

JAEA-Technology 2021-035 DOI:10.11484/jaea-technology-2021-035

核破砕標的循環試験装置(IMMORTAL)の開発

Development of Mock-up Test Loop (IMMORTAL) for LBE Spallation Target

大林 寛生 八巻 賢一 吉元 秀光 北 智士 万 涛 佐々 敏信

Hironari OBAYASHI, Kenichi YAMAKI, Hidemitsu YOSHIMOTO, Satoshi KITA Tao WAN 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

C

March 2022

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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。(<u>https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja</u>) 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(<u>https://www.jaea.go.jp</u>) 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 (<u>https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en</u>). 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

© Japan Atomic Energy Agency, 2022

核破砕標的循環試験装置(IMMORTAL)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

大林 寛生、八巻 賢一*1、吉元 秀光*2、北 智士*3、万 涛*4、佐々 敏信

(2021年12月3日受理)

大強度陽子加速器施設(Japan Proton Accelerator Research Complex; J-PARC)では、加速器駆動システム(Accelerator-Driven system; ADS)による核変換技術の実現に資する研究開発を行うため、核変換実験施設(Transmutation Experimental Facility; TEF)の建設を計画している。2つの施設で構成されるTEFの内、ADSターゲット試験施設(TEF-T)では、溶融鉛ビスマス合金(Lead-Bismuth Eutectic alloy; LBE)を核破砕ターゲットおよび冷却材として用いるターゲットシステムを導入して陽子ビームを照射することにより、照射環境下でのLBEとADS構造材料候

補材との共存性等のADS特有の課題に関する研究開発を行う。

冷却材としての側面から見たLBEは、他の液体金属冷却材と同様に伝熱特性に優れ、ナトリ ウムに比べ化学的活性が低く水や空気と接触した際に火災などの事故に繋がる危険性がない。 一方、一般に広く用いられるステンレス鋼等の構造材料に対し腐食性を示す他に、TEF-Tター ゲットでは最大500℃に達する温度域で使用される等の理由から適応する計装や機器が限られ る。このため、LBE用の機器について個別に研究開発や設計を進めてきた。LBEターゲットシ ステムの実現においては、これらの機器を統合して単体の大型装置として運用した際の機能や 性能評価が重要である。本報告書では、LBEターゲットの一次冷却系および二次冷却系の実証 試験の他、LBE用機器や計装の性能評価、遠隔によるメンテナンスを考慮した際の機器配置に 関する課題抽出、さらに将来的にTEF-T施設で行う照射後試験に向けた非照射サンプルの供給 を目的とした実規模試験ループである核破砕標的循環試験装置(Integrated Multi-functional MOckup for TEF-T Real-scale TArget Loop; IMMORTAL)の概要について報告する。

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

*1 株式会社 NAT

- *2 株式会社サンユテクノスプラントエンジニアズ
- *3 株式会社ジック
- *4 中国科学院近代物理研究所

Development of Mock-up Test Loop (IMMORTAL) for LBE Spallation Target

Hironari OBAYASHI, Kenichi YAMAKI^{*1}, Hidemitsu YOSHIMOTO^{*2}, Satoshi KITA^{*3}, Tao WAN^{*4} 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 3, 2021)

Construction of Transmutation Experimental Facility (TEF) is under planning in Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) program to promote R&Ds on realization of transmutation technology by an accelerator driven system (ADS). As a facility of TEF, ADS Target Test Facility (TEF-T) will provide a spallation target to study target technology and perform post irradiation examination (PIE) of candidate materials of ADS. In ADS, lead-bismuth eutectic (LBE) alloy is used as a spallation target material and a core coolant. As is well known, LBE has corrosive to structural materials hence each component of the target system should provide compatibility with LBE. In addition, instrumentations for LBE are restricted by the target operation condition such as high temperature and irradiation environment. The devices for LBE have been developed individually to achieve the LBE target system. "Integrated Multi-functional MOckup for TEF-T Real-scale TArget Loop, IMMORTAL" was fabricated as a mock-up test loop of the target for the purpose of the integration testing of individually developed devices. This report describes an overview of IMMORTAL and the design of the installed devices.

Keywords: Accelerator-driven System (ADS), Lead-bismuth Eutectic (LBE), Spallation Target, High Temperature, Control of Dissolved Oxygen Concentration, Mock-up Test Loop, IMMORTAL

^{*1} NAT Corporation

^{*2} Sanyutechnos Plant Engineers Corporation

^{*3} Growth Industry Create Corporation

^{*4} Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences

目 次

1.	緒言	1
2.	装置の目的と目標性能	2
	2.1 背景と目的	2
	2.2 設計指針および性能目標	3
	2.2.1 実機 LBE ターゲットの設計指針	3
	2.2.2 IMMORTAL の設計指針と性能目標	4
3.	IMMORTAL 系統構成	9
	3.1 全体概要	9
	3.2 一次冷却系および二次冷却系の運転モード	11
	3.3 一次冷却系(LBE 循環系)の構成機器	14
	3.3.1 ターゲット容器	14
	3.3.2 一次冷却系配管および予熱・保温機構	15
	3.3.3 溶融鉛ビスマス合金(LBE)循環駆動用ポンプ	17
	3.3.4 加熱器	18
	3.3.5 熱交換器	19
	3.3.6 流量計測用配管	22
	3.3.7 膨張タンク	24
	3.3.8 ドレンタンク	25
	3.3.9 ドレン弁	26
	3.3.10 フィルターーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーー	27
	3.4 二次冷却系(加圧水循環系)の構成機器	38
	3.4.1 二次冷却系配管および予熱・保温機構	38
	3.4.2 加圧水循環駆動用ポンプ	39
	3.4.3 二次/三次熱交換器	39
	3.4.4 バッファタンク	40
	3.4.5 仕切弁	40
	3.4.6 加圧ガス供給系	41
	3.5 三次冷却系(チラー水循環系)の構成機器	47
	3.5.1 三次冷却系配管	47
	3.5.2 冷却用大型水冷チラー	47
	3.5.3 流量調整用バイパス弁	47
	3.6 カバーガス給排気系および酸素濃度制御系機器	50
	3.6.1 カバーガス給排気系	50
	3.6.2 ベーパトラップ	50
	3.6.3 酸素濃度制御系	51

3.7 計装機器	54
3.7.1 一次冷却系(LBE 循環系)の計装機器	54
3.7.2 二次冷却系(加圧水循環系)の計装機器	57
3.7.3 三次冷却系(チラー水循環系)の計装機器	58
3.8 データ収録・監視	62
4. 総括	65
謝辞	66
参考文献	66

Contents

1.	Introduction	1
2.	Purpose and target performance	2
	2.1 Background and purpose	2
	2.2 Design criteria and target performance	3
	2.2.1 Design criteria of LBE spallation target system of TEF-T	3
	2.2.2 Design criteria and target performance of IMMORTAL	4
3.	System configuration of IMMORTAL	9
	3.1 Overview	9
	3.2 Operation mode of primary and secondary system	
	3.3 Primary (Lead-bismuth eutectic alloy; LBE) cooling system	
	3.3.1 Testing mock-up of target vessel	
	3.3.2 System piping and heater for LBE cooling system	
	3.3.3 LBE circulation pump	
	3.3.4 Modular heater	
	3.3.5 Heat exchanger	19
	3.3.6 Measurement pipe for flow monitor	22
	3.3.7 Expansion tank	24
	3.3.8 Drain tank	25
	3.3.9 Drain valve	26
	3.3.10 Filter	27
	3.4 Secondary (Pressurized water) cooling system	
	3.4.1 System piping and heater for pressurized water cooling system	
	3.4.2 Pressurized water circulation pump	
	3.4.3 Secondary heat exchanger	39
	3.4.4 Buffer tank	40
	3.4.5 Gate valve	40
	3.4.6 Pressurized gas supply system	
	3.5 Third (Water) circulation system	47
	3.5.1 System piping for water cooling system	47
	3.5.2 Large-sized chiller unit	47
	3.5.3 Flow regulating valve	47
	3.6 Cover gas supply/exhaust system and control system of oxygen concentration	50
	3.6.1 Cover gas supply/exhaust system	50
	3.6.2 Vapor trap	50
	3.6.3 Control system of oxygen concentration	51
	3.7 Instrumentations	

	3.7.1 Instrumentations for LBE cooling system	54
	3.7.2 Instrumentations for pressurized water cooling system	57
	3.7.3 Instrumentations for water cooling system	58
	3.8 Data acquisition and monitoring system	62
4.	Concluding remarks	65
Ac	knowledgement	66
Re	ferences	66

表リスト

Table 2.1 C	Comparison of environmental conditions for material samples6
Table 2.2-1	Specifications of primary system and secondary system of the LBE spallation target
system	7
Table 2.2-2	Design specifications of IMMORTAL8
Table 3.3-1	Specifications of prototypical mock-up of LBE target vessel29
Table 3.3-2	Specifications of packaged heater 30
Table 3.3-3	Specifications of circulation pump for primary cooling system (Electromagnetic pump) 31
Table 3.3-4	Specifications of modular heater (MH) 32
Table 3.3-5	Specifications of primary heat exchanger (PHX) 33
Table 3.3-6	Specifications of expansion tank 35
Table 3.3-7	Specifications of drain tank 36
Table 3.4-1	Specifications of circulation pump for secondary cooling system (Canned motor pump) 43
Table 3.4-2	Specifications of secondary heat exchanger 44
Table 3.4-3	Specifications of buffer tank 45

図リスト

Fig. 2.2-1	Schematic view of the LBE spallation target system	-7
Fig. 3.1-1	Flow diagram of each cooling system of IMMORTAL	10
Fig. 3.2-1	Operation procedures of primary system and secondary system of IMMORTAL	13
Fig. 3.3-1	Schematic drawing of prototypical mock-up of LBE target vessel	29
Fig. 3.3-2	Schematic drawing of packaged heater	30
Fig. 3.3-3	Schematic drawing of circulation pump for primary cooling system (Electromagnetic pum	p)
		31
Fig. 3.3-4	Schematic drawing of modular heater (MH)	32
Fig. 3.3-5	Schematic drawing of primary heat exchanger (PHX)	33
Fig. 3.3-6 ((a) Schematic drawing of measurement section for immersion plug type	34
Fig. 3.3-6 ((b) Schematic drawing of measurement section for non-contact type	34
Fig. 3.3-7	Schematic drawing of expansion tank	35
Fig. 3.3-8	Schematic drawing of drain tank	36
Fig. 3.3-9	Schematic drawing of filter	37
Fig. 3.4-1	Flow diagram of secondary cooling system	42
Fig. 3.4-2	Schematic drawing of circulation pump for secondary cooling system (Canned motor pump	p)
		43
Fig. 3.4-3	Schematic drawing of secondary heat exchanger	44

Fig. 3.4-4	Schematic drawing of buffer tank for secondary cooling system	45
Fig. 3.4-5	5 Diagram of pressurized gas supply system	46
Fig. 3.5-1	Diagram of third cooling system	49
Fig. 3.5-2	2 Photograph of exterior of water chiller	49
Fig. 3.6-1	Diagram of cover gas supply/exhaust system	52
Fig. 3.6-2	2 Schematic drawing of vapor trap	52
Fig. 3.6-3	3 Overall diagram of oxygen concentration control system	53
Fig. 3.7-1	(a) Schematic drawing of continuous liquid level gauge	60
Fig. 3.7-1	(b) Schematic drawing of contact type of liquid level gauge	60
Fig. 3.7-2	2 Typical measurement configuration of propagation time difference method	60
Fig. 3.7-3	Appearance photograph and schematic drawing of oxygen sensor for LBE	61
Fig. 3.7-4	Photograph of flowmeter for secondary cooling system	61
Fig. 3.8-1	Main control window of IMMORTAL	63
Fig. 3.8-2	2 Setting window of heater control	64

1. 緒言

日本原子力研究開発機構(Japan Atomic Energy Agency; JAEA)では、使用済み核燃料に含ま れ、人体に対する有害度や長寿命で環境へ与える負荷が大きい高レベル放射性廃棄物に含まれ る対象の核種を分離し、別の核種に変換することで地層へ処分する際の環境負荷の低減を目的 とした分離・変換技術開発の一環として、加速器駆動システム(Accelerator-driven System; ADS) の研究開発を行っている。ADSでは、加速器と核破砕材料(ターゲット材)および冷却材とし て溶融鉛ビスマス合金(Lead-Bismuth Eutectic alloy; LBE)を用いたタンク型の未臨界炉を組み 合わせて炉側の核破砕標的、すなわちターゲット材であるLBEに対し大強度の高エネルギー陽 子ビームを入射させることで、発生した中性子による原子核反応を利用して対象核種を短寿命 の物質に変換する。加速器と炉心の境界として機能するビーム窓は、鋼材に対し腐食性を持つ LBEの流動場に晒される他、核破砕反応による発熱に伴い熱応力が生じることに加えて、陽子 ビームの通過および核破砕反応により発生した中性子の照射により損傷を受ける。このため、 ビーム窓の構造的健全性の確保が ADS の実現における重要な課題のひとつである。ビーム窓を はじめとした ADS に導入する構成機器の候補材を対象として、ループ試験装置を用いた高温 LBE 流動条件下での腐食試験がこれまで行われてきているが、高温、腐食性流体、陽子・中性 子照射などの複数の要素が絡む環境での材料の健全性には未解明な点が多い。

このため、大強度陽子加速器施設(Japan Proton Accelerator Research Complex; J-PARC)では、 異なる 2 つの施設で構成される核変換実験施設(Transmutation Experimental Facility; TEF)(Fig. 1-1)の内、ADS ターゲット試験施設(TEF-T)の実現に向けた検討を行ってきた。TEF-T では、 ADS と同様にターゲット材および一次系冷却材として LBE を用いた核破砕ターゲットシステ ムを設置し、実際の ADS における環境(高温、LBE 流動下、陽子/中性子照射場)を模擬した ADS 候補材料の照射試験を計画している。当該のターゲットシステムでは、照射サンプルを装 荷した容器(ターゲット容器)に対して 400 MeV / 250 kW のパルス陽子ビーム(繰り返し周波 数:25 Hz、パルス幅:500 µs、最大電流密度:30 µA/cm²(ガウス分布))を照射する。この他、 陽子・中性子が通過するビーム窓の照射損傷特性、LBE 核破砕ターゲットの制御・運転特性を 把握するための試験も併せて計画している。

本報告書では、LBE 核破砕ターゲットシステムの実現に向けた取り組みの一環として、一次 /二次冷却系の系統実証試験の他、LBE 用機器・計装の性能評価、施設での遠隔保守に向けた機 器配置に関する課題抽出、TEF-T 施設で将来的な実施を計画している ADS 候補材料の照射後試 験において比較対象となる非照射サンプルの供給を目的とし、実規模試験ループとして設置し た核破砕標的循環試験装置(Integrated Multi-functional MOckup for TEF-T Real-scale TArget Loop; IMMORTAL)の概要について報告する。

2. 装置の目的と目標性能

2.1 背景と目的

ADS および TEF-T で用いる LBE は、鉛(44.5%) とビスマス(55.5%) からなる共晶合金で ある。融点は、合金を構成する鉛(327.55℃)、ビスマス(271.45℃)と比べて約125℃と低く、 高速炉の冷却材として検討が進められているナトリウム(97.79℃)に近しい値を持つ¹⁾。この ため、ナトリウム冷却型高速炉の研究開発で培われた技術・知見を応用できるとともに、類似 のヒートバランスを想定して炉心の設計検討を行うことができる。また、一般的な液体冷却材 である水と比べ熱伝導率が 10 倍以上高く、他の液体金属冷却材と同様に除熱冷媒として優れる。 沸点は1670℃であり、鉄鋼材の融点より高く、液体で使用できる温度範囲が広いことも有用な 特長である。このため、炉内で冷媒の蒸発が生じ、冷却能力を大幅に損なうことや局所的な発 熱を誘発する可能性が低い。また、ナトリウムやナトリウム合金、リチウムのようなアルカリ 金属に比べて化学的活性が低く、仮に水や空気と接触したとしても火災の発生に繋がるような 急激な反応を生じることがない。このため、中間的な熱交換器を設けることなく、伝熱面を介 して直接水または加圧水による冷却を行うことが可能である。加えて、系統保守の側面ではメ ンテナンス時に機器周囲の雰囲気を不活性ガスで置換することが必須ではない。核破砕材料と しての性質においても、LBE を構成する鉛、ビスマス共に重金属に分類されており、多くの核 子を有することから、高エネルギー陽子の入射により誘発される核破砕反応で生じる中性子の 生成量が多い点、中性子を減速させる度合が少ない点等の核変換炉に寄与する利点を持つ。

