83. 「弥生」の反応度パルス運転時 燃料体の振動特性

吉井康司*, 斎藤 勲*, 若林宏明*

(1980年 10月 8日 受理)

(1981年 4月 1日 再受理)

Core Vibrating Characteristics of "YAYOI" in Reactivity Pulse Operation

By Koji YOSHII, Isao SAITHO and Hiroaki WAKABAYASHI

For research reactors as well as power reactors, it is important to watch the integrity of core fuel. Specifically, pulse reactor safety needs monitoring of the dynamic behavior of core fuel every time pulsed.

In August 1976, University of Tokyo research reactor "YAYOI" attained 1 GW pulse core. In this pulse operation, the dynamic displacement or vibration of fuel were measured by the Core Displacement Measuring Devices which were positioned at four points of the core, and used for the radial and axial displacement measurement of core fuel. The data shown here presenting some pictures of YAYOI type fuel dynamics seem very interesting and are very useful as safety measures.

KEYWORDS: core vibrating characteristics, reactivity pulse operation, dynamic behavior, 1 GW pulse core, core displacement measuring devices, YAYOI reactor

I. 概 要

動力用原子炉のみならず、研究用原子炉においても、炉心燃料体の健全性の監視を行うことは重要である。殊に、後者に属するパルス炉⁽¹⁾⁽²⁾においては、その急激な出力上昇のために、その燃料体の動的なふるまいを監視して安全性を保つようにすべきである。米国の単発型高速パルス炉⁽³⁾⁽⁴⁾においては、金属ウラン燃料自身の膨脹変位量を測定する目的で、燃料に非接触型の変位計を数箇所にかけて燃料の直接の変位を測定している⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

東京大学高速中性子源炉「弥生」⁽⁷⁾においても同様の目的で炉心部変位計が設けられており、反応度パルス運転^{(8)~(9)}時の安全系の1つとして、プロセス量計測器である熱電対の応答の遅れを補うプロセス計装となっている。反応度パルス運転は、反応度分括方式によるもので、第1反応度としてパイルオシレータ・POS-1⁽¹¹⁾（即発臨界以下の反応度を有す）を使用し、その後、約600 m/s 素子印加速度の超高速パイルオシレータ・PO S-5⁽¹¹⁾を用いて全反応度0.94% $\Delta k/k$ を炉に印加する。

その結果、パルスゲイン：約 5×10^3 、パルス半値幅：100 μs 、パルスピーク：1 GW 規模のパルス運転が可能である。反応度パルス運転におけるフィードバック効果は、熱膨脹による密度減少に依存しており、その熱膨脹を測定する目的で、炉心部変位計が設けられた。変位計は、炉の建設時にその組込みが検討され、炉心を加工して設置されている。

炉心部変位計は、「弥生」の炉心構成から中核燃料の熱膨脹および振動現象を直接に観察することができないので、特製の変位伝達治具を介して、炉心燃料の挙動を観測する。そのため、得られた測定結果から中核燃料の挙動解析をするには、現象のモデル化が必要である。本報では、測定結果を示すとともに現象のモデル化の考察を行なった。また、炉心部変位計が反応度パルス運転における全積算出力を推定する手段になることを示す。

* 東京大学工学部附属原子力工学研究施設(Nucl. Eng. Lab., Fac. of Eng., Univ. of Tokyo)

II. 測定方法

1. 「弥生」の炉心構成(Fig. 1)⁽¹²⁾

中核燃料はA, B, Cと名付けられた直径約124mmφの円柱形の燃料要素の集合体で、93%濃縮U 28kgであり、おのおの約0.7mmのステンレス鋼により被覆されている。燃料径方向支持は、各燃料要素の円周下方の突起を2本のレールにはめこみ、円周上面より2本のレールが燃料を押え付けて上下左右の位置ぎめが

なされている。燃料軸方向支持は、側部ブランケット押え盤のスプリングで燃料全体を、A燃料と安全ブロックの間のストッパーに押し付けて前後の位置ぎめがなされている。

2. 変位計の炉心部への配置と測定方法⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾

4系統の変位計のうち2系統は反応度パルス運転時のプロセス計装を構成している。Fig. 1に配置を示す。ここに示すB燃料径方向変位を測定する変位計を(R-1)、軸方向変位を測定する変位計には2種類あり

Fig. 1 Core of "YAYOI" with displacement measuring devices

Fig. 2 Core radial displacement measuring devices (R-1, -2)

