JAEA-Technology 2021-005

DOI:10.11484/jaea-technology-2021-005

電磁石電源装置の長期的安定運用を実現する 安全安心な維持管理手法の提案

Proposal of Safe and Secure Maintenance Method to Realize Long-term Stable Operation of Electromagnet Power Supply

小野 礼人 高柳 智弘 植野 智晶 堀野 光喜 山本 風海 金正 倫計

Ayato ONO, Tomohiro TAKAYANAGI, Tomoaki UENO, Koki HORINO Kazami YAMAMOTO and Michikazu KINSHO

原子力科学研究部門 J-PARC センター 加速器ディビジョン

Accelerator Division
J-PARC Center
Sector of Nuclear Science Research

May 2021

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。 本レポートの転載等の著作権利用は許可が必要です。本レポートの入手並びに成果の利用(データを含む)は、 下記までお問い合わせ下さい。

なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト(https://www.jaea.go.jp)より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課 〒 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.

Reuse and reproduction of this report (including data) is required permission.

Availability and use of the results of this report, please contact

Institutional Repository Section,

Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department, 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, 2021

電磁石電源装置の長期的安定運用を実現する安全安心な維持管理手法の提案

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 加速器ディビジョン

小野 礼人、高柳 智弘、植野 智晶*、堀野 光喜*、山本 風海、金正 倫計

(2021年3月12日受理)

大強度陽子加速器施設(J-PARC)の 3GeV シンクロトロン加速器には、1MW の大強度ビームを 生成するために開発された電磁石用の電源装置が多数配置されている。これらの電源装置は、陽 子ビームの軌道制御の要求に合わせて専用に開発されており、多種多様な出力波形の形式、定格 仕様、更には異なる筐体のサイズや電源回路で構成されている。

J-PARC 用に開発されたこれらの電源装置には世界最先端の技術が集約されており、故障が少ない安定した運転、且つ故障時に大きなトラブルに発展しない安全な機器として運用する為には、新しい装置として特徴を良く理解した適切且つ的確な管理により機器装置の性能を維持しなければならない。しかし、それぞれの装置の仕様や機能は異なっており、更には製作メーカーも違っているため、装置の構造・構成・特徴に合わせた維持管理手法が必要である。

維持管理の手法は大きく分けて 3 つのタイプがある。機器・部品の劣化による交換や後継機種への更新を目的とした週・月・年ごとに実施する「メンテナンス」、運転中の装置の状態を常時監視し、異常・異変の有無を確認する「日常点検」、突発的な故障の修理を目的とした「トラブル対応」に分類できる。

本報告書では、電磁石電源グループで実施している保守管理の事例を基に、「メンテナンス」、「日常点検」、「トラブル事例」の内容を紹介する。特に、修理などの交換作業を容易にするアイデアを含めた作業管理手法、および装置の構成・構造・特徴に依らない、電源の保守作業時に必要な注意すべき点を整理して報告する。

J-PARC センター: 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4

*株式会社 NAT

Proposal of Safe and Secure Maintenance Method to Realize Long-term Stable Operation of Electromagnet Power Supply

Ayato ONO, Tomohiro TAKAYANAGI, Tomoaki UENO*, Koki HORINO*, Kazami YAMAMOTO and Michikazu KINSHO

Accelerator Division

J-PARC Center, Sector of Nuclear Science Research

Japan Atomic Energy Agency

Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received March 12, 2021)

The 3-GeV rapid cycling synchrotron of Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) uses a large number of electromagnet power supplies in order to manipulate a high-intensity beam of 1 MW. These devices have been specially developed to meet the requirement to achieve acceleration of the 1-MW proton beams.

State-of-the-art technologies are used to these devices. To achieve stable operation with few failures, and to prevent major troubles in the event of a failure, it is necessary to maintain the performance of the devices under the appropriate and accurate management strategy with an enough understanding of its characteristics. However, since the specification and function of each device is different respectively, and it is also produced by different manufacturer, we have to maintain adequately according to the structure, configuration and features of the apparatus.

There are typically three major stages in the maintenance works. First, "Daily inspection" is constantly performed to monitor the status of the equipment during operation and check for any errors or abnormalities. Second, "Routine maintenance" is carried out weekly, monthly, or yearly to fix the errors, or to replace the parts that are deteriorated. Third, "Troubleshooting" is conducted to recover from sudden failures.

In this report, we will introduce the specific contents of "Routine maintenance", "Daily inspection", and "trouble case" based on the experiences of the electromagnet power supply group. In particular, we will report the work management methods, including ideas for facilitating recovery work. We will also summarize the important points of a matter that does not depend on the configuration, structure, and characteristics of the equipment.

Keywords: Maintenance, Daily Inspection, Troubleshooting, Trouble Case

^{*}NAT Corporation

目次

1.	はじめに		1
2.	メンテナ	- ・ンス	2
	2.1 メン	· テナンスの目的	2
	2.2 メン	· テナンスの種類	2
	2.2.1	メーカー点検	2
	2.2.2	自営作業	3
	2.3 メン	ゲテナンスの周期と期間	3
	2.3.1	メーカー点検	3
	2.3.2	自営作業	3
	2.4 メン	· ・テナンスの手順	4
	2.4.1	メーカー点検	4
	2.4.2	自営作業	5
	2.5 メン	· ・テナンスの内容と注意点	6
	2.5.1	メーカー点検	6
	2.5.2	自営作業	.10
3.	日常点検	<u></u>	11
	3.1 日常	7点検の目的	11
	3.2 日常	7点検の種類と頻度	11
	3.2.1	定期巡視	. 11
	3.2.2	運転波形比較	11
	3.3 日常	7点検の手順	11
	3.3.1	定期巡視	.12
	3.3.2	運転波形比較	16
	3.4 日常	「点検で発見された異常の事例	
	3.4.1	受電電圧変動	18
	3.4.2	異音 (充電器内部のファン故障)	
	3.4.3	油漏れ(油循環ポンプからの漏れ)	
4.	トラブル	事例	20
		セプタム電磁石電源 単位電源温度異常	
	4.1.1	発生事象	
	4.1.2	調査の内容	
	4.1.3		
	4.1.4	対処の内容	
	4.1.5	今後の電源装置設計に反映すべき内容	

JAEA-Technology 2021-005

4.2 水	平シフトバンプ電磁石電源 ユニット異常・トリガー異常	21
4.2.1	発生事象	21
4.2.2	調査の内容	21
4.2.3	原因の推定	23
4.2.4	対処の内容	23
4.2.5	今後の電源装置設計に反映すべき内容	23
4.3 水	平シフトバンプ電磁石電源 変圧器油循環ポンプの油漏れ	23
4.3.1	発生事象	23
4.3.2	調査の内容	23
4.3.3	原因の推定	24
4.3.4	対処の内容	24
4.3.5	今後の電源装置設計に反映すべき内容	25
4.4 水	平シフトバンプ電磁石電源 盤背面ファンへ配線接触	26
4.4.1	発生事象	26
4.4.2	調査の内容	26
4.4.3	原因の推定	27
4.4.4	対処の内容	27
4.4.5	今後の電源装置設計に反映すべき内容	27
4.5 水	平シフトバンプ電磁石電源 充電器内部ファン故障	28
4.5.1	発生事象	28
4.5.2	調査の内容	28
4.5.3	原因の推定	30
4.5.4	対処の内容	30
4.5.5	今後の電源装置設計に反映すべき内容	31
4.6 出	射セプタム電磁石電源 タッチパネル故障	36
4.6.1	発生事象	36
4.6.2	調査の内容	36
4.6.3	原因の推定	36
4.6.4	対処の内容	36
4.6.5	今後の電源装置設計に反映すべき内容	36
4.7 水	平シフトバンプ電磁石電源 モニタ表示のズレ(ソフトの不具合)	37
4.7.1	発生事象	37
4.7.2	調査の内容	37
4.7.3	原因の推定	37
4.7.4	対処の内容	37
4.7.5	今後の電源装置設計に反映すべき内容	39
5. まとめ		40
謝辞		40

Contents

1.	It	ntrodu	ction	1
2.	N	l ainte	nance	2
	2.1	Pι	rpose of maintenance	2
	2.2	Ty	pes of maintenance	2
	2	.2.1	Manufacturer inspection	2
	2	.2.2	Self-employed work	3
	2.3	M	aintenance cycle and duration	3
	2	.3.1	Manufacturer inspection	3
	2	.3.2	Self-employed work	3
	2.4	M	aintenance procedure	4
	2	.4.1	Manufacturer inspection	4
	2	.4.2	Self-employed work	5
	2.5	M	aintenance details and precautions	6
	2	.5.1	Manufacturer inspection	6
	2	.5.2	Self-employed work	10
3.	D	aily c	heck	11
	3.1	Pι	rpose of daily inspection	11
	3.2	Ty	pe and frequency of daily inspections	11
	3	.2.1	Regular patrol	11
	3	.2.2	Operation waveform comparison	11
	3.3	Ro	outine inspection procedure	11
	3	.3.1	Regular patrol	12
	3	.3.2	Operation waveform comparison	16
	3.4	Ca	ses found in daily inspections	18
	3	.4.1	Received voltage fluctuation	18
	3	.4.2	Abnormal noise (Fan failure inside the charger)	18
	3	.4.3	Oil leak (Leak from oil circulation pump)	19
4.	T	rouble	e case	20
	4.1	Uı	nit power supply temperature abnormality	20
	4	.1.1	Occurrence event	20
	4	.1.2	Survey content	20
	4	.1.3	Estimating the cause	20
	4	.1.4	Details of measures	20
	4	.1.5	Contents that should be reflected in future power supply design	20
	4.2	Uı	nit error / trigger error	21
	4	2 1	Occurrence event	21

4.2.2	Survey content	21
4.2.3	Estimating the cause	23
4.2.4	Details of measures	23
4.2.5	Contents that should be reflected in future power supply design	23
4.3 Tr	ransformer oil circulation pump oil leak	23
4.3.1	Occurrence event	23
4.3.2	Survey content	23
4.3.3	Estimating the cause	24
4.3.4	Details of measures	24
4.3.5	Contents that should be reflected in future power supply design	25
4.4 W	iring contact with the fan on the back of the board	26
4.4.1	Occurrence event	26
4.4.2	Survey content	26
4.4.3	Estimating the cause	27
4.4.4	Details of measures	27
4.4.5	Contents that should be reflected in future power supply design	27
4.5 C	harger internal fan failure	28
4.5.1	Occurrence event	28
4.5.2	Survey content	28
4.5.3	Estimating the cause	30
4.5.4	Details of measures	30
4.5.5	Contents that should be reflected in future power supply design	31
4.6 To	ouch panel failure	36
4.6.1	Occurrence event	36
4.6.2	Survey content	36
4.6.3	Estimating the cause	36
4.6.4	Details of measures	36
4.6.5	Contents that should be reflected in future power supply design	36
4.7 M	onitor display deviation (Software malfunction)	37
4.7.1	Occurrence event	37
4.7.2	Survey content	37
4.7.3	Estimating the cause	37
4.7.4	Details of measures	37
4.7.5	Contents that should be reflected in future power supply design	39
5. Summa	ary	40
Acknowled	gement	40

1. はじめに

大強度陽子加速器施設(J-PARC)は、世界最高強度の 1MW 高エネルギー陽子ビームを生成し、様々な物理実験施設においてそのビームを用いた研究を推進することを目的に建設された。陽子ビームの加速は、リニアック、3GeV シンクロトロン、主リングシンクロトロンの 3 種類の加速器によって行われており、それら加速器は、電磁石電源装置、高周波加速装置、ビームモニタ装置、真空装置など、各加速器の特性に合わせて多種多様な装置で構成されている。1MW の大強度ビーム運転を実現するため、構成装置には世界最先端の技術が集約されており、安定、且つ安全に加速器を運用するためには、それぞれ装置の特徴を良く理解し、適切、且つ的確な対応による性能の維持管理が必須である。

本報告書で対象とする電磁石用の電源装置は、陽子ビームの入射、周回、出射、輸送の各仕様に合わせて専用に開発されている。出力する波形の仕様は、パルス波形、交流波形、直流波形など様々な形式が存在する。また、出力定格においても、電圧が数 V から最大 80kV、電流は数 A から最大 30kA と様々な仕様があり、その仕様に合わせて筐体の大きさ、構成も様々である。

これら電源装置ごとに、機器の型式や特徴は様々であり、保守の対象となる部品や点検内容も 異なっている。それに伴い、日常点検で行う連続運転中の機器毎の出力波形や数値のデータ比較 による健全性の確認手法、その結果を判断して実施する週・月ごとの機器の部品交換や更新、年 次的に実施するメンテナンスなどの点検保守手法、そして、緊急対応で行う復旧作業の多くも対 象となる機器装置によって違うが、装置の安定運転を維持するため且つ安全に作業を実施するた めの方針は、共通な思想の下に定めている。更に、電気・電子関係の機器部品に関しては、作業 に関する要領・手順、必要な知識、安全対策などは共通な部分も存在する。

本報告書では、電磁石電源グループで実施している保守管理の事例を基に、「メンテナンス」、「日常点検」、「トラブル対応」の内容を紹介する。特に、「トラブル対応」においては、修理などの交換作業を容易にするアイデアを含めた作業管理手法、また、「メンテナンス」については、装置の構成・構造・特徴に依らない、電源の保守作業時に注意すべき点を含めた維持管理の考え方を中心に報告する。

