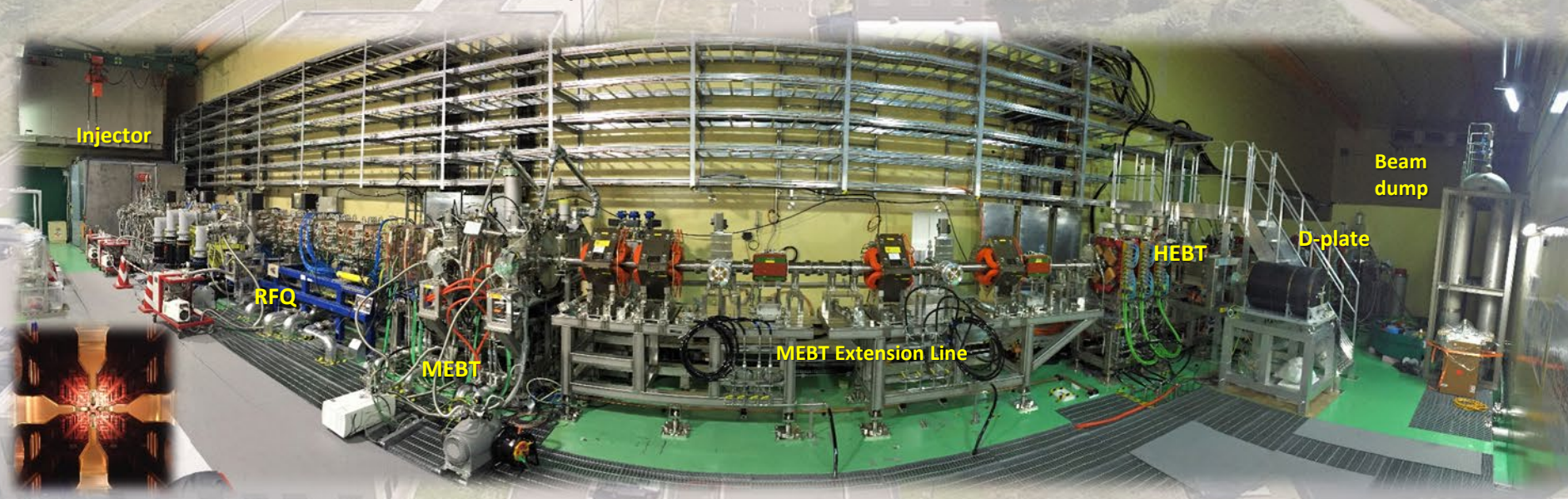


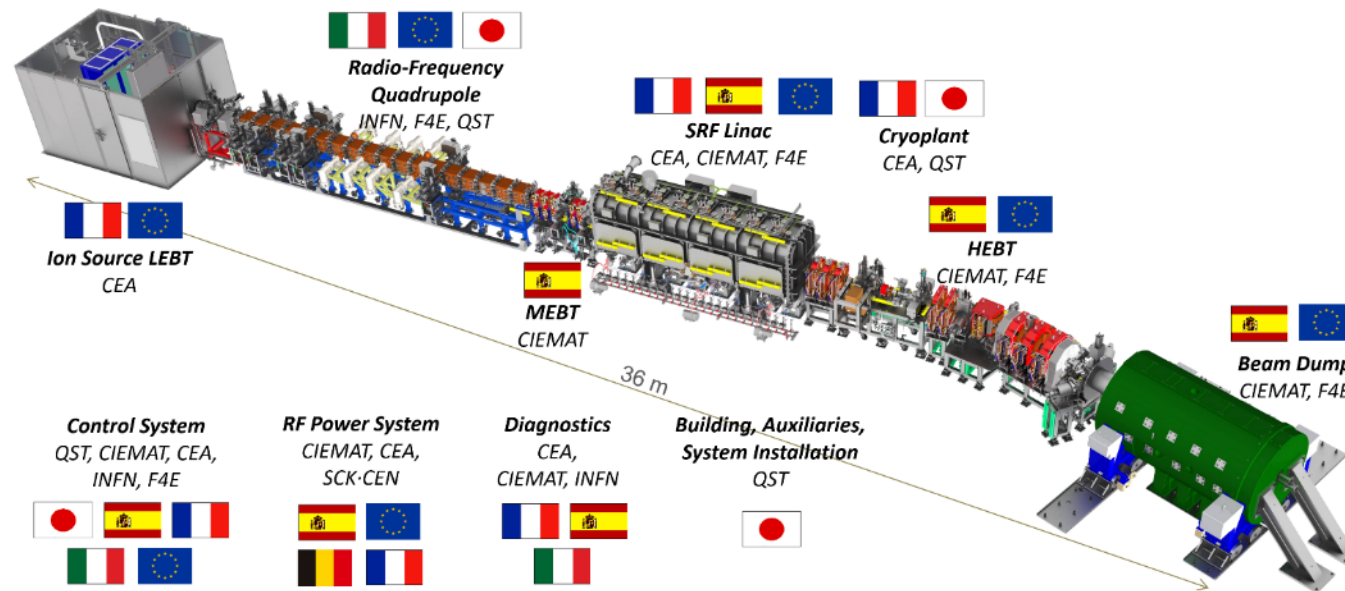
IFMIF原型加速器における冷却水システムの保守に関する現状と課題

○熊谷 公紀, 近藤 恵太郎, 長谷川 和男(量研), ヤン カリン, ドミニク ヘックス, ダビデ クレイナー, フランチェスコ スカンタンビューロ (IFMIF/EVEDA Project Team), ファビオ シモンディ, エルベ ジッコ(F4E)



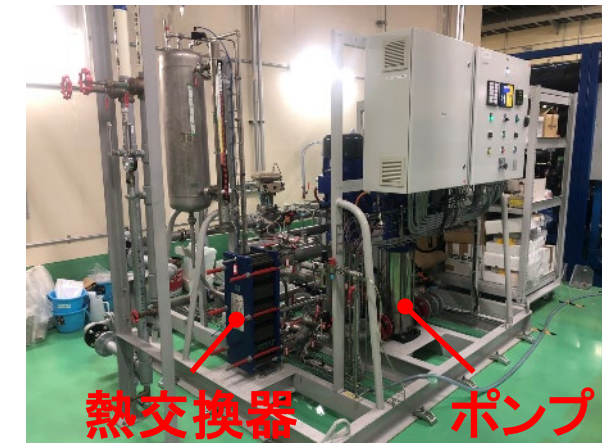
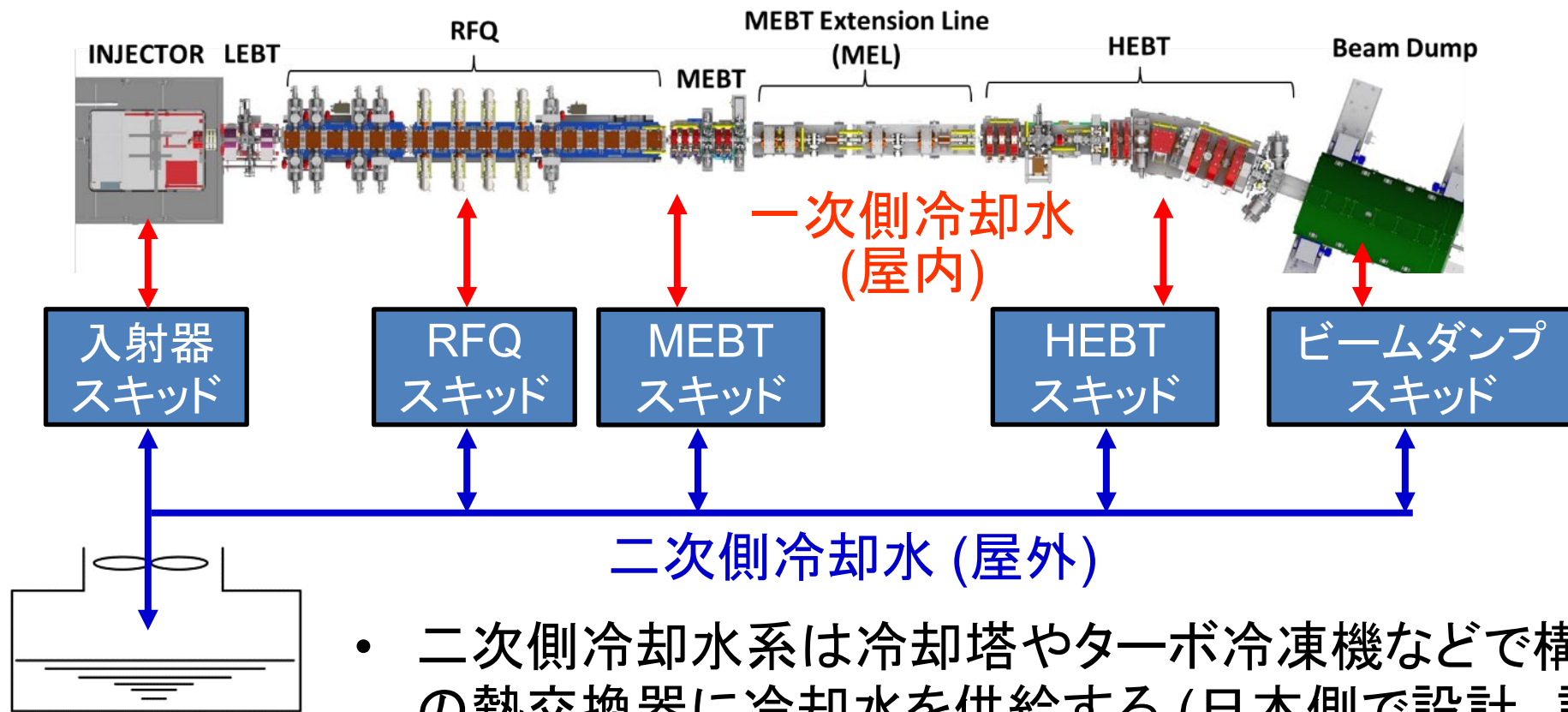
Linear IFMIF Prototype Accelerator (LIPAc)