一方、光学的に不透明であることに加え、LBE はその物理的特徴から流れが乱れやすく、か つ流れの乱れが減衰しにくいため、循環流路内部で複雑な流れ場を形成する。また、JAEA が 提案する ADS ならびに TEF-T¹における LBE 核破砕ターゲットシステムでは、高い温度条件 (250~500℃) での使用を計画しており、適用できる計装が限られる。加えて、450℃を超える 温度条件で鋼材に対して強い腐食性を示すため、系統機器の設計において LBE と構造材との共 存性を考慮する必要がある。しかしながら、高温かつ流動下でのLBE による鋼材の腐食挙動に は未知な点が多い。このような性質を持つ LBE の取り扱い技術として、これまで個別に計装や 機器の研究開発が行われてきた。研究開発段階では、機器単体の性能評価が主軸であり他の機 器からの影響を極力排除したある意味で理想条件を基にした検討が行われる。一方、多数の計 装と機器で構成されるターゲットシステムの実現においては、一体化したひとつの大型装置と して運用した際の性能確認・評価が必要である。また、TEF-T では、ターゲット容器をはじめ とした激しい損耗が予想される一部の系統機器や計装は1年毎の交換を計画している。このた め、TEF-T では J-PARC 物質・生命科学実験施設 (Materials and Life Science Experimental Facility; MLF)における水銀ターゲットでの実績を参考として、ターゲットシステムの一次(LBE)冷 却系を稼働台車上に積載し、ビーム運転後に照射位置から作業エリア内に引き出して点検保守 を実施することを前提とした設計を進めている。ビーム運転後の系統機器は内部に残留する微 量の LBE を含めて陽子/中性子照射により放射化するため、作業者を保護する観点からマスタ ースレーブマニプレータ (MSM) やパワーマニプレータ (PM)、クレーン等を利用した遠隔操 作により保守作業を行う²⁾。遠隔操作では人の手による細かな作業が不可能となるため、MSM 等のサイズや可動範囲、必要治具の形状等により、必要となる作業領域を予め考慮した上で機器や計装を配置した設計を行う必要がある。さらに、将来的に TEF-T が実現して本格運転が開始された場合には、ADS 候補構造材の照射後サンプルを用いた材料試験を計画しており、陽子/中性子照射の影響を直接的に比較検証するには、非照射下で TEF-T においてターゲットを運用する際の環境と同等の条件(Table 2.1 参照)で得た比較用サンプルが必要である。

以上の LBE 核破砕ターゲットシステム(将来計画:以下、実機 LBE ターゲットと記載)の 実現における課題に着目し、実規模での模擬試験装置として IMMORTAL を製作した。本装置 製作の目的は以下の通りである。

①LBE ターゲットシステムの一次/二次冷却系の実証試験および実規模 LBE 循環系の特性評価 ②LBE 用機器および計装の統合機能試験および性能評価

③遠隔操作を想定した機器の配置および課題抽出

④照射後試験における比較用非照射サンプルの供給(将来計画)

2.2 設計指針および性能目標

2.2.1 実機 LBE ターゲットの設計指針

Fig. 2.2-1 に台車上に搭載した実機 LBE ターゲットの概略図、Table 2.2-1 に主要諸元を示す。 また、以下に各冷却系の主要構成機器とそれぞれの機能を示す。

実機一次冷却系の主要構成機器および各機器の機能

1) ターゲット容器:陽子ビームの受入箇所、候補構造材試料の格納・保持

- 2) 系統配管および予熱・保温機構:LBE 循環系を構成する主流路
- 3) 循環駆動用ポンプ:LBE の循環駆動源
- 4) 加熱器:ターゲット容器へ輸送する LBE の温度調節
- 5) 熱交換器(一次側):ターゲット容器内で生じた発熱を二次冷却系へ排出するための機器
- 6) 流量計測用配管:流量計の設置・流量監視
- 7) 膨張タンク:熱膨張および熱収縮による LBE の体積変化量を吸収するための機器
- 8) ドレンタンク: 点検保守および緊急時等における LBE の収容、保管
- 9) ドレン弁:LBE 循環時に循環流路とドレンタンクを縁切りするための機器
- 10) フィルタ: 系内に生じた不純物の除去

11) その他計装および附帯設備:温度、流量、溶存酸素濃度等の運転監視に必要となる計装お よびガス系設備等

実機二次冷却系の主要構成機器および各機器の機能

- a) 系統配管および予熱・保温機構:加圧水系を構成する主流路
- b) 加圧水循環駆動用ポンプ:加圧水の循環駆動源
- c) 熱交換器(二次側):一次冷却系から排出される熱を受領する機器
- d) 二次/三次熱交換器:熱交換器で受領した熱を建屋附帯の冷却設備(三次)へ排出する機器

e) バッファタンク:熱膨張および熱収縮による加圧水の体積変化量の吸収およびガス添加により加圧水を所定の圧力に加圧するための機器

f) ドレンタンク: 点検保守および緊急時等における加圧水の収容、保管

g) ドレン弁:加圧水循環時に循環系とドレンタンクを縁切りする機器

h) その他計装および附帯設備:温度、流量等の運転監視に必要となる計装および加圧ガス添加 設備等

複数箇所の状態監視が必須である温度計測用センサ、LBE 中の溶存酸素濃度を計測する酸素 センサを除き、一次冷却系および二次冷却系の構成機器は 100%容量を 1 基設置し、予備機を 設置しない。一次系の主要材質は材料の調達性およびコストの面から SUS316 を採用した。ド レンタンクに格納した LBE は、運転前にドレンタンク側と膨張タンク側のガス圧力差により系 統内に揚液・充填し、電磁ポンプ(EMP)により駆動する。実機 LBE ターゲットのビーム運転 時には、システムの先端に設置されたターゲット容器に対して陽子ビームが入射され、核破砕 反応に伴い LBE 中に 200 kW の発熱が生じる。ターゲット容器の内、陽子ビームが通過する箇 所は、最も高い熱応力が負荷される部位であることから、450℃以上の温度条件で運転する際に は容器材質をT91に変更する計画である。また、定格運転時のターゲット容器の内部では局所 的に LBE 温度が最大 500℃近傍に達することが見込まれていることから、LBE から発生する鉛 蒸気、および核破砕反応により LBE 中に生成される放射性物質の拡散を防止するため、一次系 は閉ループ構造を採用している。LBE 中に発生した熱は、膨張タンク下流に設置した熱交換器 を介して二次冷却系へ排出する。2.1 節で述べた遠隔操作による点検保守に必要な作業領域を 確保する必要があることから、台車上に機器を搭載できるスペースに制約が生じる。形状や方 式により異なるが、一般に 200 kW もの熱交換を可能とする熱交換器は巨大化することが想定 されるため、可能な限り縮小化することを目的として二次冷媒には気体冷媒に比べ伝熱性能に 優れる加圧水を採用している。二次冷却系が受けた熱は、TEF-T 建屋が備える常圧水を用いた 大型の冷却設備を介して建屋外へ排出する計画である。

2.2.2 IMMORTAL の設計指針と性能目標

IMMORTAL は、実機 LBE ターゲットの実現に向けた実証試験を行うための実規模試験装置 である。このため、Table 2.2-1 に示す LBE 核破砕ターゲットシステムの諸元を基本とし、これ らを可能な限り実現することを前提として設計を行った。しかしながら、陽子ビーム入射によ る発熱等、現存の技術により完全に再現することが極めて難しい事象については、以下のよう な設計指針とした。

 実機LBEターゲットのターゲット容器は直径150 mm、長さ約550 mmの二重円管型流路 で構成されており、ビーム運転時には深さ方向(陽子ビームが通過する方向)に対して先 端から約150 mm 近傍の範囲で200 kW もの局所発熱がLBE 中に生じる。このような局所 発熱を試験装置である IMMORTAL に設置するターゲット容器試験体で実現することは不 可能であることから、加熱器の機能で代替する方針とした。またさらに、加熱器は本来タ ーゲット容器に流入する LBE 温度を所定の温度に調整するための機器である側面から、 200 kW の出力性能を付与する点において性能が過剰となること、加熱器自体の巨大化を招 く点から、加熱器出力を 200 kW の約 1/3 に相当する 67 kW とした。実機 LBE ターゲット では一次冷却系で生じた熱は最終的に建屋附帯の冷却設備へ排出する計画であるが、 IMMORTAL では三次冷却系として大型の水冷チラーを設置して排熱を行う方針とした。設 置した大型水冷チラーの最大除熱量は 57 kW であり、IMMORTAL 定格運用時の各系統最 大加熱量/除熱量は余裕を見込み 50 kW で各系統間が平衡状態となるように設定した。

- IMMORTAL は非照射環境の試験を行うことを目的としているため、実機 LBE ターゲット においてターゲット容器~一次冷却系の各主要機器の間に位置する遮蔽体およびその間を 繋ぐ接続配管を除外する方針とした。
- 一次冷却系の設計においてその他考慮するべき事項として、系統の局所的な腐食を抑制することを目的として、これまでの経験に基づき系統内の最大流速を2m/s以下とすること、可能な限りエルボ等の屈曲を回避する設計とした。
- IMMORTALの設計/製作を行った当時の実機LBEターゲットの設計において、一次冷却系の各機器の遠隔操作による交換手法として、MLFで導入実績のある65Aサイズの遠隔操作用フランジを採用するとともに、系統配管も65Aサイズに設定していた。IMMORTALでもこれに従い、系統配管のサイズを65Aとするとともに装置各部に遠隔操作フランジを配置して設計・製作を実施した。しかしながら、その後のLBEターゲットに用いる遠隔操作技術の研究開発過程において、以下の事象が確認された。

①最大 500℃に達する高温環境下でフランジ固定ボルトに焼き付きが生じ、脱着が不可能 となる

②長時間系統内に LBE を保持していた際、遠隔操作用フランジの接合部分からの LBE の 漏洩が発生

このため、その後の実機 LBE ターゲットー次冷却系機器の交換手法では、遠隔操作により 系統配管を切断/溶接/検査する方針で別途研究開発を進めている。以降、配管を接合する 際に用いる溶接器の適用配管サイズの制約から、実機配管サイズは 65A から 40A に変更さ れている。IMMORTAL では、製作後の配管サイズ変更は困難である一方、一次冷却系か らの LBE 漏洩を回避する観点から、実機と同様に LBE と接液する箇所に設置していた遠 隔操作用フランジは全て除去し、溶接接合に変更した。

以上の指針に従い、IMMORTAL の設計性能を Table 2.2-2 に示す。

項目	実機 LBE ターゲットサンプル	IMMORTAL サンプル	
照射/非照射	照射(総目標 20 dpa / 3 年) 非照射		
接液媒体	LBE		
媒体循環時間	最大約 15000 時間(年間ビーム運転 5000 時間で換算)		
系統高温部温度	450%		
(サンプル周辺温度)	450 C		
系統低温部温度	350°C		
系統温度差(高温部-低温部)	100°C		
サンプル周辺の流速	最大 2 m/s		
LBE 中溶存酸素濃度の範囲	$1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-5}$ w	rt%	
LBE 中溶存酸素濃度の制御目標	1×10 ⁻⁶ wt%		

 Table 2.1 Comparison of environmental conditions for material samples



Fig. 2.2-1 Schematic view of the LBE spallation target system

Table 2.2-1 Specifications of pr	primary system and secondary	system of the LBE spallation target system
----------------------------------	------------------------------	--

項目	一次冷却系	二次冷却系
冷媒	溶融鉛ビスマス合金(LBE)	加圧水(2.0 MPa 加圧)
冷媒容量	0.29 m ³	0.06 m ³
設計温度	500°C	250°C
使用温度	\sim 500°C	\sim 200°C
設計圧力	0.5 MPa	2.2 MPa
定格時使用圧力(気相部)	0.1 MPa	2.0 MPa
交換熱量	200 kW	200 kW
冷却材最大流量	0.12 m ³ /min	0.5 m ³ /min
冷却材定格流量	0.085 m ³ /min	0.06 m ³ /min
主要部材質	SUS316	SUS316
ターゲット容器材質	SUS316	—
	(450℃以上運転時:T91)	
カバーガス	Ar	N_2
酸素濃度制御ガス	還元ガス:Ar+H ₂	
	酸化ガス:Ar+O ₂	

項目	一次冷却系	二次冷却系	三次冷却系	
<u>》</u>	溶融鉛ビスマス合金	加圧水	水	
行保	(LBE)	(2.0 MPa 加圧)	(大気圧)	
灭结排卍	目しい。			
术杭伸风		ノ悟垣	閉ループ構造	
最大流速の制限	2 m/s 以下	_	—	
	接液部:			
	原則溶接接合		漆垶埣스	
	JIS20K フランジ	浓埣埣스	伯汝汝口	
配管接合部	非接液部:	俗」」な」は HCOOL フランジ	Swaaalah	
	熔接接合	J1520K / / / / /	Swagelok	
	JIS10K, 20K フランジ		ユ ホ ク ク	
	Swagelok			
循環駆動源	電磁ポンプ	機械式ポンプ	機械式ポンプ	
冷媒容量	0.29 m ³	0.06 m ³	0.16 m ³	
設計温度	500°C	250°C	60°C	
使用温度	150~500°C	150∼200°C	~35°C	
設計圧力	0.5 MPa	2.2 MPa	0.5 MPa	
定格時使用圧力	0.1 MDa	2.0 MDa	十句正	
(気相部)				
加執哭出力	最大:67 kW			
2012/11/12	運用:50 kW		—	
執厺拘哭厺拖執昰	設計:200 kW	50 kW	50 kW	
派入沃甸人沃杰里	運用:50 kW	50 K W	50 K W	
冷却材最大流量	0.12 m ³ /min	0.15 m ³ /min	0.4 m ³ /min	
冷却材定格流量	0.085 m ³ /min	0.06 m ³ /min	0.2 m ³ /min	
主要部材質	SUS316	SUS316	SUS316	
ターゲット容器材質	SUS316	—	—	
セバーゼン	A <i>a</i>	N	大気雰囲気	
			(チラータンク内)	
酸素濃産制御ガマ	還元ガス:Ar+H ₂	_		
吸不恢反則仰从八	酸化ガス:Ar+O ₂			

Table 2.2-2 Design specifications of IMMORTAL

3. IMMORTAL 系統構成

3.1 全体概要

Fig. 3.1-1 に IMMORTAL の各系統構成図を示す。2.2.1 項で述べた実機 LBE ターゲットの各 系統間での加熱/除熱の総熱量、遮蔽体および遮蔽体内を貫通する流路配管を除外した上で、 IMMORTAL の一次冷却系を構成する主要機器については2.2.1 項1)~11)に示した機器と同様と し、実機 LBE ターゲットの設計を基にした性能、形状、サイズで設計した。二次冷却系につい ては、同じく 2.2.1 項 a)~h)に示した機器構成と同様とし、装置全体の簡素化の観点から加圧水 を収容する f)ドレンタンクのみ除外し、加圧水ドレン時には減圧後にドレン弁から可搬式の容 器へ排出する設計とした。三次系については大型の水冷チラーを採用し、系統上段からの排熱 をチラー周囲雰囲気へ排出する。

循環駆動源を起点とした各冷媒の流れ方向は以下の通りである。

一次冷却系

- ① 電磁ポンプ(EMP)から吐出された LBE は、EMP 下流の流量計測用配管を経て系統に 設置されたフィルタへ流れる。フィルタ通過後、加熱器が備えるヒータから任意設定の 熱量による加熱を受けた(等温運転の場合は任意の設定温度に調整)後に、ターゲット 容器に流入する。
- ② ターゲット容器を経て膨張タンクに流入し、その後熱交換器で除熱される。
- ③ 熱交換器で除熱後にフィルタを経て EMP へ流入し、再度循環される。

二次冷却系

- 予めバッファタンクの気相部に窒素ガスを添加することで指定の圧力(2.0 MPa)に加圧 された加圧水は、二次系機械式ポンプにより駆動され、ポンプ下流の流量計を経て熱交 換器に流入し、一次系 LBE を冷却する。
- ② 一次冷却系統からの入熱により昇温された加圧水は、熱交換器通過後に二次/三次熱交換器で除熱される。除熱後、二次系ポンプにより再度循環される。

三次冷却系

- チラーポンプにより吐出されたチラー水は系統配管を通じて二次/三次熱交換器に流入し、二次系加圧水を冷却する。
- ② 二次系冷却の際の入熱により昇温されたチラー水は、二次/三次熱交換器後流の系統配管 を通じて再度チラー本体に流入し、本体冷却塔により除熱された後に再度チラー附帯の ポンプにより循環される。



Fig. 3.1-1 Flow diagram of each cooling system of IMMORTAL

3.2 一次冷却系および二次冷却系の運転モード

2.1 節で述べたように、常温で LBE は固化してしまうことから、一次系は系統配管および各 機器に敷設したヒータにより揚液・系統への充填・循環運転前に予め予熱昇温しておく必要が ある。熱交換器の伝熱面を介して一次 LBE を冷却する都合上、同様に LBE の固化を回避する ため二次系加圧水も事前に予熱昇温を行う必要がある。また、実機 LBE ターゲットの模擬運転 試験の際に一次 LBE が到達する最大温度(450℃)を考慮して二次冷却系のヒートバランスを 設定する。Fig. 3.2-1 に IMMORTAL 運転の際に想定する一次冷却系および二次冷却系の温度挙 動を示す。また、以下に本装置の運転開始から運転終了に至るまでの各運転モードについて説 明する。

