

IFMIF 原型加速器における冷却水システムの保守に関する現状と課題

MAINTENANCE EXPERIENCE OF THE WATER-COOLING SYSTEM IN THE LINEAR IFMIF PROTOTYPE ACCELERATOR (LIPAc)

熊谷公紀^{#, A)}, 近藤恵太郎^{A)}, 長谷川和男^{A)}, ヤンカリン^{B)}, ドミニクヘックス^{B)}, ダビデクレイナー^{B)}, フランチェスコスカンタンビューロ^{B)}, ファビオシモンディ^{C)}, エルベジッコ^{C)}

Kohki Kumagai^{#, A)}, Keitaro Kondo^{A)}, Kazuo Hasegawa^{A)}, Yann Carin^{B)}, Dominique Gex^{B)}, Davide Kleiner^{B)}, Francesco Scantamburlo^{B)}, Fabio Cismondi^{C)}, Hervé Dzitko^{C)}, IFMIF/EVEDA Integrated Project Team

^{A)} National Institutes for Quantum Science and Technology

^{B)} IFMIF/EVEDA Project Team

^{C)} Fusion for Energy

Abstract

In the framework of the IFMIF/EVEDA project, the Linear IFMIF Prototype Accelerator (LIPAc) is being commissioned in Rokkasho, Japan. Water-cooling systems (WCS) have been used for each subsystem in the LIPAc. Maintenance of the WCS is a key point to prevent failure of the subsystems and to increase the availability of the accelerator. We have faced issues with the WCS in the subsystems, such as corrosion and water clogging. The present study reports several enhancements made in the maintenance to overcome the issues. In addition, this report describes our maintenance activities which reduce the risks of further troubles with the WCS.

1. はじめに

IFMIF/EVEDA プロジェクトの一環として、Fig. 1 に示す IFMIF 原型加速器 (LIPAc) によるビームコミッションングが量研六ヶ所フュージョンエネルギー研究所で実施されている[1]。LIPAc では、将来の核融合炉材料照射試験用中性子源への適用に向けて、ビーム電流 125 mA の重陽子を 9 MeV まで加速できることを実証する。2021 年 7 月から 2024 年 6 月までの期間で実施された LIPAc のフェーズ B+運転[1]では、超伝導加速器の代わりに MEBT Extension Line (MEL) を設置し、重陽子ビームを 5 MeV まで加速する実験を行った。2024 年 7 月より MEL を撤去して超伝導加速器を設置する作業を行っている。

Figure 1 に示す通り、LIPAc は入射器、及び高周波四重極加速器 (RFQ)、中エネルギーエネルギー輸送系 (MEBT)、超伝導加速器、高エネルギーエネルギー輸送系 (HEBT)、ビームダンプといったサブシステムで構成される。LIPAc のサブシステムは物納貢献 (In-kind contribution) として、CEA (フランス)、INFN (イタリア)、CIEMAT (スペイン) 等といった欧州の研究機関から日

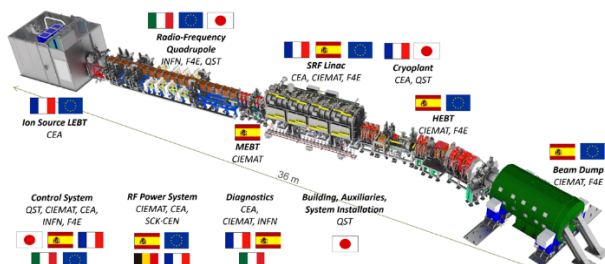


Figure 1: Linear IFMIF prototype accelerator (LIPAc).

[#]kumagai.kohki@qst.go.jp

本に納入され、量研によって据付工事・統合作業を実施している。

2. LIPAc 冷却水システム

LIPAc のビーム出力は、125 mA、9 MeV のフルパワービーム運転において 1.125 MW である。このような高出力のビーム生成のため LIPAc では水冷を多用しており、各サブシステムは「スキッド」と呼ばれる専用の冷却水システムを有する。Figure 2 にこれら冷却水スキッドを含む LIPAc 冷却水システムの概略図を示す。冷却水スキッドは、サブシステム中の機器 (例えば電磁石、スリット、ビームターゲット) の熱負荷による損傷を防ぐため、若しくはキャビティ温度の制御に用いられる。