本報告書は、以下のように構成されている。2章ではメンテナンスについて、3章では日常点検について、4章ではトラブル事例について、それぞれ述べる。

2. メンテナンス

この章では、3GeV シンクロトロンの電源装置で行われているメンテナンスについて述べる。2.1 では、メンテナンスの目的について述べる。メンテナンスの種類については 2.2、メンテナンスの周期と期間については 2.3、メンテナンスの手順については 2.4、実際に行っているメンテナンスの内容と注意点についての解説は 2.5 で述べる。

2.1 メンテナンスの目的

電源装置で使用している部品は、時間と共に劣化が進みやがて使用に堪えなくなる。しかしながら、メンテナンスによって劣化を早期に発見することができれば、故障前に交換することが可能である。また、清掃や部品交換により寿命を延ばすことも可能である。加速器のような大型施設では、電磁石電源は数十年の寿命が求められる。また、一時的に使用しない期間があったとしても、後日再利用・再使用する可能性があるのであれば、保守によって電源の性能を維持することで、新たな電源を用意するのと比較して時間も費用も抑えられる。既設の電磁石電源の効率化や長寿命化につながるメンテナンス技術は欠かすことができない重要な作業である。

2.2 メンテナンスの種類

3GeV シンクロトロン棟の電源装置で行われているメンテナンスの種類は、大きく2つとなっている。1つは、夏期や年末、期末といった長期停止期間に電源装置製作メーカー検査員によって行われるメーカー点検である。もう1つは、ビーム利用運転期間中に設けられているビーム運転停止日に実施する、日常点検で見つかった不具合に対する調査や対策、および機器の健全性確認を行う自営作業である。この節では、上記2種類のメンテナンスについて述べる。

2.2.1 メーカー点検

3GeV シンクロトロン棟に設置されている電源装置を製作したメーカー検査員による定期メンテナンスをいう。必ずしも電源装置の製作メーカーが実施するとは限らず、メンテナンスメーカーや他の電源装置メーカーが参入する場合がある。その場合、受電範囲確認や残留電荷の有無等、感電防止について十分に協議を行い安全に作業ができるように指導する必要がある。また、電源装置は非常に複雑であり、回路図や構造図を理解できることが必須条件となる。

2.2.2 自営作業

突発的な不具合の調査や対策について、短い期間での作業となるため事前にメーカーとの協議を十分に行い、手順書とリスクアセスメントを用意した上で、効率よく且つ安全に作業を行うことが必要である。1つの方法として、現場で同じ図面を見ながらメーカーとPHSなどで直接連絡を取り作業をすることで、作業手順や危険な場所についての助言をもらえ、効果的である。しかしながら、人はミスするものとの考えを忘れず、決して鵜呑みにせず、自分の経験や知識と照らし合わせ、少しでも不安がある場合は躊躇わず作業を中断し、確認することが重要である。

2.3 メンテナンスの周期と期間

この節では、各メンテナンスの周期と期間について下記に述べる。

2.3.1 メーカー点検

メーカー点検の周期については、取扱説明書にある点検推奨期間や部品交換周期を基にメーカーと協議して決めることになるが、定期メンテナンスについては概ね1年に1回が一般的である。期間については、電力需要の観点から7月~9月の夏期停止期間に行うことが多く、大きな電源の場合1か月程度の点検期間を必要とする。夏期のこの時期は、日本原子力研究開発機構(原子力機構)のみならず様々な機関や企業がこの時期にメーカー点検を実施しており、作業員の確保がネックとなる。保守作業を予定期間で確実に実施するには、早期に契約を締結し可能な限り早く作業工程を決めるべきである。インフラ(水、電気、空調)の停止/復旧状況と利用運転開始日から逆算した点検終了希望日(原子力機構側の日程マージンはできるだけ確保)と作業不可の日時を連絡する。メーカー側の都合としては、1週間を月曜から金曜まで通しで作業を行ったほうが人員配置や移動の効率も良いので、祝日も作業出来れば作業工程を組み易く日程マージンも確保できる。点検終了日はメーカー点検ピークである9月末より遅いほど(10月初旬~中旬等)人員の調整がし易く、逆に日程の決定が早くなると思われる。どちらにせよ原子力機構から予定を提示し、メーカーと早めに協議することが肝要である。

2.3.2 自営作業

J-PARC においては、現状(令和 2 年度現在)自営作業の周期と期間については、至急でない故障対応や定期確認を 1 週間に 1 度のメンテナンス日(半日または 1 日)に実施することとなるため、作業時間に余裕がない。十分な準備が可能で安全を確保できることと、メンテナンス作業後の利用運転に影響が及ばないことが、作業実施可否の判断基準の一つとなる。メンテナンス日で作業が収まらない場合は、短期の運転停止の申請を行い、作業を実施することとなるため、早急な作業時間見積が必要となる。初めて発生した事象に対する対応時の作業時間見積は、作業手順書とリスクアセスメントより算出することとなるので、関係者・有識者が集まり効率よく行う必要がある。メンテナンス日や短期間の停止でも対応できない場合は、長期停止期間までの応急処置を行い、長期停止期間に確実に対

応することとなる。その際には、メーカー修理依頼も視野に入れて計画をしていくこととなる。

2.4 メンテナンスの手順

この節では、各メンテナンスの手順について下記に述べる。

2.4.1 メーカー点検

(1) 停電作業

電源装置の点検を行うのにあたり、まず受電状態である機器を運転停止状態とし、供給している AC 電源を遮断する必要がある。電源装置によっては AC6600V を受電盤から直接受けている機器もあり、工務担当者と共に AC6600V 受電盤の停電作業を行わなければならない。停電作業を行うにあたり、実施計画書、作業確認書と図面の作成、および事前打合せが必要であり、メンテナンス作業の一部として計画に盛り込む必要がある。

(2) 冷却水の停止

冷却水を使用している機器については、点検前に冷却水の通水の有無を確認する必要がある。通水中に電源装置点検のためにバルブを閉める場合は、冷却水設備担当に連絡し許可を取る必要がある。

(3) 外観点検

外観点検時、側板を外して外観確認を行うこととなるが、踏み台や脚立や足場タイプ の脚立を使用する。使用時には、安全保護具を適宜使用するとともに補助員の配置を行 い安全に配慮する。外した側板も仮置き表示を行い、転倒防止や荷崩れを起こさないよ うな対策を行う。

(4) 絶縁抵抗測定

電源装置側からトンネル内にある電磁石を含む出力部の絶縁抵抗測定を行う場合は、 電磁石側の安全を確認したうえで電圧印加を行う必要がある。できるだけ電磁石側に 人がいない昼休みや時間外を利用し、通電前に放送で注意喚起を行うようにする。絶縁 抵抗測定後は、残電荷の放電を忘れないようにする。

(5) 通電を伴う点検

インターロック試験・ゲート確認・出力確認を行う際に、電磁石側に通電される可能性がある場合(ゼロアンペアでの出力や操作ミスでの出力を考慮)は、安全を考慮し電磁石側の安全確保がされない限り原則実施しないようにする。電磁石への通電試験は、加速器トンネルの入退管理を中央制御室で管理している状態(J-PARC の人的保護システムの定義で、CA(Control Access:特別許可でのみ入域可能)状態もしくはNA(No Access:立ち入り禁止)状態)で実施することが望ましい。

2.4.2 自営作業

(1) 不具合調査や対策

本作業を行うにあたり、安全を確保するということが一番である。また、作業を行うことで、その後のビーム利用運転に影響を与えないことも重要となる。特に調査や復旧に時間を要しビーム利用運転に大きな影響が出る可能性がある場合については、他の機器で故障機器の機能を補うことでビーム運転が再開できるか、その調整のマージンがどのくらいあるかを確認し、他のグループと協議し協力を求める必要がある。できうる限り現状復帰に努めるべきであるが、当面の対策が尽き、致し方ない場合は現状でできる運転条件を協力しあって模索し、問題を打開すべきである。短い停止期間で元に戻せないような不可逆な作業は避けたほうが良い。ソフトならバックアップを取っておけば元に戻せるし、デジタル的な設定変更や調整も数字を戻せば元に戻ると思われる。しかしながら、基板のボリュームの再調整やアナログ調整回路が多い基板を交換する場合は、モニタやリファレンスが微妙に変わり、今までと同じ設定を入力しても電源装置出力値が今までとずれる可能性があることを考慮するべきである。どうしても基板のボリュームを再調整する必要が出た場合は、テスターなどで調整前後の電圧などを数字で記録し、元の値に戻せるような準備を忘れないようにする。

(2) ユニットや部品の交換

ユニット交換を行う場合、事前にユニット単体で出力を確認し健全性を確認できていれば、仮に交換後同じ症状が起こった場合でも、ユニット側の不具合でないことを切り分けることができる。ユニット単体を試験する場合、受電設備・冷却水設備・負荷設備・制御系などの準備が必要であり、すぐには準備できないものもあるので計画的に行う必要がある。部品交換を行う場合は、交換前後の写真を残すとともに、作業後に複数名でダブルチェックを行うなど作業抜けが絶対起こらないようにする必要がある。また、ファンの方向や電源の極性は当然のことながら、リレーや電磁接触器のコイルの仕様(AC用やDC用・電圧値を確認する)、基板を交換する際にはそのまま置き換えが可能なのかどうか、などをメーカーに協力してもらい確認する必要がある。そしてすべての作業に共通なのは記録を残すことである。今後の作業に必ずプラスになることであり、メンテナンス技術を継承するにあたり重要な資料となる。

(3) 立上げ確認・出力運転確認

電源装置の立上げは時間に余裕をもって行うことを推奨する。なぜならば、電源装置立上げ時に不具合が発生することを多々経験しているからである。原因は様々あると思われるが、多くは過渡的な変化(突入電流やサージの発生等)によるものである。ブレーカー操作や充電・出力の ON/OFF は避けられないことであり、できるだけ早めに立ち上げておくことが、安定に運転を開始するために必要である。出力運転確認時には、停止する直前と同じ出力状態になっているかどうか、機器状態や出力波形の比較を行う。「3.日常点検」にて述べるが、利用運転中は、平日午前中に定期的に出力波形データの取得を行うことで、出力波形の重ね合わせ比較を常時行っている。

2.5 メンテナンスの内容と注意点

この節では、各メンテナンスの具体的な内容について例を示す。また、各メンテナンス項目について注意すべき点を述べる。

2.5.1 メーカー点検

メンテナンスの内容は、大きく3つに分類することが出来る。1つ目は、毎回繰返し行い機器の状態を確認する定期メンテナンスである。2つ目は、経年によって老朽化した部品を交換し、電源装置の性能維持を行う計画的な消耗部品交換作業である。3つ目に、利用運転中に自営作業で対策ができなかった事象に対する保守作業である。

定期メンテナンスについては、毎回ほぼ同じ内容で実施していくため、作業要領書の作成や作業工程の計画や作業人数の算出はし易い。例として下記に、水平シフトバンプ電磁石電源の定期点検おける工程順での作業内容を示す。

(1) 停電作業

電源装置に供給されている AC 受電を遮断して安全に点検作業できるように準備を行う。AC6600V の遮断が必要な場合は、事前に作成・承認された作業確認書に従い、工務担当者と共に上流部の停電作業として VCB 遮断と VCB 試験位置への引き抜き、接地作業を行う。AC400V/AC200V/AC100V を分電盤および各電源装置側ブレーカーでOFF する。

(2) 側板取外し

電源装置内部の点検を行うために、周囲に取り付けられている正面板・背面板を取り 外す。背面板には、排気ファンがついているため配線コネクタを取り外して背面板の取 り外しを行う。床面に養生を行い、取り外した板を置いていく。板を重ねて置いた際に 崩れないようにラッシングベルトで固縛するなどの荷崩れ防止を行う。

(3) 外観点検・清掃・増し締め

電源装置の外部および内部の確認を行う。特に内部の確認では、今まで受電していた ところやコンデンサに充電していたところ、むき出しの銅板などを検電器で検電し、確 実に電荷がないことを確認した後に外観点検作業を行う。

外観点検については、電源装置内部に部品が落ちていないかどうか、放電痕がないか、 入力出力端子部や絶縁支持材や抵抗器に加熱による変色が見られないか、焼けたよう な香ばしい臭い、あるいは基板や FRP が焼ける独特な臭いがしないか、配線断線や配 線被覆が溶けていないか、コンデンサや半導体などの部品が破損していないか、油漏れ や水漏れの痕跡がないかを確認していく。

清掃作業について、外観点検を行いながら清掃も行っていく。エアフィルターは、掃除機などで清掃し汚れてきたら定期的に交換を行っていく。電気回路を水拭きするのは絶縁的に望ましくない為、化学雑巾やハンディモップでほこりを取り、汚れがひどいところはアルコールで拭く。アクリル樹脂をアルコールで拭いてしまうと白濁やヒビが入ってしまう可能性があるので避けたほうが良い。ハンディモップもあまり安価なものを使用するとヘッドの部分が簡単に抜け落ち、逆にごみを増やしてしまうことも

