

JAEA-Technology 2015-056 DOI:10.11484/jaea-technology-2015-056

JRR-3制御棒駆動装置コイル電源制御盤の更新

Replacement of Power Supply for Reactor Control Rod Magnet of JRR-3

車田 修 池亀 吉則 大内 諭 佐藤 正幸 上石 瑛伍 和田 茂

Osamu KURUMADA, Yoshinori IKEKAME, Satoshi OHUCHI, Masayuki SATO Eigo KAMIISHI and Shigeru WADA

> 原子力科学研究部門 原子力科学研究所 研究炉加速器管理部

Department of Research Reactor and Tandem Accelerator Nuclear Science Research Institute Sector of Nuclear Science Research **March 2016**

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。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてに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ホームページ(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) 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. Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to 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, 2016

JAEA-Technology 2015-056

JRR-3制御棒駆動装置コイル電源制御盤の更新

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 原子力科学研究所 研究炉加速器管理部

車田 修、池亀 吉則、大内 諭、佐藤 正幸、上石 瑛伍、和田 茂

(2015年12月21日受理)

制御棒駆動装置コイル電源制御盤は、JRR-3 の改造に合わせ設計製作され、設置から 25 年が 経過している。本制御盤は、磁力を発生させ制御棒を保持する電磁コイルに必要な、安定した直 流大電流源としてシリーズレギュレータ方式を採用してきたが、高経年化対策に合わせ本方式の 特徴である高発熱を解消するために、スイッチングレギュレータ方式を採用して行った更新を報 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

JAEA-Technology 2015-056

Replacement of Power Supply for Reactor Control Rod Magnet of JRR-3

Osamu KURUMADA, Yoshinori IKEKAME, Satoshi OHUCHI, Masayuki SATO, Eigo KAMIISHI and Shigeru WADA

Department of Research Reactor and Tandem Accelerator Nuclear Science Research Institute, Sector of Nuclear Science Research Japan Atomic Energy Agency Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 21, 2015)

The power supply for reactor control rod magnet of JRR-3 has been utilized for generating electromagnetic power of control rod coil and that was using more than 25 years. The power supply was required for providing to stabilize DC current. Therefore, we adopted series regulator method. Although, the power supply generate a high heat. Then, we decided to create switching regulator method in order to improve the aging and heat generation of the series regulator method.

This paper reports the replacement of switching regulator method.

Keywords : Power Supply, Reactor Control Rod Magnet, Electromagnetic Power, DC Current, Series Regulator Method, Switching Regulator Method, High Heat, Aging, Replacement, JRR-3

目次

1.はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1
2.CRDM の概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2
3.CRDM コイル電源制御盤の概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	5
4.CRDM コイル電源制御盤の更新 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	8
4.1 電源方式の変更・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	8
4.2 シリーズ方式・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	9
4.3 スイッチング方式 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・1	0
4.4 スイッチング方式の性能検証 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・1	2
4.5 実機構造 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	7
4.6 発熱量の低減化 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・2	3
5.試験検査・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4
5.1 工場試験・検査 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4
5.2 現地検査 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	5
5.3 CRDM 性能確認検査・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・2	5
6.まとめ · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	5
謝辞 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	5

Contents

1. Introduction $\cdot \cdot \cdot$	1
2. Outline of the CRDM • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	2
3. Outline of the Power Supply for Reactor Control Rod Magnet ••••••••••••••••••••••••••••••••••••	5
4. Renewal of the Power Supply for Reactor Control Rod Magnet · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	8
4.1 Change of the power supply method ••••••••••••••••••••••••••••••••••••	8
4.2 Series regulator method • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	9
4.3 Switching regulator method • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	10
4.4 Performance verification of the switching system • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	12
4.5 Structure $\cdot \cdot \cdot$	17
4.6 Reduction of the heat generation ••••••••••••••••••••••••••••••••••••	23
5. Verification of the performance • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	24
5.1 Factory test $\cdot \cdot \cdot$	24
5.2 Local test $\cdot \cdot \cdot$	25
5.3 Performance confirmation test of Power Supply for	
Reactor Control Rod Magnet	25
6. Summary ••••••••••••••••	35
Acknowledgements •••••••••••••••••••••••••••	35

This is a blank page.