Figure 2 に示す冷却水スキッドは、Fig. 1 に示すサブシステムと同じ責任所掌で、欧州の各研究機関により設計・製造・調達が行われた。各冷却水スキッドは、そのサブシステム専用のポンプ、熱交換器などが一つの架台に搭載されている。各スキッドとサブシステムとを接続する冷却水系は一次側冷却水系と呼ばれている。Figure 2 に示す通り、各スキッドには冷却塔やターボ冷凍機で温度調整された二次側冷却水が供給されており、スキッド内の熱交換器を介して一次側冷却水の温度調節を可能に

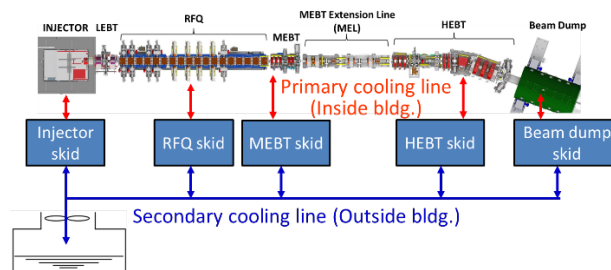


Figure 2: LIPAc water-cooling system (WCS).

している。二次側冷却水系の設計・製造・調達は量研の責任所掌である。下記に LIPAc 冷却水システムの欧州側 (CEA, INFN, CIEMAT 等) と日本側 (QST) との責任所掌をまとめる。

- 一次側冷却水系の設計: 欧州、
- 一次側冷却水系の製造: 欧州、
- 建屋とユーティリティ (二次側冷却水等): 日本、
- 日本現地サイトでの据付、工事作業: 日本、
- 冷却水システムの試運転: 欧州と日本、
- 冷却水システムの保守: 欧州と日本。

3. 冷却水システムのトラブル事例

LIPAc の各サブシステムが日本に納入され、運転及び保守の段階に移行されて以降、冷却水システムは多くのトラブルに直面してきた。異なる研究機関、文化、外国人同士が絡む LIPAc プロジェクトでは、トラブルが生じた後の迅速な情報共有が、二次被害の防止や再発防止のために重要である。LIPAc ではイベントレポートシステム (ER システム) と呼ばれるソフトウェアを開発し、トラブル発生時の情報共有に活用している。ER システムはトラブルの情報共有に加えて、及びトラブル発生に至った過程の追跡、品質保証の基本に従った解決策の解析に用いられる。

トラブルが発生したとき、その発生日と内容を ER システムで迅速に報告し、プロジェクト内で情報が共有される。ER 責任者が各トラブルの分析者を指名し、分析者によって根本原因分析や解決策が提案される。ER システムによって、トラブルが生じたサブシステムやトラブルの要因等の統計データも併せて記録される。ER システムで報告されたトラブルは 2024 年 7 月時点で 600 件を超えている。サブシステム別では高周波源システム、入射器の順でトラブルの報告件数が多い。ER システムを用いた知見の蓄積は、将来の核融合中性子源 (A-FNS、IFMIF-DONES) への活用を念頭に置いている。

ER システムで報告された冷却水システムのトラブル事例として、腐食による漏水を紹介する。LIPAc サブシステムの制御盤が設置されている部屋の点検中、床におよそ 40 L の漏水が確認された。制御盤内部の調査を行った結果、Fig. 3 に示すように、入射器の絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ (IGBT) 用のアルミニウム製冷却パネルの腐食部から漏水が確認された。アルミニウム製冷却パネルにステンレス製の継手が接続されており、アルミニウムはステンレスよりもイオン化傾向が大きいいため、異種金属接触腐食が根本原因の一つに挙げられた。是正保守として、イオン化傾向がステンレスに近い、銅製の冷却パネルに交換された。

ER システムで報告された別のトラブル事例として、冷却水が目詰まりが挙げられる。高周波源システムの高圧電源の冷却水で流量がインターロックレベルまで低下した。冷却水配管部品を分解した結果、Fig. 4 に示すスプリングスター型の流量制限器の内部に黒い粒子がたまり、目詰まりを起こしていることが確認された。化学分析の結果、黒い粒子の成分は主に銅と鉄であった。また黒い金属粉に加え、同冷却水系等に設置されている繊維フィル