Rokkasho Institute for Fusion Energy



- 核融合炉材料の中性子照射試験に用いる重陽子加速器の実証機。
- 定格ビームエネルギー: 5 MeV (RFQ出口), 9 MeV (超伝導加速器出口)
- 定格ビーム電流: 125 mA
 - ✓ 2021年12月より、連続波運転を目指して、5 MeVの重陽子ビーム運転を実施。
 - ✓ 2024年6月時点で、デューティ比8.75%を達成 (パルス長3.5 ms、繰り返し40 ms、118 mA)。
 - ✓ 2024年7月より、9 MeVまでのビーム加速のため超伝導加速器の据付準備作業を開始。

- 電磁石やコリメータなどを有する各サブシステム (入射器など) は冷却水が必要。
- 冷却水スキッド: 各サブシステム専用に、ポンプ、熱交換機などの機器を一つの架台に搭載した冷却水循環装置 (欧州側で設計、調達、製造)。

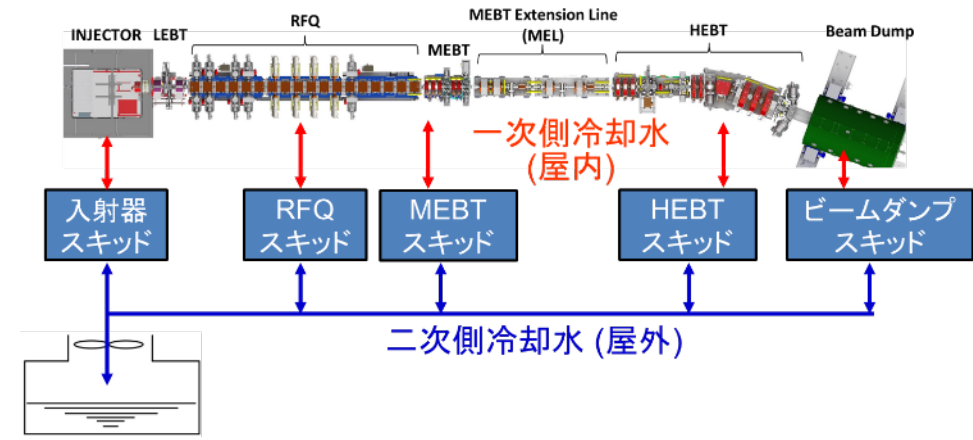


入射器スキッドの例

- 二次側冷却水系は冷却塔やターボ冷凍機などで構成され、各スキッドの熱交換器に冷却水を供給する (日本側で設計、調達、製造)。

- 欧州側 (例: フランスCEA, イタリアINFN, スペインCIEMAT, 欧州F4E) と日本側 (QST) との取り決めにより、LIPAc冷却水の分担は下記の通り区分けされている:

一次側冷却水系の設計		
一次側冷却水系の製造		
建屋とユーティリティ (二次側冷却水系等)		
六ヶ所での据付、工事作業全般		
冷却水システムの試運転		
冷却水システムの保守点検		



- 本発表では冷却水系の試運転、保守点検時に現場で経験したトラブル事例などを紹介する。
- 異なる研究機関、文化、外国人同士が絡む複雑なプロジェクトで、トラブルを克服するために重要と認識されたことは、国内現場と同様に、問題の「見える化」と「情報共有」であった。

■ ERシステムはLIPAcサブシステムにトラブルが生じた際に用いられている。

1. 情報共有:

- 問題発生から報告までの早さを優先順位に置いている。最初の報告は、何が、どこで、だけで十分。
- 問題の見える化が第一優先。

2. トラブルの分析:

- プロジェクトの責任者が各トラブルにつき分析者を指名する。
- 分析者は根本原因を探り、解決案を提示する。

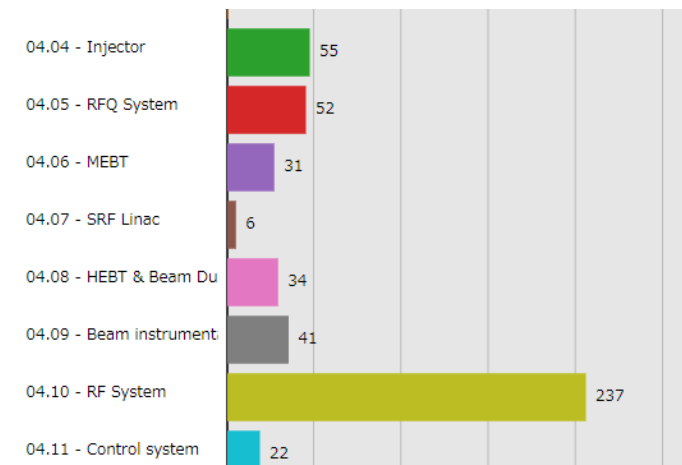
3. トラブルの記録:

- 将来の加速器、中性子源プロジェクトに向けた経験の蓄積。

✓ 2017年の運用から600件を超えるトラブルが報告されている。

✓ 以下のスライドではERシステムで報告されたトラブル事例を紹介する。

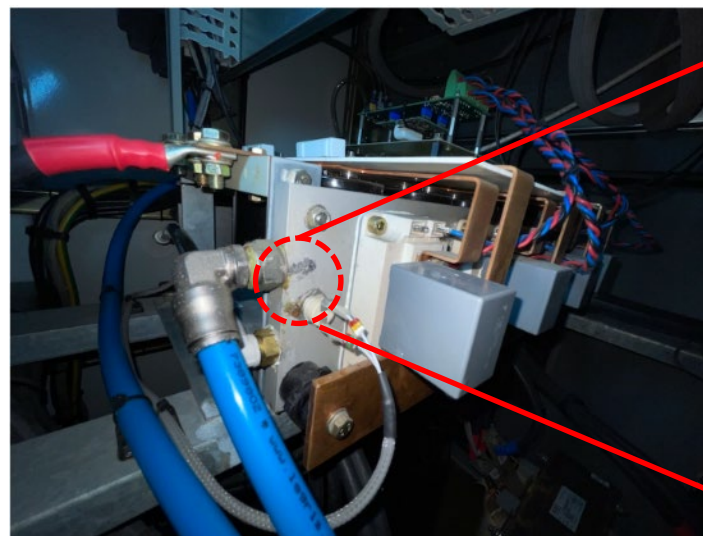
The screenshot shows the ER system interface. On the left is a user menu for 'Koiki Kumagai' with options like 'ERMS', 'Event Reports', 'Actions', 'Statistics', 'Users', and 'Help'. The main area displays a report titled 'Water leak at LET4'. It includes a table with 'Initial data' and 'Revision: #3'. The 'Description' section contains text about a water leak on 27th December 2021 and a photo of the leak site. A yellow 'SAMPLE' label is overlaid on the right side of the screenshot.



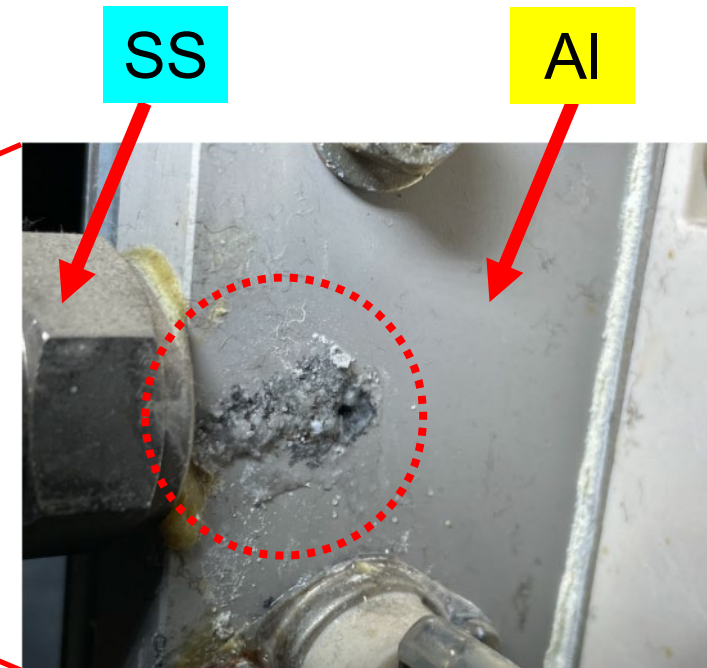
- 制御盤内の絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ (IGBT) 用の冷却パネルの腐食による漏水。
 - ある朝、制御盤エリアの床におよそ40 Lの水が漏れていることが確認された。
 - 制御盤の中を確認し、IGBTのアルミニウム製冷却パネルの腐食部から漏水があることが確認された。冷却パネルにはステンレス製の継手が接続されていた。



制御盤エリア



制御盤内
(IGBT冷却パネル)



