

## 高速実験炉「常陽」の保守経験(2) 「常陽」ナトリウム冷却系電磁ポンプの保守経験

Maintenance experience of Experimental Fast Reactor Joyo (2)  
The maintenance experience on the electromagnetic pumps in Joyo sodium cooling system

日本原子力研究開発機構	須藤 正義	Masayoshi SUTO	Non Member
日本原子力研究開発機構	菅谷 孝	Takashi SUGAYA	Non Member
日本原子力研究開発機構	住野 公造	Kozo SUMINO	Non Member

Maintenance for five electromagnetic pumps in sodium cooling system of Joyo has been conducted successfully considering their operational and environmental conditions. As a result of the periodical surveillance over thirty years, it was confirmed that the pumps could be maintained their integrity during the planned service period of Joyo. Additionally, based on the experiences, the long term maintenance program for electromagnetic pumps was decided.

**Keywords:** Joyo, Sodium Cooling System, Electromagnetic Pump, FLIP, Maintenance

### 1. 緒言

高速実験炉「常陽」では、冷却材に使用している液体金属ナトリウムの循環に機械式ポンプと電磁ポンプを用いている。このうち、電磁ポンプについては、高速炉特有の機器で他のプラントでの使用例が少ないとから、「常陽」に設置した5基についてその特徴を踏まえた開放点検を計画的に行うことにより、健全性を確保するとともにその結果を踏まえて長期的な保守計画を策定した。

本稿では、ナトリウム冷却系電磁ポンプの保守経験について報告する。

### 2. 電磁ポンプの概要及び特徴

#### 2.1 電磁ポンプの概要

「常陽」のナトリウム冷却系電磁ポンプは、1次冷却系の補助系、オーバフロー系、ナトリウム純化系（以降、純化系）に計3基、2次冷却系の補助系、純化系に計2基の合計5基が設置されている。このうち、2次冷却系の純化系電磁ポンプがACファラデー型であり、それ以外はフラットリニアインダクションポンプ(Flat Linear Induction Pump:FLIP)型である。「常陽」冷却系の電磁ポンプの配置を図1に示す。

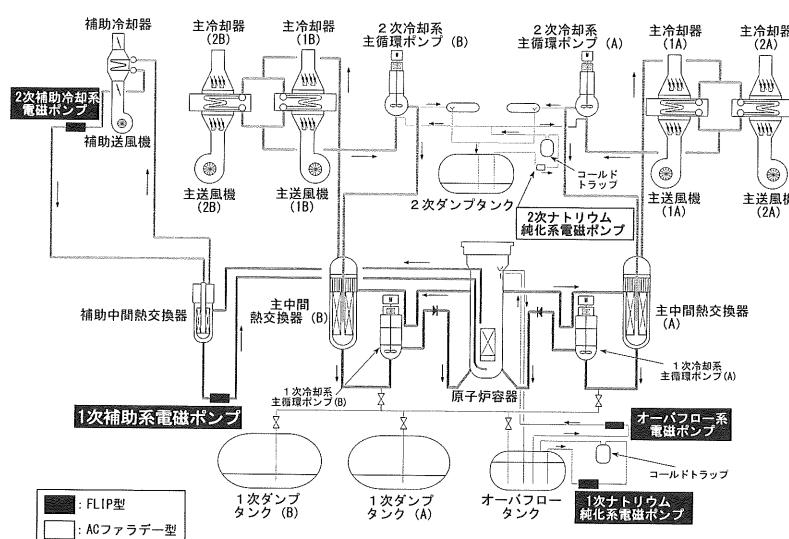


図1 「常陽」冷却系系統図

連絡先: 須藤正義、〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002、(独) 日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センター 高速実験炉部 高速炉第2課  
電話: 029-267-4141、E-mail:suto.masayoshi@jaea.go.jp