1. はじめに

JRR-3 (Japan Research Reactor No.3)の制御棒は、プール上面の照射設備等の作業性を重視 して、プール底部に制御棒駆動装置(Control Rod Drive Mechanism 以下、「CRDM」と示す。) を設置し、制御棒の駆動(引抜、挿入)を行っていることから、プール底部からの漏水を防ぐた め軸封が不要な非接触結合方式を採用した CRDM である。非接触結合方式は、案内管の外側から 可動コイル(電磁コイル)へ CRDM コイル電源制御盤より励磁電流を供給し、発生する磁力によ って内蔵した制御棒を吊り下げることで、制御棒と CRDM が一体化される。

専用に開発されることの多い原子炉施設の機器の中でも、CRDM コイル電源制御盤は原子炉の 運転に欠くことの出来ない制御棒用電源を内包した盤であるため、特注品として製作された盤で ある。本盤は、これまで定期的な点検と予防的に部品交換を行うことで機能を維持してきたが、 高経年化に伴いシリーズレギュレータ方式(以下、シリーズ方式)に使用する交換部品が欠品と なり、機能維持、故障修理と共に、欠品した代替素子のサイズ等の問題によって現行方式では盤 を更新することが困難となった。

このため、本書では、高経年化に伴う早急な対応を迫られる中、原子炉に専用な電源盤の開発 に掛かる多大な費用と原子炉の長期停止を避け、原子炉用に限定することなく、汎用品化された スイッチングレギュレータ方式(以下、スイッチング方式)の応用に着目し行った、新電源盤の 更新について報告する。

2. CRDM の概要

JRR-3 は、低濃縮ウラン軽水減速冷却プール型原子炉である。平成2年11月から最大熱出力20MWで施設共同利用運転を開始し、設置された各種の利用設備は高い中性子束を利用者に提供している。また、冷中性子が利用できることも大きな特徴となっており、主に熱・冷中性子を用いたビーム実験、放射化分析、半導体用シリコン照射及びラジオアイソトープの製造に利用されている。

原子炉の炉心は、深さ 8.5m、内径 4.5m の原子炉プールの底部に設置されており、その形状は 外径 60cm、高さ 75cm の円筒形である。燃料は、標準型燃料要素 26 体、制御棒と接続するフォ ロワ型燃料要素 6 体で、照射筒 5 基及びこれらの周囲を取り囲むベリリウム反射体 12 体によっ て炉心が構成されている。原子炉の運転、出力制御及び停止は、6 体の制御棒を CRDM により引 抜、挿入駆動させることで行っている。制御棒と一体化された CRDM は、反応度制御盤からの原 子炉の目標出力に合わせた制御棒駆動信号により、サーボモーターが回転しボールネジを介して 可動コイルが上下動することで、原子炉出力制御を行っている。

CRDM 仕様表を Table2.1、CRDM 写真を Fig.2.1、可動コイル写真及び図を Fig.2.2、CRDM 概要図を Fig.2.3 に示す。

項目	仕様			
形式	可動コイル型ボールスクリュー駆動方式			
個数	6 体 < 微調整棒 2 体、粗調整棒 4 体 >			
取動方式	通常:サーボモーターからボールネジを介して可動コイルが上下動			
	スクラム : 重力落下			
駆動ストローク	0~800mm			
	形式:可動式水冷却型電磁コイル			
可動コイル	コイル数: 保持用 2個、制御用 1個			
	定格保持力:保持用 MAX85kg、制御用 MAX20kg			
スクラム時挿入時間	約1秒			
取制注中	手動 : 約 10cm/min			
松期还没	自動 : 約 0~30 cm/min(出力状況に合わせて可変)			

Table2.1 CRDM 仕様表



Fig.2.1 CRDM (写真)





Fig.2.2 可動コイル



Fig.2.3 CRDM 概要図

3. CRDM コイル電源制御盤の概要

CRDM コイル電源制御盤は2面の盤より構成され、制御棒各々の電源が1ユニット構造を成し、 1 面あたり3 台ずつ、計6 台収納されている。電源方式にはシリーズ方式(トランジスタ制御) を採用し、一次電力源である3相AC400Vを整流回路にて直流に変換したのち、可動コイル(保 持用コイル定格 DC300V 17A、制御用コイル定格 DC50V 10A)に出力する定電流型直流安定化 電源である。

本盤は、スクラム発生時、上流側の盤で電源が遮断することで、可動コイルへの出力電流が切 れ、制御棒が1s以内に炉心へ急速挿入される。また、電流の制御パラメーターとして原子炉の反 応度制御系からの制御棒の上下駆動に合わせた速度命令信号及び、磁気結合した内部の制御棒と の偏差である相対位置信号をフィードバックし、基準となる電流設定値を増減させることで内部 駆動部とのズレを最小に抑える制御も行っている。そのため、本盤はスクラム時間を担保するた めの早い応答速度と、駆動に応じて制御棒を安定して保持するための電流供給性能が要求される。

既設シリーズ電源仕様表を Table3.1 に、電流制御ブロック図を Fig.3.1、CRDM コイル電源制御盤 写真を Fig.3.2 から Fig.3.4、CRDM コイル電源制御盤制御フロー図を Fig.3.5 に示す。

