

鉛ビスマス要素技術開発装置を用いた フリーズシールバルブの開発

Development of Freezed Seal Valve by Using Test Stand for LBE Technology

斎藤 滋 山口 和司 吉元 秀光 大林 寛生
佐々 敏信

Shigeru SAITO, Kazushi YAMAGUCHI, Hidemitsu YOSHIMOTO, Hironari OBAYASHI
and Toshinobu SASA

原子力科学研究部門
J-PARC センター
核変換ディビジョン

Nuclear Transmutation Division
J-PARC Center
Sector of Nuclear Science Research

March 2023

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

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。本レポートはクリエイティブ・コモンズ表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の条件で利用してください。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（<https://www.jaea.go.jp>）より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課
〒 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.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).
Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under the same terms and conditions as CC-BY.
For inquiries regarding this report, please contact Institutional Repository and Utilization Section, JAEA Innovation Hub, 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

鉛ビスマス要素技術開発装置を用いたフリーズシールバルブの開発

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 J-PARC センター
核変換ディビジョン

斎藤 滋、山口 和司*1、吉元 秀光*2、大林 寛生、佐々 敏信+

(2022年12月1日受理)

長寿命放射性廃棄物の核変換を実現するため、日本原子力研究開発機構（JAEA）が研究を進めている加速器駆動システム（ADS; Accelerator Driven System）では、核破砕ターゲット及び未臨界炉心冷却材として鉛ビスマス共晶合金（LBE; Lead-Bismuth Eutectic alloy）を採用している。将来のADSの開発に向けて材料照射データベースを構築するため、J-PARCでは陽子照射施設の検討を進めている。陽子照射施設にはLBEループが設置され、核破砕環境かつ流動LBE中での材料照射試験が可能である。陽子照射施設において、LBEを安全に利用するためにいくつか解決すべき課題の一つとして、運転停止後にループ内のLBEをドレンタンクに導くためのドレンバルブがスラグ等を噛み込むことによって発生するスローリークがある。この問題を解決するため、JAEAでは液体金属系統の一部を融点以下に冷却することで配管中のLBEを固化して閉止する、フリーズシールバルブ（FSV）採用を検討した。まず、水冷式及び空冷式のFSV試験体を製作し、既設の鉛ビスマス要素技術開発装置の試験部に取り付け、動作・性能確認試験を行った。試験の結果、水冷式FSVは設計通りの性能を発揮することが確認された。本報告書では鉛ビスマス要素技術開発装置ならびに各FSV試験体の概要と各部の詳細、動作・性能確認試験結果について述べる。

原子力科学研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2-4

+ 新試験研究炉準備室

*1 株式会社アトックス

*2 株式会社サンユテクノスプラントエンジニアズ

Development of Freezed Seal Valve by Using Test Stand for LBE Technology

Shigeru SAITO, Kazushi YAMAGUCHI*¹, Hidemitsu YOSHIMOTO*²,
Hironari OBAYASHI and Toshinobu SASA⁺

Nuclear Transmutation Division, J-PARC Center,
Sector of Nuclear Science Research,
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 1, 2022)

In the Accelerator Driven System (ADS) being studied by the Japan Atomic Energy Agency (JAEA) for transmutation of long-lived radioactive waste, lead-bismuth eutectic alloy (LBE) is used as a spallation target and subcritical core coolant. A proton irradiation facility in J-PARC is considered to prepare a material irradiation database for ADS development. The proton irradiation facility is equipped with an LBE loop, which enables material irradiation tests in spallation environment under flowing LBE condition. The slow leakage of LBE is one of critical issue to use LBE safety. The slow leakage is caused by the biting slag and/or other materials at valve seal of drain valve. To solve this problem, JAEA examined the application of freeze-seal valve (FSV), which seal the piping by freezing LBE in specific position. Water-cooled and air-cooled freeze-seal valve test modules were fabricated, installed in the test section of the existing test stand for LBE technology development, and tested to confirm their operation and performance. As a result of the tests, it was confirmed that the water-cooled FSV test module worked well along to the design values. This report describes the outline and details of the test stand for LBE technology and each FSV test module, as well as the results of operation and performance verification tests.

Keywords: ADS, Lead-bismuth Eutectic Alloy (LBE), Freezed Seal Valve (FSV)

+ Preparatory Office of New Research Reactor

*1 ATOX Co., Ltd.

*2 Sanyutechnos Plant Engineers Corporation

目 次

1. 序論	1
2. 鉛ビスマス要素技術開発装置	3
2.1 装置の概要	3
2.1.1 設計の基本指針	3
2.1.2 装置の設計性能	3
2.2 装置全体構成	3
2.2.1 LBE 系	3
2.2.2 試験部	4
2.2.3 カバーガス系	4
2.2.4 計測制御系	4
2.3 各機器の詳細	5
2.3.1 ドレンタンク	5
2.3.2 LBE 配管	5
2.3.3 LBE ドレンバルブ	6
2.3.4 膨張タンク	6
2.3.5 カバーガス系機器	7
2.3.6 計測制御系機器	8
2.3.7 その他	10
3. フリーズシールバルブ (FSV) 試験体	13
3.1 共通仕様	13
3.1.1 フランジアダプター	13
3.1.2 熱電対	13
3.1.3 予熱ヒーター及び保温材	14
3.1.4 制御装置ユニット	14
3.2 水冷式 FSV 試験体の概要	14
3.2.1 試験体全体構成	14
3.2.2 各機器の詳細	14
3.3 空冷式 FSV 試験体の概要	15
3.3.1 試験体全体構成	15
3.3.2 各機器の詳細	16
4. 動作・性能確認試験	25
4.1 全体計画	25
4.2 水冷式 FSV 試験	25
4.2.1 性能確認試験の手順	25
4.2.2 結果	25
4.3 空冷式 FSV 試験	26

4.3.1 性能確認試験の手順	26
4.3.2 結果	27
5. まとめ	35
謝辞	36
参考文献	36
付録 A 主要な機器の図面	37
付録 B 運転マニュアル	43

Contents

1. Introduction	1
2. Test stand for fundamental LBE technology.....	3
2.1 Outline of the test stand.....	3
2.1.1 Basic design guidelines.....	3
2.1.2 Design performance of the test stand	3
2.2 Overall structure of the test stand	3
2.2.1 LBE system	3
2.2.2 Test section.....	4
2.2.3 Cover gas system	4
2.2.4 Instrumentation and control systems.....	4
2.3 Components.....	5
2.3.1 Drain tank	5
2.3.2 LBE piping	5
2.3.3 LBE drain valve	6
2.3.4 Expansion tank	6
2.3.5 Components for cover gas system	7
2.3.6 Components for instrumentation and control systems	8
2.3.7 Others.....	10
3. Frozen seal valve (FSV) test modules	13
3.1 Common specifications	13
3.1.1 Flange adapter	13
3.1.2 Thermocouples	13
3.1.3 Preheating heaters and thermal insulators.....	14
3.1.4 Control unit	14
3.2 Outline of the water-cooled FSV test module	14
3.2.1 Overall structure	14
3.2.2 Components	14
3.3 Outline of the air-cooled FSV test module	15
3.3.1 Overall structure	15
3.3.2 Components	16
4. Operation and performance verification tests.....	25
4.1 Overall plan	25
4.2 Results of the water-cooled FSV.....	25
4.2.1 Performance verification test procedure	25
4.2.2 Results	25
4.3 Results of the air-cooled FSV.....	26

4.3.1 Performance verification test procedure	26
4.3.2 Results	27
5. Concluding remarks	35
Acknowledgements	36
References	36
Appendix A Drawings of major components	37
Appendix B Operation manuals	43

図リスト

Fig. 1.1	Operating principles of freeze seal valve	2
Fig. 2.2.1	Overall layout of the test stand for fundamental LBE technology	11
Fig. 2.2.2	Flow diagram of the test stand for fundamental LBE technology	12
Fig. 3.1.1	Drawing of the normal flange adapter	17
Fig. 3.1.2	Drawing of the chiller, blower and control unit	18
Fig. 3.2.1	Outline of the FSV test module (water cooling type)	19
Fig. 3.2.2	Flow diagram of the FSV test module (water cooling type)	20
Fig. 3.2.3	Drawing of the FSV test module (water cooling type)	21
Fig. 3.2.4	Thermocouple installation diagram of the FSV test module (water cooling type)	22
Fig. 3.3.1	Outline of the FSV test module (air cooling type)	23
Fig. 3.3.2	Flow diagram of the FSV test module (air cooling type)	23
Fig. 3.3.3	Drawing of the FSV test module (air cooling type)	24
Fig. 4.2.1	Trend graph of LBE temperatures (water-cooling type, 1st run)	29
Fig. 4.2.2	Solidification behavior of LBE (water-cooling type, 1st run)	29
Fig. 4.2.3	Melting behavior of LBE (water-cooling type, 1st run)	30
Fig. 4.2.4	Trend graph of coolant temperatures (water-cooling type, 1st run)	30
Fig. 4.2.5	Trend graph of LBE temperatures (water-cooling type, 2nd run)	31
Fig. 4.2.6	Solidification behavior of LBE (water-cooling type, 2nd run)	31
Fig. 4.2.7	Melting behavior of LBE (water-cooling type, 2nd run)	32
Fig. 4.2.8	Trend graph of coolant temperatures (water-cooling type, 2nd run)	32
Fig. 4.3.1	Trend graph of LBE temperatures (air-cooling type, 1st run)	33
Fig. 4.3.2	Trend graph of air temperatures (air-cooling type, 1st run)	33
Fig. 4.3.3	Trend graph of LBE temperatures (air-cooling type, 2nd run)	34
Fig. 4.3.4	Trend graph of air temperatures (air-cooling type, 2nd run)	34
Fig. A.1	Drawing of the remote flange	37
Fig. A.2	Drawing of the drain tank	38
Fig. A.3	Drawing of the drain valve and box heater	39
Fig. A.4	Drawing of the expansion tank	40
Fig. A.5	Drawing of the vapor trap	41
Fig. A.6	Drawing of the induction type continuous liquid level meter	42

This is a blank page.

1. 序論

長寿命放射性廃棄物の核変換を実現するため、日本原子力研究開発機構（JAEA）が研究を進めている加速器駆動システム（ADS; Accelerator Driven System）¹⁾では、核破砕ターゲット及び未臨界炉心冷却材として鉛ビスマス共晶合金（LBE; Lead-Bismuth Eutectic alloy）を採用している。将来のADSの開発に向けて材料照射データベースを構築するため、J-PARCでは陽子照射施設²⁾の検討を進めている。陽子照射施設にはLBEループが設置され、核破砕環境かつ流動LBE中での材料照射試験が可能である。陽子照射施設を実現するためには、LBEを安全に利用するためにいくつか解決すべき課題がある。その中の一つに、ドレンバルブがスラグ等を噛み込むことによって発生するLBEのスローリークがある。ドレンバルブはLBEループにおいて、運転中はループの循環部分にLBEを保持し、運転停止時はループ内のLBEをドレンタンク導く重要な機器である。過去にJAEAが初めて製作した鉛ビスマス材料試験ループ（JLBL-1）の運転において、ドレンバルブのシート部に付着したスラグの噛み込みが原因と見られるスローリークが発生し、ループ内LBE量の減少による計画外停止が頻発した。この対策として以降に製作したLBEループにおいては、(1) LBEを系統に投入する前に純化作業を行う、(2) 系統内にフィルターを設置、(3) LBE中酸素濃度の制御、を必ず行うこととした。これらの対策によりスラグの発生は大幅に抑制されるが、完全に無くすことは出来ない。万が一、陽子照射施設においてスローリークが発生した場合、放射線環境下でドレンバルブのシート部の研磨やバルブ交換作業を行うことは極めて困難である。そこで、陽子照射施設の鉛ビスマス系統にフリーズシールバルブ（FSV）の採用を検討した。FSVは、Fig. 1.1に示すように液体金属系配管の一部を水や空気で冷却し、LBEを融点以下で固化させることで流れを止めるタイプのバルブである。FSVをドレンバルブとして用いた場合、接触部がないためスラグ等の噛み込みによるスローリークの恐れがなくなる。ドレンバルブを開放するときは冷却を止め、ヒーターで加熱することによりLBEを融解する。LBE用のFSVを開発するため、水冷式及び空冷式のFSV試験体を製作し、既設の鉛ビスマス要素技術開発装置の試験部に取り付け、動作・性能確認試験を行った。

本報告書では鉛ビスマス要素技術開発装置ならびに各 FSV 試験体の概要と各部の詳細、動作・性能確認試験結果について述べる。

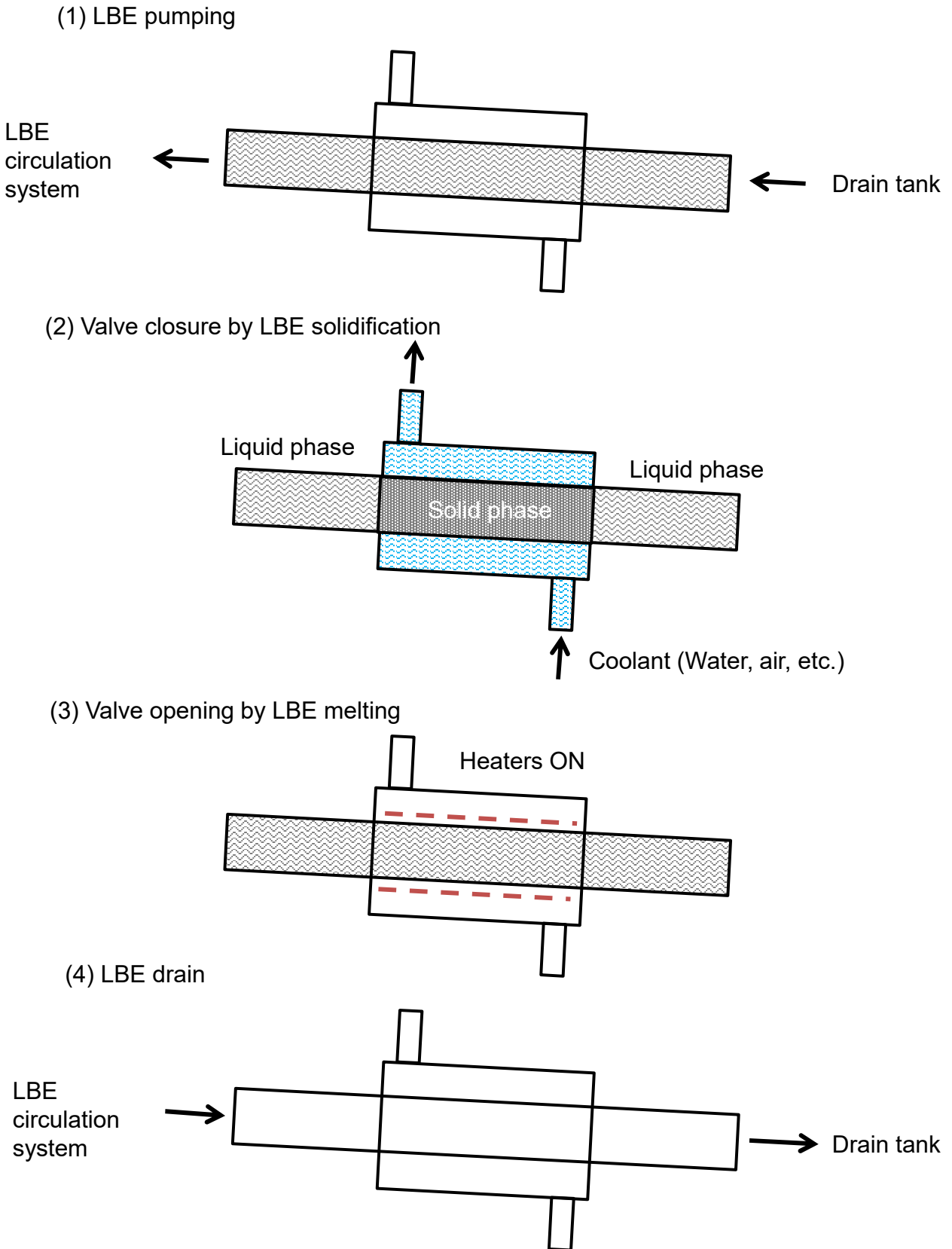


Fig. 1.1 Operating principles of freeze seal valve.

2. 鉛ビスマス要素技術開発装置

2.1 装置の概要

2.1.1 設計の基本指針

鉛ビスマス要素技術開発装置は、ADS の研究開発計画の一環として、LBE の取扱いに関連した要素技術開発（遠隔操作対応フランジ、遠隔操作対応パッケージヒーター、FSV、LBE 用圧力計及び連続式液位計等）を行うための装置である。装置の設計性能を次項に示す。

2.1.2 装置の設計性能

装置の設計性能は以下とした。

流体	LBE（鉛ビスマス共晶合金（45%Pb-55%Bi））
使用温度	最高 450 °C
設計圧力	0.5 MPa
全体構成	線形型とする。
配管	使用温度に応じた材質（SUS316L）を選定する。主要配管の口径は遠隔対応フランジに対応するように選定する。
配管継ぎ手	フランジ部以外は全て溶接継手とする。
試験部	主流部の途中に遠隔対応フランジを設置し、試験部とする。この試験部には遠隔操作対応フランジ、遠隔操作対応パッケージヒーターおよび FSV 試験体を設置できる構造とする。

装置の全体構成を次節に示す。

2.2 装置全体構成

Fig. 2.2.1に鉛ビスマス要素技術開発装置の全体構成図を示す。本装置は、ドレンタンク、膨張タンク、遠隔操作対応フランジとそれらを接続するLBE配管及びバルブ、ガス系配管、制御装置などより構成される。以下に各系統の詳細について述べる。

2.2.1 LBE 系

LBE 系は、Fig. 2.2.2 のフロー図に示すようにドレンタンク、膨張タンク、遠隔操作対応フランジとそれらを接続する LBE 配管及びバルブから構成される。配管、機器類ともに使用実績が豊富な SUS316L 製で、最高使用温度は 450°C である。以下に各機器の概略を述べる。詳細な仕様は別途 2.3 に記載した。

ドレンタンクは系統の最下部に、膨張タンクは系統の最上部にそれぞれ設置される。両者は配管によって連結され、それらの間には遠隔操作対応フランジが 2 箇所、通常フランジが

1 箇所に設置され、フランジ間が試験部となる。バルブ類はドレンタンク上部に手動のドレンバルブが設置される。これら全ての LBE 機器及び配管、バルブには予熱ヒーターと保温材、熱電対が取り付けられるとともに、熔融した LBE がドレン時に途中で滞留することなく最下部のドレンタンクに必ず集約できるよう、配管には 1/25 以上の勾配が設けられている (Fig. 2.2.1 参照)。また、万が一 LBE が循環系外に漏洩した場合に備え、架台床面をトレイ構造とし、循環系内の LBE の全量を受容し、装置外への LBE の拡散を防止する構造としている。

2.2.2 試験部

Fig. 2.2.2に示すように主流配管の途中にフランジを設置し、それらの間を試験部とする。試験部には3つのフランジを設置し、上部と中央部が遠隔操作対応型、下部が通常フランジである。この試験部には遠隔操作対応フランジ試験体、遠隔操作対応パッケージヒーターおよびFSV試験体を設置できる構造となっている。

遠隔操作対応フランジの仕様 (図面は Fig. A.1)

型式	3 本ボルト型
寸法	φ270 mm (外径)
主要材質	SUS316L
シール方式	セミメタリックガスケット (日本バルカートライパック)
員数	2 基

通常フランジの仕様

型式	JIS10k FF50A
寸法	φ155 mm (外径)
主要材質	SUS316L
シール方式	メタリックガスケット
員数	1 基

2.2.3 カバーガス系

カバーガス系は、Fig. 2.2.2に示すようにガスラインおよびガス操作パネルから構成される。カバーガス系の役割は、(1)LBE系のガス置換、(2)ドレンタンクの溶解したLBEを加圧し、配管側を減圧することによるLBEの揚液、(3)通常運転時のカバーガス供給、である。以下に各機器の概略を述べる。詳細な仕様は別途2.3に記載した。

ガスラインは SUS316L 製配管とベーパートラップで構成され、スエージロック継ぎ手により接続される。ガスラインは、ガスボンベと各機器を接続し、ベーパートラップを通じて系統外へ排気する役割を果たす。ガス操作パネルは、パネル、手動バルブ、圧力計、安全弁、真空ポンプ及びそれらを接続する配管継ぎ手から構成され、ガス系の制御ならびに監視を行う。

2.2.4 計測制御系

計測制御系は、Fig. 2.2.2に示すように熱電対、予熱ヒーター及び保温材、LBEセンサー類

及び制御盤から構成される。以下に各機器の概略を述べる。詳細な仕様は別途2.3に記載した。熱電対は、予熱ヒーターの温度制御用及びLBEの液温監視用に分類される。予熱ヒーターは、配管、機器類を設定した温度に保つために設置する。保温材は配管、機器からの放熱を抑えるとともに、火傷から人員を防護する役割を持つ。センサー類は、膨張タンク内のLBEレベルを固定位置で検出及び連続的に指示するLBEレベル計、系統内のLBE圧力を指示するLBE圧力計である。制御装置は、制御盤内に試験装置の電源、制御回路などを配置した装置で、制御用コントローラ（PLC: Programmable Logic Controller）による試験装置の監視・操作機能とともに、インターロック機能を有する。