電磁ポンプの動作原理はフレミングの左手の法則に基づくものである（FLIP型、AC フラデー型共通）。

FLIP型は、図2に示すようにコイルを三相交流で励磁することで、移動磁界 $\phi$ をポンプダクト内ナトリウム中に発生させると、これにより誘導電流 $I_1$ が発生し、誘導電流 $I_1$ と移動磁界 $\phi$ の垂直な方向に駆動力Fが発生するものである。

AC フラデー型は、図3に示すようにトランス1次コイルを励磁することでトランス鉄芯に誘起される磁束が発生し、トランス2次コイル及び電極に電流を流す。また、磁場コイルの励磁により磁場鉄芯に磁束が発生する。このトランス2次コイル及び電極に流れる電流と磁場鉄芯を通る磁束によりナトリウムに駆動力が発生するものである。

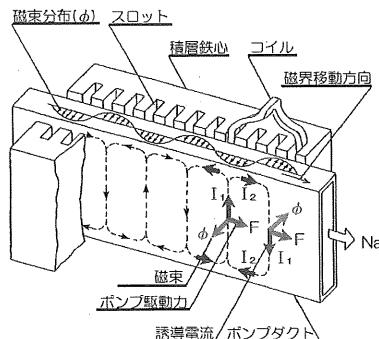


図2 FLIP型電磁ポンプの構造と動作原理

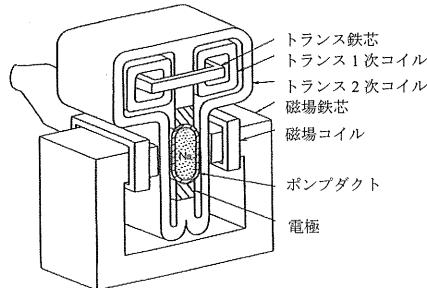


図3 AC フラデー型電磁ポンプの構造と動作原理

## 2.2 電磁ポンプの特徴

電磁ポンプは可動部がないため、これに起因する故障や摩耗による劣化が少ないと、パッキン等によるシール部分がなく完全密閉構造とできる等の利点があるが、機械式に比べてポンプ効率が10数%と低く、通常、小流量のものに用いられる。

また、FLIP型特有の構造上の特徴として、1次冷却系に用いている堅型構造を示した図2のポンプダクトの上下に接合された力率改善用の銅エンドバーがある。誘導電流はループを形成しており、ポンプダクトの上下にも流れる。これにより、ポンプダクトの上下では駆動力Fの向きが変わるため、ナトリウム中を誘導電流 $I_2$ ( $I_1=I_2$ )が流れた場合、ナトリウムの流れに乱れが生じる。この対策としてポンプダクトの上下に銅エンドバーを接合し、銅エンドバー内

に誘導電流 $I_2$ を流すことにより乱れを除去している。2次冷却系には横型構造を用いているが、ポンプダクト左右に銅エンドバーを設置している以外、上記特徴は堅型と同様である。なお、AC フラデー型はFLIP型よりも小型であり、構造が異なることから銅エンドバーは必要ない。

## 3. 電磁ポンプの保守経験

### 3.1 保守実績

各電磁ポンプについては、施設定期検査（以下、定検）毎に電磁ポンプ本体の外観・作動・絶縁抵抗検査及び制御装置の点検を行っている。また、運転実績や長期保全計画等に基づき電磁ポンプ本体の開放点検を下記のとおり行っている。

#### (1) 1次冷却系電磁ポンプ

1次冷却系電磁ポンプ本体は、すべて管理区域内に設置されている。最も稼働率の高いオーバフロー系電磁ポンプは、1982年7月の第3回定検及び2000年12月の第13回定検において、また、純化系電磁ポンプは、2008年6月～7月の第15回定検において電磁ポンプ本体カバーを取り外し、開放点検を行っている。補助電磁ポンプについては、表1に示すようにオーバフロー系及び純化系より運転時間が1桁少なく、放射線の影響も少ないとから、開放点検を行ったことはない。

