785. 沸騰水型原子炉の音響雑音および衝撃音の測定

出海 滋*, 道口 由博*, 山田 喜美雄*,
濱田 憲二郎**, 関戸 洋二**, 瀬川 統迪**

(1984年 1月5日 受理)

Measurement of Acoustic Background Noise and Simulated Impact Sound in BWR

By Shigeru IZUMI, Yoshihiro MICHIGUCHI, Kimio YAMADA,
Kenjiro HAMADA, Yoji SEKIDO and Motomichi SEGAWA

In order to develop a method for detecting and locating metallic loose parts in BWRs, sound properties were studied. Five acoustic sensors were attached to the BWR pressure vessel and simulated impacts were given to the vessel by hitting it with a hammer. Background noise during the actual plant operation and the impact sound were measured and analyzed.

The following results were obtained:

- (1) Signals with S/N of five or more for impacts with an energy of 0.2 J at full power plant operation were obtained by accelerometers located within 6 m from the impact positions.
- (2) Arrival time and amplitude of the impact signals showed a good reproducibility for the same impact position. On the other hand, there was a poor relationship between time or amplitude information and acoustic path length. This fact suggested that there is little chance for impact sound location into reality by analytical methods such as triangulation. It will be one of the solution for the accurate location to make use of data for reference impacts.

KEYWORDS: loose parts, impact location, pressure vessels, sound velocity, amplitude, background noise, signal to noise ratio

I. 緒 言

発電用原子力プラントの1次冷却系に金属異物が存在すると、それが冷却水の流れとともに移動して各種の構造物に接触して損傷を与える恐れがある。海外の原子力プラントでは、このような異物が発見された例がある⁽¹⁾。原子力プラントの信頼性を高く保つためには、このような異物の有無をプラント運転中に継続的に監視することが望まれる。米国原子力規制委員会(USNRC)では、これに関連した Regulatory Guide を発行し、軽水炉への異物を監視する装置(Loose Parts Monitor, LPM)の設置を勧告している⁽²⁾。この Regulatory Guide に従って、米国のほか西独、フランスなどが LPM の開発を進めている⁽³⁾⁽⁴⁾。国内においても同様の開発が進行している⁽⁵⁾。

1次冷却系内の異物は、それが移動する際に圧力容

器壁などに当たったときに発生する音によって検知できる。したがって LPM では、圧力バウンダリーの外壁に圧電型の音響検出器を取り付けて異物の衝突音をモニタする方法が採られる。しかし原子力プラントは、異物が存在しなくても各種の原因で音が発生する。音の発生原因としては、冷却材の流動や沸騰によるもの、制御棒や弁の作動によるもの、ポンプやモータの回転によるものなどがある。異物が衝突したときの音に着目する場合、それ以外の原因で発生する音はすべてバックグラウンド雑音となり排除しなければならない。また、音響検出器には電気的な雑音も発生するこ

* (株)日立製作所エネルギー研究所(Energy Res. Lab., Hitachi, Ltd.)

** 東京電力(株)(Tokyo Elec. Power Co., Inc.)

** 中部電力(株)(Chubu Elec. Power Co., Inc.)

** 中国電力(株)(Chugoku Elec. Power Co., Inc.)

とがあり、これも排除の対象となる。

LPM では、これらの雑音をすべて排除して、異物が原因となって発生した音を検知したときのみ警報を発生することが望ましい。しかし実際には、すべての雑音を排除することは難しく、異物以外の原因で警報を発生することもありうる。したがって、LPM は警報が発生したとき、その原因が異物によるものか否かを分析により確認できる機能が必要となる。また、異物が検知された場合は、その位置を推定できることが望まれる。

このような観点から LPM を開発する場合、通常の状態において原子炉からいかなる雑音が発生し、その特性が運転状態に依存してどのように変化するかを、あらかじめ把握しておくことが極めて重要である。すなわち、実プラントにおいて音響データを採取することにより、次の項目を検討する必要がある。

- (1) 冷却材の流動や沸騰などに伴って発生する連続的なバックグラウンド雑音レベルとその原子炉運転状態との関連の把握。
- (2) 衝撃音を検知する際の検出レベルの把握と SN 比の改善法。
- (3) 衝撃音源の位置標定をするための、衝撃音信号の時間差情報や振幅情報の特性把握。

本報では、BWR を対象に衝撃音および原子炉運転時のバックグラウンド雑音のデータを採取し、上記項目に関して解析した結果について述べる。

II. 実験

1. 実験装置

音響データ採取の対象とした原子炉は中国電力福島根原子力発電所 1 号炉 (BWR, 電気出力 460 MWe) である。この原子炉圧力容器は直径 5 m, 肉厚 12 cm の炭素鋼で、内面には 6 mm 厚のステンレス鋼のライニングが施してある。この圧力容器の外壁および配管ノズル部に音響検出器を取り付けた。取付け場所は、Fig. 1 に示すように、給水配管 135° ノズル部 (FW 135°), 炉心スプレー配管 90° ノズル部 (RCS 90°), 再循環入口配管 300° ノズル部 (PLR IN 300°), 再循環出口配管 180° ノズル部 (PLR OUT 180°) および炉壁下部 190° (VW 190°) の 5 箇所である。用いた音響検出器は ENDEVCO 社 MODEL 2276 である*。この検出器は 3 Hz~8 kHz の周波数範囲に対し ±10% でフラットな周波数応答特性をもち、25 kHz 近辺に共振点をもつ。検出した音響信号はチャージ増幅器で増幅後、データレコーダに記録した。データレコーダは FM 記録方