1. LBE 揚液・充填モード

一次冷却系への揚液・充填時の LBE の固化を回避するため、事前に一次冷却系および二 次冷却系の予熱昇温および温度保持を行う。温度条件は、これまでの経験に基づき融点 (124.7℃)から余裕を見込み 200℃に設定する。二次冷却系内の温度を均一に保つこと、 設定温度以上の LBE が揚液された場合の熱交換器内部の加圧水の沸騰の回避を目的とし て、二次系加圧水は循環しながら徐々に 200℃まで昇温し、温度を保持する。その後、真 空ポンプにより一次冷却系の循環流路側を膨張タンクから-0.1 MPa まで減圧し、ドレンタ ンク内をカバーガスにより 0.2 MPa 加圧した状態でドレンタンクと循環流路側を仕切るド レン弁を開く。ドレン弁開操作後、徐々にドレンタンク内を最大 0.4 MPa まで加圧しなが ら LBE を一次冷却系内に揚液・充填する。膨張タンク内の液位が目標の高さ(150 mm) に到達後、ドレン弁を閉操作し、ドレンタンクおよび循環流路側のカバーガス圧の均圧操 作を行うとともにそれぞれの内圧を 0.03 MPa まで減圧する。

2. 昇温運転モード

実機 LBE ターゲットにおいて、ターゲット容器入口の LBE 温度は 350℃に設定される。 このため、本運転モードでは 200℃の設定温度で揚液した LBE を目標温度(350℃)まで 昇温・温度保持を行う。約 213℃以上で二次系加圧水の沸点に到達するため、二次系流量 の調整と並行して三次冷却系の運転を開始し、熱交換器(この場合 LBE と加圧水)におけ る除熱量が一次系ヒータの総加熱量未満になるように調整しながら二次冷却系の冷却を行 う。

3. 発熱模擬運転モード(ビーム入射による発熱模擬試験)

2. 昇温運転モードで記載した通り、実機 LBE ターゲット容器入口での LBE 温度は 350℃ であり、核破砕反応により発熱、昇温されて約 450℃の温度で熱交換器へ流入する。熱交換器で除熱された LBE は再び 350℃で一次系内を循環し、加熱器で温度調整された後にターゲット容器へ再び流入する。本運転モードでは上記の実機 LBE ターゲット温度環境を疑似的に模擬するため、350℃で循環する LBE を加熱器により 450℃まで加熱・昇温し、実機と同様に熱交換器により 350℃に除熱・降温する。

4. 降温・運転停止モード

運転終了に際し、装置全体温度の降温を行う。熱交換器で過冷却による LBE 固化が生じ ないように注意し、一次冷却系の予熱昇温用ヒータの制御を目標温度(Fig. 3.2-1 中では 200℃)に設定すると共に、加熱器の運転を停止する。二次冷却系一次冷却系の鉛ビスマス を 200℃に設定すると想定したときに、二次冷却系については三次冷却系と共に除熱量を 調整しながら一次系 LBE が目標温度に低下するまで運転を継続する。その後、電磁ポンプ を停止した後に一次系ドレンバルブを開放して LBE をドレンし、一次系予熱昇温ヒータを 停止する。続いて二次冷却系の予熱昇温用ヒータを停止し、三次冷却系により二次系加圧 水を大気圧の沸点以下まで降温した後に二次系ポンプを停止する。最後に、三次系チラー の出入口温度がチラー設定温度に降温されたことを確認してチラーの運転を停止する。



Fig. 3.2-1 Operation procedures of primary system and secondary system of IMMORTAL

3.3 一次冷却系(LBE 循環系)の構成機器

IMMORTAL の一次冷却系は、LBE を冷媒として循環する閉ループで構成される。本節では、 2.2 節で示した一次冷却系の構成機器の内、3.6 節および 3.7 節で示す附帯設備および計装以外 について述べる。

3.3.1 ターゲット容器

ターゲット容器は照射後試験用の候補構造材試料を格納し、LBEの流れに晒される箇所に配置するための機器である。実機LBEターゲットでは、これに加えてビーム窓と称する箇所を介して陽子ビームをLBE中へ透過させ、陽子/中性子照射環境を再現する計画である。設計の詳細¹⁾については割愛し、本報告書では概要について述べる。外形図および仕様をFig. 3.3-1、Table 3.3-1 に示す。また、IMMORTAL で設置するターゲット容器を構成する要素は下記の通りである。

(1)	ターゲット容器本体	1 基	
(2)	予熱・温度保持用ヒータ	1式	
(3)	温度監視・ヒータ制御用熱電対	1本	
(4)	各部保温材(常設型)	1式	(常設型)

ターゲット容器は、外管の内径が 150 mm、内管の内径が 105 mm、全長が 600 mm の二重円 管型構造であり、入口配管と出口配管はそれぞれ外管と内管に接続する設計とした。出入口配 管は、40A sch20S(外径 48.6 mm、肉厚 3 mm)のスケジュール管を採用した。入口配管を介し て流入する LBE は、外環流路を流れた後に端部に位置するビーム窓で合流・反転して内管を経 て出口配管から流出する。過去に実施した陽子ビーム入射時の熱流動解析による予測の結果か らビーム窓の肉厚は2mmとした。実機LBEターゲットおよびIMMORTALで用いるターゲッ ト容器では、中央が窪んだ凹面形状のビーム窓を介して入射する陽子ビームの方向とターゲッ ト容器中心部の LBE の流れ方向が等しくなり、ビームの進行方向と LBE の流れの方向が正対 する ADS 実機と逆向きの流れを形成する。ビーム入射時において、ビームの入射および核破砕 反応により 100 W/cm³ 以上の発熱密度を伴う領域はビーム径方向で約 100 mm、ビーム進行方向 でビーム窓先端から約150 mm までに限定される。このとき、外環流路での発熱密度は最大で 10 W/cm³程度であり、定格流量(0.085 m³/min)で外環流路を流れる LBE の温度に影響しない。 以上のことから、外環流路を流れる LBE が発熱の影響をほとんど無視できる状態で効率的にビ ーム窓を冷却することが可能であると考え、本構造を採用した。実機 LBE ターゲットと同様に、 内管のビーム窓側には構造材試料を装荷する試料ホルダを設置する。ホルダは 46×46×150 (H×W×D, 単位:mm)の矩形断面構造を有し、内部に 44×2×150 または 44×3×150 の板状試料

を合計 8 枚装荷可能な構造とした。また、ホルダの上流側(ビーム窓側)には試料間の流れを 可能な限り均一化することを目的として整流格子(開口率 0.29、厚さ 5 mm)を設置した。容 器材質は運転温度条件(最大 450℃)および材料の調達性を考慮して SUS316 を採用した。将 来的に非照射条件下での試料を作成する際には、450℃以上の条件下での運用が想定されている ため、T91 製の容器を別途製作して運用することを計画している。

実機 LBE ターゲットでは陽子ビーム入射に伴う反応によりターゲット容器および内部の LBE に 200 kW の熱が付与される。容器自体が小さく内挿ヒータ等により当該の発熱を模擬す ることが難しいため、IMMORTAL では発熱模擬を後述の加熱器(3.3.4 項)の機能により代替 する方針とした。このため、ターゲット容器本体および出入口配管の外周には他の機器と同様 に、内部に充填した LBE の固化の回避および試験時の目標温度への昇温を目的としてマイクロ ヒータと温度制御用熱電対の他、常設型の保温材を設置した。

ターゲット容器諸元を以下に示す。

- (1) 冷却材 : 溶融鉛ビスマス共晶合金
- (2) 容器材料 : SUS316L (低温試験時)、T91 (高温試験時)
- (3) 設計圧力 : 0.5 MPa
- (4) 設計温度 : 500℃ (容器)、500℃ (鉛ビスマス)
- (5) 溶融鉛ビスマス入口温度 : 300℃~400℃
- (6) 冷却材流量 : 定格 85 L/min、最大 120 L/min

3.3.2 一次冷却系配管および予熱・保温機構

LBE ターゲットの各構成機器は、メンテナンス時に遠隔操作により脱着することを想定²⁾し ている。また、過去に実施された LBE ループ試験において、配管母材等から溶出した物質がル ープの低温側で析出し、局所に堆積して配管流路の閉塞を引き起こした事象が確認されている。 このため実機 LBE ターゲットの系統配管は、遠隔操作による着脱を可能とする機構を具備する こと、系統配管の径を広げ十分な流路幅を確保することの2点を両立させることを目的として、 MLF において運用実績のある遠隔操作用フランジを適用可能とする配管口径の内、65A サイズ のスケジュール配管を実機 LBE ターゲットの設計当初に採用した。IMMORTAL ではこれに従 い、同じ口径の配管 (65A) を一次系配管に採用している。当該の配管は外径 76.3 mm、肉厚 3 mm である。LBE の最大流量 0.12 m³/min における管内平均流速は約 0.52 m/s であり、Table 2.2-2 に示す設計上の最大流速の制限値を満足する。配管材質は SUS316 を採用した。ドレン後に残 留する LBE を低減するため、過去の LBE ループ運用の経験からドレンタンク側が低くなるよ うに 1/25 の勾配で各構成機器を繋ぐ系統配管を設置し、最下部に設置したフィルタに集約、経 由してドレンラインに接続する。

室温で固体のLBEを昇温・液化して循環冷媒として用いる都合上、配管周辺には予熱昇温の ためマイクロヒータを設置するとともに、昇温後の温度保持や周辺機器類への熱影響の回避を 目的として、ヒータを設置した配管外周を保温材で覆う措置を施した。ヒータ熱量については、 被加熱物を昇温する際に用いる以下の式に基づき算出し、設計した。

 $W_{all} = W_p + W_l + W_{lbe}$ $W_p = 0.2778c_p \rho_p V_p \Delta T/t$

$$W_l = \frac{2\pi(\theta_i - \theta_r)}{\frac{1}{\lambda}ln\frac{d_o}{d_i} + \frac{2}{\alpha d_o}}$$

 $W_{lbe} = 0.2778 c_{lbe} \rho_{lbe} V_{lbe} \Delta T/t$

また、保温材の厚みは、JISA 9501 記載の下記計算式を用いて計算した。

$$d_o ln \frac{d_o}{d_i} = \frac{2\lambda}{\alpha} \cdot \frac{\theta_i - \theta_s}{\theta_s - \theta_r}$$

$$D = \frac{d_o - d_i}{2}$$

ここで、各パラメータは以下のように定められる。

Wall:予熱昇温用ヒータ容量 [W]

- W_p:LBE を除く被加熱構造物(配管等)の昇温に必要となる熱量 [W]
- W1:外周保温材からの拡散放熱量 [W]
- *W*_{lbe}: 内部 LBE の昇温に必要となる熱量 [W]
- *c_p*: 被加熱構造物の比熱 [kJ/kg·K]
- $\rho_p: 被加熱構造物の密度 [kg/m³]$
- *V_p*: 被加熱構造物の体積 [m³]
- *ΔT*:温度差(昇温後目標温度-初期温度) [°C]
- t:昇温時間 [h]
- θ_i :保温材内部温度 [°C]
- θ_r :保温材外雰囲気温度 [℃]
- λ:保温材の熱伝導率 [W/m・K]
- do:保温材の外径 [m]
- di:保温材の内径 [m]
- α:保温材表面での熱伝達率 [W/m²·K]
- c_{lbe}:LBEの比熱 [kJ/kg・K]
- $\rho_{lbe}: LBE の密度 [kg/m³]$
- V_{lbe}:LBEの体積 [m³]
- $\theta_s: 保温材表面温度 [°C]$
- D:保温材厚さ [m]

保温材の内径を系統配管の外径である 76.3 mm、常設型保温材の 350℃における熱伝導率を 公称値 0.035 W/m・K、保温材表面での熱伝達率には、周辺雰囲気で生じた熱対流による熱伝達 率として 12 W/m²・K と仮定した。また、保温材内部温度は系統内 LBE の最大温度である 500℃ とした。保温材外雰囲気温度を 30℃とし、雰囲気温度+40℃(70℃)を保温材表面温度として 設定した場合、保温材厚さは約 66 mm である。このため、一次系配管の保温材厚さは 70 mm に設定した。

これまで述べたように、循環冷媒が LBE であること、および運転温度の面から、系統配管や 各機器は予熱・昇温・温度保持を行うための機能を有する必要がある。一方、実機 LBE ターゲ ットー次系の主要機器の交換作業は遠隔操作による配管の切断/溶接/検査により実施する計画 であり、一般的に用いられるシリカ系の素材を用いた常設型保温材や被加熱物に直接巻き付け て用いるマイクロヒータが使用されている場合は、遠隔操作による当該の作業の実施が極めて 困難となる。このため実機LBE ターゲットでは、保温材と加熱用ヒータをひとつの構造に収め たパッケージ型ヒータを遠隔操作による交換作業を実施する箇所に設置することで対応するこ とを計画している。IMMORTAL では、遠隔操作による交換作業のモックアップ試験は計画し ていないが、性能確認を目的として実機 LBE ターゲットで一年毎の交換を予定しているターゲ ット容器の出入口配管(2ヶ所)、遠隔操作用フランジを閉止上蓋として採用しているフィルタ (2ヶ所)の周囲にパッケージ型ヒータを設置した。外形図を Fig. 3.3-2、仕様概略を Table 3.3-2 にまとめる。パッケージ型ヒータは、鏡面仕上げの外板と内部に積層した金属箔により輻射熱 を反射することで据付対象の保温を行う金属保温材と金属保温材の内側に設置したシースヒー タにより構成される。金属保温材は半円円筒型を2つ組み合わせて使用する分割構造であり、 それぞれの内側にヒータが設置されている。側面に取り付けた蝶番とバックルによって容易に 保温材とヒータを同時に着脱することが可能である。遠隔操作に対応するためにはワンタッチ 式開閉機構の付加等の更なる追加工が必要であるが、IMMORTAL で導入したパッケージ型ヒ ータは加熱昇温および温度保持性能の確認を目的としているため、手動で着脱を行う。保温部 分の熱伝導率が高く一般的な常設型保温材に比べて性能的に劣ること、着脱性を確保する都合 上、ヒータを被加熱物に直接接触しない状態で設置しており、空気を介して加熱するため効率 が著しく悪いことが代表的な欠点として挙げられる一方、外装が堅牢であり遠隔操作による着 脱への対応が常設型に比べて大幅に簡略化できること、保温部分は半永久的に使用が可能であ ることが利点である。

3.3.3 溶融鉛ビスマス合金(LBE)循環駆動用ポンプ

冷媒を循環させる駆動源として一般的にモーター駆動のターボ型ポンプが用いられることが 多く、過去のLBE 循環試験装置においても試験ループ(JLBL#3³⁾)に採用した実績がある。タ ーボ型ポンプは高速回転する羽根車により連続的に大きな流量(JLBL#3 におけるLBE 流量の 実績値:0.5 m³/min)が容易に得られる一方、吐出圧が容積式に比べて低く負荷により流量が大 きく変動するデメリットがある。容積式ポンプは一定の空間にある駆動媒体を往復または回転 運動により容積変化させることで駆動する方式であり、吐出圧が高く安定的な流量が得られる。 しかしながら、ターボ型、容積式の両者ともに駆動部の軸封に課題があり、閉ループを構成す ることが難しくLBE を循環させる駆動源には適さない。実際にJLBL#3 では軸封箇所からの外 気の混入により多量の酸化鉛が生成され、循環流量が不安定になるとともにポンプの駆動軸等 に酸化鉛が固着することでポンプ負荷が増大し、最終的に運転停止に至る事象が生じた。この ため IMMORTAL では、磁力により媒体を駆動する電磁ポンプ(Electro-Magnetic Pump; EMP) を採用した。EMP は流路外周に配置した電磁石により媒体に磁力を与えて駆動する特殊なポン プであり、機械的な駆動部を有するポンプに比べ吐出圧に劣る一方で、一様に媒体を押し出す ことが可能であること、流路構造が単純であり流れを乱しにくいことに加えて閉じた構造である利点がある。IMMORTALに設置した EMP の外形図および仕様を Fig. 3.3-3、Table 3.3-3 に示す。EMP を構成する要素は下記の通りである。

(1)駆動用コイルユニット(冷却ファンを含む)	1基
(2)駆動部二重配管	1体
(3)駆動部二重配管予熱・温度保持用ヒータ	1式
(4)駆動部二重配管温度監視・ヒータ制御用熱電対	1本
(5)コイル温度監視・ファン制御用熱電対	1本
(6)駆動二重配管保温材(常設型)	1式