#### (2) 2次冷却系電磁ポンプ

2次冷却系電磁ポンプは、すべて非管理区域に設置されている。補助電磁ポンプは、1987年4月の第6回定検及び2009年1月～2月の第15回定検において、また、純化系電磁ポンプは、2次系でかつ小型であるため、毎定検電磁ポンプ本体カバーを取り外して点検を行っている。

表1 電磁ポンプの運転時間とコイル累積照射線量

機器名称	型式	寸法	設置場所	評価結果		供用開始年
				設置場所 <sup>1)</sup> 照射線量 (Gy/20年)	コイル設計 照射量 (Gy)	
1次補助電磁ポンプ	2重壁 FLIP型	H:1237.5 L:2800 W:750	R-203 (管理区域)	$3 \times 10^5$	$1 \times 10^3$	27,651 <math>4.7 \times 10^4</math> 1976
1次オーバフロー系電磁ポンプ	1重壁 FLIP型	H:1035.5 L:1940 W:800	R-105 (管理区域)	$6.5 \times 10^6$	$1 \times 10^3$	198,102 <math>4.7 \times 10^4</math> 1976
1次純化系電磁ポンプ	1重壁 FLIP型	H:1035.5 L:1940 W:750	R-105 (管理区域)	$6.5 \times 10^6$	$1 \times 10^3$	202,891 <math>4.7 \times 10^4</math> 1976
2次補助電磁ポンプ	1重壁 LJP型	H:1180 L:2750 W:1400	A-505 (非管理区域)	—	—	228,783 — 1976
2次純化系電磁ポンプ	AC フラデー型	H:700 L:800 W:700	S-212 (非管理区域)	—	—	218,506 — 1976

\*1 設置される部屋の代表的な照射線量(設計値)

\*2 2010年4月末現在

\*3 1次補助電磁ポンプについては設置場所(R-203室)の照射線量がR-105室と比べ1桁以上低く、ダクトも2重壁であることから他の電磁ポンプより低いと推定される。

<参考> 電磁ポンプの仕様

機器名称	仕様(設計時想定標準運転状態)				
	流量 (V/h)	冷却材 温度 (°C)	攝程 <sup>1)</sup> (mNa)	設計電圧 (V)	設計電流 (A)
1次補助電磁ポンプ	56.5	370	18	300	260
1次オーバフロー系電磁ポンプ	11.0	500	21	180	116
1次純化系電磁ポンプ	11.0	500	50	250	160
2次補助電磁ポンプ	56.5	340	8.5(kg/cm <sup>3</sup> )	400	187
2次純化系電磁ポンプ	5.2	340	3(kg/cm <sup>3</sup> )	140	(容量35kVA)

\*1 設計流量、温度における

### 3.2 開放点検内容とその特徴

#### (1) コイル

点検内容は、基本的に一般的な電動機のコイルと同様であるが、1次冷却系電磁ポンプの場合、設置される原子炉格納容器内の床下エリアが原子炉出力運転中に高γ線量率（約 $8 \times 10^1$  Gy/h）となるため、放射線による絶縁劣化（ボイドの発生等）が経年劣化において重要な要因となる。これを踏まえ、以下の点検を行っている。

- ・外観検査
- ・絶縁抵抗測定、抵抗測定
- ・絶縁補強
- ・打音検査

#### (2) ダクト

ダクトは薄肉構造で、かつ配管系の中では円形から矩形に変化する構造的不連続部になっており、銅エンドバー溶接部は異材継手になっている。過去に大洗研究開発センターのコールド施設で使用していた同型電磁ポンプにおいて、運転開始3年で実施した開放点検時にダクトの変形、銅エンドバー溶着金属部の多数のクラック及び銅エンドバーの高温酸化が確認された実績がある（図4参照）。これらを踏まえ、以下の点検を行っている。