腐食箇所

□ 根本原因分析：

- アルミニウム冷却パネルとステンレス継手による異種金属接触腐食が生じていた。

□ 解決案：

1. 応急処置：

- 腐食部にアルミの薄板を接着剤で貼り付ける。
- 定期的に腐食の進行具合をチェックする。

2. 長期的な解決法：

- 冷却パネルをアルミ製から銅製のものに交換する。
- アルミはステンレス、銅よりもイオン化傾向が大きいいため。ステンレスと同じくらいのイオン化傾向である銅との組み合わせにより腐食しないようにする。

➤ **スプリングスター型流量制限器内の目詰まり。**

- 高周波源システムにおける高圧電源装置内の冷却水ラインで、流量が規定値以下まで低下し、インターロックにより装置が停止した。



高圧電源装置



流量制限器 (スプリングスター型)

(<https://www.kobold.com/Flow-Restrictors-REG>)



流量制限器内部

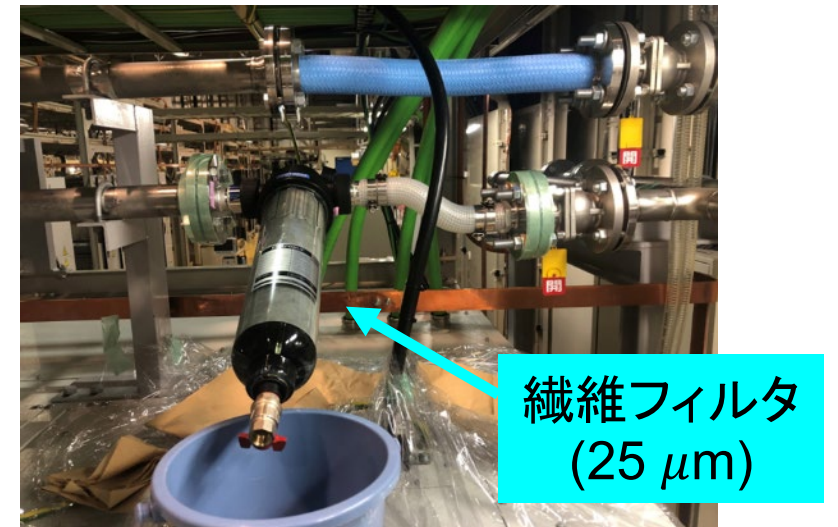
- 流量制限器内部で発見された黒い粒が目詰まりの原因と考えられた。化学分析を行い、この黒い粒の組成は主に銅と鉄であった。
- 黒い金属粉に加え、繊維フィルタで多くのNi金属片が捕集された。冷却水配管は主にステンレス製であったため、Ni片の発生源が当初不明であった。

□ 根本原因分析:

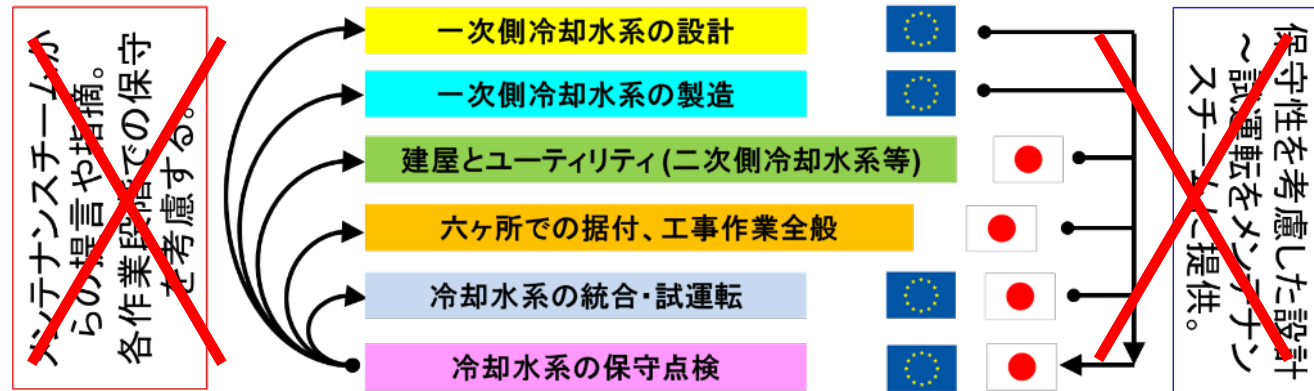
- 冷却水ラインの中に、Niメッキ真ちゅう部品が使われていた。
- エロージョンなどによりNiメッキがまず剥がれ、真ちゅうの銅が酸化銅となり腐食し、黒い金属粉が生成されたと考えられた。

□ 解決案:

- 流量制限器をオリフイスタイプに変更。
- Niメッキ真ちゅう部品をステンレス部品に交換する。
(不用意に異種材料部品を使用しない)
- 25マイクロメッシュの繊維フィルタを追加。
- 定期的に繊維フィルタをチェックし、フィルタ前後の圧損が規定値を超えたら中のスクリーンを交換する。