あるので、ハンディモップを使用したところに異物が残っていないか目視で確認を行う。高電圧部の碍子はひだの部分も丁寧に拭きあげる。高電圧部が集塵し煤で真っ黒になっている場合、アルコールで拭いてもすぐにアルコールが乾いてしまい黒い筋が残りうまくきれいにならない。その場合はアルコールに少量の水を加えて(アルコール7に対して水3を目安)拭くと汚れがきれいに落ちる。仕上げに100%のアルコールで拭きあげておく。高電圧部を清掃する場合は、放電痕があるかもしれないので注意しながら見る。

増し締めについては、入出力部や端子台やコネクタ部分の勘合がしっかり刺さっているかなどを確認する。ビスやボルトの部分に工具が入るものは、時計回り(締め付ける方向)に軽く工具を当て、ビスやボルトが動かないことを確認する。ボルトとナットを使用しているものは、ボルトだけを回すと空回りしたときにナット側がさらに緩む可能性があるので必ずナット側も工具で押さえて行う。ホーロー抵抗の端子はボルトナットで配線されるが、この部分は非常に脆く、力がかかると割れたり断線したりするので注意が必要である。ホーロー抵抗の端子を締め付ける際は、ボルトとナットを同じ力で締めると抵抗の端子部分には偏った力がかからないので抵抗の端子部分を痛めることが無くなる。簡単に工具が入らない場合は、接続されている配線を時計回り(締め付ける方向)に軽く振り動かないことを確認する。手が簡単にはいらない場合は、目視でばね座金がつぶれていることを確認する。

(4) 絶縁抵抗測定

電源装置を正常に動かすためには、電圧は必要な場所にだけかからなければならないが、絶縁物の経年劣化によっていずれ絶縁破壊を起こし、地絡や漏電を起こす。この絶縁破壊を未然に防ぐため、定期的に絶縁抵抗を測定し異常な変化がないことを確認する必要がある。電源装置の入出力および内部には、色々な個所に様々な電圧がかかっているので、使われている絶縁物もそれに見合ったものが選定されている。絶縁抵抗測定もそれに見合った規格の印加電圧レンジや印加時間で行う必要がある。評価したい絶縁物の絶縁抵抗値を測る際に、電気的にバイパスする回路がある場合は、その回路を意図的に切り離す必要がある。また、絶縁抵抗測定の測定電圧を印加すると耐電圧がもたない部品がある場合も、その部品を含む回路を切り離す必要がある。電気回路図をよく確認し検討を行う。絶縁抵抗測定後は、残留電荷が残っている可能性があるため放電を確実に行う。また、意図的に切り離した回路を復旧することを忘れないようにする。電源装置側からトンネル内にある電磁石を含む出力部の絶縁抵抗を行う場合は、電磁石側の安全を確認したうえで電圧印加を行う必要がある。できるだけ電磁石側に人がいない昼休みや時間外を利用し、通電前に放送で注意喚起を行うようにする。

(5) 復電作業

AC6600V の復電をする場合は、事前に作成・承認された作業確認書に従い、工務担当者と共に停電作業の逆の工程で復電させていく。AC400V/AC200V/AC100V を分電盤および各電源装置側ブレーカーで ON する。特に注意しなければならないのは、絶縁抵抗測定の際、AC ラインをクリップで短絡し一括回路で電圧印加した場合である。この

場合、短絡クリップを外し忘れると、ブレーカーを入れた際に相間短絡が発生し大事故 となる。ジャンパー管理表などを作成し、複数名でダブルチェックするなど対策を講じ、 作業忘れを防止する必要がある。

(6) 制御電源電圧確認

制御電源は消耗部品であり、経年で劣化すると、出力リプルが大きくなり徐々に出力電圧が低下していき故障する。よって、突発的な故障を未然に防ぐため定期的に出力電圧を測定し、異常な変化があれば制御電源が寿命を迎える前に交換する指標とすべきである。出力電圧測定の記録の際には、前回の測定値がすぐわかるように、点検作業要領書に前回の値と今回の値を列記すると分かり易い。出力電圧を測定する場合、テスターを使用するが、テスター棒で測定点を当たりに行く際、測定個所の電極間の間隔が狭くまた周辺にスペースがない場合には、極性の違うテスター棒の先端が接触してしまい制御電源の出力を短絡や地絡させてしまう可能性がある。その対策として、テスター棒の先端に専用のキャップやテーピングを施し、むき出しの金属部分を養生し事故防止を行うこと。

(7) 光ファイバーを使用した光信号の光量測定

光ファイバー通信を行っている機器に対して、光量の低下による通信不良を防ぐために実施する。光量低下の原因として、光を送り出す光トランスミッタ素子(光信号送信器)の出力低下が考えられる。出力低下の原因として、第一に光トランスミッタ素子自身の経年劣化によるものや、素子を駆動する電源供給ラインの電圧低下などが考えられる。それ以外の原因としては、光ファイバーでの光量減衰が考えられる。最近の電源装置内部の近距離の光伝送には、ガラス光ファイバーではなく安価で柔軟性があり、扱いやすいプラスチック光ファイバーも多く使われている。光ファイバーも経年変化が考えられるので、継続的な測定を行い、測定値の経年変化を確認することで光ファイバーの交換時期の指標に出来ると思われる。また、曲げ R がきついところでは光量減衰が大きくなるので、メーカー推奨の曲げ R の範囲を確認して使用することが必要である。電源装置の内部点検での光ファイバーの引っ掛けや、インターロック確認のために光ファイバーコネクタを脱着する場合は、取り扱いに十分注意する必要がある。

(8) インターロック確認

インターロック動作確認については、模擬的にインターロックが動作する条件を作り出し、インターロックの発生条件や閾値、アラーム表示を確認し、電源装置の停止が正常に行われるかどうか確認する。インターロックを模擬的に発生させる場合、できるだけインターロックを検出するセンサー部に近いところで模擬し、検出回路全体の健全性を確認する。インターロックを点検期間内に全て確認することができない場合は、項目を厳選して実施することとなるが、最低限次に示す項目は入れる必要がある。

- ・人命に関する部分・・・電源装置の扉開(感電防止)・外部インターロック (PPS等)
- ・負荷設備の保護・・・電磁石温度異常と電磁石冷却水異常
- ・非常停止・・・現場押しボタンスイッチと外部非常停止信号 すべてのインターロック確認を計画的に行うために、例えば 3 ブロックほどに分け

て、昨年はA ブロック、今年はB ブロック、来年はC ブロックで再来年はA ブロックに戻るなどローテーションしていくのも一つの手法である。

(9) ゲート波形確認

半導体スイッチなどを駆動するためのタイミング信号の確認を行う。外観点検・清掃やインターロック試験後に各配線等を正常に復帰したことの最終チェックとしての効果もある。ゲート信号はできるだけ半導体素子の入力ゲート(ゲート〜エミッタ間)に近いところの波形を確認することが望ましいが、基本的にシース側(エミッタ側)が接地電位でないため、差動プローブを使用する際には耐電圧に十分注意する必要がある。半導体のゲート信号の直接測定が作業的に困難であり、作業ミスにより半導体破損のリスクも考えられる場合は、その上流のゲート基板の1次側を測定し、同じ波形が得られるのであれば代用し、より安全な方向での測定を行うことが望ましい。ゲート信号を出すために電源装置を出力状態にしなければならない場合は、たとえゼロアンペア設定であっても負荷への通電状態とみなし、負荷側の安全確保が必要である。

(10) 通電確認

すべての点検が終了した後で、電源装置の性能が維持されていることを確認する試験である。まず電源装置をどこまで出力させて評価するかを決める必要がある。電源装置を定格電流電圧まで出力させるかどうかは、負荷側の制限もあるので電源装置担当者と電磁石担当者、メーカー責任者で協議し決定する。毎回同じ運転パラメータでデータや波形を取得し比較することで、電源装置性能が維持できていることを確認する。場合によっては、電源装置立上当初のデータと比較する場合もある。波形で比較する場合でも見た目だけでなく、取得波形の同じ場所の波高値や幅などを数値で管理することができれば、比較し易いので望ましい。周辺機器や他の電源装置の影響を受けることも考えられるので、周辺機器や他の電源装置の稼働状態や冷却水流量や周囲温度なども把握し、運転条件に記録を残しておくべきである。波形を取得する際も、オシロスコープの型式やメーカーによって取得波形の表示が変わることも考えられる。またサンプリング速度や垂直分解能によっても見え方が変わる可能性があるので、オシロスコープのセッティングはデータシートに細かく残し、後の比較時の参考になるようにしておく。毎回全く同じ条件で比較できることが理想である。通電時間は、データを取るだけでは終わらせずにある程度の時間運転し、問題が発生しないことを確認しておく。

2.5.2 自営作業

(1) 突発的な不具合調査や対策

突発的な不具合調査や対策については、「4.トラブル事例」で述べており、そちらを 参照されたし。

(2) 計画的な確認作業

計画的な確認作業について、作業手順書とリスクアセスメントを作成し、承認を得てからの作業となる。作業員は最低でも 2 名以上で行う。作業前に安全日報を作成し、KY (Kiken Yochi: 危険予知)・TBM (Toolbox Meeting: ツールボックス・ミーティング)を実施する。必要に応じて電磁石電源を停止する。利用運転中に電源を停止する際は中央制御室への連絡を忘れないようにする。作業手順書に従い作業を行っていくが、想定外の事象が起こった場合は直ぐに作業をストップする。作業を進める必要がある場合は、作業手順書とリスクアセスメントの見直しを行い、承認後に作業を再開する。利用運転中は、作業の必須事項でなければ、電源装置の運転は停止させても制御電源までは落とさないほうが無難である。タッチパネルの故障のタイミングは制御電源投入時が最も多いので、できるだけリスクは避けたいところである。ペイントバンプ電磁石電源おいては、周辺機器をリブートしなければならないため、再立ち上げに時間を要する。作業終了後、CCR (Central Control Room:中央制御棟のコントロール室)に連絡し速やかに電源の立上げを行う。安全日報と KY・TBM の用紙を仕上げ、上席に報告を行い完了となる。

3. 日常点検

この章では、利用運転中に 3GeV シンクロトロンの電源装置で行われている日常点検について述べる。3.1 では、日常点検の目的について述べる。日常点検の種類と頻度については 3.2、実際に行っている日常点検の手順についての解説は 3.3、日常点検によって発見された異常の事例を 3.4 の順で述べる。

3.1 日常点検の目的

トラブルが発生する場合、前兆を発する場合が多々ある。それが出力波形の乱れに現れたり、入力電流の増加やトランスの温度上昇に現れたり、異音や異臭、水漏れや油漏れが発生したりと様々である。その変化や発生源を捉えることができれば、突発トラブルが発生する前に対応が可能である。

3.2 日常点検の種類と頻度

現在、利用運転中に 3GeV シンクロトロンの電源装置で行われている日常点検は 2種類あり、定期巡視と運転波形比較である。次項に、定期巡視と運転波形比較をそれぞれ述べる。

3.2.1 定期巡視

定期巡視とは、2名の巡視員による現場の巡視確認である。現在、利用運転中に1日に4回実施しており、午前1時頃、5時頃、11時頃、午後4時半頃に巡視を行っている。巡視内容はチェックシートにまとめられており、時間ごとに内容が異なっている。午前1時頃、11時頃の巡視では、3GeVシンクロトロン棟地下1階の入出射電磁石電源室にある入出射DC電源装置の受電電圧・電流およびトランスの温度の記録を実施し、グラフ化を行い大きな変化の有無を確認している。午前5時頃、午後4時半頃の巡視では、3GeVシンクロトロン棟1階の電磁石電源室と地下1階の入出射電磁石電源室にある電源装置について、異音・異臭・水漏れ・油漏れの有無を確認している。

3.2.2 運転波形比較

タイミング調整室にある遠隔操作 PC にて各電源の運転出力波形を取得し、過去の出力 波形と比較することで、異常の有無を確認している。運転波形の取得タイミングは、利用 運転中およびビームスタディ中の平日午前9時頃に行っている。波形比較は、波形取得後 Microsoft Excel®にてまとめ、実施される。

3.3 日常点検の手順

この節では、日常点検の手順について述べる。定期巡視については、チェックシートおよび巡回マップにて説明を行う。運転波形比較については、取得波形およびデータシートにて 説明を行う。

3.3.1 定期巡視

3GeV シンクロトロン棟の定期巡視は、1日に4回行われ内容的には2種類に分かれている。1つは、午前1時頃と11時頃の巡視で行われる、入出射DC電源の受電電圧・電流・トランスの温度およびペイントバンプ電源のトランス温度の確認と記録である。表1は、入出射DC電源の受電電圧・電流・トランスの温度の記録内容である。表2は、ペイントバンプ電源のトランス温度の記録内容である。

もう 1 つは、午前 5 時頃と午後 4 時半頃の巡視で行われる、電磁石電源室の異音・異臭・水漏れ・油漏れの確認である。1 階では、主電磁石電源系と RF 電源が確認対象となっており、地下 1 階では、キッカー電源と入射出射 DC 電源系とバンプ電源系が確認対象となっている。表 3 は、電磁石電源室の異音・異臭・水漏れ・油漏れの確認内容と記録である。