項目	仕様
Y	盤外径:2400mm(W)×2300mm(H)×1200mm(D)
可伝	電源部:480mm(W)×900mm(H)×900mm(D)
方式	シリーズ方式
定枚山力	保持用コイル定格:DC300V 17A
足俗山刀	制御用コイル定格:DC50V 10A
電源容量	約 7kW
電源増幅部	1 ユニット構造
台数	6台
効率	約 60%(定格出力時)
発熱量	約 3400W/1 ユニット
冷却ファン数	92 台/6 ユニット
重量	約 220kg/1 ユニット
冷却方式	強制空冷方式

Table3.1 既設シリーズ電源仕様表



Fig.3.1 電流制御ブロック図



Fig.3.2 CRDM コイル電源制御盤外部1面(写真)



Fig.3.3 CRDM コイル電源制御盤内部(写真)



Fig.3.4 シリーズ電源電流増幅部 1ユニット引出し状態(写真)



- 7 -

4. CRDM コイル電源制御盤の更新

本盤は CRDM の一部で、使用から 25 年が経過し、高経年化に対する早急な対応が必要である と共に、現行のシリーズ方式は回路の特徴により低効率で発熱が多いことから、構成部品の劣化 の進行と、放熱に使用する冷却ファンの騒音による問題を抱え、更に、騒音緩和のために電源盤 裏に設置した消音装置は、電源ユニット本体が高重量であることと合わせて、メンテナンスの障 害となっていた。

4.1 電源方式の変更

本盤は、CRDMの機能を満たすため要求される性能として、安定した電流供給と速い応答速度 が必要となる。また、問題となっていた高発熱の解消と、装置の重要性から高い信頼性を有した 電源方式を模索する必要があった。

その結果、現代では主流化し、安価で汎用性がある省電力の電源として確立された性能を有す るスイッチング方式を採用することにより、シリーズ方式の問題を解消し更新できることが分か ったため、スイッチング方式へ変更し更新を行った。スイッチング方式とシリーズ方式の性能比 較表を Table4.1 に示す。

	スイッチング方式	シリーズ方式
原理	TR、MOS-FET 等をON、OFF スイッチ 動作させ、出力するエネルギーを調整す る。出力はコイルと、コンデンサで平滑す る。	負荷に対して直列(シリーズ)に安定 化素子(TR、FET等)を接続し出力す る電力以外は、熱に変換して出力を安 定化する。
効率	高い(約 70~90%)	低い(約40~60%)
発熱量	少ない	多い
重さ	軽い	重い
大きさ	小さい(シリーズ方式に比べ 1/4~1/10)	大きい
回路	複雑 ※但し、現在は IC 化が進み基板上に大 きなスペースは取らない	簡単
素子寿命 ※同環境下 で比較	長い	短い
入力電圧	広い	広くすると効率低下
ノイズ	大きい(スイッチングノイズ)	小さい
リップル	大きい	小さい
応答速度	標準	 速い
安定度	高い	高い
価格	安価(一般汎用品利用可能)	高価(汎用品がなく新設計必要)

Table4.1	スイッチング方式とシリーズ方式の性能比較家
Table4.1	- ヘインノマクカムとマソニヘカムの住宅地報

4.2 シリーズ方式

シリーズ方式は、定格出力より大きな電圧を半導体素子により必要な電圧まで下げて一定出力 を得る。動作としては、内部の基準電圧と設定した出力電圧値を比較して電力素子のトランジス タを制御することにより、入力電圧の変動の影響を抑えて、リップル、ノイズが少ない安定した 電源を容易に作れる。一方で、制御により発生する不要な電力は、全て熱として放出されるため、 本電源のような大きな電流を使用する場合、消費電力量が多く、発熱による素子の寿命低下、ま た放熱に多量の冷却ファンが必要となるなどの問題がある。

シリーズ方式説明図を Fig.4.1、シリーズ方式電源出力イメージ図を Fig.4.2 に示す。



Fig.4.1 シリーズ方式説明図



Fig.4.2 シリーズ方式電源出力イメージ図

4.3 スイッチング方式

スイッチング方式は、交流入力を整流、平滑して直流に変換し、スイッチング素子により高周 波のパルスに細分してトランスで変圧後、再度整流、平滑させ、直流出力とする方式である。大 きな特徴として、電力制御素子はほとんどの時間 ON 又は OFF のどちらかの状態におかれ、出 力の制御は、ON、OFF の時間を変えて行う。パルス幅変換回路(PWM 制御方式)にて、必要 な分の出力に比例したパルスをフィードバックすることにより制御する。シリーズ方式と比べ無 駄な電力を発生することがなく、高い電力変換効率、発熱の抑制、騒音の低減化に優れているこ とが特徴である。

ただし、シリーズ方式と比較して使用する素子が多くなり回路が複雑になること、スイッチン グ周波数による応答速度の低下、また、スイッチング素子にて高速で出力の ON/OFF を繰り返す ことによって発生する高周波のスイッチングノイズ※による他機器への影響が懸念される。スイ ッチング方式説明図を Fig.4.3、スイッチング方式電源(PWM 方式)出力イメージ図を Fig.4.4 に示す。