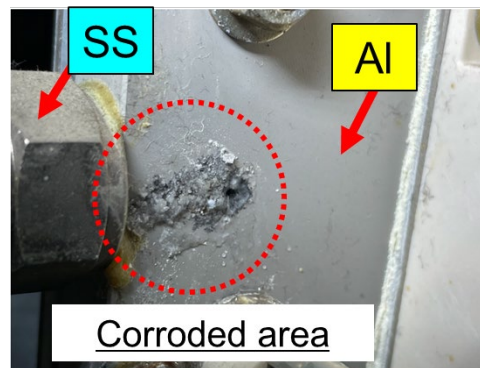


Figure 3: Corrosion of the cooling panel for IGBT for the injector.

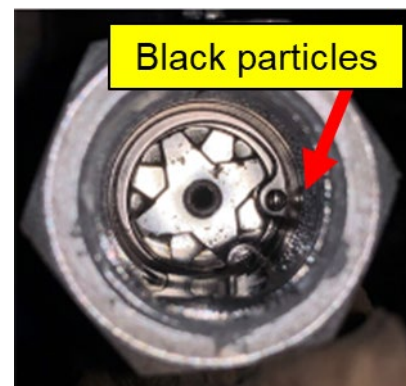


Figure 4: Black particles inside the flow rate restrictor of spring star type.

タでニッケル金属片も捕集された。根本原因の一つとして、冷却水配管部品にニッケルメッキ真ちゅう部品が混入していたことが挙げられた。エロージョンによってニッケルメッキが剥がれ、真ちゅう中の銅が腐食により溶出したと考えられた。また鉄の金属粉については、ステンレス配管溶接部の腐食が原因に挙げられた。是正保守として、スプリングスター型の流量制限器を目詰まりしにくいオリフィス型に交換した。また 25 μm メッシュの繊維フィルタの追加、ニッケルメッキ真ちゅう部品のステンレス部品への交換が施されている。

4. 冷却水システムの保守の現状と課題

前章で述べたトラブルが発生した後の是正保守は、サブシステムの運転を早期に再開するために突発的に実施される。通常は加速器の運転中における装置の故障を未然に防ぐため、年一回、2 カ月間、予防保守期間を設けている。LIPAc プロジェクトでは毎年、サブシステムと保守担当者で打ち合わせを行い、保守の計画表を見直し、記録表を更新している。

予防保守では寿命を迎えた部品を、故障する前に交換する。LIPAc 冷却水システムの予防保守でこれまで直面してきた課題の一つとして、物納貢献で納入されたサブシステムの設計図書の不足がある。例えば機器リストや部品表といった設計図書が提出されず、部品の型式等が分からずに交換ができない問題に直面している。前

もって物納貢献に関係する研究機関と入念に協議し、必要な設計図書を提出するように予め合意を得ておくことが重要である。別の課題の例として、欧州の研究機関で製作されたサブシステムの多くが海外の部品で構成されており、日本で容易に同一部品を調達できないことも挙げられる。

事前に上記のような課題を克服するため、サブシステムの設計段階から十分にその保守について考慮することが必要である。そのため、保守の担当者や責任者が、サブシステムの設計担当者と共に設計を行うことが有効な手段と考えられる。設計時における保守性の考慮として例えば、冷却水のメインポンプに冗長性を設けて一方の保守期間中に他方で運転できるようにする、ストレーナやフィルタには適切にバイパス配管を設けてストレーナ等の清掃中にバイパス配管で運転を継続できるようにする、といったことが挙げられる。設計に加えて製造、及び据付、試運転でも同様に、保守担当者が積極的に関与して協業関係を構築することで、保守性の向上が見込まれる。

5. 設計・試運転における保守への考慮

装置の故障による加速器の停止を予防するために、設計段階においてその保守について考慮することが重要になる。Figures 2 に示す LIPAc ビームダンプ[2]の設計では、腐食による目詰まりの予防が考慮されている。重陽子ビームはビームダンプ中の円すい形の銅ターゲットに衝突して止まる。ビームダンプ内の銅ターゲットの周りに最大速度 10 m/s の水を循環して冷却している。ビームダンプ冷却スキッドの設計では銅ターゲットの腐食抑制が考慮され、Fig. 5 に示す通り冷却水の溶存酸素、及び pH、導電率が制御されている。

