式会社化研にて検討・確認されており、本装置は露点 $-50^{\circ}\text{Cdp}$ 以下の乾燥空気を供給できる<sup>3)</sup>。

### 3.4 残留トリチウム水回収のための真空乾燥装置

真空乾燥では、蒸発に伴って蒸発潜熱が奪われ、残留トリチウム水の温度は低下する。外部から特別な加熱をしない場合、残留トリチウム水の蒸発速度（すなわち、真空ポンプによる系内空気の排気速度）が大きく、蒸発による除熱量が外気との温度差による入熱量を上回っていると、水温は低下し続け、最終的に表面が凍結して回収効率が極端に低下する可能性がある。そのため、常温真空乾燥においては、表面が凍結しないような排気速度で真空乾燥装置を設計する必要がある。ここでは、重水浄化系を対象とした常温真空乾燥作業においてその適用性が確認できたことを踏まえて、より規模の大きな設備への常温真空乾燥の適用のために真空乾燥装置の設計要件を検討した。

#### 3.4.1 真空ポンプによる排気速度の上限値

常温真空乾燥における排気速度の上限値  $v_{me}$  (L/min) は、水の凍結が始まる温度  $T_f$  (4°C) において、蒸発による除熱量が外気との温度差による入熱量と等しくなり、それ以上水温が低下しない状態となる排気速度である。このような状態において、系内の水蒸気圧が常にその水温における飽和蒸気圧であると仮定すると、蒸発による除熱量  $Q_r$  (W) は、気体の状態方程式を用いて、

$$Q_r = (H \times 10^3) \times \left( \frac{v_{me}}{60} \times \frac{n}{V \times 10^3} \right) = H \times \frac{v_{me}}{60} \times \frac{P_v}{R \times (273.15 + T_s)} \quad (3.1)$$

となる。ここで、 $H$  は 4°C における水の蒸発潜熱 (44.8 kJ/mol<sup>4)</sup>)、 $n$  は水蒸気の本数 (mol)、 $V$  は水蒸気の体積 (m<sup>3</sup>)、 $T_s$  は系内の温度 (10°C)、 $P_v$  は水温 4°C における飽和水蒸気圧 (813.5 Pa)、 $R$  は気体定数 (8.31 J/(mol・K)) である。なお、系内の温度  $T_s$  は、作業エリアの温度と等しいものとし、外気からの入熱量が最小となる時期の温度を想定した。また、飽和水蒸気圧  $P_v$  は、Tetens の実験式<sup>5)</sup>

$$P_v = 6.11 \times 10^{\{7.5T_f / (237.3 + T_f)\}} \times 100 \quad (3.2)$$

を用いて算出した。

次に、外気との温度差による入熱量を考える。残留トリチウム水が凍結する直前における外気から残留トリチウム水への熱移動のモデルを図 3.4-1 に示す。外気からの残留トリチウム水への入熱は機器・配管等の金属材を介したもののみとし、残留トリチウム水膜が機器・配管等の表面上に一様に存在する場合、残留トリチウム水中の熱流束  $q_w$  (W/m<sup>2</sup>) は、

$$q_w = \frac{T_r - T_f}{\left( \frac{1}{h} + \frac{\delta_M}{\lambda_M} + \frac{\delta_w}{\lambda_w} \right)} \quad (3.3)$$

で表される。ここで、 $T_r$  は作業エリアの温度 (10°C)、 $h$  は静止した空気の熱伝達率 (5.0 W/(m<sup>2</sup>・K)<sup>6)</sup>)、 $\lambda_w$  は水の熱伝導率 (0.561 W/(m・K)<sup>7)</sup>)、 $\lambda_M$  はステンレス鋼 (SUS304) の熱伝導率 (14.39 W/(m・K)<sup>8)</sup>)、 $\delta_M$  は機器・配管等のステンレス鋼材の厚み (0.010 m)、 $\delta_w$  は機器・配管等の表面上の残留トリチウム水膜の厚さ (0.005 mm) である。これより、熱流束 ( $q_w$ ) は約 28.6 W/m<sup>2</sup> となり、残留トリチウム水への入熱量  $Q_i$  (W) は、対象機器・配管等の内表面積を  $S$  (m<sup>2</sup>) とすると、

$$Q_i = q_w \times S = 28.6 \times S \quad (3.4)$$

となる。

したがって、式(3.1)と式(3.4)より、真空ポンプによる排気速度の上限値  $v_{me}$  (L/min) は、

$$v_{me} = \frac{Q_i}{\frac{H}{60} \times \frac{P_v}{R \times (273.15 + T_s)}} = 1,716 \times \frac{S \times R \times (273.15 + T_s)}{H \times P_v} \quad (3.5)$$

となる。対象設備の内表面積と  $v_{me}$  及び  $Q_i$  の関係を図 3.4-2 に示す。なお、図中のプロットは、重水浄化系室内に設置されている重水浄化系、原子炉建屋側に設置されている重水冷却系の大型機器等（重水ダンプタンク、重水冷却器×2基、重水ドレンタンク、大口径配管）、カランドリアタンク、並びに原子炉補助建屋に設置されている重水冷却系及び重水浄化系の大型機器（重水貯槽タンク×2基、劣化重水貯槽×2基、重水ドレンタンク、浄化系重水貯槽、重水貯槽用拔出槽、劣化重水貯槽用拔出槽、樹脂交換用重水タンク）について計算した結果である。この結果から、劣化重水貯槽、重水貯槽等及びカランドリアタンク等の残留トリチウム水の回収においては、真空乾燥装置の設置スペースやコスト等の観点から予定していた排気速度（1,000～2,000 L/min 程度）では残留トリチウム水が凍結するおそれはないことを確認した。

### 3.4.2 その他の設計要件

真空乾燥装置の設計に当たっては、真空ポンプによる排気速度を上限値以下にすることに加えて、①対象設備内の圧力（水蒸気量）を考慮した対象設備内の空気の排気速度（実効排気速度）の下限値の設定、②主要な機器に接続する配管のコンダクタンス（口径と長さ）を考慮した真空乾燥装置を接続する箇所を選定、③上記①・②に基づいて装置を構成する配管のコンダクタンス（口径と長さ）と真空ポンプの排気速度の決定、④排気中の水分（残留トリチウム水）を全て捕集するために必要な冷却器の冷却性能の決定が必要となる。なお、実際には、装置の設置スペースやコスト等も考慮して真空乾燥装置を設計した。

設計要件①については、次の通りに設定した。真空乾燥において系内圧力は、多量の残留トリチウム水が存在する場合には飽和蒸気圧付近でほぼ一定となるが、残留水分量が減少すると圧力は再び低下し、100 Pa 以下に到達する。系内圧力が低下すると、配管のコンダクタンスは減少するため、実効排気速度が減少する。これに伴って、蒸発による除熱量が減少し、残留トリチウム水と外気との温度差が小さくなり、蒸発量が減少するため、残留トリチウム水の回収効率が低下する。そのため、このような状況においても回収効率をある程度維持できるように、実効排気速度の下限値は系内圧力 100 Pa において 100 L/min とした。

設計要件②・③において、実効排気速度及び配管のコンダクタンスは次の通りに評価した。実効排気速度  $v_e$  (L/min) は、真空乾燥装置に使用する真空ポンプの排気速度を  $v_d$  (L/min)、真空乾燥装置の配管のコンダクタンスを  $C_d$  ( $m^3/s$ )、設備側の配管のコンダクタンスを  $C_s$  ( $m^3/s$ ) とすると、

$$\frac{1}{v_e} = \frac{1}{v_d} + \frac{1}{C_d \times 1000 \times 60} + \frac{1}{C_s \times 1000 \times 60} \quad (3.6)$$

で表される。配管のコンダクタンスは、粘性流領域では圧力に比例し、分子流領域では圧力に依存しない。系統を構成する配管及び真空乾燥装置に使用する予定の配管の内径は数 cm～数十 cm であり、高真空（1 Pa 以下）でなければ空気の平均自由行程は配管内径より十分小さいため、配管内の気体の流れは粘性流とみなすことができる。したがって、配管のコンダクタンス  $C$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) は、Hagen-Poiseuille の法則より

$$C = \frac{\pi}{128\mu} \frac{D^4}{L} P = 1,353 \frac{D^4}{L} P \quad (3.7)$$

となる。ここで、 $\mu$  は空気の粘性係数 ( $1.813 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ )、 $P$  は配管内平均圧力 (Pa)、 $D$  は配管内径 (m)、 $L$  は配管長 (m) である。なお、空気の粘性係数は、作業エリアの年平均温度  $20^\circ\text{C}$  を用いて、以下の計算式<sup>9)</sup>により算出した。

$$\mu = \frac{6 \cdot T_M^{3/2}}{T_M + S} = 1.458 \times 10^{-6} \times \frac{(T + 273.15)^{3/2}}{T + 383.55} \quad (3.8)$$

劣化重水貯槽、重水貯槽等の残留トリチウム水の回収及びカランドリアタンク等の残留トリチウム水の回収においては、それぞれ 1,000 L/min と 2,000 L/min の排気性能を有する真空乾燥装置を設置して使用する予定であったため、その実効排気速度を式(3.6)と式(3.7)を用いて計算した。なお、劣化重水貯槽、重水貯槽等について、装置から最も離れた主要な機器から装置接続部までの配管は 40A 配管 (Sch40、長さ約 30 m)、50A 配管 (Sch40、長さ約 48 m) 及び 80A 配管 (Sch40、長さ約 34 m) であり、装置接続部から真空ポンプまでは長さ約 2.5 m の内径 41.5 mm の耐圧チューブで構成した。また、カランドリアタンク等について、装置から最も離れた主要な機器から装置接続部までの配管は 350A 配管 (Sch40、長さ約 5 m)、400A 配管 (Sch40、長さ約 8 m) 及び 400A 配管 (Sch80、長さ約 27 m) であり、装置接続部から真空ポンプまでは長さ約 6 m の内径 40 mm 及び長さ約 13 m の内径 80 mm の耐圧チューブ等で構成した。以上より、 $v_e$  と系内圧力との関係を、常温真空乾燥の適用性確認を行った重水浄化系室の計算結果とともに図 3.4-3 に示す。いずれの場合においても設計要件①を満たしている。

設計要件④については、次の通りに決定した。通常、蒸発によって発生した水蒸気を再び液体に戻すためには、蒸発に要したエネルギーと同量のエネルギーを取り除く必要がある。外気との温度差による入熱が全て残留トリチウム水の蒸発に消費され、発生した水蒸気が冷却器に到達するまでに再凝縮しないとすると、排気中の水分を全て捕集するためには、式(3.1)と式(3.2)より、作業エリアの温度  $20^\circ\text{C}$  において、劣化重水貯槽、重水貯槽等では約 720 W、カランドリアタンク等では約 1,430 W の冷却性能が必要となる。

### 3.5 トリチウム除去作業の完了判断基準

「ふげん」でのトリチウム除去作業の完了要件は、重水系・ヘリウム系の解体撤去工事における被ばくの低減を図る観点から、「対象機器、配管類を開放した場合の作業環境中のトリチウム濃度が予め定めた目標値以下であること」である。この目標値とは、トリチウムによる内部被ばく低減のための保護具着用等の防護が軽減できるレベルである。「ふげん」では、表 2.2-1 に示したように、作業環境中のトリチウム濃度が  $8 \times 10^{-2} \text{ Bq}/\text{cm}^3$  以上の場合にはエアライ

ンマスクを、 $8 \times 10^{-1} \text{ Bq/cm}^3$  以上の場合にはエアラインマスク及びトリチウム防護服を着用しなければならない。このため、トリチウム除去作業の完了要件は、少なくとも「トリチウム防護服の着用を回避できるレベル ( $8 \times 10^{-1} \text{ Bq/cm}^3$  未満)」を満足することである。なお、空気置換時の系内トリチウム濃度の推移から作業期間内に「エアラインマスクの着用を回避できるレベル ( $8 \times 10^{-2} \text{ Bq/cm}^3$  未満)」を達成できると判断される場合には、解体撤去工事においてエアラインマスク着用による作業性の低下を避けるためにこれを目指すこととした。

空気置換作業においては、系内トリチウム濃度を定期的に測定し、対象設備を開放した場合の作業環境中のトリチウム濃度を計算し、その結果が完了要件を満足することを確認した上で、実際に対象設備を開放して作業環境中のトリチウム濃度を測定・確認し、トリチウム除去工事の完了の可否を判断した。対象設備の開放前の確認項目は、①系内のトリチウムが一瞬で作業環境中へ拡散したと仮定した場合に作業環境中のトリチウム濃度が目標値を超えないこと、②作業環境の換気が停止した場合に、1時間経過後の作業環境中のトリチウム濃度が目標値を超えないことである。

確認項目①については、次の通りに考えた。対象設備はトリチウム除去作業終了後、その解体撤去工事の開始まで密閉されるため、内部のトリチウム濃度は酸化皮膜から放出によって上昇する。そこで、保守的に解体撤去工事の着手直前に再度空気置換を行い、内部のトリチウム濃度を下げて内部被ばくのリスクを最小限にすると考える。したがって、確認要件①は、  

$$(\text{空気置換直後の系内トリチウム濃度}) \times (\text{対象設備の容積}) \div (\text{作業環境の容積}) < (\text{目標値})$$
となる。

確認項目②については、次の通りに考えた。対象設備の解体撤去作業中に、作業環境の換気系が停止した場合、作業環境中のトリチウム濃度が上昇する可能性があるため、作業者は速やかに作業環境（作業ハウス）から退出する必要がある。作業ハウスからの退出時には、保守的に簡易的な漏えい防止策等の安全措置や作業者の汚染サーベイ等に時間を要すると考え、作業者全員の退出に必要となる時間を1時間とした。この退出時間内において、トリチウムによる有意な内部被ばくを避けるためには、換気系停止から1時間経過後の作業環境中のトリチウム濃度が目標値未満でなければならない。したがって、確認要件②は、

$$(\text{系内トリチウム濃度の上昇率}) \times (\text{退出時間}) \times (\text{対象設備の容積}) \div (\text{作業環境の容積}) < (\text{目標値})$$

となる。

実際の開放確認作業は、次の通りに実施した。通常の解体撤去工事はトリチウム除去機能を持たない換気系（以下、「一般換気系」という。）による換気の下で実施されるが、トリチウム汚染された系統の解体撤去工事ではトリチウム除去機能を持った非常用ガス処理系による換気を備えておく必要がある。非常用ガス処理系は一般換気系よりも換気量が少ないため、非常用ガス処理系による換気の下でトリチウム除去の完了要件を満足できれば解体撤去工事の安全性は確保される。また、対象設備の解体に伴って開口面積が大きくなり、作業環境へのトリチウム放出率が増加する。しかしながら、開放確認作業ではそのような状態を模擬できないため、対象設備内の空気の放出が可能な限り多くなるように開口部を設ける必要がある。したがって、開放確認作業では、非常用ガス処理系による換気の下で、開口部設置に伴う対象

設備内の空気の流れ及びトリチウムの放出量を考慮して、2 箇所以上の離れた箇所に可能な限り大きな開口部を設けることとした。このとき、解体撤去工事は 1 日 6 時間の作業と仮定し、トリチウム除去工事の完了判断の基準は、

$$(\text{系内トリチウム濃度の上昇率}) \times (\text{1 日の作業時間}) < (\text{目標値})$$

となる。なお、系内トリチウム濃度の上昇率は、作業環境中のトリチウム濃度を開放開始から 3 時間まで 1 時間毎に測定することで決定した。

## 4. トリチウム除去作業の実績

### 4.1 はじめに

残留トリチウム水の回収は、「3. トリチウム除去作業の概要」で述べたように、カランドリアタンク、重水系及びヘリウム系を複数のブロックに分割し（図 3.1-1）、加熱下又は非加熱下において通気乾燥及び真空乾燥を適用する（図 3.2-1）ことで実施した。このとき、その容積やトリチウム汚染の程度等を考慮して分別範囲を決定し、そのブロックの残留トリチウム水の回収作業で得られた成果を次のブロックの作業に反映することで、作業の安全性の向上と作業方法の合理化を図った。残留トリチウム水の回収完了後、ブロック毎にトリチウム除去作業の完了判断基準を満たすように、空気置換によって酸化皮膜中のトリチウムの低減を図った。また、通気乾燥に使用する除湿ロータ式トリチウム除去装置は、吸着材（シリカゲル）へのトリチウム水の吸着によってトリチウムで汚染されるので、当該装置を安全に取り外して処分することを目的として、系統のトリチウム除去作業が完了した後に当該装置についてもトリチウム除去を行った。本章では、各ブロック及び除湿ロータ式トリチウム除去装置のトリチウム除去作業の作業内容及び作業実績を示す。

また、残留トリチウム水の回収作業の進捗状況を把握するためには、その残留量を機器・配管等の設計重量と現状の重量の差から計算する必要があるが、現場に設置された状態では計測できない。そこで、残留トリチウム水の回収作業中の残留トリチウム水からの熱の出入りに着目して、その残留量を推定する手法を検討し、その適用性を検証した。

なお、これらのトリチウム除去作業及び残留トリチウム水量の推定手法の検討の実績の概略を表 4.1-1 に示す。

### 4.2 重水循環ポンプ用熱交換器のトリチウム除去作業

#### 4.2.1 作業方法

重水循環ポンプ用熱交換器 3 基 (A/B/C) を系統から取り外してトリチウム除去装置に接続し、以下の通りに常温通気乾燥、加熱通気乾燥、加熱真空乾燥の 3 つの条件で残留トリチウム水の回収を行った。トリチウム除去装置は除湿ロータユニットと真空ポンプで構成されており、その概略を図 4.2-1 に示す。残留トリチウム水の回収完了後、非常用ガス処理系によって各熱交換器内の空気を吸引することで空気置換を行い、酸化皮膜中のトリチウムの低減を図った。空気置換は、30 分間吸引した後、密閉状態で約 1～6 日間保持することを 1 回の操作として、繰返し行った。このとき、空気置換直前と直後の内部のトリチウム濃度を測定し、その変化（酸化皮膜からのトリチウムの放出率）を確認した。なお、内部のトリチウム濃度は、内部の空気をポンプで吸引して水蒸気成分を水バブラで捕集し、液体シンチレーションカウンターでそのバブラ水を測定することで確認した。

##### ① 常温通気乾燥

B-重水循環ポンプ用熱交換器（以下、「B-熱交換器」という。）を対象として、ヒータによる加熱をせずに内部の空気を間欠的に循環させて、トリチウム除去装置の熱交換器及び除湿ロータユニットにおいて空気中の水分を除去した。この乾燥作業では、B-熱

交換器の入口側と出口側の露点がほぼ一致してから一定の間隔で通気を停止して真空ポンプによる真空引きを行い、内部の圧力変化から残留トリチウム水の有無を判断し、残留していると判断される場合には通気を再開した。なお、真空引きにおいて内部に残留水が存在しない場合、内圧が大気圧から真空状態（10～20 Pa 程度）までスムーズに低下することを事前に確認している。本作業では、通気乾燥における B-熱交換器の入口側と出口側の露点と真空引きにおける圧力に加え、B-熱交換器内のトリチウム濃度を測定した。

#### ② 加熱通気乾燥

C-重水循環ポンプ用熱交換器（以下、「C-熱交換器」という。）を対象として、ヒータで約 40℃に加熱しながら B-熱交換器と同様の手順で通気乾燥を行った。本作業においても、B-熱交換器と同様に、通気乾燥時の露点、真空引き時の圧力及び内部のトリチウム濃度を測定した。

#### ③ 加熱真空乾燥

A-重水循環ポンプ用熱交換器（以下、「A-熱交換器」という。）を対象として、ヒータで約 40℃に加熱しながら真空ポンプを用いて真空乾燥を行った。この乾燥作業では、真空状態（10～30 Pa 程度）に達するまで真空引きを行った後、一度大気圧に戻し再度真空引きを行い、内部の圧力変化から残留トリチウム水の有無を判断し、残留していると判断される場合には真空乾燥を再開した。本作業では、真空乾燥時の A-熱交換器内の圧力及びトリチウム濃度を測定した。

### 4.2.2 作業結果

B-熱交換器を対象とした常温通気乾燥、C-熱交換器を対象とした加熱通気乾燥及び A-熱交換器を対象とした加熱真空乾燥の結果を図 4.2-2～4.2-4 に示す。これらの作業において、各熱交換器から約 100 ml の残留トリチウム水が回収された。

#### ① 常温通気乾燥の結果

通気乾燥における B-熱交換器の出口側の露点は、通気開始から 10 時間付近まで入口側の露点より高い値であったが、それ以降では入口側の露点とほぼ一致した。また、B-熱交換器内のトリチウム濃度は、通気開始から 11 時間の時点で約 170 Bq/cm<sup>3</sup> であり、21 時間の約 130 Bq/cm<sup>3</sup> まで緩やかに低下したが、その後 24.2 時間までの約 3 時間で約 1/2 倍（約 60 Bq/cm<sup>3</sup>）となった。なお、通気乾燥後のトリチウム除去装置内のトリチウム濃度（バックグラウンド値）は約 51 Bq/cm<sup>3</sup> であり、B-熱交換器内のトリチウム濃度の最終値は正味で 9 Bq/cm<sup>3</sup> 程度であると推定した。一方で、真空引きにおける B-熱交換器内の圧力は、通気開始から 20.3 時間の時点で十分な真空度（約 30 Pa）に到達し、通気開始から 23.5 時間の時点で大気圧から真空状態（30 Pa 程度）までスムーズに低下するようになった。以上から、通気開始から 20.3 時間の時点まで B-熱交換器内に残留トリチウム水が存在しており、内部のトリチウム濃度の低下も緩やかであるが、23.5 時間の時点で残留トリチウム水の回収が完了し、内部のトリチウム濃度も大きく低下したと推定した。

## ② 加熱通気乾燥の結果

通気乾燥における C-熱交換器の出口側の露点は、通気開始から 5 時間付近まで入口側の露点より高い値であったが、それ以降では入口側の露点とほぼ一致した。また、C-熱交換器内のトリチウム濃度は、通気開始から 3.5 時間の時点で約 160 Bq/cm<sup>3</sup> であり、19.3 時間まで 120~200 Bq/cm<sup>3</sup> で推移したが、20 時間の時点で約 100 Bq/cm<sup>3</sup> を下回った。なお、通気乾燥後のトリチウム除去装置内のトリチウム濃度（バックグラウンド値）は約 60 Bq/cm<sup>3</sup> であり、C-熱交換器内のトリチウム濃度の最終値は正味で 36 Bq/cm<sup>3</sup> 程度であると推定した。一方で、真空引きにおける C-熱交換器内の圧力は、通気開始から 11.8 時間の時点で十分な真空度（30 Pa 程度）に到達し、通気開始から 13.2 時間の時点で大気圧から真空状態（20 Pa 程度）までスムーズに低下するようになった。以上から、通気開始から 13.2 時間の時点で残留トリチウム水の回収が完了したと推定した。一方で、内部のトリチウム濃度が装置のバックグラウンドを考慮しても 100 Bq/cm<sup>3</sup> 程度あることは、ヒータでの加熱によって酸化皮膜からのトリチウムの放出が多くなったことが原因であると推定した。

## ③ 加熱真空乾燥の結果

真空乾燥における A-熱交換器内の圧力は、真空引き開始から約 60 分間は 10<sup>3</sup> Pa 程度でほぼ一定であったが、その後低下して約 20 Pa で一定となった。2 回目の真空引きにおいて、圧力は大気圧から真空状態（約 20 Pa）までスムーズに低下し、一定となった。また、3 回目の真空引きにおいても、2 回目の圧力変化を再現できた。このとき、A-熱交換器内のトリチウム濃度は、約 2.6 Bq/cm<sup>3</sup> であった。なお、トリチウム除去装置の除湿ラインは弁の閉操作により A-熱交換器から隔離されているため、測定したトリチウム濃度への当該装置のバックグラウンドの影響はない。以上から、真空引き開始から約 2 時間で残留トリチウム水の回収が完了したと推定した。

## ④ 空気置換の結果

空気置換前後の各熱交換器内のトリチウム濃度を図 4.2-5~4.2-7 に示す。いずれの熱交換器においても、トリチウム濃度は空気置換直前で 10<sup>-1</sup>~10<sup>1</sup> Bq/cm<sup>3</sup>、空気置換直後で 10<sup>-2</sup>~10<sup>-1</sup> Bq/cm<sup>3</sup> であり、約 1~4 日間密閉することで 1~2 桁程度上昇した。なお、空気置換開始時における通気乾燥完了時からのトリチウム濃度の減少は、トリチウム除去装置の取り外しと非常用ガス処理系への接続が原因であると推定した。これらの結果から、トリチウム除去作業の完了判断基準における確認要件①及び②についてエアラインマスクの着用を軽減できるレベル（8×10<sup>-2</sup> Bq/cm<sup>3</sup> 未満）を満足することが確認されたため、実際に各熱交換器を開放し、作業環境中のトリチウム濃度が 8×10<sup>-2</sup> Bq/cm<sup>3</sup> 未満となることを確認し、重水循環ポンプ用熱交換器のトリチウム除去作業を完了した。

### 4.2.3 まとめ

内部構造物を有する重水循環ポンプ用熱交換器を対象として、常温通気乾燥、加熱通気乾燥及び加熱真空乾燥により残留トリチウム水の回収が完了でき、実機への適用性が確認できた。残留トリチウム水の回収方法としては、加熱真空乾燥が最も効率的であり、次いで加熱通

気乾燥であり、常温通気乾燥が最も時間を要した。通気乾燥、真空乾燥及び空気置換時の各熱交換器内のトリチウム濃度から、残留トリチウム水の回収が完了した場合の内部のトリチウム濃度は数  $\text{Bq/cm}^3$ ～数十  $\text{Bq/cm}^3$  が目安となることが分かった。通気乾燥においては、トリチウム除去装置の送り側と戻り側の露点がほぼ一致した場合においても設備内部には水分が残留している可能性があり、残留トリチウム水の有無の判断は真空引きによる圧力変化や設備内部のトリチウム濃度の確認によって補完する必要があることがあった。また、トリチウム除去の進行に伴って、トリチウム除去装置自体がトリチウムで汚染され、当該装置のバックグラウンドが高くなるため、設備内部のトリチウム濃度を確認するためのサンプリングポートは、トリチウム除去装置側に設置するのではなく、系統側の既存のサンプリングポート等を利用する必要があることが分かった。

酸化皮膜中のトリチウムの低減作業においては、空気置換前のトリチウム濃度が十数回の空気置換を経ても大きな変化が見られないことから、酸化皮膜中のトリチウムを完全に除去するためには長期的な空気置換が必要となることが予想された。

### 4.3 ヘリウム浄化系室のトリチウム除去作業

#### 4.3.1 作業方法

図 4.3-1 に示すように、ヘリウム浄化系室内の対象範囲を 3 ブロックに分割して、ブロック毎にリボンヒータで主要な機器・配管を  $60\sim 90^\circ\text{C}$  (ただし、再結合器については最大  $150^\circ\text{C}$ ) に加熱しながら真空乾燥装置 (図 4.3-2) を用いて残留トリチウム水の回収を行った。また、主要な機器 (ヘリウム循環系冷却器、予熱器、再結合器) について、残留トリチウム水の回収状況に応じて、弁の開閉によってラインを構成して個別に加熱真空乾燥を行った。なお、日次の作業は、真空ポンプ及びリボンヒータの停止後に対象範囲の内部の圧力を大気圧に戻して終了した。これらの作業では、対象範囲の内部の圧力及び対象範囲内のトリチウム濃度を確認した。内部のトリチウム濃度は、重水循環ポンプ用熱交換器と同様にして測定した。真空ポンプの排気中の水蒸気 (トリチウム) については、水バブラで捕集したため、回収量は計測していない。

残留トリチウム水の回収完了後、図 4.3-3 に示すように、①ヘリウム循環系冷却器を除いたブロック 1、②再結合器を除いたブロック 2、③ヘリウム循環系冷却器及び再結合器、④ヘリウム浄化系冷却器を除いたブロック 3、⑤ヘリウム浄化系冷却器の 5 つの範囲で区切り、真空ポンプを用いて  $1\text{ kPa}$  程度になるまで系内空気を排出した後、外気を取り入れて大気圧に戻すことで空気置換を行い、酸化皮膜中のトリチウムの低減を図った。空気置換は日次の作業において複数回実施し、日次の空気置換後の密閉保持時間は約 1～3 日間とした。このとき、必要に応じて空気置換直前及び直後の内部のトリチウム濃度を測定した。

#### 4.3.2 作業結果

ブロック 1 を対象とした加熱真空乾燥時の内部の圧力及びトリチウム濃度の経時変化を図 4.3-4 に示す。ブロック 1 全体の日次の最終到達圧力は時間とともに低下し、最終的に約  $70\text{ Pa}$  で一定となったが、残留トリチウム水の回収完了とするには高い値であった。そこで、内

部構造物を有する循環系冷却器（図 4.3-1 中の破線）を真空引きしたところ、内部の圧力は 100 Pa を超えており、内部のトリチウム濃度も約 10~60 Bq/cm<sup>3</sup> で推移した。これより、循環系冷却器以外の残留トリチウム水の回収は完了し、循環系冷却器にはトリチウム水が残留していると判断し、後述するように、ブロック 2 の再結合器とともに再度真空引きを行った。

ブロック 2 を対象とした加熱真空乾燥時の内部の圧力及びトリチウム濃度の経時変化を図 4.3-5 に示す。ブロック 2 全体の日次の最終到達圧力は、真空引き開始から約 185 時間で約 900 Pa から約 700 Pa までしか低下しなかった。そこで、再結合器（2 基）と予熱器（2 基）の残留トリチウム水の残留状況を確認するため、再結合器のみ（図 4.3-1 中の一点鎖線）及び予熱器のみ（図 4.3-1 中の二点鎖線）を真空引きしたところ、再結合器の日次の最終到達圧力はブロック 2 全体の最終値と同じ約 700 Pa から減少して約 55 時間で約 500 Pa まで下がった一方で、予熱器の日次の最終到達圧力は初回から約 30 Pa に到達していた。これより、予熱器については最終のトリチウム濃度が高い（約 140 Bq/cm<sup>3</sup>）が、残留トリチウム水の回収は完了しており、再結合器についてはトリチウム水が残留していると判断した。なお、再結合器（0.7 m<sup>3</sup>）にはアルミナペレット（0.5%パラジウム含有）が 0.5 m<sup>3</sup> 充填されており、残留トリチウム水はこのペレットに吸着されており、蒸発し難い状態にあると推定した。

ブロック 1 の循環系冷却器及びブロック 2 の再結合器の真空引き時（図 4.3-5 の約 255 時間以降）の日次の最終到達圧力は、時間とともに減少し、約 297 時間の時点で 100 Pa を下回った。また、内部のトリチウム濃度は約 310 時間の時点で約 15 Bq/cm<sup>3</sup> であった。これより、循環系冷却器及び再結合器の残留トリチウム水の回収が完了したと推定した。なお、再結合器は約 150℃で加熱した。

ブロック 3 を対象とした加熱真空乾燥時の内部の圧力及びトリチウム濃度の経時変化を図 4.3-6 に示す。ブロック 3 の日次の最終到達圧力は 1 回目の真空引き操作で約 40 Pa に到達し、それ以降は内部の圧力は大気圧から約 30 Pa までスムーズに低下し、ほぼ一定であった。また、系内のトリチウム濃度は、真空引き操作ごとに低下し、最終的に約 10 Bq/cm<sup>3</sup> となった。これより、ブロック 3 の残留トリチウム水の回収が完了したと推定される。