2.3 各機器の詳細

本節では主要な機器の役割、仕様等について詳細に述べる。

2.3.1 ドレンタンク

ドレンタンクは、系統の最も低い位置に設置する。起動時には LBE を加熱融解し、停止時あるいは異常時にはドレンバルブが開放されることで、系統内の LBE を重力によりドレンして貯留する機能を有する。重力によるドレンを補助するため、運転中は膨張タンクと均圧にして運用する。以下に具体的な仕様を示す。

ドレンタンクの仕様（図面は Fig. A.2）

型式	縦置円筒形、上部蓋は溶接構造
寸法	350A (φ355.6)、高さ 610 mm、肉厚 8 mm
材質	SUS316L
内容積	約 50 L (LBE 投入量は約 40 L)
ノズル類	LBE 出入り口ノズル (1 本)、LBE 投入口ノズル (1 本)、ガス系ノズル (1 本)、熱電対ウェル (1 本)
LBE 予熱機能	有 (最高温度 450 °C)
員数	1 基
ノズル類の仕様	
LBE 出入口ノズル	SUS316L TP-S、50A Sch20S、タンク底面から約50mm
LBE 投入口ノズル	SUS316L TP-S、50A Sch20S、フランジ50A/10K FF
ガス系ノズル	SUS304 TP-S、10A Sch20S、スエージロック継ぎ手
熱電対ウェル	SUS316 TP-S、6A Sch20S

2.3.2 LBE 配管

LBE 配管は、ドレンタンクと膨張タンクを連結し、途中にはドレンバルブ、遠隔対応フランジ部を含む。また、膨張タンクの手前で分岐し、圧力計取り付けフランジへ至る。全ての配管には予熱ヒーターと保温材とともに、制御用熱電対が取り付けられている。

LBE 配管の仕様

配管口径	ドレンタンク側：50A Sch20S 膨張タンク側：65A Sch10S
材質	SUS316L TP-S
接続方式	フランジ部以外は全て溶接
予熱機能	有（最高温度：450 °C）

2.3.3 LBE ドレンバルブ

本試験装置には、LBE ドレンバルブが設置されている。

LBE ドレンバルブの役割

LBE 揚液時にはドレンバルブを閉じてドレンタンクと配管部を区切り、ドレンタンク側を加圧、配管部を減圧して差圧をつけ、この状態でドレンバルブを開放することで LBE を揚液する。運転中はドレンバルブを閉じて LBE を配管部に保持する。また、異常時にはドレンバルブを開放することで、膨張タンクや配管内の LBE を重力によりドレンタンクへ落下させることで、LBE の漏洩を防ぐ。

LBE ドレンバルブの仕様（図面は Fig. A.3）

形式	手動式ボールバルブ（KITZ 製 10UTDZ3H(M)-SK）
口径	50A JIS10K RF
材質	SCS13A
接続方式	両端フランジ
員数	1 台

2.3.4 膨張タンク

膨張タンクは、試験装置の最も高い位置に設置され、LBE の熱による膨張・収縮を吸収する他、系統内のガス置換の機能を有する。液位計はタンク内の LBE 液位の最高点及び最低での LBE 接液状態を検知し、制御機器に信号を伝達する機能を有する。運転時の液面レベルは底部から 200 mm 以上を維持するように設計している。上蓋はフランジ構造とし、取り外し可能である。フランジにはタンク内部を視認可能な石英ガラス製の監視窓が設置してある。以下に具体的な仕様を示す。

膨張タンクの仕様（図面は Fig. A.4）

型式	横置円筒型、上部蓋は監視窓付きフランジ構造
寸法	300A (φ318.5)、高さ 500 mm、肉厚 6 mm
材質	SUS316L
内容積	約 34 L
上面フランジ	300A / 10K
ノズル類	LBE 出入り口ノズル（1 本）、ガス系ノズル（1 本）、 連続式液位計案内管（1 本）、接点式液位計ノズル（1 本）、

ガス注入口・出口 員数	監視窓ノズル（1本）、熱電対ウェル（1本） 各1本、膨張タンク側面上部にスエージロック継ぎ手 1基
ノズル類の仕様	
LBE出入口ノズル	SUS316L TP-S、65A Sch10S
ガス系ノズル	SUS304L TP-S、10A Sch20S、スエージロック継ぎ手
連続式液位計案内管	SUS316 TP-S、 $\phi 25.4 \times t2.5$ mm
接点式液位計ノズル	SUS316 TP-S、25A Sch20S
監視窓ノズル	SUS316L TP-S、65A Sch10S
熱電対ウェル	SUS316 TP-S、6A Sch20S

2.3.5 カバーガス系機器

カバーガス系を構成する機器の具体的な仕様を以下に示す。

ガスライン

ガスラインの系統図を Fig. 2.2.2 に示す。系統の各機器は SUS316L 製配管とスエージロック継ぎ手により接続される。

ガスラインの仕様

口径	1/4 インチ
材質	SUS316L
接続方式	スエージロック
安全弁	0.5 MPa

ベーパートラップ

ベーパートラップは、LBE 蒸気がガス系のラインから漏出することを防ぐ目的で設置する。内蔵されたメッシュ構造のフィルターは交換可能な構造としている。以下に具体的な仕様を示す。（図面は Fig. A.5）

型式	メッシュ内蔵型
寸法	2B ($\phi 60.5$) \times 200 mm
材質	SUS304
員数	2 基

ガス操作パネル

ガス操作パネルは、パネル、手動バルブ、圧力計、安全弁、真空ポンプ及びそれらを接続する配管及び継ぎ手から構成される。

ガス操作パネルの仕様

型式	自立式（鋼製アングル、SUS 製パネル）
----	----------------------

手動バルブの仕様

型式	ボンネット一体型ニードルバルブ
----	-----------------

	(スエージロック製 SS-1RS4-A)
主要材質	SUS316
寸法	1/4 インチ
員数	6 個
圧力計の仕様	
圧力計	AC15 (-0.1~1.0 MPa)、2 個
圧力トランスミッター	KH15、2 個
安全弁の仕様	
安全弁	SL-38 (呼び径 15A)、2 個
真空ポンプの仕様	
真空ポンプ	アズワン VP-215、1 台
配管及び継ぎ手の仕様	
配管	1/4 インチ (SUS316)
継ぎ手	スエージロック

2.3.6 計測制御系機器

計測制御系を構成する機器の具体的な仕様を以下に示す。

熱電対

熱電対は、予熱ヒーターの温度制御用及び LBE の液温監視用に分類される。以下に各熱電対の仕様を示す。

予熱ヒーターの温度制御用熱電対の仕様 (Fig. 2.2.2 において TE で示す熱電対)

型式	シース型
種類	K
階級	JIS 0.75
外径	3.2 mm
シース材質	SUS316
員数	8 本

LBE 液温監視用熱電対の仕様 (Fig. 2.2.2 において T で示す熱電対)

型式	シース型
種類	K
階級	JIS 0.75
外径	3.2 mm
シース材質	SUS316
員数	4 本
その他	ウェルに挿入して使用

予熱ヒーター及び保温材

予熱ヒーターは、配管、機器類を設定した温度に保つために設置する。保温材は配管や機器からの放熱を抑えるとともに、火傷から人員を防護する役割を持つ。

予熱ヒーターの要求仕様

予熱最高温度	450 °C
予熱昇温時間	4 時間以内（配管、弁、機器） 24 時間（ドレンタンク）
型式	マイクロヒーター
シース材質	SUS316

保温材の仕様

保温材厚さ	保温材は雰囲気+30 °C 以下となる厚みとする。
主保温材	セラミックファイバー、ガラスウール等
仕上げ	ガラスクロス仕上げ

LBE センサー類

センサー類は、LBE レベル計、LBE 圧力計である。

LBE レベル計

LBE レベル計は膨張タンク内の LBE レベルを検知するためのものである。膨張タンクには接点式レベル計と連続式レベル計の 2 本設置され、いずれもインターロックに組み込まれている。それぞれの設置高さは Fig. A.4 に記載した。これらのレベル計を監視することにより、LBE の所在や液位を確認する。

(接点式レベル計)

型式	接点式（オムロン製 BS-1 S）
電極棒外径	5.23 mm
電極棒材質	SUS316
員数	1 本

(連続式レベル計) (図面は Fig. A.6)

型式	誘導型連続式（助川電気製 LD-1）
測定長	300 mm
測定部材質、外径	SUS304、φ16 mm
案内管材質、寸法	SUS316、φ25.4 × t2.5 mm
員数	1 本

LBE 圧力計は、膨張タンクの手前で分岐した配管にフランジで取り付けられる。最高使用温度が系統内の LBE 温度より低いため、分岐配管の温度を圧力計の使用温度以下に下げる事で LBE の圧力を測定可能とする。

LBE 圧力計の仕様は以下の通りである。

形式	高温用ダイアフラムシール式圧力トランスミッタ (長野計器製 SH71-614-4 XX01KH75XX21)
接液部材質	SUS316L
封入液	水銀
最高使用温度	最高 330 °C
測定レンジ	0～1 MPa / 4～20 mA DC
接続フランジ	50A JIS10K RF
員数	1 基

制御装置

制御装置は、制御盤内に試験装置の電源、制御回路などを配置した装置で PLC による試験装置の監視・操作機能を有している。

制御装置の仕様

型式	自立式
PLC	キーエンス製KV7500
タッチパネル	キーエンス製VT5-10W
機能	各種機器、予熱ヒーターの電源 1 式 各種機器、予熱ヒーターの制御回路 1 式
計装の物理量	各部温度、LBE 温度、LBE 液位、カバーガス圧力
インターロック	有り
員数	1 式

2.3.7 その他

架台

本装置は運転終了時に LBE を確実にドレンタンクに保持するために、主要機器が縦方向に並ぶ配置となり、床面積に比較して高さが高い構造となる。従って、架台は機器を剛に保持できる構造としている。また、遠隔操作試験時に別の場所へ移動するため、キャスターを取り付けられている。以下に具体的な仕様を示す。

型式	鉄骨構造
寸法	約 3 m × 1.9 m × 2.3 m H
材質	炭素鋼 (塗装仕上げ、刷毛塗り、灰色)
員数	1 式
キャスター	4 個

床トレイ

本装置の架台底部に設置する床トレイの構造は、万が一循環系から LBE が漏洩した際、その場で LBE を確実に回収できるように受け皿構造とした。床トレイは、ループに充填した LBE を全量受容可能な容量としている。

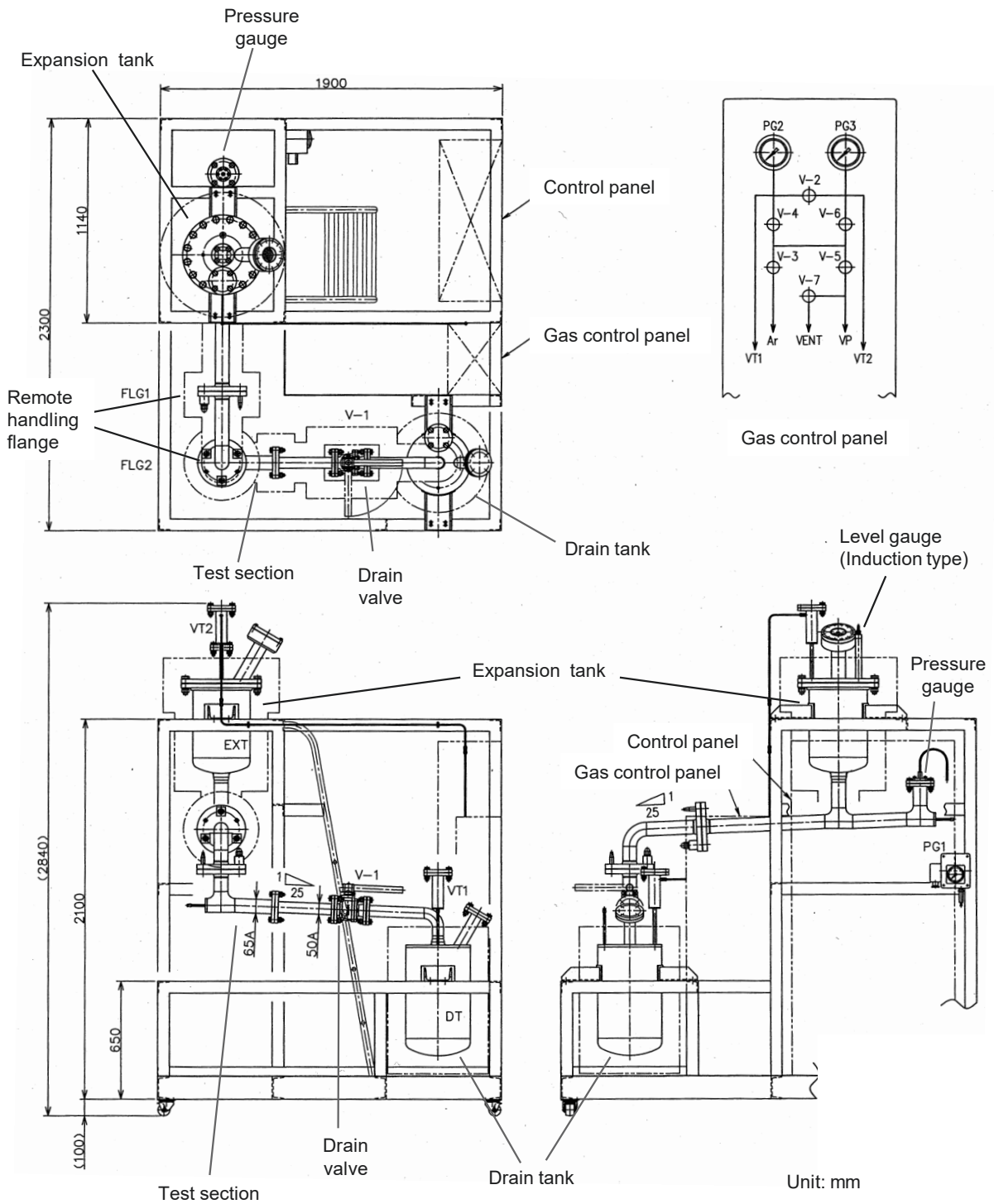


Fig. 2.2.1 Overall layout of the test stand for fundamental LBE technology.

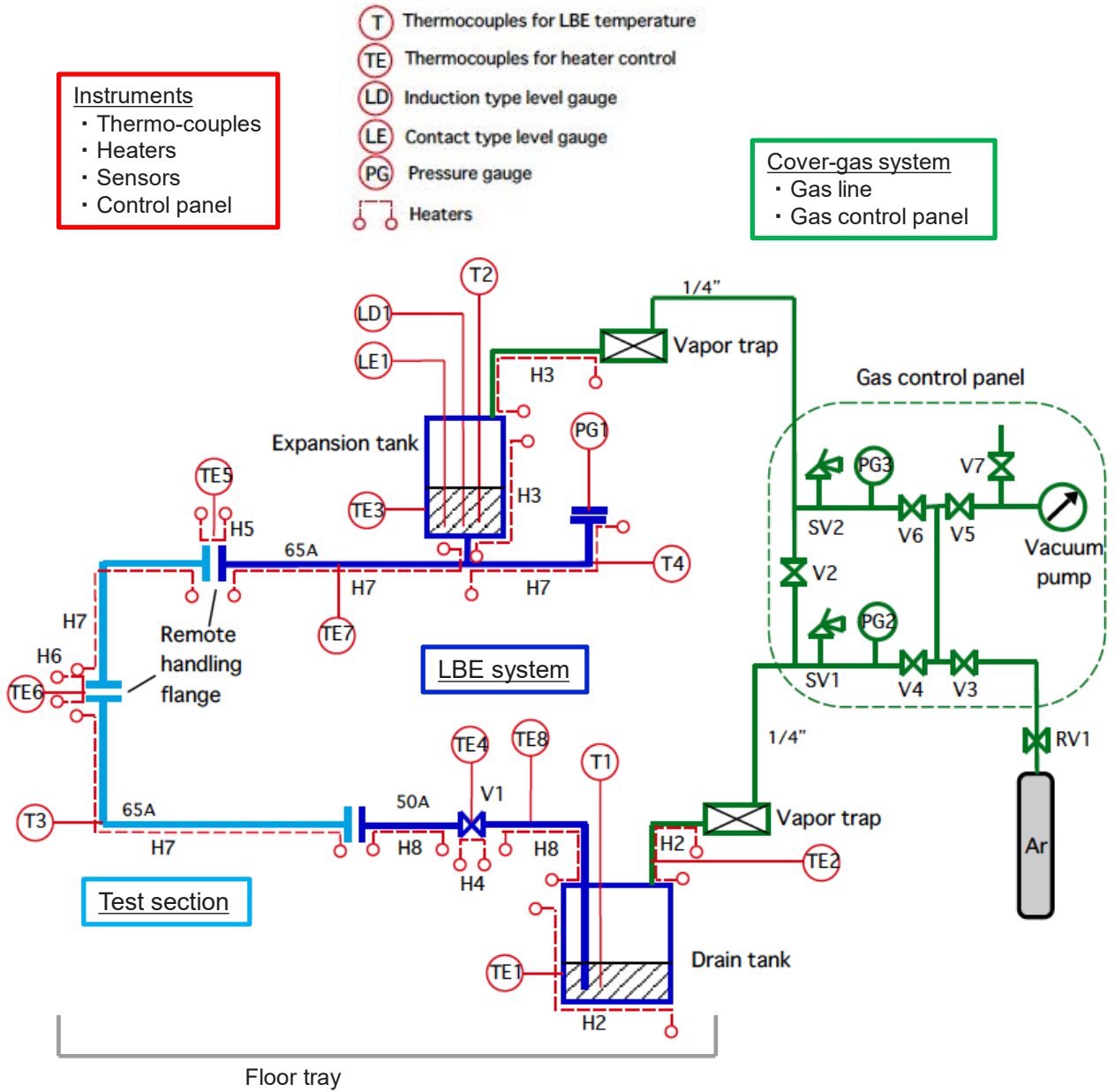


Fig. 2.2.2 Flow diagram of the test stand for fundamental LBE technology.