ビームダンプスキッドの試運転段階では、ビームダンプへの通水前に、ファイバースコープを用いてステンレス配管内部に腐食が無いか調査を行った。調査の結果、Fig. 6 (a) に示す通り、欧州で調達されたプレハブ配管の溶接部に腐食が確認された。そのまま冷却水を循環すると溶接部の錆が剥がれて銅ターゲット周りで目詰まりが生じる可能性がある。したがって通水前に配管内部の溶接線腐食部に対して酸洗いと不動態化処理を実施した。酸洗いでは配管内に濃度 10%以上のリン酸を満たし、1 時間循環して錆を除去した。不動態化処理では溶接部に濃度 4 - 5%の硝酸を 16 時間以上接液させた。Figure 6 (b) に示す通り、酸洗い後は溶接部の錆が除去されており、不動態膜の再形成も確認された。ビームダンプスキッドの運転開始以降、ビームダンプ冷却水の見詰まりに起因する流量低下等は観測されておらず、LIPAc の稼働率向上に貢献している。

6. まとめ

LIPAc 加速器の冷却水システムの保守について、これまで冷却水部品の腐食や目詰まりといった様々なトラブルに直面してきた。そのような問題に直面するたびに、日本と欧州の研究機関とで一緒に議論を重ね、装置の保守や管理方法について改善・改良を施してきた。冷却

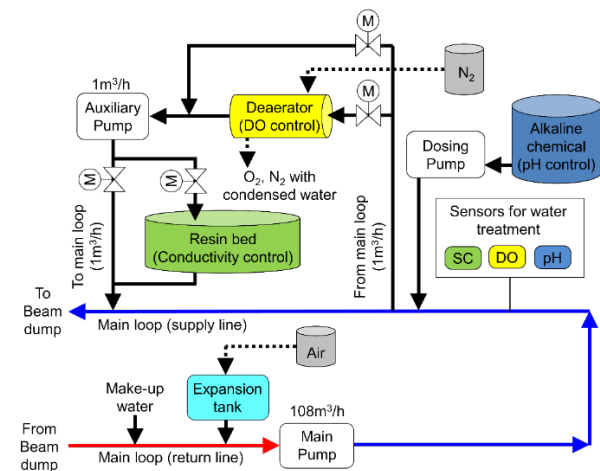
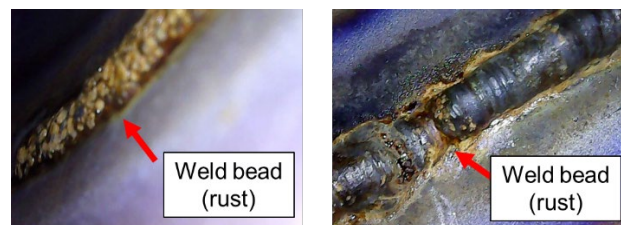


Figure 5: Outline sketch of the beam dump cooling skid [3].

(a) Before pickling and passivation



(b) After pickling and passivation

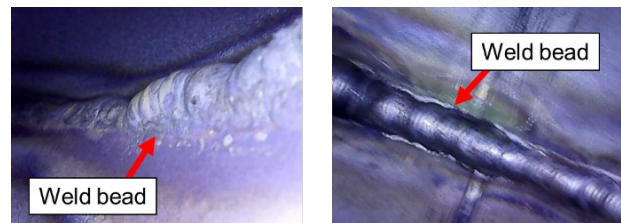


Figure 6: Weld beads inside stainless-steel piping between the beam dump and the beam dump cooling skid (a) before and (b) after pickling and passivation process [3].

水システムの予防保守により、装置にトラブルが発生するリスクを低減して、LIPAc 加速器の稼働率向上に寄与している。

参考文献

- [1] H. Dzitko *et al.*, “Overview of Broader Approach activities”, Fusion Engineering and Design, 201, 2024, 114259.
- [2] B. Brañas *et al.*, “The LIPAc beam dump”, Fusion Engineering and Design, 127, 2018, pp. 127-138.
- [3] K. Kumagai *et al.*, “Integration and commissioning of the water-cooling system for the beam dump of the linear IFMIF prototype accelerator (LIPAc)”, Fusion Engineering and Design, 201, 2024, 114245.