5つの範囲①（ヘリウム循環系冷却器を除いたブロック 1）、②（再結合器を除いたブロック 2）、③（ヘリウム循環系冷却器及び再結合器）、④（ヘリウム浄化系冷却器を除いたブロック 3）、⑤（ヘリウム浄化系冷却器）の空気置換前後のトリチウム濃度を図 4.3-7～図 4.3.11 に示す。空気置換範囲①、②及び⑤のトリチウム濃度は、空気置換を行うごとに低下し、それぞれ最終の空気置換後で約 0.27 Bq/cm<sup>3</sup>、約 1.61 Bq/cm<sup>3</sup> 及び約 0.72 Bq/cm<sup>3</sup> であった。空気置換範囲③及び④のトリチウム濃度は、それぞれ約 2~20 Bq/cm<sup>3</sup> と約 1.5~5 Bq/cm<sup>3</sup> を推移した。また、いずれの範囲においても、密閉保持中（約 1~3 日間）のトリチウム濃度の上昇は最大で約 1 桁であった。これらの結果から、範囲ごとにトリチウム濃度の差が見られるが、トリチウム除去作業の完了判断基準における確認要件①及び②についてエアラインマスクの着用を軽減できるレベル（ $8 \times 10^{-2}$  Bq/cm<sup>3</sup> 未満）を満足することが確認されたため、各範囲を隔離していた弁を開操作して、実際に設備全体を開放し、作業環境中のトリチウム濃度が  $8 \times 10^{-2}$  Bq/cm<sup>3</sup> 未満となることを確認し、ヘリウム浄化系室のトリチウム除去作業を完了した。

### 4.3.3 まとめ

内部構造物や充填物を有するヘリウム浄化系室内の設備を対象として、加熱真空乾燥により残留トリチウム水の回収が安全に完了でき、より規模の大きい実機への適用性及び作業の安全性が確認できた。内部構造物を有する機器やアルミナペレットのような水分を吸着する充填材を内包する機器については、タンクのような単純形状の機器や配管と比べて、残留トリチウム水の回収に時間を要することが分かった。

## 4.4 ポイズン供給系のトリチウム除去作業

### 4.4.1 作業方法

図 4.4-1 及び図 4.4-2 に示すように、ポイズン溶解槽及び接続配管については 2 ブロック、ホットカラム試験装置については 3 ブロックに分割して、ブロック毎にリボンヒータで主要な機器・配管を加熱しながら真空乾燥装置（図 4.4-3）を用いて残留トリチウム水の回収を行った。加熱温度は、ポイズン溶解槽及び接続配管については約 70℃、ホットカラム試験装置については約 40～60℃とした。なお、日次の作業は、真空ポンプ及びリボンヒータの停止後に対象範囲の内圧を大気圧に戻して終了した。また、ホットカラム試験装置のブロック 3 については、残留トリチウム水の凍結防止のため、30 分間真空引きした後、真空破壊して外気を取り入れることを 1 回の操作として繰り返し行った。これらの作業では、対象範囲内の圧力及びトリチウム濃度を確認した。内部のトリチウム濃度は、重水循環ポンプ用熱交換器と同様に測定した。

残留トリチウム水の回収完了後、ポイズン溶解槽及び接続配管については全体を一括して、ホットカラム試験装置については①ブロック 1 及び 2 と②ブロック 3 に分割して、真空ポンプを用いて 1.5 kPa 程度まで系内空気を排出した後、外気を取り入れて大気圧に戻すことで空気置換を行い、酸化皮膜中のトリチウムの低減を図った。空気置換は日次作業において複数回実施し、日次の空気置換後の密閉保持時間は約 1～4 日間とした。ただし、ホットカラム試験装置については、現場作業の都合により保持時間が一部 11 日間となった。空気置換時には、空気置換直前と直後の内部のトリチウム濃度を測定し、その変化（酸化皮膜からのトリチウムの放出率）を確認した。

### 4.4.2 作業結果

ポイズン溶解槽及び接続配管を対象とした加熱真空乾燥時の内部の圧力及びトリチウム濃度の経時変化を図 4.4-4 に示す。ブロック 1 の日次の最終到達圧力は時間とともに低下し、真空引き開始から約 22 時間で約 30 Pa に到達し、ほぼ一定となった。ブロック 2 の日次の最終到達圧力も時間とともに低下し、約 10 時間で約 20 Pa に到達し、ほぼ一定となった。ポイズン溶解槽及び接続配管の全体について、内部の圧力はスムーズに約 30 Pa まで低下した後ほぼ一定であり、内部のトリチウム濃度は約 4 Bq/cm<sup>3</sup> で一定であった。これより、ポイズン溶解槽及び接続配管の残留トリチウム水の回収が完了したと推定した。

ホットカラム試験装置のブロック 1 及び 2 を対象とした加熱真空乾燥時の内部の圧力及びトリチウム濃度の経時変化を図 4.4-5 に示す。ブロック 1 の圧力は時間とともに低下し、真空

引き開始から約 10 時間で約 10 Pa に到達した。一方で、ブロック 2 の圧力は、真空引き開始から約 1,600 Pa で一定であった。このとき、真空ポンプの排気流量が初期値からほとんど低下しないことから、対象ブロック内を確認した結果、腐食電位試験槽でインリークがあることが判明した。このため、腐食電位試験槽を隔離して真空引きを継続したところ、圧力は時間とともに低下し、真空引き開始から約 13.7 時間で約 10 Pa に到達した。

図 4.4-5 の真空引き時間 30 時間以降は、腐食電位試験槽を乾燥するために、ブロック 1 及び 2 を一括して真空引きを行った結果である。この真空引きにおいては、真空引きを 1.5 時間行った後に、真空破壊して外気を取り入れるとともに、この 1.5 時間のうち 0.5 時間にわたり腐食電位試験槽の隔離を解除することを 1 回の操作として繰り返し行った。腐食電位試験槽を隔離した状態では、圧力は速やかに約 10 Pa に到達するが、腐食電位試験槽の隔離を解除すると約 1,600 Pa となるため、圧力から残留トリチウム水の有無を確認できなかった。そこで、内部のトリチウム濃度に着目すると、時間とともに約 165 Bq/cm<sup>3</sup> から約 4 Bq/cm<sup>3</sup> まで減少していた。以上から、腐食電位試験槽を含めたブロック 1 及び 2 の残留トリチウム水の回収が完了したと推定した。

ホットカラム試験装置のブロック 3 を対象とした加熱真空乾燥時の内部の圧力及びトリチウム濃度の経時変化を図 4.4-6 に示す。ブロック 3 の圧力は、真空引き開始から約 0.5 時間にわたり約 500 Pa で一定であったが、その後速やかに低下し、真空引き開始から約 1 時間で約 10 Pa に到達した。それ以降の日次の真空引き作業では、20～30 Pa で推移した。トリチウム濃度は、真空引き開始から約 14 時間の時点で約 7 Bq/cm<sup>3</sup> であった。これよりブロック 3 の残留トリチウム水の回収が完了したと推定した。

ポイズン溶解槽及び接続配管とホットカラム試験装置の空気置換前後のトリチウム濃度をそれぞれ図 4.4-7 と図 4.4-8 に示す。ポイズン溶解槽及び接続配管の空気置換後の濃度は 10<sup>-1</sup>～10<sup>0</sup> Bq/cm<sup>3</sup> で推移した。ホットカラム試験装置のブロック 1+2 及びブロック 3 は、空気置換を行うごとに低下し、それぞれ最終の空気置換後で約 0.57 Bq/cm<sup>3</sup> 及び約 0.09 Bq/cm<sup>3</sup> であった。また、いずれにおいても空気置換後に約 1～4 日間密閉保持することで内部のトリチウム濃度は約 1 桁上昇した。これらの結果から、トリチウム除去作業の完了判断基準における確認要件①及び②についてエアラインマスクの着用を軽減できるレベル (8×10<sup>-2</sup> Bq/cm<sup>3</sup> 未満) を満足することが確認されたため、実際に各範囲を開放し、作業環境中のトリチウム濃度が 8×10<sup>-2</sup> Bq/cm<sup>3</sup> 未満となることを確認し、ポイズン供給系のトリチウム除去作業を完了した。

#### 4.4.3 まとめ

ヘリウム浄化系と比較して、トリチウム汚染が多いポイズン供給系の設備を対象として、加熱真空乾燥により残留トリチウム水の回収が安全に完了でき、作業の安全性が確認できた。対象範囲外からのインリークは、対象設備内の圧力はある程度まで低下した後ほぼ一定となるとともに、真空ポンプによる排気流量が初期値からほとんど低下しないことが判断の目安となった。インリークは、設備の気密性の低さによる作業環境からの外気の流入だけでなく、対象設備を区切る弁体の気密性の低さによる対象範囲外からの対象外設備内の空気の流入が

予想されるため、弁の開閉によるインリーク範囲の隔離や対象範囲の区切る位置の変更を適宜行う必要があることが判明した。また、隔離したインリーク範囲については、内部のトリチウム濃度により残留トリチウム水の回収の進捗を管理する必要があった。

#### 4.5 重水浄化系室のトリチウム除去作業

##### 4.5.1 作業方法

図 4.5-1 に示すように、重水浄化系室内の重水浄化系の設備のうち B-重水浄化塔を対象として、中空糸膜分離式トリチウム除去装置を用いて常温通気乾燥及び常温真空乾燥により残留トリチウム水の回収を行った。日次の通気及び真空引き作業は、対象範囲を密閉保持した状態で終了した。なお、「4.5.2 作業結果」で述べるように、常温通気乾燥では残留イオン交換樹脂に吸着した残留トリチウム水の回収効率が悪いことが判明したため、常温真空乾燥を適用することとした。また、B-重水浄化塔の結果より、B-重水浄化塔を含めた対象範囲全体を一括して、真空ポンプを用いて常温真空乾燥により残留トリチウム水の回収を行った。日次の真空引き作業は、対象範囲を密閉保持した状態で終了した。これらの作業では、対象範囲の露点及びコールドトラップでの回収の有無を確認した。なお、常温真空乾燥では残留トリチウム水の蒸発速度が遅く、かつ対象設備の容積が大きいため、少量の水分を観測できるように、露点による確認を試みた。

残留トリチウム水の回収完了後、対象範囲全体を一括して、真空ポンプを用いて 2~5 kPa 程度にまで系内空気を排出した後、外気を取り入れて大気圧に戻すことで空気置換を行い、酸化皮膜中のトリチウムの低減を図った。日次の空気置換後の密閉保持時間は、約 2~4 日間とした。このとき、空気置換直前と直後の内部のトリチウム濃度を測定し、その変化（酸化皮膜からのトリチウムの放出率）を確認した。また、長期間の密閉保持における内部のトリチウム濃度の変化を調べるために、1 ヶ月間の密閉保持を行った。内部のトリチウム濃度は、重水循環ポンプ用熱交換器と同様にして測定した。

##### 4.5.2 作業結果

B-重水浄化塔を対象とした常温通気乾燥時及び常温真空乾燥時の露点及び室温の経時変化をそれぞれ図 4.5-2 と図 4.5-3 に示す。なお、図 4.5-3 は日次の最終露点の経時変化である。常温通気乾燥において、B-重水浄化塔の入口側（中空糸膜分離式トリチウム除去装置の送気側）の露点はスムーズに約 $-80^{\circ}\text{Cdp}$ まで低下し、凝縮器において残留トリチウム水が回収されており、中空糸膜分離式トリチウム除去装置は所定の性能を発揮しており、その適用性は確認された。一方で、出口側の露点は時間とともに低下したが、室温の変化と同様の低下傾向を示した。このように出口側の露点が室温の変化に依存しているのは、B-重水浄化塔に充填されていたイオン交換樹脂の抜出し操作を実施しているが、その一部は塔内に残留していること、及び「4.3 ヘリウム浄化系室のトリチウム除去作業」の結果を考慮すると、残留トリチウム水がイオン交換樹脂に吸着されて蒸発し難い状態にあることが要因であると推定した。このため、常温通気乾燥を継続しても、イオン交換樹脂に吸着された残留トリチウム水の完全な回収には長期間を要することが予想されたため、通気乾燥より回収効率が良い真空乾燥に

切り替えて残留トリチウム水の回収を継続した。常温真空乾燥において、露点は真空引き開始から約 170 時間まで室温の上昇とともに増加したが、それ以降は室温の上昇に関係なく低下し、約 $-4^{\circ}\text{Cdp}$ に到達した。また、真空引き開始から約 280 時間以降はコールドトラップによる残留トリチウム水の回収がほとんど見られなかった。以上から、B-重水浄化塔の残留トリチウム水の回収はほぼ完了したと推定した。なお、これらの作業において、常温通気乾燥で約 2.41 L、常温真空乾燥で約 12.49 L の残留トリチウム水が回収された。

B-重水浄化塔を含めた対象範囲全体を対象とした常温真空乾燥時の日次の最終露点及び室温の経時変化を図 4.5-4 に示す。露点は、真空ポンプによる排気速度を 140 L/min とした（中空糸膜分離式トリチウム除去装置を用いた）場合、室温の変化と同様の傾向を示した。これは、B-重水浄化塔と同様に、A・B-ポイズン除去塔、A-重水浄化塔、重水化塔にイオン交換樹脂が残留していることが要因であると推定した。真空引き開始から約 857 時間の時点においても、室温に対する露点の依存性が見られることから、回収効率を上げるために、「4.6 劣化重水貯槽、重水貯槽等のトリチウム除去作業」の真空乾燥装置を用いて当該作業の対象範囲と一括して真空引きすることで排気速度を 1,000 L/min にした。その結果、露点は室温の上昇に関係なく低下し、流量変更から約 250 時間で約 $-20^{\circ}\text{Cdp}$ に到達した。これより、重水浄化系室の残留トリチウム水の回収は完了したと推定した。なお、真空引き開始から約 857 時間までに約 56.83 L の残留トリチウム水が回収された。857 時間以降の回収量は、劣化重水貯槽、重水貯槽等と一括して真空乾燥したため、計測できなかった。

重水浄化系室の空気置換前後のトリチウム濃度を図 4.5-5 に示す。空気置換後の濃度は、 $10^0 \text{ Bq/cm}^3$  オーダーで推移し、約 2~4 日間密閉保持することで約 1 桁上昇した。また、29 日間の密閉保持においては、 $20\sim 30 \text{ Bq/cm}^3$  程度で推移しており、増加傾向は見られなかった。最終の空気置換後のトリチウム濃度は、約  $0.67 \text{ Bq/cm}^3$  であった。これらの結果から、トリチウム除去作業の完了判断基準における確認要件①及び②についてエアラインマスクの着用を軽減できるレベル（ $8\times 10^{-2} \text{ Bq/cm}^3$  未満）を満足することが確認されたため、実際に当該範囲を開放し、作業環境中のトリチウム濃度が  $8\times 10^{-2} \text{ Bq/cm}^3$  未満となることを確認し、重水浄化系室のトリチウム除去作業を完了した。

#### 4.5.3 まとめ

重水浄化系室内の重水浄化系の設備を対象として、常温真空乾燥により残留トリチウム水の回収が安全に完了でき、作業の安全性が確認できた。真空乾燥における残留トリチウム水の有無は、内部の露点を確認することで判断できる見通しを得た。当該設備からの残留トリチウム水の回収結果から、イオン交換樹脂のような吸着材に吸着した水分の放出は外気温に強く依存しているが、真空ポンプによる排気速度を一定値以上に上げることで、この温度依存性の影響を受けることなく効率的に回収できることが示された。また、B-重水浄化塔を対象として、中空糸膜分離式トリチウム除去装置を用いて常温通気乾燥を行い、狭隘な箇所に設置された実機に対する当該装置の適用性が確認できた。

## 4.6 劣化重水貯槽、重水貯槽等のトリチウム除去作業

### 4.6.1 作業方法

重水貯槽、劣化重水貯槽等の機器及び配管等について、排気速度 1,000 L/min の真空ポンプを用いた真空乾燥装置（図 4.6-1）を用いて常温真空乾燥にて残留トリチウム水の回収を行った。本作業は、重水貯槽（A・B）、重水ドレンタンク及び周辺配管から開始し、①浄化系重水貯槽、再生熱交換器及び重水冷却器、②劣化重水貯槽（A・B）及び樹脂交換用重水タンク、③計装ラックの一部、④ホウ酸濃度測定装置及び触媒充填管、⑤ヘリウム浄化系及びポイズン供給系等の一部配管、⑥サンプリング系の一部、⑦計装ラック及びサンプリング系の一部配管、⑧サンプリング系、ヘリウム循環系及びホウ酸濃度測定装置等の一部配管、⑨その他の残り全ての配管の順番に真空引き範囲を適宜拡張した。また、「4.5 重水浄化系室のトリチウム除去作業」で記載したように、当該作業を加速するために、一時的に本真空引き範囲に接続して一括して真空引きを行った。日次の真空引き作業は、対象範囲を密閉保持した状態で終了した。これらの作業では、対象範囲の露点及びコールドトラップでの残留トリチウム水の回収の有無を確認した。

空気置換による酸化皮膜中のトリチウムの低減及び内部のトリチウム濃度の確認については、対象設備の容積が約 220 m<sup>3</sup> と大きいこと及び対象設備が複数の部屋（重水貯槽室、劣化重水貯槽室、除染室、樹脂交換用重水タンク室）にまたがって設置されていることを考慮して、以下の通り実施した。残留トリチウム水の回収完了後、対象範囲全体を一括して、真空ポンプを用いて 1.5 kPa 程度にまで系内空気を排出した後、外気を取り入れて約 10 kPa にすることで空気置換を行った。この空気置換を複数回行った後、部屋ごとに対象設備を区切り、圧力を大気圧に戻して 1 日密閉保持した。このとき、大気圧に戻した直後と 1 日密閉保持した後の内部のトリチウム濃度を確認した。トリチウム濃度が高い範囲については、再度 1.5 kPa 程度にした後、外気を取り入れて大気圧に戻すことで空気置換を行った。なお、トリチウム濃度の確認は、重水貯槽室では B-重水貯槽及び重水ドレンタンク、劣化重水貯槽室では A-劣化重水貯槽及び浄化系重水貯槽、除染室では劣化重水貯槽用拔出槽、樹脂交換用重水タンク室では樹脂交換慣用重水タンクからサンプリングして行った。

### 4.6.2 作業結果

重水貯槽、劣化重水貯槽等を対象とした常温真空乾燥時の日次の最終露点及びコールドトラップで回収された残留トリチウム水量の経時変化を図 4.6-2 に示す。内部の露点は時間とともに低下し、真空引き範囲を拡張した際に露点の上昇が見られた。また、重水浄化系室の範囲を接続した際にも露点が増加し、それぞれの真空引き範囲で露点を観測しているため計測値に差が見られるが、重水浄化系室（図 4.6-2 の 857 時間以降のプロット）と同様の低下傾向を示した。真空引き開始から 1,000 時間以降、約 10kPa 分の外気を定期的に導入したために一時的な露点の上昇が見られるが、露点は約-40°Cdp で一定となった。コールドトラップで回収された残留トリチウム水量も時間とともに増加し、1,000 時間以降はほぼ一定となった。これより、重水貯槽、劣化重水貯槽等の残留トリチウム水の回収は完了したと推定した。

対象範囲全体を一括した空気置換後の各部屋の設備について、大気圧に戻した直後と 1 日

密閉保持した後の内部のトリチウム濃度を表 4.6-1 に示す。各部屋において、大気圧に戻した直後のトリチウム濃度が約  $10^0$  Bq/cm<sup>3</sup> オーダーと比較的高かった。なお、重水貯槽室と劣化重水貯槽室については、主要な大型機器である B-重水貯槽と A-劣化重水貯槽は  $10^{-3}$ ~ $10^{-2}$  Bq/cm<sup>3</sup> と低かった。また、大気圧に戻した後に約 1 日間密閉保持することで、内部のトリチウム濃度は数 B/cm<sup>3</sup>~数十 B/cm<sup>3</sup> 上昇した。これらの結果において、解体撤去作業時に予定している作業エリアの容積を考慮した場合、トリチウム除去作業の完了判断基準における確認要件①及び②についてトリチウム防護服の着用を軽減できるレベル( $8 \times 10^{-1}$  Bq/cm<sup>3</sup> 未満)を満足することが確認された。これにより、重水貯槽、劣化重水貯槽等のトリチウム除去作業を完了した。

#### 4.6.3 まとめ

重水貯槽、劣化重水貯槽等の機器及び配管等を対象として、「4.5 重水浄化系室のトリチウム除去作業」で得られた成果及び「3.4 残留トリチウム水回収のための真空乾燥装置」の検討結果を踏まえて常温真空乾燥を行い、残留トリチウム水の回収が安全に完了できた。本作業では、真空引き範囲を適宜拡張することにより、各範囲からの残留トリチウム水の回収状況を的確に把握することができるとともに、弁体の気密性の低さによる隔離範囲外からのインリーク箇所を効果的に特定することができた。

### 4.7 カランドリアタンク等のトリチウム除去作業

#### 4.7.1 作業方法

カランドリアタンク、重水冷却系及びヘリウム循環系の機器及び配管等について、除湿ロータ式トリチウム除去装置を用いて常温通気乾燥により残留トリチウム水の回収を行った。図 4.7-1 に示すように、カランドリアタンク、重水ダンプタンク及び重水冷却系を含む主に大口径配管 (300A~400A) で構成される経路を乾燥空気の通気ラインとした。日次の通気作業は、対象範囲を密閉保持した状態で終了した。また、回収効率を上げるために、途中から 24 時間通気を実施した。この作業では、除湿ロータ式トリチウム除去装置に戻る空気の露点及びプレクーラで回収された残留トリチウム水量を確認した。なお、対象設備の容積は約 280 m<sup>3</sup> と大きく、残留トリチウム水が大量に存在すること、主要な機器が大口径配管により繋がっていること及び重水浄化系での常温真空乾燥の適用性の確認や真空乾燥装置の設計に時間を要することを考慮して、残留トリチウム水の回収を効率的に進めるために、常温通気乾燥を行った。

常温通気乾燥完了後、排気速度 500 L/min の真空ポンプ 4 台を用いた真空乾燥装置 (図 4.7-2) を重水循環ポンプ 3 台に接続し、常温真空乾燥にて残留トリチウム水の回収を行った。日次の真空引き作業は、対象範囲を密閉保持した状態で終了した。この作業では、対象範囲の露点及びコールドトラップでの残留トリチウム水量を確認した。

空気置換による酸化皮膜中のトリチウムの低減及び内部のトリチウム濃度の確認については、対象設備の容積が約 280 m<sup>3</sup> と大きいこと及び対象設備が原子炉建屋内の広域にまたがって設置されていることを考慮して、以下の通り実施した。カランドリアタンクの容積は約 210

m<sup>3</sup>（対象設備の約 75 %）あるため、当該タンクに接続する配管を切断・閉止することで重水冷却系及びヘリウム循環系から分離し、非常用ガス処理系によって当該タンク内の空気を吸引することで空気置換を行った。重水冷却系及びヘリウム循環系については、重水循環ポンプをはさんで重水ダンプタンク側のライン、重水循環ポンプをはさんで重水冷却器側のライン及びヘリウム循環系のラインで区切って、非常用ガス処理系により内部の空気を吸引することで空気置換を行った。カランドリアタンク及び各ラインにおいて、内部の空気を 10 回以上入れ替えた。

#### 4.7.2 作業結果

カランドリアタンク等を対象とした常温通気乾燥時の日次の最終露点及びプレクーラで回収された残留トリチウム水量の経時変化を図 4.7-3 と図 4.7-4 に示す。なお、除湿ロータ式トリチウム除去装置の露点計の測定下限値が $-15^{\circ}\text{Cdp}$  であるため、露点計の交換（通気開始から約 4,500 時間）まで日次作業中に採取できた最終値を中抜きでプロットした。通気開始から約 70 時間で露点は $-15^{\circ}\text{Cdp}$  に到達し、それ以降の日次の最終露点は $-15^{\circ}\text{Cdp}$  を下回った（図 4.7-3）。このとき、プレクーラでは残留トリチウム水の回収が継続されていることから、回収効率を上げるために通気開始から約 360 時間の時点で 24 時間通気を開始した（図 4.7-4）。通気開始から約 3,600 時間において、残留トリチウム水の回収作業を 5 ヶ月中断しており、露点が約  $5^{\circ}\text{Cdp}$  まで上昇した。その後、露点は低下し、通気開始から約 7,480 時間の時点で送り空気の露点（約 $-20^{\circ}\text{Cdp}$ ）と一致した。また、通気開始から約 3,600 時間以降の残留トリチウム水の回収量が少量であることから、通気ライン上の残留トリチウム水の回収はほぼ完了したと推定した。なお、通気開始から約 7,480 時間までに約 110.7 L の残留トリチウム水が回収された。

常温真空乾燥の日次の最終露点及びコールドトラップで回収された残留トリチウム水量の経時変化を図 4.7-5 に示す。露点は、真空引き開始から約 150 時間で約 $-10^{\circ}\text{Cdp}$  に到達し、作業中断（約 240 時間）まで $-10^{\circ}\text{Cdp}$  付近を推移した。その後、約半年の作業中断に、残留トリチウム水により露点が増加した。露点計の故障のために、約 280 時間～約 500 時間までは露点による作業管理はできないが、この間も残留トリチウム水がコールドトラップで回収されていることから、真空引きを継続した。真空引き開始から約 500 時間の時点で、露点計の交換により露点が $-40^{\circ}\text{Cdp}$  を下回っていることが分かり、その後も $-40^{\circ}\text{Cdp}$  付近を推移した。真空引き開始から約 620 時間の時点で、インリークの疑いがあるために真空引き範囲から除外していた計装ラインを接続したところ、露点は約 $-20^{\circ}\text{Cdp}$  まで上昇したが、その後も $-20^{\circ}\text{Cdp}$  付近を推移しており、コールドトラップでの残留トリチウム水の回収も確認されなかった。以上から、カランドリアタンク等の残留トリチウム水の回収は完了したと推定した。なお、真空引き開始から約 726 時間までに約 26.9 L の残留トリチウム水が回収された。カランドリアタンク及び各ラインについて、空気置換直後と 1 日密閉保持した後の内部のトリチウム濃度を表 4.7-1 に示す。なお、重水冷却系については、2 つのラインに区切っているが、トリチウム濃度の確認は 1 つの代表箇所で行った。また、ヘリウム循環系ラインでは空気置換後の値を確認していないが、1 日後の値からトリチウムの放出速度は最大 0.15

Bq/(cm<sup>3</sup>・h)となることが分かる。これらの結果において、解体撤去作業時に予定している作業エリアの容積を考慮すると、トリチウム除去作業の完了判断基準における確認要件①及び②についてトリチウム防護服の着用を軽減できるレベル（ $8 \times 10^{-1}$  Bq/cm<sup>3</sup> 未満）を満足することが確認された。「4.6 劣化重水貯槽、重水貯槽等のトリチウム除去作業」と同様の理由から、実際に各範囲を開放して作業環境中のトリチウム濃度の確認は実施しなかった。これより、カランドリアタンク等のトリチウム除去作業を完了した。

#### 4.7.3 まとめ

カランドリアタンク、重水冷却系及びヘリウム循環系の機器及び配管等を対象として、常温通気乾燥により主要な機器及びそれらを繋ぐ大口径配管から残留トリチウム水の回収を、常温真空乾燥によりその他の全対象範囲から残留トリチウム水の回収を安全に完了できた。

### 4.8 除湿ロータ式トリチウム除去装置のトリチウム除去作業

#### 4.8.1 作業方法

除湿ロータ式トリチウム除去装置について、除湿ロータ式トリチウム除去装置は耐圧性能を有しておらず、真空引きは適用できないこと及び当該装置の運転上限温度（80℃）においてシリカゲルには重量比で数%の水分が吸着<sup>10</sup>されたままであるため、2つのステップで吸着剤（シリカゲル）の再生運転をすることで除湿ロータのシリカゲルに吸着したトリチウム水の除去を行った。第1ステップは、当該装置の加熱システムを用いて最大50℃まで加熱し、乾燥空気を流量20 L/min及び100 L/minで通気した。第2ステップは、シリカゲルからのトリチウム水の除去がある程度進んだ時点で、トリチウムを含まない湿潤空気を通気してシリカゲルに水を吸着させた後、当該装置の加熱システム及びリボンヒータで約60℃まで加熱し、乾燥空気を流量200 L/minで通気した。第2ステップは、シリカゲルに吸着されたトリチウム水を希釈して除去するものであるため、当該装置内のトリチウム濃度が所定の値になるまで水分の吸脱着を繰り返した。なお、湿潤空気の通気時間を変えることで、シリカゲルに送る水分量を100～600 mLで調節した。これらの作業では、当該装置の出口ラインの日次の初期露点と装置内の日次の初期トリチウム濃度によって確認した。

#### 4.8.2 作業結果

除湿ロータ式トリチウム除去装置を対象としたトリチウム除去作業の第1ステップにおける日次の初期露点の経時変化を図4.8-1、第1ステップ及び第2ステップの当該装置内の日次の初期トリチウム濃度の経時変化を図4.8-2に示す。第1ステップにおける日次の初期露点は、通気開始から約30時間までは緩やかに低下した後、約49時間まで0℃dp付近で推移した。この初期の露点の低下は、当該装置内の表面等に付着したトリチウム水が除去されていたためと推定した。シリカゲルからのトリチウムの除去速度を上げるために通気流量を100 L/minとしたところ、露点は低下し、約66時間の時点で約-15℃dpに到達した。なお、約57.1時間の時点での露点の一時的な上昇は、閉ループで循環運転したことで、シリカゲルから放出されたトリチウム水が当該装置内に残留したためである。当該装置内のトリチウム濃度は、

約 1,000 Bq/cm<sup>3</sup> から約 160 Bq/cm<sup>3</sup> まで減少した。

第 2 ステップでは、時間とともに日次の初期トリチウム濃度が指数関数的に約 160 Bq/cm<sup>3</sup> から約 1.5 Bq/cm<sup>3</sup> まで減少した。トリチウム濃度測定時の露点は-10℃～-20℃程度であり、当該装置内の水蒸気量（シリカゲルから放出されている水分量）はほぼ一定であることから、水分の吸脱着によりシリカゲルに吸着されたトリチウムが希釈されていることが分かる。また、当該装置内のトリチウム濃度から、シリカゲルに吸着したトリチウムの量は約 100 分の 1 になったと推測される。これにより、トリチウム除去作業の完了判断基準における確認要件①及び②についてエアラインマスクの着用を軽減できるレベル（ $8 \times 10^{-2}$  Bq/cm<sup>3</sup> 未満）を満足することが確認されたため、実際に当該範囲を開放し、作業環境中のトリチウム濃度が  $8 \times 10^{-2}$  Bq/cm<sup>3</sup> 未満となることを確認し、除湿ロータ式トリチウム除去装置のトリチウム除去作業を完了した。

#### 4.8.3 まとめ

除湿ロータ式トリチウム除去装置について、再生運転及びトリチウムを含まない水分による希釈により吸着剤（シリカゲル）からのトリチウム水の除去を安全に完了できた。この作業において、再生運転のみではシリカゲルの重量比で数%のトリチウム水が吸着されたままとなり、100 分の 1 以下することはできないが、水分の吸脱着による希釈を行うことによりシリカゲルに吸着されたトリチウム水を効果的に除去することができた。

### 4.9 残留トリチウム水量の推定

残留トリチウム水の回収作業の進捗状況を把握するためには、その残留量を機器・配管等の設計重量と現状の重量の差から計算する必要があるが、現場に設置された状態では計測できない。そこで、残留トリチウム水の回収作業中の残留トリチウム水からの熱の出入りに着目して、その残留量を推定する手法を検討し、純水を用いたコールド試験により推定条件と推定精度を確認した後、B-重水浄化塔を対象としてその適用性を検証した。

#### 4.9.1 残留水量の推定の概念

常温通気乾燥及び常温真空乾燥においては、残留トリチウム水の水温は蒸発に伴って時間とともに低下する。このとき、残留トリチウム水が凍結しない条件下で十分な時間が経過すると、蒸発による除熱量は外気との温度差による入熱量と等しくなる。この平衡状態においては、残留トリチウム水の水温は変化せず、外気との温度差は一定である。その後、乾燥作業を停止して系を密閉・保持すると、残留トリチウム水の水温が上昇するとともに、残留トリチウム水が蒸発する。この密閉・保持から短時間に着目すると、外気からの入熱量は平衡状態時の外気との温度差による入熱量と等しい。