3. フリーズシールバルブ (FSV) 試験体

本試験体は、鉛ビスマス要素技術開発装置の試験部に取り付け、FSV の動作・性能確認試験を行うための試験体である。水冷式、空冷式を各一体ずつ製作した。以下に共通仕様ならびに各試験体の詳細について述べる。

3.1 共通仕様

3.1.1 フランジアダプター

i) フランジアダプターの役割

フランジアダプターは Fig. 3.1.1 に示すように L 字管の両端にサイズの異なるフランジを溶接した構造である。これを遠隔試験部に設置し、下流側の遠隔対応フランジを通常フランジへ変換することで、FSV 試験体の上流側と通常フランジで連結することができる。全ての配管、フランジには予熱ヒーターと保温材が巻かれている。

ii) フランジアダプターの仕様

配管口径	65A 10S
材質	SUS316LTP-S-C
遠隔対応フランジ	3 本ボルト型、φ270 mm
通常フランジ	65A / 10K FF
接続方式	フランジ部以外は全て溶接
員数	1

3.1.2 熱電対

i) 熱電対の役割

熱電対には、LBE の温度監視用とヒーター制御用並びに冷却水・空気温度測定用がある。それぞれの仕様を以下に示す。

ii) LBE 温度監視用熱電対の仕様

型式	シース型
種類	K
階級	JIS クラス 2
外径	3.2 mm
シース材質	SUS316

iii) 配管表面及び強制融解用ヒーター、予熱ヒーターの温度制御用並びに冷却水・空気温度測定用熱電対の仕様

型式	シース型
種類	K
階級	JIS クラス 2
外径	1.6 mm
シース材質	SUS316

3.1.3 予熱ヒーター及び保温材

i) 予熱ヒーターと保温材の役割

予熱ヒーターは、配管、機器類を設定した温度に保つためのものである。保温材は配管、機器からの放熱を抑えるとともに、火傷から人員を防護する役割を持つ。

ii) 予熱ヒーターの仕様

予熱温度	400 °C
予熱昇温時間	4 時間以内
型式	マイクロヒーター
シース材質	SUS316

iii) 保温材の仕様

保温材厚さ	保温材は雰囲気+30 °C 以下となる厚みとする。
主保温材	セラミックファイバー、ガラスウール等
仕上げ	ガラスクロス仕上げ

3.1.4 制御装置ユニット

制御装置ユニットは、Fig. 3.1.2 に示すように制御盤、チラー及びブロアを同じ架台上に搭載し、一体化したものである。制御盤の役割及び仕様を以下に記す。なお、チラー及びブロアについてはそれぞれ 3.2.2 及び 3.3.2 で述べる。

i) 制御盤の役割

制御盤には、試験体の電源、制御回路などを配置している。

ii) 制御盤の仕様

1) 型式	自立式
2) 機能	各種機器、予熱ヒーターの電源 1 式 各種機器、予熱ヒーターの制御回路 1 式 各種機器、温度計等の指示値、警報等の表示 1 式
3) 員数	1 台

3.2 水冷式 FSV 試験体の概要

3.2.1 試験体全体構成

要素技術開発装置に装着した水冷式 FSV 試験体の外観写真を Fig. 3.2.1 に示す。水冷式 FSV 試験体は、Fig. 3.2.2 に示すように水冷式 FSV 試験体一式（通常フランジとそれらを接続する LBE 配管、水冷ジャケットからなる試験体部、チラー、流量計、膨張タンク及びそれらを接続する冷却水配管からなる冷却水系、制御装置など）、遠隔対応フランジを通常フランジに変換するフランジアダプターから構成される。制御盤は空冷式と共通である。

3.2.2 各機器の詳細

i) 水冷式 FSV 試験体の役割

水冷式 FSV は、配管を水で冷却し LBE を固化させることで流れを止めるタイプのバルブである。これをドレンバルブとして用いた場合、スラグ等の噛み込みによるスローリークの恐れがない。また、異常時には冷却水流が止まることで余熱により LBE が融解し、ドレンバルブが開放されることで、外部電源に頼ることなく自動的に LBE がドレンされる。

ii) 水冷式 FSV 試験体部の仕様

試験体部は Fig. 3.2.3 の図面に示すような扁平な断面を持つ配管である。LBE の凝固、融解時の温度変化を測定するため、試験体部内部には Fig. 3.2.4 に示すように多くの熱電対が取り付けられている。

型式	円筒形、水冷式ジャケット
材質	SUS316L
付属品	冷却水入口（1箇所）、冷却水出口（1箇所）、 強制融解用ヒーター（1本）、予熱ヒーター（3本）
熱電対	LBE 温度測定用（8本、Fig. 3.2.4 の TL1～8） 強制融解用ヒーター制御用（2本、Fig. 3.2.4 の TF1～2） 予熱ヒーターの温度制御用（4本、Fig. 3.2.4 の T1～4） 冷却水温度測定用（2本、Fig. 3.2.4 の TW1～2）
員数	1基

iii) 冷却水系の仕様

(冷却系)

チラー	東京理化器械製クールエース CA-2600
循環方式	密閉系向循環
温度調節範囲・精度	-10～30 °C、±2 °C以下
冷却能力	3000 W (2580 kcal/h) at 20°C
外部循環能力	最大流量23.5 L/min
員数	1基

(循環系)

配管	寸法：20A (φ24.5)、材質：SUS316L、
膨張タンク	円筒形、材質：SUS316L、員数：1基
流量計	キーエンス製 FD-M100T (入口側 1箇所)

3.3 空冷式 FSV 試験体の概要

3.3.1 試験体全体構成

要素技術開発装置に装着した空冷式 FSV 試験体の外観写真を Fig. 3.3.1 に示す。空冷式

FSV 試験体は、Fig. 3.3.2 に示すように空冷式 FSV 試験体一式（通常フランジとそれらを接続する LBE 配管から成る試験体部、ブロア、風量計、吸気ダクト及び排気ダクト、制御装置など）、遠隔対応フランジを通常フランジに変換するフランジアダプターより構成される。制御盤は水冷式と共通である。

3.3.2 各機器の詳細

i) 空冷式 FSV 試験体の役割

空冷式 FSV は配管を空気で冷却し LBE を凝固させることで流れを止めるタイプのバルブである。これをドレンバルブとして用いた場合、スラグ等の噛み込みによるスローリークの恐れがない。また、異常時には気流が止まることで余熱により LBE が融解し、ドレンバルブが開放されることで、外部電源に頼ることなく自動的に LBE がドレンされる。

ii) 空冷式 FSV 試験体の仕様

試験体部は Fig. 3.3.3 に示すような扁平な断面を持つ配管にフィンを溶接した構造である。LBE の凝固、融解時の温度変化を測定するため、試験体部内部に多くの熱電対が取り付けられている。熱電対の取り付け位置は水冷式と同様で Fig. 3.2.4 に示すとおりである。

型式	円筒形空冷式ジャケット、フィン付き
材質	SUS316L
付属品	空気入口（1箇所）、空気出口（1箇所） 強制融解用ヒーター（1本）、予熱ヒーター（3本）
熱電対	LBE 温度測定用（8本、Fig. 3.3.4 の TL1～8） 強制融解用ヒーター制御用（2本、Fig. 3.3.4 の TF1～2） 予熱ヒーターの温度制御用（4本、Fig. 3.3.4 の T1～4） 空気温度測定用（2本、Fig. 3.3.4 の TW1～2）
員数	1基

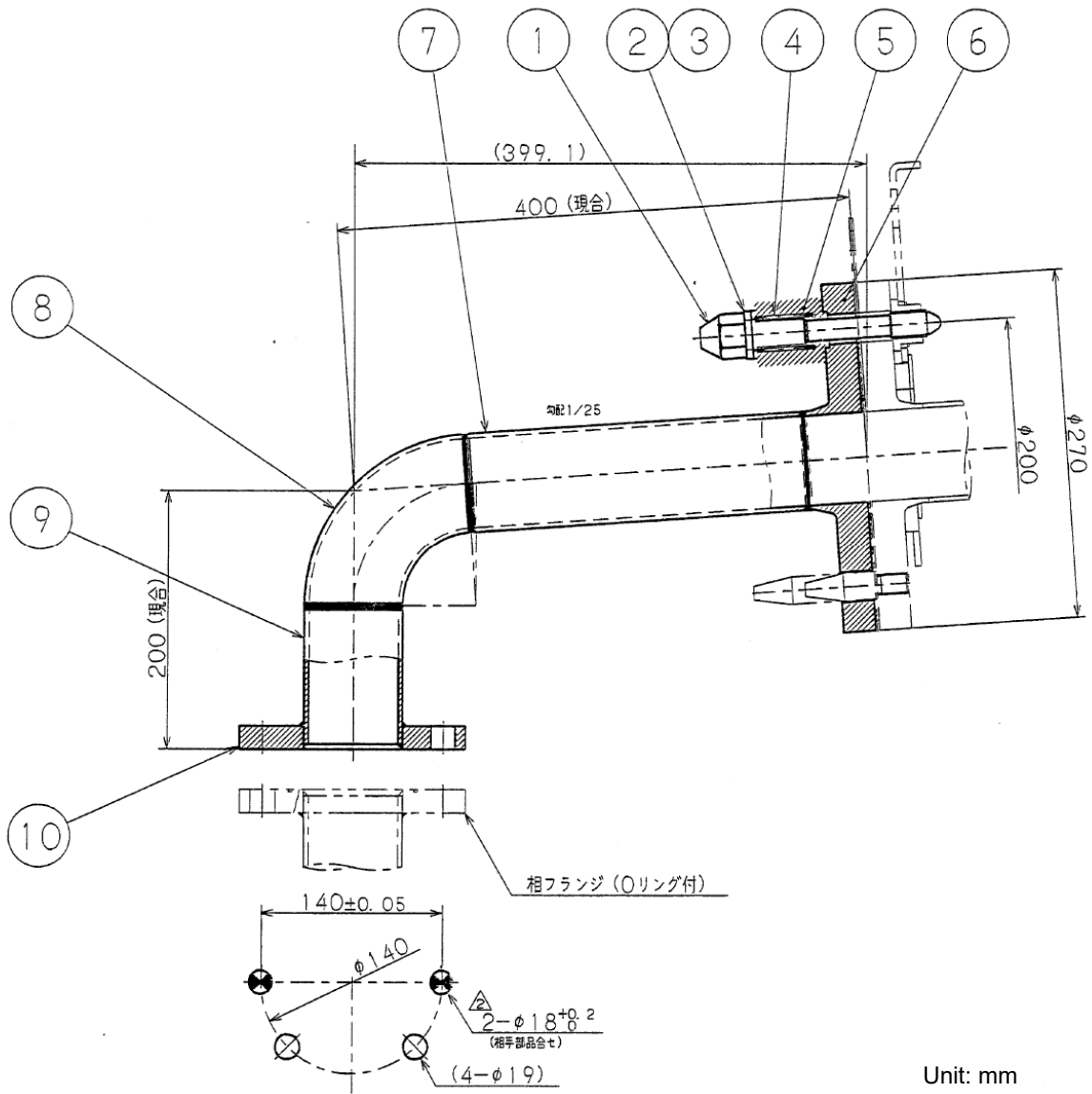
iii) 冷却系の仕様

（ブロア）

電動送風機	日立産機システム製ボルテックスブロアVB-022-G
最大風量	4.1 m ³ /min
員数	1基

（送風系）

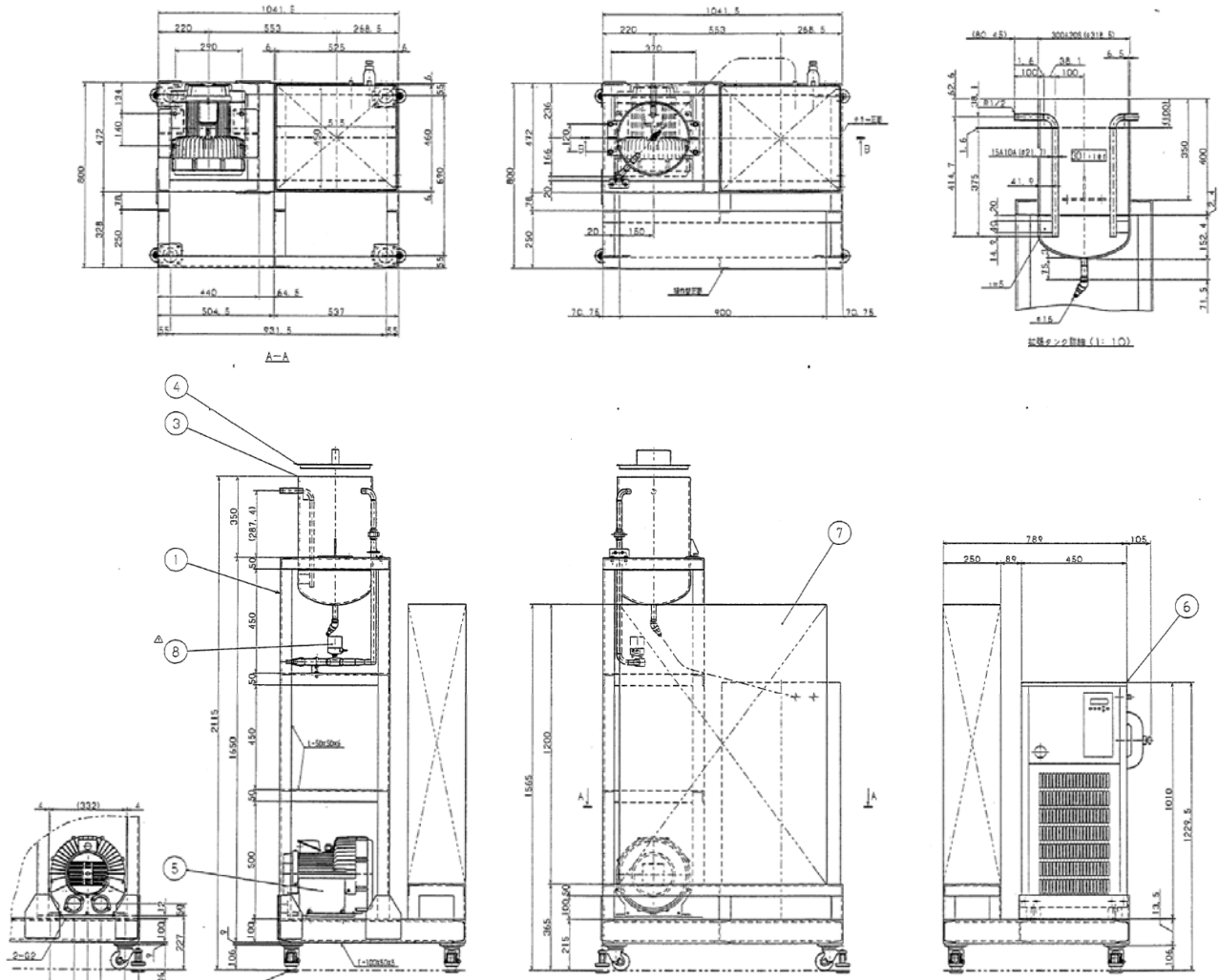
ダクト	寸法：100A（φ114.3）前後、材質：SUS
風量計	azbil 製 MCF0250（入口側 1箇所）



Unit: mm

10	フランジ	1	SUS316L/JIS10k FF 65A
9	パイプ	1	SUS316L/65A 10S
8	ロングエルボ	1	SUS316L/65A 10S
7	パイプ	1	SUS316L/65A 10S
6	フランジ	1	SUS316L
5	反力受	3	SUS304
4	スプリング	3	SUS304WPB/線径: 2.5・外径27.5・総筋数14・自由長106
3	平バネ座金	3	SUS304/M20
2	平座金	3	SUS304/M20
1	遠隔ボルト	3	SUS630

Fig. 3.1.1 Drawing of the normal flange adapter.

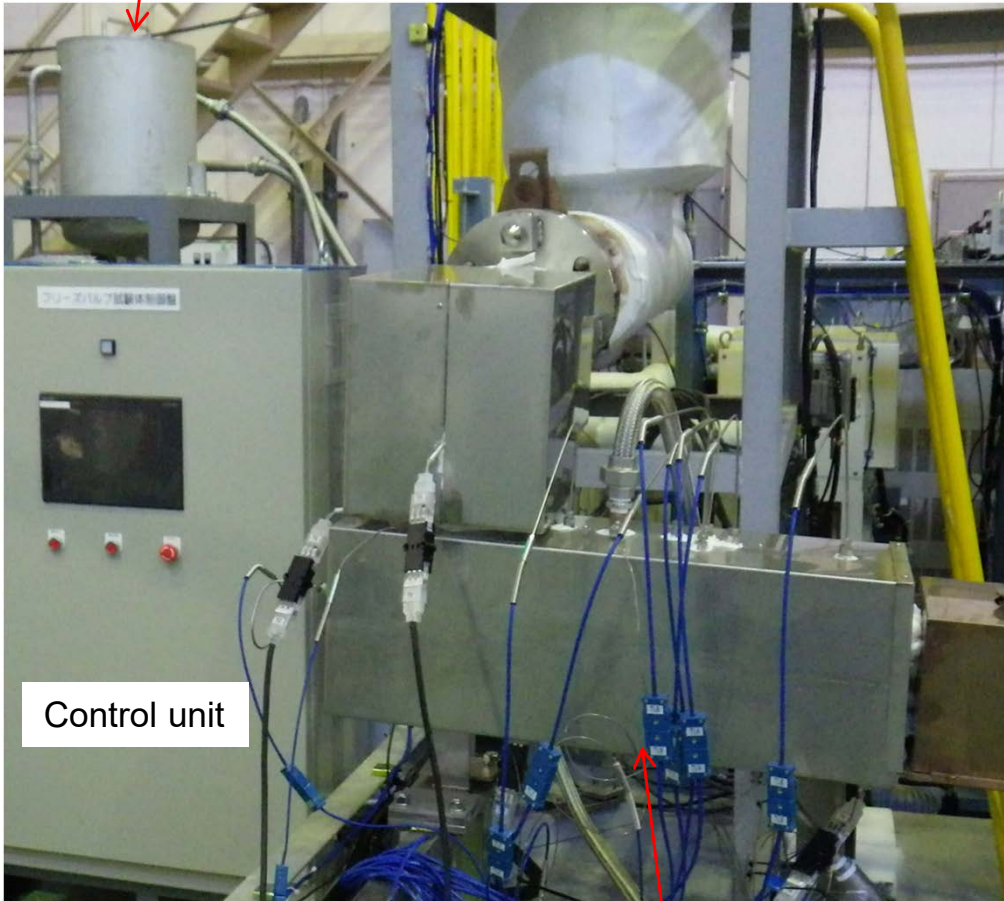


Unit: mm

8	電動3万弁	1	EA100-UTNE (KITZ)
7	制御盤	1	
6	冷却水循環装置	1	CA-2600 (東京理化)
5	ホルテックスブロウ	1	VB-022G (HITACHI)
4	拡張タンク・室	1	SUS304
3	拡張タンク	1	SUS304/300A20S・15A (ノズル)
2	キャスター	4	CGAN75-P (MISUMI)
1	フレーム	1	SS400 (*)
品番	部品名	員数	材質・仕様・備考

Fig. 3.1.2 Drawing of the chiller, blower and control unit.

Expansion tank



Test module

Fig. 3.2.1 Outline of the FSV test module (water cooling type).

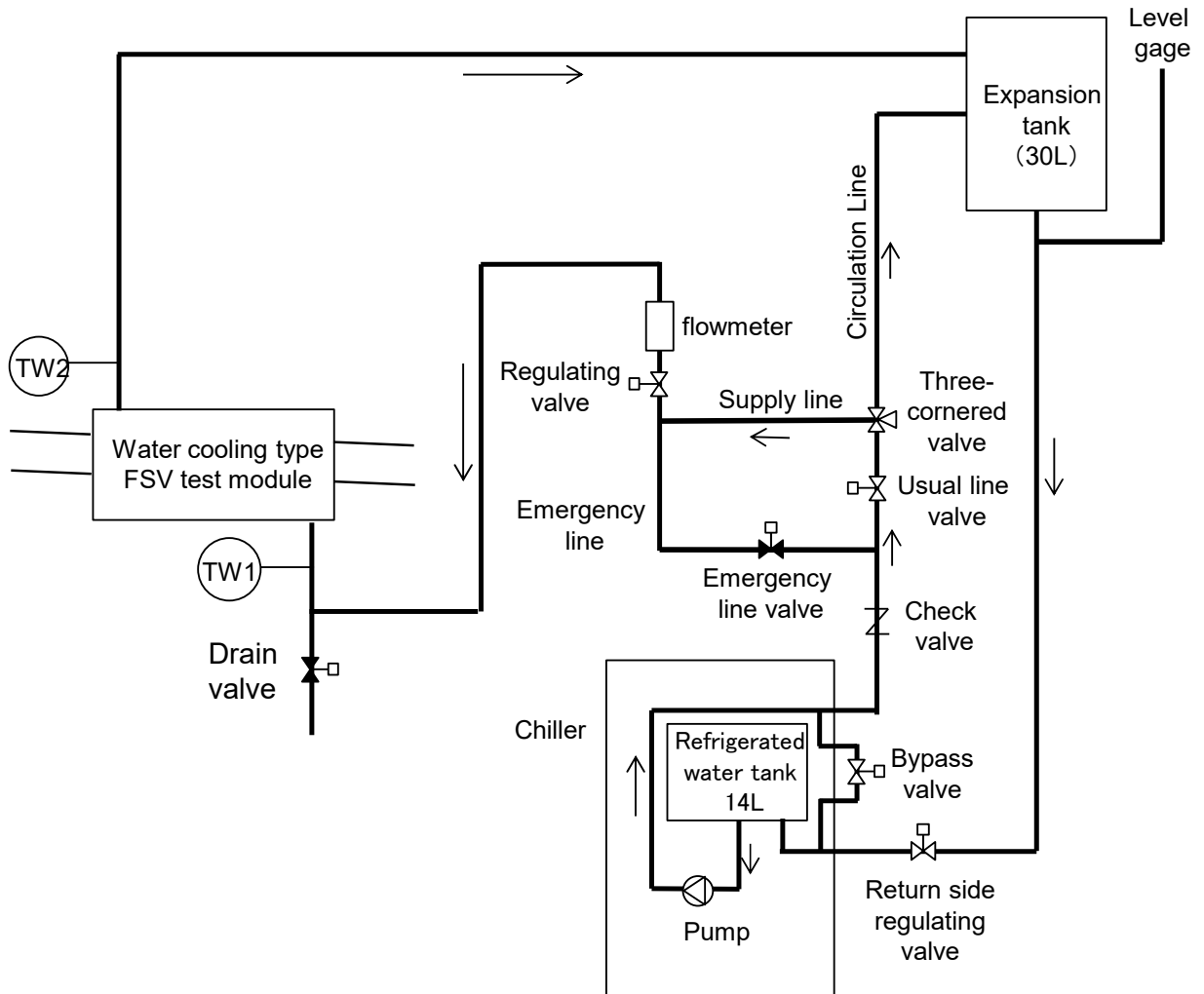
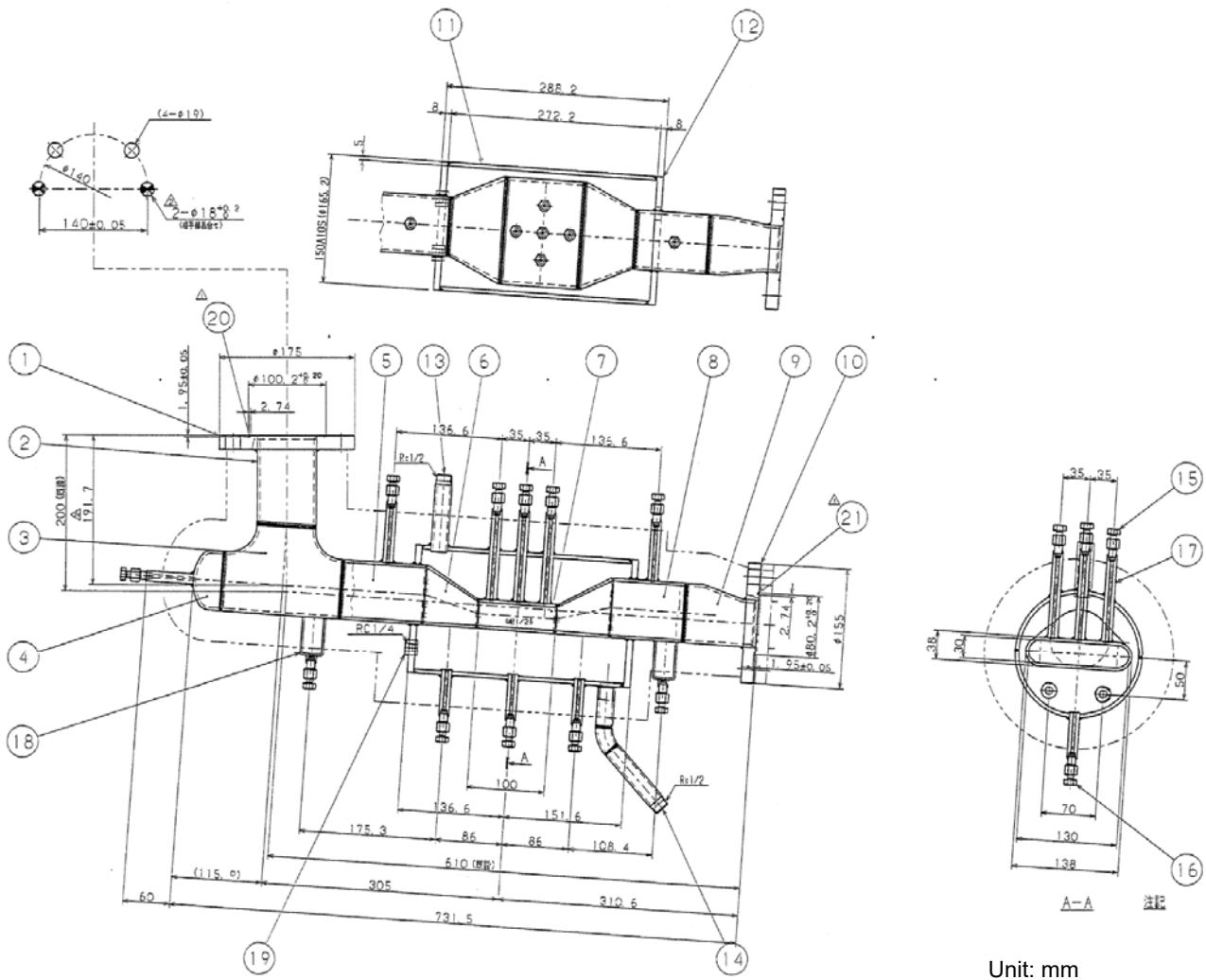