(A-1, -2)とする。変位の測定方法は、Fig. 2に示す径方向変位計(R-1)では、燃料被覆部にネジ固定された長さ212mm、内径3.54mmφ、外径4.8mmφの中空の変位伝達棒(SUS製)が燃料の変位を伝達する。その伝達棒の先端に取り付けられたギャップ調整ネジ(真ちゅう製)が、ピックアップである高周波コイルに接近して変位が測定される。

Fig. 3に示す軸方向変位計(A-1)では、スプリングをもつ押え盤の支持具に直接、変位伝達棒(真ちゅう製)が取り付けられ、膨脹した燃料がその支持具を押して伝達棒が高周波コイル内に挿入される。また、1978年に取り付けられた新規軸方向変位計(A-2)は、軸方向変位計(A-1)自身がスプリングの影響を受けている可能性が考えられたので、燃料押え盤を改良してスプリングの影響を受けない位置で(燃料径方向で中心より半径30mm離れた位置)、直接的に燃料軸方向変位が観測できるようにしたものである。この場合、側部ブランケット被覆材(SUS製)が非接触型ピックアップに接近して、この時のコイルインダクタンス変化を利用して、変位量を電気量に変換し検出する⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。

これらの変位計は新日本測器(株)製で、周波数範囲：

Fig. 3 Position of axial displacement measuring devices (A-1, -2)

DC ~20 kHz, 測定変位量: 1 mm, 最小可能測定変位量: $1\mu\text{m}$ の性能を有している。なお、変位計出力をデジタルメモリーを利用して計測した。増幅器を使用した場合の測定系の応答速度は 10 kHz である。

Ⅲ. 反応度パルス運転時の測定結果

1. 変位計出力波形

変位計の応答性を見るために、パルス炉出力発生時の測定結果を Fig. 4 に示す。核計装⁽¹⁷⁾にて、パルス半値幅約 $100\mu\text{s}$ のパルス炉出力を示しているが、径方向変位計(R-1)は約 3.3 kHz の振動をしながら膨脹する変位を計測している。軸方向変位計(A-1)は、パルス炉出力に比較して幾分応答の遅れをもって膨脹している。これはスプリングの影響のためと考えられる。これらと比較して、もう 1 つの軸方向変位計(A-2)は、

Fig. 4 Typical core displacement data of "YAYOI" reactivity pulse operation (EX 78-04071 C)

パルス出力の立上り直後、負方向に出力が生じ(後に検討を加える)、その後、ゆっくりとした正方向の膨脹を示す。

次に、パルス炉出力発生後、約 40 ms 間の変位計の応答を示す。Fig. 5(a), (b)に、炉ピーク出力の高低による変位計 3 系統の出力波形を示す。Fig. 5(a)は、ピーク出力 118 MW の低出力時、(b)は 1 GW の最高出力時のものである。Fig. 5(a), (b)において、両軸方向変位計はほぼ同じ周期の振動現象を観測しており、低出力時には 3.6 ms の周期であり、高出力時には 7.5 ms と振動周期が長くなっている。パルス運転時における炉心振動現象はきわめて非線型性が強いものである。また、同時に炉ピーク出力が低い場合と高い場合について径方向変位計の出力波形を比較しても、炉出力によりその振動周期が変化している。

そこで、炉ピーク出力と径方向および軸方向変位計の振動周期との関係を Fig. 6 に整理すると、炉ピーク出力が高くなるに従って周期が大きくなっていることがわかる。なお、図中に類似の 2 ケースの測定を示すが、投入反応度に若干の差があるため別々に示している。

2. パルス部積算出力と各変位計の変位量との関係

Fig. 7 は、径方向変位計(R-1)について、パルス部積算出力と変位量との関係を求めたものであるが、ピーク①とピーク②は $80\text{ kW}\cdot\text{s}$ あたりまではほぼ同じ変位量であるが、それ以上になるとピーク①は飽和傾向にあり、ピーク②は増加傾向になっている。また、振動減衰時の平衡変位量③は積算出力に直線比例関係にある。

Fig. 8(a), (b)は、両軸方向変位計(A-1, -2)の振動波形の各ピーク値について、パルス部積算出力と変位量との関係を求めた。パルス発生時の振動ピークを①(軸方向変位計 A-1)、①'(軸方向変位計 A-2)とし、最大ピーク振動を②、②'、最大ピーク振動後の谷の部分の変位を③、③'、そして、パルスピーク出力より約 25 ms 経過しては振動が減衰安定している変位量を④、④'と名付けて求めた。その結果、Fig. 8(a)に示すように、最大ピーク振動の変位は積算出力 $50\text{ kW}\cdot\text{s}$ まで比例関係が成立するが、それ以上は積算出力が大きくなるに従い変位量が急激に大きくなり多次曲線的となる。この場合、両軸方向変位計(A-1, -2)はほぼ同じ変位量を示している。