平衡状態において、外気との温度差による入熱量は、

$$Q_1 = L \times (\rho \times 10^3) \times V_R \quad (4.1)$$

により計算できる。ここで、 $L$  は水の蒸発潜熱 (J/g)、 $\rho$  は水の密度 (kg/m<sup>3</sup>)、 $V_R$  は単位時間当たりにコールドトラップで回収される水分量 (m<sup>3</sup>/min) である。一方で、系の密閉・保持

から短時間において、残留水の温度上昇に消費される熱量は、残留水量を  $V$  ( $\text{m}^3$ ) とすると、

$$Q_2 = S \times (\rho \times 10^3) \times V \times \Delta T \quad (4.2)$$

で表すことができる。ここで、 $S$  は水の比熱 ( $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ )、 $\Delta T$  は残留水の温度上昇率 ( $\text{K}/\text{min}$ ) である。ただし実機においては、残留水の温度 ( $t$  [ $^{\circ}\text{C}$ ]) は実測できないため、真空引きによって系内空気を排気し、水蒸気成分で系内を満たすことで、その蒸気圧 ( $P$  [ $\text{Pa}$ ]) から Tetens の式 (式(3.2)) を用いて推定した。また、系の密閉・保持から短時間において、残留水の蒸発に消費される熱量は、単位時間あたりに発生する水蒸気量 ( $m_v$  [ $\text{g}/\text{min}$ ]) を理想気体の状態方程式を用いて表すと、

$$Q_3 = L \times m_v = L \times \frac{M \times \Delta P \times V_E}{R \times T_A} \quad (4.3)$$

により計算できる。ここで、 $R$  は気体定数 ( $8.31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ )、 $T_A$  は外気温 ( $\text{K}$ )、 $M$  は水分子のモル質量 ( $\text{g}/\text{mol}$ )、 $\Delta P$  は系内の水蒸気圧の増加速度 ( $\text{Pa}/\text{min}$ )、 $V_E$  は対象系の容積 ( $\text{m}^3$ ) である。したがって、系の密閉・保持から短時間における外気からの入熱量 ( $Q_2$  と  $Q_3$  の和) が平衡状態時の外気との温度差による入熱量 ( $Q_1$ ) と等しいとき、

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 \quad (4.4)$$

より残留水量 ( $V$ ) を推定できる。

#### 4.9.2 コールド試験

コールド試験は、図 4.9-1 に示したように、除湿機を 2 通りの方法で 200 L ドラム缶と 20 L ペール缶に接続し、ドラム缶とペール缶のいずれか一方又は両方に残留トリチウム水を模擬して純水を入れ、約  $30^{\circ}\text{C}$  の作業環境下で行った。表 4.9-1 に示すように、風速  $22 \text{ L}/\text{min}$  又は  $50 \text{ L}/\text{min}$  で乾燥空気を通気し、除湿機に戻る水分を含んだ空気 (湿潤空気) の水蒸気圧がほぼ一定になるまで継続した。その後、通気を停止し、系をそのままの状態でも 10~20 分間保持した。なお、ドラム缶とペール缶内の残留水の水温は、温度計を用いて直接測定した。

各試験におけるドラム缶及びペール缶内の水蒸気圧、水温及び室温の経時変化を図 4.9-2~図 4.9-13 に示す。水蒸気圧は時間とともに減少し、風速  $22 \text{ L}/\text{min}$  においては乾燥空気の通気開始から約 3 時間以降、風速  $50 \text{ L}/\text{min}$  においては約 2 時間以降にほぼ一定となった。通気停止後、水蒸気圧は全ての条件において上昇した。このとき、水温に関しても同様の挙動を示した。

これらの試験結果より、式(4.1)~式(4.4)を用いて  $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $Q_3$ 、 $V$  を計算し、実際の残留水量 ( $V_r$  [ $\text{m}^3$ ]) との比較から推定精度を算出した。なお、水の蒸発潜熱  $L$  には  $30^{\circ}\text{C}$  における  $2,428 \text{ J}/\text{g}$ <sup>4)</sup>、比熱  $S$  には  $30^{\circ}\text{C}$  における  $4.18 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$ <sup>11)</sup>、水の密度  $\rho$  には  $995.7 \text{ kg}/\text{m}^3$ <sup>12)</sup> 及び水の分子量  $M$  には  $18 \text{ g}/\text{mol}$  を用いた。また、系を密閉・保持している間に水蒸気圧と温度に関して複数点採取した試験 (No. 1、3、4) については、通気停止時点からのプロットの傾きから増加速度を算出した。計算結果を表 4.9-2 に、通気停止時の水温と室温との温度差と推定精度の関係を図 4.9-14 に示す。推定精度は、通気停止時の水温と室温との温度差が大きくなるほど低くなる傾向が見られた。また、通気方向及び純水の有無が同じ条件の試験においては、風速が大きい方が通気停止時の水温と室温との温度差が大きくなった。これは、風速が大き

なるほど、ドラム缶及びペール缶内の水蒸気を除去する効率が高くなり、単位時間当たりの蒸発量が増えたためである。以上から、系内の残留水量を精度良く推定するためには、水分の除去速度を可能な限り低く抑える必要があることが明らかとなった。

#### 4.9.3 ホット試験

ホット試験は、B-重水浄化塔の真空乾燥作業の開始時に実施した。中空糸膜分離式トリチウム除去装置の真空ポンプを用いて B-重水浄化塔内の空気を排気し、系内の水蒸気圧がほぼ一定になるまで真空引きを継続した。その後、真空引きを停止し、系をそのままの状態でも 20 分間保持した。この試験は、作業環境の温度下で 3 回実施した。試験終了後、B-重水浄化塔の真空乾燥作業を行い、実際に回収されたトリチウム水量と推定値を比較した。

B-重水浄化塔内の圧力（圧力計による計測値）及び水蒸気圧（露点計による計測値）の経時変化を図 4.9-15～図 4.9-17 に示す。系内圧力は時間とともに低下し、約 3 時間で 600～800 Pa 付近で一定となった。一方で、系内の水蒸気圧は圧力の低下とともに増加し、約 3 時間で圧力と同様に一定となった。この水蒸気圧の上昇は、圧力の低下によって蒸発量が増えたためと推定した。真空引きを停止し密閉状態で維持すると、全ての試験において圧力はほとんど変化しなかったが、水蒸気圧は時間とともに増加した。

これらの試験結果より、式(4.1)～式(4.4)及び式(3.2)を用いて  $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $Q_3$ 、 $V$  を計算し、真空乾燥作業において回収されたトリチウム水量 (12.49 L) との比較から推定精度を算出した。なお、重水の蒸発潜熱  $L$  には 10℃における 2,307.9 J/g と 13℃における 2,300.2 J/g<sup>13)</sup>、重水の比熱  $S$  には 6.85℃における 4.241 J/(g・K)<sup>11)</sup>、重水の密度  $\rho$  には 1106 kg/m<sup>3</sup><sup>12)</sup> 及び重水の分子量  $M$  には 20 g/mol を用いた。計算結果を表 4.9-3 に示す。いずれの試験においても、残留トリチウム水を 80%以上の精度で推定することができた。また、3 回の試験の残留トリチウム水量の平均値と標準偏差は 12.93 L と 1.56 L であり、その推定精度は 96.5 %であった。

カランドリアタンク等の残留トリチウム水の回収作業において、本手法を用いて当該範囲内の残留トリチウム水量の推定を試みた。しかしながら、大きな機器が離れて配置されており、それらを接続する配管の全長も大きいために、真空引きを停止し密閉状態で維持しても、水蒸気成分の分散（拡散移動）に時間を要し、系内の水蒸気の分布が不均一となり、本手法による推定はできなかった。以上から、複数の機器や広範な配管を含まない単純な設備について、本手法を用いることで残留水量を高い精度で推定できることが示された。

#### 4.9.4 まとめ

残留トリチウム水の回収作業の進捗状況を把握するためには、残留水からの熱の出入りからその残留量を推定する手法を開発した。本手法では、水分の除去速度を低く抑えて外気と残留水との温度差を小さくすることでその推定精度を高くできること及び複数の機器や広範な配管を含まない単純な設備の残留水量を高い精度で推定できることが示された。

## 5. 結言

「ふげん」では、廃止措置の第一段階「重水系・ヘリウム系等の汚染の除去期間」の作業の一環として、2008年度からカランドリアタンク、重水系及びヘリウム系のトリチウム除去作業を進め、2017年度に完遂した。また、通気乾燥に使用した除湿ロータ式トリチウム除去装置についても、トリチウム除去作業を実施した。これらの作業で得られた成果は以下の通りである。

対象設備を容積や設置場所等を考慮して複数のブロックに分割し、その内容積やトリチウム汚染の程度等が小さいブロックから段階的に作業を進めていくことで、通気乾燥及び真空乾燥並びに空気置換により安全にトリチウム除去を実施できるとともに、ブロック内の圧力変化やトリチウム濃度を確認することでその進捗を管理することができた。ただし、作業に使用するトリチウム除去装置は設備のトリチウム除去に伴ってトリチウムで汚染されるため、設備内のトリチウム濃度の確認においては装置側のバックグラウンドの影響に配慮する必要があった。また、狭隘な箇所に設置された設備の通気乾燥には、小型で可搬性の高い装置として中空糸膜分離式トリチウム除去装置が有効であった。

容積の大きいブロックにおいては、対象範囲をさらに細かく区切って適宜拡張することで、各範囲からの残留トリチウム水の回収状況を的確に把握できるとともに、インリーク箇所を効果的に特定できた。なお、対象範囲外からのインリークは、対象設備内の圧力及び排気流量の減少の停滞が判断の目安となることが分かった。また、吸着材（充填材）を有する機器からのトリチウム除去において加熱が困難な場合には、吸着材からの水分放出の温度依存性を考慮して、真空引き速度を高め設定して真空引きすることが効果的な方法であった。シリカゲルのように加熱処理をしても吸着水の一部が残留する吸着材については、トリチウムを含まない水分を吸脱着させて希釈することがトリチウム除去の有効な手段であることが確認された。さらに、単純かつ比較的小規模な設備の残留推量については、残留水からの熱の出入りを考慮した方法を用い、通気乾燥又は真空乾燥時における外気と残留水との温度差を小さくすることで精度良く推定できた。

本報告書の成果は、類似の作業が想定される他の原子力施設の廃止措置において役立つものと期待される。

参考文献

- 1) K.Y. Wong, et al., “Tritium decontamination of machine components and walls”, *Fusion Engineering and Design*, 16, pp.159-172(1991).
- 2) 大学共同利用機関法人自然科学研究機構, 朝倉大和, “湿潤ガスの除湿方法及びその除湿システム”, 特開 2008-030001, 2008-02-14.
- 3) 伊藤剛士ほか, “中空糸膜分離式の小型可搬式除湿装置を用いた「ふげん」のトリチウム除去－(1) トリチウム水蒸気用除湿装置の開発－”, 日本原子力学会 2013 年春の年会 予稿集, 大阪, 2013, K17.
- 4) N.S. Osborne, et al., “Thermal properties of saturated water and steam”, *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 23, pp.261-270(1939).
- 5) O. Tetens, “Über einige meteorologische Begriffe”, *Zeitschrift für Geophysik*, 6, pp.297-309(1930).
- 6) 甲藤好郎, 伝熱概論, 養賢堂, p.23 (1996).
- 7) N.B. Vargaftik, “Handbook of Thermal Conductivity of Liquids and Gases (1st Edition)”, CRC Press, p.68.
- 8) C.Y Ho and T.K. Chu, “Electrical resistivity and thermal conductivity of nine selected AISI stainless steels”, *CINDAS Report 45*, AISI, 1997.
- 9) U.S. standard atmosphere, 1976, p.19, NASA-TM-X-74335.
- 10) W.G. Berl, ed., “Physical Methods in Chemical Analysis”, Academic Press, New York, Vol. IV, pp.45-98(1961).
- 11) A. Braibanti, et al., “Isobaric heat capacity and structure of water and heavy water in the liquid state”, *Thermochimica Acta*, 286, pp.51-66(1996).
- 12) 菊池誠, 及川瑛子, “アルコール－水系の粘度”, *日本化学雑誌*, 88 (12), pp.1259-1267(1967).
- 13) P.G. Hill, et al., “Tables of thermodynamic properties of heavy water in S.I. units”, Atomic Energy of Canada Limited, Mississauga, Ontario, 1981, 196p.

表 2.2-1 トリチウム防護具とその着用基準

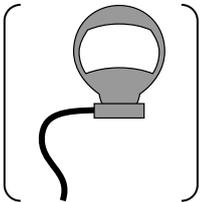
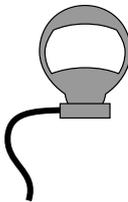
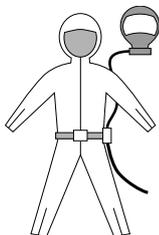
作業エリアのトリチウム濃度 (Bq/cm <sup>3</sup> -air)	< 8×10 <sup>-2</sup>	8×10 <sup>-2</sup> ~8×10 <sup>-1</sup>	8×10 <sup>-1</sup> <
防護具	 <p>エアラインマスク (必要に応じて)</p>	 <p>エアラインマスク</p>	 <p>エアラインマスク トリチウム防護服</p>

表 3.3-1 除湿ロータ式トリチウム除去装置の仕様

項 目	仕 様
装置寸法 (W×D×H)	約 8,000 mm × 6,300 mm × 3,700 mm
装置総重量	約 5,240 kg (架台類除く)
除湿ロータ	ハニードライ (HPM-05CEW)
再生ヒータ	—
プレクーラ	BWT-2010-450
処理ファン	AH-1000HT-H312 (風量 1,410 Nm <sup>3</sup> /h)
給気ファン	U100B-66-D00-M212 (風量 500 Nm <sup>3</sup> /h)
再生ファン	AH-800HT-H312 (風量 470 Nm <sup>3</sup> /h)
冷却用ファン	AH-800-H312 (風量 440 Nm <sup>3</sup> /h)
ブラインチリングユニット	UWAXP750BZ (冷媒 R410A)
ブラインポンプ	50LPD62.2A (吐出量 0.12 m <sup>3</sup> /min)
ドレンポンプ	F61-119F2AM-0204R1-AV (吐出量 0.01 m <sup>3</sup> /min)

表 3.3-2 中空糸膜分離式トリチウム除去装置の仕様

項 目	仕 様
ユニット寸法 (W×D×H)	約 800 mm × 600 mm × 1,800 mm
装置総重量	約 300 kg (冷却器除く)
膜モジュール	ポリイミド高分子中空糸膜 (L1,160 mm × φ 90 mm)
圧縮ポンプ	最大流量 140 L/min at 1atm、突出圧 600 kPa
真空ポンプ	最高真空度 5 Pa、排気流量 250 L/min
冷却器温度	5°C

This is a blank page.

表 4.1-1 トリチウム除去作業の実績概略

作業名	対象物	作業内容	実績
① 重水循環ポンプ用熱交換器のトリチウム除去 (2008 年度)	重水循環ポンプ用熱交換器 A/B/C 【約 0.09 m <sup>3</sup> /基】	A: 加熱真空乾燥 (40°C) B: 常温通気乾燥 (室温) C: 加熱通気乾燥 (40°C) ↓ 間欠的空気置換 (30 分吸引 ⇄ 数日密閉)	・ 各乾燥方法の実機への適用性を確認するとともに、各乾燥方法の作業時間 (加熱真空 < 加熱通気 < 常通気)、乾燥完了の目安 (内部濃度で ~ 数十 Bq/cm <sup>3</sup> )、通気乾燥における残留水の有無判断方法 (真空引きによる圧力変化や内部濃度の確認) 及び除去装置のバッググラウンド影響を考慮した内部空気採取ポートの位置 (系統側に直接設置) を確認した。
② ヘリウム浄化系のトリチウム除去 (2008 年度末 ~ 2010 年度)	ヘリウム浄化系室内の設備 【約 3.4 m <sup>3</sup> 】 (再結合器 - A/B、脱湿器 - A/B、その他機器・配管等)	加熱真空乾燥 (60 ~ 90°C) ↓ 間欠的空気置換 (約 1 kPa まで排気した後大気圧に戻す作業を複数回 ⇄ 数日密閉)	・ 上記①の結果を踏まえて、より規模の大きい実機への加熱真空乾燥の適用性及び当該作業の安全性を確認するとともに、作業時間を長くする要因 (内部構造物や充填材) を確認した。
③ ポイズン供給系のトリチウム除去 (2010 年度末 ~ 2011 年度)	ポイズン供給設備 【約 1.2 m <sup>3</sup> 】 (ポイズン溶解槽、その他機器・配管等)	加熱真空乾燥 (40 ~ 70°C) ↓ 間欠的空気置換 (約 1.5 kPa まで排気した後大気圧に戻す作業を複数回 ⇄ 数日密閉)	・ 上記②の結果を踏まえて、トリチウム汚染が多い実機への加熱真空乾燥の適用性及び当該作業の安全性を確認するとともに、範囲対象外からのインリークの判断目安 (内圧と真空ポンプの排気流量の変化) を確認した。
④ 重水浄化系のトリチウム除去 (2011 年度末 ~ 2014 年度)	重水浄化系室内の設備 【約 8.65 m <sup>3</sup> 】 (ポイズン除去塔 - A/B、重水浄化塔 - A/B、重水化塔、その他配管等)	常通真空乾燥* ↓ 間欠的空気置換 (2 ~ 5 kPa まで排気した後大気圧に戻す ⇄ 数日密閉) ※ 当該作業前に、中空糸膜分離式トリチウム除去装置を用いた B-重水浄化塔の常通真空/真空乾燥を実施した。	・ 上記②・③の結果を踏まえて、さらに規模の大きい実機への常通真空乾燥の適用性及び当該作業の安全性を確認するとともに、常通での充填材の効率的な乾燥方法 (真空排気速度の増大) 及び中空糸膜分離式トリチウム除去装置の狭隘な現場への適用性を確認した。 ・ 内部露点の確認により残留水の有無を判断できる見通しを得た。
⑤ 劣化重水貯槽、重水貯槽等のトリチウム除去 (2013 年度 ~ 2017 年度)	原子炉補助建屋側の重水冷却系及び重水浄化系の残り 【約 220 m <sup>3</sup> 】 (重水 / 劣化重水貯槽 - A/B、その他機器・配管等)	常通真空乾燥 ↓ 間欠的空気置換 (約 1.5 kPa まで排気した後約 10 kPa まで戻す ⇄ 1 日密閉)	・ 上記④の結果及び「3.4 残留トリチウム水回収のための真空乾燥装置」を踏まえて、常通真空乾燥により安全に残留水を回収した。 ・ 真空引き範囲を適宜拡張することで、残留水の回収状況及びインリーク箇所を把握した。
⑥ カラントリアタンク等のトリチウム除去 (2010 年度 ~ 2017 年度)	原子炉建屋側の設備 【約 280 m <sup>3</sup> 】 (カラントリアタンク、重水ダンブタンク、その他機器・配管等)	常通通気乾燥 / 常通真空乾燥 ↓ 連続空気置換 (非常用ガス処理系による吸引)	・ 上記①・④の結果及び「3.4 残留トリチウム水回収のための真空乾燥装置」を踏まえて、常通通気乾燥及び常通通気乾燥により安全に残留水を回収した。
⑦ 除湿ロータ式トリチウム除去装置 (2015 年度)	除湿ロータ式トリチウム除去装置	装置全体の加熱通気乾燥 (50°C) ↓ シリカゲルに吸着したトリチウム水の希釈 (湿潤空気の導入によるトリチウム非含有水の吸着 ⇄ 再生運転による脱水)	・ 本作業方法により、当該装置のトリチウム除去を安全に実施した。 ・ シリカゲルへの水分の吸脱着を行うことで、シリカゲルに吸着されたトリチウム水を効果的に除去 (希釈) できた。
⑧ 残留トリチウム水量の推定 (2012 年度)	コントロール試験: 模擬体 (20 L ベール缶及び 200 L ドラム缶) ホット試験: B-重水浄化塔	常通通気乾燥及び常通真空乾燥における熱の出入り (下記 a, b の比較) から推定 a) 乾燥作業中の平衡状態における外気からの残留水への入熱量 b) 平衡状態到達後、密閉状態で乾燥作業を停止してから短時間経過する間 の外気からの残留水への入熱量 ▶ ここで平衡状態とは、蒸発による除熱量と外気との温度差による入熱量が等しい状態をいう。	・ 本手法により、比較的小規模な設備を対象として、水分の除去速度 (通気風速又は真空排気速度) を低く抑えて外気と残留水との温度差を小さくすることで、残留水量を高い精度で推定できることが示された。

表 4.6-1 空気置換後のトリチウム濃度の変化（劣化重水貯槽、重水貯槽等）

測定時期	対象箇所		重水貯槽室	劣化重水貯槽室	除染室	樹脂交換用重水タンク室
	空気置換直後	密閉保持 1 日後				
1 回目	2.3×10 <sup>-2</sup> Bq/cm <sup>3</sup> (B-重水貯槽)	4.0 Bq/cm <sup>3</sup> (ドレンタンク)	0.3×10 <sup>-2</sup> Bq/cm <sup>3</sup> (A-劣化重水貯槽)	10.2 Bq/cm <sup>3</sup> (浄化系重水貯槽)	9.11 Bq/cm <sup>3</sup>	1.43 Bq/cm <sup>3</sup>
	2.3×10 <sup>-1</sup> Bq/cm <sup>3</sup> (B-重水貯槽)	9.14 Bq/cm <sup>3</sup> (ドレンタンク)	0.1×10 <sup>-2</sup> Bq/cm <sup>3</sup> (A-劣化重水貯槽)	12.5 Bq/cm <sup>3</sup> (浄化系重水貯槽)	10 Bq/cm <sup>3</sup>	7.02 Bq/cm <sup>3</sup>
2 回目	—	—	—	—	—	6.98 Bq/cm <sup>3</sup>
	—	—	0.39 Bq/cm <sup>3</sup> (浄化系重水貯槽)	—	—	7.85 Bq/cm <sup>3</sup>
3 回目	—	—	—	—	—	3.78 Bq/cm <sup>3</sup>
	—	—	18.3 Bq/cm <sup>3</sup> (浄化系重水貯槽)	—	—	3.5 Bq/cm <sup>3</sup>

表 4.7-1 空気置換後のトリチウム濃度の変化（カランドリアタンク等）

対象箇所	カランドリアタンク	原子炉建屋 地下 2 階	原子炉建屋 地下 1 階	原子炉建屋 3 階
測定時期	—	—	—	—
空気置換直後	3.7×10 <sup>-1</sup> Bq/cm <sup>3</sup>	0.6×10 <sup>-1</sup> Bq/cm <sup>3</sup> ※	同左※	—
密閉保持 1 日後	4.5×10 <sup>-1</sup> Bq/cm <sup>3</sup>	1.9 Bq/cm <sup>3</sup> ※	同左※	3.5 Bq/cm <sup>3</sup>

※重水冷却系として代表箇所にて採取した値

表 4.9-1 コールド試験条件

試験 No.	通気方向	風速 [L/min]	水量 [L]	
			ドラム缶	ペール缶
1	ドラム缶→ペール缶	22	4.6	0
2	ドラム缶→ペール缶	50	4.5	0
3	ドラム缶→ペール缶	22	5.0	1.5
4	ドラム缶→ペール缶	50	5.0	1.5
5	ペール缶→ドラム缶	22	0	2.2
6	ペール缶→ドラム缶	50	0	2
7	ペール缶→ドラム缶	22	5.0	1.8
8	ペール缶→ドラム缶	50	5.3	1.7

表 4.9-2 コールド試験結果

試験 No.	缶	Q <sub>1</sub> [J/min]	Q <sub>2</sub> [J/min]	Q <sub>3</sub> [×V J/min]	V [×10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> ]	V <sub>r</sub> [×10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> ]	推定精度 [%]
1	ドラム	781.7	113.3	0.149	4.48	4.44	98.1
	ペール	—	—	—	—	—	—
2	ドラム	1407.7	119.4	0.255	5.05	4.28	82.1
	ペール	—	—	—	—	—	—
3	ドラム	878.9	107.2	0.145	5.32	4.76	88.1
	ペール	190.5	14.1	0.118	1.49	1.45	96.9
4	ドラム	1491.2	89.7	0.174	8.04	4.62	26.0
	ペール	354.1	10.4	0.174	1.97	1.38	57.6
5	ドラム	—	—	—	—	—	—
	ペール	581.7	21.5	0.153	3.65	2.00	17.4
6	ドラム	—	—	—	—	—	—
	ペール	907.7	20.5	0.295	3.01	1.78	31.5
7	ドラム	592.9	143.7	0.092	4.91	4.77	97.2
	ペール	585.5	18.5	0.203	2.80	1.69	34.7
8	ドラム	1065.3	73.7	0.161	6.16	4.91	74.5
	ペール	984.7	18.0	0.321	3.01	1.51	0.47

表 4.9-3 ホット試験結果

試験 No.	室温 [°C]	Q <sub>1</sub> [J/min]	Q <sub>2</sub> [J/min]	Q <sub>3</sub> [×V J/min]	V [×10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> ]	推定精度 [%]
1	10.4	1469.8	58.3	0.100	12.76	97.8
2	13.6	1855.4	73.5	0.108	14.92	80.6
3	13.4	2037.2	108.6	0.157	11.11	88.9
平均	—	—	—	—	12.94	96.5