- ・外観検査
- ・寸法測定（銅エンドバー上下、鉛直、曲がり）
- ・溶接部（構造的不連続部、異材継手等）の非破壊検査（PT,RT）

#### (3) 付属計装品等

ヒータ、熱電対、ナトリウム検出器等が設置されており、外観検査及び絶縁抵抗測定を行っている。



図4 大洗研究開発センターコールド施設におけるダクト変形、銅エンドバークラック・高温酸化状況

### 3.3 開放点検方法・手順

AC フラーデー型電磁ポンプは、本体カバーを取り外し、コイル等部品を取り外すことなく、外観点検、清掃、ボルト類の締付確認、絶縁抵抗検査等を行うことができ、開放手順が複雑ではなく、点検方法も簡易的なものであるため、ここでは、1次系のFLIP型電磁ポンプの開放点検について述べる。なお、2次

冷却系の FLIP 型は横型であるが、開放手順は基本的に1次系の豊型と同様である。開放手順を図5に、開放状況を図6に示す。

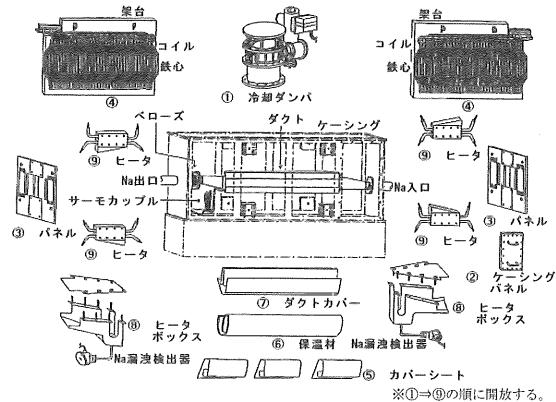


図5 1次冷却系電磁ポンプ開放手順

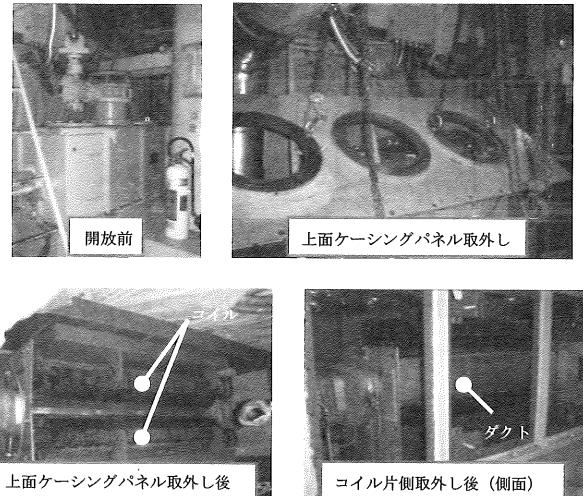


図6 1次冷却系電磁ポンプ開放状況

### 3.4 開放点検結果

電磁ポンプのコイル、ダクト、付属計装品等の主要な点検結果を以下に示す（図7参照）。

#### (1) コイルの点検結果

- ・コイルの鉄心及び絶縁材の外観検査の結果、性能を害する変色、変形はなかった。
- ・コイルの絶縁抵抗測定の結果、判定基準は上まわっているものの絶縁が低下しているものが 33% 確認された。原因としては口出し線へのほこりの付着が考えられることから、口出し線の清掃及び絶縁テープの取り替えを行った結果、絶縁が回復した（ $100M\Omega$ 以上）。

- ・予防保全として、絶縁補強（洗浄、ワニス処理）を行った。
- ・コイルの打音検査の結果、絶縁材に異常（ボイドの発生や絶縁層の剥離等）はなかった。

#### (2) ダクトの点検結果

- ・ダクトの外観検査の結果、銅エンドバー部全面に酸化銅スケールが認められたものの異常な変形、有害な欠陥はなかった。

- ・酸化銅スケール除去後の寸法測定の結果、ダクト各部に著しい変形はなかった。ただし、銅エンドバーの減肉が確認されたため、後述のとおり寿命評価を行った。
  - ・溶接部の非破壊検査（PT、RT）を実施し、欠陥がなく健全であることを確認した。