※スイッチング素子を、高速で出力の ON、OFF(スイッチング動作)を繰り返すことによって発生する高 周波のノイズのこと。



Fig.4.3 スイッチング方式説明図



Fig.4.4 スイッチング方式電源(PWM 方式)出力イメージ図

4.4 スイッチング方式の性能検証

スイッチング方式を採用するにあたって、安定した電流供給、速い応答速度(電流制御)並びに 発熱量の低減化が図れること、更にスイッチングノイズによる機器への影響を確認するため、平 成18年度より段階的に試作等を行った後試験機を製作し、CRDMを模擬した試験装置及び実負 荷(可動コイル)を使用してスイッチング方式の性能検証を行った。その結果、スイッチング方 式がCRDMに及ぼす影響はなく、適応することを確認できた。

CRDM コイル電源制御盤更新ステップを Fig.4.5、試験機及び試験装置写真を Fig.4.6、4.7 に示す。

①安定した電流供給(エージング試験)

模擬負荷を使用し、1ヶ月(28日)連続通電試験を行った。その結果、異常な出力電流及 び電源内部温度に上昇は見られず、JRR-3の連続運転に耐えうる性能を備えた電源であるこ とを確認できた。試験機におけるエージング試験結果を Fig.4.8、4.9 へ示す。

②速い応答速度(スクラム時間測定)

スイッチング方式は、方式の特徴としてシリーズ方式に比べて回路が複雑になるため、応 答速度は標準的な速度となる。そのため、出力電流の平滑に使用する電子部品(コンデンサ) 等を最適に選定し、応答速度の高速化を図った。試験装置を使用して、応答速度を総合的に 確認できるスクラム時間を測定した結果、スクラム時間が平均0.6秒とシリーズ方式の約0.6 秒と同時間であると共に、判定基準値の1秒以下を満足した。本結果から、スイッチング方 式の応答速度に対する対応は、設計によって解消できることを確認した。

③入出力特性確認

出力電流値の制御をシリーズ方式の基板によるアナログ制御から、汎用品シーケンサーに よるデジタル制御に変更した。汎用品シーケンサーは性能が明確化しているため、設計に掛 かる時間短縮を図ると共に、大量生産化され初期不良及び故障時において早期復旧が期待で きることから、特注品として製作が必要な従来の基板制御から変更した。試験装置を使用し て入出力特性を確認した結果、入力信号の変動(相対位置指示信号及び速度命令信号)に対 して、出力電流値が判定基準値の許容誤差範囲内(±1%FS以内)であることを確認した。 ④制御棒保持力特性

試験装置にて可動コイルの上昇及び下降動作を行い、動作中の相対位置指示を測定して、 制御棒保持特性の確認を行った。その結果、制御棒フルストローク(0~800mm)駆動に対し て、相対位置指示は±1.0mmの偏差内に止まり、判定基準値(±3.0mm以内)を満足する と共に、シリーズ方式と同様の安定した保持特性を示した。

⑤発熱量測定

スイッチング方式への変更によって、シリーズ方式で約 60%だった効率が、約 83%まで上 昇した。効率向上により、発熱量は1ユニットあたり 3400W から 1000W (定格出力時で計 算) へ、約 1/3 の電力量が低下した。

⑥リップル測定

オシロスコープにて出力電流のリップル波形を測定し、可動コイルへの影響がないことを 確認した。その結果、判定基準である 200mVp-p 以下に対して、保持用コイル電源で 55mVp-p、 制御用コイル電源で 39mVp-p となり、判定基準値を満足すると共に、可動コイル温度上昇 等の影響も発生しなかった。

⑦スイッチングノイズ影響確認

試験機を実負荷へ接続して通電し、スイッチングノイズが原子炉の機器へ影響がないことの確認を行った。その結果、最もノイズの影響が出易い微小電流を取り扱う中性子計装設備の対数出力炉周期計への影響も無く、ノイズ除去対策を行うことによってスイッチング方式を使用できることを確認した。スイッチングノイズ影響確認結果を Fig.4.10 に示す。なお、試験機には、ノイズを発生しない最適な電子部品の配置及び、ノイズを消す配線ルートや配線処理を行うことによってスイッチングノイズの低減化を図った。



Fig.4.5 CRDM コイル電源制御盤更新ステップ



Fig.4.6 試験機(写真)







Fig.4.8 エージング試験結果(出力電流)