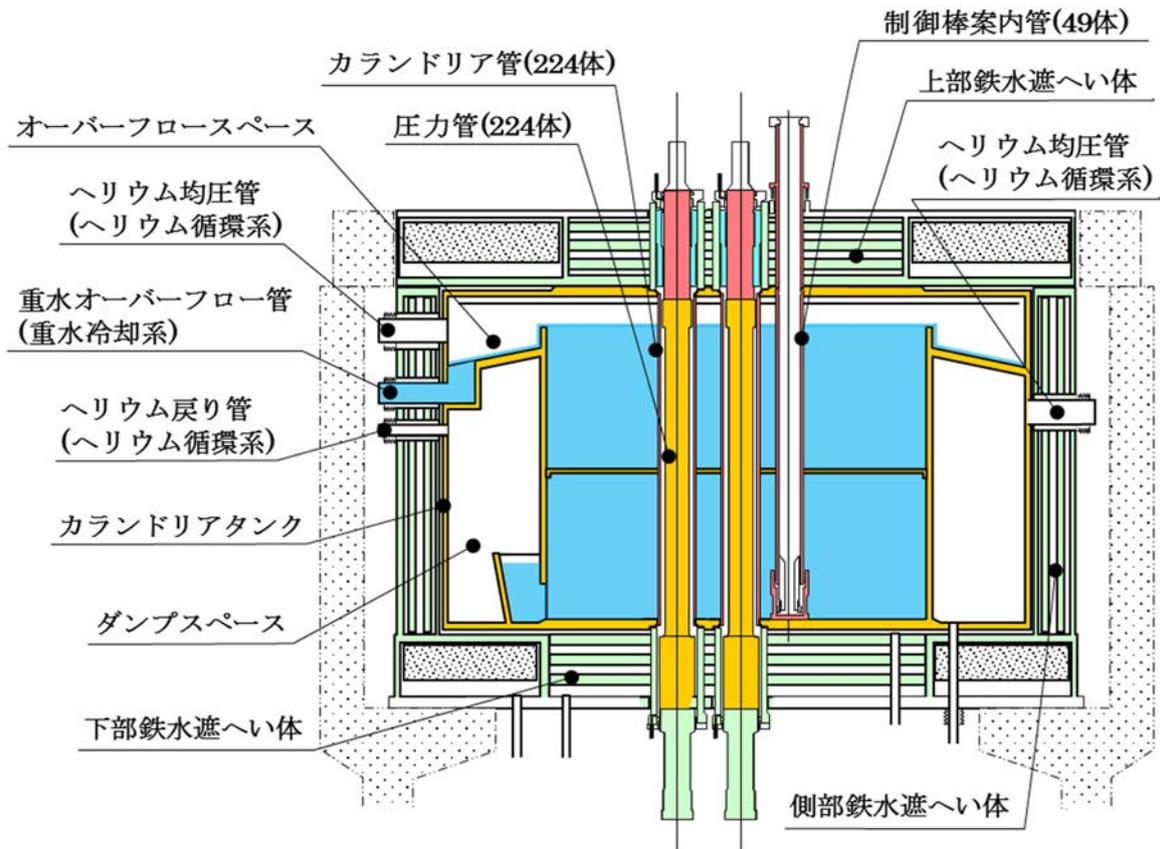


図 2.1-1 原子炉本体の概略

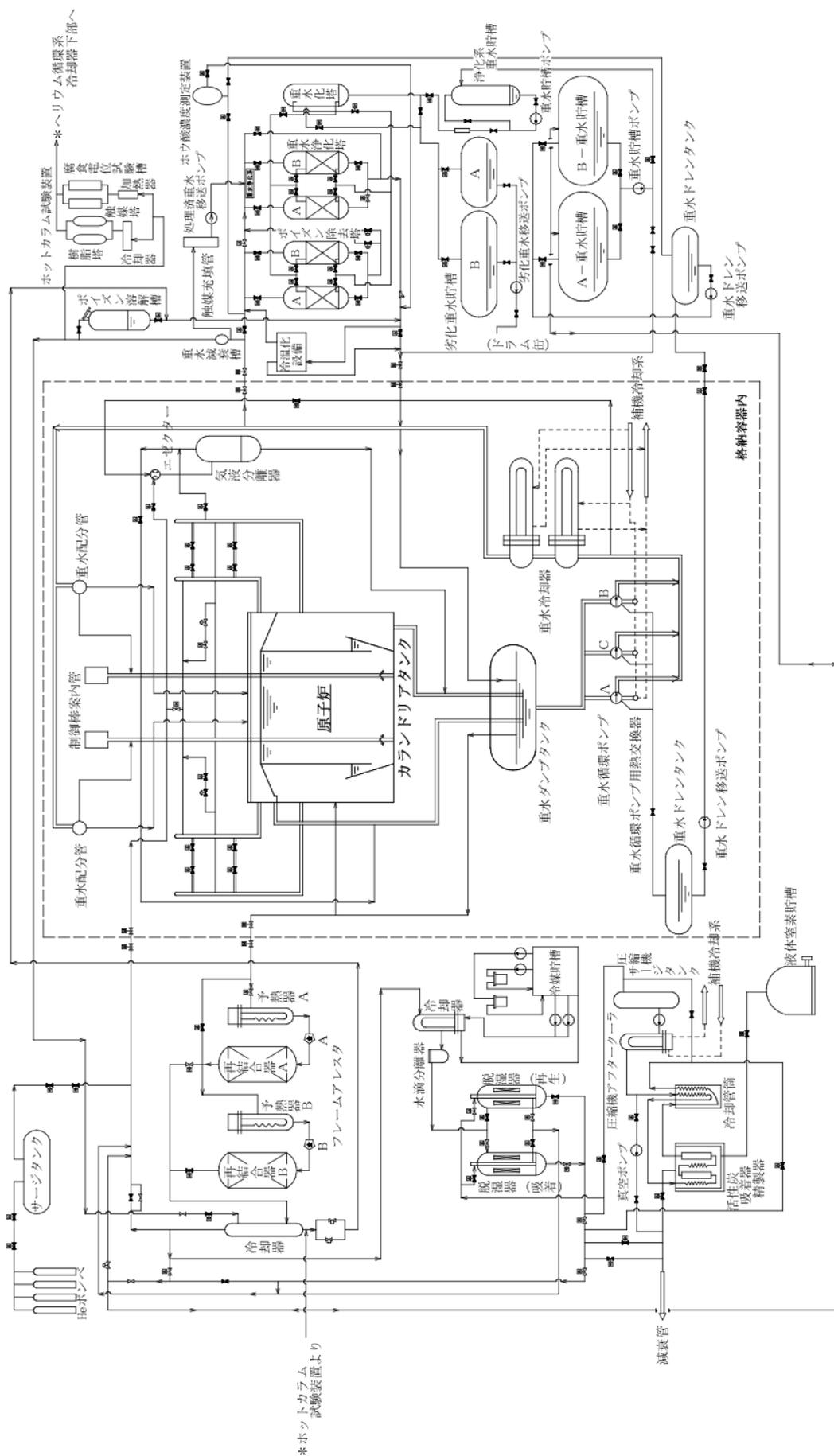


図 2.1-2 重水系及びびヘリウム系の概略

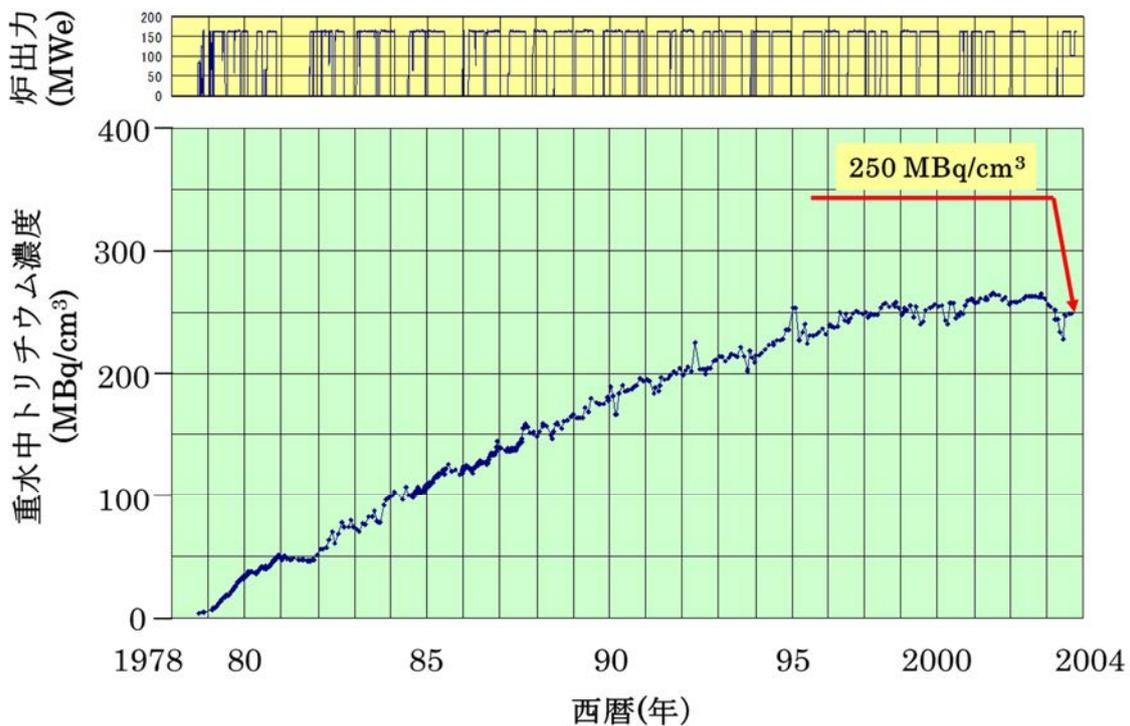


図 2.2-1 原子炉運転期間における重水中のトリチウム濃度の変化

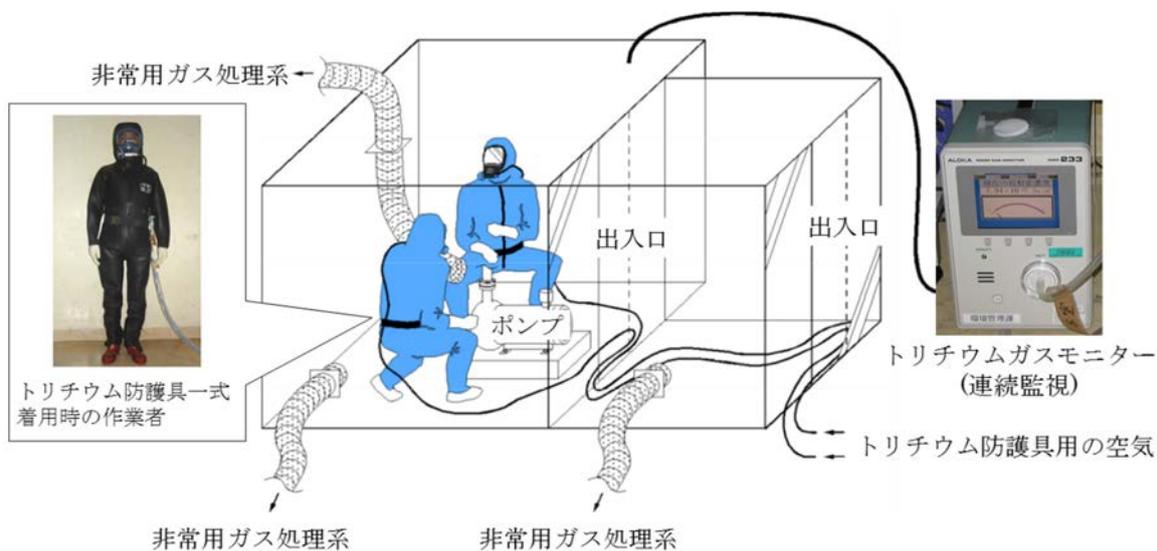
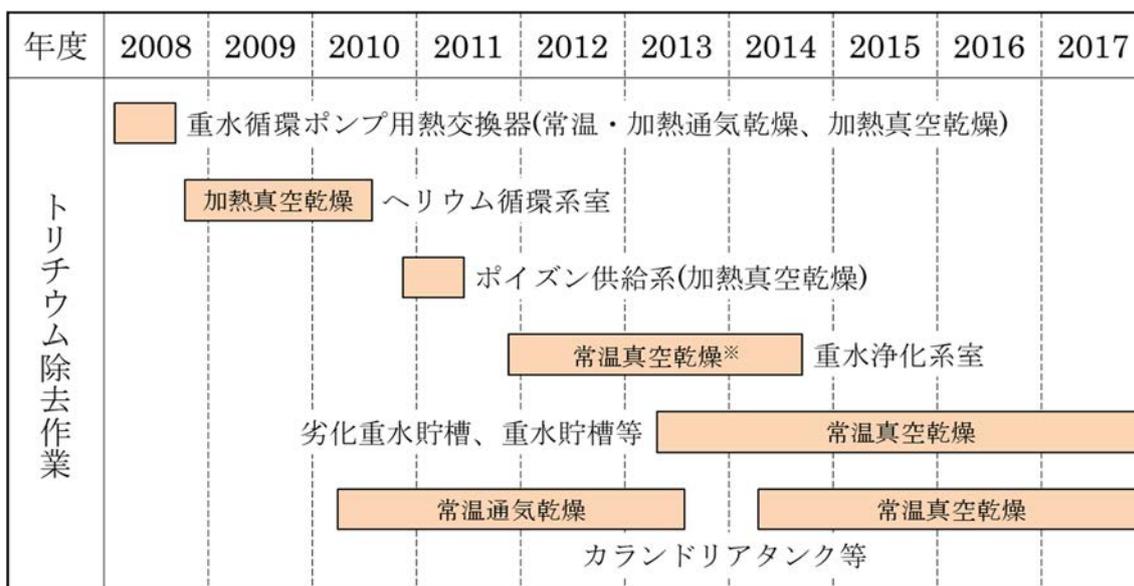


図 2.2-2 トリチウム防護対策





※B-重水浄化塔には部分的に常温通気乾燥を適用。

図 3.2-1 残留トリチウム水の回収工程



図 3.3-1 除湿ロータ式トリチウム除去装置の外観

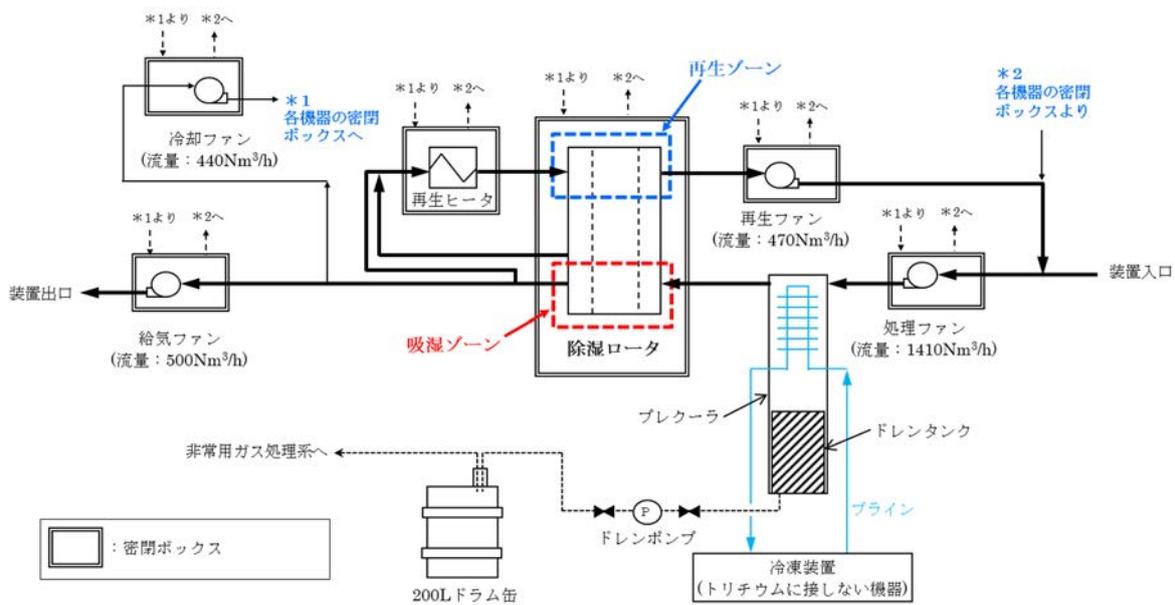


図 3.3-2 除湿ロータ式トリチウム除去装置の構成概略

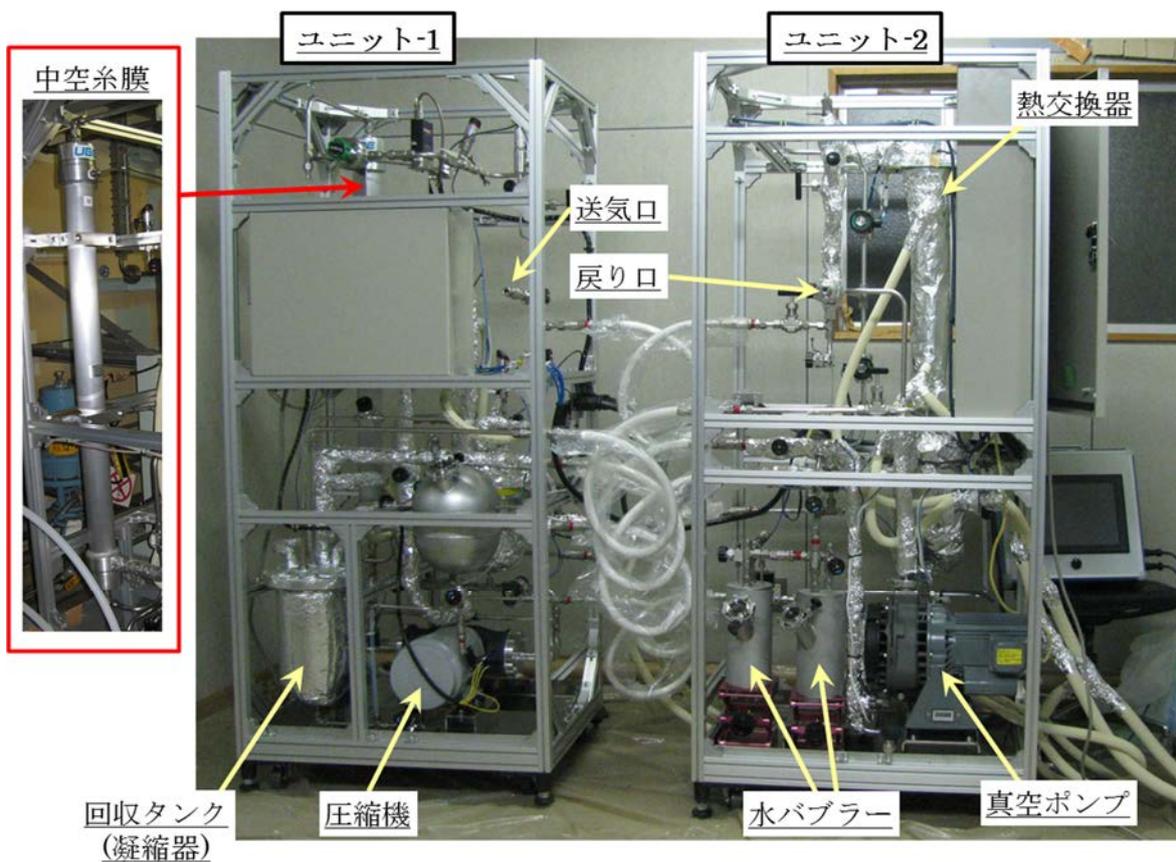


図 3.3-3 中空糸膜分離式トリチウム除去装置の外観

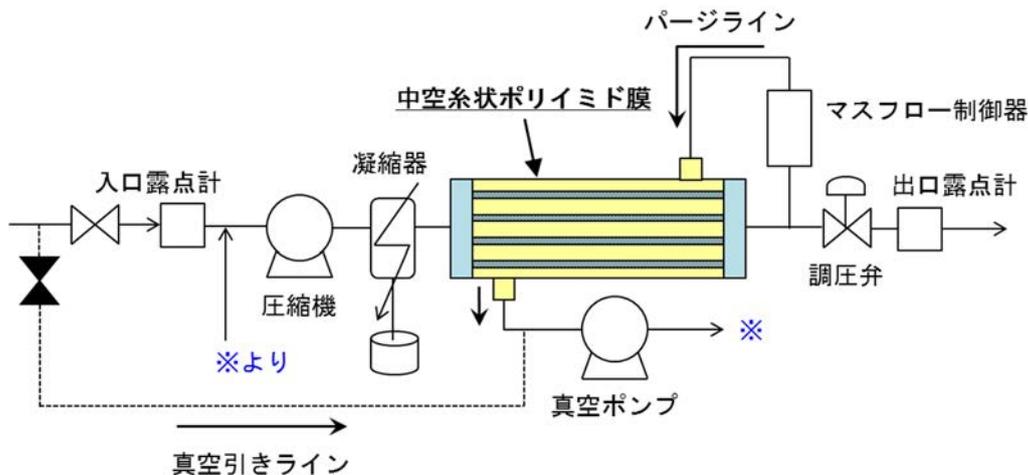


図 3.3-4 中空糸膜分離式トリチウム除去装置の構成概略

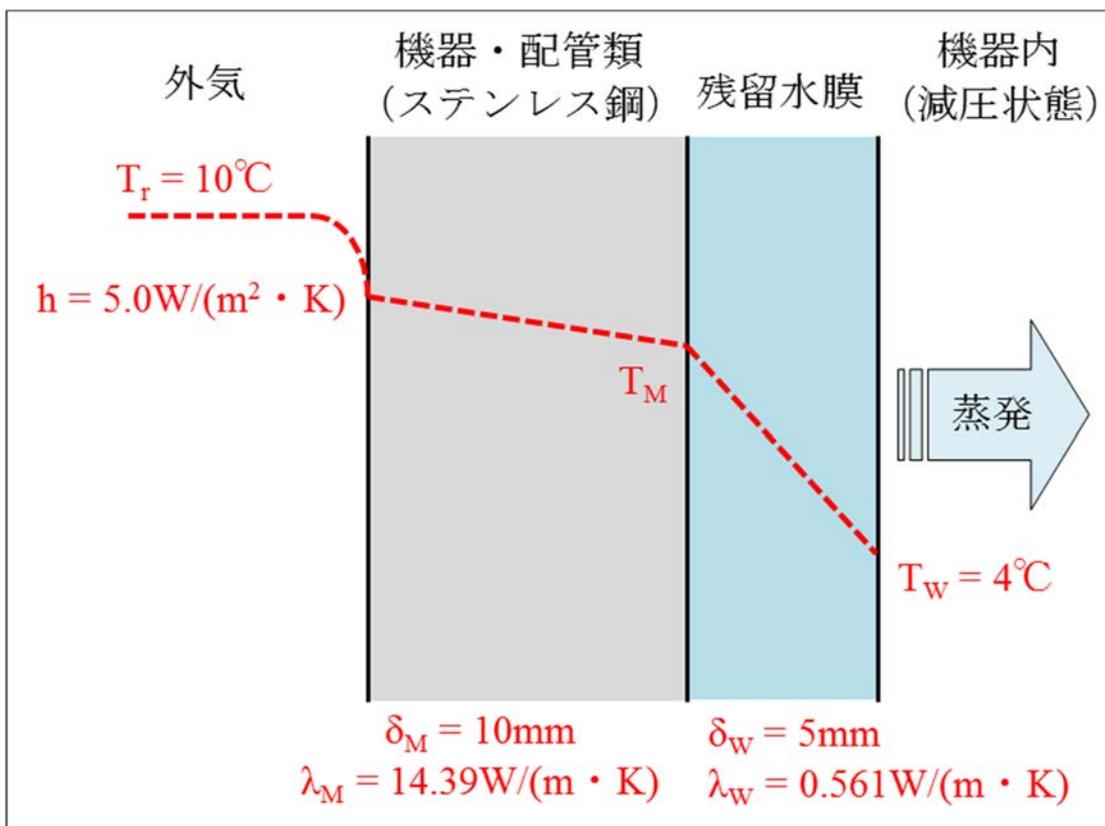


図 3.4-1 外気 - 残留トリチウム水間の熱移動モデル

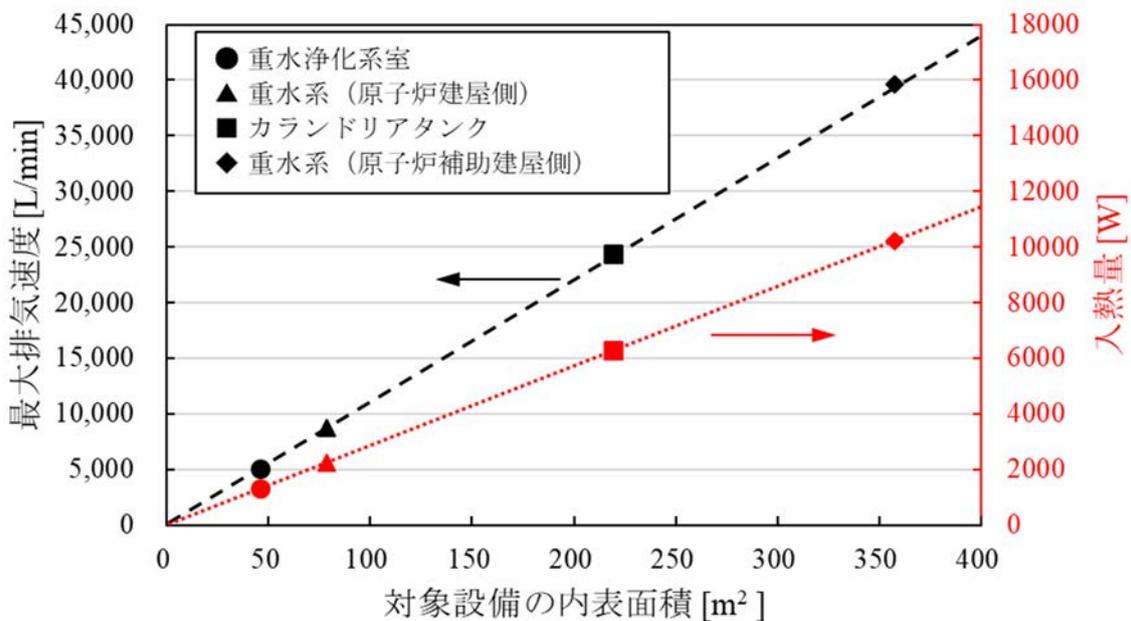


図 3.4-2 設備の内表面積と排気速度の上限値及び入熱量の関係

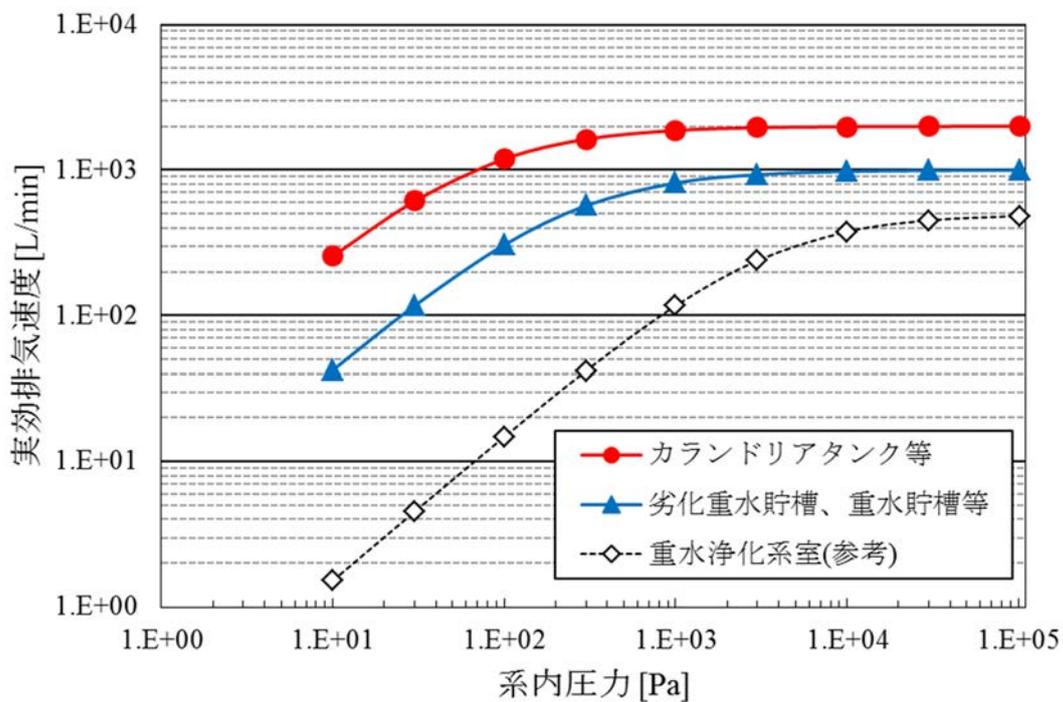


図 3.4-3 実効排気速度と系内圧力の関係



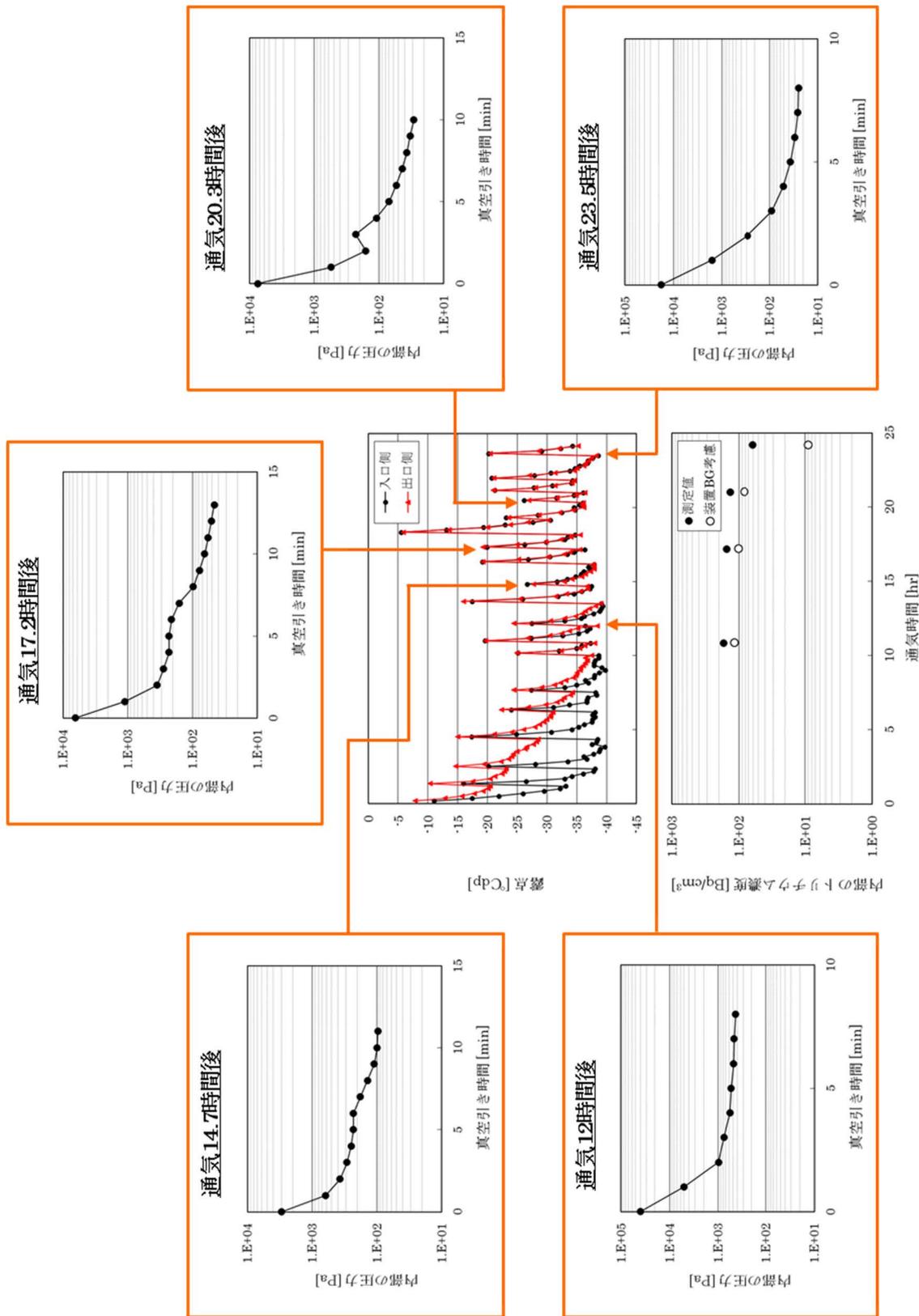


図 4.2-2 常温通気乾燥時の露点、内圧及びトリチウム濃度の経時変化 (B-熱交換器)

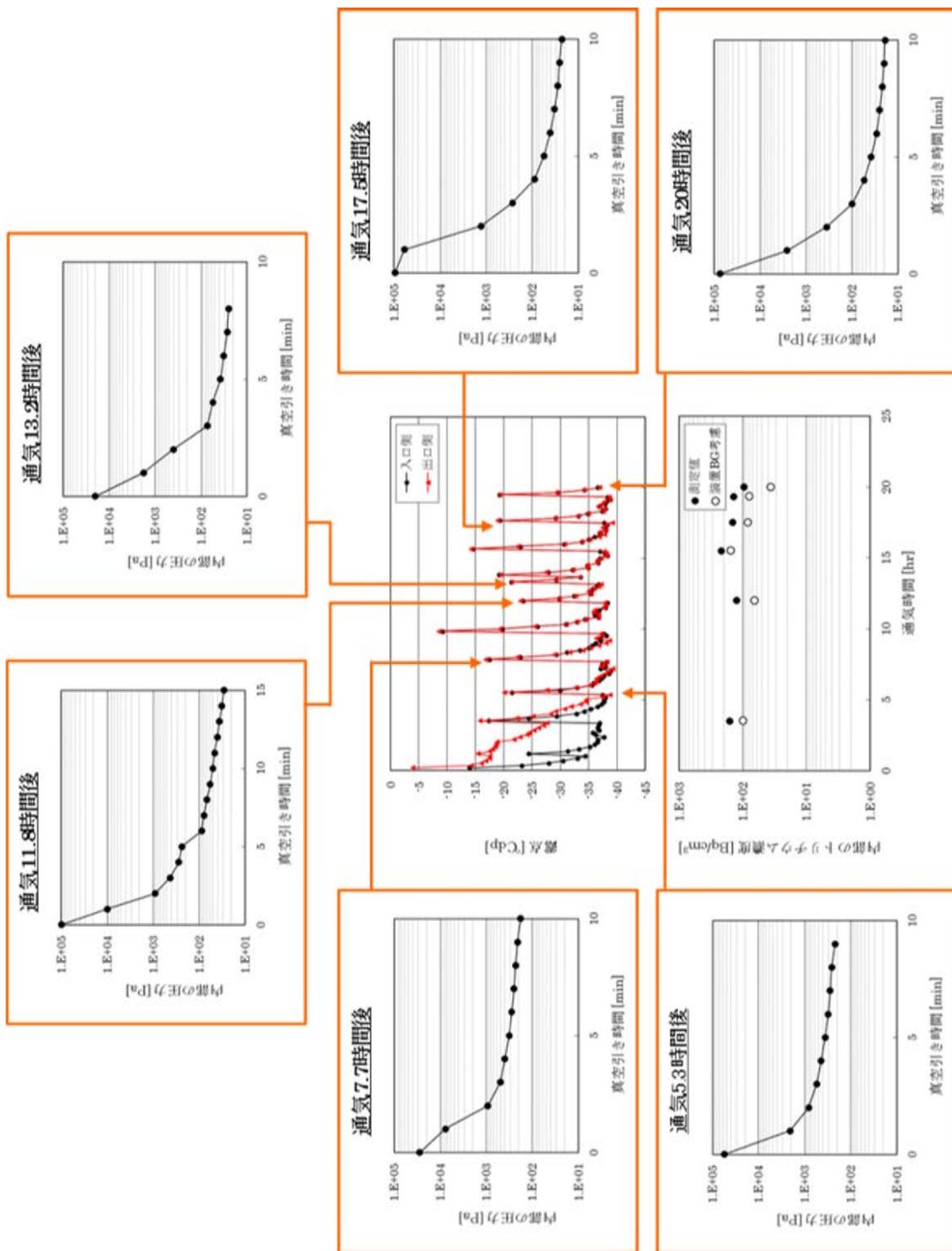


図 4.2-3 加熱通気乾燥時の露点、内圧及びトリチウム濃度の経時変化 (C-熱交換器)

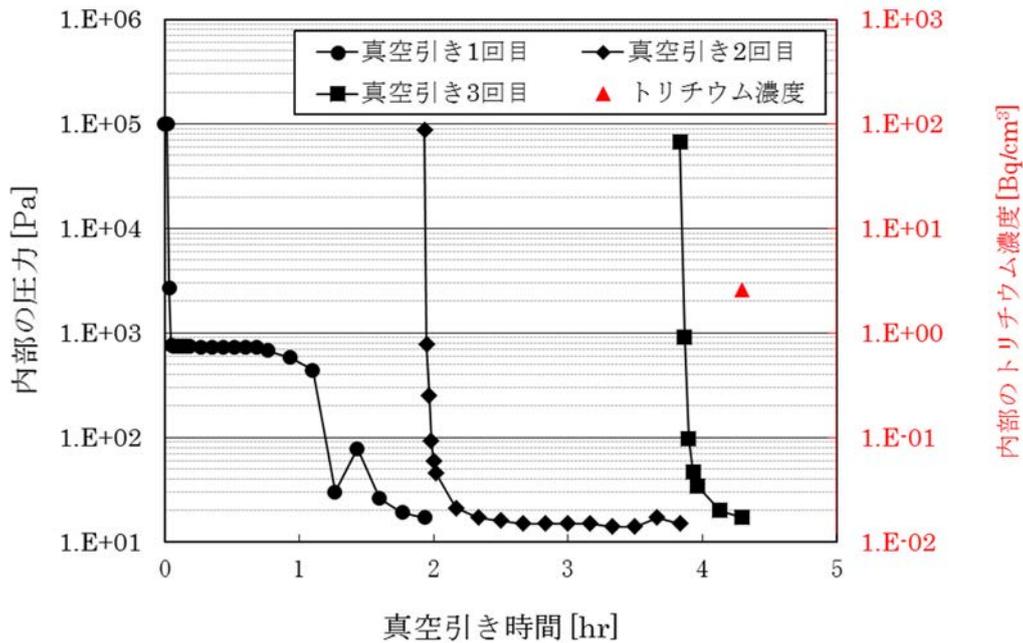


図 4.2-4 加熱真空乾燥時の内圧及びトリチウム濃度の経時変化 (A-熱交換器)