Fig. 3.2.2 Flow diagram of the FSV test module (water cooling type).



Unit: mm

21	メタル中空リング	1	#3640・φ80Xφ2.4X0.35 (バルカー)
20	メタル中空リング	1	#3640・φ100Xφ2.4X0.35 (バルカー)
19	ヒータ取出口	2	SUS304
18	フィッティング製作部	2	SUS304
17	フィッティング製作部	11	SUS316L
16	コブラックフィッティング	5	φ1.6用 (R1/8)
15	コブラックフィッティング	8	φ3.2用 (R1/8)
14	パイプ・45°エルブ(倭米)	1	SUS304/15A 20S
13	パイプ(倭米)	1	SUS304/15A 20S
12	鏡板	2	SUS304/8t
11	パイプ	1	SUS304/150A 20S (2分割)
10	フランジ	1	SUS316L/JIS10k FF 50A
9	エキセントリックレギュレータ	1	SUS316L/65AX50A 20S
8	パイプ	1	SUS316L/65A20S (現倉)
7	精円パイプ	1	SUS316L (製作品)
6	レギュレータ	2	SUS316L (製作品)
5	パイプ	1	SUS316L/65A 20S
4	キャップ	1	SUS316L/65A 20S
3	チーズ	1	SUS316L/65A 20S
2	パイプ	1	SUS316L/65A 20S (現倉)
1	フランジ	1	SUS316L/JIS10k FF 65A
品番	部品名	数量	材質・仕様・備考

Fig. 3.2.3 Drawing of the FSV test module (water cooling type).

フリーズバルブ試験体熱電対取り付け図

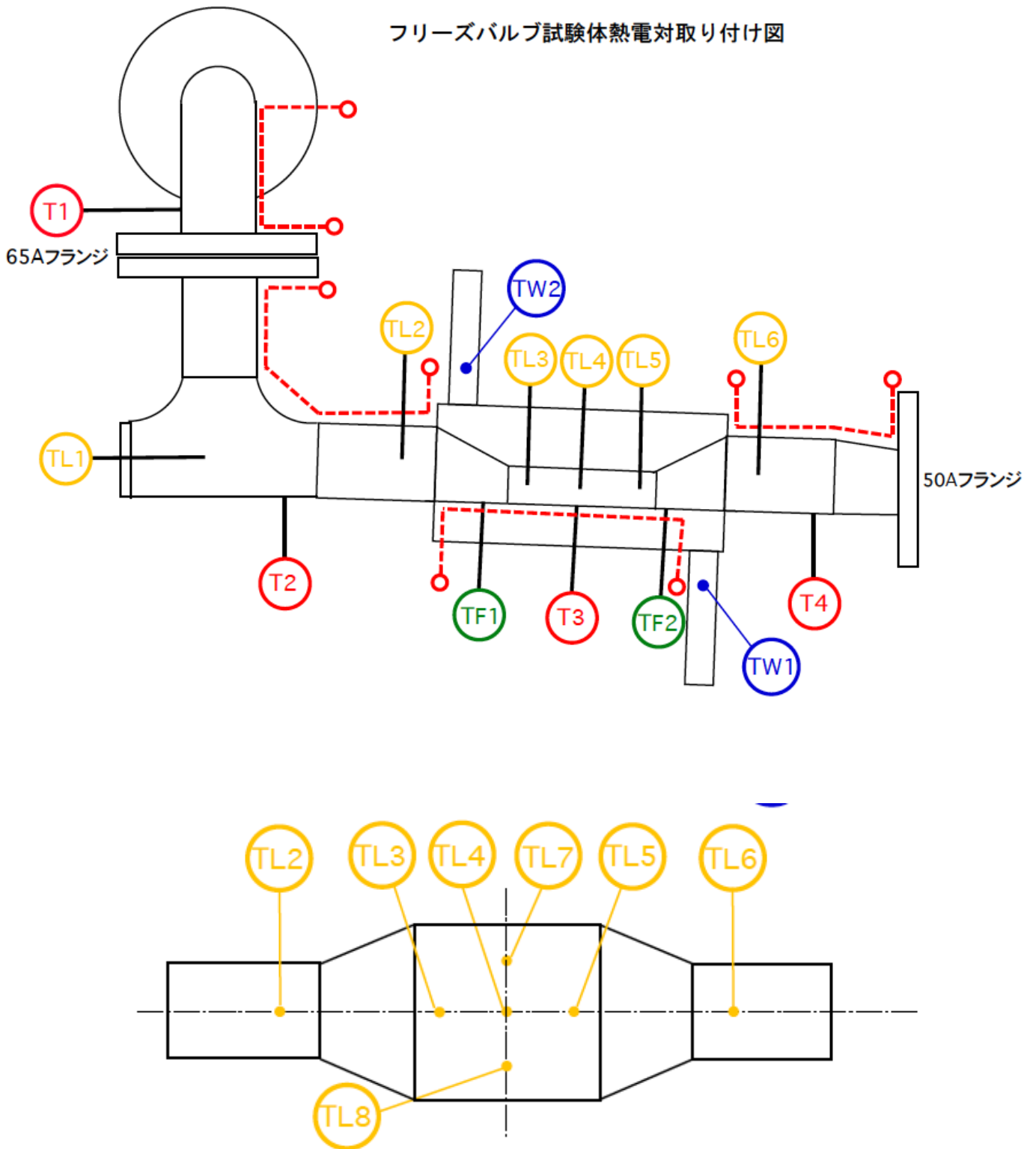


Fig. 3.2.4 Thermocouple installation diagram of the FSV test module (water cooling type).

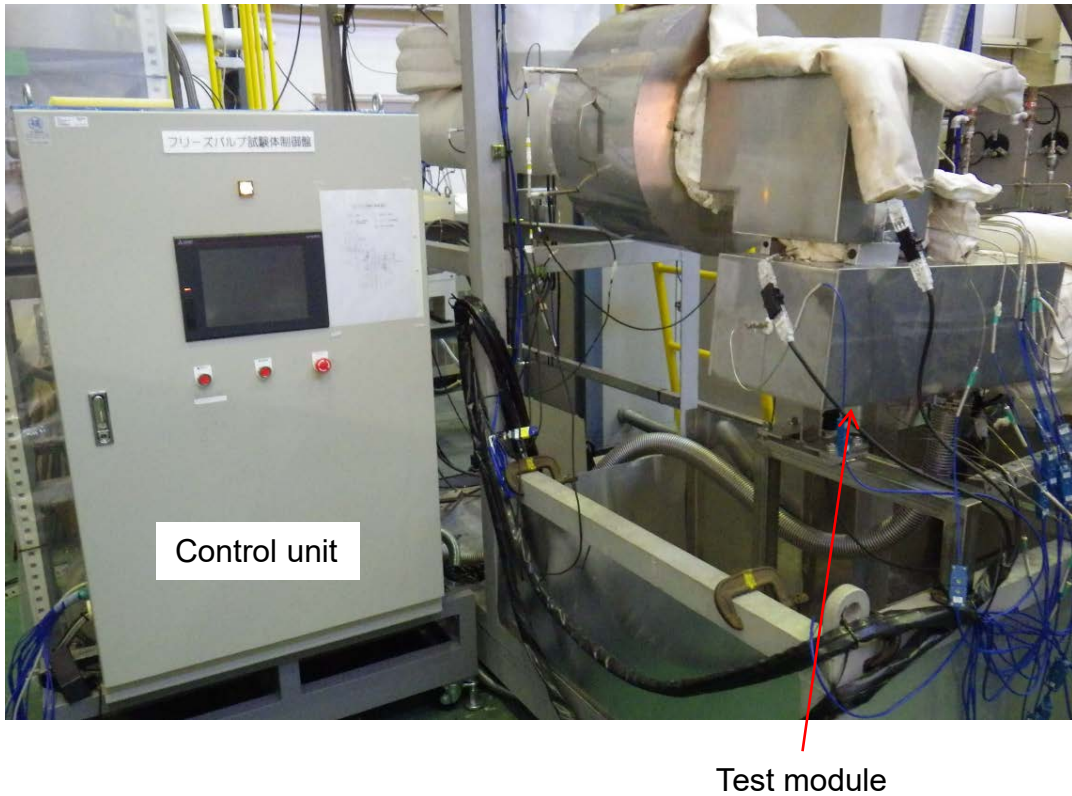


Fig. 3.3.1 Outline of the FSV test module (air cooling type).

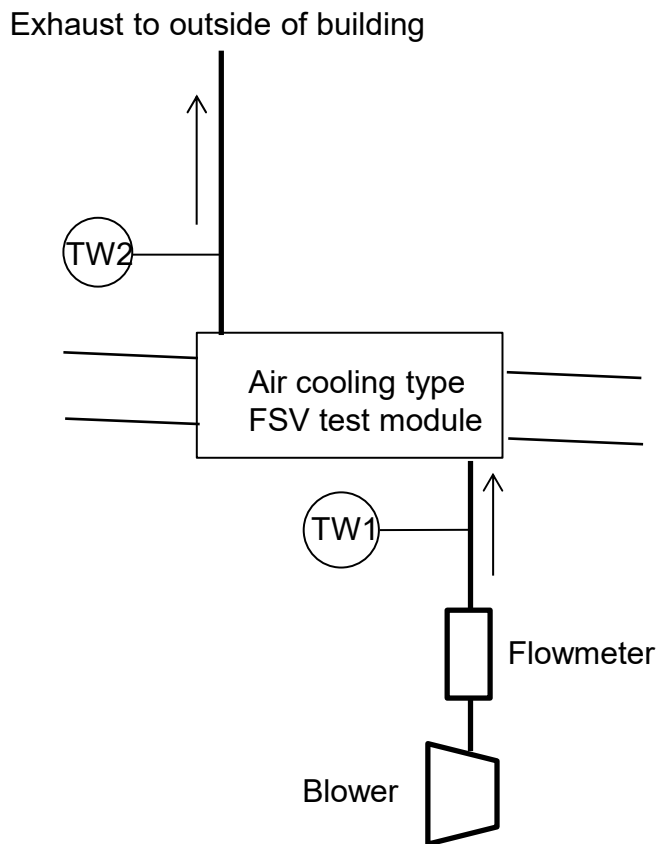
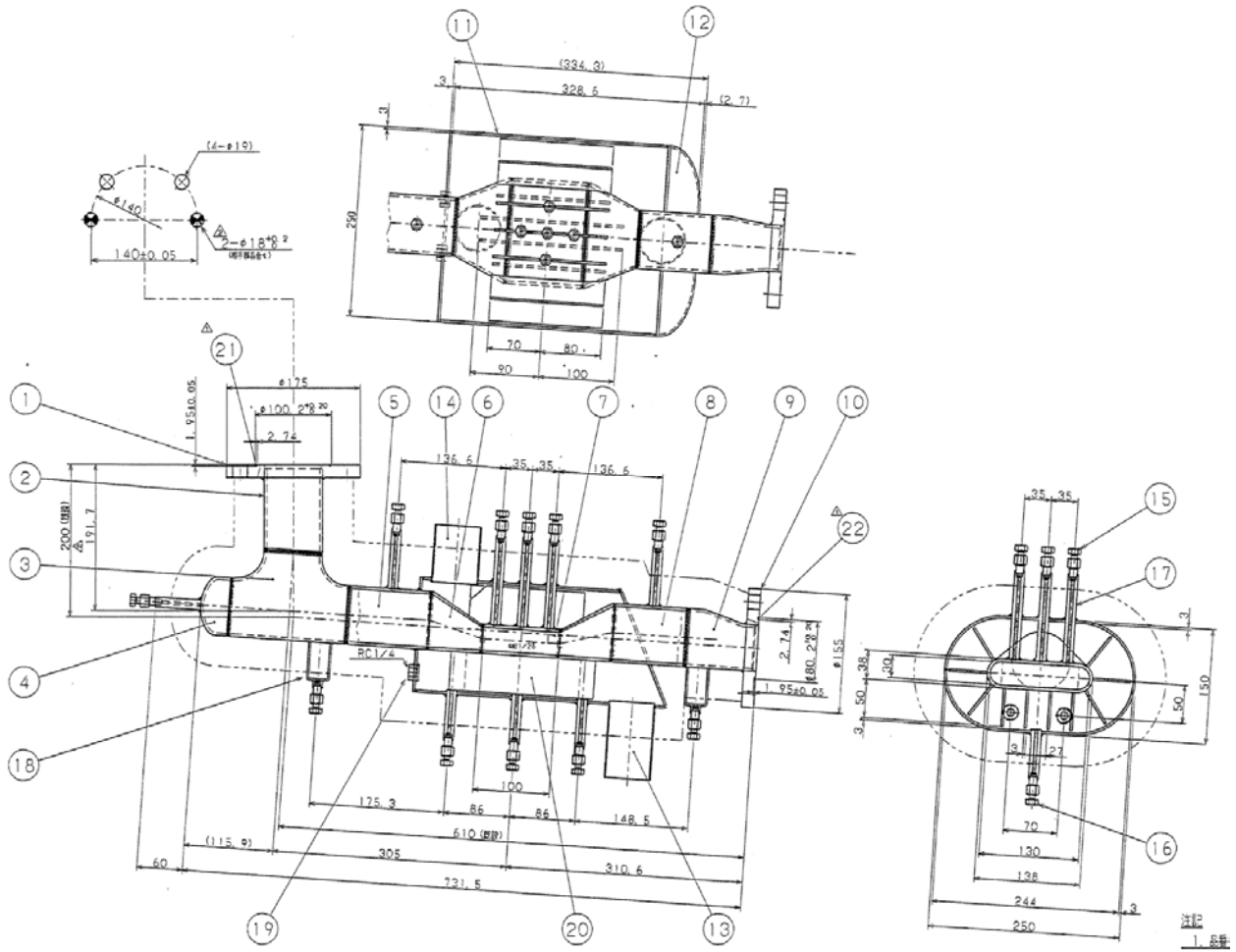


Fig. 3.3.2 Flow diagram of the FSV test module (air cooling type).



22	メタル中空リング	1	#3640・φ80Xφ2.4X0.35 (バルカー)
21	メタル中空リング	1	#3640・φ100Xφ2.4X0.35 (バルカー)
20	フィン	1式	SUS304/3t
19	ヒート取出口	2	SUS304
18	フィッティング継手	2	SUS304
17	フィッティング継手	11	SUS316L
16	コンプレッションフィッティング	5	φ1.6用 (R1/8)
15	コンプレッションフィッティング	8	φ3.2用 (R1/8)
14	パイプ (縦長)	1	SUS304/50A 5S
13	パイプ 90°エルブ (横割)	1	SUS304/50A 5S
12	翼板	2	SUS304/3t
11	胴板	2	SUS304/3t・2t
10	フランジ	1	SUS316L/J1S10k FF 50A
9	エキセントリックレジュマー	1	SUS316L/65AX50A 20S
8	パイプ	1	SUS316L/65A20S (現倉)
7	横円パイプ	1	SUS316L (製作品)
6	レジュマー	2	SUS316L (製作品)
5	パイプ	1	SUS316L/65A 20S
4	キャップ	1	SUS316L/65A 20S
3	テーズ	1	SUS316L/65A 20S
2	パイプ	1	SUS316L/65A 20S (現倉)
1	フランジ	1	SUS316L/J1S10k FF 65A
品番	部品名	員数	材質・仕様・備考

Unit: mm

Fig. 3.3.3 Drawing of the FSV test module (air cooling type).