試験機連続通電試験温度測定グラフ

- 15 -





Fig.4.10 スイッチングノイズ影響確認結果 ※対数出力炉周期系出力波形

4.5 実機構造

(1) 本体構造

試験機において、スイッチング方式での CRDM コイル電源制御盤に要求される、電流供給 及び応答速度性能を確認できたため、更新では試験機の構造を反映し製作した。また、シリ ーズ方式では、専用に設計開発された部品の入手に時間を要するといった制約があったこと から、部品の仕様が公開され、陳腐化しにくい汎用部品を最大限に活用して製作した。同様 に、出力電流制御においても、汎用品のシーケンサーを使用することで特注品化を避け、故 障発生時の復旧へのリスク低減を図った。

(2) 電流増幅部

スイッチング方式は、高周波でスイッチングさせることにより、トランス等を小型化して 電源本体の軽量化を図れる。その利点を生かし、更新では耐震の計算がされた盤筐体はその まま利用し、電源増幅部(ユニット構造)のみ更新することとした。

シリーズ方式の電流増幅部構造は、制御回路等を内蔵した一体型で、点検及び交換はユニットを取り出し行う構造となっていた。更新では、一体型から機能毎に独立したセパレート型に変更し、①保持用コイル電源ユニット②制御用コイル電源ユニット③制御ユニットの3つのユニットへ分離した。その結果、更新前の約220kgあった総重量は約100kgまで半減し、ユニット毎の点検、修理、交換等が容易に行えるようになった。また、機器の配置にも変化がなく重量が軽減したため、盤の強度を変更することなく更新を行うことができた。

CRDM コイル電源制御盤へ実装した電流増幅部写真と更新した電流増幅部写真を Fig.4.11 及び Fig.4.12 に示す。また、更新したスイッチング方式の電流増幅部概要図を Fig.4.13、保 持用コイル電源ユニット回路図及び制御用コイル電源ユニット回路図を、Fig.4.14、Fig.4.15 に示す。

(3) 冷却ファン冗長化

シリーズ方式は、冷却ファンによって発熱を除去する強制空冷方式を採用していたため、 冷却ファン単体の偶発故障によって電源内部の温度が上昇した場合、CRDM を保護するため に電源を停止する構造であった。スイッチング方式も同様に冷却ファンによる強制空冷方式 を採用したが、冷却ファンの故障に依存しない構造へと改良を行った。

改良は、電源に標準で1台設置される冷却ファンに(冷却ファン1,2)、同じ作動状態の冷却 ファンを1台(冷却ファン3,4) 直列に追加し、合計4台とした。これにより、突発的な故 障によって1台が停止しても冷却機能が失われ内部温度が上昇しないように改良すると共に、 電源の信頼性向上を図った。また、換気風量が増加したことで内部温度が約5度低下したこ とにより部品の劣化を抑制することが期待される。冗長化した冷却ファン写真をFig.4.16に 示す。



Fig.4.11 既設の盤を利用し実装した電流増幅部(写真)



Fig.4.12 更新した電流増幅部(写真)



Fig.4.13 電流增幅部概要図







制御用コイル電源ユニッ Fig.4.15



※制御用コイル電源ユニットは、①、③のみ

Fig.4.16 冗長化ファン(写真)

4.6 発熱量の低減化

スイッチング方式への移行により、電源の効率はシリーズ方式の約 60%から約 85%まで改善し、 1 ユニットあたりの発熱量は 3400W から 900W へ低減され(定格出力時で計算)、発熱による構 成部品の劣化緩和対策が図られた。更に、冷却ファン数は 92 台から 36 台へ大幅に削減され、同 時に、騒音も 64dB から 58dB※へ改善されたことで、騒音対策に設置した消音装置を撤去し、機 器の状態を身近に監視できるようになるなど使用環境が向上した。

撤去した消音装置写真を Fig.4.17 に示す。

※CRDM コイル電源制御盤を停止し測定した値。以前のシリーズ方式では自身の騒音が支配的だった。ファン数が減り騒音が下がったことで他設備のファンの騒音レベルの方が高い。



Fig.4.17 撤去した消音装置(写真)

5. 試験検査

5.1 工場試験·検査

(1)員数検査

製作した電源について、仕様書で要求している員数(7 台:予備機含む)であることを確認した。

(2)外観検査

製作した電源の外観を、目視により、有害な変形及び傷等がないことを確認した。

(3) 寸法検査

電源ユニットの各寸法が寸法許容差(±2mm以内)であることを確認した。

- (4)性能試験
 - ①出力電流特性試験
 - ・保持用:出力電流17Aにて3相AC400V電源電圧を±10%、負荷抵抗を16Ω±10%変化 させ、出力電流の変動を電流計により確認する。
 - ・制御用:出力電流 10A にて3相 AC400V 電源電圧を±10%、負荷抵抗を 4.5Ω±10%変 化させ、出力電流の変動を電流計により確認する。
 - いずれも、出力電流の変動幅が±1%以下であることを確認した。
 - ②基準電流設定範囲測定試験
 - ・保持用:負荷抵抗 16Ωにおいて、基準電流設定範囲を電流計により測定し、基準電流設 定が、下限 8.5A(+0%、-50%)、上限 17A(+50%、-0%)の範囲で設定可能 なことを確認した。
 - ・制御用:負荷抵抗 4.5Ωにおいて、基準電流設定範囲を電流計により測定し、基準電流 設定が、下限 2.0A(+0%、-50%)、上限 10A(+50%、-0%)の範囲で設定可 能なことを確認した。
 - ③シーケンス試験