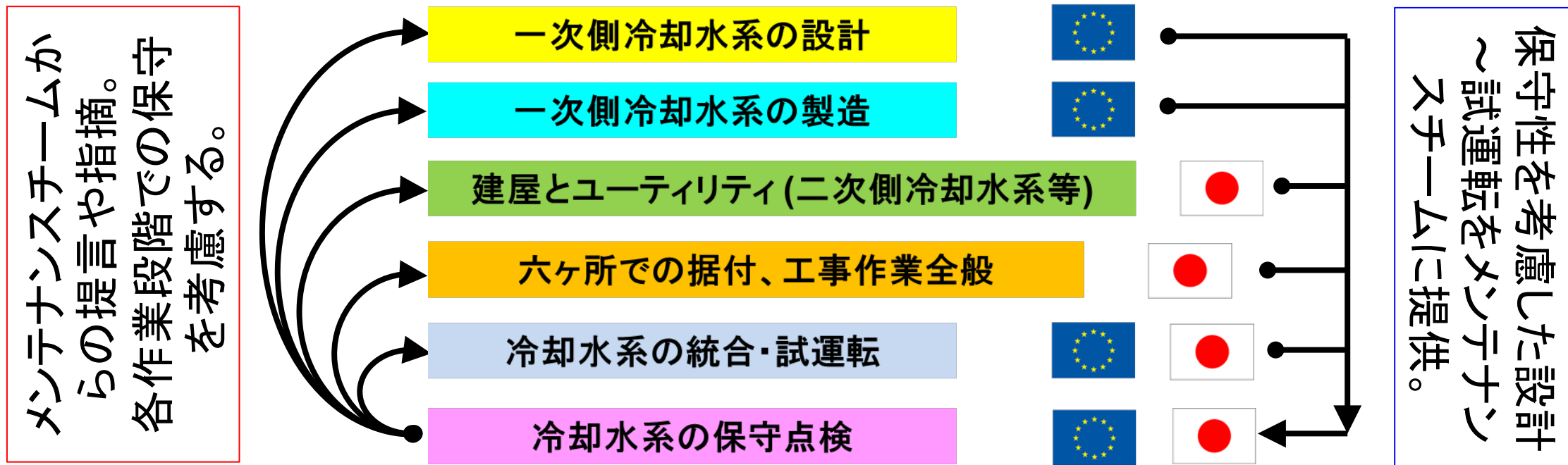
これまでLIPAcの冷却水システムでは、設計～試運転の段階で、その後の保守について考慮されず、多くの困難に直面してきた。