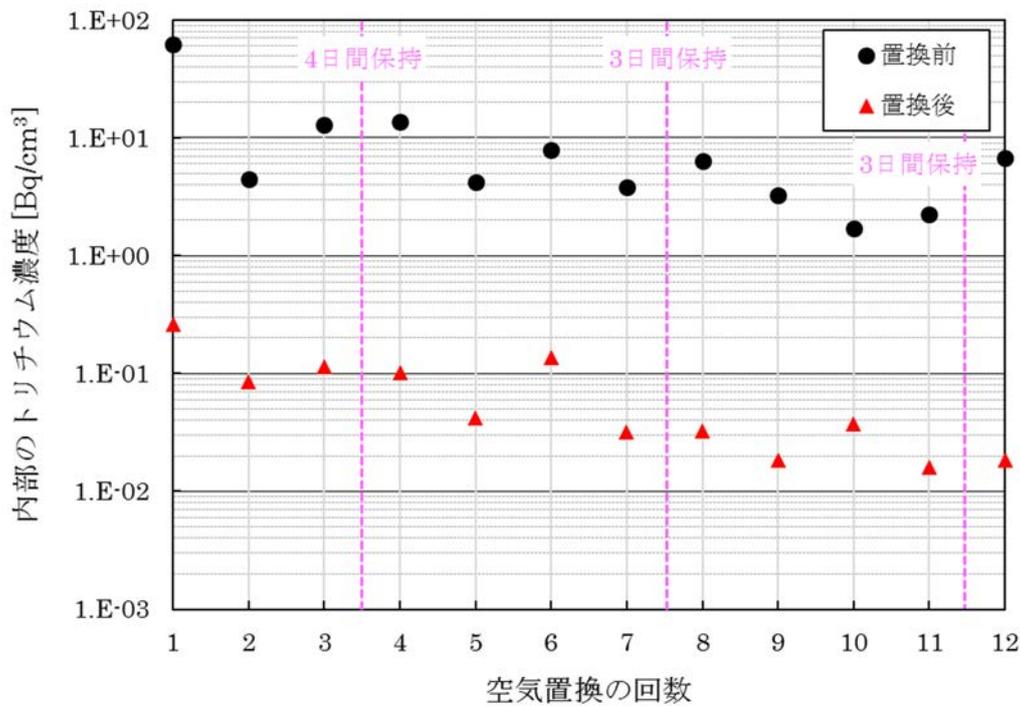


図 4.2-5 空気置換時のトリチウム濃度の変化 (A-熱交換器)

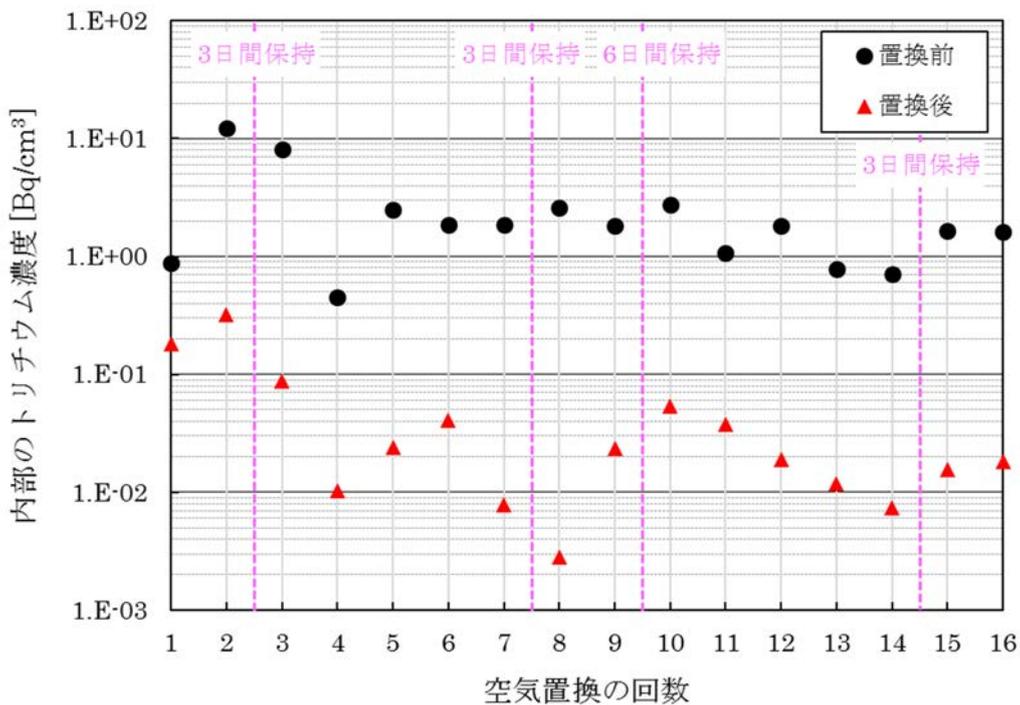


図 4.2-6 空気置換時のトリチウム濃度の変化 (B-熱交換器)

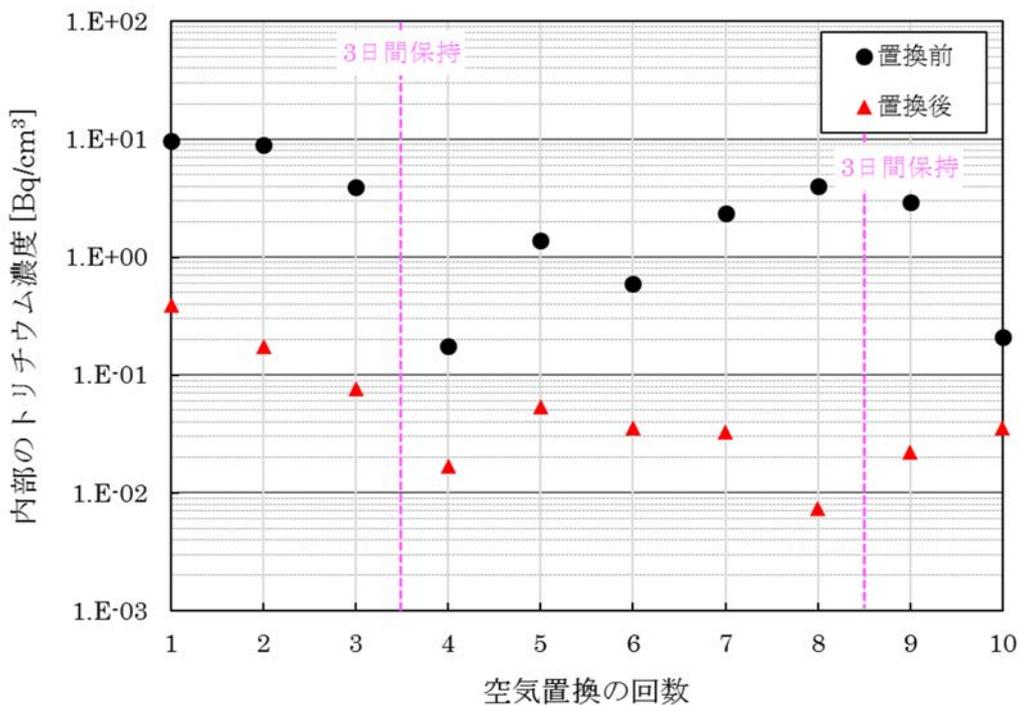


図 4.2-7 空気置換時のトリチウム濃度の変化 (C-熱交換器)

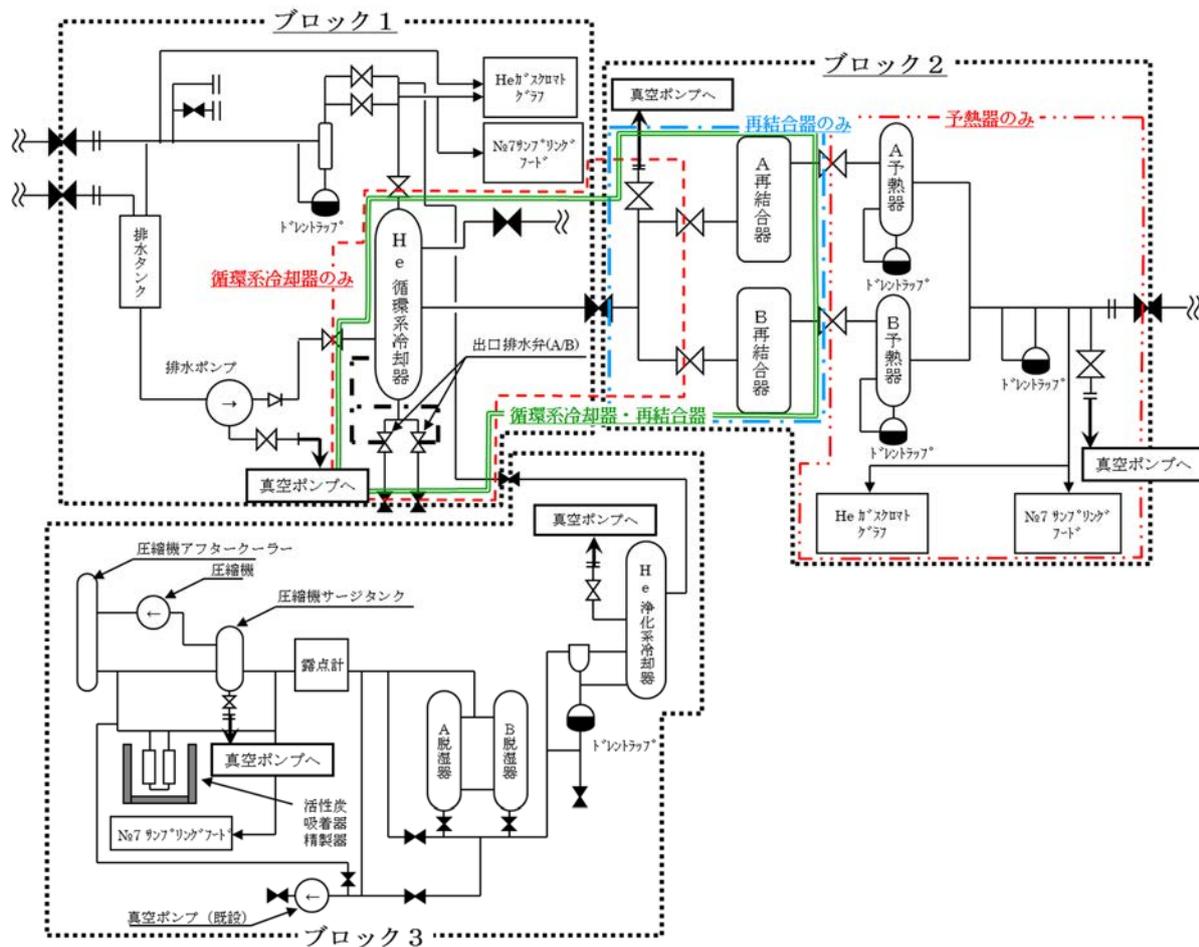


図 4.3-1 真空乾燥作業におけるブロック分けの概略 (ヘリウム浄化系室)

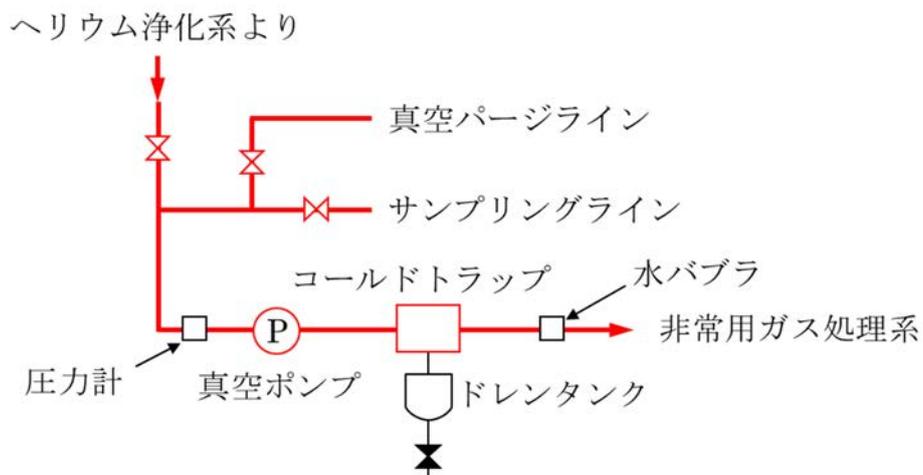


図 4.3-2 真空乾燥装置の概略 (ヘリウム浄化系室)

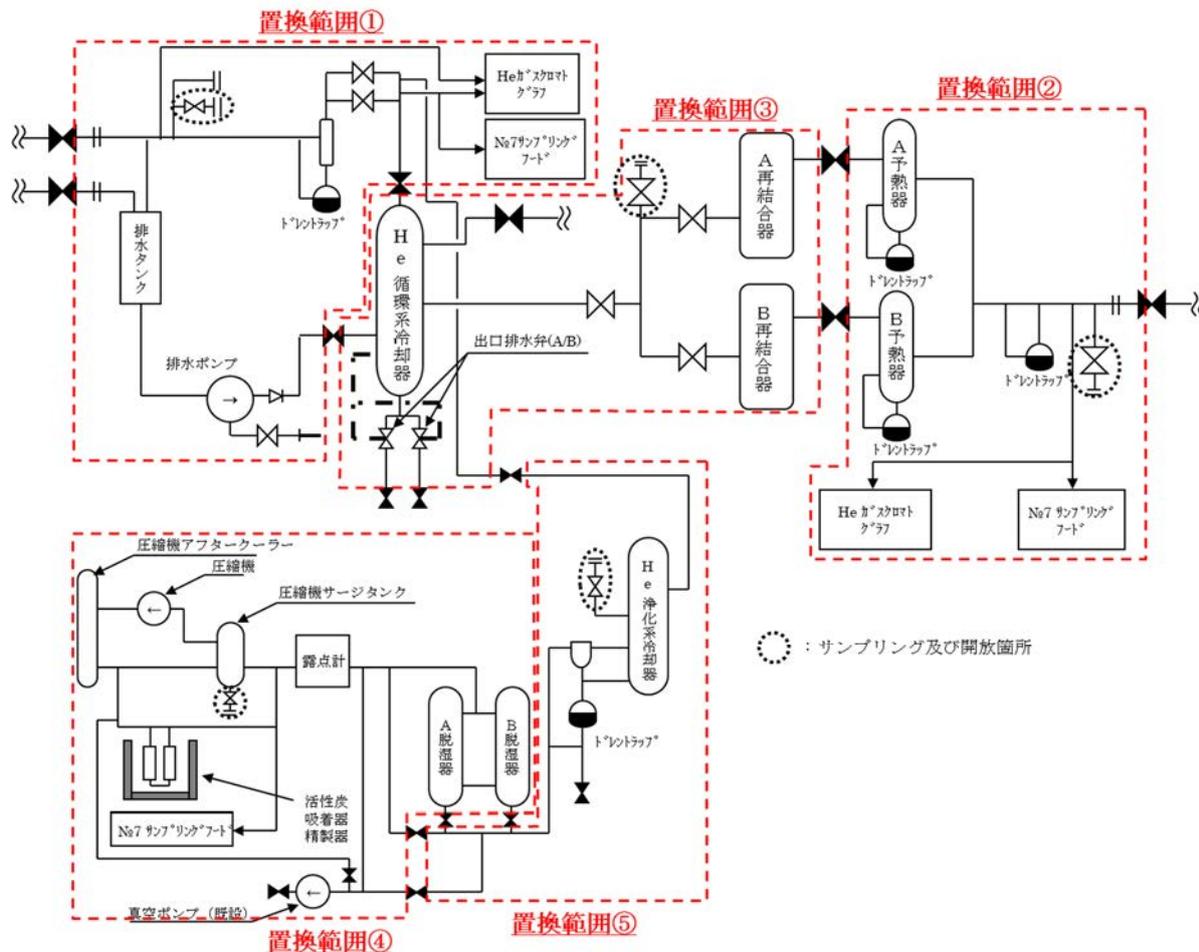


図 4.3-3 空気置換作業におけるブロック分けの概略（ヘリウム浄化系室）

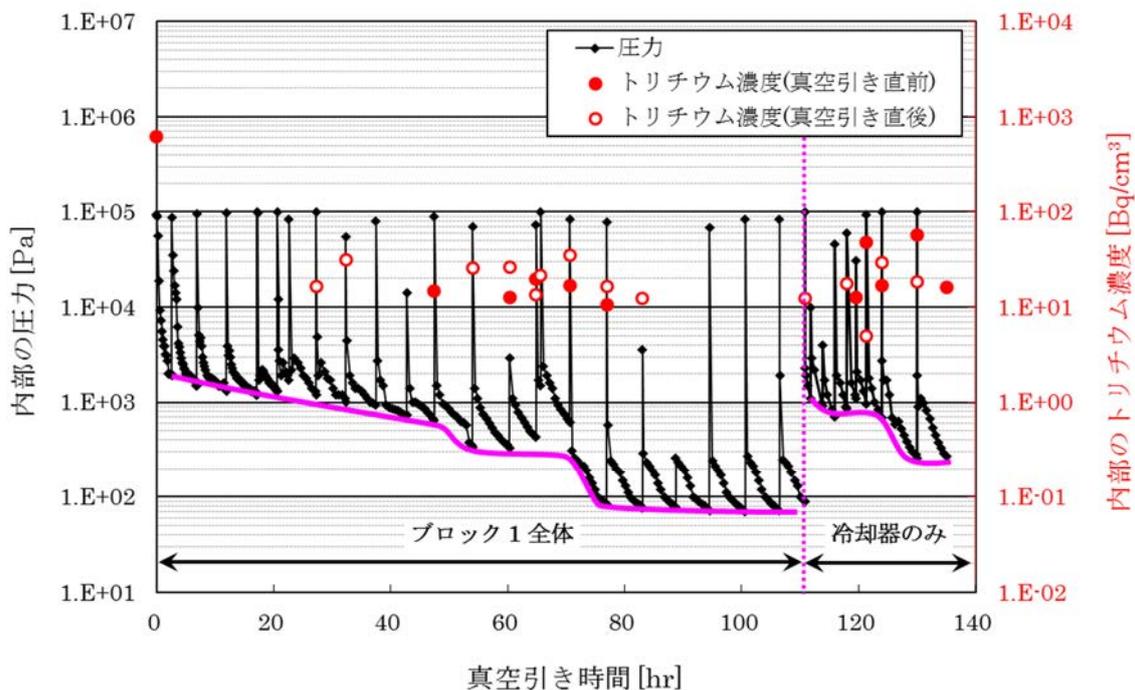


図 4.3-4 加熱真空乾燥時の内圧及びトリチウム濃度の経時変化  
(ヘリウム浄化系室、ブロック 1)

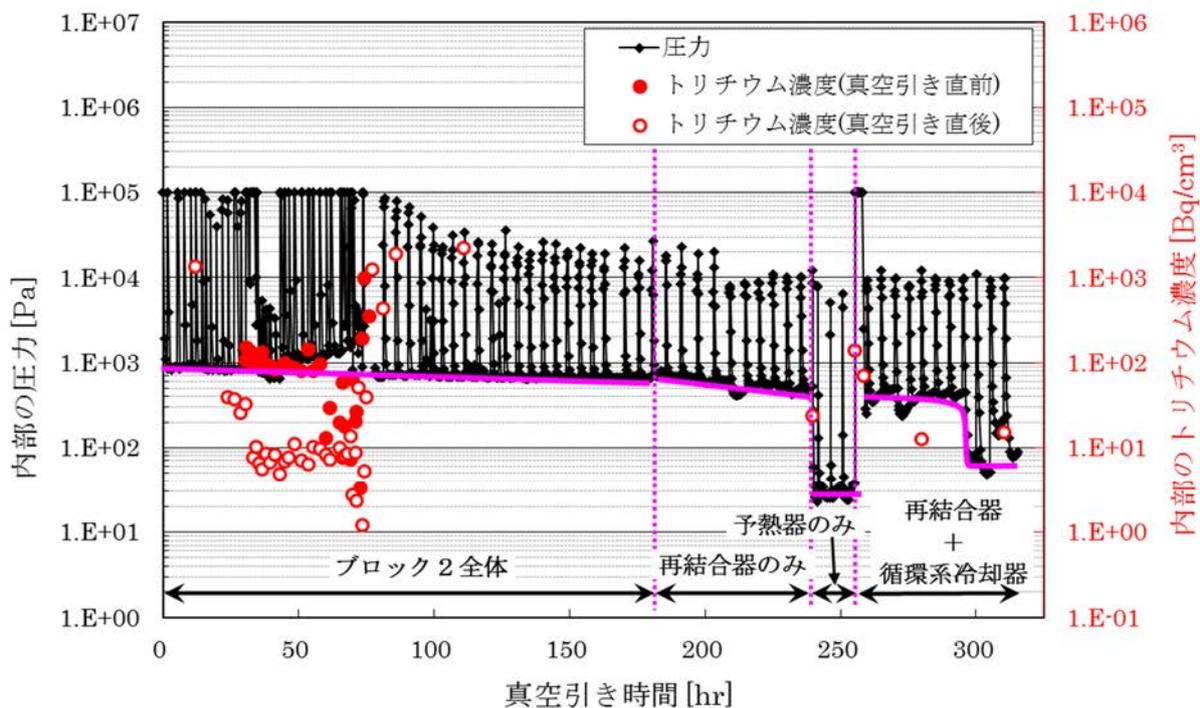


図 4.3-5 加熱真空乾燥時の内圧及びトリチウム濃度の経時変化  
(ヘリウム浄化系室、ブロック 2)

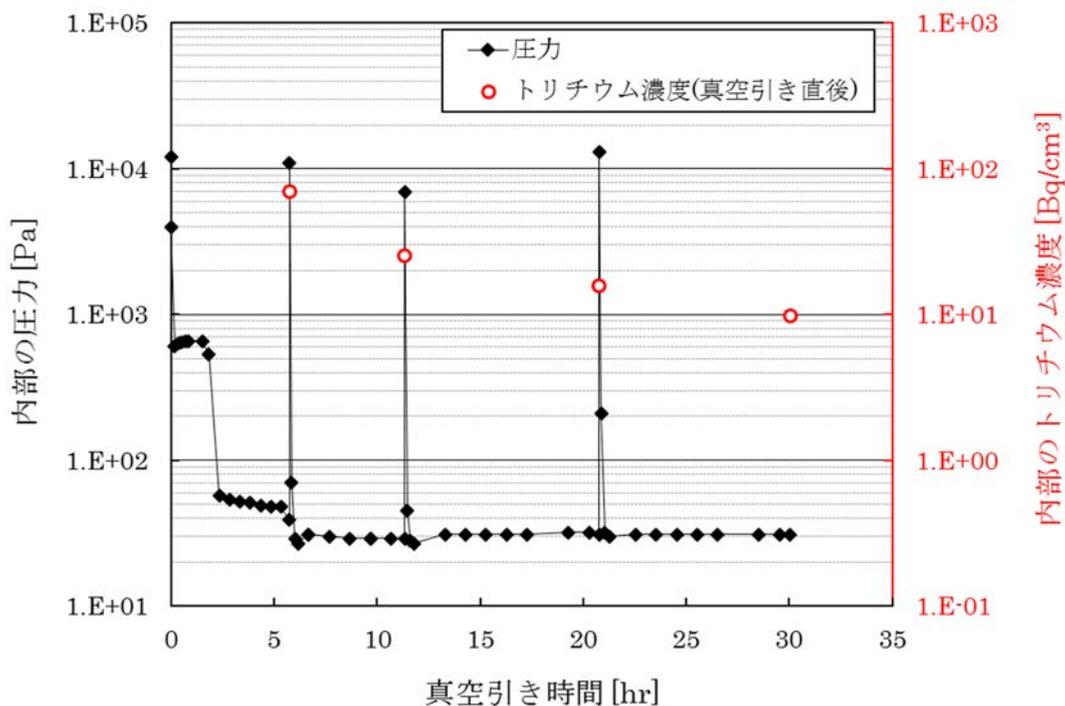


図 4.3-6 加熱真空乾燥時の内圧及びトリチウム濃度の経時変化  
(ヘリウム浄化系室、ブロック 3)

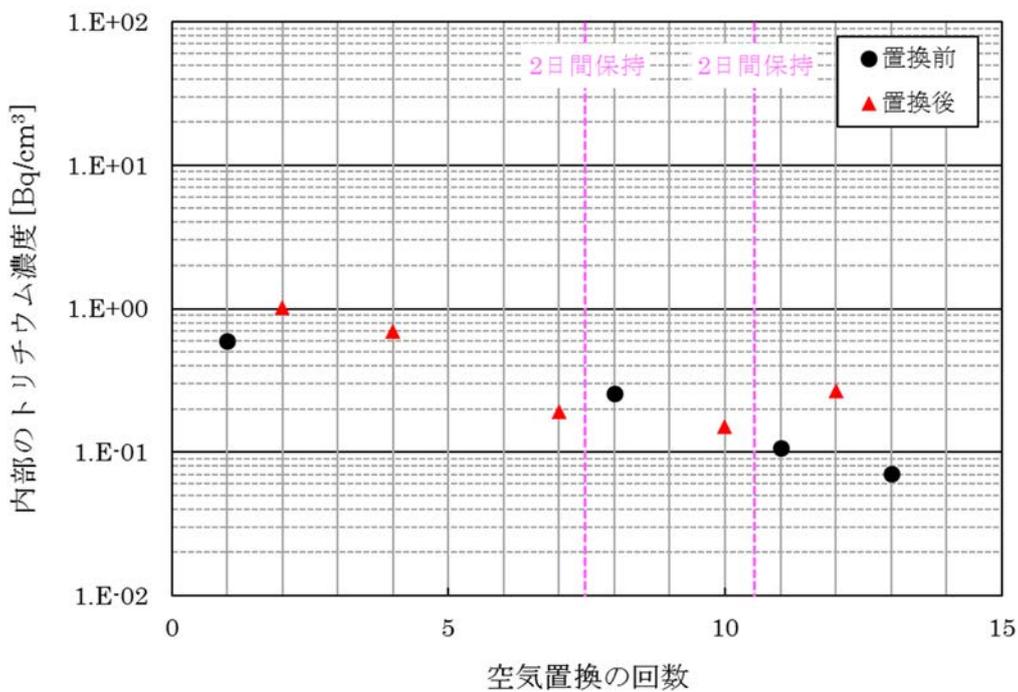


図 4.3-7 空気置換時のトリチウム濃度の変化 (ヘリウム浄化系室、置換範囲①)