現状、どちらの場合も人による巡回確認となっている。これをできる限り自動化するアイデアを検討している。電圧値や電流値や温度に関して、測定可能な機器は様々なものが販売されているので、測定したデータを電源ごとに集約し、モニタすることは可能である。既設の電源機器に関しては、後付けでデータ収集可能な測定器を設置するなど改造が必要となるが、新規製作するものに関しては故障監視を見据えて、故障判断に必要な要素を検討し盛り込むことができるはずである。異音・異臭に関しては、発生場所が不規則であり予想できないためなかなか難しいところはあるが、水漏れ・油漏れに関しては、漏水センサー(油も兼用できるものあり)を、漏れが予想できる場所に張り巡らせることにより検知は可能となる。あとは漏れ具合により緊急度の場合分けを行い、警報をどう出すかを検討する。これらの内容を実施する費用は、別途算出しなければならないが、人による 24 時間監視体制を敷かなければならない状況を考えると費用対効果は高いように思われる。また、自動でのデータ収集と故障監視は 24 時間可能であり故障の発見が迅速に行われることが期待できると考える。

表1:入出射 DC 電源の受電電圧・電流・トランスの温度の記録

		八調度正面右側	[0]	[0]	[0]	[0,]		ı	1		ı	-	-	,	ı	[0,]	ı	[2]						
) M95sebM1:		トランス温度正面を側正面を	[0]				'	1	-	-	1	1	ı	1	-	1								
		安 衛 南龍	[V]				[v] [v]	[X] [A]	(A)	[4]	[A]				(A)	(A)	(A)	7 [A]	EM EM		[A]	3	[8]	
ш		部田田田田田田田田田田田田田田田田田田田田田田田田田田田田田田田田田田田田田田		٥	٥	٥		2	Ξ	_	[X]	2	[2]	Σ	1 [X]	2 [W]	3 [X]	4 [V]	[kv]	-	-	,	1	
年月	ill:		入射部 入射セプタム電磁石1	入射セプタム電磁石2	ダンプセプタム電磁石1	ダンプセプタム電磁石2	ダンプ四極電磁石	ダンブ垂直ステアリング電磁石	ダンブ水平ステアリング電磁石	出射部 低工ネルギー出射用電磁石1	低工ネルギー出射用遊磁石2	出射セプタム電磁石補助1	出射セプタム電磁石補助2	出射セプタム電磁石補助3	出射セプタム電磁モ電源トランス盤1		出射セプタム電磁石電源トランス盤2		①高圧受電盤	②入射セプタム電圧石1	③入射セプタム配磁石2	④ダンブセブタム電磁石1	⑤ダンブセブタム電磁石2	
日付	雄調相談									田野田									旭	記述機				_
کی		トランス温度 E側 正面右側	3 8 FC					1	ı	-	,	,	ı	1	1	3 9 [°C]	1	49 (*)						
関連時間: /:03		トラン正面左側	8/ [35]	7.5 [°C]				1	1		1	1	1	'	-	1		1						
0/2		受電電流電流	150 [A]	380 [V] 430 [A]	380 [M] 430 [M]	380 [V] 440 [A]	60 [A]		0 EM	0	0	60	(M) 0// (M) 0.1%	70 [A]		250 [A]	[A] 085 [V] 2/4	270 [A]	/40 [A]				27.5 [K]	,
79 B		新田	380 tvi	380 W	W 08E	380 W	4/0 [V]	410 [V]	410 M	4/0 [V]	405 [V]	420 [V]	(V) 0.1%	430 W 70					6.5 [W] /40	'	ı	ı	ı	
(В	確認担当: 住 配 式 、 寿 木		入射部 入射セプタム電磁石1	入射セプタム電磁石2	ダンプセプタム電磁石1	ダンプセプタム電磁石2	ダンブ四極電磁石	ダンブ垂直ステアリング電磁石	ダンブ水平ステアリング電磁石	出射部 低エネルギー出射用電磁石1	低エネルギー出射用電磁石2	出射セプタム電磁石補助1	出射セプタム低磁石補助2	出射セプタム電磁石補助3	出射セプタム電磁石電源トランス盤1 1	2	出対セプタム電磁石電源トランス盤2 3	4	①高圧受電盤	配電盤 ②入射セプタム電磁石1	③入射セプタム電磁石2	④ダンブセブタム電磁石1	⑤ダンブセプタム電磁石2	是
2020 #			1 17 1					medi		1.7	-	5.1					1.7							

表2:ペイントバンプ電源のトランス温度の記録

パンプ電源 トランス温度測定用 ダイヤル温度計確認チェックシート

	醋老														
	確認者	橋本,小泉	(成此、清化												
	PBV1,2 支压器整	5-6	55												
	PBHI 支压器舱 PBH2 支压器舱 PBH4 支压器盤 PBH4 支压器盤 PBV1.2 支压器缝	42	42												
原室	PBH3 效压器路	59	39												
地下1階 電磁石電源室	PBH2 文任器盤	42	42												
地下1階	PBHI 英压器整	44	47												
3eV RCS棟	景盤A TR3		\												
ñ	SB 変日 TR2	\	\												
	温度	26	7												
	開	23,4	73.4												
	時間	(/://	_		 										
	確認日	2020.1.28	2020 1.29	1											

表3:電磁石電源室の異音・異臭・水漏れ・油漏れの確認内容と記録

2011.12.5 Ver.f

※1 点格は自視とする、電視量や冷却水配容には熱化ないようにること。 ※2 現象が続い場合はかを起入すること。 ※3 気になることがあった場合は、必ず概算等に建格すること。	する。電源盤や冷乱 冷はどを記入する。 ちった精合は、必	0水配管には触れる こと。 「世島省に連絡する	れいようにること。 Sこと																	2011.12.5 Ver.1
						Ē	1階 短肌有能原金	112,00,00		\vdash			地下机	地下1階 人出材配础石馆源宽	配此石和	温用				
華塔	小校日	B0 94 15 [11]	Mer Tahin	经数据	中間	主配田石電源系	蜒	-	RFEETE	Н	キッカー配理	- 1674	H	入批約の系	DC系	Н	パンプシステム	አ ችል	56	क्रांक (त
					祖民	界具	水新札	况音	RR *	水漏化 双	双音 界界	九三十二 大三十二	14. 风音	# RA	1 水銀化	お記	* RA	1 水脈丸		
2020 #	/ A25B	16:29	04:91	因時、方数	>	7	2	5	>	>	>	_	>	>	>	>	7	7		
2020 #	1 n 26 B	5:6	5:15	南 四四	>	>	5	>	7	<u> </u>	7	7		1	>	>	2	7		
2020 ₩	/ n26B	١ ٦	16:83	佐雄、右翼	2	2	2	2	2	7	7	7)	7)	7	2	7		
よるこち 年	1 A 27B	60:5	51:4	-	>	>	>	2	2	2	2	>	-1	,	3	-)	2		
2020 ₩	-	16:30	16:45	小兔 考察	>	7	1	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7		
2020 #	I A 28B	4:03	2:14	河南、南西、	>	>	>	>	7	>	7	-	7	2	7	2	3	4		
2020 #	-		th: 9/	橋本 小泉	>	>	>	>	>	7	>	2	2	>	>	_	>	,		
2020 #	1 n29B	90:5	1/2	高松,如西	7	7	1	>	7	Ž	7	X	7	7 1	7	싓	4	7		
4	-							,		-	-	-	-	-	4	-	+	+		
#	ЯВ						_				_	-	-	-	-	-	-	4		
4	В И	-	-										_		_	-	-	\dashv		
*		-	-							_	_	_	_	_	-	-	-	-		
4	н н в		-									-	\dashv	\dashv	+	+	+	+		
外	в н в	-						\neg	\neg	+	+	\dashv	\dashv	+	+	+	+	+		
数	я и в	-							1	+	\dashv	+	+	+	+	+	+	+		
春	я и в								1	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
林	я я в								1	\dagger	+	+	+	+	+	+	+	+		
47	4 月 日								1	1	+	+	+	+	+	+	+	+		
4	4 Л в		-						1	+	\dagger	+	+	+	+	+	+	+		
妆	я и в		-						1	+	+	\dashv	+	+	+	+	+	+		
华	я н в								1	\dashv	+	+	+	+	+	+	+	+		
幹	я н в	-	-							\dashv	\dashv	\dashv	\dashv	\dashv	\dashv	\dashv	\dashv	\dashv		

3.3.2 運転波形比較

現在運転波形の取得を行っている電源機器は、水平シフトバンプ電磁石電源(SB)と水平ペイントバンプ電磁石電源1~4(PBH1~4)、垂直ペイントバンプ電磁石電源1~2(PBV1~2)のパルス電磁石電源7台である。各電源の出力電流モニタをWER(ウェーブエンドレスレコーダー:パルス波形データ計測装置)に取り込み、イーサネット上で波形の表示やcsv データの取得が可能である。このcsv データを使い波形の比較を行っている。取得したデータをMicrosoft Excel®にてグラフの重ね書きを行い、波形のズレが発生していないことを確認している(図1-1~1-3)。主に日々の運転波形を比較確認しているが、メンテナンスで電源を停止した場合の再立ち上げ時の波形も比較確認し、誤ったパラメータとなっていないかの確認を行っている。現在波形の取得および波形の比較は人力で行っている。今後の課題としては、PCによる自動取得および重ねた波形の自動判定ができるような自動化の工夫が必要であると考えている。

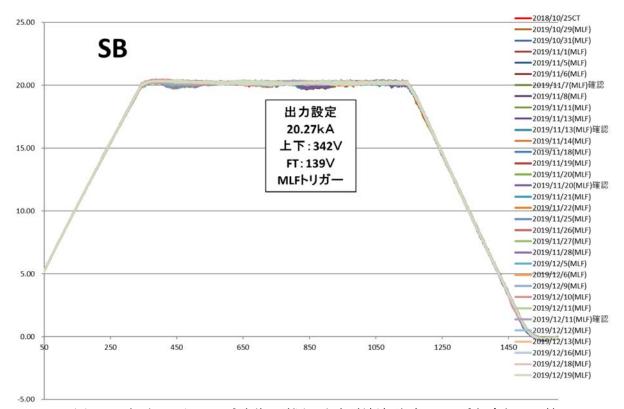


図 1-1: 水平シフトバンプ電磁石電源 出力電流波形グラフの重ね合わせ比較

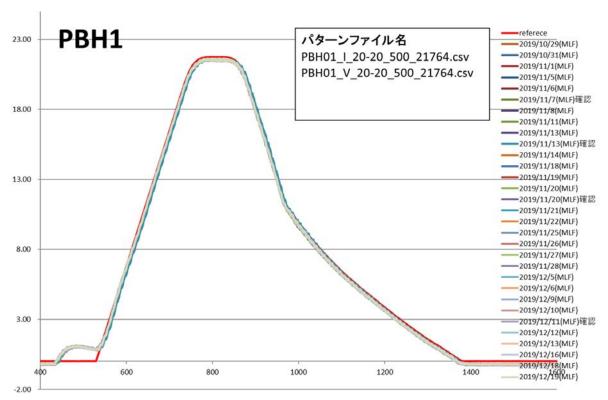


図 1-2: 水平ペイントバンプ電磁石電源 1 出力電流波形グラフの重ね合わせ比較

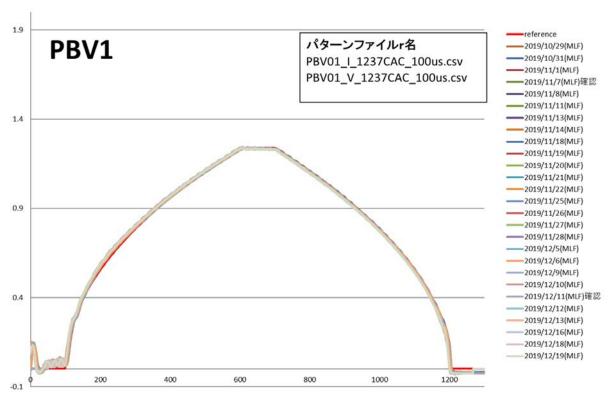


図 1-3:垂直ペイントバンプ電磁石電源 1 出力電流波形グラフの重ね合わせ比較

3.4 日常点検で発見された異常の事例

日常点検において、発見された異常の事例について述べる。

3.4.1 受電電圧変動

2020年1月17日午前11時12分頃、3 GeVシンクロトロン棟地下一階の入出射電磁石電源室の受電盤の針がいつもより大きく変動していることに巡視員が気づいた。通常時ほぼ6600Vを示している電圧計がその時には、6400~6700V(約4.6%)の範囲で変動していた。聞き取り調査を行うと、LINAC棟ではクライストロンギャラリーやクライストロン準備室の水銀灯が消灯するような事象が確認されていた。当該時刻のビームモニタのデータより、この受電電圧変動が現状のビーム運転には影響を与えていないことが確認されたが、受電電圧が低下したことにより電源装置の制御が出力値を一定に保つよう働き、受電電流が増加した。このような状態は、トランスが発熱し、電源機器の故障を誘発してもおかしくないような状況であった。調査を進めると前日1月16日の午後3時04分から変動が発生しており、1月17日の午後1時20分に急に変動がなくなっていることが確認された。工務によるとちょうどそのころに受電設備の点検を行っていたということである。その後変動の再現は起こっていない。ビームの軌道に影響がなかったため中央制御室の方からは受電変動を認識することができなかったが、毎日の巡視による点検や記録によりその変化を発見できることができたケースとなった。

3.4.2 異音(充電器内部のファン故障)