### (3) 付属計装品等の点検結果

- ・ヒータ、熱電対、ナトリウム漏洩検出器の外観検査の結果、異常な変形、絶縁部の損傷、変色、割れ、緩み等はなかった。
  - ・ヒータ、熱電対、ナトリウム漏洩検出器の絶縁抵抗測定の結果、測定で一部判定基準を若干下回ったものがあったが、清掃及び絶縁テープの補強・交換により、絶縁が回復した（ $50M\Omega$ 以上）。
  - ・冷却ファン・ダンパ等、その他付属機器に異常はなかった。



(3) タクトの検査

#### 4. 長期保全計画の検討

#### 4.1 銅エンドバーの寿命評価

前述の点検結果から、ダクトの形状やコイルの絶縁等に異常はなく、現状、明らかな経年的な劣化は銅エンドバー以外に確認されていない。このため、銅エンドバーの寿命評価を行った。

### (1) 減肉状況とポンプの輸送効率

電磁ポンプの銅エンドバーは、運転温度が高いため高温酸化が問題となる。第3回及び第13回定検のオーバフロー系電磁ポンプ開放点検における外観検査では、エンドバーに酸化によるスケール（主成分は  $Cu_2O, CuO$ ）の付着が確認されたため、スケール除去後にダクトの寸法測定を行った。この時のデータを基にエンドバーの酸化の進行とポンプのナトリウム輸送効率の低下について考察した。

エンドバーの断面積をパラメータとした場合のポンプの輸送効率を図8に示す。第13回定検時にダクト寸法測定を行った結果、断面積は $510.7\text{mm}^2$ (平均

値) であった。この結果を基にエンドバーの実効的断面積の初期断面積 ( $20\text{mm} \times 30\text{mm}$ ) に対する比率を求める。

$$510.7 \text{ mm}^2 / 600 \text{ mm}^2 = 0.851 \dots \dots \dots (1)$$

となる。図8より、エンドバーの断面積が85.1%になった時のナトリウムの輸送効率は初期の約95%となるが、オーバフロー系電磁ポンプには元々20%の通電余裕があり、ナトリウム輸送効率が初期の80%程度まで低下しても定格流量での運転が可能であるため、上記エンドバーの減肉に伴う効率低下は運転に支障を及ぼすものではない。なお、現在のところ効率低下に伴う電磁ポンプの運転電圧の上昇は見られていない。

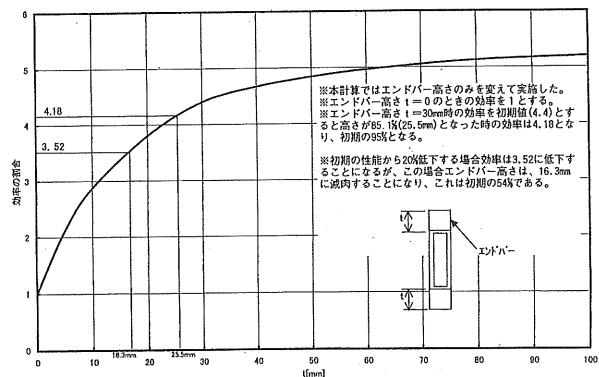


図 8 銅エンドバーの高さに対する効率の割合

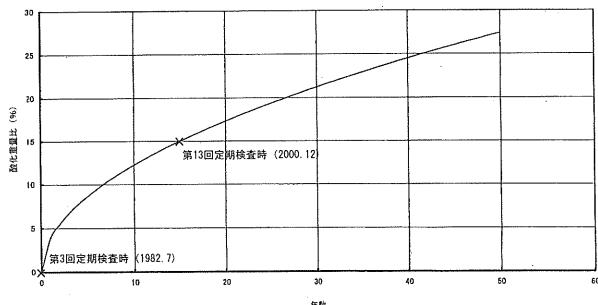


図9 銅エンドバーの酸化腐食進行度

## (2) 酸化の進行

500°C近傍における銅エンドバーの酸化については、下式のとおり放射線則が成立すると考えられる。

(y:酸化した重量 K:酸化速度年数 t:年)