4. 動作・性能確認試験

4.1 全体計画

鉛ビスマス要素技術開発装置を用いた LBE 技術開発試験として以下を行った。試験開始前に、機能確認試験として気密試験、LBE 無し昇温試験並びに LBE 揚液昇温試験を実施し、2.1.2 に示した装置の性能に問題がないことを確認した。

- (1) 遠隔対応フランジ試験
- (2) 遠隔対応パッケージヒーター試験
- (3) FSV 試験
- (4) 計測機器試験

これらのうち、(1)、(2)および(4)については別途報告することとし、本報告書では(3)について報告する。

4.2 水冷式 FSV 試験

4.2.1 性能確認試験の手順

詳細な運転手順は「付録 B 運転マニュアル」に記載されているが、概略の手順は以下の通りである。

- ①装置全体を昇温し（～200 °C）、LBE を融解する。
- ②LBE を揚液する。
- ③FSV 部のヒーターを OFF、冷却水の循環を開始し（3～5 L/min）、LBE を固化する。LBE が固化し、FSV 部の温度が融点より十分下がったらドレンバルブを開放する。
- ④FSV より上流側を 400 °C まで段階的に昇温する。
- ⑤冷却水の循環を停止し、全ヒーターを OFF する。
- ⑥1 回目（強制融解試験）：FSV 部のヒーターのみ ON、LBE が融解し、ドレンしたらヒーターを OFF し、試験を終了する。
- 2 回目（自然融解試験）：全ヒーターを OFF のまま、余熱により LBE が融解し、ドレンしたら試験を終了する。

なお、水冷式 FSV 試験体の目標性能は以下の通りである。

- (1) 上流側 LBE 温度 200 °C において LBE を固化でき、FSV として機能すること。
- (2) 上流側 LBE 温度を 400 °C まで昇温しても FSV として機能を保持できること。
- (3) FSV として機能しているときの冷却水温度は、安定していると共にチラーの最高温度である 30 °C を超えないこと。
- (4) 強制融解、自然融解のいずれでもドレン可能であること。

4.2.2 結果

要素技術開発試験装置に設置した水冷式 FSV 試験体について、1 回目、2 回目の性能確認試験を行った。その結果を以下に記す。

1 回目（強制融解試験）

Fig. 4.2.1 に各部温度のトレンドグラフを、Fig. 4.2.2 と Fig. 4.2.3 に凝固過程及び融解過程の拡大図をそれぞれ示す。Fig.4.2.2 に示すように上流側 LBE 温度 200 °C において FSV 部のヒーターを OFF とした。冷却水の循環を開始してから 2～3 分で水冷ジャケット部の LBE 温度（TL3～5、7、8）は融点以下に下がり、凝固した。ヒーターOFF から約 10 分でドレンバルブを開放したところ、融点温度以上であった水冷ジャケットより下流の LBE（TL6）は融点以下に下がったことからドレンしたと考えられるが、水冷ジャケットより上流の LBE（TL1～2）は融点以上の温度で系統内に保持されており、FSV として機能することが確認された。さらに上流側 LBE 温度を 400 °C まで昇温しても上流の LBE（TL1～2）は融点以上の温度で系統内に保持されており、FSV として機能を保持できることが分かった。続いて、冷却水循環停止後、FSV 部のヒーターを ON にする強制融解試験を行った。Fig. 4.2.3 に示すようにヒーターON から約 10 分で LBE の温度は融点を上回って融解し、ドレンすることが分かった。

また、水冷ジャケット部出入口における冷却水温度のトレンドグラフを Fig. 4.2.4 に示す。循環運転中は常に 30 °C 以下に保持できていることが分かった。

2 回目（自然融解試験）

Fig. 4.2.5 に各部温度のトレンドグラフを、Fig. 4.2.6 と Fig. 4.2.7 に凝固過程及び融解過程の拡大図をそれぞれ示す。1 回目試験と同様、上流側 LBE 温度を 400 °C まで昇温しても FSV として機能を保持できることが分かった。続いて、冷却水循環停止後、全ヒーターOFF の自然融解試験を行った。Fig. 4.2.7 に示すように、全ヒーターOFF から約 20 分で LBE の温度は融点を上回って融解し、ドレンすることが分かった。

また、水冷ジャケット部出入口における冷却水温度のトレンドグラフを Fig.4.2.8 に示す。1 回目試験と同様、循環運転中は常に 30 °C 以下に保持できていることが分かった。

以上の結果より、水冷式 FSV 試験体は十分な冷却能力を有しており、冷却水循環開始からわずか 2～3 分で FSV として機能することが分かった。一方、融解特性は強制融解で 10 分、自然融解では 20 分かかかるが、異常発生時には出来るだけ早くドレン出来ることが望ましい。本試験体は、LBE の凝固特性を測定するための熱電対を複数取り付けるため、水冷ジャケットがやや大型化している。実機的设计にあたっては凝固時間よりも融解時間の短縮を優先したよりコンパクトな設計とすることが望ましい。

一方、水冷式は Fig. 3.2.2 に示すように複雑な構成である。このような複雑な構成となる理由のひとつは、通水開始時やポンプ喪失時などの沸騰対策である。実機においては、運転時だけでなく異常時も自動で安全側に動作するよう、設計する必要がある。

4.3 空冷式 FSV 試験

4.3.1 性能確認試験の手順

詳細な運転手順は「付録 B 運転マニュアル」に記載されているが、概略の手順は以下の通りである。

- ①装置全体を昇温し（～200 °C）、LBE を融解する。
- ②LBE を揚液する。
- ③FSV 部のヒーターを OFF、ブロアの運転を開始する。（風量 1,620 L/min）
- ④LBE を固化し、ドレンバルブを開放する。
- ⑤ブロアの運転を停止し、全ヒーターを OFF する。
- ⑥1 回目（強制融解試験）：FSV 部のヒーターのみ ON、LBE が融解し、ドレンしたらヒーターを OFF し、試験を終了する。
2 回目（自然融解試験）：全ヒーターを OFF のまま、余熱により LBE が融解し、ドレンしたら試験を終了する。

なお、空冷式 FSV 試験体の目標性能は以下の通りである。

- (1) 上流側 LBE 温度 200 °C において LBE を固化でき、FSV として機能すること。
- (2) 上流側 LBE 温度を 400 °C まで昇温しても FSV として機能を保持できること。
- (3) FSV として機能しているときの冷却風温度は安定していること。
- (4) 強制融解、自然融解のいずれでもドレン可能であること。

4.3.2 結果

要素技術開発試験装置に設置した空冷式 FSV 試験体について、1 回目、2 回目の性能確認試験を行った。その結果を以下に記す。

1 回目（強制融解試験）

Fig. 4.3.1 に各部温度のトレンドグラフを示す。FSV 部のヒーターを OFF し、ブロア運転を開始したが、上流側 LBE 温度 200 °C および 150 °C では LBE は凝固しなかった。上流側 LBE 温度を 130 °C まで下げてから約 30 分で空冷ジャケット部の LBE 温度（TL3～5、7、8）は融点以下に下がり、凝固した。ここでドレンバルブを開放したところ、融点温度以上であった空冷ジャケットより下流の LBE（TL6）はドレンしたが、空冷ジャケットより上流の LBE は系統内に保持されており、FSV として機能することが確認された。続いてブロア運転を停止し、FSV 部ヒーターを ON する強制融解試験を行った。Fig. 4.3.1 に示すようにヒーター ON から約 10 分で LBE の温度は融点を上回って融解し、ドレンすることが分かった。また、空冷ジャケット部出入口における空気温度のトレンドグラフを Fig. 4.3.2 に示す。入口温度は、ブロア運転中は常に 40 °C 前後であった。出口側温度は周辺温度が 150～200 °C では約 65 °C、130 °C の時は約 50 °C であった。

2 回目（自然融解試験）

Fig. 4.3.3 に各部温度のトレンドグラフを示す。1 回目試験と同様、上流側 LBE 温度を 130 °C まで下げることで FSV として機能することが分かった。続いてブロア運転を停止し、全ヒーター OFF の自然融解試験を行った。Fig. 4.3.3 に示すように、全ヒーター OFF から約 20 分で LBE の温度は融点を上回って融解し、ドレンすることが分かった。また、空冷ジャケット部出入口における空気温度のトレンドグラフを Fig. 4.3.4 に示す。入口温度は、ブロア運転中は常に 35 °C 前後であった。出口側温度は上流側 LBE 温度が

200 °C では約 55 °C、130°C の時は約 50 °C であった。

以上の結果より、空冷式 FSV 試験体の冷却能力は不十分であり、水冷式と同様に上流側 LBE 温度 200 °C において LBE を固化でき、上流側 LBE 温度を 400 °C まで昇温しても FSV として機能を保持できるように設計する必要がある。しかし、冷却能力を向上するために大型化すると比較的大きな設置空間を要すると共に、融解時間の増大にもつながる。風量の増加に伴って騒音も大きくなるため、対策が必要である。今回の試験ではブロー運転時に騒音が発生し、その発生源は、ブローの吸気音と空冷ジャケット内のフィンとの干渉と考えられた。空冷式は構成機器が少なく、簡潔に構成できる利点があるため、実機的设计時に最適化と対策を行うことでよりよい構成を提案できると考えられる。

また、水冷式、空冷式共通の課題として、冷却条件の設定が挙げられる。凝固後の固相-固相間の相変態による応力発生は、LBE 温度を 50~80 °C で保持することで緩和できる³⁾。相変態時に発生する繰り返し応力は配管の寿命を縮め、大きな破裂を招く恐れがある。このため、相変態時に発生する応力を極力低減することが LBE の漏洩事故の防止や FSV の安全確保の上で重要になる。また、温度を融点近傍に保持することにより、電源喪失や FSV 冷却材喪失などの非常時に自動的にドレンが開始されるまでの時間も短縮できる利点も生まれる。これらの点を踏まえ、適切な冷却温度を設定することが FSV を運用していく上で重要である。

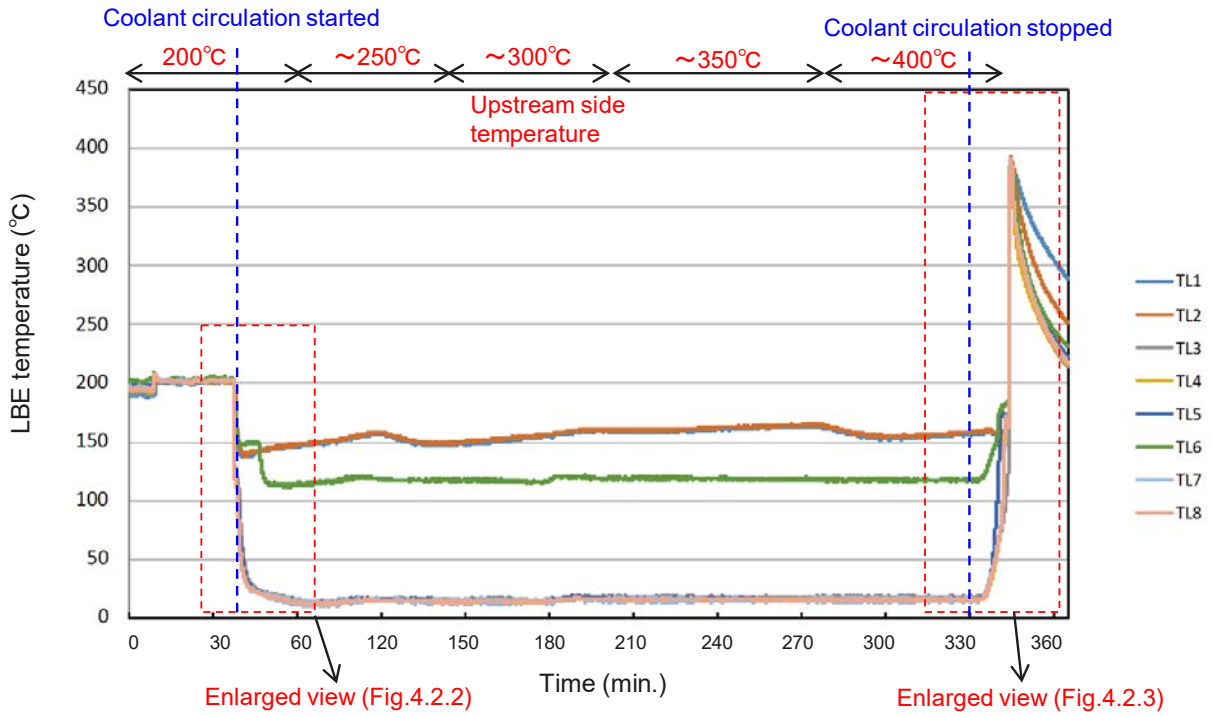


Fig. 4.2.1 Trend graph of LBE temperatures (water-cooling type, 1st run).

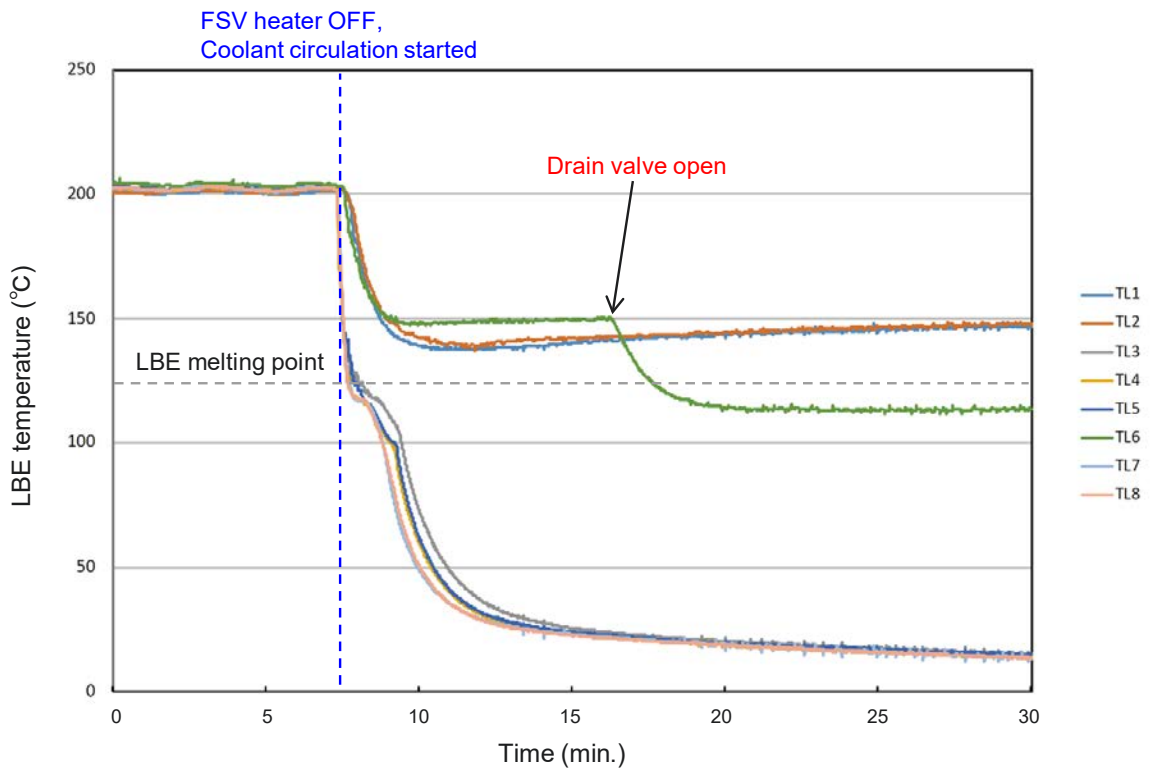


Fig. 4.2.2 Solidification behavior of LBE (water-cooling type, 1st run).

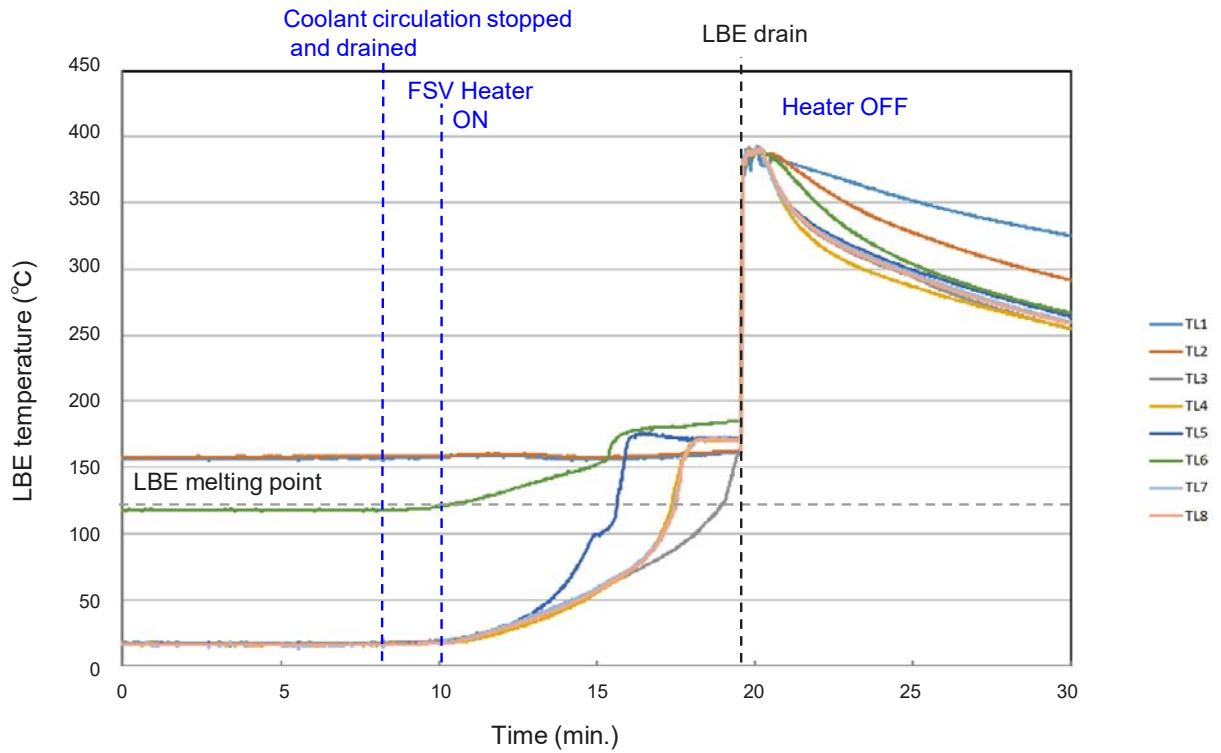


Fig. 4.2.3 Melting behavior of LBE (water-cooling type, 1st run).

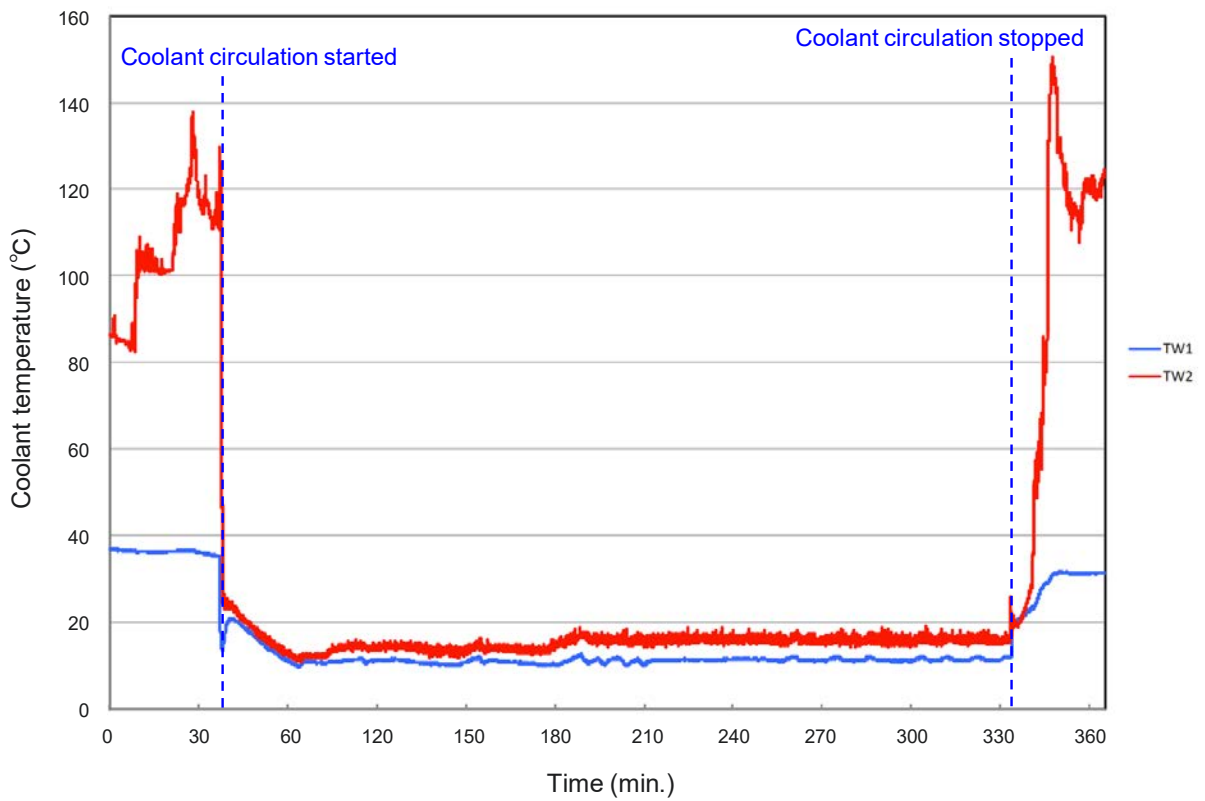


Fig. 4.2.4 Trend graph of coolant temperatures (water-cooling type, 1st run).

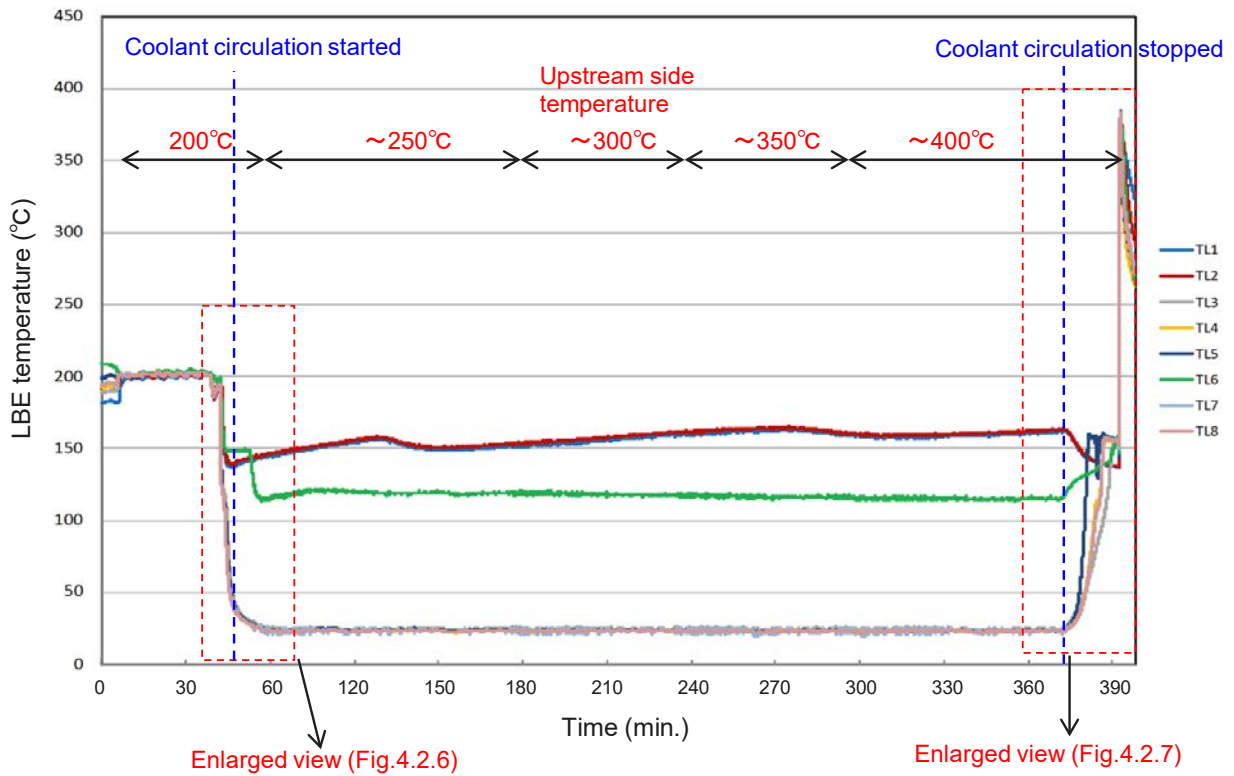


Fig. 4.2.5 Trend graph of LBE temperatures (water-cooling type, 2nd run).