外周に配置した電磁石により内部の LBE に磁力を加える駆動部配管は、ターゲット容器の流 路構造と同様に外環の先端に鏡板を設けた二重配管構造とした。系統配管を貫通させた形で用 いる通常の電磁ポンプでは、故障等により駆動用コイルの交換を余儀なくされた場合には配管 の両端を切断し、駆動部配管と駆動用コイルの両者を一緒に取り外す必要がある。一方、採用 した二重配管構造では、流れが合流する端部より先に系統配管へ接続される構造物が存在しな いため、配管を覆うコイルユニットのみを片側から引き出して分離することが可能であり、コ イルユニットか駆動部二重配管のどちらかのみを対象としたメンテナンス、廃棄・交換を行う ことが可能である。以上の点から、駆動用コイル故障時の遠隔操作によるメンテナンス性、お よび交換時の廃棄物量の低減に寄与できると考え、本二重配管構造を採用した。駆動部二重配 管の構成は、外管 125A sch20S (外径 139.8 mm、肉厚 5 mm)、内管 40A sch20S (外径 48.6 mm、 肉厚 3 mm)、全長約 2.2 m であり、流入した LBE は外環流路で駆動力を付加された後に端部で 合流・反転して内管を流れるリターンフロー型の流路を有する。材質は IMMORTAL 各系統配 管に採用している SUS316 とした。また、系統配管および他の主要機器と同様に二重配管の外 周には予熱昇温用マイクロヒータと温度制御用熱電対、両端の露出部には保温材を設置した。 二重配管外周に設置される駆動用コイル(耐熱限界 300℃)は予熱昇温運転時や循環運転時に ヒータや配管自体により加熱される。このため、機器保護の観点からコイルユニット下面に冷 却ファンを7基設置し、二重配管温度が200℃以上でコイル冷却を開始する。また、コイル温 度監視用熱電対を設置してコイル温度が250℃を超えた場合、および二重配管温度が450℃を超 えた場合には直ちに運転を停止するインターロックが作動する。この間コイルの冷却は継続さ れる。また、7基の冷却ファンの内、1基以上が故障等により停止した場合は、予熱昇温用ヒー タを含めた運転が停止する。本ポンプは Table 2.2-2 に示した諸元の通り、最大流量 0.12 m³/min として設計した。また、設計最大吐出圧は 0.2 MPa であり、定格 0.085 m³/s で LBE を循環した 際のターゲット容器を含む一次冷却系全体の圧力損失(約 0.15 MPa)に対し LBE の循環を可 能とするための十分な性能を有する。

3.3.4 加熱器

IMMORTAL における加熱器は、陽子ビーム入射による実機 LBE ターゲット容器での発熱を

模擬することを目的としてターゲット容器直近の上流側に設置した。加熱器の外形図および仕様を Fig. 3.3-4、Table 3.3-4 に示す。加熱器を構成する要素は下記の通りである。

(1)	LBE 加熱用ヒータエレメント	1式(最大 67 kW)
(2)	LBE 加熱用ヒータエレメント温度監視・制御用熱電対	1本
(3)	加熱部流路本体	1体
(4)	加熱部流路本体予熱・温度保持用ヒータ	1式
(5)	加熱器出入口 LBE 温度監視用熱電対	各1本(計2本)
(6)	加熱器外周温度監視・ヒータ制御用熱電対	1本
(7)	加熱部流路本体保温材(常設型)	1式

最大加熱容量はビーム入射による発熱量(200 kW)の約1/3である67 kWであり、定格運転時には後段の冷却系とのヒートバランスを考慮して50 kWで運用する。加熱部流路本体の外周にはマイクロヒータと温度制御用熱電対の他、常設型の保温材を設置して一次系運転温度条件に合せて予熱昇温を行う。加熱部流路本体内部には計18本のヒータエレメント(単体出力3.73 kW)が挿入され、発熱模擬運転を行う際にLBEを直接加熱し、ヒータエレメントに設置した温度監視・制御用熱電対により任意の設定温度に制御することが可能である。ヒータエレメントは、発熱模擬運転の際には発熱量一定で制御する他、補助的に運転することで昇温運転時の時間を短縮する。その他、LBEの温度監視および加熱器によるLBEへの熱付与の効果を確認することを目的として、加熱器出入口配管に各1本、計2本の熱電対を設置した。

3.3.5 熱交換器

IMMORTAL の熱交換器は、一次系加熱器で LBE に付与された熱の除去および二次冷却系へ 排出するための機器であり、入熱によって生じる LBE の熱収縮を後述の膨張タンクで吸収した 後に冷却を行うため、膨張タンクの下流側に設置した。熱交換器の外形図および仕様を Fig. 3.3-5、Table 3.3-5 に示す。また、熱交換器を構成する要素は下記の通りである。

(1)	熱交換器本体(伝熱管部含む)	1 基
(2)	熱交換器本体予熱・温度保持用ヒータ	1式
(3)	熱交換器外周温度監視・ヒータ制御用熱電対	2本
(4)	熱交換器出入口 LBE 温度監視用熱電対	各1本(計2本)
(5)	熱交換器本体保温材(常設型)	1式

熱交換器は、流路の急激な縮小または拡大により生じる LBE の流れの乱れ、および乱れによ り促進される流路壁の腐食を回避するため、一次系側を単一の流路で構成するフィンチューブ 方式を採用した。一次系流路は 65A sch10S のスケジュール管で構成し、可能な限り短い区間に 必要伝熱面積を確保することを目的として、伝熱管部には一次系流路外周に 24 枚の板状冷却フ ィン(幅/高さ: 2 mm / 12 mm)を冷媒の流れ方向と並行に配置した。二次系流路となる加圧水 ジャケットは 100A sch10S(外径 114.3 mm、肉厚 3 mm)のスケジュール管で構成し、伝熱管部 フィンの外側に配置した。加圧水ジャケットには加圧水の出入口となる配管をそれぞれ設け、 50A JIS20K フランジにより二次冷却系と接続する。熱交換器本体の外周には、他の機器と同様 にマイクロヒータと温度制御用熱電対の他、常設型の保温材を設置して予熱昇温を行う。各冷 媒の流れ方向は、単位距離当たりの両冷媒間の温度差(平均温度差)が大きく熱交換効率に優 れる向流式を採用し、設計を行った。

遠隔操作による作業性の確認を行う上で将来的に必要となる実機 LBE ターゲットの規模お よび空間的な位置関係の把握、除熱量が大きく大型化が予想される熱交換器の縮小化検討、 IMMORTAL 完成後の実験による伝熱特性の検証、設計上の課題の抽出等を装置設置後に実施 することを計画しており、IMMORTAL では実機と同じ交換熱量を想定した熱交換器の設計を 行った。以下に、設計条件を示す。

- 交換熱量:200 kW
- LBE (一次側) 流量: 0.085 m³/min
- LBE(一次側)入口温度:450℃
- LBE(一次側)出口温度目標:350℃
- LBE(一次側)流路配管サイズ:65A sch10S(外径 76.3 mm、肉厚 3 mm)
- 加圧水(二次側)流量:0.06 m³/min
- 加圧水(二次側)入口温度:150℃
- 加圧水(二次側)出口温度制限:200℃以下
- 加圧水(二次側)流路ジャケットサイズ: 100A sch10S(外径 114.3 mm、肉厚 3 mm)
- 加圧水(二次側)出入口配管サイズ: 50A sch10S(外径 60.5 mm、肉厚 2.8 mm)
- 冷媒の流れ方向:向流

上記は LBE の流路配管サイズを除き実機 LBE ターゲットと全て同じ条件である。450℃に加 熱された LBE は、熱交換器により加熱器入口温度(実機ではターゲット容器入口温度)である 350℃まで冷却され、再度循環する。伝熱管部での過冷却による LBE の固化を回避するため、 LBE の融点(約 125℃)から余裕を見込み二次系加圧水の熱交換器入口温度を 150℃に設定し た。加圧水の出口温度制限は、二次冷却系の最大使用温度である 200℃以下とした。装置運用 の安定化を目的として、加圧水は通常運転中に沸騰を伴わず液相状態での運転を基本とする。 このため、加圧水圧力は 200℃の温度条件で沸騰を生じない圧力として、200℃の飽和蒸気圧 1.45 MPa に余裕を考慮し、2.0 MPa に設定した。交換熱量に基づき、LBE と加圧水の出口温度 (それぞれ、*T_{Lout}, T_{Lin}*)は以下の式で求められる。

 $T_{Lout} = T_{Lin} - \frac{Q}{F_L \rho_L c_{pL}} \ (\text{LBE} \amalg \Box \amalg \textcircled{E})$

$$T_{Wout} = T_{Win} - \frac{Q}{F_W \rho_W c_{pW}}$$
 (加圧水出口温度)

ここで、各パラメータは以下のように定められる。

<i>T_{Lin}</i> :LBE 入口温度 [℃]	Q:交換熱量 [kW]
F _L :LBE 流量 [m ³ /s]	$ \rho_L : LBE 密度 [kg/m^3] $
c _{pL} :LBE 比熱 [kJ/kg・K]	T_{Win} :加圧水入口温度 [℃]
F _L :加圧水流量 [m ³ /s]	ρ _L :加圧水密度 [kg/m ³]
c _{pL} :加圧水比熱 [kJ/kg・K]	

LBE 入口温度 T_{Lin} は 450°C、交換熱量 Qは 200 kW、LBE 流量 F_L は 0.085 m³/s とした。その他 LBE および加圧水の密度をはじめとする物性値については文献値 ^{4,5)} を用いた。計算の結果、 LBE 出口温度 T_{Lout} は 350°C、加圧水出口温度 T_{Wout} は 200°Cであり要求性能を満足する。なお、 二次加圧水が IMMORTAL での最大流量 (0.15 m³/min) の場合は単位時間毎の加圧水への入熱 量が減少し、 T_{Wout} が 171°Cに低下する。また、一次 LBE 側の管内熱伝達率 α_L および二次加圧 水側の管外熱伝達率 α_W は以下の式により求めた。

$$\alpha_L = N u_L \cdot \frac{\lambda_L}{D_L}$$

 $Nu_L = 5.0 + 0.025 Pe_L^{0.8} = 5.0 + 0.025 (Re_L \cdot Pr_L)^{0.8}$

$$Re_L = \frac{V_L D_L}{v_I}$$

 $\alpha_W = N u_W \cdot \frac{\lambda_W}{D h_W}$

$$Nu_W = 0.023 Re_W^{0.8} Pr_W^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu_{Wl}}{\mu_{Wh}}\right)^{0.14}$$

$$Re_W = \frac{V_W Dh_W}{v_W}$$

ー次側の管内熱伝達率の導出に必要となるヌセルト数 Nu_Lは、乱流の管内強制対流熱伝達に関 する実験式であり、ナトリウム等の液体金属の熱伝達率を求める際にも用いられている Seban-shimazaki の式⁶を使用した。一次系流路は単管構造であるため、レイノルズ数 Re_Lを導

出する際の代表長さは、流路配管の内径 *D*_Lとした。二次側ヌセルト数 *Nuw*は LBE に対して加 圧水の温度域が極端に低く、固体壁と流体との温度差が大きくなることを考慮して、Colburn の式に温度差による粘度の変化を考慮した補正係数を加えた Sieder-Tate の式を用いた。二次系 ジャケット内の流路は単管ではなく板状フィンを含めた複雑な構造であるため、流路断面積と 濡れ長さにより決まる相当直径 *Dhw*をレイノルズ数 *Re*_Lの導出における代表長さとして使用し た。

次に、設計において重要である伝熱管部全長の検討を行った。総括伝熱係数 K、対数平均温 度差 T_{LMTD}は以下の式により求められる。

$$K = 1/\left(\frac{1}{a_{W}} + r_{f} + \frac{A_{o}}{A_{lm}} \cdot \frac{t_{S}}{\lambda_{S}} + \frac{1}{a_{L}} \cdot \frac{A_{o}}{A_{i}}\right)$$

$$T_{LMTD} = \frac{\left((T_{Lin} - T_{Wout}) - (T_{Lout} - T_{Win})\right)}{\left(ln((T_{Lin} - T_{Wout})/(T_{Lout} - T_{Win}))\right)}$$
こで、各パラメータは以下のように定められる。
$$A_{o}: -$$
次系流路配管外周面積 [m²]
$$A_{i}: -$$
次系流路配管対数平均周面積 [m²]
$$t_{S}: -$$
次系流路配管肉厚 [mm]
$$\lambda_{S}: -$$
次系流路配管伝導率 [W/mK]

必要伝熱面積 AHX および必要伝熱管長 LHX はそれぞれ以下の式により求めた。

$$A_{HX} = Q/(KT_{LMTD})$$
$$L_{HX} = A_{HX}/A_o$$

計算の結果、設計条件とした定格運転時における総括伝熱係数 K は約 450 W/m²·K であり、 対数平均温度差 T_{LMTD}は 227℃であった。以上から、必要伝熱管長 L_{HX}は 2.4 m である。熱交換 器は伝熱管部のみではなく、他の機器との接続配管およびヒータや保温材等の付随機材との取 合いの他、遠隔操作による保守作業性を考慮した場合必要伝熱管長よりさらに長尺化すること が見込まれた。このため、本熱交換器では伝熱管部を 2 つに分割し、U 字管の直線部にそれぞ れ 1.2 m の伝熱管部を配置して熱交換器設置スペースの縮小化を図る構造とした。

3.3.6 流量計測用配管

Σ

実機 LBE ターゲットでは、一次系 LBE 流量を監視するための計装として、超音波流量計の 採用を決定している。これに従い、IMMORTAL でも同様に LBE 用流量計として超音波流量計 (3.7.1.3 参照)を導入した。超音波を用いた LBE の流量計測では、使用する計測用配管および 超音波センサが異なる 2 種類の計測手法の開発と性能検証を行っている。このため、計測配管 ごと交換して各手法の試験を行うための設置スペースを EMP 下流側に設けた。設置スペース の全長は 700 mm である。IMMORTAL では LBE の漏洩を極力回避するため、各部の接続方法 については溶接接合を原則としているが、各手法の性能評価に用いる当該スペースに関しては 配管ごとの交換が可能であることを優先し、例外的に 65A JIS20K フランジで接続する構造とし た。以下に、計測配管の共通の構成要素とそれぞれの計測用配管の概要について述べる。

(1)	計測配管本体	1 基
(2)	計測配管本体予熱・温度保持用ヒータ	1式
(3)	計測配管本体温度監視・ヒータ制御用熱電対	1本
(4)	LBE 温度監視・ヒータ制御用熱電対	1本
(5)	低温部 LBE 中酸素濃度計測用酸素センサ	1本
(6)	計測配管本体保温材 (常設型)	1式

①センサプラグ液浸型用計測配管

センサプラグ液浸型では、表面張力が強く鋼材との濡れが悪い LBE の流れに対して、比較的 良好な濡れ性を示す高クロム鋼製かつ先端に鏡面処理を施したセンサプラグを介して LBE 中 へ超音波信号を透過させる。本方法では直線状の信号透過経路を用いる都合上、超音波センサ を組み合わせたセンサプラグも同様にひとつの直線上に配置する必要がある。このため、設置 スペースとの接合用フランジを備えた 2 つの枝管と直線流路を組み合わせたπ字型の計測用配 管を用いる。Fig. 3.3-6 (a) に外形図を示す。枝管および直線流路は 65A sch10S (外径 76.3 mm、 肉厚 3 mm)のスケジュール管で構成する。直線部の両端にはセンサプラグを挿入・接合する 取り口として、過去の LBE ループにおいて最大 500℃での使用で LBE 漏洩等の不具合が生じ ていない実績を持つ1インチ取合いの VCR 継手を設置した。枝管の下流側には LBE 温度を計 測するための熱電対設置用管台、低温部の LBE 中酸素濃度を計測・監視するための酸素センサ 設置用管台をそれぞれ1基設ける設計とした。また、本配管の予熱昇温・温度保持は他の機器 と同様に、外周にマイクロヒータと温度制御用熱電対の他、常設型の保温材を設置して行う設 計とした。

②非接触型(センサ外壁面設置型)計測配管

非接触型は超音波センサを流路外壁面に設置して、流路壁を介して超音波信号の送受信を行 う手法である。このため、①のセンサプラグ液浸型のように特殊な構造ではなく、直管型流路 構造を有した計測配管を用いる。Fig. 3.3-6 (b) に外形図を示す。計測配管は、両端のJIS20K フ ランジを含め一次系の系統配管と同じく 65A sch10S スケジュール管のサイズで設計した。管内 の流路も同じく内径 69.3 mm 一定の直管流路で構成される。計測配管の両端フランジ間の中央 に位置する超音波センサを設置する箇所の配管は、超音波信号が LBE 中へ透過する過程で生じ る信号の多重反射の影響を極力低減することを目的として、肉厚を 15 mm とした。配管外壁の センサを設置する箇所(対向する 2 面)は幅 26 mm、長さ約 150 mm の平面であり、センサと 配管外壁面との密着性および LBE と内壁面との濡れ性を確保する観点から、配管の外壁平面と 内壁面に鏡面仕上げ(#3000 以上)を施した。センサは、ジャケットおよび固定治具により対 向する 2 つの平滑面にそれぞれ密着させて設置する。固定治具は、ボルトの締め付けと皿バネ によりジャケットに収められたセンサを平滑面に対し押しつけ、保持する構造である。①の計 測配管と同様に、下流側には LBE 温度を計測するための熱電対設置用管台、低温部の LBE 中 酸素濃度を計測・監視するための酸素センサ設置用管台をそれぞれ 1 基分設けると共に、外周 にマイクロヒータと温度制御用熱電対の他、常設型の保温材を設置して予熱昇温を行う設計と した。