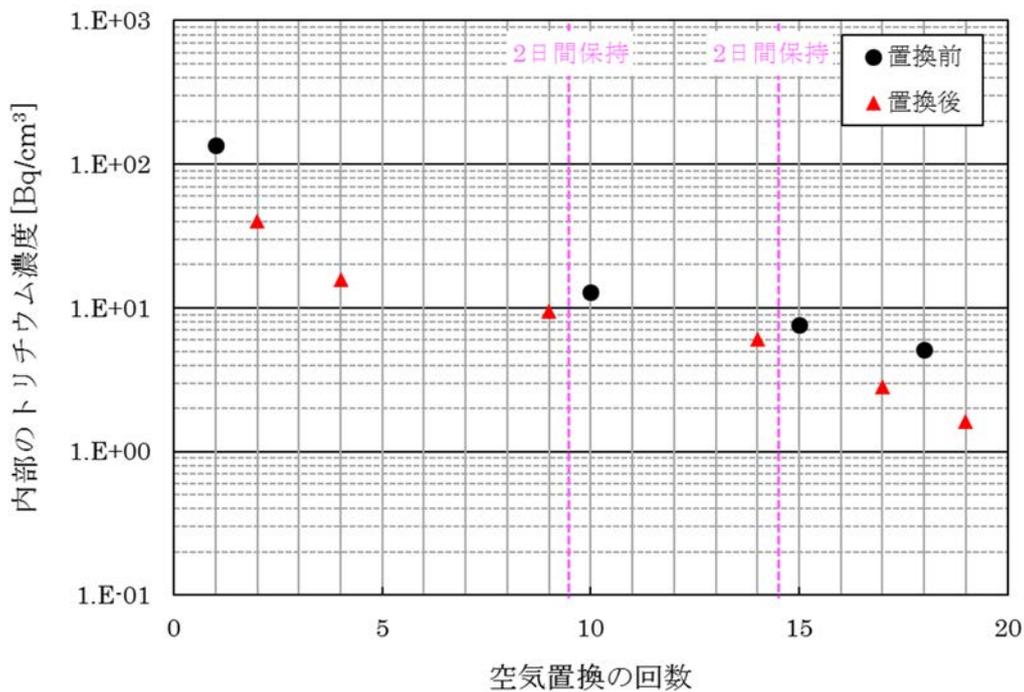


図 4.3-8 空気置換時のトリチウム濃度の変化（ヘリウム浄化系室、置換範囲②）

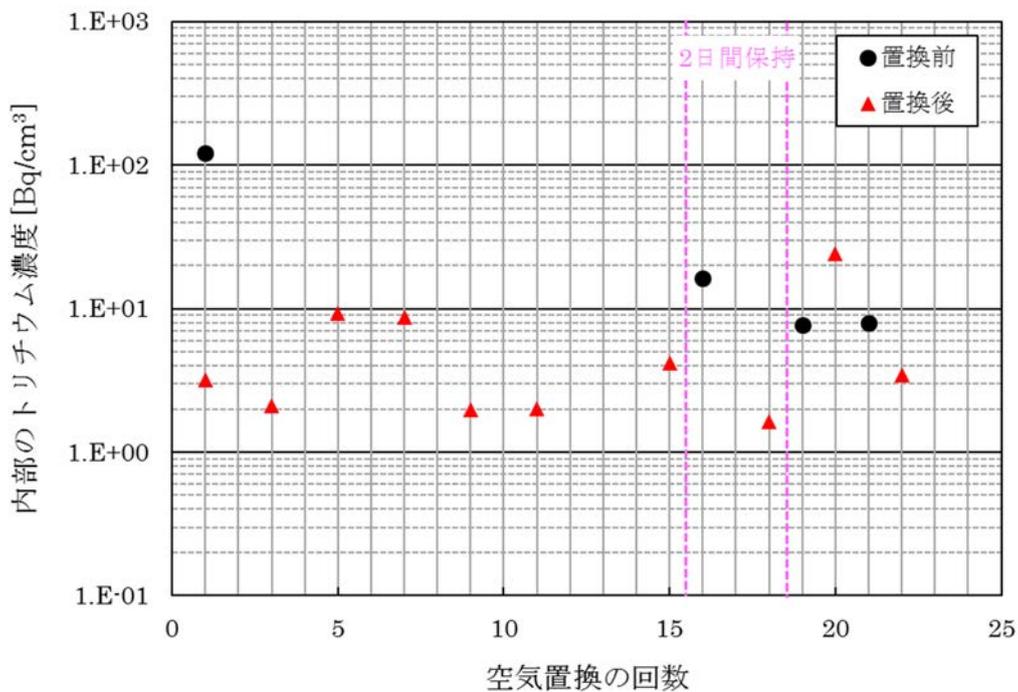


図 4.3-9 空気置換時のトリチウム濃度の変化（ヘリウム浄化系室、置換範囲③）

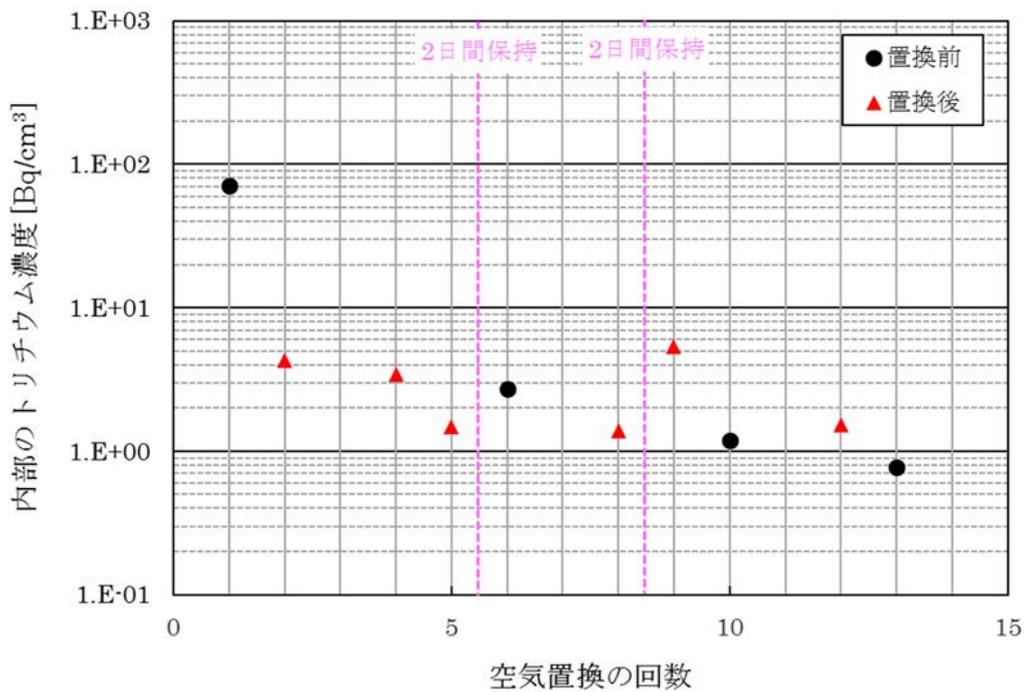


図 4.3-10 空気置換時のトリチウム濃度の変化（ヘリウム浄化系室、置換範囲④）

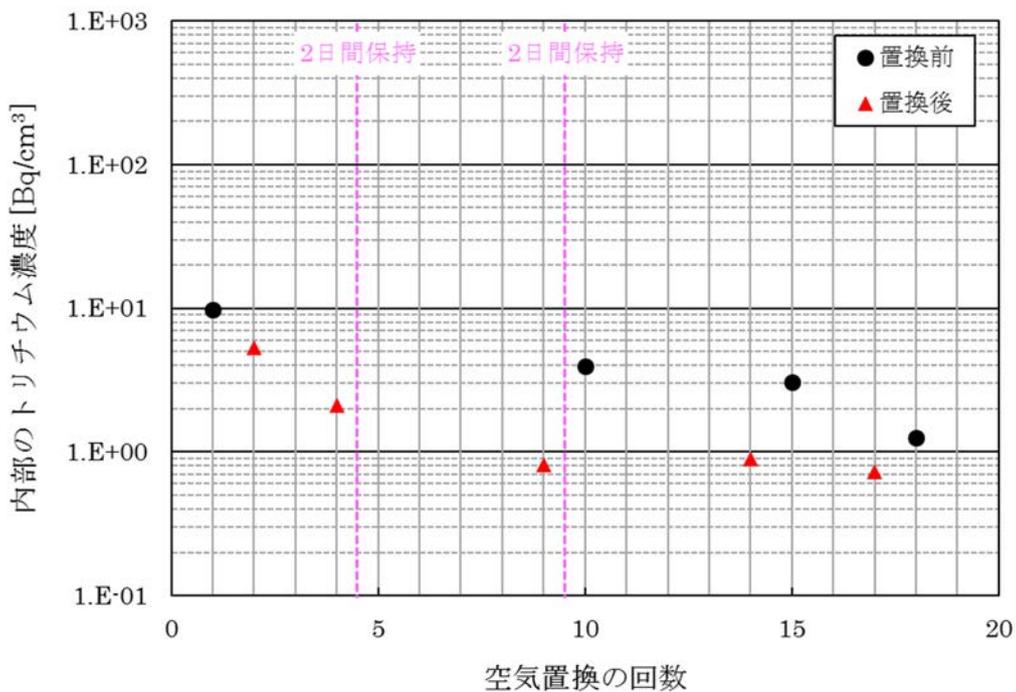


図 4.3-11 空気置換時のトリチウム濃度の変化（ヘリウム浄化系室、置換範囲⑤）

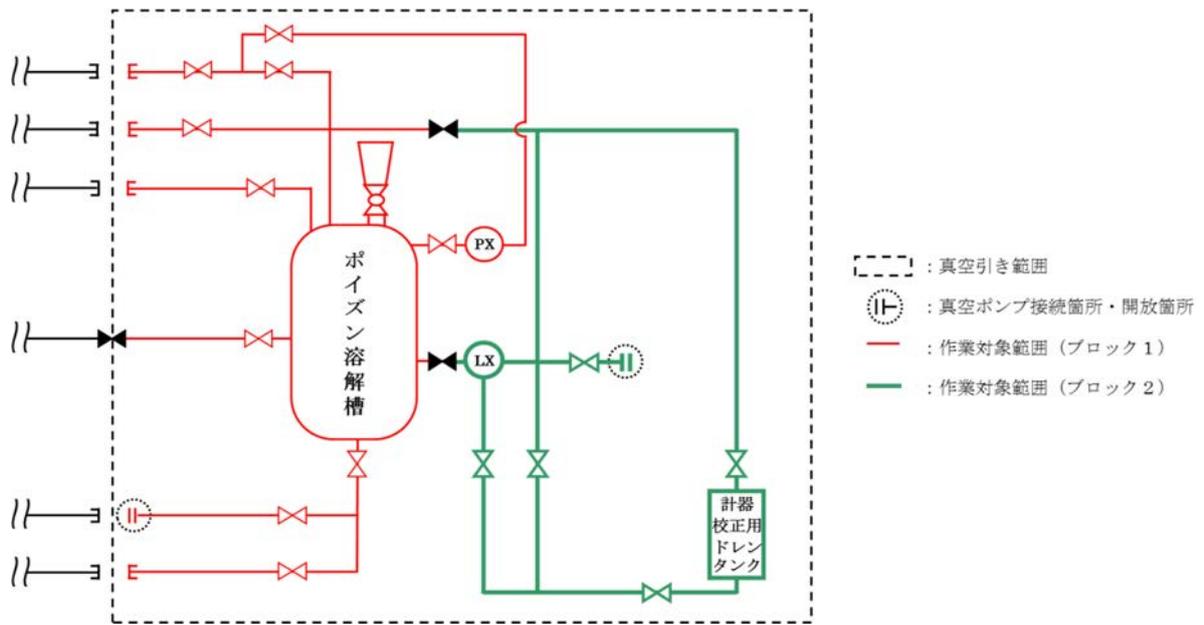


図 4.4-1 ポイズン溶解槽及び接続配管のブロック分けの概略

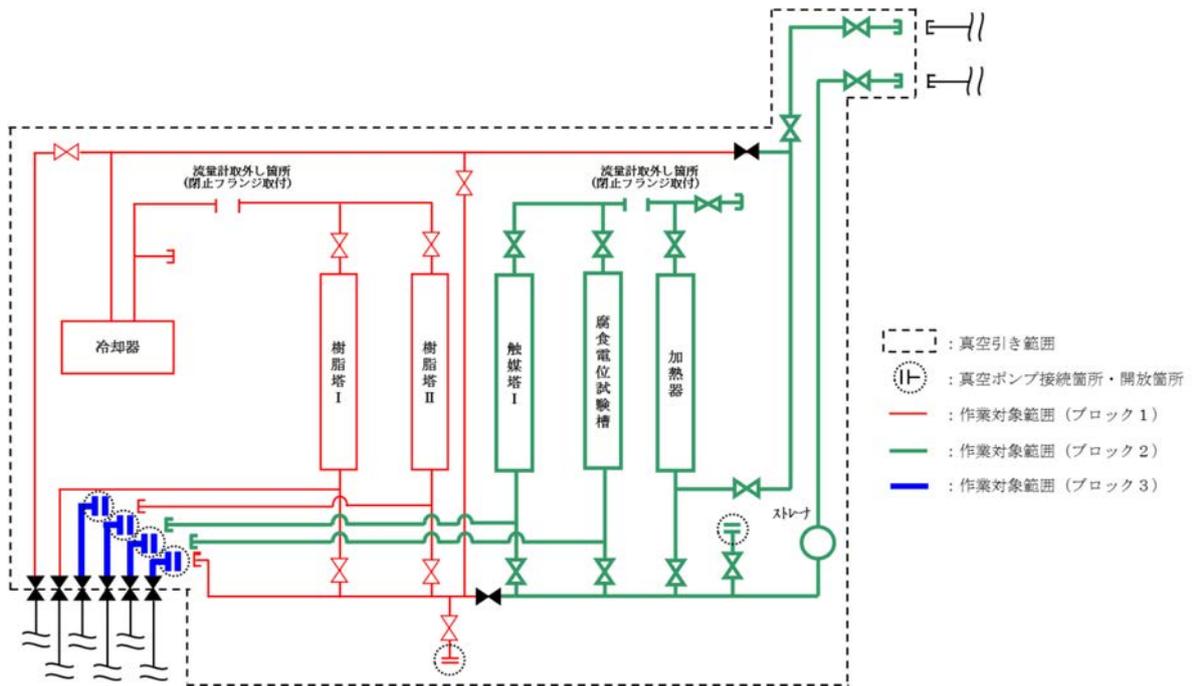


図 4.4-2 ホットカラム試験装置のブロック分けの概略

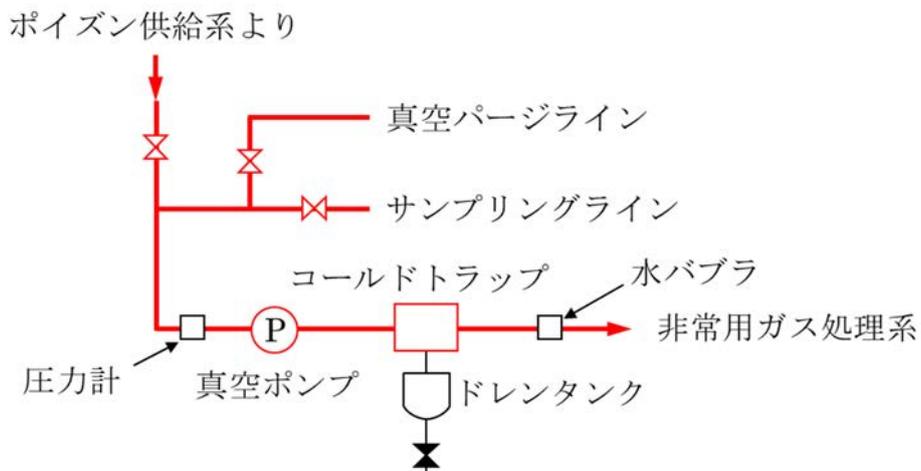


図 4.4-3 真空乾燥装置の概略 (ポイズン供給系)

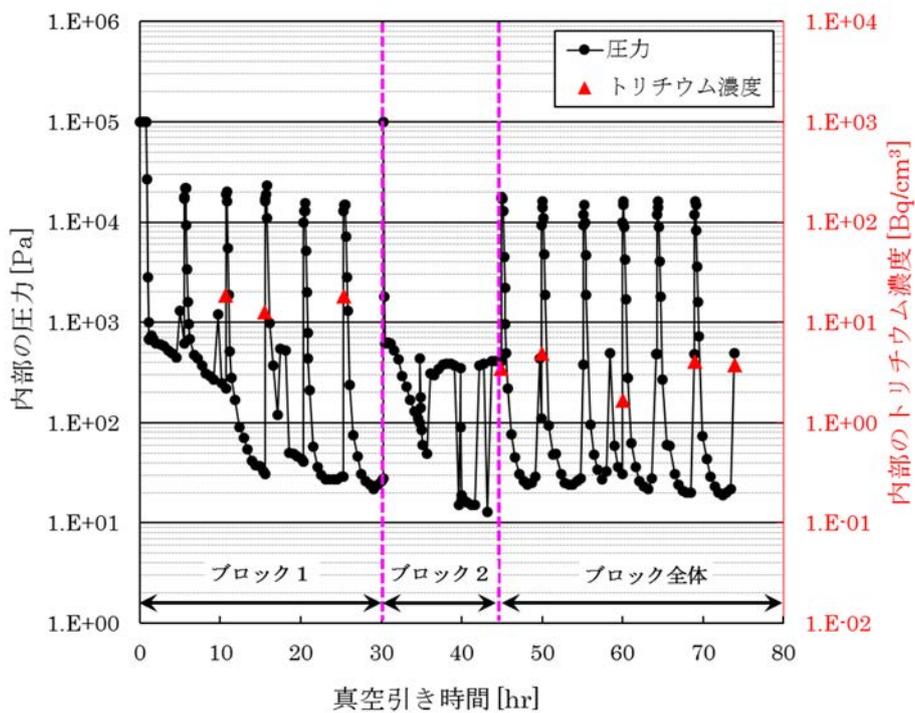


図 4.4-4 加熱真空乾燥時の内圧及びトリチウム濃度の経時変化 (ポイズン溶解槽)

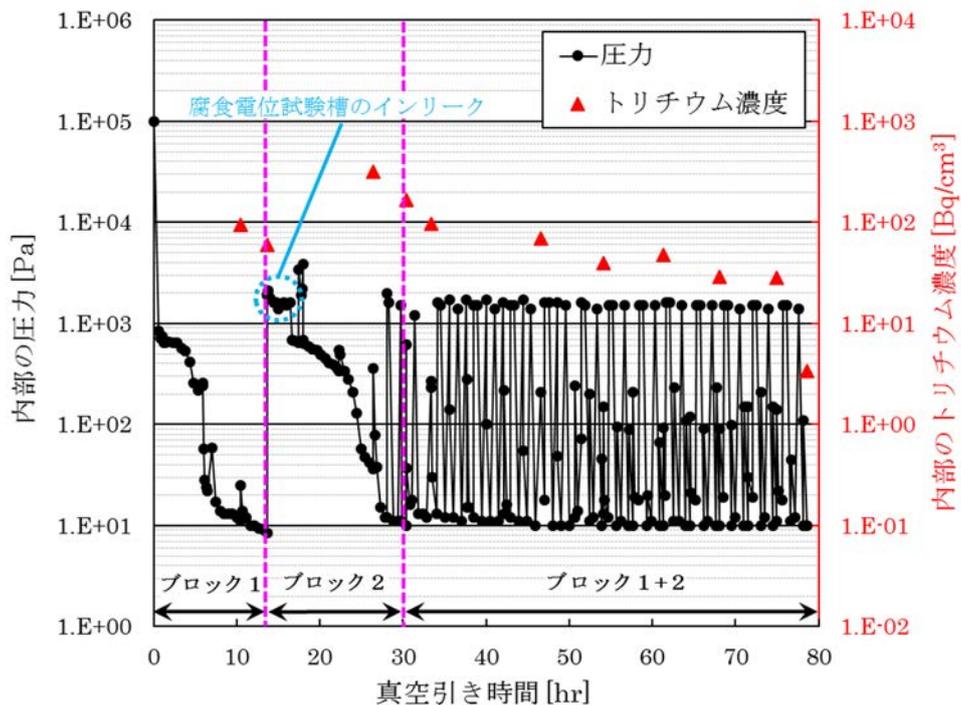


図 4.4-5 加熱真空乾燥時の内圧及びトリチウム濃度の経時変化  
(ホットカラム試験装置のブロック 1・2)

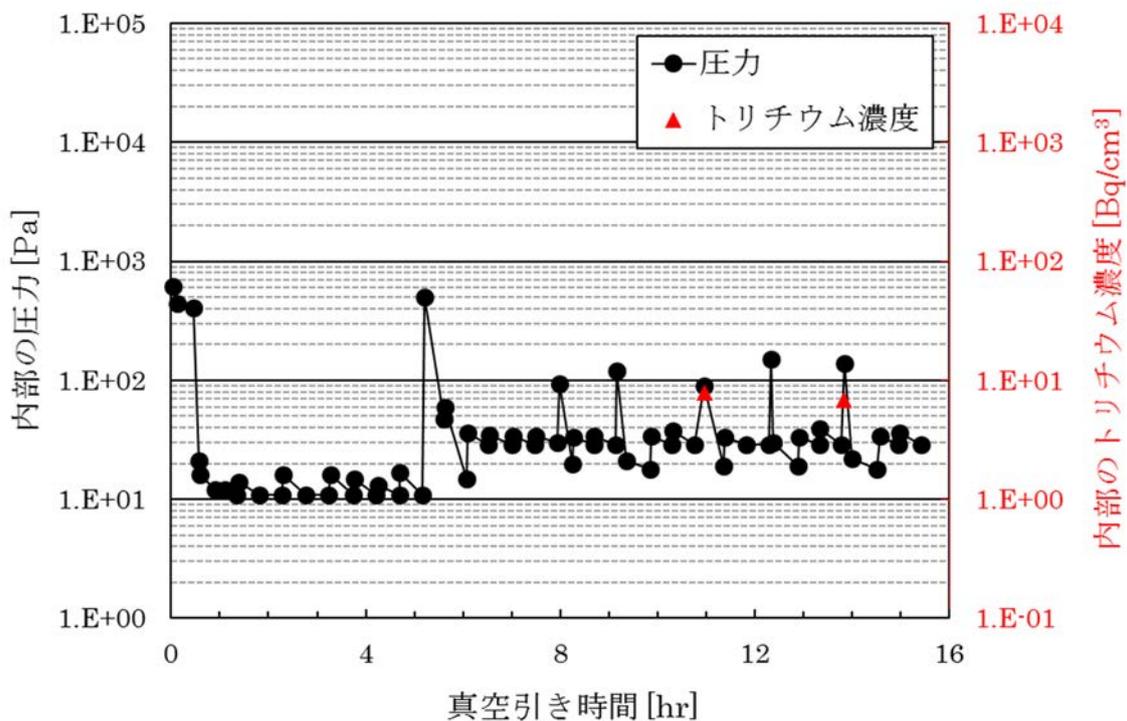


図 4.4-6 加熱真空乾燥時の内圧及びトリチウム濃度の経時変化  
(ホットカラム試験装置のブロック 3)

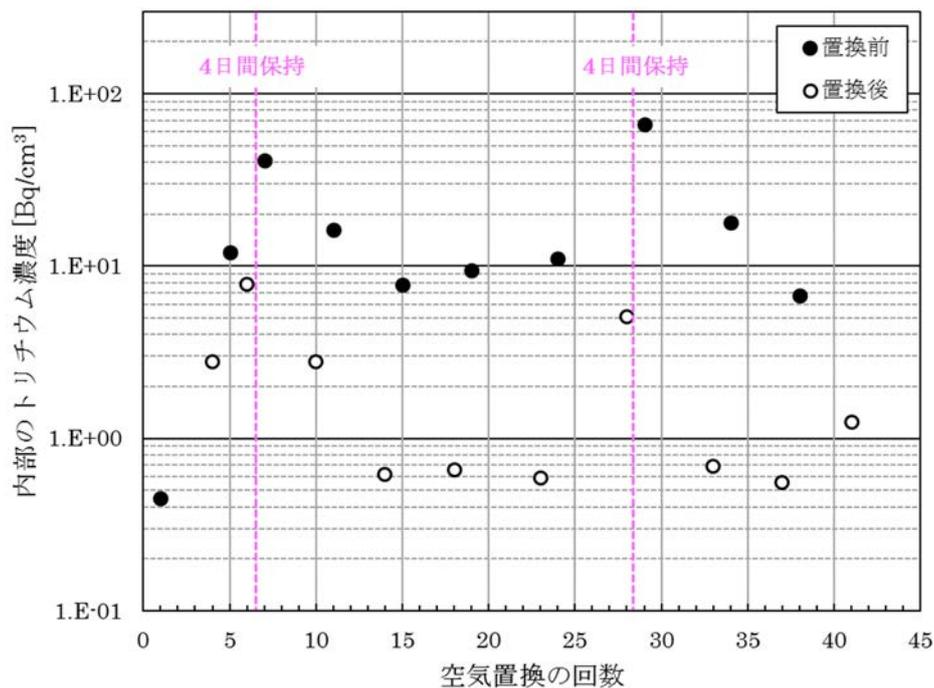


図 4.4-7 空気置換時のトリチウム濃度の変化（ポイズン溶解槽）

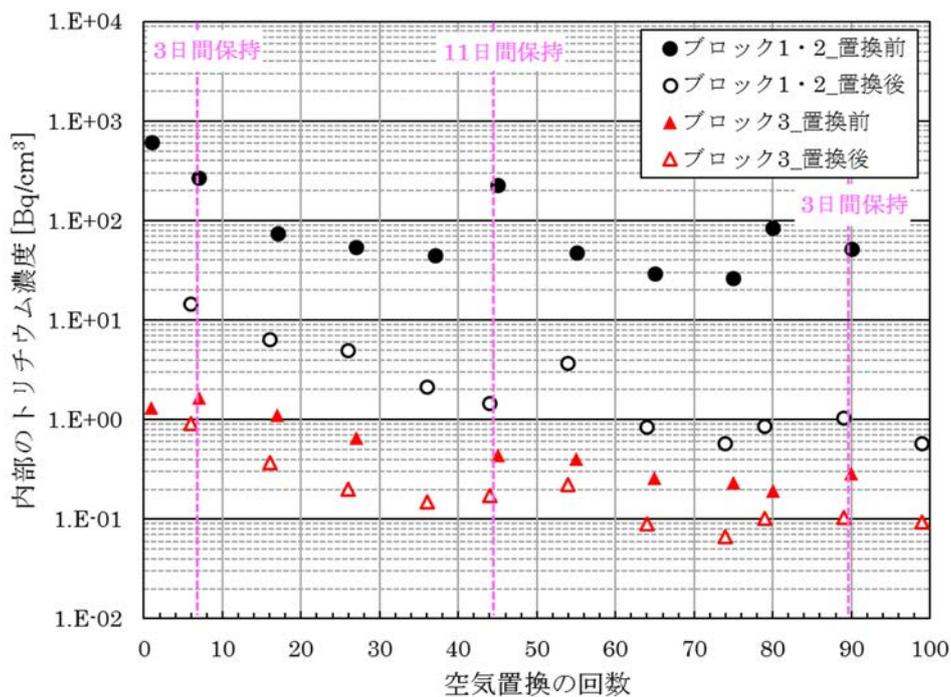


図 4.4-8 空気置換時のトリチウム濃度の変化（ホットカラム試験装置）

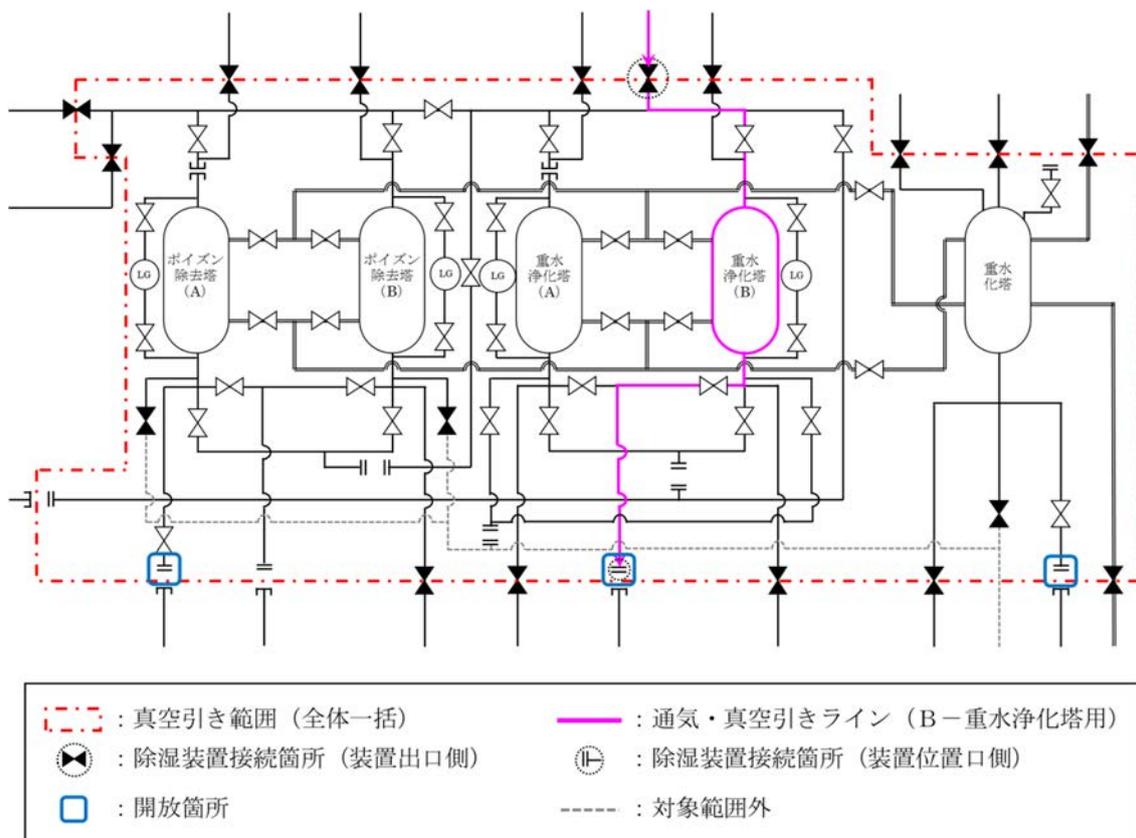


図 4.5-1 トリチウム除去範囲の概略（重水浄化系室）

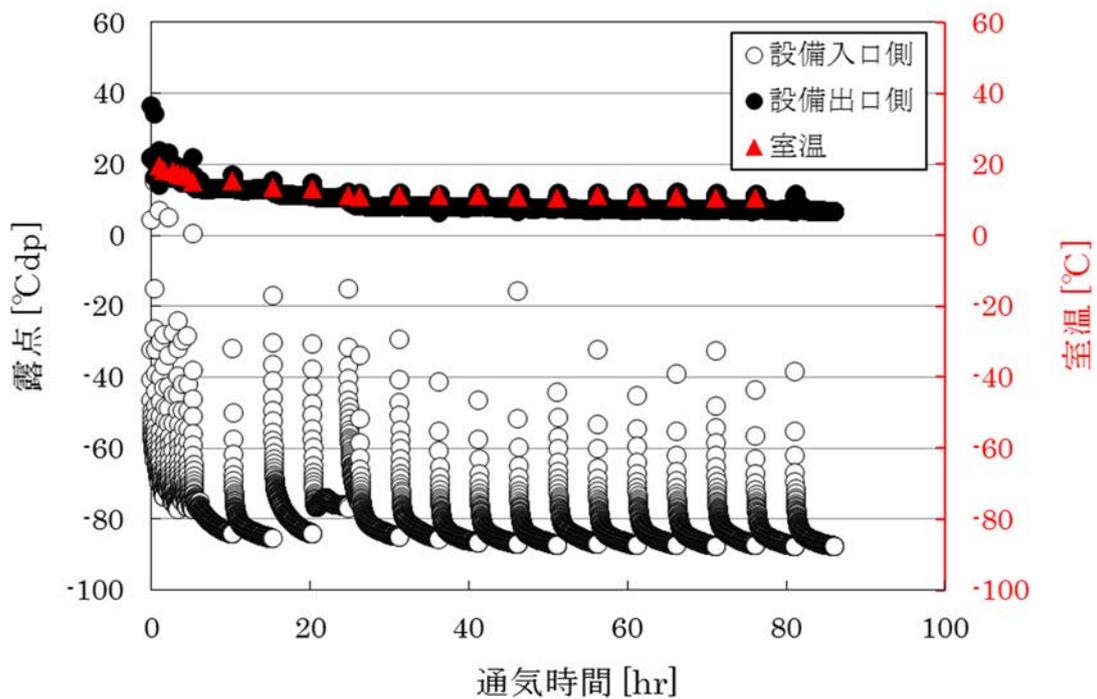


図 4.5-2 常温通気乾燥時の露点及び室温の経時変化（B-重水浄化塔）

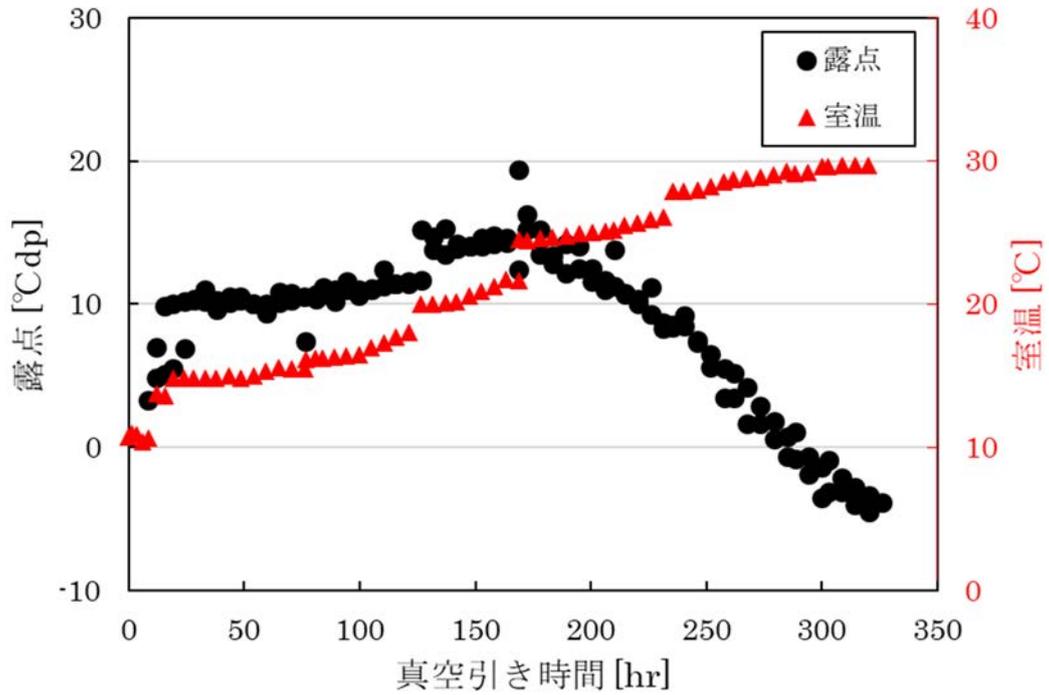


図 4.5-3 常温真空乾燥時の露点及び室温の経時変化 (B-重水浄化塔)

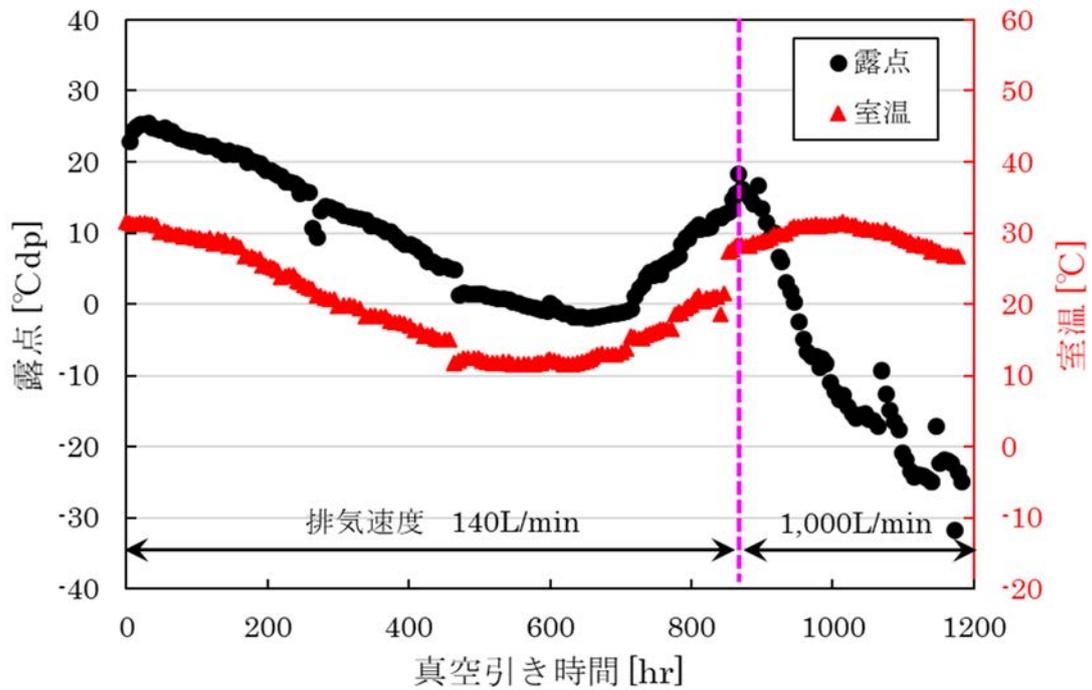


図 4.5-4 常温真空乾燥時の露点及び室温の経時変化 (重水浄化系室)

