高温工学試験研究炉 HTTR の後備停止系用 健全性評価手法の確立

濱本 真平^{1,*}, 川本 大樹¹, 近藤 誠¹,
澤畑 洋明¹, 高田 昌二¹, 篠崎 正幸¹

Establishment of Integrity Evaluation Method for Reserved Shutdown System of High-Temperature Engineering Test Reactor (HTTR)

Shimpei HAMAMOTO^{1,*}, Taiki KAWAMOTO¹, Makoto KONDO¹,
Hiroaki SAWAHATA¹, Shoji TAKADA¹ and Masayuki SHINOZAKI¹

¹Japan Atomic Energy Agency, 4002 Narita-cho, Oarai-machi, Higashi-ibaraki-gun, Ibaraki 311-1393, Japan

(Received September 17, 2015; accepted in revised form November 24, 2015; published online March 18, 2016)

A high-temperature engineering test reactor (HTTR) has a reactivity control system which is accompanied with a reserved shutdown system (RSS). The RSS consists of B₄C/C pellets, a guide tube, an electric plug, a motor which contains a brake and reducer, and so on. In accidents when the control rods cannot be inserted, the electric plug is pulled out by the motor and the B₄C/C pellets fall into the core by gravity. It was revealed that the motor in the RSS drive mechanism did not work as the result of pre-start-up checks as described in the following: (1) The oil which separated from the grease of the motor reducer flowed down from the gap of the oil seal, (2) the separated oil penetrated into the brake, (3) the penetrated oil mixed with the abrasive powder released from the brake disk, and finally, (4) the adhesive mixture blocked the rotation of the motor. A new evaluation method was proposed to detect signs of the motor sticking. Through the overhaul inspection of all RSS drive mechanisms of an HTTR, it was revealed that the proposed method was effective to evaluate the integrity of the RSS drive mechanism.

KEYWORDS: HTTR, HTGR, VHTR, reserved shutdown system, electromagnetic brake

I. 緒 言

高温工学試験研究炉(HTTR)の反応度制御設備は、制御棒系と後備停止系(RSS: Reserved Shutdown System)の、動作原理の異なる2つの独立した系統で構成されている。制御棒系は、通常運転時、原子炉の反応度を制御するとともに、運転時の異常な過渡変化時および事故時に安全かつ確実に原子炉を停止させるものである。後備停止系は、万一、制御棒系が動作不能となり原子炉を停止させることができない場合に、中性子吸収材である炭化ホウ素ペレットを炉心内に重力落下させ、運転状態から原子炉を未臨界にする機能を有するものである。

HTTRでは、原子炉の起動前点検を実施してきたところ、RSSの作動試験時に、本装置の16基のうち1基が正

常に動作しないことが明らかとなった。その後の調査により、不具合の原因を明らかにし¹⁾、この調査結果をもとに動作不良を未然に防止できるよう、健全性評価手法を考案した。ここで健全性とは、RSS駆動機構にRSSの機能に影響を及ぼすような過負荷が発生していない状態をいう。

詳細にパラメータを振った再現実験を数百回以上行うことで、現実性の高い健全性評価手法を構築していたものの、炉内に装荷されているRSS駆動装置の健全性を実際に確認することは重要である。本報は、RSSの不具合の概要について述べ、次に健全性評価手法と、実際にRSS駆動機構の全数を分解点検した結果を総合して確立した、信頼性の高い高温ガス炉内機器の健全性を診断し評価する技術について報告する。

II. 後備停止系の概要

反応度制御設備は、原子炉停止系として16基が配置されており、1つの反応度制御設備に制御棒系として2本の

¹ (独)日本原子力開発機構 大洗研究開発センター

* Corresponding author, E-mail: hamamoto.shimpei@jaea.go.jp

Fig. 1 Structural diagram of Reserved shutdown system and failure event

制御棒と1つのRSSを備えている。RSSの構造をFig. 1に示す。駆動機構は、モータ、平歯車、ボールネジ、電動プラグ等から構成され、モータの回転により電動プラグが引き抜かれ、炭化ホウ素ペレットを炉心に落下させる。電動プラグは、モータを駆動させることによって上下させる。モータの停止は、モータの下部に配置されているブレーキにより行う。

ブレーキは、無励磁作動スプリング型電磁ブレーキであり、カバープレート、ディスク、アーマチュアプレート、コイルおよびスプリング等で構成される。コイルに電圧が印加されないときは、バネがアーマチュアプレートを押し上げ、固定されているカバープレートとの間でディスクを挟み込んでモータの駆動軸を固定する。コイルに電圧が印加されると、アーマチュアプレートがコイル側に引き寄せられ、それによってディスクが解放され、モータが駆動する。

III. 不具合の概要

原子炉の起動前点検において、RSSの電動プラグを2 cm 引き上げる試験を実施したところ、以下の事象が明らかとなった。

- ① 所定の時間内に電動プラグが2 cm 引き上げられないこと
- ② RSS 駆動装置に供給されている電流の測定値が

定格電流値の約0.8 A に対して約2.5 A と高く、モータが過負荷状態にあること

- ③ 電磁ブレーキに供給している電流から推定されるブレーキの解放に要する時間が約93 ms であり、他の健全なRSSと比較して長いこと

RSSを分解点検したところ、駆動機構のうちモータに異常を見出した。まず、ブレーキを分解したところ、ディスクの上下には、粘性の高い黄土色の物質が付着しており、アーマチュアプレートとディスクが混合物によって粘着していた。フーリエ変換赤外分光光度計と顕微鏡観察により、粘着性の物質が、グリスのベースオイルであるポリフェニルエーテルと、ブレーキの材質であるポリイミド樹脂の摩耗粉の混合物であることを明らかにした。