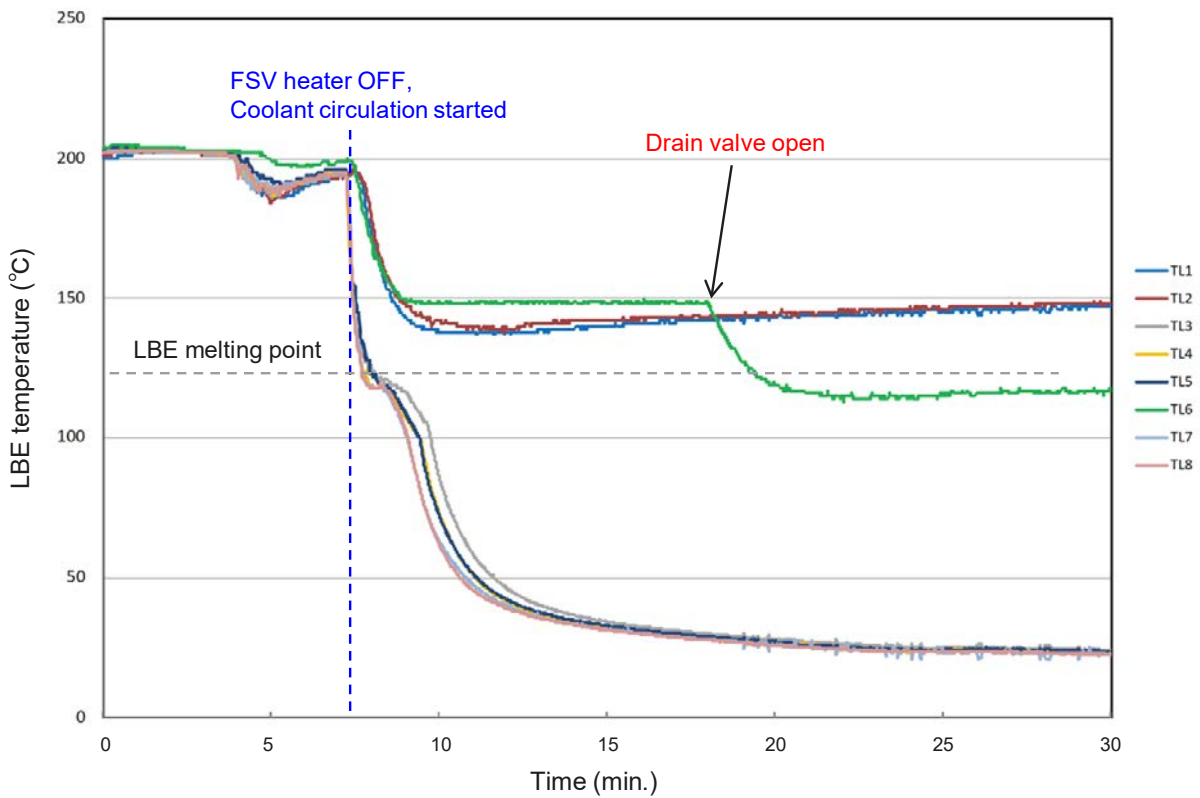


Fig. 4.2.6 Solidification behavior of LBE (water-cooling type, 2nd run).

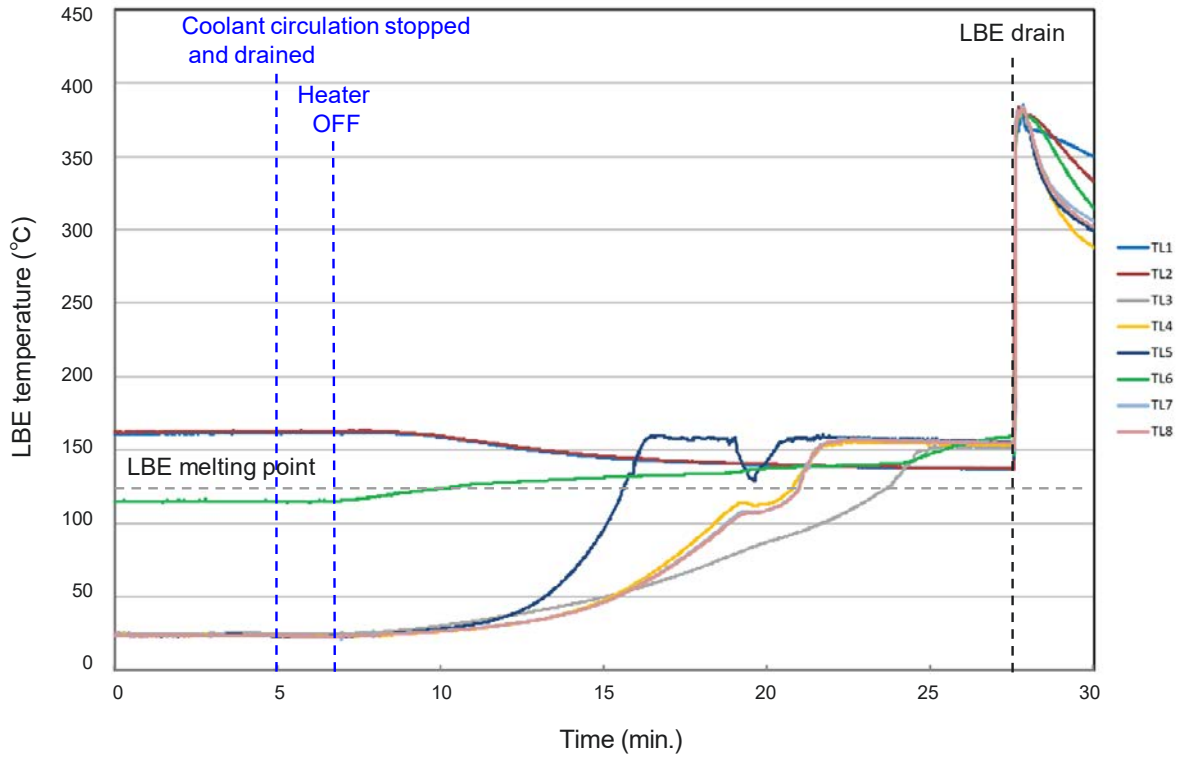


Fig. 4.2.7 Melting behavior of LBE (water-cooling type, 2nd run).

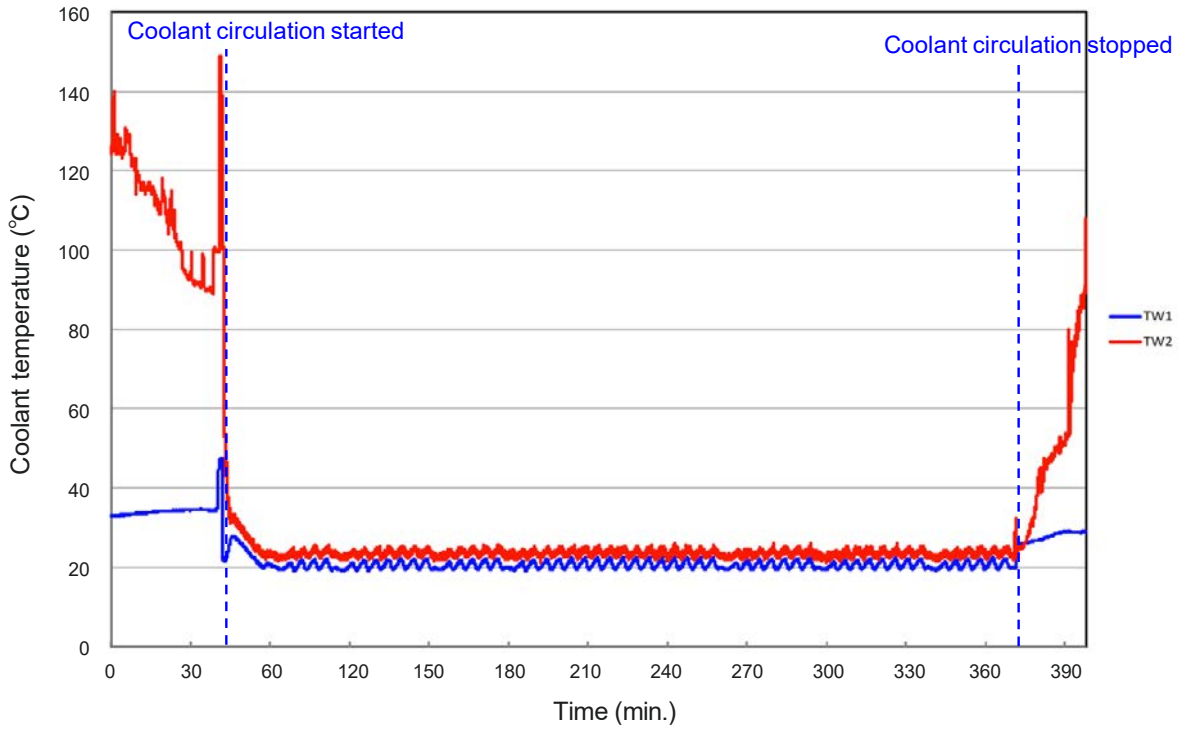


Fig. 4.2.8 Trend graph of coolant temperatures (water-cooling type, 2nd run).

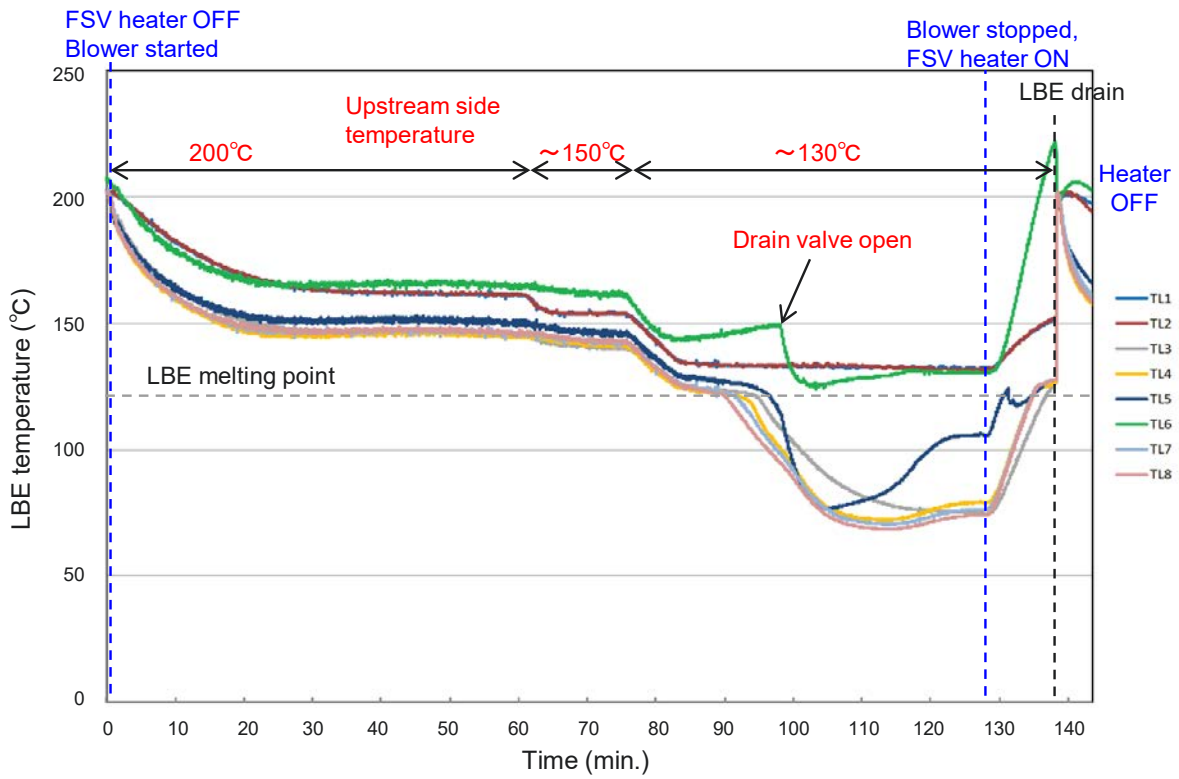


Fig. 4.3.1 Trend graph of LBE temperatures (air-cooling type, 1st run).

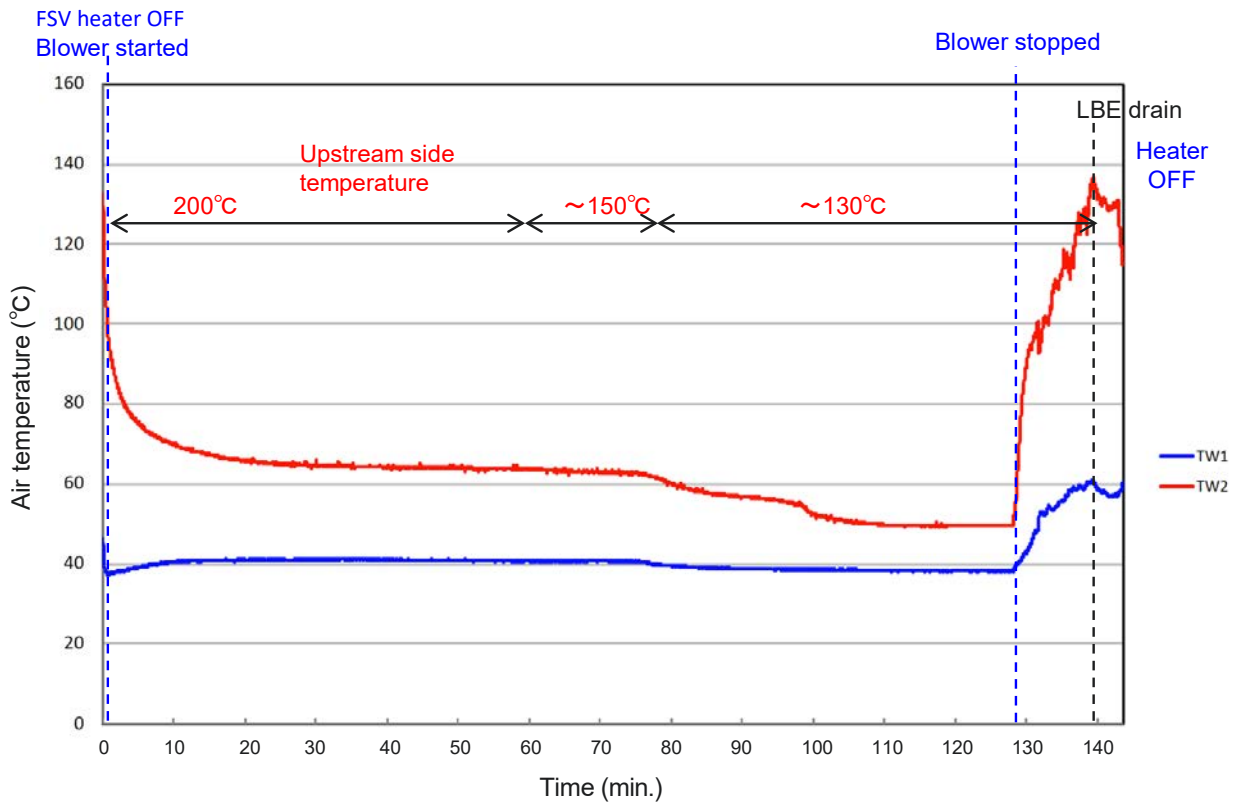


Fig. 4.3.2 Trend graph of air temperatures (air-cooling type, 1st run).

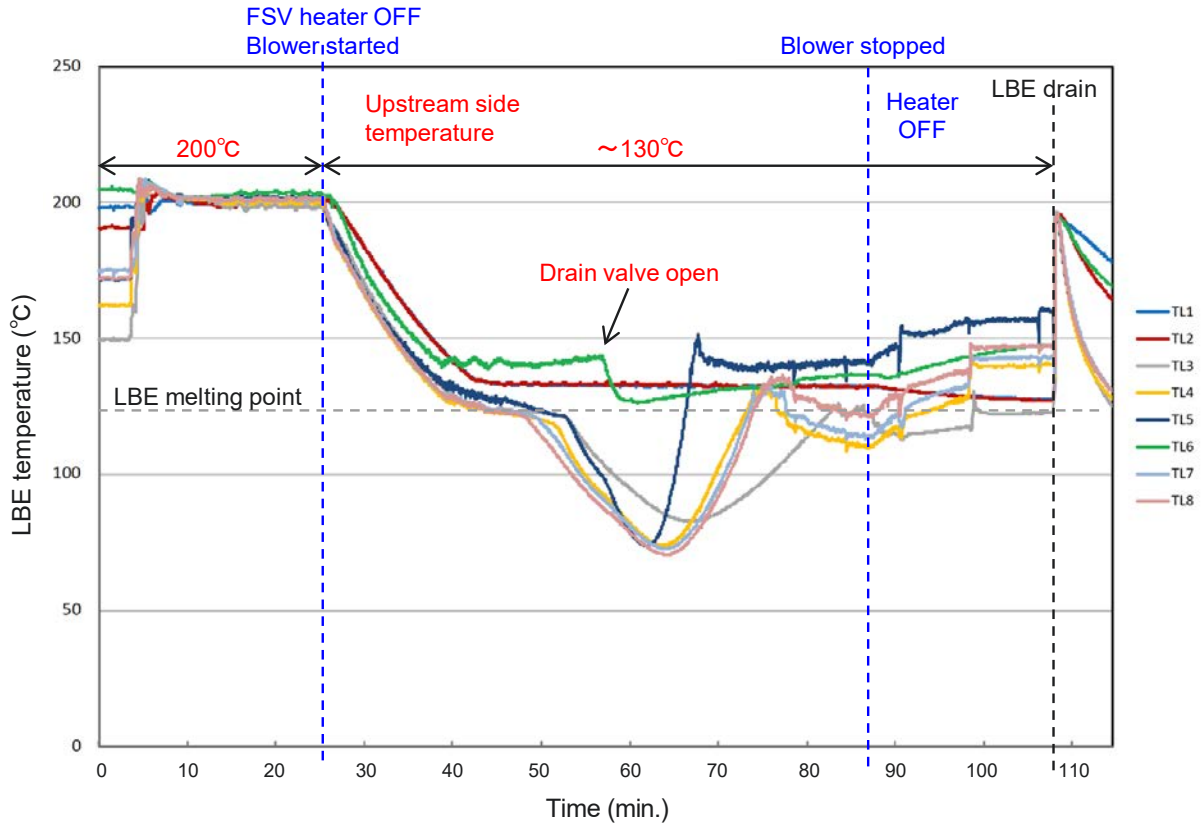


Fig. 4.3.3 Trend graph of LBE temperatures (air-cooling type, 2nd run).