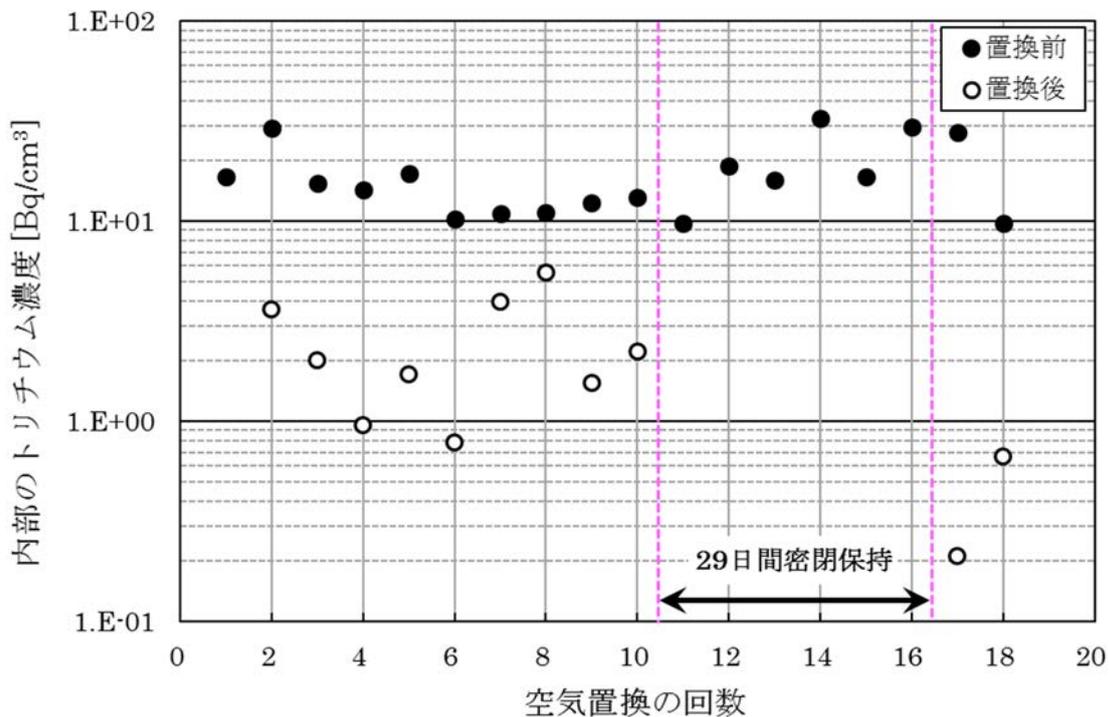


図 4.5-5 空気置換時のトリチウム濃度の変化（重水浄化系室）

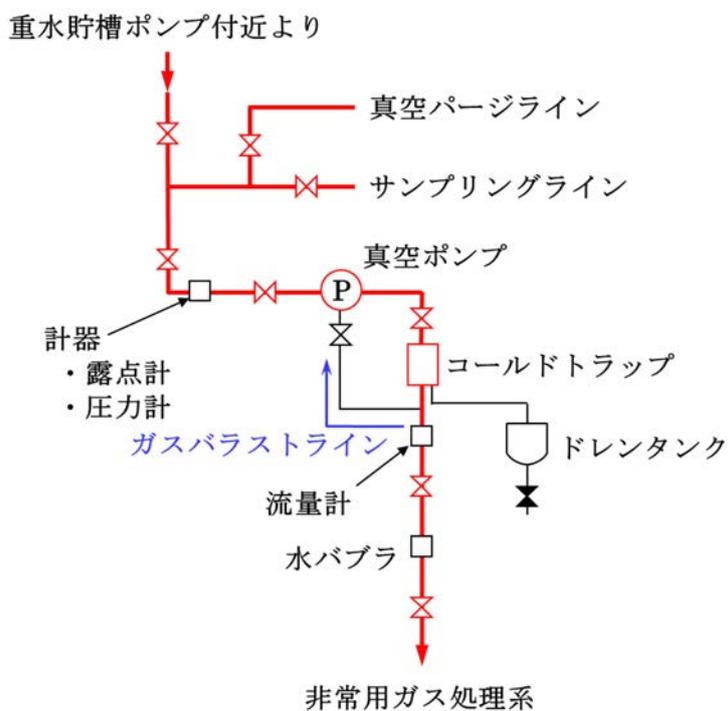


図 4.6-1 真空乾燥装置の概略（劣化重水貯槽、重水貯槽等）

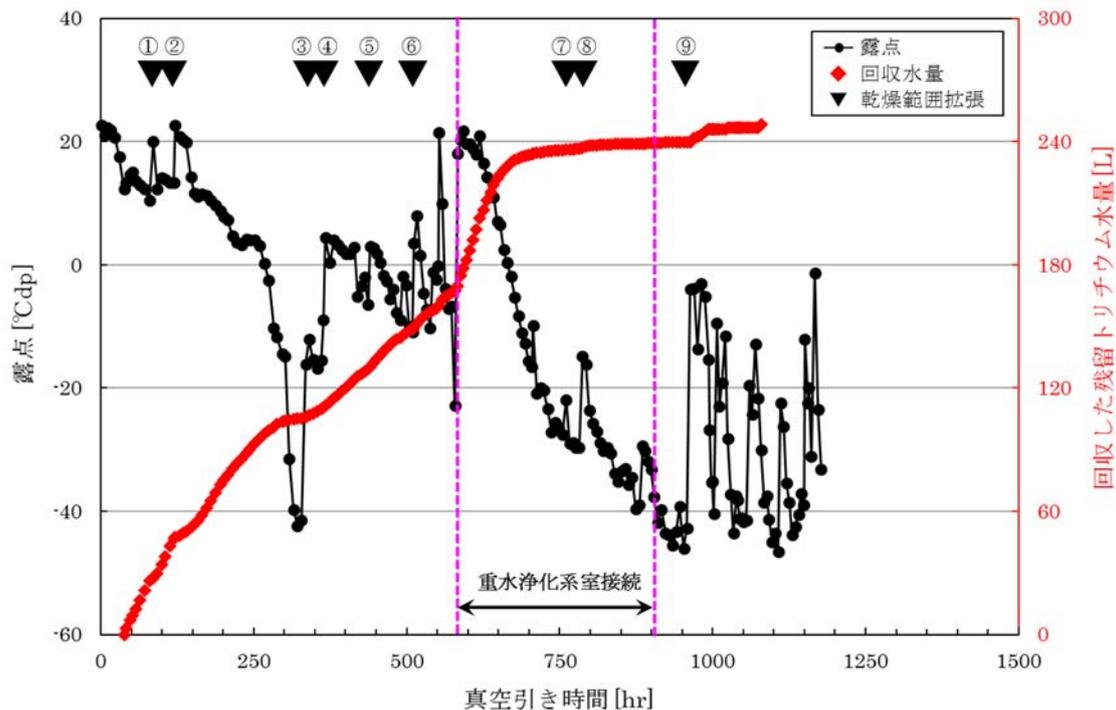


図 4.6-2 常温真空乾燥時の露点及び回収水量の経時変化（劣化重水貯槽、重水貯槽等）

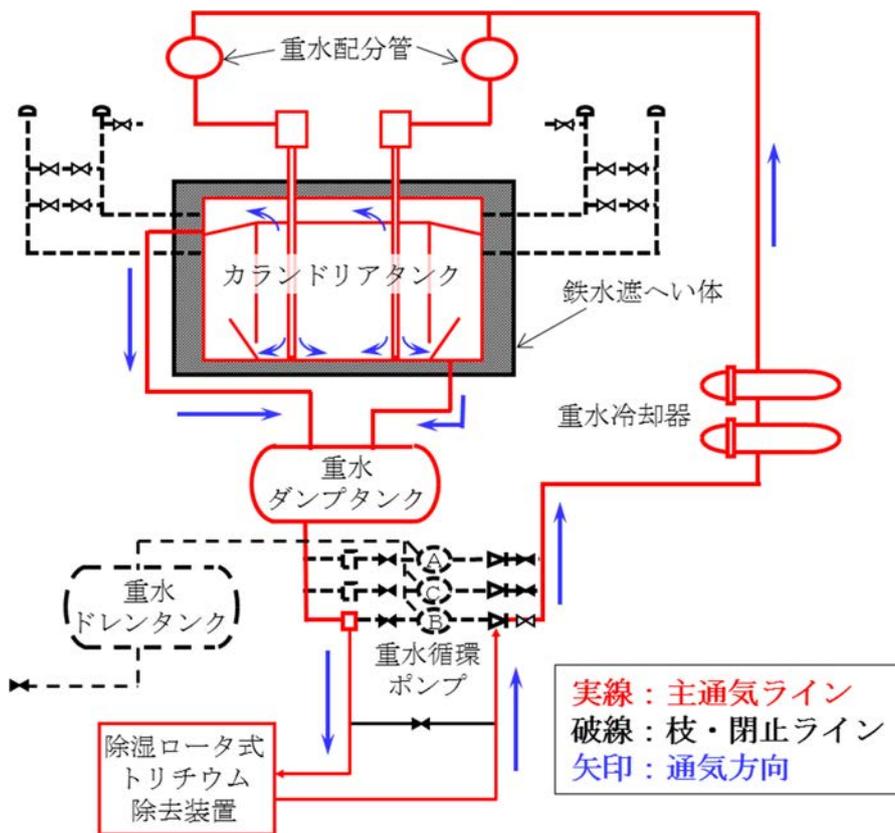


図 4.7-1 通気ライン構成の概略（カランドリアタンク等）

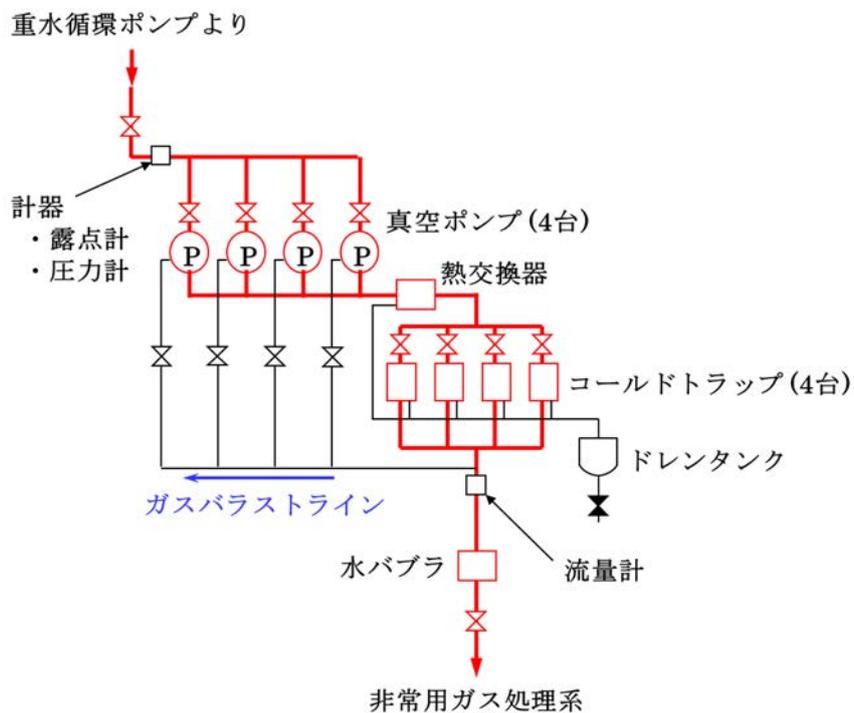


図 4.7-2 真空乾燥装置の概略 (カランドリアタンク等)

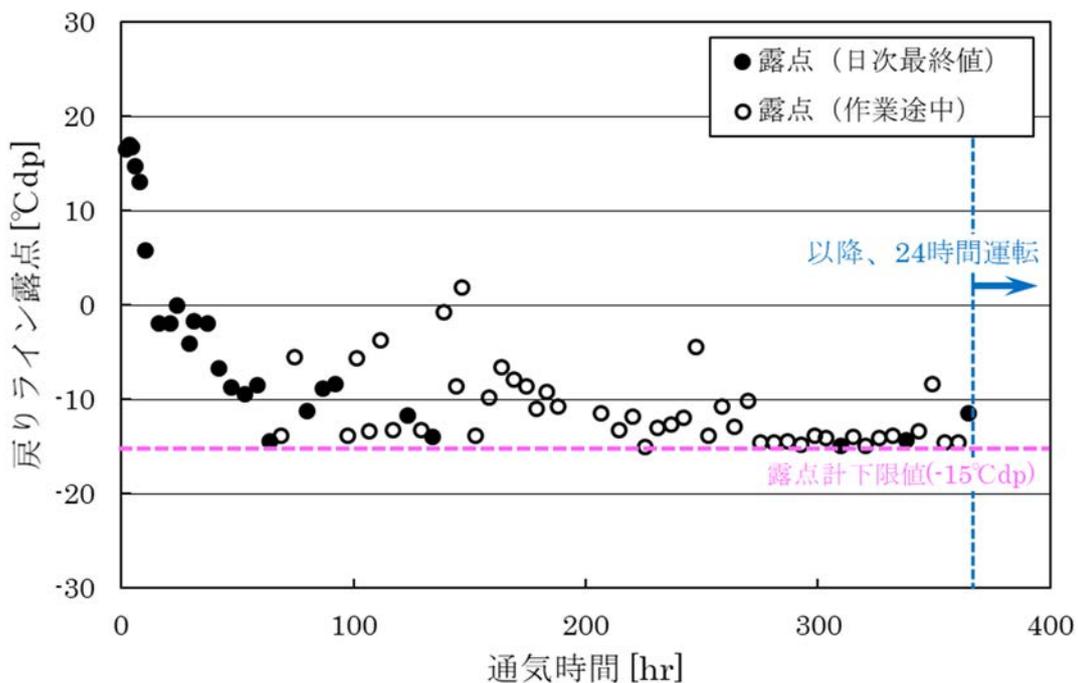


図 4.7-3 常温通気乾燥時の露点の経時変化 (カランドリアタンク等、0~360 時間)

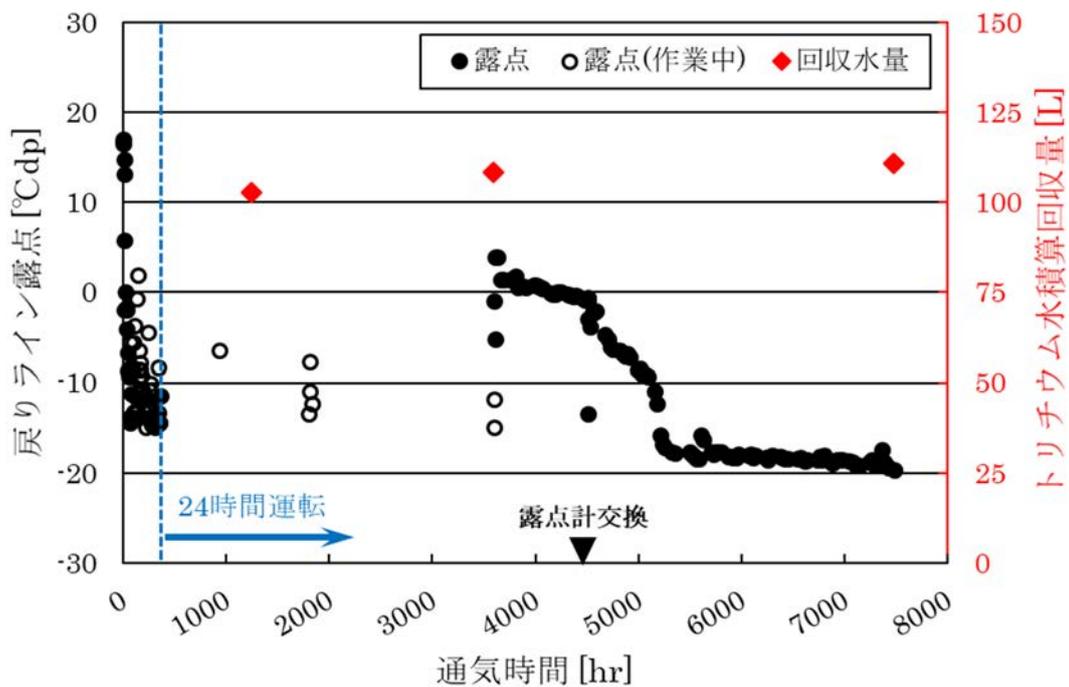


図 4.7-4 常温通気乾燥時の露点の経時変化（カランドリアタンク等、0～7,480 時間）

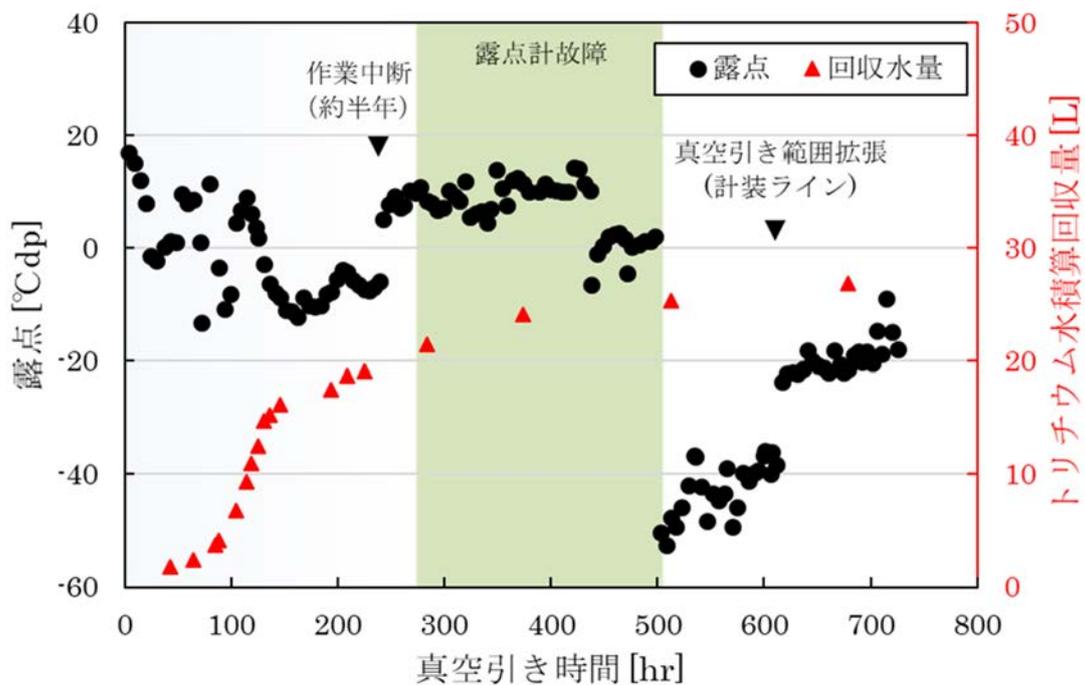


図 4.7-5 常温真空乾燥時の露点及び回収水量の経時変化（カランドリアタンク等）

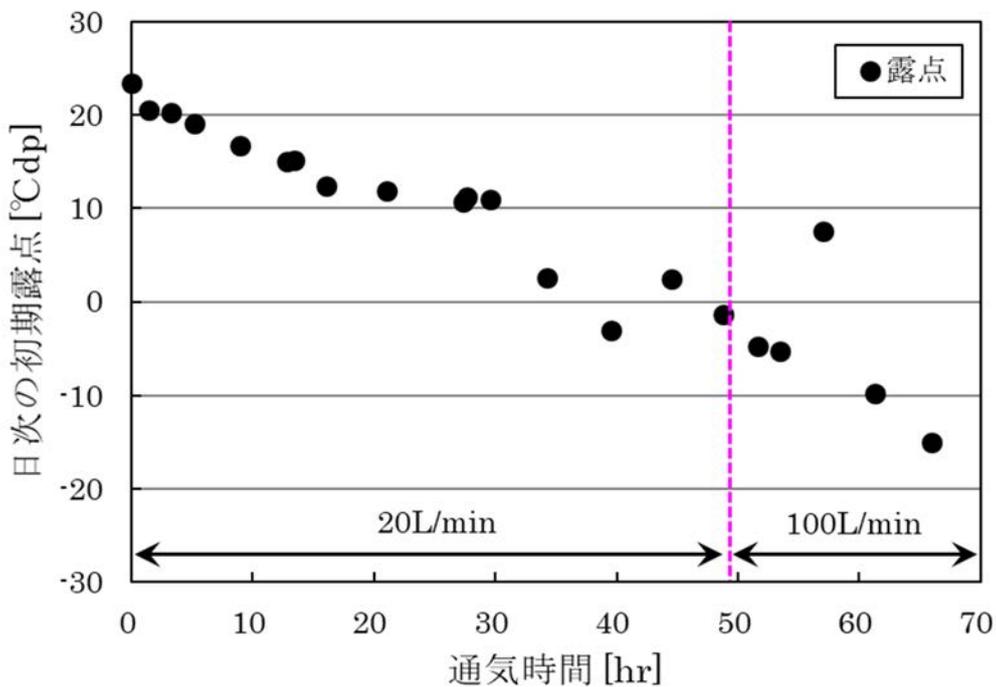


図 4.8-1 再生運転時の露点の経時変化（除湿ロータ式トリチウム除去装置）

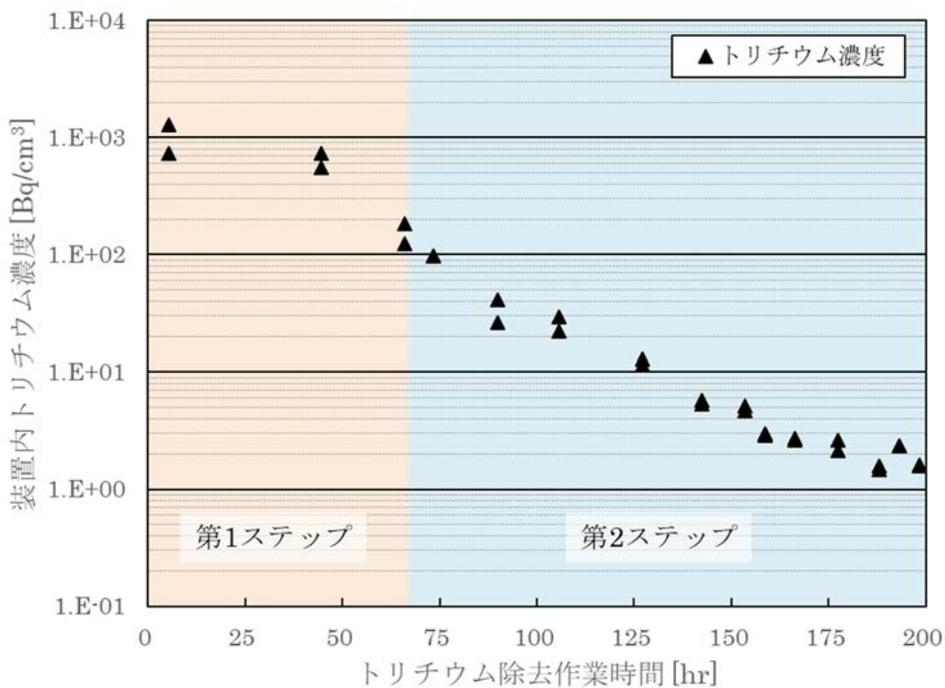
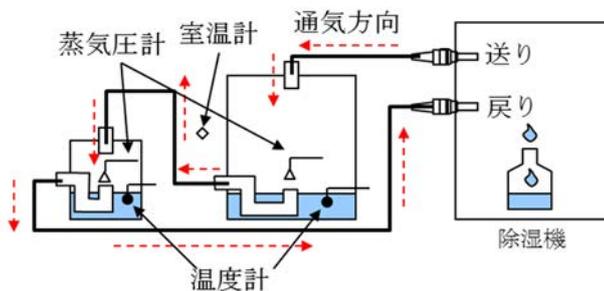


図 4.8-2 再生運転時のトリチウム濃度の経時変化（除湿ロータ式トリチウム除去装置）

① ドラム缶→ペール缶



② ペール缶→ドラム缶

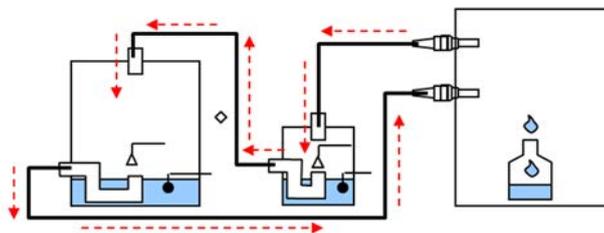


図 4.9-1 残留水量推定のコールド試験体系

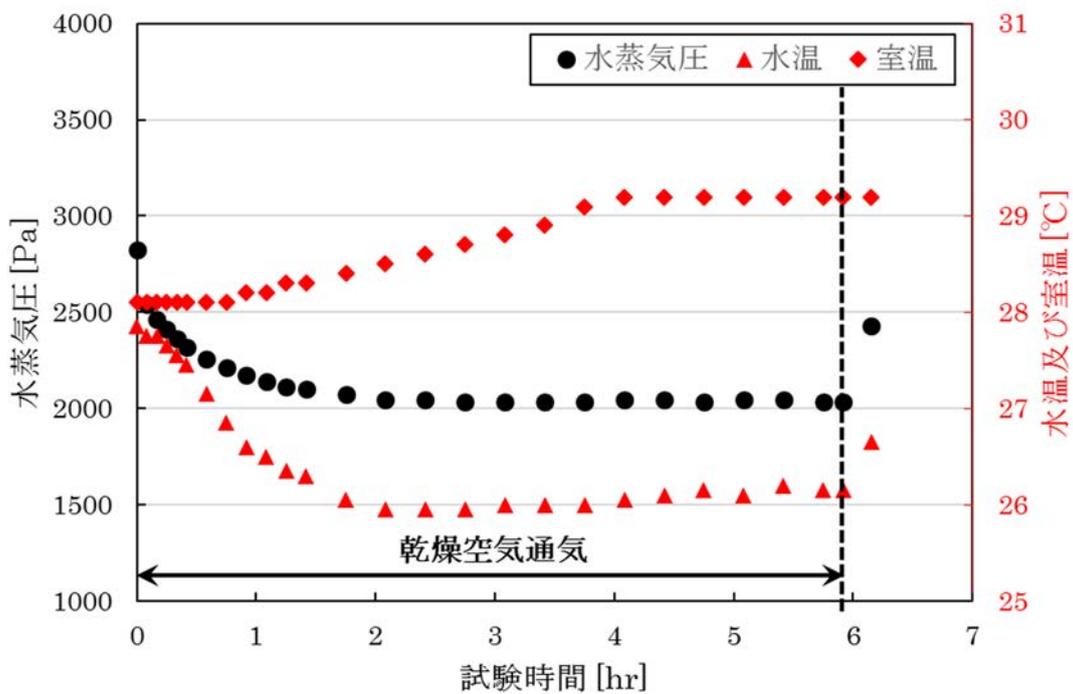


図 4.9-2 コールド試験結果 (試験 No.1、ドラム缶)

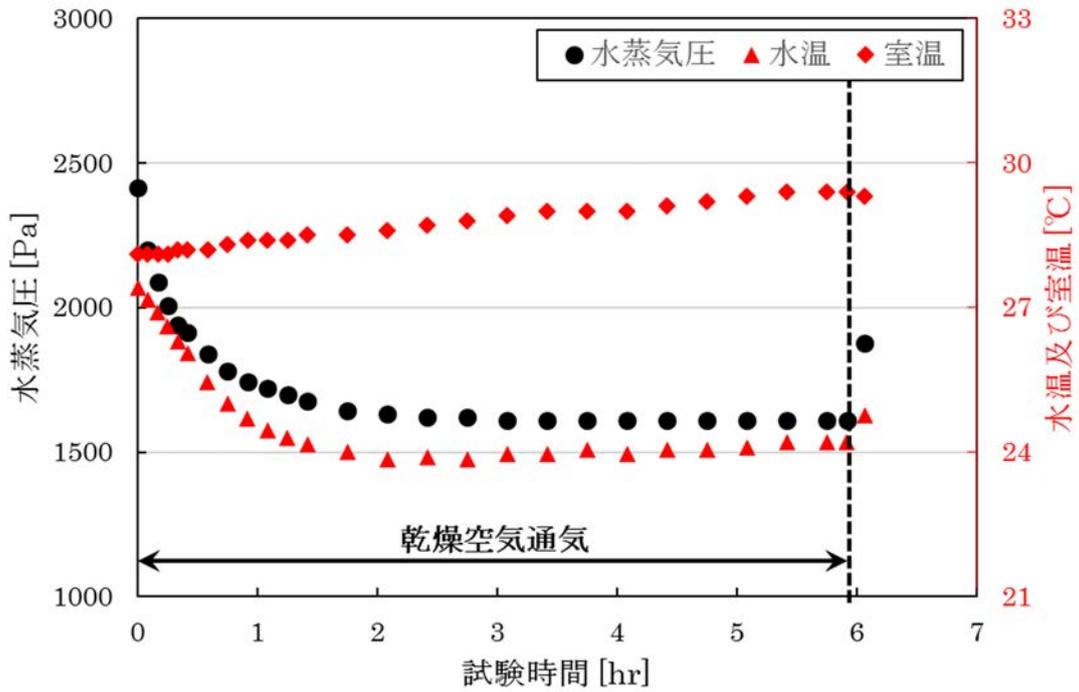


図 4.9-3 コールド試験結果 (試験 No.2、ドラム缶)

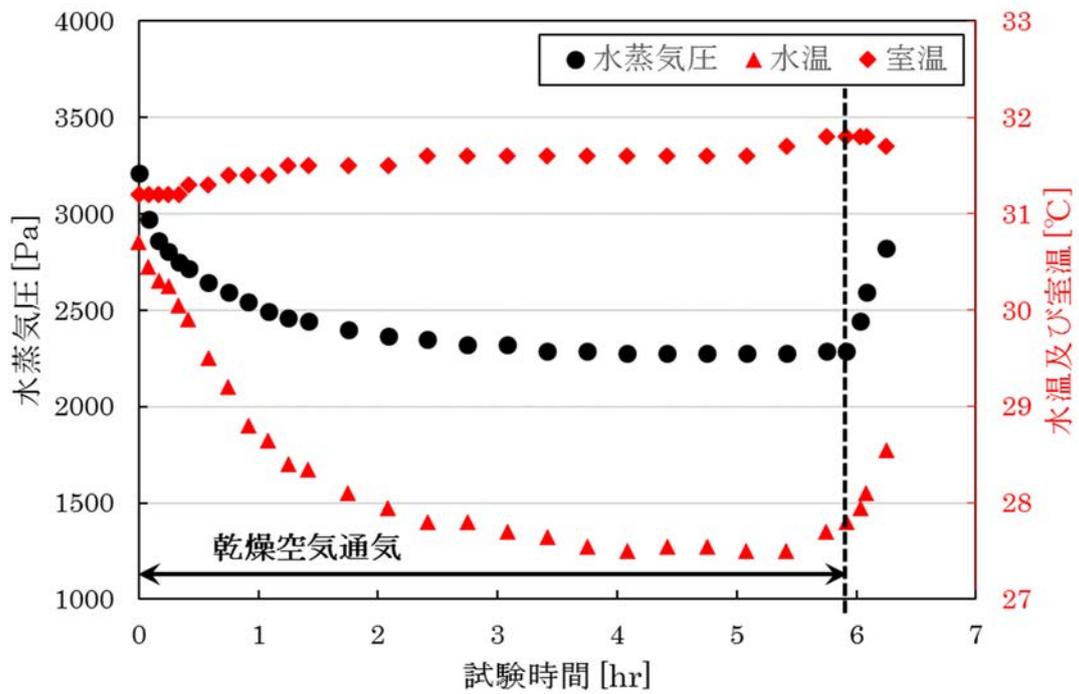


図 4.9-4 コールド試験結果 (試験 No.3、ドラム缶)