3.3.7 膨張タンク

膨張タンクは一次冷却系配管および機器に揚液・充填された LBE の熱膨張および熱収縮によ る体積変化量を吸収するための機器であると共に、内部 LBE の自由界面を介してカバーガス中 に添加した酸化/還元ガスにより LBE 中の酸素濃度を制御するための機器である。膨張タンク の外形図および仕様を Fig. 3.3-7、Table 3.3-6 に示す。また、膨張タンクを構成する要素は下記 の通りである。

(1) 膨張タンク本体	1 基
(2) 膨張タンク本体予熱・温度保持用ヒータ	1式
(3) 膨張タンク本体温度監視・ヒータ制御用熱電対	1本
(4) 検出器等設置用管台および遠隔操作用フランジ	2 基
(5) 遠隔操作用フランジ予熱・温度保持用ヒータ	1式
(6) 遠隔操作用フランジ温度監視・ヒータ制御用熱電対	1本
(7) LBE 液温監視用熱電対	1本
(8) ガス供給・排気用配管(内1本は接点式液位計設置用と兼用)	2本
(9) 連続式液位計	1本
(10) 接点式液位計	1本
(11) 各部保温材(常設型)	1式

膨張タンクは縦置円筒型であり、LBE の急激な酸化を回避するため内部の気相部には Ar ガ スが充填される。揚液完了時(LBE 温度 200℃)に一次冷却系内に充填される LBE のインベン トリを 0.25 m³とし、定格運転時の LBE 温度を高温側 (加熱器出口~熱交換器入口) で 450℃、 低温側(熱交換器出口~加熱器入口)で350℃とした場合におけるLBEの体積変化量の概算は 約 0.006 m³である。機器縮小化の面において、膨張タンクは LBE の体積膨張、および系統の昇 温により上昇したタンク内圧が設計圧力未満となる範囲で極力小型化することが可能である。 しかしながら、実機 LBE ターゲットでは、タンク上面に設置するいくつかの計装や設備を遠隔 操作による保守・交換が必要であることから、タンク上面には2基の遠隔操作用フランジを備 えた管台を配置する設計とした。IMMORTAL 膨張タンクは、内径 489 mm、高さ 550 mm、タ ンクの容量は 0.09 m³ であり、一次冷却系に充填された LBE の体積変化量を十分に吸収するこ とが可能である。膨張タンク本体の外周にはマイクロヒータと温度制御用熱電対の他、常設型 の保温材を設置して一次系運転温度条件に合せて予熱昇温を行う。タンク上面に位置する2基 の管台および遠隔操作用フランジについては、フランジを覆う型枠にシースヒータを設置し、 パッケージ型ヒータと同様に空気を介してフランジに設置した制御用熱電対により予熱昇温を 行う方式を採用した。これにより型枠ごとヒータを着脱することが可能であり、カバーガスの 漏洩がフランジで生じた際の増し締め等の保守作業性の向上に寄与する。型枠外周は常設型の

保温材で全面を覆う構造としている。2 基の遠隔操作フランジには、タンク内の液面変動およ び系統破損に伴う LBE 漏洩を検知することを目的とした連続式液位計、カバーガス(Ar)/酸 素濃度制御ガス(還元ガス:Ar+4.5 wt%H₂、酸化ガス:Ar+2.0 wt%O₂)の供給/排気用配管およ びLBE 温度計測用熱電対と装置安全保護用の接点式液位計を設置した。連続式液位計はタンク 最下部から 51 mm の高さの位置まで挿入してタンク内部の LBE の液位を監視する。液位低(110 mm)が検知された場合には、出口配管と液面がほぼ同じ高さとなり、気泡を巻き込む恐れが あるため、インターロックを作動してポンプによる循環運転を停止する設計とした。液位高(200 mm)の際はタンク容量に余裕があるため、警告が表示されるのみである。連続式液位計の計 測限界距離(300 mm)と同じ位置には、過去の LBE ループでの運用実績で高い信頼性を示し た接点式液位計を設置した。液位高の位置からさらに液面が上昇して連続式液位計の計測限界 に到達した際は、接点式液位計がこれを検知し、インターロックにより循環運転の停止とドレ ンバルブを開放して LBE のドレンを行う。タンク内圧はガス供給/排気用配管を介して調整が 可能であり、揚液時には減圧のため-0.1 MPa、運転時には 0.1 MPa 以下で運用する。

3.3.8 ドレンタンク

ドレンタンクは、点検保守等により運転を停止している際や緊急時に一次系の循環流路から ドレンラインを介して LBE 全量を収容・保管するための機器である。装置停止時はタンク内で LBE を降温することで凝固させて保管し、また予熱昇温を行う際は固化した LBE を融解させ るとともに静的溶融状態を維持することで LBE 中の不純物(代表的なものとして酸化鉛)を密 度差により浮遊・分離することを目的として設置する。このため、運転前の予熱昇温を行う際 には、常温保管により固化した内部の LBE を揚液温度(200℃)に昇温、融解させる機能を有 する。ドレンタンクの外形図および仕様を Fig. 3.3-8、Table 3.3-7 に示す。また、ドレンタンク を構成する要素は下記の通りである。

(1)	ドレンタンク本体	1 基
(2)	ドレンタンク予熱・温度保持用ヒータ	1式
(3)	温度監視・ヒータ制御用熱電対	1本
(4)	検出器等設置用管台および接続用フランジ	2 基
(5)	ドレンライン配管	1本
(6)	LBE 温度監視用熱電対	1本
(7)	ガス供給・排気用配管	1本
(8)	連続式液位計	1本
(9)	接点式液位計	1本
(10)各部保温材(常設型)	1式

ドレンタンクは IMMORTAL 全高を低減することを目的として、横置円筒型で設計した。膨 張タンクと同様に、内部の気相部に Ar ガスを充填して運用する。LBE の融解は 200℃の温度条 件で可能であるが、LBE 中の溶存酸素濃度を予め調整する場合に高温度条件であるほど還元が 促進されることから、設計上の最大使用温度を 450℃とした。また、一次冷却系に充填される LBE のインベントリが約 0.25 m³であるため、余裕を見込み内容積 0.28 m³で設計した。揚液お よびドレンの際、LBE はドレンライン配管を介して一次系循環流路側とタンクの間を移動する。 ドレンライン配管は、後述のドレン弁の対応口径のサイズから 50A sch10S(外径 60.5 mm、肉 厚 2.8 mm)の SUS316 製配管を採用し、タンク最下部より 14.5 mm 上の深さまで挿入して設置 した。これにより、静的溶融状態でタンク内 LBE の自由界面付近に浮遊・分離した不純物を極 力循環流路側へ移動させることなく揚液することが可能である。実機 LBE ターゲットでは、ド レンタンクは装置の最下部に位置しており①遠隔操作による点検・保守のアクセス性が悪いこ と、②構造が堅牢であり故障や破損が生じ難いことを考慮して、温度センサ等の付属機器は故 障頻度の少なく信頼性の高い熱電対等の単純かつ堅牢な構造を持つ機器を極力選定して複数導 入し、単体の交換を想定しない計画である。ドレンタンクと他の一次冷却系機器の位置関係に ついては IMMORTAL も同様であるが、連続式液位計を除いて導入する機器(熱電対、接点式 液位計、ヒータ等)の故障事例が類似の LBE 循環装置において 10 年以上確認されていないこ とから、付属機器に関しては複数導入せず、必要最低限の数量のみ設置する方針とした。この ため、IMMORTAL のドレンタンクでは、付属機器の接続・設置用として JIS10K フランジを備 えた管台をタンク上部に2基設置し、付属機器が万一故障した際には交換することができる構 造とした。2基の管台には、連続式液位計、ガスの供給/排気用配管および LBE 温度計測用熱電 対と接点式液位計をそれぞれ設置する。連続式液位計は、ドレンタンク内の液位監視に使用し、 ドレン時に収容された LBE の回収量の確認は接点式液位計で行う。また、予熱昇温用として、 ドレンタンク本体の外周には他の機器と同様にマイクロヒータと温度制御用熱電対の他、常設 型の保温材を設置する設計とした。なお、IMMORTAL では、万一ドレンタンクが破損した場 合に備えて装置架台床面(ドレンタンクより低位置)に堰を設ける構造としており、装置架台 外へ LBE を流出させることなく全量(0.29 m³)を収容できるキャッチパンとして機能する。

3.3.9 ドレン弁

過去の LBE ループでの運用実績を基に、IMMORTAL において運転時に一次系循環流路とド レンタンクを縁切りするドレン弁として空操式ベローズバルブを採用した。ドレン弁周辺を構 成する要素は下記の通りである。

(1) ドレン弁本体
(2) ドレン弁本体予熱・温度保持用ヒータ
(3) ドレン弁本体温度監視・ヒータ制御用熱電対
(4) ドレン弁本体保温材(常設型)
1式

ドレン弁の材質は他の機器と同じく SUS316 であり、ドレンタンクと循環流路を接続するド レンライン配管を繋ぐ形で両端溶接により接続した。接続する配管の口径は揚液時等の内部流 速を抑制することを目的として、可能な限り循環流路配管に近い大きさの 50A (外径 60.5 mm) サイズの仕様とした。また、他の機器と同じく予熱昇温用として、ドレンバルブ本体の外周に
マイクロヒータと温度制御用熱電対の他、常設型の保温材を設置する設計とした。弁の開閉は、 手動でハンドルを回転させるマニュアル操作の他、通常はスイッチの切り替えにより供給する 圧縮空気をオンオフ操作することで行う。圧縮空気による動作圧力は 0.49 MPa であり、 IMMORTAL ではコンプレッサーまたはガスボンベから操作用の圧縮空気を供給する。ドレン弁 は、電源遮断や供給空気の圧力が動作圧力以下となった場合には自動的に開操作が行われ、LBE のドレンが開始されるようにした。これにより、不測の事態が生じた場合でも、LBE はドレン され安全に装置を停止できる。また、本形式のバルブは作動部分の質量および作動範囲が短い ことから弁座周辺に与える負荷が小さく、高頻度の繰り返し作動による故障が少ない特長を持 つ。

一方、過去の運用における不具合の一例として、弁座に鉛化合物等のスラグが噛み込み、ス ローリークが発生した事例が確認されている。IMMORTAL ではこの不具合に対し、同事象が 発生する以前の事前対策として、ドレンタンクでの静的溶融状態の維持による不純物の分離お よび溶存酸素濃度の制御による還元処理によって対応する計画である。また、その他の根本的 な対策として、ドレンライン配管の一部を冷却して当該箇所の LBE を意図的に固化して閉塞さ せ、閉状態のバルブとして機能させるフリーズシールバルブの研究開発を別途実施しており、 将来的に IMMORTAL での実証試験を計画している。

3.3.10 フィルタ

一次冷却系に設置するフィルタは、LBE 中の鉛化合物等のスラグの除去を目的とした機器で ある。①ドレンライン配管と循環流路の合流する箇所、②熱交換器~EMP 入口の中間位置の2 箇所に設置した。①は揚液時に循環流路内に充填されるドレンタンク中のスラグ等の固体不純 物を極力低減することを目的として設置し、②は LBE が流れる一次系循環流路の内、最も狭い 流路を持つ EMP 駆動二重配管の外環流路に侵入するスラグ等を可能な限り除去することを目 的としてそれぞれ設置する。フィルタの外形図を Fig. 3.3-9 に示す。また、フィルタを構成する 要素は下記の通りである。

(1)	遠隔操作用フランジ(閉止上蓋)付濾材	1 基
(2)	遠隔操作用フランジ(受け)付濾材収納容器部分	1基
(3)	循環流路接続配管	2本(入口出口各1本)
(4)	遠隔操作用フランジ予熱・温度保持用パッケージ型ヒータ	1基
(5)	遠隔操作用フランジ温度監視・ヒータ制御用熱電対	1本
(6)	濾材格収納容器部分予熱・温度保持用ヒータ	1式
(7)	濾材収納容器部分温度監視・ヒータ制御用熱電対	1本
(8)	濾材収納容器部分等用保温材(常設型)	1式

フィルタは、将来的に実機 LBE ターゲットでの遠隔操作による濾材交換を想定し、それぞれ 遠隔操作用フランジを備えた濾材(閉止上蓋)と濾材収納容器部分(受け)により構成する設 計とした。ステンレスウールおよびステンレスメッシュで構成する濾材は、遠隔操作用フラン ジ(閉止上蓋)に支持棒により固定され、出入口に一次系循環流路と接続する配管を設けた濾 材収納容器に挿入、容器上面に設置した遠隔操作用フランジにより固定される。定期メンテナ ンスの際には、濾材と一緒にフランジを取り外して交換を行う。遠隔操作用フランジは、3.3.2 項に記載したパッケージ型ヒータを搭載して予熱・昇温・温度保持を行う。パッケージ型ヒー タの温度監視・制御用熱電対は、収納容器側に設置した。交換時に脱着する必要の無い収納容 器部分およびその出入口の接続配管については、他の機器と同じく予熱昇温用として、外周に マイクロヒータと温度制御用熱電対の他、常設型の保温材を設置する設計とした。



Fig. 3.3-1 Schematic drawing of prototypical mock-up of LBE target vessel

項目	仕様
型式	二重円管型容器
員数	1 基
外形寸法	φ160×560.5 mm
外管/内管 内径	105 mm / 150 mm
重量	乾燥重量 約65kg
使用温度	最大 450℃
使用圧力	最大 0.5 MPa
材質	SUS316
流路配管サイズ	外管:125A/ 内管:40A
流量	最大 0.12 m ³ /min

Table 3.3-1 Specifications of prototypical mock-up of LBE target vessel



Fig. 3.3-2 Schematic drawing of packaged heater

項目	仕様
型式	シースヒータ/金属保温材一体構造
員数	4 基(内フィルター用 2 基)
外形寸法	φ520×300 mm
重量	乾燥重量 約25kg
使用温度	最大 450℃
使用圧力	最大 0.5 MPa
流路材質	SUS316
対応配管サイズ	65A
ヒータ容量	1.3 kW

Table 3.3-2 Specifications of packaged heater



Fig. 3.3-3 Schematic drawing of circulation pump for primary cooling system (Electromagnetic pump)

項目	仕様
型式	二重管流路駆動型電磁ポンプ
員数	1 基
外形寸法	2200×700×700 mm
重量	乾燥重量 約 900 kg
使用温度	最大 450℃
使用圧力	最大 0.5 MPa
主要材質	SUS316
流路配管サイズ	外管:125A/ 内管:40A
流量	最大 0.12 m ³ /min
制御方式	インバータ駆動方式

Table 3.3-3 Specifications of circulation pump for primary cooling system (Electromagnetic pump)



Fig. 3.3-4 Schematic drawing of modular heater (MH)

項目	仕様
型式	投げ込み式シースヒータ
員数	1 基
外形寸法	φ360×2000 mm
重量	乾燥重量 約110 kg
使用温度	最大 450℃
流路材質	SUS316
加熱部配管サイズ	200A Sch10S
加熱量	最大 67 kW

Table 3.3-4 Specifications of modular heater (MH)



Fig. 3.3-5 Schematic drawing of primary heat exchanger (PHX)

1	
項目	仕様
型式	U 字型フィンチューブ式
員数	1 基
一次/二次冷媒	LBE / 加圧水
外形寸法	全長 2400 mm / 全高 約 800mm
重量	乾燥重量 約 90 kg
使用温度	最大 450℃
一次/二次使用圧力	最大 0.5 MPa / 最大 2.0 MPa
流路材質	SUS316
流路配管サイズ	一次流路:65A/二次流路:100A
除熱量	最大 200 kW (設計値)
一次冷媒流量	最大 0.12 m ³ /min
二次冷媒流量	最大 0.15 m ³ /min

Table 3.3-5 Specifications of primary heat exchanger (PHX)



Fig. 3.3-6 (a) Schematic drawing of measurement section for immersion plug type



Fig. 3.3-6 (b) Schematic drawing of measurement section for non-contact type



Fig. 3.3-7 Schematic drawing of expansion tank

項目	仕様
型式	縦置円筒型
員数	1 基
外形寸法	φ508×550 mm
重量	乾燥重量 約190 kg
使用温度	最大 450℃
使用圧力	最大 0.5 MPa
流路材質	SUS316
海位胜相	連続式液位計 (運転時液位監視用)
11次11公11公11公11公11公11公11公11公11公11公11公11公1	接点式液位計(液位高検知用)

Table 3.3-6 Specifications of expansion tank





Fig. 3.3-8 Schematic drawing of drain tank

	-
項目	仕様
型式	横置円筒型
員数	1 基
外形寸法	φ508×1680 mm
重量	乾燥重量 約 300 kg
使用温度	最大 450℃
使用圧力	最大 0.5 MPa
流路材質	SUS316
海位胜相	連続式液位計(揚液/ドレン時の液位監視用)
们又们上品们记	接点式液位計(液位高検知用)

Table 3.3-7 Specifications of drain tank



Fig. 3.3-9 Schematic drawing of filter

3.4 二次冷却系(加圧水循環系)の構成機器

IMMORTAL の二次冷却系は、加圧水を冷媒として循環する閉ループで構成される。以下に、 二次冷却系の設計における前提条件を示す。

- 除熱量:50 kW (定格)
- 設計温度:250℃
- 設計圧力: 2.2 MPa
- 循環冷媒:加圧水(加圧圧力 2.0 MPa)
- 冷媒使用温度:150~200℃
- 主要部材質: SUS316
- カバーガス: N₂
- ドレンタンク:無し
- 個別機器の遠隔操作性:考慮しない(全体をユニット化)