Fig. 8(b)には、各ピークについて実線により軸方向変位計(A-1)を、破線により軸

(a) EX 78-04061B, pulse peak power: 118 MW

(b) EX 78-04071E, pulse peak power: 1 GW

Fig. 5 (a), (b) Typical core displacement data of "YAYOI" reactivity pulse operation

方向変位計(A-2)の関係を示している。振動減衰時平衡変位量④、④'は両軸方向変位計(A-1, -2)とも同じ値で、積算出力に対して直線比例関係がある。また、軸方向変位計(A-1)のパルス発生時変位量①およびピーク振動後の谷の変位も、積算出力に直線比例関係がある。しかし、軸方向変位計(A-2)のパルス発生時変位量①'は上に凸の2次曲線的な関係にあり、ピーク振動後の谷の変位量③'も積算出力 20 kW・s でピーク値をもつ上に凸の2次曲線的関係がある。

Ⅳ. 測定結果の検討

1. 軸方向変位計(A-1, -2)による振動現象

(1) 軸方向変位計(A-1)に見られる燃料体振動現象において、燃料押え盤のスプリングの影響が大きく出ている可能性を検討するため、スプリングの影響を避けて直接的に燃料を見る位置に変位計を新設した。この測定結果より、軸方向変位計(A-2)の性能は従来の変位計とはほぼ同じであった。

(2) 軸方向の燃料体振動現象は、両軸方向変位計(A-1, -2)の出力波形より燃料体と押え盤と一緒に振動し、燃料体とレールとの摩擦力等により減衰振動していることが考えられる。

(3) パルス出力発生時に、燃料中心軸にある変位計(A-1)と燃料中心軸より約30 mm上側にある変位計(A-2)は、正負の変位量を示した。このような現象は、燃料体の熱膨脹による力が燃料中心軸より下側に働き、また、燃料押え盤のスプリングによる燃料を押える力が中心軸に働いた場合、曲げモーメントが生じてパルス出力発生時に燃料体が傾いたためと考えられる。(Fig. 8(b)参照)

(4) 最大ピーク振動後の谷の部分の変位について、両軸方向変位計(A-1, -2)の変位量と積算出力との関係を見ると(Fig. 8(b)), 軸方向変位計(A-2)は積算出力が30 kW・sを越えると、負の変位量を示した。このような現象は、燃料押え盤のスプリングの反発力により燃料体が押される時、燃料体とレールとの摩擦力と、スプリングの反発力とによる曲げモーメント

がより強く働くため、燃料が傾いて移動する場合に起ると考えられる。

(5) 軸方向変位計(A-1)により観察されたパルス出力発生時の変位量は、パルス部積算出力に対応した変位と思われる。一方、振動減衰後の変位量は、パルス部とパルス出力発生後の減衰出力の両者の寄与によると考えられる。後者を確認するため、In および Au 箔を炉心部A反射体実験孔に挿入し、定常運転での放射化箔の放射化量を基準に

Fig. 6 Time profile of radial displacement (R-1) and axial displacement (A-1, -2) for different peak power

Fig. 7 Radial displacement vs. integral pulse power

Fig. 8 (a), (b) Axial displacement vs. integral pulse power

して、パルス運転時の全積算出力を評価した。

また、非定常運転⁽¹⁴⁾(即発臨界以下の反応度を投入して非定常的にピーク出力 200 kW 以下を出す運転をいう)で得られた変位量と積算出力との関係([付録])を利用し、軸方向変位計の振動減衰後の変位量より、パルス運転時の全積算出力を評価した。この結果をFig. 9に示すが、放射化箔より評価した全積算出力と、軸方向変位計より評価した全積算出力とはよく一致した。このことより、炉心部変位計はパルス運転時の全積算出力計として使用できるといえる。

Fig. 9 Pulse peak power vs. total integral power by three measurements

(6) 軸方向変位の振動現象は、炉出力が大きくなるに従って振動周期が大きくなっている。これは、燃料押え盤にあるスプリングのバネ定数、または燃料体とレールとの摩擦係数が変位量により変化するために起っていると考えられる⁽¹⁸⁾。

2. 径方向変位計(R-1)による振動現象

(1) 径方向変位計(R-1)による振動現象は、炉出力ピーク時点の約 3.3 kHz の高周波振動と、それを含む低周波振動の 2 成分が観察された。この振動現象を検討するため、SUS製の変位伝達棒自身の