2019年11月25日午後4時51分頃、3GeVシンクロトロン棟地下一階の入出射電磁石 電源室の、水平シフトバンプ電磁石電源 No.1 の正面を通った際に異音がしていることに 巡視員が気づいた。正面から見て左側の中腹当たりから異音がしているようであった。す ぐに電源装置の担当者に連絡を行い立ち合い確認を行ったところ、12 台ある立上げ立下 げユニットの1台(P4)から異音を確認した。状況から、立上げ立下げユニット内の充電 ユニットのファンより異音がしているのではないかと推測した。利用運転中であり、電源 としては正常に動作していたため、メンテナンス日の11月27日に調査を行うことと決ま ったが、アラームが発生し運転が停止した場合に備えて、交換用の予備充電ユニットと予 備立上げ立下げユニットの事前準備を行った。調査の結果は、充電ユニット内ファンの故 障であり充電ユニットの交換で対応が出来た。また、2019年12月19日午後4時52分頃 にも同じ水平シフトバンプ電磁石電源 No.1 の別の場所から異音発生を確認し、前回と同 様に交換の事前準備とメンテナンス日での対応で問題を解決することができた。この日常 点検の巡視による異音の発見によって、故障する可能性があるユニット特定およびユニッ ト交換作業に備えることができたこと、および実際に故障発生前に交換を実施し安定運転 を維持したことは、日常点検の重要性を明確に示している。今回の異音発見者は2回とも 同じ巡視員で、周りが騒がしい水平シフトバンプ電磁石電源の前にも関わらず、異常音に 気づくことが出来たのは、普段からの経験に依るところも大きいと思われる。実際のファ ンの故障内容については、「4.5 水平シフトバンプ電磁石電源 充電器内部ファン故障」に

詳細を示す。

3.4.3 油漏れ(油循環ポンプからの漏れ)

2018 年 7 月 11 日、3GeV シンクロトロン棟地下一階の入出射電磁石電源室の水平シフトバンプ電磁石電源変圧器盤周辺の床に、液体が散らばっていることに巡視員が気づいた。液体は油であり、水平シフトバンプ電磁石電源変圧器盤を中心に半径 1m ほどで飛散していた。変圧器盤を網の保護板の外から目視確認すると、油循環ポンプのオイルパン(漏れたオイルの受け皿)が溢れるくらいに絶縁油が溜まっていた。原因は油循環ポンプのメカニカルシールの劣化によるものであった。夏期の定期点検時に油循環ポンプの交換を行い復旧した。油循環ポンプの油漏れについては「4.3 水平シフトバンプ電磁石電源 変圧器油循環ポンプの油漏れ」にて詳細を述べる。前日の巡視では油の飛散は確認されなかったが、翌日に大量の油漏れが起こっており、日常点検によって油汚染の被害を最小限に抑えることができた。

4. トラブル事例

この章では、今までに起こった電源装置でのトラブル事例を抜粋し、以下の各節で、トラブルの (1項) 発生事象、(2項) 調査の内容、(3項) 原因の推定、(4項) 対処の内容、(5項) 今後の電源装置設計に反映すべき内容、について述べる。

4.1 出射セプタム電磁石電源 単位電源温度異常

4.1.1 発生事象

・主電源1:2013年3月16日(リセットにより復旧)に発生(1回目)。

・主電源 4:2016年3月27日(リセットにより復旧)に発生(2回目)。

・主電源4:2016年4月17日(リセットにより復旧)に再発(3回目)。

本事象は全て、"トランス温度上昇"により出力停止している。"トランス温度上昇"は、 出射セプタム電磁石電源内にある単位電源ユニット内のサーモスタットの動作により検 出する。

4.1.2 調査の内容

回路図より異常検出回路を特定し、その回路内にあるサーモスタット(4個)をテスターにて抵抗測定を行うと抵抗値が高いものが1個あった。過去2回発生し、抵抗値の高いものは2回とも高周波トランスに取り付けられているものであった。

4.1.3 原因の推定

サーモスタットの接点接触不良。抵抗値の高いサーモスタットをメーカーにて分解調査 を行った結果、接点部が摩耗し削れていた。ケース内部には黒い粉が見受けられた。微小 振動により接点が擦れ合い摩耗したと推測した。

4.1.4 対処の内容

高周波トランスに取り付けられている 2 個を部品交換し、DC チョークコイルに取り付けられている 2 個は、容易に交換できない構造となっているため、現状のサーモスタットの近傍に取り付け配線を移植した。2013 年 12 月の定期点検にて PLC のシーケンス変更も行った。出射セプタム電磁石電源(主電源 1 台・補助電源 3 台)の単位電源ユニット内の"トランス温度上昇"に該当するサーモスタットの異常検出時間を 2 秒から 5 秒へ変更した。

4.1.5 今後の電源装置設計に反映すべき内容

- ① サーモスタットも消耗品であることを考慮する。
- ② 容易に交換できる構造にする。(DC チョークコイル用の 2 か所は交換できなかった。交換対象の内 1 個は正面から工具が入らなかったため、単位電源を引き出す作業が発生した。)
- ③ 高周波トランスなど振動する可能性がある部分にサーモスタットを取り付ける際は、定期的にサーモスタットを交換(調査)することを考慮する。

4.2 水平シフトバンプ電磁石電源 ユニット異常・トリガー異常

4.2.1 発生事象

2019年10月23日午後4時頃、水平シフトバンク電磁石電源No.4にて、TRG異常(ゲート用光ファイバ内の光量低下を検出)が発生していることに気づく。タッチパネルの異常履歴より2019年10月22日午後10時32分に発生している(写真1)。ビーム運転開始前であり、翌日の電源立上作業前の発見となった。同日午後4時11分にリセットを押したが異常は復旧しなかった。



写真1:異常発生時のタッチパネルの異常履歴の写真

4.2.2 調査の内容

リセットを押したが異常が復旧しなかったため、異常が継続している箇所を順に追っていった。TRG 異常の検出条件は、光信号でゲートを送っている基板(GATE-4CH-1)に、IGBT 駆動用ゲート基板(IGBT-GATE-OPT3)からのアンサーバック信号(ゲート電源の+15Vが+13.75V以上ないと電源電圧低下異常を検出する)が届かなくなると TRG 異常と検出する。下記(a)~(f)の手順で確認した。

(a) 水平シフトバンプ電磁石電源の正面保護板を外し、ユニットの検電を行った。

(b) 図 2 確認①

異常ユニットの切り分けを行う。立上げ立下げユニット 16 台と FT ユニット 2 台に接続されている光ファイバー (32 系統)を外し、どのトランスミッタが発光していないかを目視確認した。32 系統の内、立上げ立下げユニット (P1) のトランスミッタの 1 系統のみが光っていなかった。よって、立上げ立下げユニット (P1) の内部回路の調査を進めることとした。

(c) 図2確認②

光アンサーバック信号を作っている光送受信基板(GATE-4CH-1)の健全性の確認を行った。基板回路図を確認し、光送受信基板のチェックピンの TP5~8(正常時は5Vが印加される)を確認すると、TP5のみ 0.15Vであった。これは、上流にある IGBT 駆動用ゲート基板からの Ready 信号が来ていないためであり、これが原因で光アンサーバック信号を返していなかった。よって、光送受信基板(GATE-4CH-1)は正常に動作していることが確認された。

(d) 図2確認③

IGBT 駆動用ゲート基板 (GBT-GATE-OPT3) から Ready 信号が返ってきていない要因を確認した。IGBT 駆動用ゲート基板に供給されている+15V 電源の供給電圧をテスターにて確認すると、+13.7V であった。IGBT 駆動用ゲート基板内には、電源電圧低下検出回路(+13.75V 以下で検出)があり、供給されている電源電圧が低いためにReady 信号を返さなかったと思われる。よって、IGBT 駆動用ゲート基板は正常に動作していると判断し、さらに上流の電源電圧供給源の調査を進めた。

(e) 図2確認④

IGBT 駆動用ゲート基板への電源供給源の調査を行った。ゲート基板へは、供給源である DC 電源から端子台に送られ電圧を分配している。よって、端子台の電圧と DC 電源の電圧をテスターにて測定する。 結果、端子台の電圧が+13.7V、DC 電源の電圧が+15.3V であった。端子台周辺で電圧低下が起こっていることが判明した。

(f) 原因の特定

端子台を調査すると、DC 電源の N 側を分岐している端子台にビスのゆるみ発見された。ゆるみの程度は、接続されている電線が左右に動くくらいであった。このゆるんだビスを締め込むと端子台の電圧が正常値(テスター値で+15.2V)となった。

TRG異常発報条件: DC電源より各ゲート基板へゲート電源(+15 V)が供給されている。ゲート基板内の低下検出基板にてゲート電源(+15 V)が、+13.75V(設計値)を下回ると電源電圧低下異常を検出する。ゲート基板内で異常を検出すると光ゲート信号送信基板への光アンサーバック信号(正常時発光)を停止する。光ゲート信号送信基板は光アンサーバック信号が無くなると、TRG異常と認識してFPGAへのReady信号を停止する。



図2:TRG 異常検出のブロック図

4.2.3 原因の推定

端子台のビスのゆるみにより電線が接触不良となっていたため、接触不良部分の接触抵抗が経年で徐々に増大し、この部分での電圧低下が IGBT 駆動用ゲート基板の電源電圧低下検出回路(+13.75V以下で検出)で検出され、TRG 異常を発生した。

4.2.4 対処の内容

問題の発生した端子台のビスの増し締めを行い、また周辺端子台のビスにゆるみが無いことを確認した。リセットにより TRG 異常は解消し、水平シフトバンプ電磁石電源を立ち上げることが可能となった。

4.2.5 今後の電源装置設計に反映すべき内容

今回のビスのゆるみは、運よく下流の電圧低下検出回路にて電圧低下として検出された。発見が遅れれば接触不良部分で熱が発生し発煙・発火に繋がる内容であった。DC 電源の出力を監視し電源電圧低下を検出する手法はあるが、これは今回のような DC 電源下流側の端子台ビスのゆるみ等による電圧降下には効果が無い。今回、端子台の周りには振動が伝わるものもなく、また大電流が流れて電線が動くような場所ではないため、製作時のビスの締め忘れの可能性が大いに考えられる。ビスの締め忘れの場合、人的要因が大きいため、設計的にはビス止めの配線の箇所を減らすことにより物理的に発生率を下げることが有効だと考えられる。製作過程においては、ビスを締める人(もちろん自己チェックは必須)とビスが締まっていることを確認する人を別で準備し、ダブルチェックを行うことが有効だと考えられる。しかしながら全てのビスを確認するには膨大な人と時間が必要であることと、やはり人の作業であるため100%無くなるということは難しい。何か不具合が生じた際はビスのゆるみを念頭に置き、要因の1つとして検討をすべきである。既に設置されている機器についても、年度点検等で増し締めチェックの項目を加えるなどして、チェックの機会を増やすことにより不具合箇所をつぶしてゆくことは可能であると考えられる。

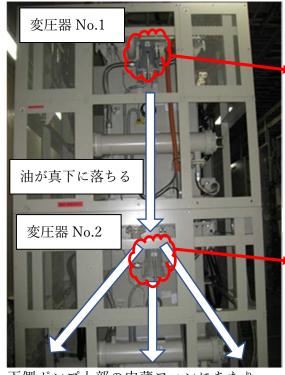
4.3 水平シフトバンプ電磁石電源 変圧器油循環ポンプの油漏れ

4.3.1 発生事象

2018年7月11日 水平シフトバンプ用変圧器周辺の床に油が散乱しているのを日常巡視点検で発見した。

4.3.2 調査の内容

油が散乱している隣には、水平シフトバンプ電磁石電源の変圧器(上下二段に設置)があり、目視確認すると上段の変圧器 No.1 の油循環ポンプより油漏れをしていた。漏れたオイルはオイル受け皿(深さ 25~30mm)を溢れて、下段の変圧器 No.2 の油循環ポンプに滴っていた。油循環ポンプ上部には内蔵型冷却ファンがあり、下段の油循環ポンプのファンに滴った油が当たって周囲に散乱していたと推定した。図 3 に油漏れ発生時の状況を示す。



下側ポンプ上部の内蔵ファンにあたり 油が床に飛散する。



上側ポンプのオイル受け皿が溢れている。



下側ポンプのオイル受け皿は溢れていない。



床に飛散していた油の範囲

図3:油漏れ発生時の状況

4.3.3 原因の推定

油循環ポンプ (NPJ-400E) のメカニカルシシールの部品が摩耗してドレン穴 (排油穴) より油漏れが発生したと推定した。メカニカルシールの部品は消耗品であり、ポンプメーカー取扱説明書の交換時期は約5000時間 (24時間稼働で約7か月)と、J-PARC の稼働日数からすると約1年で交換時期に達する。水平シフトバンプ電磁石電源を稼働して利用運転が始まった2014年2月以降メカニカルシールの交換は一度も行ってはいなかった。

4.3.4 対処の内容

① 応急処置

2018年7月に油漏れが発見され同年9月末までに対処しなければならないため、 夏期メンテナンス時に飛散した油の清掃と2か所のポンプの交換を行った。ポンプ を交換する際には、オイル受け皿を深さ25mmから50mmとした。

② 恒久対策

ポンプ交換翌年の2019年9月の夏期メンテナンス時に、油循環ポンプをシールレスでメンテナンスフリーのマグネットポンプ (MP-420) に交換を行い、ライフサイクルコストの改善を行った。図4にポンプ交換前後の外観図を示す。