また、IMMORTAL 二次冷却系の系統図を Fig. 3.4-1 に示す。IMMORTAL 冷却系の定格除熱量と して、50 kW の除熱を達成することを前提として設計した。循環冷媒は 2.0 MPa で加圧した加 圧水であり、使用温度範囲は 150~200℃である。系統配管および系統機器に関して、加圧圧力 に対して余裕を見込み設計圧力を 2.2 MPa とした。また、系統の設計温度も加圧水の最高使用 温度である 200℃から 50℃の余裕を見込み、250℃に設定した。実機 LBE ターゲットと異なり 加圧水を貯蔵・保管するためのドレンタンクを備えず、運転開始前後に水を充填/排出して使用 する設計とした。加圧運転前に系統内に充填する水は、系統腐食の要因となる不純物の混入を 可能な限り排除するため、JIS K0557 A4 に該当する精製水を使用する。本節では、Table 2.2-2 で示した主要諸元を満たすように設計した二次冷却系の構成機器について述べる。

3.4.1 二次冷却系配管および予熱・保温機構

実機 LBE ターゲットにおける二次冷却系は、一次系と異なりユニット化して台車遮蔽体の後 方かつ台車外に設置し、台車上の一次系熱交換器と接続する計画であり、メンテナンスや交換 に関する個々の機器の遠隔操作性については考慮しない方針とした。IMMORTAL では一次系 熱交換器と二次冷却系との接続に 50A サイズのフランジを採用していることから、二次系配管 は同サイズである 50A sch10S (外径 60.5 mm、肉厚 2.8 mm)のスケジュール管を用いる設計と した。材質は一次系と同じく SUS316 である。

二次冷却系は一次系熱交換器の伝熱部を介して一次 LBE の冷却を行う都合上、一次系側の固 化を回避するため LBE の融点以上の温度で運用する必要がある。このため、二次系配管外周に は一次系と同様にマイクロヒータおよび制御用熱電対を各部に設置するとともに、昇温後の温 度保持や周辺機器類への熱影響の回避を目的として一次冷却系の系統配管と同様に、シリカ系 素材を用いた常設型保温材を設置した。なお、台車外に設置することを想定しており、実機 LBE ターゲットでも同様の保温材を使用することを想定している。 3.4.2 加圧水循環駆動用ポンプ

二次冷却系は一次系伝熱管部での LBE の固化を回避するため、循環冷媒である加圧水を系統 に敷設したヒータおよび保温材により予熱昇温し、最大 200℃の温度で運用する。また、加圧 水は液相状態での使用を前提とするため 200℃の飽和蒸気圧から余裕を見込み、2.0 MPa の Ar ガスで加圧して運用する。加圧水を循環駆動させるためのポンプには高温、高圧条件下での使 用に適するものとして、キャンドモーターポンプ(帝国電機製作所:F42-216X2M-0204SS1V-BV) を採用した。ポンプの外形図および仕様を Fig. 3.4-2、Table 3.4-1 に示す。一般的なモーター駆 動のポンプは、それぞれ個別に製造したポンプケーシングとモーターを組み合わせて使用する 都合上、ケーシングを貫通するモーター回転軸の軸封箇所から駆動流体が漏洩する可能性を排 除できない。IMMORTAL で採用するキャンドモーターポンプは、ケーシングと一体化された フレーム内部に回転軸およびモーター回転子を封入し、回転子外周の駆動流体を物理的に隔離 した領域にモーター固定子を設置することで、駆動流体の外気との隔離および漏洩の可能性を 排除することができる。また、軸封が必要ないため、高温、高圧の媒体を取り扱いやすいとい う利点を有する。

加圧水を循環駆動するポンプは、Table 2.2-2 に示した IMMORTAL 二次冷却系の仕様に準拠 して設計圧力 2.0 MPa、設計温度 200℃、吐出流量 0.06 m³/min(定格)とした。インバータ制 御により流量は任意の値に変更でき、最小流量 0.02 m³/min~最大流量 0.15 m³/min までの範囲 で使用することが可能である。

3.4.3 二次/三次熱交換器

二次/三次熱交換器は、一次系熱交換器で二次冷却系加圧水に付与された熱を三次系へ排出す るための機器であり、ガス加圧および入熱による加圧水の熱収縮を吸収するために設置したバ ッファタンク下流側に設置した。熱交換器の外形図および仕様を Fig. 3.4-3、Table 3.4-2 に示す。 以下に、設計条件を示す。

- 交換熱量:50 kW
- 熱交換方式:シェルアンドチューブ式
- 加圧水(二次側)流量:0.06 m³/min
- 加圧水(二次側)入口温度:200℃
- 加圧水(二次側)出口温度目標:150℃
- 加圧水(二次側)出入口配管サイズ: 50A(外径 60.5 mm、肉厚 3 mm)
- チラー水(三次側)流量:0.1 m³/min
- チラー水(三次側)入口温度:20℃
- チラー水(三次側)出口温度制限:40℃以下
- チラー水(三次側)出入口配管サイズ: 32A(外径 42.7 mm、肉厚 3 mm)

当該の熱交換器内を流れる二次側の加圧水、三次側のチラー水はごく一般的に用いられる冷 媒であり、運転中に局所的な温度低下により固化を生じないこと、系統を構成する材料に及ぼ す腐食の影響がLBEに比べて少ないことに加え、不純物の析出等による流路閉塞の発生を無視 できることから、一方の冷媒流路を分割・複数化することで伝熱面積を確保する手法を用いる ことができる。このため、二次/三次熱交換器には本体を縮小化でき、構造が比較的単純であり 幅広い圧力条件に適用可能なシェルアンドチューブ式を採用した。熱交換器胴(シェル)側は 三次側チラー水が流れ、胴側面に設置した 32A JIS10K フランジにより三次系と接続する。高温 側流体である二次側加圧水は、二次/三次熱交換器の出入口として設けた 50A JIS20K フランジ の入口側を介し、仕切り板により三次側流路と隔離したシェル内に流入した後に直径 8 mm、 長さ 500 mm、合計 20 本の細管(チューブ)内を流れ、流出する設計とした。冷却に伴う熱収 縮を考慮し、チューブはそれぞれ U 字形状に加工して一枚の仕切り板に固定することにより、 自由に伸縮できる構造を採用した。また、本構造は、仕切り板を境界としてシェル側とチュー ブ側をそれぞれ分割することが容易であり、保守点検性の向上が見込まれる。

3.4.4 バッファタンク

バッファタンクは、一次系膨張タンクと同様に、二次冷却系配管および機器に充填された加 圧水の熱膨張および熱収縮による体積変化量を吸収するための機器である。また、タンク内に 窒素ガスを供給し、系内の水を所定の圧力に加圧する機能を有する。バッファタンクの外形図 および仕様を Fig. 3.4-4、Table 3.4-3 に示す。膨張タンクは設置可能面積が限られる都合上、直 径 165.2 mm (肉厚 3.4 mm) の比較的小口径の縦置円筒型とした。冷媒への不純物等の混入を 回避するため、3.4.6項に示す加圧ガス供給系を介して内部の気相部に窒素ガスを供給する。タ ンクの下部および側面には耐熱ニードルバルブを設置し、両バルブ間に設けた透明テフロンチ ューブ(連続使用時の耐熱温度:200℃)製のマノメータによってタンク内に充填した精製水の 液位を確認できる構造とした。マノメータはタンク下部側に配置し、充填した精製水が運転時 の体積膨張によりタンク容量以上とならないように充填量を管理する役割を担う。タンク最低 部から約 0.45 m の高さまでの液面を目視確認することが可能である。運用の際、精製水はマノ メータの中央、タンク最低部から約0.225 mの液面高さまで充填する。タンク内を含む二次系 加圧水のインベントリは 0.08 m³であり、室温 20℃で充填した精製水を二次冷却系のヒータお よび後述の 3.4.6 項に示す加圧ガス供給系(3.4.6 項)を用いて 2.0 MPa に加圧保持しながら最 大温度(200℃)まで均一に昇温した場合、その体積変化量は約 0.012 m³であり、タンク内で は液位が 0.62 m 上昇する。この液位上昇分に対する余裕を考慮し、バッファタンクは高さ 1.33 m、容量 0.025 m³として設計した。また、タンク上部には 3.4.6 項に示す加圧ガス供給系との接 統部を設け、窒素ガスを供給することで二次系内部に充填した精製水を加圧する方式を採用し た。

3.4.5 仕切弁

3.3.5 項に示す通り、一次 LBE の除熱を行う熱交換器は、設置面積の縮小化を目的として伝 熱管部を2つに分割し、それらを上下に配置する構造を採用している。運用時には二次冷却系 を分岐させて、それぞれの伝熱管部に加圧水を供給する。また、それぞれの伝熱管部で LBE を 冷却した後の加圧水は、伝熱管部出口から排出、合流した後に再び二次/三次熱交換器により除 熱される。上下に分割された熱交換器の伝熱管の出入口ごとに加圧水を供給・排出する配管を 接続する都合上、二次冷却系の系統配管は屈曲部が多く非常に入り組んだ構成であり、運転前 に精製水を充填する際、仮に片側(入口側)のみから充填した場合において系統内部の各所で ガス溜りが発生する。このため、二次冷却系内に仕切弁(Fig. 3.4-1 参照)を設ける対策を施し た。IMMORTAL 運転時には仕切弁を閉操作し、加圧水の流れ方向が正しく伝熱管へ供給・排 出される系統構成となる。一方、精製水を二次冷却系内に充填する際は、各伝熱管の出口側か らも均等に充填されるように仕切弁の開操作を行う。充填後、加圧水循環駆動用ポンプを起動 し、充填された精製水を数時間程度循環してガス抜き操作を行う。ポンプ停止後にマノメータ により精製水の充填量を確認し、必要に応じて追加分の充填および同様のガス抜き操作を実施 する。

3.4.6 加圧ガス供給系

加圧ガス供給系は、高圧ガスボンベからレギュレータを通してバッファタンク内の気相部に 窒素ガスを供給し、タンク内の自由液面を介して二次系内の精製水を所定の圧力(2.0 MPa)ま で加圧するガス供給ラインと装置運転後やメンテナンスの際にタンク内に充填された窒素ガス を装置外へ排出するための排気ラインにより構成した。ガス添加系の主配管は材質が SUS316L、 外径 1/2 インチサイズ(肉厚 1.65 mm)の Swagelok 社製シームレスチューブである。系統概略 図を Fig. 3.4-5 に示す。二次系の局所で沸騰が生じてしまった際、液面からの水蒸気を冷却・復 水させた後に再びタンク内へ回収することを目的として、3.4.4項に示すバッファタンク上部と の接合部にコイリングチューブを設けた。また、圧力センサを設置してバッファタンク内の気 相部に繋がるガス添加系内部の圧力を計測・監視することが可能である。二次系の昇温操作や 循環運転時の熱交換に伴って加圧水に温度変化が生じ、バッファタンク内圧が変動する。この ため排気ラインには、装置運転後に弁を手動操作することでガス排気を行う通常排気系(運転 中は閉止)の他、二次系運転中にバッファタンク内圧を保持するための内圧保持系をそれぞれ 設けた。二次系が運転中の場合、ガス供給ラインから常に 2.0 MPa の圧力設定で窒素ガスを供 給することで、熱交換等により加圧水温度が低下した際のタンク内圧の減少を補填する。昇温 操作等によって加圧水温度が上昇、内圧が増加して 2.01 MPa 以上に達した際には系内圧力を計 測・監視する圧力センサからの信号により内圧保持系の電磁弁が開いて余剰圧分の排気が行わ れる。排気後、内圧が 2.0 MPa 以下に減少した時点で再び電磁弁が自動的に閉止状態となり、 系内の圧力が 2.0 MPa で保持される。この他、装置運転中に供給ラインから窒素ガスが過剰供 給された場合や不具合により内圧保持系が作動しない場合に生じた過加圧状態による機器の破 損を回避するため、二次系設計圧力(2.2 MPa)以上で作動する安全弁を1基設置した。



Fig. 3.4-1 Flow diagram of secondary cooling system



Fig. 3.4-2 Schematic drawing of circulation pump for secondary cooling system (Canned motor pump)

Table 3.4-1 Specifications of circulation pump for secondary cooling system (Canned motor pump)

項目	仕様
型式	キャンドモーターポンプ
員数	1 基
外形寸法	500×290×435 mm
重量	乾燥重量 約80kg
使用温度	最大 200℃
使用圧力	最大 2.0 MPa
主要材質	SUS316
流量	最大 0.15 m ³ /min
制御方式	インバータ駆動方式



Fig. 3.4-3 Schematic drawing of secondary heat exchanger

項目	仕様
型式	シェル&チューブ式
員数	1 基
二次/三次冷媒	加圧水 / チラー水
外形寸法	φ114.3×800 mm
重量	乾燥重量 約70kg
使用温度	最大 200℃
二次/三次使用圧力	最大 2.0 MPa / 最大 0.5 MPa
流路材質	SUS316
流路配管サイズ	一次流路:65A/二次流路:100A
除熱量	50 kW(設計値)
二次冷媒流量	最大 0.15 m ³ /min
三次冷媒流量	最大 0.4 m ³ /min

Table 3.4-2 Specifications of secondary heat exchanger



Fig. 3.4-4 Schematic drawing of buffer tank for secondary cooling system

項目	仕様
型式	縦置円筒型
員数	1 基
外形寸法	φ165.2×1330 mm
重量	乾燥重量 約30kg
使用温度	最大 200℃
使用圧力	最大 2.0 MPa
流路材質	SUS316

Table 3.4-3 Specifications of buffer tank



Fig. 3.4-5 Diagram of pressurized gas supply system

3.5 三次冷却系(チラー水循環系)の構成機器

IMMORTAL が備える 3 つの冷却系の最終段である三次冷却系は、水を冷媒として循環する ループで構成される。系統図を Fig. 3.5-1 に示す。二次系の熱を除熱し、装置外へ排出するため の三次系の構成は前段の一次系および二次系に比べて単純であり、三次冷却系配管、冷却用大 型水冷チラー、流量調節用バイパス弁の 3 つで構成される。本節では、2.2 節で示した主要諸 元を満たすこれらの三次冷却系機器について述べる。

3.5.1 三次冷却系配管

実機LBEターゲットにおける三次冷却系は、TEF-T 建屋が備える水冷設備を二次冷却系に接 続して用いる計画であるため、IMMORTAL では二次系と同様に、遠隔操作性を設計上の考慮 から除外した。二次/三次熱交換器との接合部に適合するように、三次冷却系配管のサイズは 32A sch20S(外径 42.7 mm、肉厚 3 mm)のスケジュール管とした。材質は前段の一次系、二次 系と同じく SUS316 である。本装置の三次系は大気圧条件下で水を循環する設備であることに 加えて冷却に用いるチラー水の使用温度制限の都合上、35℃以上の温度条件での使用を想定し ない。このため、三次系配管は、前段の各系と異なり配管外周に対して温度制御用のヒータや 保温材を設置しない方針とした。

3.5.2 冷却用大型水冷チラー

本項では、三次系の中心的機器である冷却用大型水冷チラーについて述べる。2.2 節で示し た通り、IMMORTAL 定格運用時の各系統における最大加熱量および除熱量は 50 kW であるこ とから、当該除熱量を満足する性能を有するオリオン社製インバータチラー (RKE18000A-V) を三次系に設置した。外観写真を Fig. 3.5-2 に示す。冷却水を貯蔵する水槽内蔵型 (容量:約 160 L) であり、外形サイズ 1800×1720×960 (H×W×D、 単位:mm)、乾燥重量 660 kg の非常 に大型のチラーである。渦巻式の圧送ポンプを備え、揚程 20 m で約 300 L/min で冷却水を循環 させることが可能である。ポンプの他に銅製のブレージングプレート式熱交換器を備え、最大 57 kW の冷却能力を有しており IMMORTAL の要求性能を満足する。チラーの冷却水使用温度 範囲が 5~35℃であることから、三次系冷却水の使用温度上限も同様の値を適用して 35℃に設 定した。

3.5.3 流量調整用バイパス弁

装置停止時のLBEはドレンタンク内に収容されており、装置運転を開始する際にタンク内で 溶解させ、その後に一次系内へ揚液・充填する。3.2節で示した通り揚液中に系内のLBEの固 化を回避することを目的とした事前準備として、一次系機器の予熱昇温に加えて二次冷却系の 循環昇温を行う(LBE 揚液・充填モード)。二次/三次熱交換器において 100℃以上の温度で二 次系加圧水が循環する場合、二次/三次熱交換器の伝熱面温度が三次系冷却水の沸点に達する。 このため、大型チラーにより三次系を並行して循環運転することで冷却水の沸騰の防止を行う。 このとき二次/三次熱交換器では二次系の加圧水と三次系の水との間で熱交換が行われるが、三 次系大型チラーが最大57kWの冷却能力を有することに対して二次系を予熱昇温するヒータ容 量(4 kW)が極端に小さい。また、チラー自体には一定の除熱量設定により冷却を行う機能が 無く、チラー出入口の水温をもとに自動で出力調整を行う。三次系循環開始直後等に三次系冷 却水の温度が急上昇した場合において、二次系加圧水へのヒータによる入熱に対しチラーの冷 却能力が過剰となり加圧水温度が低下する。このため、二次/三次熱交換器への三次系冷却水の 供給流量を低下させて除熱量を調整することを目的としたバイパス弁を設けた。Fig. 3.5-1 に示 す通りバイパス弁はチラー出口配管直後に位置する電動式三方弁であり、二次/三次熱交換器へ 流れる主流配管とチラー入口配管側へ流れるバイパス流路にそれぞれ接続した。一次/二次熱交 換器へ流入する加圧水温度を参照して弁開度を制御することでバイパス流路を流れる三次系冷 却水の流量を増減させ、加圧水温度を均一に調整することが可能である。