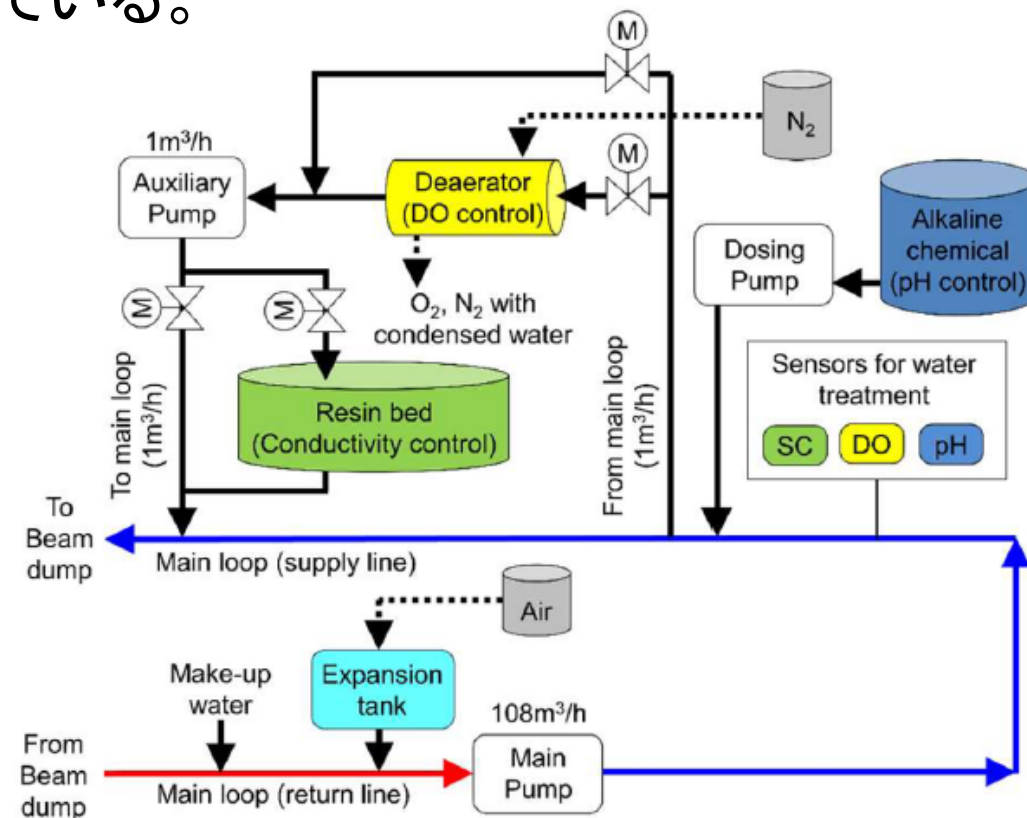
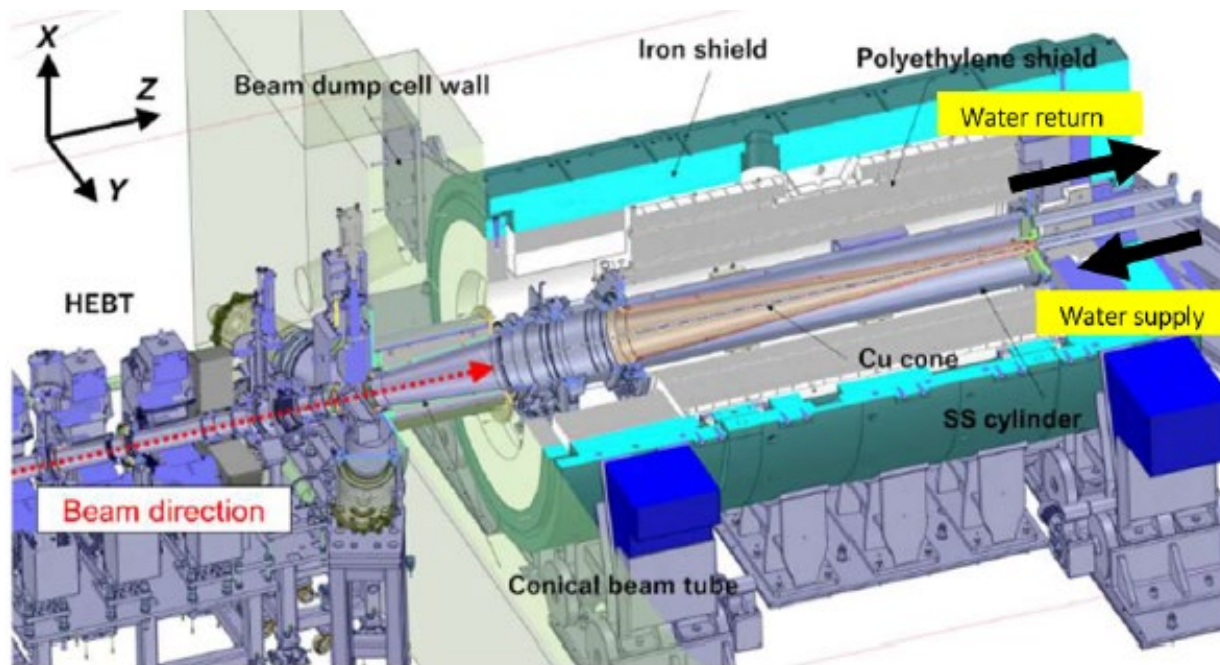
点検における困難さの例:

- 設計図書が無い (例えば、機器リスト、P&ID、図面なし)
 - ✓ 欧州側での設計・製作時に図書は存在したと思われる。物納貢献に伴う図書提出責任の曖昧さ、設計リソースの不足、技術の秘密保持の問題など。
- 欧州で製作されているため、故障時に日本で同一品が入手できない。
- 保守性が考慮されていない設計: 例えばフィルターの交換時にバイパスラインが無い、メインポンプにスペアが無い、等。

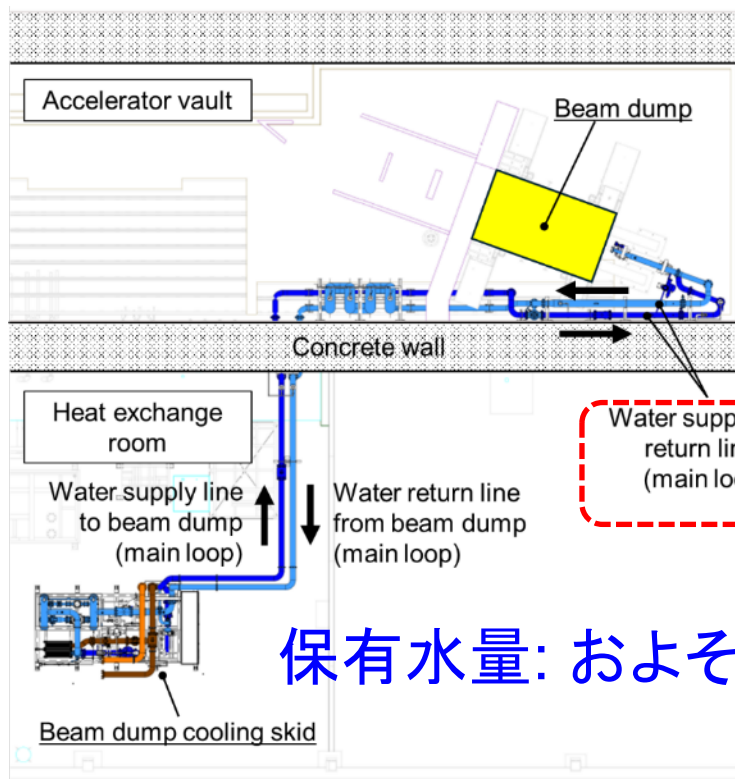
- ✓ LIPAcの運転時や保守点検時の致命的なトラブルを予防するため、保守点検の責任者がサブシステムの設計段階から関与する。
- ✓ 保守の責任者からの提言や指摘を設計などに反映して、プロジェクトの初期の段階から保守性が考慮されたサブシステムを構築する。