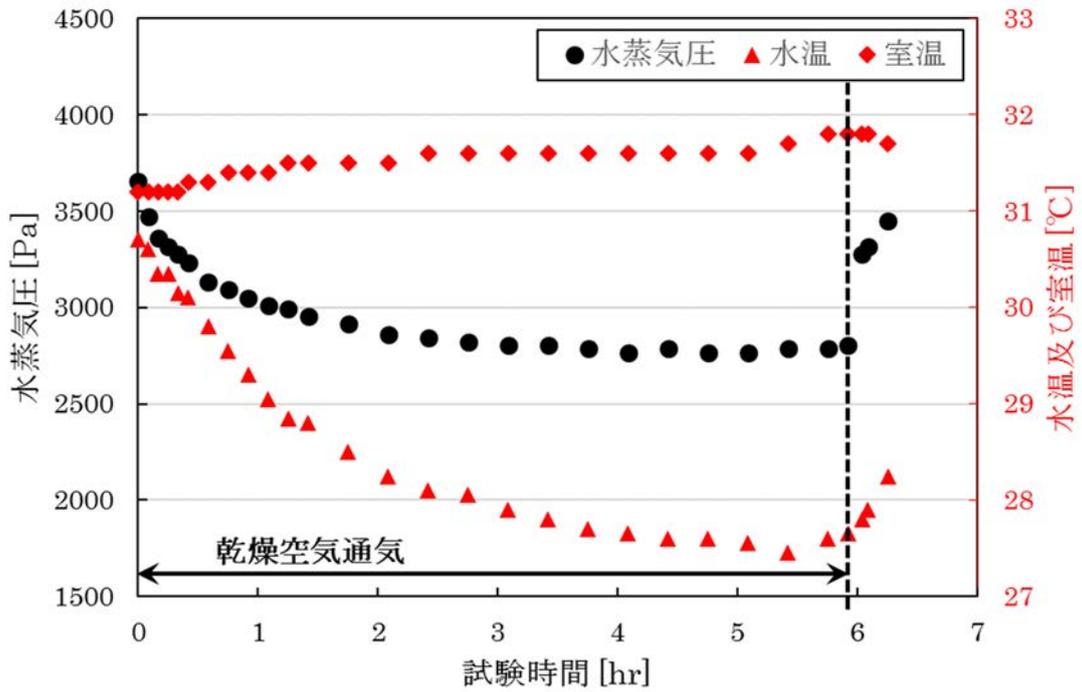


図 4.9-5 コールド試験結果 (試験 No.3、ペール缶)

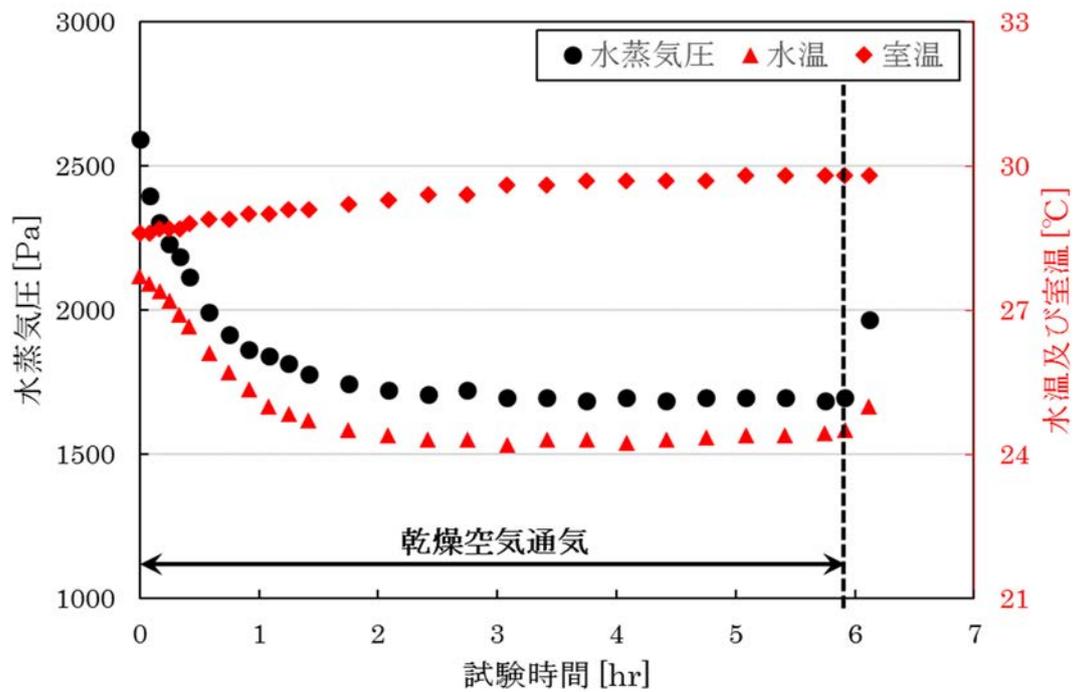


図 4.9-6 コールド試験結果 (試験 No.4、ドラム缶)

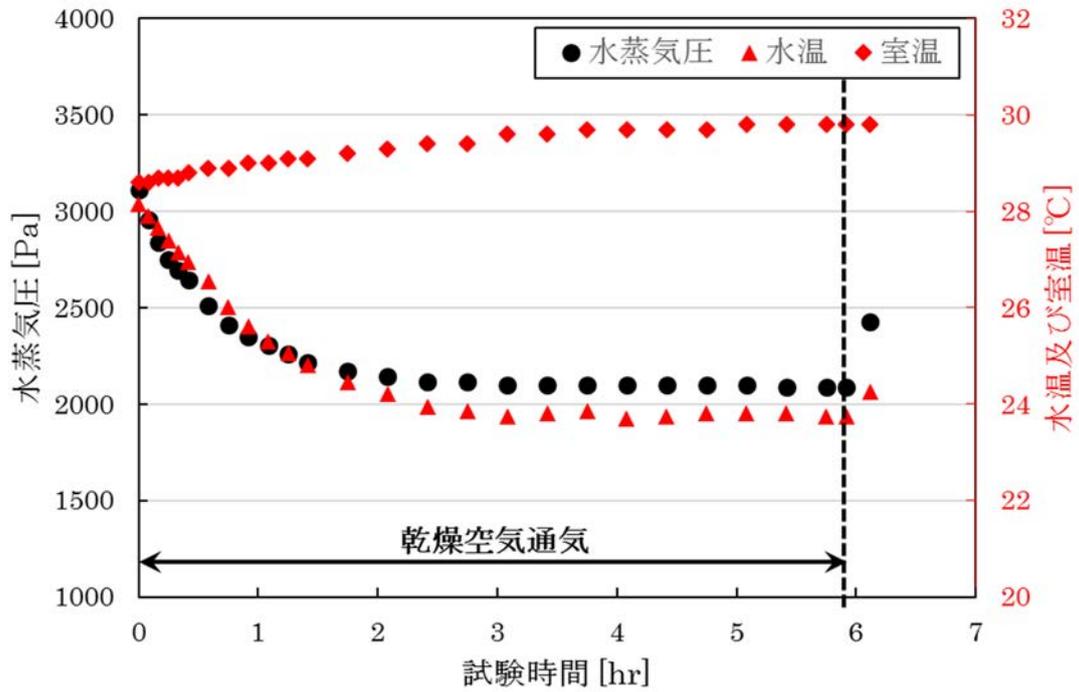


図 4.9-7 コールド試験結果 (試験 No.4、ペール缶)

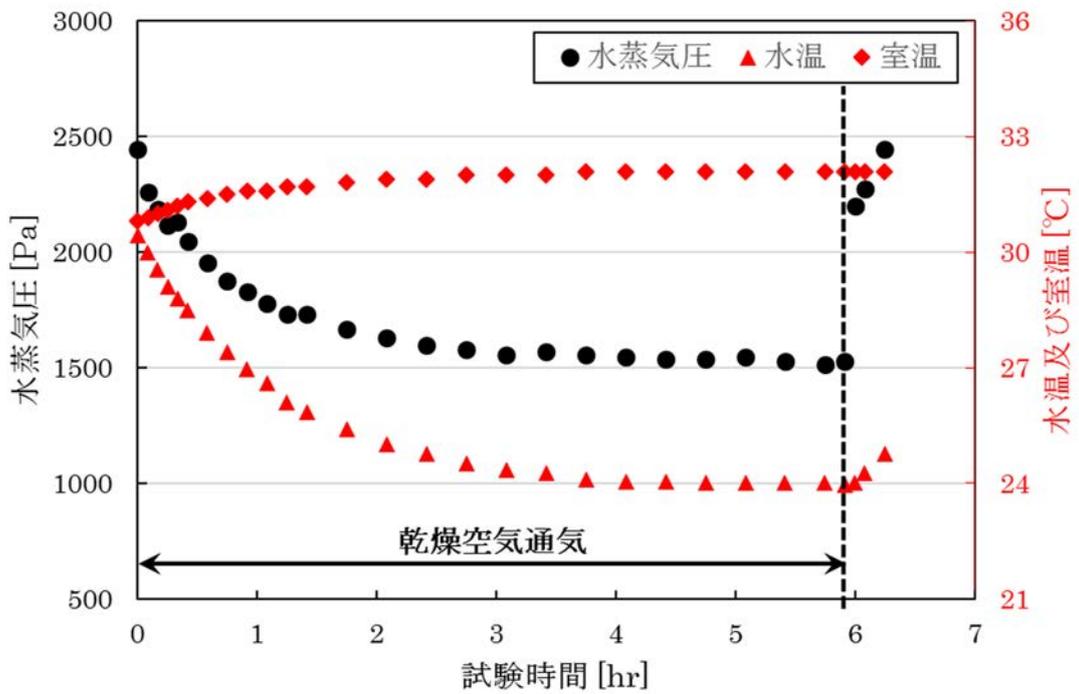


図 4.9-8 コールド試験結果 (試験 No.5、ペール缶)

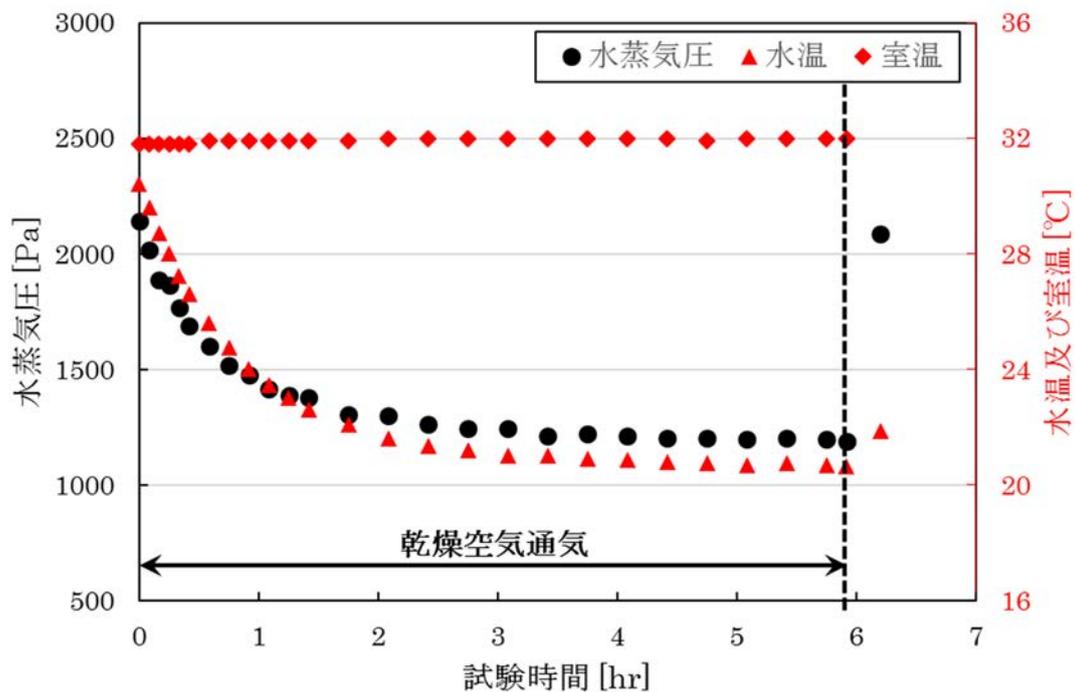


図 4.9-9 コールド試験結果 (試験 No.6、ペール缶)

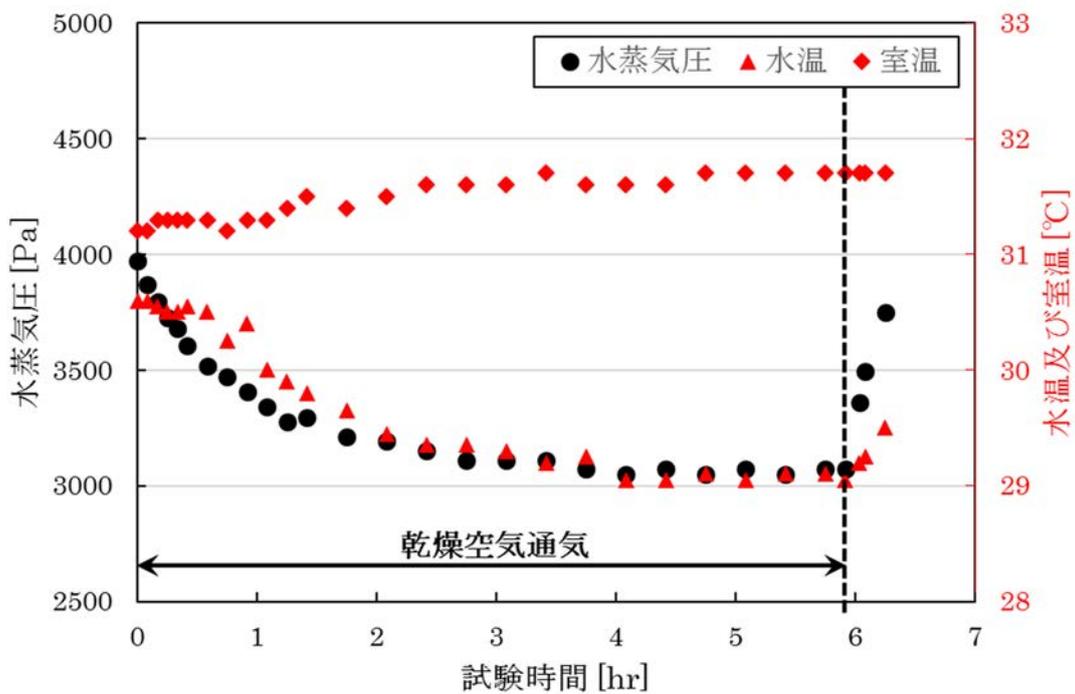


図 4.9-10 コールド試験結果 (試験 No.7、ドラム缶)

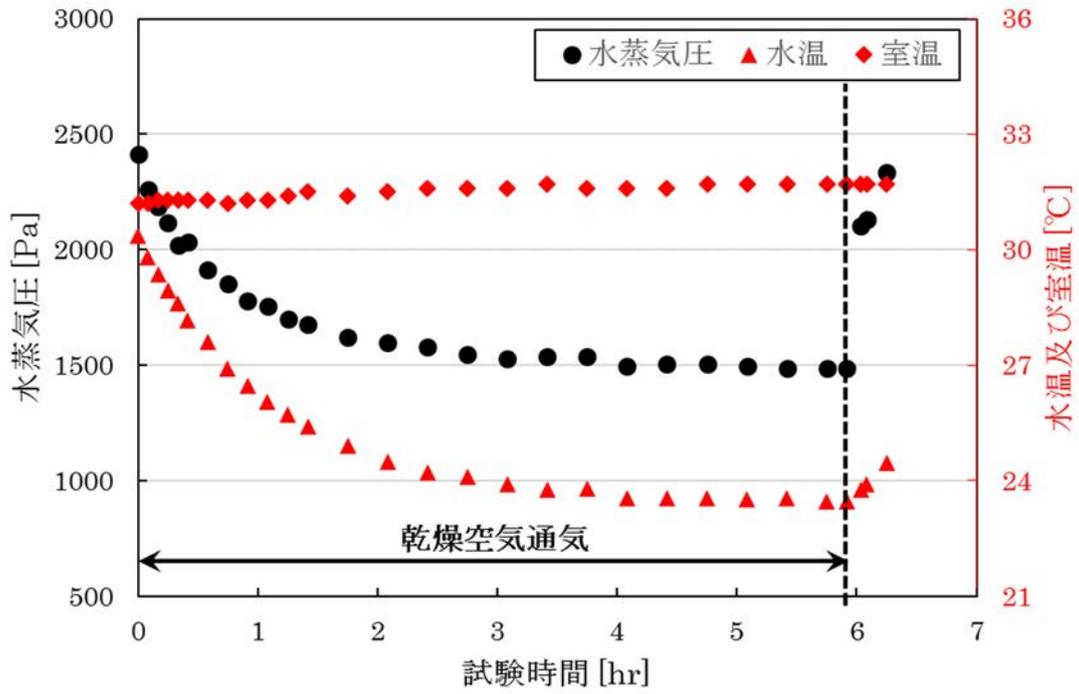


図 4.9-11 コールド試験結果 (試験 No.7、パール缶)

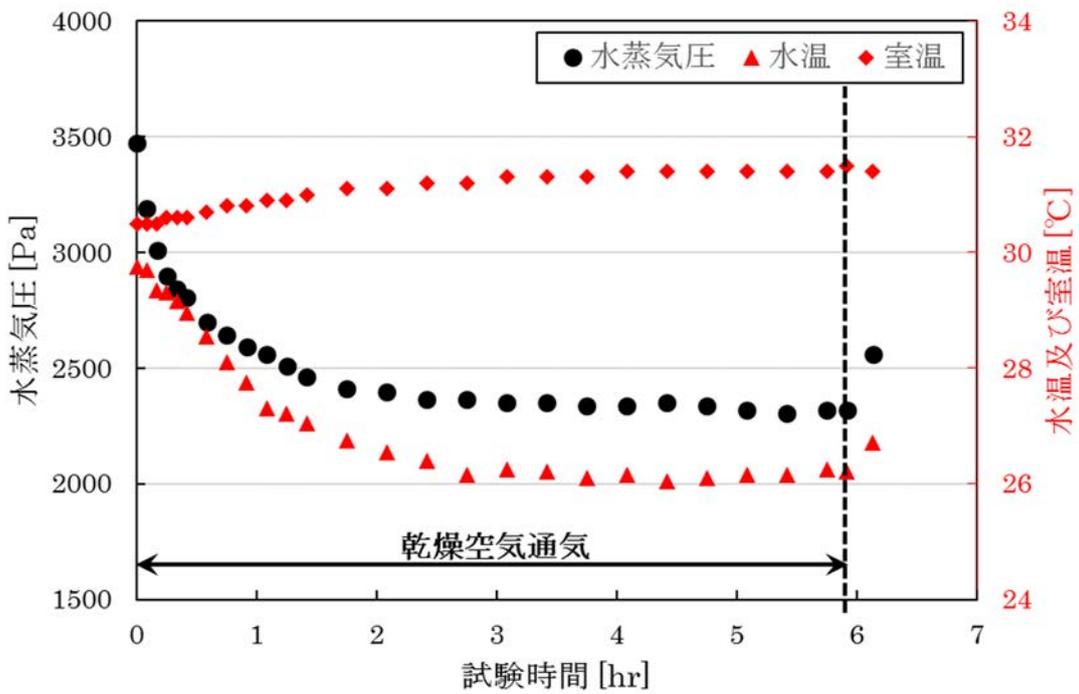


図 4.9-12 コールド試験結果 (試験 No.8、ドラム缶)

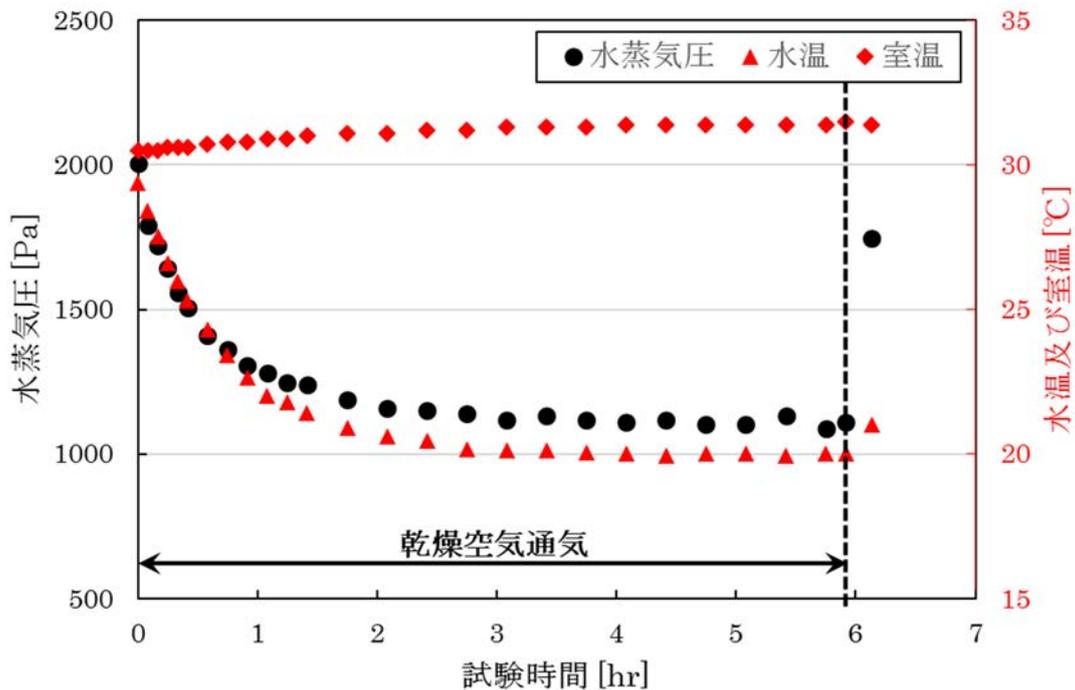


図 4.9-13 コールド試験結果（試験 No.8、ペール缶）

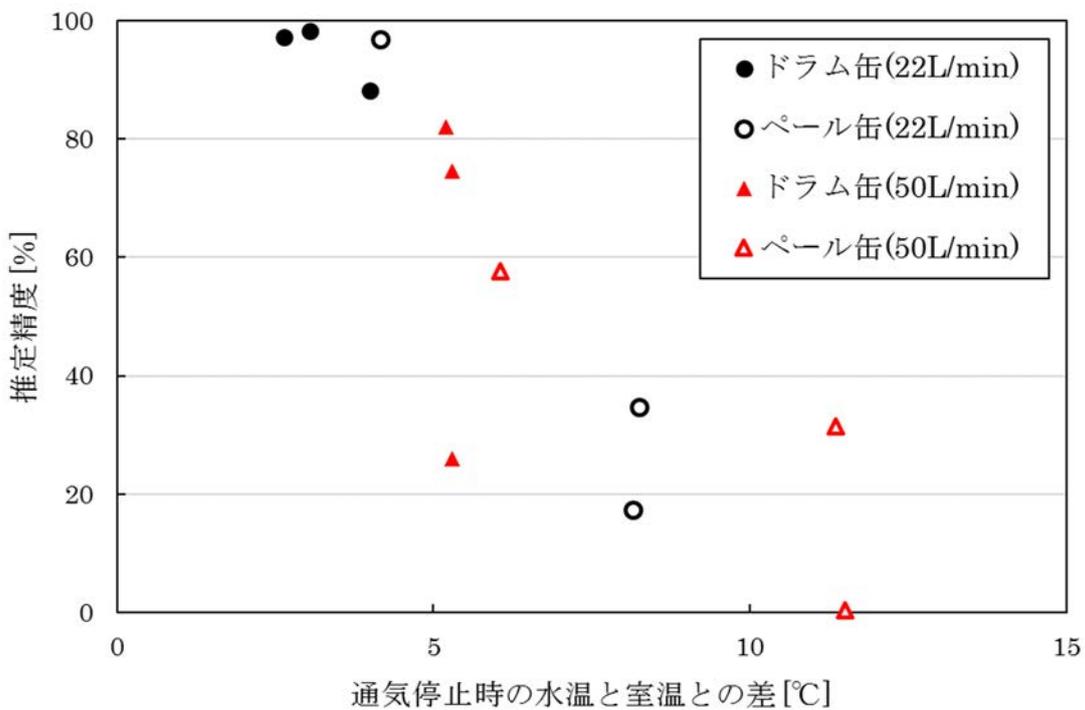


図 4.9-14 残留水量の推定精度と残留水－外気間の温度差の関係

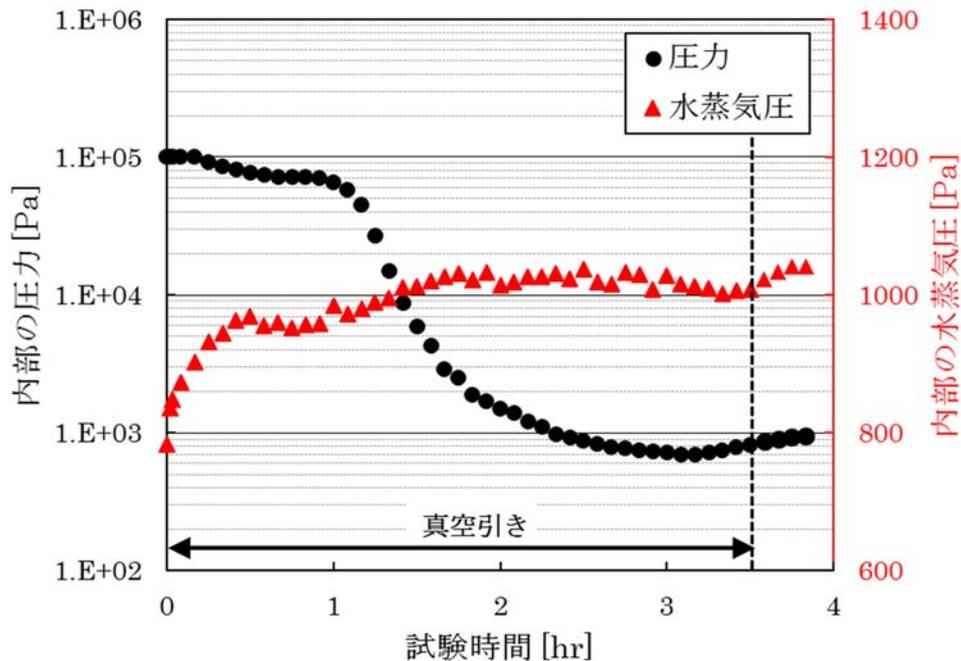


図 4.9-15 ホット試験結果 (1回目)

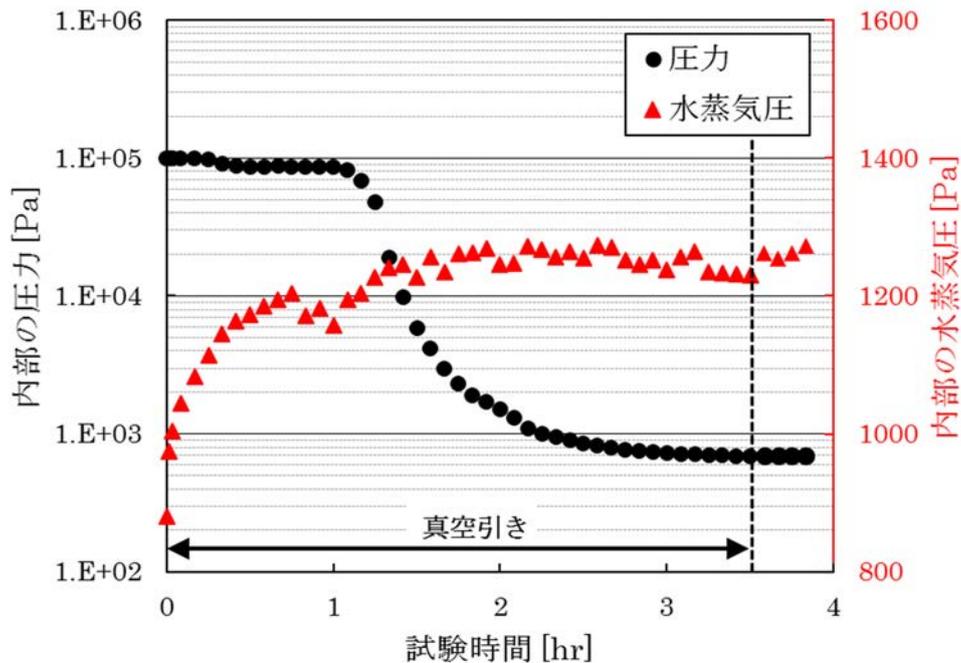


図 4.9-16 ホット試験結果 (2回目)

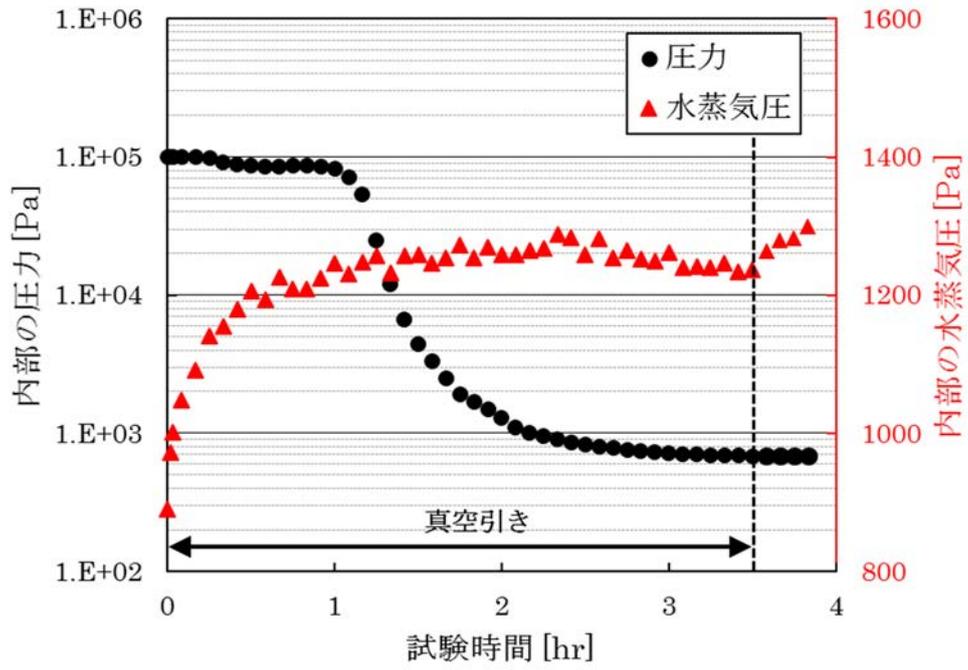


図 4.9-17 ホット試験結果 (3回目)

# 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량	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 組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。  
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表される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 <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(e)</sup>	1 <sup>(b)</sup>	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz		s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N		m kg s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
静電容量	ファラド	F	C/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup>
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光照射量	ルーメン	lm	cd sr <sup>(e)</sup>	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		s <sup>-1</sup>
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
酸素活性化	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。  
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。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である数字の1は明示されない。  
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。  
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。  
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。  
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。  
 (g) 単位シーベルト (PV, 2002, 70, 205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含む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
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
表面張力	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
角加速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角加減	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>	m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> =s <sup>-2</sup>
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>4</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> sr)	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>
	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> mol

表5. SI 接頭語

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

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1 t=10 <sup>3</sup> kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、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 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>12</sup> cm <sup>2</sup> ) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>
フオト	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(a)</sup>	Oe	1 Oe <sub>e</sub> =(10 <sup>3</sup> /4π)A m <sup>-1</sup>

(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g=2×10 <sup>-4</sup> 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	1 cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 <sup>-6</sup> m