Fig. 3.5-1 Diagram of third cooling system



Fig. 3.5-2 Photograph of exterior of water chiller

3.6 カバーガス給排気系および酸素濃度制御系機器

LBE は化学的活性が低く発火に至る極端な反応を生じないメリットがある一方で、大気中に 晒されることで多量の酸化鉛を生じ、配管壁面や計装の検出部への固着の他、流路閉塞などの 不具合を引き起こすデメリットがある。このため、LBE 試験装置では容器を閉構造とした上で 気相部に不活性のカバーガスを充填する対策を講じている。また、IMMORTAL のような循環 試験装置では LBE を揚液・充填する際にカバーガスによりドレンタンクの気相部を加圧するこ とで系統側へ押し上げる。その他、装置の継続的かつ安定的な運用において LBE 中の溶存酸素 濃度が重要な要素のひとつであり、IMMORTAL ではカバーガス供給/排気系を介して一次系膨 張タンク気相部へ酸化ガスまたは還元ガスを添加することで循環する LBE の酸素濃度調整を 行う。本節では、一次系へカバーガスおよび酸素濃度制御用の添加ガスを供給、排気するため の機器について述べる。

3.6.1 カバーガス給排気系

IMMORTAL では、カバーガス給排気系を介して一次系のドレンタンク、膨張タンクそれぞ れにカバーガスを給排気する。一次系への不純物の混入やLBEの酸化を極力回避するため、カ バーガスには高純度(純度99.995%以上)のArガスを用いる。Fig. 3.6-1にカバーガス給排気 系の系統図を示す。独立した2つのガス系統を次項(3.6.2項)に示すベーパトラップを介して 両タンクに接続し、それぞれが備える圧力計により内圧状態を確認する。また、過加圧状態に よる機器の破損を回避することを目的として、両ガス系統に設置した安全弁により内圧が安全 弁の作動圧以上に達した場合に装置外へガスを排出する。安全弁の作動圧は一次系の設計圧力 と同じく0.5 MPaとした。揚液操作の際、加圧状態とするドレンタンク側にレギュレータを介 して高圧ガスボンベからArガスを供給する配管を接続し、負圧状態とする膨張タンク側に装 置外へガスを排出するための配管と真空ポンプを接続する構成とした。また、両ガス系統をバ イパス管により接続し、各部に設けたバルブを任意に切り替えることでドレンタンク、膨張タ ンクに対してカバーガスの給排気および減圧操作をそれぞれ独立または並行して行うことが可 能である。

3.6.2 ベーパトラップ

ベーパトラップは、LBE 蒸気が装置外へ直接排出される事態を防ぐための機器であり、一次 系の各タンク(ドレンタンク、膨張タンク)それぞれのガス給排気用配管と前項(3.6.1項)に 示したカバーガス給排気系の間を中継する箇所に各1基設置した。これにより、一次系のカバ ーガスおよび酸素濃度制御用ガスの排気は常にベーパトラップを媒介して行われる。Fig. 3.6-2 に外形図を示す。全長約250 mmの80A sch20S(外径89.1 mm、肉厚4 mm)スケジュール管を 胴部としたワイヤーメッシュデミスタ内蔵型であり、下部(タンク)側からのLBE 蒸気を内蔵 したデミスタで捕集した後にガスのみを側面(カバーガス給排気側)から排出する構造である。 主要材質はSUS304、SUS316とした。デミスタはメッシュの線条によって気体や液体中の不純 物を捕集分離、除去する機能を有し、IMMORTALの場合は、主としてさえぎり効果、慣性効 果の他に自然放熱による冷却によってカバーガス中に含まれるLBEを捕集、固化させることで 装置外への排出を抑制する。このため、他の一次系機器と異なりベーパトラップは予熱昇温用 のヒータや保温材を備えない設計とした。デミスタの規格は SK-192(線径 0.25 mm)であり、 公称値として 3 µm 以上の大きさのミストに対して 1~6 m/sec の流速条件で 99~100%の効率を 有し、1 m/sec 以下の条件において 90%以上の効率を有している。また、デミスタは上部フラン ジ(80A JIS10K)の上蓋に設置した軸とサポートにより固定して胴部へ挿入する構造であり、 保守点検等における交換が容易な設計とした。

3.6.3 酸素濃度制御系

LBE は鋼材に対して腐食性を示すことが知られており、両者の共存性の確保が ADS の実現 における重要な課題のひとつである。腐食への対策として、諸外国を含めたこれまでの知見か ら LBE 中の溶存酸素濃度を適切な範囲(1×10⁻⁷~1×10⁻⁵ wt%)に制御することで流路内壁の表 面に酸化被膜を形成し、母材と LBE との直接接触を回避することで LBE の流動に起因する腐 食を抑制する手法が推奨⁷⁻⁹されている。 このため、LBE ターゲットシステムにおける酸素濃 度制御技術の確立および IMMORTAL の継続的かつ安定的な運用の実現を目的として酸素濃度 制御系を設置した。

LBE 循環系における酸素濃度は、主として流路内壁表面の酸化被膜の成長に伴い徐々に低下 する LBE 中の酸素を補う形で制御する。制御手法のひとつとして固体酸化鉛を液浸させて酸素 を供給する手法が提案されているが、主系統とは別の系統を濃度調整のために設置する必要が あること、これに合せて仕切り弁やヒータ類、計装等が追加され複雑化、高コスト化すること が問題である。このため、IMMORTAL では膨張タンクの気相部に制御ガスを添加し、タンク 内の自由液面を介して LBE 中の酸素濃度を調整・制御することを目的として酸素濃度制御系を 設置した。Fig. 3.6-3 に系統図を示す。酸素濃度制御系は、一部をカバーガス給排気系と共用す る形で膨張タンクのカバーガス給排気用配管に接続した。一次系循環運転の際に酸素濃度制御 を行う場合は酸素濃度制御系側の仕切弁を開き(制御を行わない通常時は閉)、膨張タンク内に 制御ガスを添加する。また、酸素濃度制御中の膨張タンク内の圧力を可能な限り一定に保持す るため、タンク排気側(ベーパトラップ側)に排気制御弁および背圧弁を設置し、制御ガス添 加により生じるタンク内の余剰ガスを排出する設計とした。酸素濃度制御は、一次系に設置し た酸素センサの出力を参照し、予め設定したセンサ出力の閾値を基準として自動で行われる。 制御ガスには、通常のカバーガスとして使用する Ar ガス、酸化反応用の Ar+2.0 wt%O2 混合ガ ス(酸化ガス)および還元反応用の Ar+4.5 wt%H2(還元ガス)の 3 種のガスを各高圧ガスボン べからレギュレータを介して酸素濃度制御系へ供給する。酸素濃度制御の鍵である各制御ガス の膨張タンクへの添加は、それぞれのガスのレギュレータ下流に設置したマスフローコントロ ーラと電磁弁によって調整・制御され、任意の量の単体ガスの添加だけでなく最大3種のガス の同時添加を行うことが可能である。



Fig. 3.6-1 Diagram of cover gas supply/exhaust system



Fig. 3.6-2 Schematic drawing of vapor trap



Fig. 3.6-3 Overall diagram of oxygen concentration control system

3.7 計装機器

IMMORTAL は LBE が循環する一次系をはじめとした 3 つの冷却系により構成される。本節では、装置の運転制御および監視に用いる計装機器について述べる。

3.7.1 一次冷却系(LBE 循環系)の計装機器

3.7.1.1 温度計

最大 500℃の温度条件で LBE の循環運転を行う一次冷却系において、系統の予熱昇温、温度 保持や状態監視の面から温度は最も重要なパラメータのひとつである。また、IMMORTAL を 用いた LBE ターゲットのビーム入射による発熱模擬試験等において、系統各部温度挙動の計測 が重要である。市販の工業製品であり標準規格が定められていることや入手性が良好であるこ とに加え、腐食性を有する LBE を用いた試験環境での使用における過去の実績を考慮して、一 次系の系統配管および各機器に設置する温度計として熱電対を選択した。具体的な仕様を以下 に示す。

規格:	JIS C 1602:2015
階級:	クラス2
種類:	Κ
外径:	1.6 mm, 3.2mm
型式:	シース型
シース材質:	SUS316L

IMMORTAL で設置した熱電対は、JISC1602:2015 クラス2のシース型 K 熱電対である。一次系の系統配管および各機器の表面にそれぞれ設置し、予熱昇温および温度保持用として敷設した ヒータの制御を行う。また、ドレンタンク、膨張タンクの他、加熱器や熱交換器の出入口等の 各部に熱電対を設置し、揚液前の LBE や系統内部温度の状態確認、および運転中の LBE 液温 を計測・監視する設計とした。

3.7.1.2 液位計

液位計は、一次系内の LBE 液位を確認するための計装であり、液面が存在する膨張タンク、 ドレンタンクにそれぞれ設置した。液位計が持つ役割のひとつは、液位状態の確認である。特 に循環運転中の膨張タンク内において流れの変動によって液位が出口配管の位置まで低下した 場合、カバーガスの巻き込みが生じる恐れがある。従って循環運転を行う一次系においては、 膨張タンク内の適切な高さまで LBE が揚液されたことを確認した上で循環運転を開始し、液位 の変動が許容範囲内であることを継続的に監視する必要がある。また、液位の状態監視は系統 機器の破損による装置外への LBE の流出や過去に LBE ループ試験装置(装置名称)のドレン 弁で頻発したスローリークの検知においても有用である。このため、IMMORTAL では連続的 な LBE 液位計測を可能とする誘導型連続式液位計を各タンクに設置した。外形図を Fig. 3.7-1(a) に示す。また、仕様概略は以下の通りである。 型式: 誘導型連続式 測定対象: 溶融鉛ビスマス合金(LBE) 検出部ケーシング材質: SUS304 検出部測定長: 300 mm 案内管材質: SUS316 最高使用温度 500°C 使用温度範囲: 200∼500°C 測定精度: ±5% F.S. (公称值)

連続式液位計は、検出部で発生させた誘導起電力が周辺の液位の上下に伴い変化する原理を 利用して高さ方向に変化する LBE 液位を連続的に計測することが可能であり、これにより揚液 時および循環運転時の液位の確認・監視を行う。検出部は SUS304 製のケーシングで覆われ、 SUS316 製の案内管に挿入・固定して使用する。検出部は LBE と直接触れることが無く、腐食 による損耗を回避できる。測定長は 300 mm、最高使用温度は 500℃である。

液位状態の確認の他に、液位計は装置の破損や復旧に膨大な作業期間を要する事態を回避す るための重要な役割を担う。具体的には、揚液時に過剰な量のLBEが膨張タンク内に充填され た場合等による極端な液位上昇が上記の事態を引き起こす要因であり、これを早急に検知して 対処する必要がある。このため、IMMORTALでは特定位置(液位高)におけるLBE液面の検 出および液位高のレベルスイッチとして電極型接点式の液位計を各タンクに設置した。外形図 をFig. 3.7-1 (b) に示す。また、仕様概略は以下の通りである。

型式:	電極型接点式
検出対象:	溶融鉛ビスマス合金(LBE)
検出用電極材質:	SUS316
検出用電極長:	660 mm (膨張タンク用)
	600 mm(ドレンタンク用)

連続式液位計は液位の状態監視の面において非常に有用である反面、測定長に制約がある点 や測定長の延長に伴い誤差が増大する点が問題である。このため、過去のLBE 試験装置におい て長期間安定的に機能した実績を有する接点式液位計を液位高検知用として採用した。接点式 の構造と原理は非常に単純であり、液位高の位置まで挿入された電極棒とLBE との間の導通を 利用して液面の有無を検知する。計測箇所が一点のみに限定される反面、単純構造であるが故 に動作不良等の不具合が極めて少なく信頼性が高い。膨張タンクでは、接点式によって液位高 を検知することでインターロックを作動させ、ドレン弁を開いてLBE のドレンを行う。一方、 ドレンタンクは装置内のLBE 全量を収容可能であり、極端な液位上昇が生じないと推測される。 このため、ドレンタンク側はインターロックに接続せず、ドレン後における一次系内のLBE 全 量回収の確認を目的として液位高の位置に接点式液位計を設置した。 3.7.1.3 LBE 用流量計

実機LBEターゲットの安定的かつ安全な運用における最も重要な監視対象は、陽子ビームが 通過するターゲット容器ビーム窓の温度に直接関連する一次系冷媒流量である。最大 500℃に 達する高温条件で使用され、不透明かつ鋼材に対して腐食性を示すLBEの循環流量を計測可能 とする手法は限られており、原子力機構においても慣例的に電磁流量計を適用している。しか しながら、循環運転中の時間経過に伴い出力信号が不安定となる、あるいは低下する事象が確 認されている。また、定期的に行う流量校正は、装置内のLBEの揚液とドレンを複数回繰り返 すことで行うため、遠隔操作を前提とした保守点検の作業性が求められる実機LBEターゲット での使用に不向きである。このため、実機LBEターゲットおよびその模擬試験装置である IMMORTALでは、超音波流量計をLBE用流量計として採用した。

採用した超音波流量計は、ナトリウム冷却高速炉に関連する研究開発の中で得られた知見・ 技術^{10,11)}を基に LBE 用として開発したものであり、流れ場の流速により超音波信号が伝播す る時間が変化する現象を利用して媒体の流量を算出する。3.3.6 項に示す通り、センサプラグ液 浸型と非接触型の2つの異なるセンサ配置方法を検討しているが、信号伝播時間の変化を用い る計測原理は共通である。センサプラグ液浸型においては、採用決定前に小型の LBE 循環試験 装置で実機 LBE ターゲットの温度、流速および年間運転時間(5000 時間)を模擬した条件に おいて継続的に安定した出力が得られることを確認している¹²⁾。Fig. 3.7-2 に計測の模式図を示 す。また、仕様概略を以下に示す。

プラグ液浸型、非接触型
溶融鉛ビスマス合金(LBE)
伝播時間差法
ニオブ酸リチウム
2, 4 MHz
~500°C

IMMORTAL の超音波流量計では、対となる 2 つの超音波センサを対向する位置に配置し、互 いに信号の送受信を行う。流れに対して順流 (Fig. 3.7-2 中 a から b) 方向では送信した信号が 速く相手方に到達し、逆流方向では遅く到達する現象を利用し、この時間差を計測して信号伝 播径路上の平均流速を導出した後に流路断面積との積により流量を算出する。本手法は、単純 に信号の伝播時間を計測する手法であり、計測対象へ微細なトレーサ粒子等を懸濁させる必要 が無く、局所の音速変化やノイズによる影響を受けにくい。計測する伝播時間差に対して温度 変化が与える影響を極力低減するため、LBE の音速は計測配管内の LBE 温度により補正され る。LBE 用流量計としての適用可否を決定する第一の条件は使用可能な温度範囲であり、超音 波流量計の場合は高温となる配管または LBE と接液するプラグに接触させて用いる超音波セ ンサの耐熱温度が指標となる。このため、超音波センサの圧電素子には耐熱性、耐放射性に優 れるニオブ酸リチウムを採用し、一次系 EMP 下流側に計測配管を設けて設置した。当該の箇 所は、一次系熱交換器から加熱器の間の低温側(温度条件 350℃)に位置する。これに対して 使用する超音波センサの耐熱温度は 500℃であり、設置箇所での使用条件を満たす。

3.7.1.4 酸素センサ

酸素センサは、固体電解質であるジルコニア内外の酸素分圧差によって起電力が生じる現象 を利用して媒体中の酸素濃度を計測するための計装である。LBE 中の溶存酸素濃度制御を行う 上で最も重要な計装機器であり、ターゲット容器と膨張タンクの間を繋ぐ系統配管(高温側) と流量計測用配管(低温側)に管台を設けて設置した。外形図を Fig. 3.7-3 に示す。また、仕様 概略は以下の通りである。

型式:	空気参照型
測定対象:	溶融鉛ビスマス合金(LBE)
固体電解質:	イットリア安定化ジルコニア (YSZ)
イットリア添加量:	6 mol%
固体電解質形状:	試験管型
	全長: 300 mm
	外径:φ8 mm, 内径:φ5 mm
電極材質:	白金, SUS304
使用温度:	~600°C
使用圧力:	\sim 0.5 MPa
ハウジング材質:	SUS316