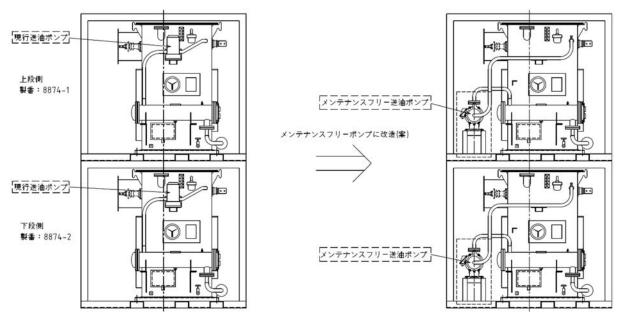


図4:ポンプ交換前後の外観図

4.3.5 今後の電源装置設計に反映すべき内容

今後、油循環ポンプ (NPJ-400E) を使用する場合に改善すべき点が3点ある。

油循環ポンプ (NPJ-400E) の取り付け方向

油循環ポンプの取り付けは、図5の方向となっており、配線用の端子箱が手前となり製作時や交換時の配作業がやり易いようになっているが、ドレン穴(図5点線丸)が裏側になり運転中にドレン穴から油が漏れた場合にトランス盤の外側から容易にチェックできない構造となっていた。メカニカルシールを交換する目安となる油漏れを確認できるようにドレン穴を外側から見える構造も考慮すべきであった。図5に油循環ポンプ(NPJ-400E)の外観を示す。

② 油循環ポンプ (NPJ-400E) のメカニカルシール交換

油循環ポンプ (NPJ-400E) のメカニカルシールの部品交換時期が 5000 時間であり、J-PARC 稼働時間からすると約 1 年と短いと思われる。設計初期段階から長期信頼性のあるポンプを選定すべきであり、使用するにしても毎年のメンテナンスでメカニカルシールの部品を交換する作業を盛り込むべきであった。

③ 油循環ポンプ (NPJ-400E) の取扱説明書

油循環ポンプ (NPJ-400E) の取扱説明書の据え付けの章に、"油面より低い場所への据え付けは避けてください"との記述があった。今回の据え付け位置は油面より低い場所にあり、メカニカルシールが損傷した際にポンプを停止しても油が漏れ続ける可能性がある構造となっていた。ポンプメーカーの取扱説明書を熟知し、禁止事項や懸念事項を認識して設計する必要がある。

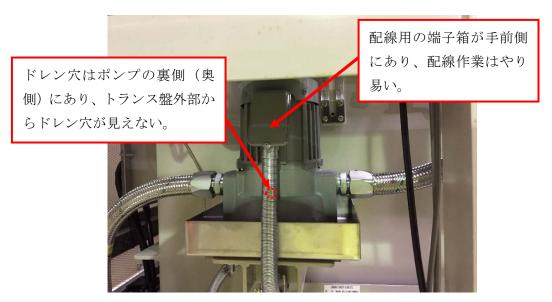


図 5: NPJ-400E の外観図

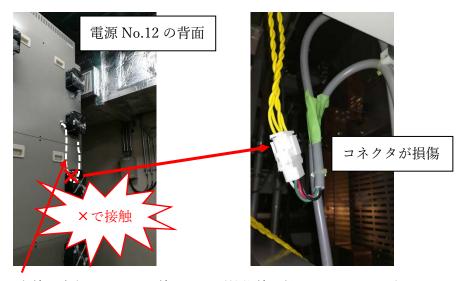
4.4 水平シフトバンプ電磁石電源 盤背面ファンへ配線接触

4.4.1 発生事象

2017 年 12 月 14 日 水平シフトバンプ電磁石電源 No.12 にて、電源の背面側から異音が発生していることを日常巡視点検で発見した。

4.4.2 調査の内容

異音がするあたりの背面板をゆっくり外してみると、上部ファンからの配線コネクタが 垂れ下がっており、下側のファンの羽に接触し異音を発生していた。図 6 に盤背面ファン の配線状況を示す。



点線が内部のファン配線ルート(放物線を描いて垂れている)

図6:盤背面ファンの配線状況

4.4.3 原因の推定

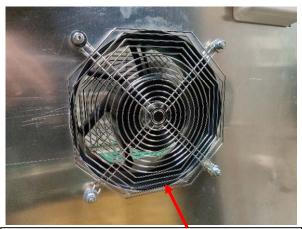
背面板を脱着する際にコネクタも脱着する必要があるが、その際に配線コネクタを固定 しているテープが外れて、配線が動いてしまった、または背面板を取付ける際に配線が引 っ張られて動いてしまったと推定する。

4.4.4 対処の内容

内部の配線が動いてしまってもファンの羽にコネクタや配線が巻き込まれないように、 電源外部側に取り付けているフィンガーガード(人がファンに触れる場合、ファンの回転 羽に手指が挟まれるのを防ぐ)を電源内部側にも取付けた。図7に盤背面ファンへのフィ ンガーガードの取り付け状況を示す。



通常、回転した羽根で怪我をしないように 外側にフィンガーガードを取り付ける。



近接する内部部品の巻き込み防止対策として、内側にもフィンガーガードを取り付ける。

図7:盤背面ファンへのフィンガーガードの取り付け状況

4.4.5 今後の電源装置設計に反映すべき内容

手順として背面板を取り付ける際にコネクタを取付けて配線を収納するのだが、いくら注意して配線を収めても、後日、配線の固定が動いてしまうと意味を無くしてしまうため、物理的にファンの羽に配線やコネクタがかからないようにする必要がある。今回の対策のようにフィンガーガードを内側に取付けるのも1つの方法だが、材料と製作工数が追加となる。今回の場合、配線が長すぎた事も一因だと思われる。上部のファンの配線が放物線状にたわんで下側のファンの羽まで届いてしまっている。少し配線を短くしてもコネクタの脱着に問題はないと思われるので、放物線の頂点がファンの羽にかからないような長さに少し短くし配線を結束すれば問題ないと思われる。組立後側板が閉まってしまうと、内部の配線のたわみまで見られないので、組立途中の状態を確認することも必要である。無論、事例教育による再発防止は必須である。

4.5 水平シフトバンプ電磁石電源 充電器内部ファン故障

4.5.1 発生事象

2019年11月25日午後4時51分頃 RCS地下一階の入出射電磁石電源室の水平シフトバンプ電磁石電源 No.1 の正面を通った際に異音がしていることに巡視員が気づいた。正面から見て左側の中腹(立上げ立下げユニットP4上部)当たりから異音がしているようであった(図8参照)。加速器運転中であった為、11月27日のメンテナンス日に対応する事となった。

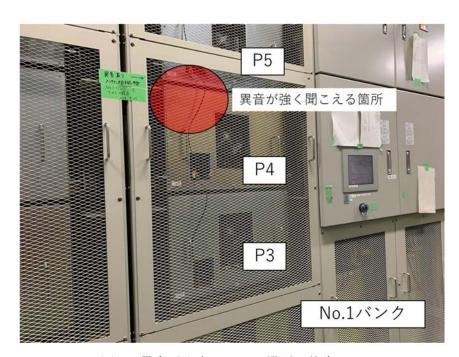


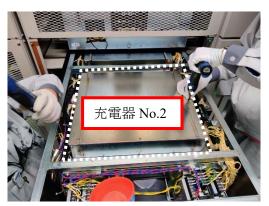
図8:異音が発生している場所の特定

4.5.2 調査の内容

11月25日の異音発見時の現場確認の際に聞いた音は、「カラカラカラ……」と音の鳴り方が一定で何かに軽く当たっているような音であった。過去の経験から、高周波トランスが「キーン」と鳴る高周波音ではなく、25Hzトリガーに同期した感じでもなく、ファンくらいの回転数の物に何かが当たっているのではないかと推測した。図8の強く音が聞こえるところにある、音が鳴りそうな物を予備ユニットで確認を行った。その結果、立上げ立下げユニットに搭載されている充電器の中に3つあるファンが怪しいと推測し、11月27日のメンテナンス日の調査に備えた。メンテナンス日のビーム運転停止まで電源に不具合は発生せず、異音も再現したままであった。初めての事象であったので、要因特定を慎重に進めるため、下記(a)~(e)の手順で行った。

- (a) 電源出力通電状態から出力停止までの過程で異音に変化するかどうか、異音を聞きな がら運転を停止させた。結果は、異音に変化はなかった。
- (b) 正面保護板を外しユニットのフレームを検電後、よりユニットに近づいて異音の発生 場所を確認した。結果は、図8の立上げ立下げユニット (P4) の正面左上側が強く音 が聞こえた。

- (c) 電源盤の主回路ブレーカーを OFF すると、異音が止まった。
- (d) 図 9-1 のように P4 のユニットを引き出し、調査を行った。立上げ立下げユニットには、2 台の充電器が搭載されており、各充電器の内部のファンのみを動かすための DC 電源がコネクタで供給されている。異音を発していたと思われる手前側の充電器 No.2 のファン電源用コネクタに外部より DC 電源を供給し、異音が発生しないかを確認した。結果は、異音が発生し充電器 No.2 内部のファンであることが確定した。
- (e) ファンは充電器内部に3つあるので、充電器の天板を外し異音がする箇所の特定を行った。図9-2 および図9-3 にある3つのファンのうち、1つのファンの羽根が手で触ってガタつくほど軸が緩い状態であった。他の2つは、手で触っても全く羽根は動かない状態であった。図9-4のようにファン用DC電源を供給しファンの回転状態を確認すると、軸が緩んだファンの羽根が近くにある電解コンデンサの取付金具に触れて異音を出している状況であった(図10参照)。



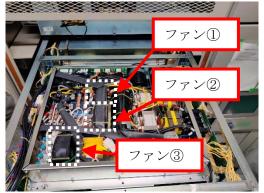


図 9-1: 立上げ立下げユニットを引き出し、図 9-2: 充電器の天板を外したところ。 充電器 No.2 の天板を外す。 ファンは枠に囲まれた 3 つ。

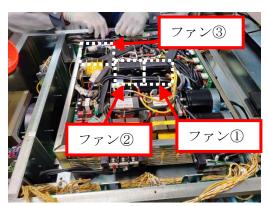


図 9-3: 別の角度から見た充電器の内部。 故障したファンは②番。



図 9-4:外部 DC 電源によるファンの 動作確認。

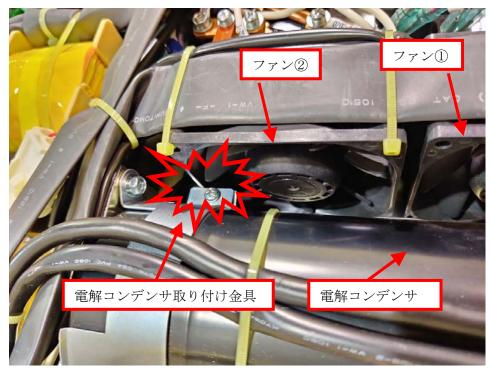


図 10: 異音発生場所。ファン②の羽根がガタつき、近くにある電解コンデンサ取り付け金具 に接触し、カラカラと音を立てていた。

4.5.3 原因の推定

異音の原因としては、ファン②の軸が緩んで、ファンの羽根が近くの電解コンデンサの取り付け金具に触れていること(ひらく)であった。ファンの軸が緩くなった原因を探るために、ファンメーカーに故障したファンの解析調査を依頼した。メーカーには故障したファンの隣にある正常なファンも送り比較調査を行ってもらった。メーカー分解調査の結果、ベアリングから摩耗粉が発生しており、当該ベアリングが著しく劣化していることが判明した。ベアリングの劣化の進行により羽根のガタつきが発生し、羽根とフレーム内径との接触も見られた。しかしながら、稼働時間はカタログ記載の寿命より十分短い(推定4800時間/カタログ記載の期待寿命は40000時間@60℃)ことより、何らかの外部要因の影響でベアリングが劣化した可能性が考えられるということであった。今回の調査結果だけでは、ベアリングの急速な劣化原因は確定できていないが、可能性の一つとして、電力スイッチング回路の近傍でファンを使用した場合、高周波ノイズの影響でファンの回転軸のベアリングに誘導電流が流れる"ファンの電食"という現象が考えられる。これについては、後述(5)で述べる。

4.5.4 対処の内容

充電器のファン故障のため、予備の充電器 (1 台) への交換を行った。今回の不具合を 考慮し、予備の充電器の天板を外して3つのファンのガタつきの確認を行った。天板を復 旧後、模擬負荷出力試験を実施し予備充電器の健全性の確認を行った。充電器交換後、立 上げ立下げユニットの復旧を行い。水平シフトバンプ電磁石電源の再立上げすることがで きた。

4.5.5 今後の電源装置設計に反映すべき内容

今回のファン故障発生後の 2019 年 12 月 19 日に、同じ水平シフトバンプ電磁石電源の No.1 の別の場所の立上げ立下げユニットから異音が発生した。前回のカラカラ音ではなく、擦れるような音であったが音の質はファンに起因しているようであった。2019 年 12 月 24 日のメンテナンス日に前回と同様な調査を行い、立上げ立下げユニット (N2) の充電器 No.2 で、同じ場所のファンが同じように羽根がガタついておりファンのフレーム内径と擦れて異音を発していた。この時も充電器交換により復旧を行い対処できたが、同じ事象が2回連続で発生したことになる。今回のファンのベアリングの劣化について原因が特定されていないが、ファンメーカーの技術資料に"ファンの電食"という現象が記載されており、原因の一つである可能性がある。図11にファンの電食発生パターンを示す。