固有振動数を計算により求めると、縦振動 1 次固有振動数は 3.59 kHz となった。この結果より、炉出力ピーク時点の高周波振動は、変位伝達棒の縦振動と考えられる。

- (2) Fig. 5 (b)に示すように、反応度パルス運転の高出力運転において、径方向振動波形と軸方向振動波形とがほぼ一致した波形になっている。また、Fig. 6に示すように、両方向振動波形の振動周期がほぼ一致している。これは径方向の低周波振動は軸方向振動の影響を受けたものと考えられる。
- (3) Fig. 7に示す径方向各ピーク変位量とパルス部積算出力との関係を見ると、ピーク①が飽和傾向にあるが、これは燃料が径方向に膨張した際、上部レールのたわみ部に押しつけられるためと考えられる。ピーク②がピーク①より増加傾向にあるのは、燃料の軸方向振動の影響を受けて上部レールのたわみ部より燃料がずれ、上部レールによる押しつけがなくなり、燃料の径方向膨張が大きくなったためと考えられる。

V. 結 論

- (1) 炉心部変位計は、炉心内計装としてよく炉心燃料の挙動を観測できる。
- (2) 炉心部変位計は、反応度パルス運転においてその追従性は良いので、従来から使用している熱電対の応答性の遅れを補うプロセス計装であると考えられる。
- (3) 反応度パルス運転での全積算出力モニタとして変位計を使用できる。
- (4) 変位計自身の応答性能と感度に限界があるため、燃料の固有振動⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾は観測されないが、燃料体を含むシステム全体の振動数の低い振動現象が観測された。

最後に、東京大学工学部原子力工学科の班目春樹助教授には、変位計出力の振動現象の理解に有益なコメントを頂き、また径方向振動現象についてご検討下さったことを感謝します。

— 参 考 文 献 —

- (1) *Proc. US/Japan Seminar on Fast Pulse Reactor held at Univ. of Tokyo, Tokai*, (1976).
- (2) 吹田徳雄, 若林二郎, 住田健二, 安成弘: 原子力誌, 19(2), 73~91 (1977).
- (3) WIMETT, T.F., et al.: *Nucl. Sci. Eng.*, 8, 691~708 (1960).

- (4) WIMETT, T.F., ORUDOFF, J.D.: *Proc. 2nd ICPUAE*, p.419 (1958).
- (5) MIHALZO, J.T.: *ORNL-TM-2330*, (1969).
- (6) REUSCHER, J.A.: *Nucl. Eng. Design*, 18, 213~251 (1972).
- (7) AN, S., et al.: *Proc. 4th ICPUAE*, 7, A/CON F, 49/p.820 (1971).
- (8) WAKABAYASHI, H., et al.: 文献(1), p.131.
- (9) WAKABAYASHI, H., et al.: *UTNL-R-0054*, (1977).
- (10) 斎藤 勲, 若林宏明, 田村孝章, 安 成弘: 東大工紀要, A, No. 16, (昭53).
- (11) TAMURA, T., et al.: *J. Fac. Eng., Univ. of Tokyo* (B), XXXII, No. 3, (1974).
- (12) 東大工原子力工学研究施設 原子炉管理部: *UTNL-D-0002*, (1972).
- (13) 吉井康司, 斎藤 勲, 若林宏明, 田村孝章: 東大工紀要, A, No.14, (昭51).
- (14) 同 上: *UTNL-D-0007*, (1977).
- (15) ELLIS, J.F.: *Trans. Amer. Nucl. Soc.*, 11, 342(1968).
- (16) 堀口文男, 他: 電子通信学会論文誌, J63-C, No. 2(1980).
- (17) 吉井康司, 秋山雅胤, 若林宏明: *UTNL-D-0008*, (1977).
- (18) WAKABAYASHI, H., SAITO, I., TAMURA, T., AN, S.: *J. Fac. Eng., Univ. of Tokyo* (B), XXXIV, No. 1, p.159~173 (1977).
- (19) 宮 健三, 岡村和夫, 安藤良夫: 原子力誌, 17(7), 365(1975).
- (20) MIYA, K., YAGAWA, G.: 文献(1), p.271.

〔付 録〕

「弥生」非定常運転時の炉心部変位応答

非定常運転時に得られた代表的な炉心部変位計の出力波形を、炉出力波形とともにFig.A1に示す。また、非定常運転の炉ピーク出力までの積算出力と変位計3系統の変位量との関係をFig.A2に示す。

Fig. A1 Typical core displacement data of "YAYOI" transient operation

Fig. A2 Integral power at peak power vs. displacement of axial (A-1, -2) and radial (R-1) instrument in "YAYOI" transient operation