固体酸化物を参照極とする酸素センサでは、継続的な使用に伴い参照極の酸素が消費され使用 限界を迎える。IMMORTAL や実機 LBE ターゲットにおいてはジルコニア管の破損や出力異常 等の無い限り、長期間の使用を想定していることから、固体参照極型に比べ長寿命であり設置 方向や昇温工程等の面での取り扱いに制約が少ない空気参照極型の酸素センサを採用した。固 体参照極型では、ジルコニア管を固定するハウジングを完全な密閉構造とすることが可能であ る点に対し、空気参照極型はジルコニア管の内側に周辺空気を導入する必要があり、ジルコニ ア管が破損した際に空気の導入径路を通じてハウジング外へ LBE が漏洩する恐れがある。この ため、ハウジングの空気を導入する径路に迷路状の構造(フリーズシール構造)を適用し、ジ ルコニア破損時にハウジング内部で LBE が固化することで導入径路を閉塞させ、外部への漏洩 を防止する設計とした。なお、採用したフリーズシール構造については、LBE 実液を用いた試 験により実機 LBE ターゲットおよび IMMORTAL 一次系の設計圧(0.5 MPa) に加圧した条件 において、外部への漏洩を完全に防止可能であることを確認している。

3.7.2 二次冷却系(加圧水循環系)の計装機器

3.7.2.1 温度計

ヒータによる系統の予熱昇温、温度保持および状態監視を目的として一次系と同様に K 熱電

対(JIS C 1602-2015 クラス 2)を設置した。具体的な内容は 3.7.1.1 と同様であるため、記載を 割愛する。

3.7.2.2 加圧水用流量計

IMMORTAL に設置した熱交換器の性能評価において加圧水循環流量は重要な計測対象のひ とつであり、運転中に冷却性能が確保されていることを確認する上でも定期的な監視が必要で ある。一方、実機 LBE ターゲットを模擬して二次冷却系は小型化が図られており流量計の設置 スペースが限定される。このため、系統内の屈曲部に設置することが可能である金属管面積流 量計(東京計装: AM72EW-02J4R-5)を用いる。Fig. 3.7-4 に流量計外観写真を示す。また、当 該の流量計の仕様概略は以下の通りである。

型式:	金属管面積流量
測定対象:	加圧水
接続口径:	50A JIS20K
主要材質:	SUS304
媒体温度:	∼400°C
最高使用圧力:	\sim 2.3 MPa
適用流量範囲:	\sim 0.21 m ³ /min
測定精度:	±1.0% F.S.(公称值)

面積流量計は、媒体の流速に応じて上下稼働するフロートを測定管内に収納した構造を有し、 フロート位置により流量を導出する。測定管およびフロート等の主要材質は SUS304 である。 媒体温度 400℃以下、最高圧力 2.3 MPa 以下の条件で使用することが可能であり、適用流量範 囲を含めて IMMORTAL 二次系の加圧水の計測に適用可能である。

3.7.3 三次冷却系 (チラー水循環系) の計装機器

3.7.3.1 温度計

三次冷却系の使用条件は水温 35℃以下であり予熱昇温用のヒータを設置する必要がない。従って、ヒータ制御用熱電対は設置せず、三次冷却系の各部の状態監視のみを目的として一次系と同様に K 熱電対 (JIS C 1602:2015 クラス 2)を設置した。具体的な内容は 3.7.1.1 と同様であるため、記載を割愛する。

3.7.3.2 冷却水用流量計

IMMORTAL では三次系バイパス弁の開度調整により系内を循環する冷却水の流量を調整するため、状態監視を目的として超音波流量計(KEYENCE: FD-Q32C)を設置した。以下に流量計の仕様概略を示す。

センサ設置方式: 非接触型
測定対象: 水(大気圧)
適用配管サイズ: 32A
適用可能材質: 金属管,樹脂管
媒体温度: ~85℃
適用流量範囲: ~0.3 m³/min
測定精度: ±0.5% F.S. (公称値)

センサの設置方式は非接触型であり、測定原理は 3.7.1.3 で記載した LBE 用流量計と同様のた め割愛する。三次系における測定対象が常温、大気圧条件下で用いる水であることから、媒体 温度条件が制約とならない。本流量計は特殊な加工等を施していない一般的な市販品であるが、 適用要件を全て満たしている。適用配管サイズは、IMMORTAL 三次系の系統配管サイズであ る 32A を選択した。大きな特徴として、センサを系統配管外壁へ密着させるために別途カプラ ント剤を塗布する等の必要が無いことに加えて非常に小型であり、長さ 100 mm 程度の直管を 有する箇所であれば設置することができる。このため、設置箇所を変更することにより三次系 の任意の箇所で流量計測を行うことが可能である。

Unit [mm]



Fig. 3.7-1 (a) Schematic drawing of continuous liquid level gauge



Fig. 3.7-1 (b) Schematic drawing of contact type of liquid level gauge



Fig. 3.7-2 Typical measurement configuration of propagation time difference method



Fig. 3.7-3 Appearance photograph and schematic drawing of oxygen sensor for LBE



Fig. 3.7-4 Photograph of flowmeter for secondary cooling system

3.8 データ収録・監視

IMMORTAL は実機 LBE ターゲットの一次系および二次系を模擬した試験装置であり、特に 一次系各部の温度や循環流量などの情報は LBE 用機器の機能試験および性能評価において極 めて重要である。このため、一次系に設置した各計装で得られた情報を装置制御・監視プログ ラムにより PLC を介してタッチパネル内の外部保存媒体 (CF カード)に収集する設計とした。 二次系以降の情報はデータロガー (KEYENCE: NR-600) を経由して PC に収集する。データ ロガーは温度、電圧出力を最大で 64 ヶ所分取得することが可能であり、二次系以降の情報の他 に試験の目的に応じて追加した熱電対や圧力計等の情報を適宜収集することができる。

IMMORTAL タッチパネル上に表示される制御・監視プログラムの操作画面の内、Fig. 3.8-1 に示すメイン操作画面では状態監視用として、一次系系統図と共に各部温度、流量、LBE 液位 やカバーガス相の圧力等が表示される。加えて加熱器の投入・遮断操作、一次系ドレン用空操 弁の開閉操作、EMP の運転停止操作ボタンの他に、データログ操作、予熱昇温用ヒータ電源の 投入遮断操作を行うボタン(画面下部側)が設けられており、本画面上で一次系の運転操作を 包括的に実行・管理することが可能である。画面上の系統図に沿って緑色で表示される各部の 予熱ヒータは、電源投入後に赤色点灯する。その他、装置側で温度超過をはじめとする異常を 検知した際には、警告音が発報すると共に画面上部に警報表示が点滅する。また、画面上部右 端には緊急停止ボタンを設けており、装置附帯の機械式の緊急停止ボタンと同様に二次系を含 めた IMMORTAL 全体の緊急停止操作が可能である。メイン操作画面の下部に配置した複数の ボタンの内、先に述べた両端を除く各ボタンは画面切り替え操作用であり、トレンドグラフ表 示、ヒータ制御設定、警報設定および現在発報している警報の種別を表示する画面へ移行する ことができる。Fig. 3.8-2 に示すヒータ制御設定画面では、一次系各部の予熱昇温用ヒータおよ び加熱器の制御温度設定と制御手法の切替操作の他、現在のヒータ出力値が表示される。各ヒ ータおよび加熱器は、PID 制御の他、任意の設定により一定値の出力による制御が可能である。

IMMORTAL の各部計装は今後の実験、開発状況により追加または変更することが想定される。将来的には、制御・監視プログラムを改良すると共に運転に必要となる全系統の情報を全て一元化して管理することを計画しており、TEF-T におけるターゲット関連機器などの制御系の統括制御システムの仕様に準拠したプロトタイプ機を導入¹³⁾している。

- 62 -


Fig. 3.8-1 Main control window of IMMORTAL

123°C

123°C

警報設定画面
警報表示一覧画面

123°C

トレンドグラフ画面 制御設定画面

LOGGING CF CARD データログ ERROR 操作 出力電流

予熱ヒー

1.0 A

2014年11月10日 09時32分23秒

制御設定画面1							
TIC 1	TIC 2	TIC 3	TIC 4	TIC 5	TIC 6	TIC 7	TIC 8
が ンフ [*] タンク(DT) ビータ 1 H 1	ダンプタンク(DT) ビータ2 H 2	ダンプタンク(DT) ヒータ3 H3	膨張タンク(EXT) 本体ヒータ H4	膨張タンク(EXT) 遠隔フラングヒータ H 5	加熱器(MH) ビータ H 6	冷却器(CL) ヒータ1 H 7	冷却器(CL) ビータ2 H 8
PV 123 ℃	PV 123 °C	PV 123 ℃	PV 123 ℃	PV 123 ℃	PV 123 ℃	PV 123 °C	PV 123 ℃
SV 300 °C	SV 300 °C	SV 300 °C	SV 300 °C	SV 300 °C	SV 300 °C	SV 300 °C	SV 300 °C
MV_0.0%	MV 0.0%	MV_0.0%	MV 0.0%	MV 0.0%	MV 0.0%	MV_0.0%	MV_0.0%
SET 0.0%	SET 0.0%	SET 0.0%	MAN 0.0%	SET 0.0%	MAN 0.0%	SET 0.0%	SET 0.0%
AUTO A.T	AUTO A.T	AUTO A.T	AUTO A.T	AUTO A.T	AUTO A.T	AUTO A.T	AUTO A.T
MANU	MANU PID	MANU PID	MANU	MANU PID	MANU	MANU	MANU PID
TIC 9	TIC 10	TIC 11	TIC 12	TIC 13	TIC 14	TIC 15	TIC 16
フィルタ1(F1) 本体ヒータ H9	フィルタ1(F1) 遠隔フランジヒータ H1O	フィルタ2(F2) 本体ヒータ H11	フィルタ2(F2) 遠隔フランジヒータ H12	弁(AV-1) ビータ H13	チャージ・トドレンライン1 (DT~AV-1)とータ H 1 4	チャージ・トドレンライン2 (AV-1~F1)と一タ H 1 5	循環ライン1 (F1~MH)ヒータ H16
PV 123 ℃	PV 123 ℃	PV 123 ℃	PV 123 ℃	PV 123 ℃	PV 123 ℃	PV 123 ℃	PV 123 °C
SV 300 °C	SV 300 °C	SV 300 °C	SV 300 °C	SV 300 °C	SV 300 °C	SV 300 °C	SV 300 °C
MV 0.0%	MV 0.0%	MV 0.0%	MV 0.0%	MV 0.0%	MV 0.0%	MV 0.0%	MV 0.0%
SET 0.0%	<u>SET 0.0%</u>	MAN 0.0%	MAN 0.0%	MAN 0.0%	MAN 0.0%	MAN 0.0%	MAN 0.0%
AUTO A.T	AUTO A.T	AUTO A.T	AUTO A.T	AUTO A.T	AUTO A.T	AUTO A.T	AUTO A.T
MANU PID	MANU	MANU	MANU	MANU	MANU	MANU	MANU PID
日間登録							
						SV一括設定	
TIC 9 TIC 10 TIC 11 TIC 12 TIC 13 TIC 14 TIC 15 TIC 16						300°C	
LOGGING			メイン画面	警報表示一覧画面	1		

Fig. 3.8-2 Setting window of heater control

4. 総括

J-PARCでは、ADSを構成する構造材料の照射後試験を主な目的としたLBE核破砕ターゲットシステムの実現に向けた研究開発を行っている。当該のシステムにおいて核破砕標的および 冷却材として用いるLBEは、通常の計装の適用が困難である高い温度域での使用を計画してい る他、鋼材に対して腐食性を示す等の特徴を有しており、LBEが循環する系統への適用を目的 とした計装および機器について、これまで個別に研究開発が進められてきた。これらを統合し、 実規模での運用による実証試験を行うことを目的として、核破砕標的循環試験装置 (IMMORTAL)の設計・製作を実施した。

実機 LBE ターゲットを模擬したループ試験装置である IMMORTAL は、その一次系に実機 LBE ターゲットに導入するものと等しい性能および機能を持つ LBE 用機器や計装を多数具備 する。現段階における計画では、LBE 機器の性能評価や系統の制御や運転特性を把握するため の試験を行う他、過剰入熱や冷却材循環停止時などの事態における挙動を予測する安全解析コ ードの検証データを取得する試験を実施していく予定である。また、試験を通じて抽出された 課題を基に、より安全性の高い LBE ターゲットの実現に資するため、修正・改造を実施してい く。その他、追加の設計検討が要求される事項は下記の通りである。

- A) 実機 LBE ターゲットを含み、現段階では熱交換器構造の単純化および小型化の観点から、 全系統に相変化を伴わない液体冷媒を適用する設計である。各系統間の温度差が大きく、 前段の冷媒温度が後段の沸点を超える温度で運用することを想定しており、単純に熱移行 を解く基礎式に現れない事象、例えば後段冷媒の流れが停滞する箇所周辺の伝熱面で局所 的な沸騰が生じる懸念がある。各系統の循環運転開始の直前および直後においては特に注 意が必要であり、装置運転プロセスにおける課題が多い。このため、IMMORTALの運用を 通じて問題点を抽出し、プロセスの見直しに留まらず熱交換部等の箇所の構造変更、一次 系 LBE を除く後段の系の冷媒変更を含めた対策を講じることを計画している。
- B) IMMORTAL は模擬試験装置である都合上、実機 LBE ターゲットの運用に必要となる数量の計装を備える。一方、例えば熱交換器や加熱器に代表される熱機器やターゲット容器ビーム窓のような箇所の熱伝達特性を把握する試験を行う場合においては、装置運用上において必要となる温度計の他に、壁表面等の複数の箇所の温度情報が必要となる。すなわち、系統の維持・管理の側面でなく物理的現象を評価する上で必要となる計測点が現状において不足している。このため、評価対象となる現象に応じた計装の追加等を含めた改造を実施することを予定している。
- C) 3.8節で述べたように、現状において各計装から得られる計測データは、系統毎にそれぞれ 別の収録機器に記録する設計であり、上記 A)および B)に記載した通り、IMMORTAL を構 成する機器の設計変更や計測点数の増強を計画している。このため、将来的に全計測デー タを集約し、一元的に管理することを目的とした改造を合せて実施する予定である。

謝辞

本装置の実現において、株式会社アトックスの山口和司氏より構想段階から装置の仕様に関 する様々な助言、指摘、指導を頂きました。また、設計・製作および運転保守においては、高 温の液体金属を循環させる様々な装置、機器を実際に製作している助川電気工業株式会社の竹 林修市氏をはじめ、塙政成氏、高橋光俊氏、武野尚文氏、小澤竜太氏らのこれまでの経験に基 づく知見により多大なるご協力を頂きました。その他ご協力頂いた核変換ディビジョン員をは じめとする皆様を含め、関係者の方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 1)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), 539p.
- H. Obayashi, et al., Remote Handling Technology for Lead-Bismuth Spallation Target System, Proc. 3rd J-PARC Symposium (J-PARC2019), Tsukuba, Japan, 2019, JPS Conf. Proc. 33, 011048 (2021), 6p.
- 3) IAEA, Experimental Facilities in Support of Liquid Metal Cooled Fast Neutron Systems, IAEA Nuclear Energy Series NP-T-1.15, (2018), 52p.
- 4)日本機械学会, 伝熱工学資料, 改訂第4版, (1986).
- 5) OECD/NEA, Handbook on Lead-bismuth Eutectic Alloy and Lead Properties, Materials Compatibility, Thermal-hydraulics and Technologies 2015 Edition, (2015).
- 6) R.A. Seban, et al., Heat transfer to a fluid flowing turbulently in a smooth pipe with walls at constant temperature, Trans. ASME, 73, (1951), pp.803-809.
- J. Konys, et al., Electrochemical Oxygen Sensors for Corrosion Control in Lead-Cooled Nuclear Reactors, Corrosion, Vol. 65, No.12, (2009), pp.798-808.
- L. Brissonneau, et al., Oxygen control systems and impurity purification in LBE: Learning from DEMETRA project, Journal of Nuclear Materials, Vol. 415, No.3, (2011), pp.348-360.
- 9) A. Aerts, et al, The LBE Coolant Chemistry R&D Programme for the MYRRHA ADS: Chemistry and Control of Oxygen, Corrosion and Spallation products, Proc. 14th Int. Workshop Spallation Materials Technology, Fukushima, Japan, 2018, JPS Conf. Proc. 28, 071002 (2020), 13p.
- 10)平林勝,他,超音波による流速分布計測手法の高度化研究,PNC TN9430 98-002 (1998), 29p.
- 11)平林勝,他,相互相関処理を利用した超音波速度分布計測手法の開発,JNC TN9400 2002-016 (2002),72p.
- 12) H. Obayashi, et al., Development of Plug-in Type Ultrasonic Flowmeter for Lead-Bismuth Spallation Target System, Proc. 11th International Topical Meeting on Nuclear Thermal Hydraulics, Operation and Safety (NUTHOS-11), Gyeongju, Korea, 2016, N11P0107 (2016), 10p., in USB flash memory.
- 酒井 健二,他,TEF-T 統括制御システムプロトタイプ機の開発,JAEA-Technology 2019-009 (2019),18p.