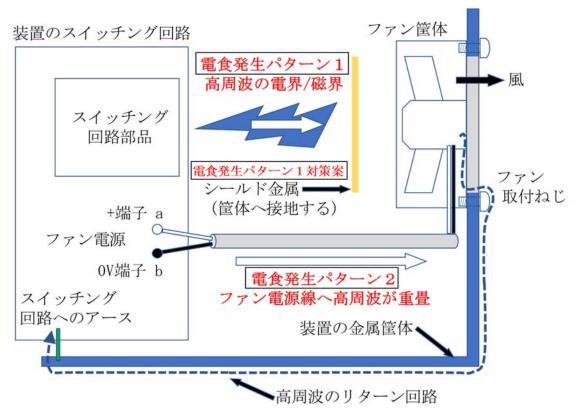


図11:ファンの電食発生パターン

○電食発生パターン1

スイッチング回路からの高周波ノイズ(電界磁界)よる誘導電流がベアリングを経由 した際に、ベアリング表面の油膜が破れ、ベアリングが摩耗(電食)する。

○電食発生パターン2

スイッチング回路からの高周波がファン電源ラインに重畳して流れ込み、高周波電流 がベアリングを経由した際に、ベアリング表面の油膜が破れ、ベアリングが摩耗(電食) する。 電食発生パターン1の対策としては、高周波ノイズ(電界磁界)による誘導を防ぐシールド板(風を妨げないもの)を設置する。電食発生パターン2の対策としては、ファン電源端子 a~b 間および端子 a~高周波リターン回路間、端子 b~高周波リターン回路間の高周波成分を取り除くために、ファン電源ラインへフィルター(コモンモードまたはノーマルモード)を入れる。またどちらの電食パターンにも対応した、金属製ベアリングが絶縁素材であるセラミック製となっているセラミックスベアリングを採用したファンとする(図 12 参照)。ベアリングに電流が流れなければ電食は発生しない。今後ますます、電源の小型化や集積度が上がり、スイッチング回路とファンとの距離が近づき、ファンへの高周波の影響が懸念される場合が出てくることが十分に考えられる。このため、"ファンの電食"という現象を踏まえた設計を進めなければならない。

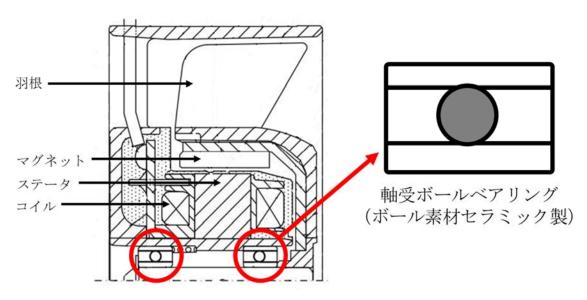


図 12: セラミックスベアリングの構造図

現象が発生した温度状況を把握するため、今回、ファンの故障が発生した立上げ立下げ ユニット用充電器の予備充電器を模擬負荷につなげて出力を行い、その時のファンの軸付 近の表面温度上昇を測定した。

対象充電器のシリアル No.: 0104-JPS-149

対象充電器の個体表示 : A13

予備充電器の状態 : 模擬負荷にて単体出力確認にて合格の物

3つのファンの状態は、ガタつきなく良好

熱電対の取付場所:3つのファンについて、フレーム中心部(ベアリングがあ

るあたり)に貼り付ける。充電器への吸気温度と排気温度 を測定する。下記の計 5 点で測定する。熱電対の取り付け

場所は、図13に示す。

①ファン 1、②ファン 2 (今回異常が発生した場所)、

③ファン3、④吸気温度、⑤排気温度

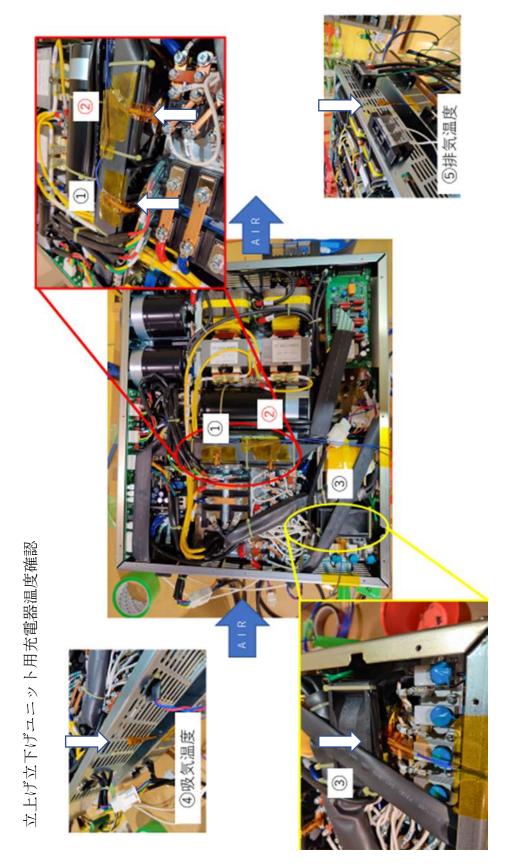
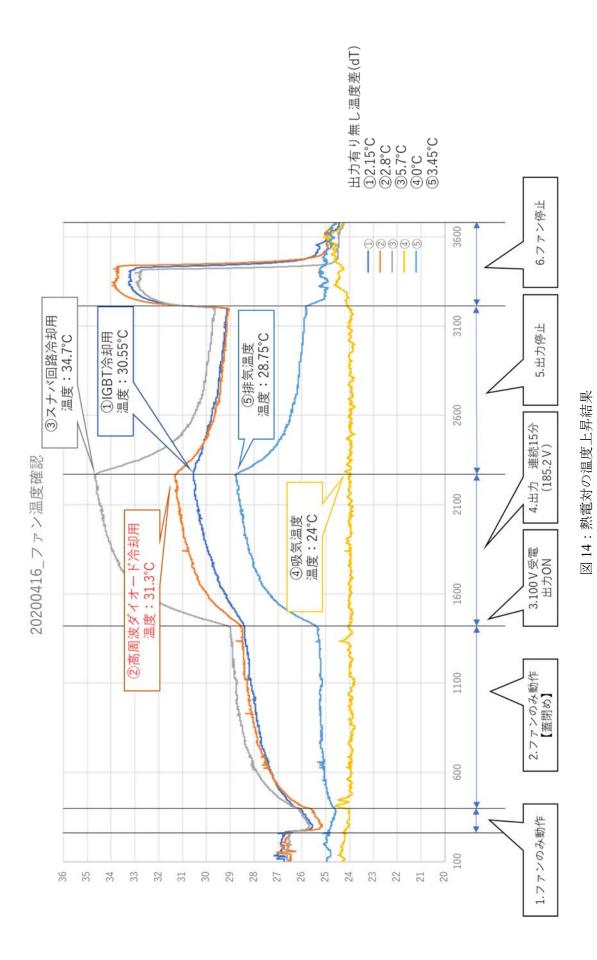


図13: 熱電対の取り付け場所

確認方法は下記(a)~(f)の手順にて行い、各温度変化を確認する。

- (a) ファン駆動用 DC 電源にて、ファンのみ動作させた場合。天板は開放。出力 OFF。
- (b) 上記 1. の状態から充電器の天板を取付ける。出力 OFF。
- (c) 上記 2. の状態から充電器に AC100V を供給し、出力 ON させる。
- (d) 出力設定値をビーム運転と同じ 3.09V とする。実出力は 185.2V。15 分通電。
- (e) 出力停止(出力設定を 0.00V とする。実出力は 0.0V。)
- (f) ファン停止 (ファン駆動用 DC 電源供給を停止) 結果を図 14 に示す。

図14が示す通り今回の測定では、ファンの軸周辺の異常な温度上昇は見られなかった。ファンメーカー技術資料によると、スイッチング回路の種類にもよるが、異常発生音までの期間が6か月~2年とされているため、今回の15分間の出力確認では変化が現れてこないと考えられる。今後の課題として、異常音が発生している状態での温度上昇の確認やサーモビュワーでの細かい温度分布を確認することにより何か変化が掴めないか、検討する必要がある。現状での予防対策としては、そのまま置き換えられるセラミックスベアリングのファンが有効だと思われる。金属製ベアリングとセラミックスベアリングでは期待寿命も同等である。そこにEMC(Electro-Magnetic Compatibility:電磁環境両立性)対策をプラスして、より信頼性を上げていく必要がある。



- 35 -

4.6 出射セプタム電磁石電源 タッチパネル故障

4.6.1 発生事象

2018年3月2日 出射セプタム電磁石電源にて、長期停止後の再立ち上げ時にタッチパネルが暗転していることを発見した。

4.6.2 調査の内容

遠隔制御からは正常な状態に見えている。現場に行き電源の暗転しているタッチパネルを押してみても操作音はせず動く様子はない。PLC (Programmable Logic Controller:シーケンサ)との通信エラーは出ていない。

4.6.3 原因の推定

タッチパネルの表示のみの異常と推定。後日メーカー修理の報告書より LED バックライトの故障と判明。製作より 10 年経過しており経年劣化と推定した。

4.6.4 対処の内容

暗転したタッチパネルより、専用ソフトの入ったパソコン (PC) と通信ケーブルを使用 し内部データを抜き取り、予備のタッチパネルにプログラムをインストールしタッチパネ ルの交換を行った。故障したタッチパネルをメーカーにて修理を行い、予備品として保管 した。

4.6.5 今後の電源装置設計に反映すべき内容

予備品のタッチパネルは購入していたが、同型が生産中止の為互換品を購入していた。また電源に合わせたプログラムを入れるために、プログラムの事前インストールは行っておらず、新たにプログラムをインストールする必要があった。その際に、既設のタッチパネルからプログラムを抜き取ろうとしたが、タッチパネルと PC の通信がなかなか上手くいかなかった。抜き出したデータが旧ソフトで作成されているため新ソフト用にコンバートしてインストールを行った。PLC とタッチパネルの通信だが、新旧のタッチパネルでコネクタ形状が違うため(旧型は 25pin、新型は 9pin)通信ケーブルの交換またはコネクタの変換が必要であり、手持ちのケーブルや変換コネクタをやりくりしてもうまくいかず、別のグループから借用して通信できるようになった。以上のことより、予備品は購入していたが、それを使用する環境整備と交換手順が確立されていなかったため、部品を交換するまでにかなりの時間を要した。

今後のタッチパネルの故障に対する準備として、

- ① 電磁石電源ごとの新旧機器の互換性の確認と通信ケーブルの準備
- ② 新旧タッチパネルに対応するプログラムの準備
- ③ 通信用 PC のタッチパネル編集ソフトの整備と新旧タッチパネルとの通信用ケーブルの準備

が必要と判断し、①②③をまとめた交換マニュアルの作成および備品の準備を行い、次 回以降の交換に向けた対応を行った。

4.7 水平シフトバンプ電磁石電源 モニタ表示のズレ (ソフトの不具合)

4.7.1 発生事象

水平シフトバンプ電磁石電源は、16 台ある各電源のタッチパネルと遠隔 PC 画面にて、ステータスを確認することができる。そのうち、FT (Flat Top) ユニットに搭載されている充電器の出力電圧モニタ表示値が設定値 148.0V に対して、全ユニット平均出力電圧モニタ値で 130.9V と約 12%と低く表示されていることが分かった。図 15 は、MLF トリガー時の遠隔 PC で表示されているモニタ一覧で、中央部の枠で囲まれた部分が、MLF トリガー時の各 FT ユニット充電器の個別出力電圧モニタ値を表している。右下の枠で囲まれた部分が、MLF トリガー時の全 FT ユニット充電器の平均出力電圧モニタ値を表している。

4.7.2 調査の内容

FT ユニットの充電器単体で試験を行った場合、出力電圧設定値を 148.0V にした場合、充電器の出力電圧値は 145.0~148.8V と設定値とのずれは小さく許容範囲であった。またその時の充電器の出力電圧モニタ値も換算値で 148V 前後を示しており、充電器側は正常と判断した。次に、水平シフトバンプ電磁石電源のモニタ制御系の確認を行った。調査の結果、PLC のプログラムに不備があり、FT ユニットの充電器の電圧モニタ表示が実際より小さく表示されていることが判明した。

4.7.3 原因の推定

充電器からのアナログモニタ(定格 300V/10V)を PLC のアナログモニタユニットで取り込み、スケーリングと表示の調整を行い、LAN 経由の外部 PC やタッチパネルにモニタ値を表示している。このスケーリングから表示の調整をする過程でプログラムミスを起こしていることが判明した。スケーリングとは具体的に、10V(定格 300V 時)で入ってきた充電電圧モニタ値をプログラム上の数字に換算する際に、10V(定格 300V 時)/20000で変換する設計としていた。しかし実際には 10V(定格 300V 時)/22000 で変換されていため、20000/22000=0.909 倍 低くモニタ表示されていた。