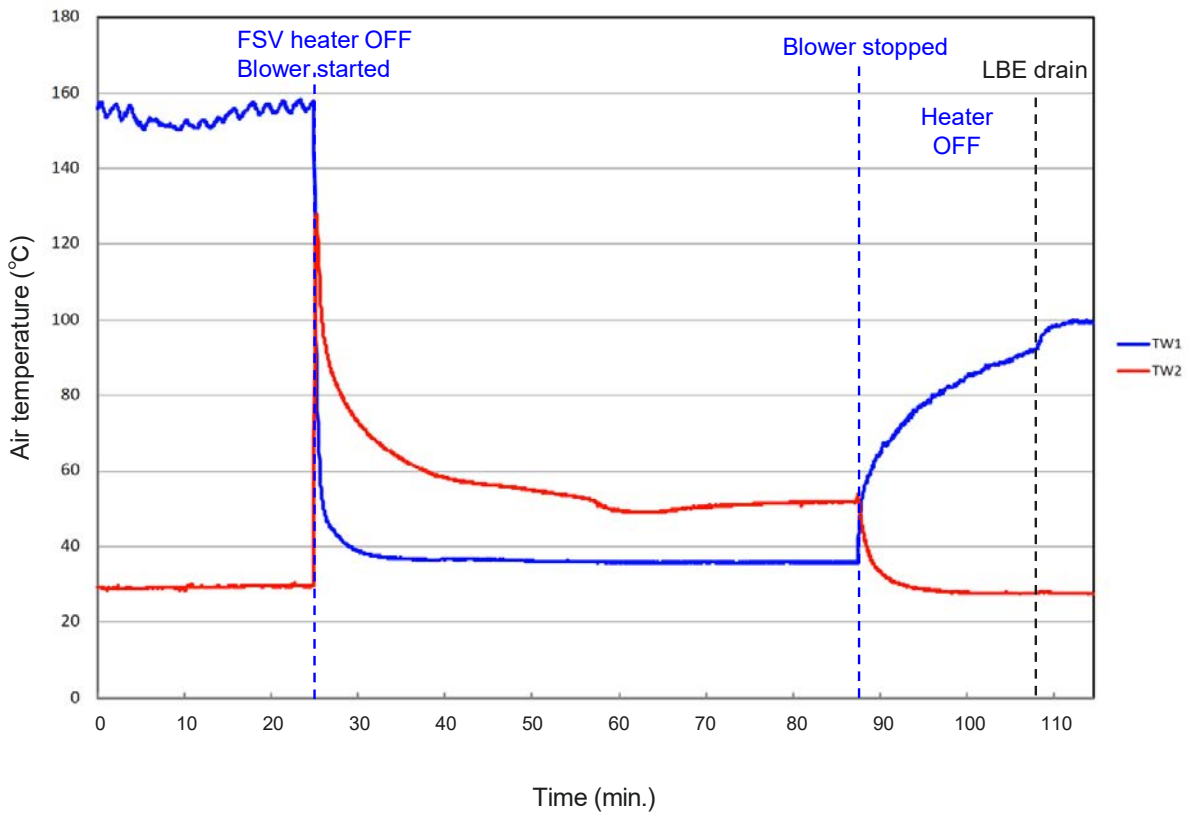


Fig. 4.3.4 Trend graph of air temperatures (air-cooling type, 2nd run).

5. まとめ

LBE の取扱いに関連した技術開発を行うため鉛ビスマス要素技術開発装置を設計、製作し、FSV に関する試験を実施した。結果の概要は以下のとおりである。

・水冷式 FSV 試験

上流側 LBE 温度が 200 °C の時、冷却水循環開始からわずか 2～3 分で FSV として機能し、さらに上流側 LBE 温度を 400 °C まで昇温しても FSV として機能を保持できたことから、本水冷式 FSV 試験体は十分な冷却性能を有するといえる。ドレンまで要する時間は、強制融解の場合約 10 分、自然融解では約 20 分であった。さらに小型化することで融解速度を速められる可能性がある。また、水冷式は複雑な構成、操作となるため、実機設計にあたっては安全側に自動で動作するようにする必要がある。

・空冷式 FSV 試験

上流側 LBE 温度が 200 °C では LBE は凝固せず、130 °C まで降下させる必要があった。この場合、ブロー運転開始から LBE が凝固し、FSV として機能するまでに約 30 分を要した。本空冷式 FSV 試験体の冷却性能は不十分であり、大型化や騒音の増大を避けつつ冷却性能を向上するための設計見直しが必要である。一方、ドレンまで要する時間は強制融解の場合約 10 分、自然融解では約 20 分で、水冷式と同等であった。

以上の通り、鉛ビスマス要素技術開発装置を用いた FSV の機能確認試験を終えた。今後は J-PARC 陽子照射施設の建設が決定し、ターゲットの詳細設計開始前に水冷式、空冷式の選定を行う必要がある。選定された型式について、今回の試験で明らかになった課題を踏まえて詳細設計を行い、改めて FSV の実証試験を行う予定である。

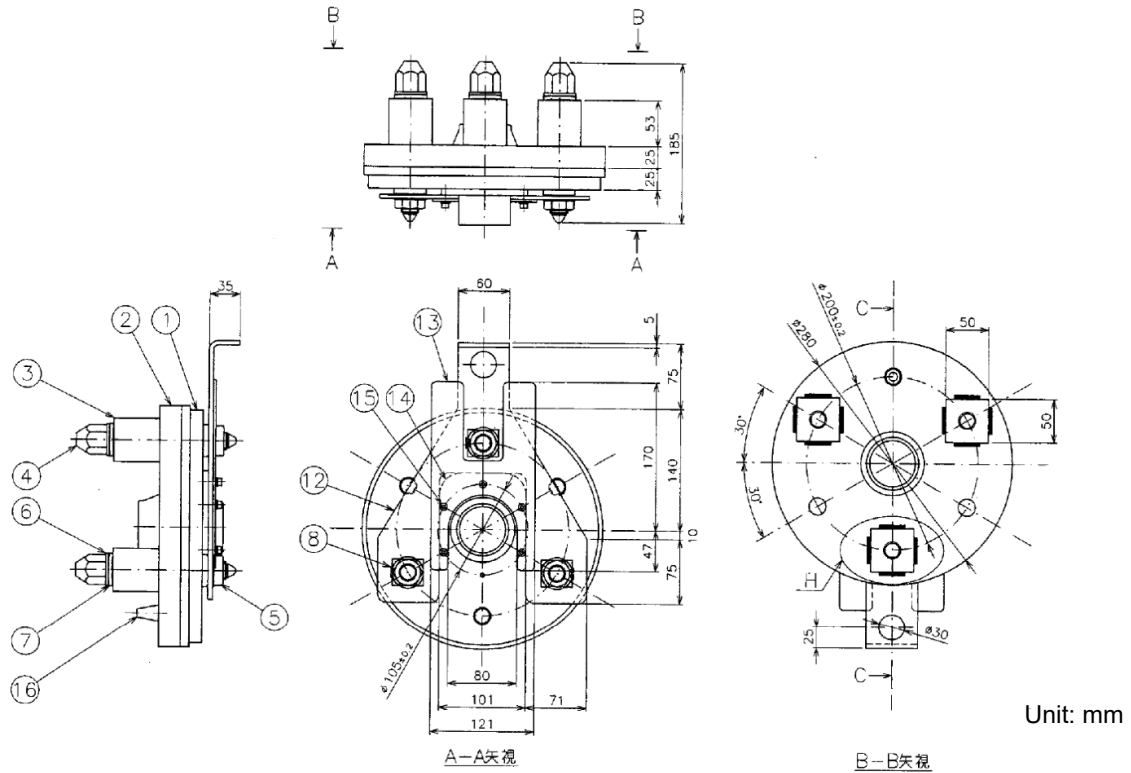
謝辞

鉛ビスマス要素技術開発装置の製作において、装置本体の設計製作並びに現地据付工事をしていただいた助川電気工業株式会社に深く感謝いたします。FSV 試験体の製作において、装置本体の設計製作並びに現地据付工事をしていただいた株式会社アルファ器械に深く感謝いたします。装置の運転開始にあたっては J-PARC センター核変換ディビジョン並びに物質・生命科学ディビジョン中性子源セクションの多くの方々に貴重な助言と協力を頂きました。ここに深く感謝いたします。

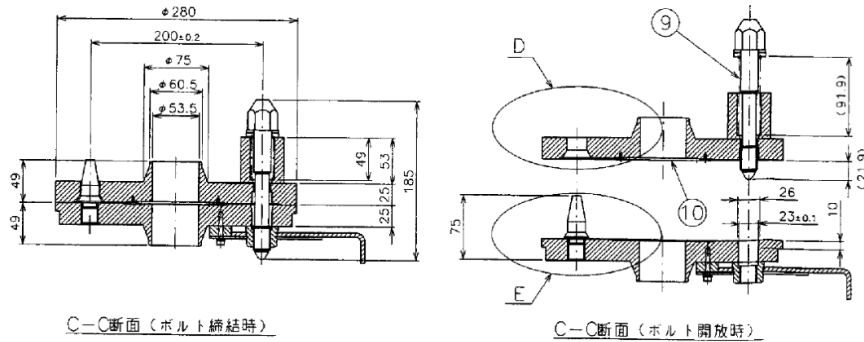
参考文献

- 1) K. Tsujimoto, H. Oigawa, K. Kikuchi, Y. Kurata, M. Mizumoto, T. Sasa, S. Saito, K. Nishihara, M. Umeno, and H. Takei, “Feasibility of Lead-bismuth–Cooled Accelerator-Driven System for Minor-Actinide Transmutation”, Nucl. Technol., Vol. 161, No. 3, (2008), pp. 315-328. <https://doi.org/10.13182/NT08-A3929>
- 2) J-PARC センター核変換ディビジョン, J-PARC 核変換実験施設技術設計書 -ADS ターゲット試験施設 (TEF-T) -, JAEA-Technology 2017-003 (2017), 539 p.
- 3) N. Odaira, S. Saito, “Characterization of mechanical strain induced by lead-bismuth eutectic (LBE) freezing in stainless steel cup”, Heliyon, Vol. 6, No. 2, (2020), e03429. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03429>

付録A 主要な機器の図面

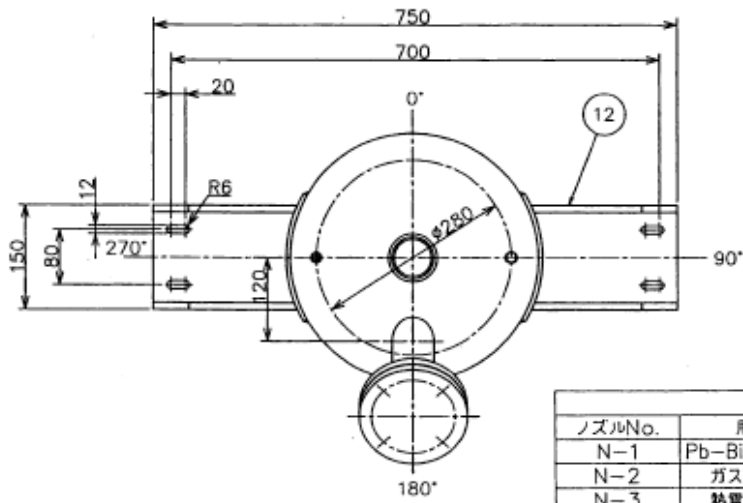


Unit: mm

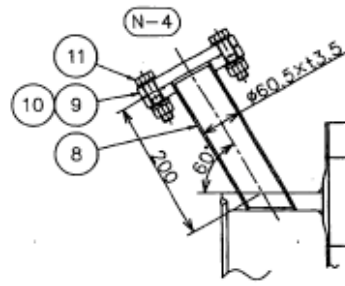
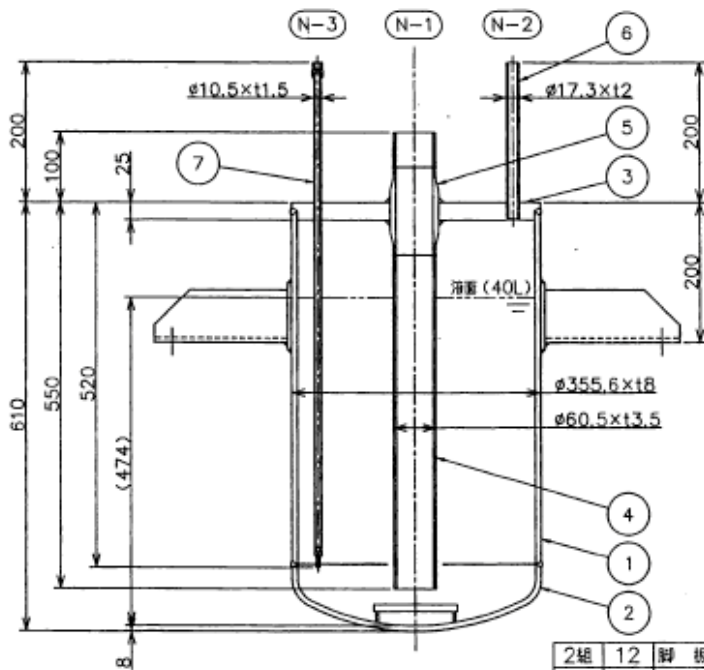


	16	ガイドピン	SUS	1					L75	
	15	ナットリテーナ受け固定ボルト	SUS	5					M5, 平頭金, ばね鋼素材	
	14	ナットリテーナ受けガイド (50A)	SUS	1						
	13	ナットリテーナ受け (50A)	SUS	1						
	12	ナットリテーナ (50A)	SUS	1					15	
	11	皿子ねじ	SUS304	4					M3, 皿子ねじ	
	10	ガスケットリテーナ (50A)	SUS304	1						
	9	コイルばね	SUS304WFB	3					外径2.5, 外径27.5, 線径0.14, 自由長38, ばね定数	
	8	軸用スナップリング	SUS304	3					φ32	
	7	皿ばね座金	SUS304	3					M20	
	6	平輪金	SUS304	3					M20	
	5	遮断ナット	SUS304	3					M20	
	4	遮断ボルト (ばね付)	SUS630	3					M20	
	3	反力受け	SUS304	3						
50A-Type1	2	反力受けフランジ	SUS316L	1						
50A-Type1G	1	ガイドピンフランジ	SUS316L	1						
部品	仕様	重量	番号	品名	材料	常備	予備	庫	合計	記
			PARTS	NAME OF PARTS	MATERIAL	WORK	SPARE	庫	TOTAL	事
			NO.			I ()	分	重	重	重
						PER	ONE	()	WEIGHT	NOTES

Fig. A.1 Drawing of the remote flange.



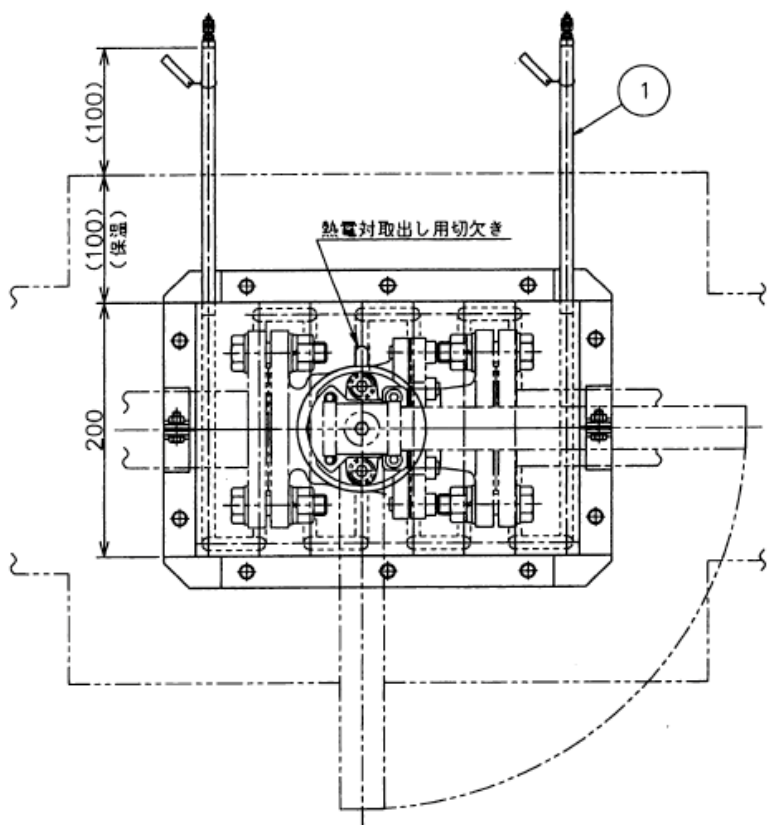
ノズル一覧				
ノズルNo.	用途	材質	ノズル寸法	数量
N-1	Pb-Bi出入口ノズル	SUS316LTP	50A×Sch20S	1
N-2	ガス系ノズル	SUS304TP	10A×Sch20S	1
N-3	熱電対ウエル	SUS316TP	6A×Sch20S	1
N-4	Pb-Bi注入ノズル	SUS316LTP	50A×Sch20S	1



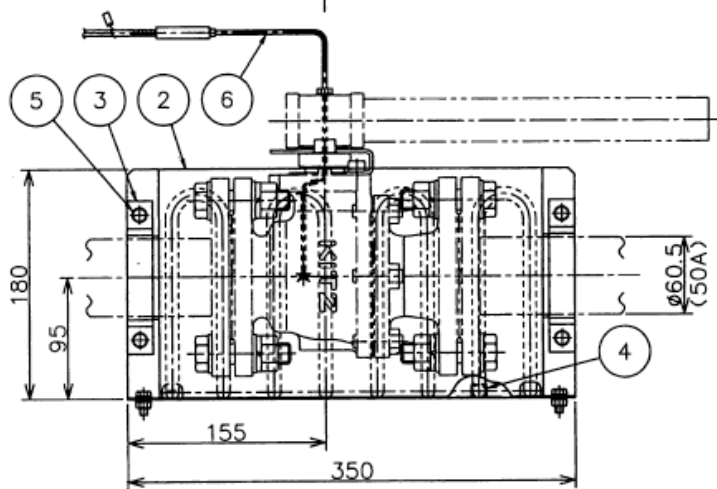
Unit: mm

2組	12	脚板	SUS304		
4組	11	六角ボルト・ナット	SUS	M16×L65	スワ1、平ワ2H
1	10	メタル中空Oリング	SUS321	φ2.4×10.25×厚φ90	
1組	9	フランジ	SUSF316	50A JS10K FF	Ⓢ
1	8	注入ノズル	SUS316LTP-S	50A×Sch20S	Ⓢ
1	7	熱電対ウエル	SUS316TP-S	6A×Sch20S	Ⓢ
1	6	ガス系ノズル	SUS304TP-S	10A×Sch20S	Ⓢ
1	5	管台	SUS316L		Ⓢ
2	4	出入口ノズル	SUS316LTP-S	50A×Sch20S	Ⓢ
1	3	平板	SUS316L		Ⓢ
1	2	鏡板	SUS316L	t8、10%面型	Ⓢ
1	1	胴	SUS316LTPY	350A×t8	Ⓢ
員数	品番	部品名	材質	寸法・記事	備考

Fig. A.2 Drawing of the drain tank.



Unit: mm



1	6	熱電対	シース: SUS316	$\phi 3.2$	
1式	5	六角ボルト・ナット	SUS	M6	
1式	4	ヒータ止め金具	SUS304	t0.5	
2組	3	固定バンド	SUS304	t3	
1組	2	弁ボックス	SUS304	t0.8	
1	1	ヒータエレメント	シース: SUS304	$\phi 10$	
員数	品番	部 品 名	材 質	寸法・記事	備 考

Fig. A.3 Drawing of the drain valve and box heater.

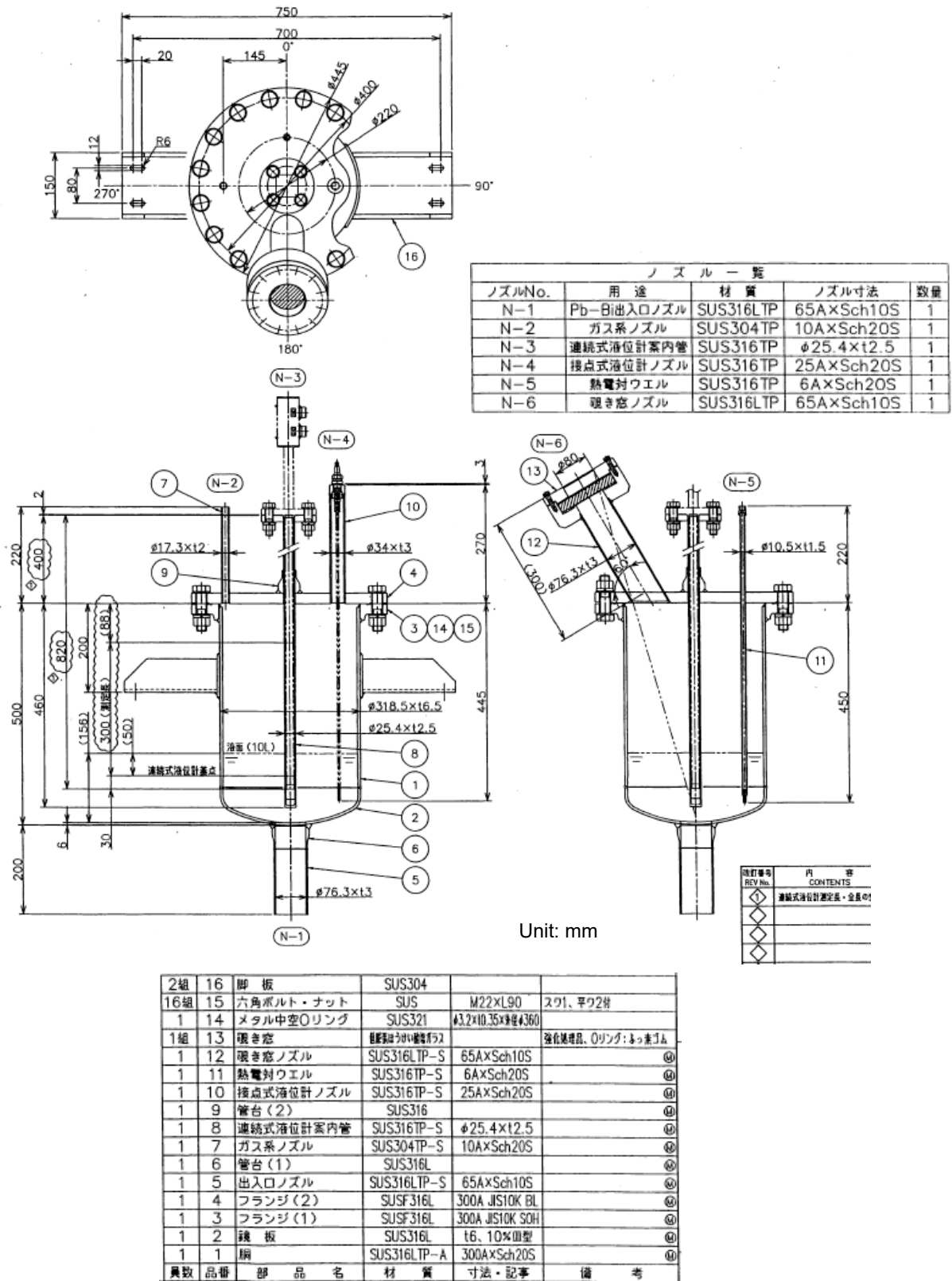


Fig. A.4 Drawing of the expansion tank.