- LIPAcのビームダンプでは銅ターゲットが使用されている。
- 銅ターゲットは水冷されており、冷却水配管にはステンレスが用いられている。
- 冷却水システムの設計段階から銅ターゲットの腐食による目詰まりの予防が考慮され、冷却水中の溶存酸素、pH、導電率が制御されている。

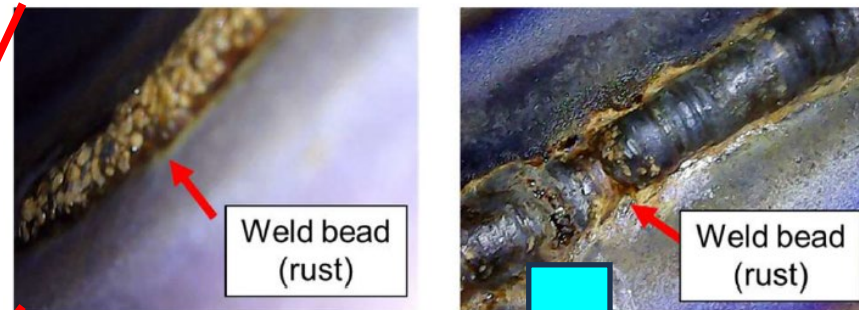


- ビームダンプ冷却水配管に水張りする前、ファイバースコープで配管内を事前確認して、溶接線の腐食が確認された。
 - 欧州でのプレハブ配管に腐食があり、日本で据付けた際の溶接線は問題なし。
 - 酸洗い (リン酸濃度10%以上、1時間循環)と、不動態化処理 (硝酸濃度4 – 5 %、16時間以上接液) を実施し、腐食による目詰まりを予防した。

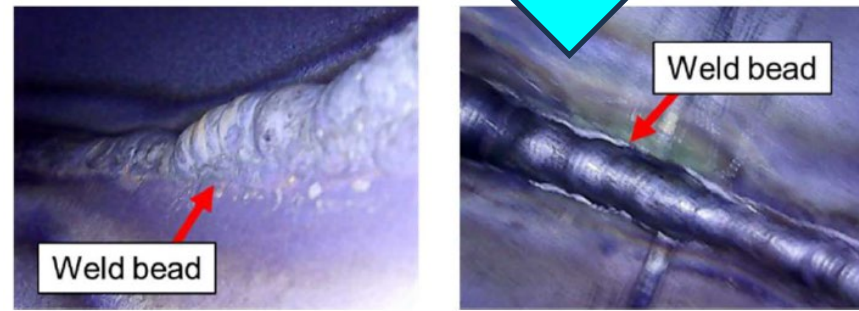


保有水量: およそ5 m³

(a) Before pickling and passivation



(b) After pickling and passivation



酸洗い・不動態化処理

LIPAcプロジェクトでは保守の計画と記録にエクセルを用いている。

✓ 扱いのシンプルさと簡単さを重視。

独立した保守管理チームと各サブシステム担当者との対面打合せを重視し、少なくとも年一回は保守計画書と記録を更新している。

✓ メールで依頼するだけでは各担当者との情報共有が難しかった。

国際プロジェクトで改めて認識するいわゆる三現主義の重要性:

- 毎日現場を歩く (会議ばかり多くなりがち。百聞は一見に如かず)。
- 現場で現物を見て、触れて、聴く。手を動かしている現場の作業者と話す。
- 装置の現状について事実を知ることが、保守の改善への第一歩と考える。

- LIPAc加速器の冷却水システムの保守において、これまで腐食や目詰まりといった様々な問題に直面してきた。
- その度に日欧協力して装置の保守や管理方法について改善、改良を施し、問題の解消と再発に努めている。
- 冷却水システムの予防保全により、トラブルが発生するリスクを低減して、LIPAc加速器運転の稼働率向上に寄与している。

ご清聴ありがとうございました