4.7.4 対処の内容

スケーリングを 10V (定格 300V 時) /20000 として、プログラムの見直しを行い、水平シフトバンプ電磁石電源 8 台分 (電源と PLC は 16 分台あるが、PLC は 2 台で 1 組 (マスター/スレーブ方式) となっており、マスター側の PLC プログラムのみを変更する)のプログラム変更を行った。プログラム変更後、出力波形に変化がないことと、各 FT ユニット充電器の電圧モニタ表示が改善されていることを確認した。図 16-1 と図 16-2 にプログラム改修前後のモニター覧を示す。この 2 つの図より、改修後の表示値がほぼ理論値となったことが確認された。

					-	000		100	200		H	H	F	H	F	ŀ	F	ŀ
	AVERAGE	MAX	MIN	201				209			808			_				
AVERAGE CURRENT(A) [to MLF] 139	1390.5			1387.9										_				
	3741.4	3753.0	3730.0	3730.0	3736.0	3739.0	3738.0	3736.0 3	3735.0 37	3733.0 3	3738.0 37	3742.0 37	3745.0 37	3747.0 37	3744.0 375	3753.0 3751.0	1.0 3747.0	0 3748
AVERAGE CURRENT(A) [to MR] 0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
TOTAL VOLTAGE(V) [to MR] 3217.	17.3	3229.0	3209.0	3211.0	3212.0	3214.0	3215.0	3212.0 3	3212.0 32	3209.0 3	3213.0 32	3216.0 32	3220.0 32.	3225.0 32	3222.0 322	3226.0 3229.0	0.0 3225.0	0 3216.0
R/F-UNIT P11 VOLTAGE(V) 187	187.0	188.0	185.6	185.8	187.3	185.6	186.6	186.9 1	187.1 18	187.8 1	187.8 18	187.4 18	188.0 18	187.1 18	186.0 186.	2 188.	0 187.6	187.3
R/F-UNIT P12 VOLTAGE(V) 187	187.0	188.6	185.6	186.1	186.3	187.0	187.5	187.8	186.9 18	187.1	186.3 18	186.3 18	187.3 185.	5.6 187.	7.3 187.1	188.	6 187.5	186.5
R/F-UNIT P21 VOLTAGE(V) 187	187.4	188.4	186.0	187.9	186.3	187.7	187.5	187.1	186.0 18	186.9	186.2 18	188.4 18	187.6 18	187.6 18	187.9 188.	.3 188.	1 187.3	186.9
	187.4	189.9	П	186.2	-	186.9		188.0	189.9	П		186.9 18	Т		Т	188.	5 186.	186.
	186.8	189.0	Г	187.9	Т			1		П	$\overline{}$	П			П	186.	187	
	187.1		184.3	187.8	186.4		187.2				187.5 18	Т						187.9
	187.1	188.2	10	186.7	П		П			П		П			П	.9 188.0		188.
	187.1	188.5		186.7	187.0	186.3	187.4	186.6	186.1 18	186.1	188.0 18		187.4 18	186.9 187.	7.3 187.5	.5 187.7		Г
	186.8	188.3	П	186.2	186.7	Π.	183.9	187.3	П	П	186.6 18	П	186.8 18		П	.9 187.7	7 187.9	188.3
	186.8		Г		Г		Г		Т			Г		Г	П	Г	Г	
	187.2	188.9	185.9	186.2	187.2		188.1		187.3 18	186.9		186.4 18	186.6 18		188.9 187.6	6 187.5	5 188.4	187.3
R/F-UNIT N22 VOLTAGE(V) 186	186.9	188.4	186.1	186.3	Г	186.9	186.9	П	Г		186.1 18	186.8 18	186.6 18:	188.0 18	186.9 187.3	.3 187.5	5 188.4	186.2
R/F-UNIT N31 VOLTAGE(V) 187	187.1	188.5		186.6	185.4		187.1	187.3			187.6 18	188.0 18	187.1 18		186.9 188.5	.5 187.4	4 186.9	187.3
R/F-UNIT N32 VOLTAGE(V) 187	187.0	189.1	184.1	186.1	186.8			188.1	186.2 18	187.3	186.9 18	186.6 18	187.3 18	187.5 18	187.0 188.1	187.	3 184.1	
R/F-UNIT N41 VOLTAGE(V) 187	187.2	189.9	185.5	187.2	187.1	186.4	187.1	186.8			185.5 18	187.6 18	189.9 18	187.5 18	186.5 187.4	.4 187.6	6 186.4	187.8
	7.2	188.0							1		T							
R/F-UNIT PS1 VOLTAGE(V) 56.1	1	57.4	54.2	56.1	56.1	56.2	56.5	56.6 5	55.5 55	55.3 5	55.2 56	56.3 55	55.8 57.3	3 56.5	5 55.6	5 57.4	56.2	54.2
R/F-UNIT P52 VOLTAGE(V) 56.1	1	57.1		55.9		m			56.2 55			56.4 55.6						54.2
R/F-UNIT NS1 VOLTAGE(V) 56.1	1	57.2			Г									6 56.6	П			55.8
	4	57.3														57.3		55.7
R/F-UNIT P61 VOLTAGE(V) 187.1	7.1	188.0	185.6	186.6	186.2	187.0	187.5	187.9	185.6 18	186.9 1	186.5 18	186.4 18	187.6 18	187.1 18	187.5 187.7	187.	3 187.4	188.0
	187.2	188.7	185.4	186.2	Г	187.8	187.2	187.1	186.7 18	185.4	186.3 18	186.6 18	187.3 18	Г	187.2 187.5	.5 187.8	8 187.6	188.7
	187.4	190.1	185.4		186.8	187.3	187.4	187.5	187.4 18	187.3	190.1	187.7 18		186.5 18		7. 187.9	9 187.1	187.6
R/F-IINIT N62 VOLTAGEON	7 1	1897	П	c	П	П	П	Н	1897 18	П	185 1 18	187 3 18	П					П
FT-UNIT P-CHARGE VOLTAGE(V) (to MLF) 130	130.5	132.5		131.0	130.5	129.5	m	131.0	_	131.7 1	131.9 13	130.0 13	131.0 13	130.0 13	131.5 129.2	130.7	7 132.5	131.6
FT-UNIT N-CHARGE VOLTAGE(V) (to MLF) 131.2	1.2	132.3		130.8						1		131.6 130.	6			130	8 130.4	130.9
FI -UNIT P-DCDC VOLTAGE(V) [16 MLF] U.1		0.1	-0.1		0.0	0.1	1.0	ı		-0.1	-0.1 0.2	0.0		ı		0.5	0.0	0.0
FT-UNIT N-DCDC VOLTAGE(V) [to MLF] 0.0		0.1	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0 0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	-0.1	0.0	0.0
FT-UNIT P-CHARGE VOLTAGE(V) [to MR] 0.4		1.8		0.2	0.3	0.2	0.2	0.2 0.	2	0.0	0	3 18	8 0.3	1.1		0.3	0.1	0.2
FT-UNIT N-CHARGE VOLTAGE(V) [to MR] 0.3		1.0	0.0	0.3				2	m		0	0 0	0.3		0.3	0.3	0.2	0.3
FT-UNIT P-DCDC VOLTAGE(V) [to MR] 0.0		0.3		-0.1	0.0		3	0.0	0	0	-0.1 0.	2 -0.1		0.0	0	0.2	-0.1	0.0
FT-UNIT N-DCDC VOLTAGE(V) (to MR) 0.0	0	0.2		0.0	0.0	0.0	0.2	-0.2	0	0	0 0	0.0	0	-0	1 0.2	0.2	0.0	0.0
			2	Average	Current (Average Current (A) < MR >					r Avera	Average Current (A) < MLF >	12 (A) < A	IF >				١
			•	Average:	0.0	MAX:	0.0	MIN	0.0		Averag	Average: 1390.5	0.5 MA		1427.0 M	MIN: 13	1342.1	
< Common				Rise/Fall	Unit [V]	Rise/Fall Unit [V] <mr: p51<="" td=""><td>1000</td><td></td><td></td><td></td><td> Rise/F</td><td></td><td>VJ <mlf< td=""><td>- 19d :</td><td></td><td></td><td></td><td>1 [</td></mlf<></td></mr:>	1000				Rise/F		VJ <mlf< td=""><td>- 19d :</td><td></td><td></td><td></td><td>1 [</td></mlf<>	- 19d :				1 [
Average: 187.1 MAX: 189.9	MIN	183.7	•	Average:	20.7	MAX:	57.4	MIN:	24.2		Average:	e: 187.2		MAX: 19	190.1 M	MIN: 185.1	1.0	
AUTO OPERATION STATUS			[FlatTop L	Init [V] <	FlatTop Unit [V] <mr: n-charge="" p=""></mr:>	CHARG	4			FlatTo	FlatTop Unit [V] <mlf: n-charge<="" p="" td=""><td>] <mlf:< td=""><td>P/N-CH</td><td>ARGE></td><td></td><td></td><td>Г</td></mlf:<></td></mlf:>] <mlf:< td=""><td>P/N-CH</td><td>ARGE></td><td></td><td></td><td>Г</td></mlf:<>	P/N-CH	ARGE>			Г
				Acaraga .	0.0			WIN.	00		Average .	1200		MAY. 12	132.5 M	C 3C1 - NIM	6.3	_

| MIS:遠隔 PC で表示されているモニタ値一覧 (MLF トリガー時)

MLFトリガー時の各 FT ユニット充電器の個別出力電圧モニタ値を表示

MLFトリガー時の全 FT ユニット充電器の平均出力電圧モニタ値を表示



図 16-1: プログラム改修前のモニタ値一覧抜粋 図 16-2: プログラム改修後のモニタ値一覧抜粋 FT 充電器アベレージ電圧: 129.9V FT 充電器アベレージ電圧: 143.0V

改修後の理論値は、129.9 V(図 16-1)÷0.909=142.9 V(理論値)となり、改修後のモニタ値一覧の表示値(図 16-2)がほぼ理論値と同じとなった。

4.7.5 今後の電源装置設計に反映すべき内容

水平シフトバンプ電磁石電源の完成図書を確認したが、各 FT ユニット充電器の電圧モニタ表示(外部 PC やタッチパネル)についての確認項目が見当たらなかった。電源の運用の仕方としては、各充電器の設定値と出力電流波形を見ながら調整し、出力電流波形のフラット部が規定値内に収まっていることをもって正常と判断している。そのため、設定値と出力電流波形は管理対象であったが、各充電器の実電圧モニタは、バランスよく出力できているかどうかや、故障しているユニットが無いかの確認のための参考値の意味合いが強く、あまり重要視していなかったため、検査項目に上がっていなかったと考えられる。模擬的に該当する PLC のアナログ入力ユニットに 10V を入力してタッチパネルが 300Vと出るかどうかを見るだけで今回の不具合は回避できたと思われる。PLC とタッチパネルと DC 電源だけで確認できるので、電源の組み立てが完成する前に、それらをバラックで組んでのデバックも可能である。

5. まとめ

本報告書では、電源装置のメンテナンスからトラブル対応までにおける手法や対処等をまとめ た。これらのことには人の関与が避けられないものである。筆者の小野がメーカーに勤めていた 際にメンテナンス作業を多く経験した。この経験の中で、他のメーカーと合同で TBM を実施した り、客先での安全教育を受講したりと他の企業文化に触れる機会も多くあった。その中で特に忘 れられない文言が 2 点あり、人生の中の教訓としていつも心掛けている。1 つ目は、"4H 作業"で ある。通常"3H 作業"がよく知られおり、「初めて(Hajimete)」、「変更(Henkou)」、「久しぶり (Hisashiburi)」の3つの作業においては、普段に比べ特にミスや失敗が発生し易く、そこから事 故や怪我といった災害につながることも多いというものである。そこにもう 1 つ「引継ぎ (Hikitsugi)」を加えた"4H作業"を学んだ。他人に作業を引き渡すことの重要性を再認識させら れた。原子力機構においては、24時間3交代制にてビーム利用運転を管理しており、引継ぎの作 業は非常に重要な作業の1つである。また、毎回同じ人が点検するわけではなく、次の担当者へ の引継ぎがどれだけ確実且つ正確に出来ているかで作業の質が変わってくると考えられる。「引継 ぎ」の仕組みを構築し、毎日日常的に当たり前にできてこそ、安定したビーム利用運転に貢献で きると考える。2 つ目は、"待て、1 秒"である。色々な作業を行う際、様々なことを考えながら 作業を行っているが、"ここ一番"という場面が現れる。この"ここ一番"の作業時に「もしも」 という意識をし、一呼吸置くことで様々な怪我やミスを防ぐことができると考えられる。慣れて くればくるほどこの意識の度合いを高めて作業に従事すべきであると経験から学んだ。

今後 IT 技術が発展し、人間に代わり AI 等機械による 24 時間監視や自動故障判断へと繋がっていくことが予想される。「慣れ」や「感覚」が入ってしまう人の手による作業を減らし正確動作の機械に任せられる仕事を増やすことができれば、短時間、且つミスが無い高精度なメンテナンスを行うことが可能となる。しかし、その為には、運転に関する情報や作業に関するノウハウのデータを蓄積し、機械への「引継ぎ」が重要なポイントになってくるだろう。また、新しい装置にはないデータのトラブルが発生し、人が対応しなければならこともあるだろう。機器装置の安全安心な維持管理は、今後、人間と機械の共存共栄で行い、その結果、より安定したビーム利用運転ができると考えられる。

謝辞

この報告書を作成するにあたり、多大なる助言を賜り、また様々な経験を与えてくださった多くの方々に深く感謝いたします。