第3回定検時及び第13回定検時の酸化重量比(100[%] - エンドバーの実効的断面積の初期断面積に対する比率[%])をプロットし、(2)式により酸化速度係数を求めた結果を図9に示す。これより、

となる。なお、ここで電磁ポンプ運転期間中（約15年）の原子炉運転と停止時間の比率がその後も同様と仮定した。図8より、ナトリウム輸送効率の80%に相当する銅エンドバーの減少率は約40%であり、図9からその時間的余裕は十分にある。

#### 4.2 1次補助電磁ポンプの開放点検について

1次補助電磁ポンプについては、長期保全計画で1次純化系電磁ポンプの開放点検結果を踏まえて実施の有無を決定することとしており、その要否を検討した。

電磁ポンプの主要劣化要因であるコイルの絶縁劣化は、電気、熱、環境（放射線、ダスト等）及び機械力等の要因が複合的に作用して起こるが、これまでの経験より、特に放射線による劣化が重要な要因となることが分かっている。他の電磁ポンプが高線量のオーバフロータンク近傍に設置されているのに対し、1次補助電磁ポンプは周囲に高線量の機器設備がないことから、 $\gamma$ 線量が少ない。前述のように、1次補助電磁ポンプの運転時間は他の1次系電磁ポンプに比べ1桁短く電気的影響も少ない上、熱的条件も他の1次系電磁ポンプに比べ緩やかである。また、4.1より、エンドバーの酸化は問題なく、オーバフロー系電磁ポンプ、1次純化系電磁ポンプとも開放点検の結果、状態が良好であったこと等も考慮し、開放点検は必要ないと判断した。ただし、過去に開放を伴う点検や補修を実施した経験がなく、また、オーバフロー系及び1次純化系電磁ポンプのいずれの点検においてもケーブルに外被覆の割れや端子の接触不良等が確認されているため、外観検査を中心とした簡易点検を第15回定検中に実施することとした。

#### 4.3 電磁ポンプ高経年化における問題点と対策

「常陽」の高経年化に関する評価において、1次系電磁ポンプについてはコイルの放射線及び高温による劣化を、また、2次系電磁ポンプではナトリウムダクト及びコイルの高温及び塩分による劣化を問

題点として抽出したが、その後の保守実績より、この評価が妥当であったことが確認できた。今後も計画的な開放点検を行うことにより状態確認を継続していくこととする。

### 5. まとめ

電磁ポンプの開放点検を行った結果、ほこりの付着等により一部に絶縁低下が確認されたが、清掃や絶縁テープの補強・交換等により回復できる程度のものであった。また、性能を害する変色、変形等ではなく、銅エンドバーの異常な減肉がないことも確認でき、これまで行ってきた保全活動により健全性が確保されていることを実証した。1次補助電磁ポンプについては、同様の開放点検は必要ないと判断しているが、第15回定検中に外観検査を中心とした簡易点検を計画している。

今後とも、電磁ポンプの健全性を維持し、原子炉施設の安全性・信頼性確保に努めていく。

### 参考文献

- [1] 須藤他, “「常陽」ナトリウム冷却系電磁ポンプの保守経験”,平成21年度弥生研究会「研究炉等の運転・管理及び改良に関する研究会」発表要旨集, pp.7-1
- [2] 磯崎他, “高速実験炉「常陽」の定期的な評価－高経年化に関する評価－”,日本原子力研究開発機構 公開資料
- [3] S.Suzuki, K.Iizawa et al.: "Measurement and Calculation sources in the Primary Cooling System of JOYO" Proc. Theory and Practices in Radiation Protection and Shielding, Vol.2, (1987), pp.363-376