電源警報回路の動作を確認した。

· 電源内部温度異常

保持用コイル電源ユニット、制御用コイル電源ユニット共に、内部ヒートシンクに 取付けられた温度センサーが 80℃以上で動作すること。

・出力過電流

保持用コイル電源ユニット、制御用コイル電源ユニット共に、定格の±3%以内で 動作すること。

・AC400V 異常

盤入力 AC ブレーカーが OFF またはトリップ時に、異常検出すること。

・PLC 異常

制御ユニット内部シーケンサーの自己診断機能により、異常検出した場合に異常出力すること。

・保持用コイル電源ユニット出力接地

地絡継電器によって検出した信号を出力すること。

・制御用コイル電源ユニット出力接地

地絡継電器によって検出した信号を出力すること。

- ・可動コイル異常 可動コイルからの異常接点入力信号(可動コイル温度高、偏差大)を検出し、異常出 力すること。
- ・保持用コイル電源ユニット冷却ファン停止
 - 冷却ファン停止による回転信号を検出し、異常出力すること。
- ・制御用コイル電源ユニット冷却ファン停止
- 冷却ファン停止による回転信号を検出し、異常出力すること。
- ・制御電源異常 制御ユニットに使用する低圧電源(+24V、+12V)に異常が発生した時、異常出力

すること。

④電源遮断特性測定試験

製作した電源の入力電源(3相AC200V)を遮断し、遮断から保持用コイル出力電圧が負荷 定格電圧から DC30V(定格電圧の10%)になるまでの時間を測定し、判定基準値(40ms) 以内であることを確認した。

⑤絶縁抵抗測定試験

盤内所定箇所の絶縁抵抗を測定し、2MΩ以上であることを確認した。

⑥絶縁耐力測定試験

電源入力端子と筐体間に AC1500V,AC2000V 及び電源出力端子と筐体間に AC500V,AC1600Vを1分間印加し、絶縁破壊等の異常がないことを確認した。

⑦エージング検査

製作した電源を模擬負荷へ接続して1台を1ヶ月(28日)、他6台を7日間の連続通電 し、出力電流値及び電源内部温度に異常な変動が見られないことを確認した。

5.2 現地検査

試験装置にて、以下の検査を実施した。

(1)ゲイン量変動特性検査

相対位置指示信号(±0.25V)及び速度命令信号(±3.96V)を変動させ、出力電流が、 基準電流に対して±3A以上、±2.5A以上変動することを確認した。

(2)可動コイル変動量測定検査

CRDM を下限から上限まで駆動させ、相対位置指示の変化量(最大値)が±3.0mm 以内であることを確認した。

(3)不感時間測定検査

CRDM を、200mm、400mm、600mm の位置から上昇及び下降駆動させ、各々の位置に おいて、CRDM の動き出しから相対位置指示が変化するまでの不感時間が 1 秒以内であ ることを確認した。

5.3 CRDM 性能確認検查

製作した電源の据付けを完了後、更新が正常に行われたことを最終的に確認するため、CRDM の性能を総合的に確認する機能試験として、定期自主検査で行う駆動速度検査及びスクラム時 間測定検査を行った。更に、設置後の初期不良がないこと、スイッチングノイズが他の機器へ 影響を及ぼさないことを確認するため、10日間連続通電試験を行い、原子炉出力制御系の機 器や中性子計装設備など微弱な電流を制御する機器の指示値に影響がないことの確認を行っ た。

(1)スクラム時間測定検査

スクラム時間を測定し、最大そう入時間が1秒以下であることを確認した。スクラム時 間測定結果を Table5.1 に示す。また、スクラム時の制御棒の落下状態に著しい不連続が ないこと及び励磁電源が正常に遮断されることを、遮断後の制御棒挿入状態、位置検出器 の指示値より確認した。

(2)駆動速度検査

制御棒を手動及び自動操作にて、下限位置から上限位置まで引抜及びそう入駆動させ、 駆動速度を測定し、手動操作時(最大 10cm/min 以下)、自動操作時(最大 30cm/min 以 下)であることを確認した。駆動速度検査結果を Table5.2 に示す。また、同時に更新し た電源の出力電流制御が正常に行われていることを確認するため、駆動中の電流値及び相 対位置指示に異常がないことを、プロセス計装系トレンドから確認した。各制御棒の駆動 速度検査時のトレンドを Fig.5.1 から Fig.5.6 に示す。