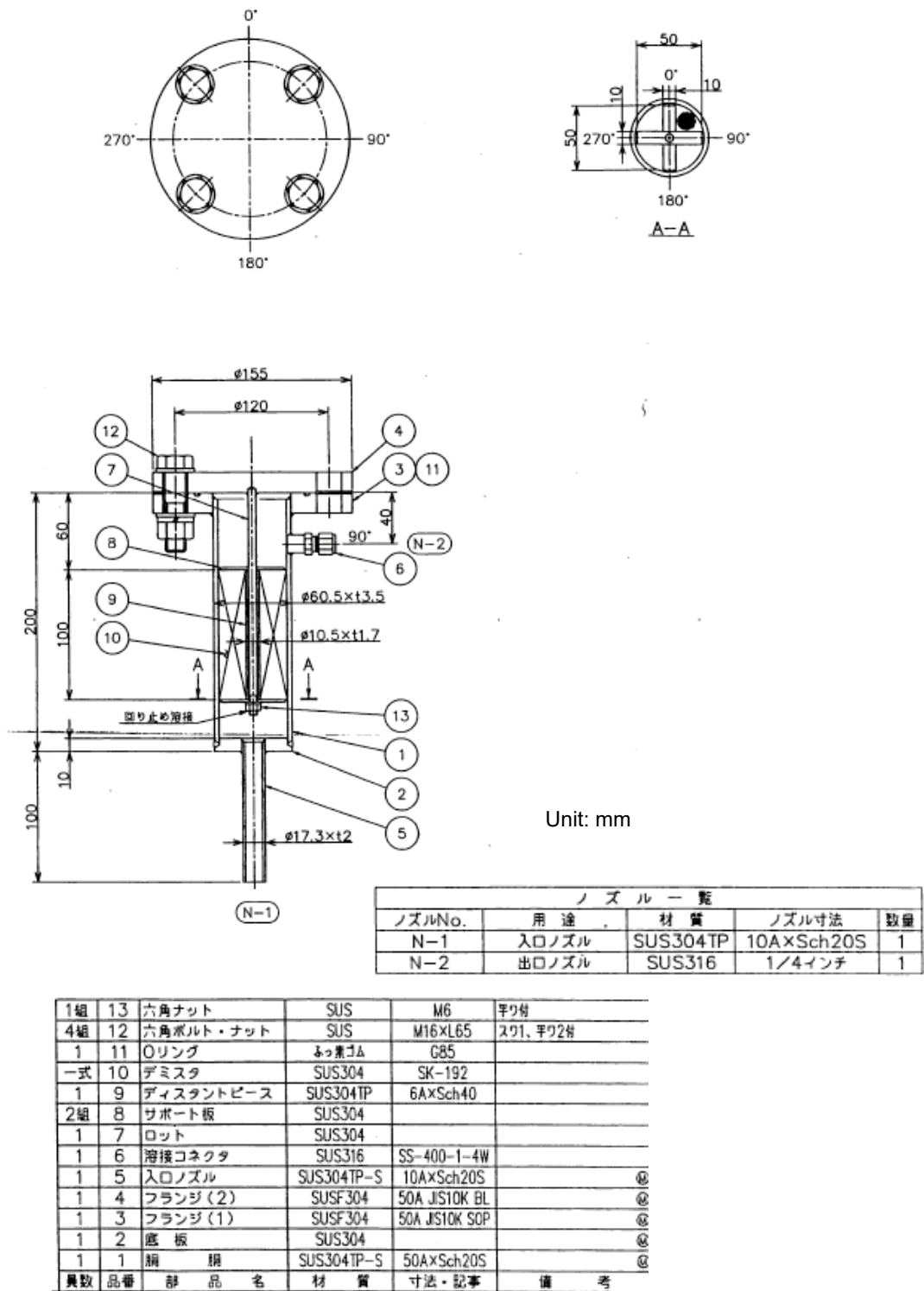
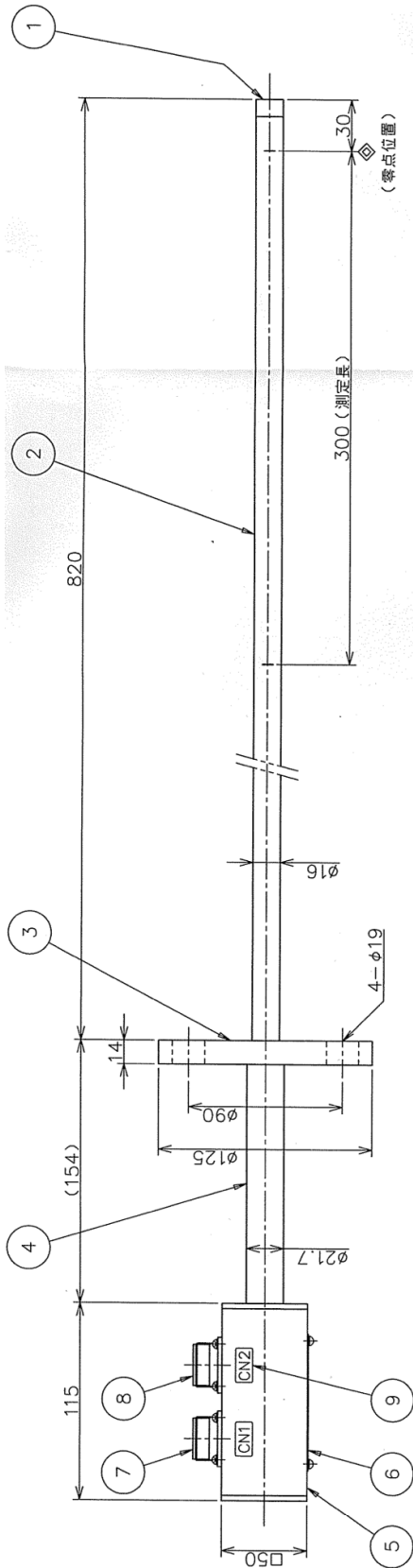
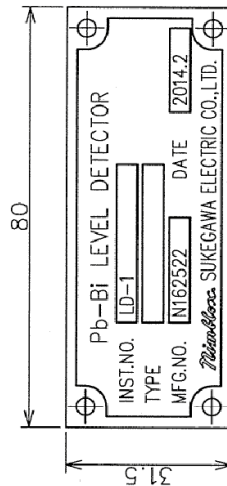


Fig. A.5 Drawing of the vapor trap.



Unit: mm



2	9	コネクタ用銘板	アクリル		
1	8	コネクタ (2次側)	シリコン樹脂	DMS3102A16S-5S DDK	
1	7	コネクタ (1次側)	シリコン樹脂	DMS3102A16S-1P DDK	
1	6	銘板	SUS304		
1	5	コネクタボックス	SUS304		
1	4	ニップル	SUS304		
1	3	フランジ	(SUS316)	JIS 10K 25A	
1	2	保護管	SUS304		
1	1	下部ボス	SUS304		
真数	品番	部品名	材質	図番	備考

Fig. A.6 Drawing of the induction type continuous liquid level meter.

付録 B 運転マニュアル

1.1 【事前準備作業】

No.	確認内容および操作	防護具・工具等	備考
1	ループ構成機器類 設置状況確認 ・各フランジ、配線、カバーガス系統、冷却水系統等の目視確認		
2	大実験室 分電盤 ED-1 NFB 投入 ・要素技術開発装置 100V 系電源 (MCB1) 「ON」 200V 系電源 (MCBA) 「ON」 要素技術開発装置制御盤受電表示灯 (AC100V 系、AC200V 系) 点灯確認 ・FSV 試験体 200V 系電源 (MCBB) 「ON」 FSV 試験体制御盤受電表示灯点灯確認		
3	制御盤 主電源投入 ・要素技術開発装置制御盤 200V 系主電源 MCCBM1 「ON」 予熱ヒーター電源 ELCB1~5,7,8 「ON」 (ELCB6 は使用しない) 100V 系主電源 MCCBM2 「ON」 真空ポンプ電源 ELCB9 「ON」 制御・計測系電源 MCCB1~4 「ON」 タッチパネル、温調等通電確認 ・FSV 試験体制御盤 200V 系主電源 ELB1 「ON」 100V 系主電源 ELB2 「ON」 タッチパネル、温調等通電確認		
4	カバーガス供給準備 ・カバーガス (Ar) ボンベ元弁 「開」 ・圧力調整弁により二次側圧力 「0.25 (MPa)」に調整 ・圧力調整弁 二次側送気弁 「開」		

1.2 【系統内ガス置換】

No.	確認内容および操作	防護具・工具等	備考
1	系統内ガス置換 系統内をアルゴンガスで数回置換する。		
2	カバーガス操作 <ul style="list-style-type: none"> ・ドレンバルブ V1「閉」、V2～V7 各弁「閉」確認。 ・V2、V3「開」。V6「徐々に開」 ・PG2（ドレンタンク圧力）、PG3（膨張タンク圧力）「0.02（MPa）」に調整。 ・V3、V6「閉」 		

1.3 【各部予熱ヒーター起動、昇温】

No.	確認内容および操作	防護具・工具等	備考
1	ヒーター制御系設定値変更 <ul style="list-style-type: none"> ・要素技術開発装置制御盤 前面タッチパネル メイン画面 指示値（PV、赤枠）＝室温程度を確認、設定値（SV、青枠）をタッチし、「200℃」に変更。 ・FV 試験体制御盤 制御盤内部の温調（TMC1～4）の設定上下キーを押し、設定値（SV）を「200℃」に変更する。 		
2	予熱ヒーター起動 <ul style="list-style-type: none"> ・要素技術開発装置制御盤 前面タッチパネル メイン画面 予熱ヒーター下の丸ボタンをタッチし、「入」にする。 ・FSV 試験体制御盤 前面タッチパネル メイン画面で中央の試験体図をタッチし、各操作画面に変更。各ヒーターの「ON」ボタンを押し。 	革手袋等	金属保温材の外壁は熱くなるので、素手で接触しないよう注意すること。昇温時は系統配管等への不用意な接近を禁止する。
3	各部 温度指示値を確認 各部の予熱温度が 200℃ に達していることを確認。		

1.4 【鉛ビスマスの揚液】

No.	確認内容および操作	防護具・工具等	備考
1	<p>ドレンタンク内温度指示値を確認</p> <p>ドレンタンク内の LBE 温度が融点（約 125 °C）以上に達していることを確認。</p>		
2	<p>膨張タンク減圧</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ V2 を「閉」、膨張タンクとドレンタンクを仕切る。 ・ V5、V6、V7 を「開」、ガスをベントする。 ・ V7 を「閉」、真空ポンプ「ON」。 <p>PG3 が「-0.04 (MPa)」に達したら V5、V6 を「閉」、真空ポンプ「OFF」。</p>		
3	<p>ドレンタンク加圧</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ V3、V4 を「開」。 ・ PG2 が「0.2 (MPa)」に達したら V3、V4 を「閉」。 		
4	<p>鉛ビスマスの揚液</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ V1 をゆっくり「開」。揚液が始まる。 ・ V3、V4 を「開」、PG2 が「0.25 (MPa)」程度まで加圧したら V3、V4 を「閉」。 ・ 要素技術開発装置制御盤タッチパネルの「液位」が約 200 mm に達したら V1 「閉」。 	<p>パーティション、SUS 板等による囲いの設置</p>	<p>LBE 揚液後は装置下部への立ち入りを禁止する。</p>
5	<p>ガス圧調整</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ V2 を「開」、膨張タンクとドレンタンクを等圧にする。 ・ V5、V6、V7 を「開」、ガスをベントする。 ・ PG2、PG3 を「0.02 (MPa)」に調整、V5、V6、V7 を「閉」。 		

1.5 【水冷 FSV 試験体凝固・融解試験】

No.	確認内容および操作	防護具・工具等	備考
1	<p>チラー起動</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ FSV 試験体制御盤前面タッチパネルメイン画面で中央の試験体図をタッチし、各操作画面に変更。 ・ 「三方弁循環側」 ボタンを押す。常用ラインバルブ「開」、非常用ラインバルブ「閉」。 ・ チラー本体のバイパスバルブ「全閉」を確認後、チラー本体電源「ON」、戻り側調整バルブ「全開」、循環ラインに冷却水が流れる。 		
2	<p>FSV ヒーターOFF、冷却水供給</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ ヒーター3を「OFF」。 ・ 冷却水温度が設定温度に達したら、タッチパネルの「三方弁供給側」 ボタンを押す。 ・ 流量計を見ながら流量調整バルブを少しずつ「開」、冷却水が FSV に流れる。 ・ はじめは冷却水が沸騰するので流量を調整する。 ・ 沸騰が収まったら、流量調整バルブをさらに「開」、所定の冷却水量に調整する。 	冷却水膨張タンクに囲い設置	沸騰した冷却水の蒸気が膨張タンクより吹き出す恐れがあるため、膨張タンクを覗き込まないこと。
3	<p>FSV 凝固試験</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ FSV 試験体制御盤前面タッチパネルメイン画面で FSV 部の温度、TL3～5,7,8 が LBE の凝固温度（約 125 °C）以下になったら、V1 を「開」。 ・ そのまま 30 分以上保持する。 	革手袋等	V1 のレバーは熱くなっているので注意。
4	<p>昇温</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 50 °C 刻みで各ヒーターの設定値を 200 °C から 350 °C または 400 °C まで変更する。ただしドレンタンクは 250 °C とする。 ・ 所定の温度に達したら 30 分以上保持し、FSV が機能していることを確認する。 		
5	<p>FSV 融解試験</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 350 °C または 400 °C で 30 分以上保持する。 ・ チラー本体の流量調整バルブ「全閉」。 		

<ul style="list-style-type: none"> ・ FSV 試験体制御盤前面タッチパネル 各操作画面 「三方弁循環側」 ボタンを押す。 ・ チラー本体電源 「OFF」。 ・ 冷却水供給ラインの水を FSV バルブ手前のドレンバルブより抜く。 ①自然融解の場合 <ul style="list-style-type: none"> ・ ドレントタンク以外のヒーター、全て 「OFF」。 ・ そのまま LBE が融解してドレンされるのを待つ。 ②強制融解の場合 <ul style="list-style-type: none"> ・ ドレントタンク以外のヒーター、全て 「OFF」。 ・ FSV 部のヒーター3 を 250 °C に設定し、「ON」。 ・ そのまま LBE が融解してドレンされるのを待つ。 ・ LBE が十分ドレンしたら V1 「閉」。 	<p>革手袋等</p> <p>革手袋等</p>	<p>冷却水及びドレンバルブのレバーは熱いので注意。</p> <p>V1 のレバーは熱いので注意。</p>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------

1.6 【空冷 FSV 試験体凝固・融解試験】

No.	確認内容および操作	防護具・工具等	備考
1	<p>ブロー設定</p> <ul style="list-style-type: none"> FSV 試験体制御盤前面タッチパネル メイン画面で中央の試験体図をタッチし、各操作画面に変更。 インバーターの周波数を設定する。 		
2	<p>FSV 凝固試験</p> <ul style="list-style-type: none"> FSV 試験体制御盤前面タッチパネル 各操作画面 ヒーター3を「OFF」。 インバーターの周波数を入力する。 「送風機運転」ボタンを押し、送気開始。 徐々にインバーターの周波数を上げる。 タッチパネル メイン画面で FSV 部の温度、TL3～5,7,8 が LBE の凝固温度（約 125 °C）以下になったら、V1 を「開」。 そのまま 30 分以上保持する。 	革手袋等	<p>空冷 FSV 試験体の排気口から熱くなった空気が排気されるため、不用意に近づかないこと。</p> <p>V1 のレバーは熱くなっているので注意。</p>
3	<p>昇温</p> <ul style="list-style-type: none"> 50 °C 刻みで各ヒーターの設定値を 200 °C から 350 °C または 400 °C まで変更する。ただしドレンタンクは 250 °C とする。 所定の温度に達したら 30 分以上保持し、FSV が機能していることを確認する。 		
4	<p>FSV 融解試験</p> <ul style="list-style-type: none"> 350 °C または 400 °C で 30 分以上保持する。 FSV 試験体制御盤前面タッチパネル 各操作画面 「送風機停止」ボタンを押し、送気停止。 ①自然融解の場合 ドレンタンク以外のヒーター、全て「OFF」。 そのまま LBE が融解してドレンされるのを待つ。 		

	<p>②強制融解の場合</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ドレンタンク以外のヒーター、全て「OFF」。 ・FSV 部のヒーター3 を 250 °C に設定し、「ON」。 ・そのまま LBE が融解してドレンされるのを待つ。 ・LBE が十分ドレンしたら V1 「閉」。 	<p>革手袋等</p>	<p>V1 のレバーは熱くなっているので注意。</p>
--	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------	-----------------------------

1.7 【ヒーター停止】

No.	確認内容および操作	防護具・工具等	備考
1	<p>予熱ヒーター停止</p> <ul style="list-style-type: none"> ・要素技術開発装置制御盤 前面タッチパネル メイン画面 予熱ヒーター下の丸ボタンをタッチし、「切」にする。 ・FSV 試験体制御盤 前面タッチパネル メイン画面で中央の試験体図をタッチし、各操作画面に変更。 各ヒーターの「OFF」ボタンを押す。 		
2	<p>ヒーター制御系設定値変更</p> <ul style="list-style-type: none"> ・要素技術開発装置制御盤 前面タッチパネル メイン画面 設定値 (SV) (青枠) をタッチし、「10 °C」に変更する。 ・FSV 試験体制御盤 制御盤内部の温調 (TMC1~4) の設定上下キーを押し、設定値 (SV) を「10 °C」に変更する。 		
3	<p>系統各部 降温確認</p> <ul style="list-style-type: none"> ・指示値 (PV) = 室温程度を確認 		
4	<p>系統内ガス圧力降圧</p> <ul style="list-style-type: none"> ・V3「閉」確認 ・V5、V7を「開」 ・V6を徐々に「開」、PG3が0.01 (MPa) まで降圧後、V5、V7「閉」 		

1.8 【電源、カバーガス等 停止操作】

No.	確認内容および操作	防護具・工具等	備考
1	カバーガス系統停止操作 <ul style="list-style-type: none"> ・ PG2 及び PG3 0.01 (MPa) 確認 ・ V2～V7 各弁「閉」確認 ・ カバーガス (Ar) ポンベ元弁「閉」 ・ 圧力調整弁 “降圧”側へ調整 ・ 圧力調整弁 二次側送気弁「閉」 		
2	制御盤 主電源遮断 <ul style="list-style-type: none"> ・ 要素技術開発装置制御盤 <ul style="list-style-type: none"> 200V 系主電源 MCCBM1 「OFF」 予熱ヒーター電源 ELCB1～5,7,8 「OFF」 100V 系主電源 MCCBM2 「OFF」 真空ポンプ電源 ELCB9 「OFF」 制御・計測系電源 MCCB1～4 「OFF」 ・ FSV 試験体制御盤 <ul style="list-style-type: none"> 200V 系主電源 ELB1 「OFF」 100V 系主電源 ELB2 「OFF」 		
3	大実験室 分電盤 ED-1 NFB 遮断 <ul style="list-style-type: none"> ・ 要素技術開発装置 <ul style="list-style-type: none"> 100V 系電源 (MCB1) 「OFF」 200V 系電源 (MCBA) 「OFF」 要素技術開発装置制御盤受電表示灯 (AC100V 系、AC200V 系) 消灯確認 ・ FSV 試験体 200V 系電源 (MCBB) 「OFF」 FSV 試験体制御盤受電表示灯消灯確認 		

This is a blank page.