そこで、モータ上部のサイクロ減速機を分解したところ、減速機ケーシング内に充填されているグリスを保持するためのオイルシールに変形があり、充填されていたグリスが大幅に減少していることが確認された。モータ本体については、グリスは認められなかったが、グリスのベースオイルの成分が確認された。分解点検で確認された粘着性の混合物を模擬するため、グリスのベースオイルと、ブレーキの摩耗粉と同程度の粒径(平均粒径 $2\mu\text{m}$)をもつポリイミド粉末を用意し、ブレーキのディスク上に配置して、モータを作動させたところ、作動回数の増加とともに混合物の攪拌が進んだところで、ブレーキが解除されず、

モータがほぼ固着状態となる現象を再現させた。

以上のことから、RSS 駆動機構の動作不良の原因は、Fig. 1 に示すとおり、オイルシールの機能喪失により、グリスの分離油が下部のブレーキディスク部に浸入しブレーキディスクの摩耗粉と混合物を形成させ、粘着性が高くなったところでブレーキが解放されないために、モータが所定の速度で駆動できず、RSS が動作不良に至ったことを確認した。

IV. 健全性評価手法と結果

実機の RSS モータを用いて動作不良の原因を再現したことで、RSS のモータとブレーキの状態に応じた電流波形の変化を明らかにすることができた。グリスの分離油がブレーキに浸入したときの電流の変化を Fig. 2 に示す。正常な RSS 電動プラグ駆動モータが起動されると、Fig. 2(a) の左側に示すように、起動電流が流れ、徐々に安定した電流に落ち着く。モータ起動時から安定した電流に達するまでの時間を測定することで、モータの負荷が増加したことを検知できる。また、ブレーキは、Fig. 2(a) の右側に示すように、電圧を印加するとコイルに電流が流れる。この電流はなだらかな右肩上がりで増加したのち、一定値に落ち着く。コイルに電流が流れるとアーマチュアプレートが吸引され、その際コイルに逆起電力が発生する

ため、これを妨げる向きに電流が流れようとする。その結果、アーマチュアプレートがコイルに引き寄せられる過程で電流応答波形に Fig. 2(a) の丸で示すような特異点が見れる。電流が流れ始めてから、特異点が見れるまでの時間を測定することで、ブレーキの異常を検知できる。ブレーキにオイルが浸入して動作に遅延等の異常が生じると、Fig. 2(b) に示すように、ブレーキ解放時間とモータ起動電流継続時間が延びる。さらに、オイルとブレーキの摩耗粉が練り合わされ粘性が増すと、Fig. 2(c) に示すように、ブレーキの解放動作が明確に現れず、かつモータは過負荷のままとなる。この状態に達すると、RSS は動作不良に至る。

様々な条件の再現試験結果を総合し、今回の不具合を早期に検知できるよう、モータ起動電流継続時間は約 140 ms 以内で、かつブレーキ開放時間は約 38 ms 以内であることを RSS モータの健全性を判定する条件とした。本不具合の発生後、他の 15 基について評価した結果は、Table 1 に示すように、すべて判定条件を満足することを確認した。その後、15 基の RSS を分解点検し、実際の装置の健全性に相違のないことを確認し、本評価手法が有効で信頼できることを示す確証を得た。

Fig. 2 Shift of motor and brake currents associated with progress of failure event

Table 1 Brake release time and Motor starting time

Control rod	Brake release time [ms]	Motor starting time [ms]	Visual inspection
1	93	Unmeasurable	Abnormal
2	30	88	
3	30	87	
4	29	88	
5	29	87	
6	30	89	Normal
7	30	89	
8	30	86	
9	31	88	
10	30	88	
11	30	88	
12	31	87	
13	31	105	
14	32	85	
15	29	87	
16	31	87	

V. 結 言

HTTR 用 RSS 駆動機構のブレーキディスク部に粘性をもった物質が浸入した場合に、モータが動作不良に至る前

に検知できる評価手法を考案するとともに、HTTR で供用中の RSS 駆動機構を分解してその妥当性を確認することで、信頼性の高い RSS 駆動機構の健全性評価手法を確立した。さらに本手法による定期的な検査を HTTR の保安規定および運転手引に明記し、RSS 駆動機構の管理強化を行った。

高温ガス炉は停止中であっても 1 次系圧力バウンダリ内に空気を極力混入させないために、機器を接続するたびに真空引きや He 置換する必要がある。そのため圧力バウンダリの開放を伴う作業には多くの時間がかかる。そのため、機器を据え付けたまま健全性を評価できる本手法を取り入れることで、HTTR を安全かつ合理的に運用することができる。また、ここで確立した技術は、稼働率を約 90% まで高くするために必要となる状態基準による保守管理技術を確立するために必要となる不具合発生の予知技術として、将来の商用高温ガス炉においても有用である。

— 参考文献 —

- 1) S. Hamamoto, K. Iigaki, A. Shimizu, H. Sawahata, M. Kondo, S. Oyama *et al.*, *Report of Investigation on Malfunction of Reserved Shutdown System in HTTR*, JAEA-Technology 2006-030, Japan Atomic Energy Agency (2006), [in Japanese].