(3)実負荷連続通電試験

実負荷へ通電した状態で10日間連続通電試験を行い、出力電流値に異常な変動が見られないこと、またスイッチングノイズによって機器の指示値に影響がないことを確認した。 実負荷連続通電試験結果をFig.5.7 へ示す。

判御持夕	スクラム時間(ms)		
削仰徑右	スイッチング方式	シリーズ方式	
判定基準値	1s以内		
Sa-1	477	463	
Sa-2	479	465	
S-1	474	458	
S-2	478	463	
R-1	472	457	
R-2	478	463	

Table5.1 スクラム時間測定結果

当省市内	手動駆動速度(cm/min)			
削 仰	方向	スイッチング方式	シリーズ方式	
判定基準値	10cm/min以下			
So 1	引抜	9.2	9.2	
29-1	挿入	9.0	8.9	
52.2	引抜	9.1	9.1	
Sd-∠	挿入	9.2	9.2	
C 1	引抜	9.2	9.2	
2-1	挿入	9.1	9.1	
5.2	引抜	9.0	9.0	
3-2	挿入	9.2	9.2	
D 1	引抜	9.1	9.1	
K-1	挿入	9.1	9.1	
р <u>э</u>	引抜	9.2	9.2	
K-2	挿入	9.1	9.1	

Table5.2 駆動速度検査結果

制御娃夕	自動駆動速度(cm/min)						
可叫作	方向	方向 スイッチング方式 シリーズ方式					
判定基準値	30cm/min以下						
D 1	引抜	27.3	27.2				
K-1	挿入	27.1	27.0				
	引抜	27.7	27.6				
r-2	挿入	27.4	27.3				





Fig.5.1 駆動速度検査中の出力電流トレンド(Sa-1)





Fig.5.2 駆動速度検査中の出力電流トレンド(Sa-2) ※各値は Sa-1 のトレンドに示した各色と同じ





 Fig.5.3
 駆動速度検査中の出力電流トレンド(S-1)

 ※各値は Sa-1 のトレンドに示した各色と同じ





Fig.5.4 駆動速度検査中の出力電流トレンド(S-2) ※各値は Sa-1 のトレンドに示した各色と同じ





Fig.5.5 駆動速度検査中の出力電流トレンド(**R**-1) ※各値は Sa-1 のトレンドに示した各色と同じ





Fig.5.6 駆動速度検査中の出力電流トレンド(**R**-2) ※各値は Sa-1 のトレンドに示した各色と同じ



Fig.5.7 実負荷連続通電試験結果

6. まとめ

CRDM コイル電源制御盤に要求される、安定した直流大電流の供給並びに応答速度が早い電流 制御性能は、スイッチング方式において全ての試験検査で判定基準値を満足することで、シリー ズ方式と同様の性能を有することを確認した。また、シリーズ方式で問題となっていた高発熱や メンテナンス性についても、スイッチング方式へ変更することで問題を解消することができた。

以上の結果から、高経年化対策に合わせ行ったスイッチング方式を採用した CRDM コイル電源 制御盤の更新は、全て正常に終えた。また、今回、CRDM コイル電源制御盤を更新することで、 長期的な安全運転に供することが可能となった。

研究炉を含む原子炉施設では、専用に開発されることの多い原子炉運転に欠かすことのできない機器の高経年化の進行は、今後の大きな課題である。本件は、高経年化が進む機器の中でも、 CRDMの一部で、原子炉の運転に不可欠な難しい機器の更新であったが、自ら機器が持つ詳細設計を精査し、実証試験を行い試験結果を示すことで、原子炉用に限定することなく、電源方式の違う汎用品を応用した高経年化対策の一例である。

本方法は、機器更新における長期間停止と多大な費用を削減すると共に、JRR-3 施設共用運転 を安定的に行うことができることとなり、機構内外の中性子利用による研究推進へ貢献できると 考えられる。

謝 辞

本報告をまとめるにあたり、研究炉加速器管理部村山洋二部長、鳥居義也次長にご指導ご鞭撻 をいただきました。また、工務技術部工作技術課美留町厚課長、研究炉加速器管理部花島進氏に は、技術的なご指導、貴重な助言をいただきました。ここに感謝の意を表します。 This is a blank page.

表 1. SI 基本単位				
甘大昌	SI 基本単位			
盔半里	名称	記号		
長さ	メートル	m		
質 量	キログラム	kg		
時 間	秒	s		
電 流	アンペア	А		
熱力学温度	ケルビン	Κ		
物質量	モル	mol		
光度	カンデラ	cd		

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立	「単位の例
and SI 組立単位	1.
和立里 名称	記号
面 積 平方メートル	m ²
体 積 立方メートル	m ³
速 さ , 速 度 メートル毎秒	m/s
加 速 度メートル毎秒毎秒	m/s^2
波 数 毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度 キログラム毎立方メート	ル kg/m ³
面 積 密 度 キログラム毎平方メート	ν kg/m ²
比体積 立方メートル毎キログラ	ム m ³ /kg
電 流 密 度 アンペア毎平方メート	\mathcal{N} A/m ²
磁 界 の 強 さアンペア毎メートル	A/m
量 濃 度 ^(a) , 濃 度 モル毎立方メートル	mol/m ⁸
質量濃度 キログラム毎立方メート	ル kg/m ³
輝 度 カンデラ毎平方メート	ν cd/m ²
屈 折 率 ^(b) (数字の) 1	1
比 透 磁 率 (b) (数字の) 1	1
(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野	では物質濃度

(substance concentration)ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

		SI 組立単位		
組立量	名称	記号	他のSI単位による	SI基本単位による
		10.0	表し方	表し方
平 面 角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立 体 角	ステラジアン ^(b)	$sr^{(c)}$	1 ^(b)	m^2/m^2
周 波 数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	Ν		m kg s ⁻²
E 力 , 応 力	パスカル	Pa	N/m ²	$m^{-1} kg s^{-2}$
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷,電気量	クーロン	С		s A
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{-2} kg^{-1} s^3 A^2$
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^{-1}$
磁 束 密 度	テスラ	Т	Wb/m ²	$kg s^{-2} A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^{-2} A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光東	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量,比エネルギー分与,	ガレイ	Gy	J/kg	m ² e ⁻²
カーマ	, , , , , , , , , , , , , , , , , , ,	Gy	ong	
線量当量,周辺線量当量,	2 ((g)	Su	I/lrg	2 -2
方向性線量当量,個人線量当量		30	o/kg	III S
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

酸素活性(カタール) kat [s¹ mol
 (a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや ュヒーレントではない。
 (b)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明 示されない。
 (c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d)へルツは周頻現象についてのみ、ペラレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e)センシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。やレシウス度とケルビンの
 (d)ペルジは高頻現象についてのみ、ペラレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e)センジス度はケルビンの特別な名称で、1、通道を表すために使用される。それシウス度とケルビンの
 (f)放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g)単位シーベルト(PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4.単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	SI 組立単位			
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方	
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹	
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²	
表 面 張 九	コニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²	
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹	
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$	
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s ⁻³	
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^2 K^1$	
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 s^{-2} K^{-1}$	
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 s^{-2}$	
熱 伝 導 率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹	
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	$m^{-1} kg s^{-2}$	
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹	
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A	
表 面 電 荷	「クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A	
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	$m^2 s A$	
誘 電 卒	コァラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$	
透 磁 率	ペンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²	
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$	
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}$	
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A	
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{-3}$	
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$	
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³	
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	$m^{-3} s^{-1} mol$	

表 5. SI 接頭語						
乗数	名称	名称 記号 乗数		名称	記号	
10^{24}	э 9	Y	10 ⁻¹	デシ	d	
10^{21}	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	с	
10^{18}	エクサ	Е	10-3	ミリ	m	
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ	
10^{12}	テラ	Т	10 ⁻⁹	ナノ	n	
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	р	
10^{6}	メガ	М	10^{-15}	フェムト	f	
10^{3}	+ 1	k	10^{-18}	アト	а	
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z	
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	v	

表6.SIに属さないが、SIと併用される単位				
名称	記号	SI 単位による値		
分	min	1 min=60 s		
時	h	1 h =60 min=3600 s		
日	d	1 d=24 h=86 400 s		
度	•	1°=(π/180) rad		
分	,	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad		
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad		
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²		
リットル	L, 1	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³		
トン	t	$1 t=10^3 kg$		

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

名称 記		SI 単位で表される数値	
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J	
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ^{·27} kg	
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da	
天 文 単 位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m	

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg≈133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海 里	М	1 M=1852m
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{\cdot 12} \text{ cm})^2=10^{\cdot 28} \text{m}^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	の単位しの教徒的な問題は
ベル	В	31単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
デシベル	dB -	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値		
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J		
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N		
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s		
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} = 10^{-4} \text{m}^2 \text{ s}^{-1}$		
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$		
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx		
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²		
マクスウエル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$		
ガウス	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{-2} = 10^{-4} \text{T}$		
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4 π)A m ⁻¹		
(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ▲ 」				

は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例						
名称 記号		記号	SI 単位で表される数値			
キ	ユ		IJ	-	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
$\scriptstyle u$	\sim	ŀ	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				ĸ	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
$\scriptstyle u$				ム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$
フ	T.		N	Ξ		1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メー	ートル	/系	カラゞ	ット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10 ⁻⁴ kg
ŀ				N	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
力			IJ	-	cal	1 cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー), 4.184J(「熱化学」カロリー)
3	ク			~	ц	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$