Fig. 1 Acoustic sensor positions and impact positions on BWR pressure vessel

式を採り、DC~40 kHz (-3 dB) の周波数範囲の記録ができる。記録した信号は波形ディジタルおよび FFT 方式の周波数解析装置を用いて解析した。解析した項目は次の通りである。

- (1) バックグラウンド雑音レベル。
- (2) バックグラウンド雑音の周波数特性。
- (3) 衝撃音の周波数特性。
- (4) 衝撃音の振幅値および音響信号到達時間差の測定。

2. データ採取方法

音響データは、プラント停止時と運転時の双方で採取した。プラント停止時には圧力容器内外に人為的に衝撃を与え、その時の衝撃音のデータを採取した。衝撃を与えた位置は Fig. 1 に示した通りであり、圧力容器外壁については各検出器位置の近傍で同一個所に対し 10 回の衝撃音データを採取した。圧力容器内部は、給水スパーチャ 90° (FWSP 90°), 給水スパーチャ 135° (FWSP 135°), 炉心スプレー炉内配管 90° (RCS IP 90°), ドライヤーブラケット 45° (DB 45°), シュラウドブラケット 0° (SB 0°), 上部グリッド 0° (UG 0°) の各位置に対し、0.2 J のエネルギーで、それぞれ 5 回ずつの衝撃を与えた。圧力容器外壁に対しては衝撃時のエネルギーは不明であるが、おおよそ 0.1~0.5 J である。原子炉運転時には、起動時から定格運転時ま

* 加速度検出器 (accelerometer) の名で市販されている。

での各運転状態においてバックグラウンド雑音データを採取した。

Ⅲ. 解析の結果および検討

1. 定常雑音

BWR では、1 次冷却水の流動や沸騰あるいは再循環ポンプの回転などにより連続的な雑音が発生する。LPM は金属相互間の衝突に伴う衝撃音を検知するものであり、この衝撃音の振幅が連続的な雑音レベルより大きい時にのみ検知が可能である。この雑音レベルは、検出器を取り付ける場所に依存するほか、再循環流量などの原子炉運転状態に大きく依存する。Fig. 2 は、圧力容器の各部位に取り付けた音響検出器で検出された連続雑音の RMS 値の再循環流量依存性を示したものである。雑音レベルは検出位置により 1 桁程度異なり、また再循環流量とともに増加している。給水配管位置を除いては雑音レベルの対数はほぼ再循環流量に比例して増加する。給水配管位置での雑音レベルは、再循環流量よりもむしろ給水流量に依存して変わり、その様子を Fig. 3 に示す。給水配管位置での雑音レベルの対数はほぼ給水流量に比例して変化することがわかる。以上のように、連続雑音のレベルは検出位置により大きく異なるほか、同一位置の雑音レベルは原子炉の運転状態に依存して 1 桁程度変化する。この事実から、同一のエネルギーの衝撃音は定格運転時より

Fig. 2 Recirculation flow dependency of acoustic background noise on BWR

Fig. 3 Feed water flow rate dependency of acoustic background noise on feed water nozzle of BWR

も、原子炉起動時の再循環流量や給水流量の少ない時の方が雑音レベルが低く、検出が容易であることがわかる。

2. 衝撃音信号の SN 比

衝撃音信号を良好な SN 比で検出するためには、バンドパスフィルタにより、バックグラウンド雑音を除去する必要がある。バンドパスフィルタのカットオフ周波数は、衝撃音信号とバックグラウンド雑音の周波数スペクトルを比較して決定する。Fig. 4 (a)~(d)に、給水配管の位置での衝撃音信号とバックグラウンド雑音の周波数スペクトルを示す。図 (a), (b) はそれぞれ RCS 配管、炉壁下部を衝撃したときのスペクトル、図 (c), (d) はそれぞれ給水流量 500 および 2,400 t/h (炉出力 100 %) の時のバックグラウンド雑音のスペクトルである。衝撃音のスペクトルは、衝撃の位置によりあまり変化なく、1.5~15 kHz の成分が大きい。

一方、バックグラウンドでは 1.5 kHz 以下に大きな周波数成分をもつ。したがって、フィルタにより 1.5 kHz を以下カットすれば SN 比は改善できる。なお、この実験で使用した音響検出器は 25 kHz 近傍に共振点があり、10 kHz 以上では周波数応答が平坦でないこと、および 10 kHz 以上は電氣的スパイク雑音が混入しやすいことなどを考慮して 10 kHz 以上の周波数成分はカットすることにした。

Fig. 4 Impact sound background-noise spectra at FW 135° of BWR

このように、各検出位置での衝撃音とバックグラウンド雑音との周波数スペクトルを比較することでバンドパスフィルタの定数を決定し、SN比を改善することが可能である。以上の方法で各検出位置でSN比を改善した割合をTable 1に示す。この表のSN比改善割合は、バンドパスフィルタを使用した場合のSN比を使用しない場合のSN比で割った値を示したものである。改善割合は、検出位置が給水配管の場合が最も大きく約7倍の改善がなされ、その他の位置では1.2~3.6倍の改善が見られた。

Table 1 Improvement rate of S/N by band-pass filters

Sensor position	Frequency range of band-pass filters (kHz)	Improvement rate of S/N
FW 135°	2~10	6.5~7.8
RCS 90°	2~8	2.3~3.5
PLR IN 300°	2~8	1.3~1.6
PLR OUT 180°	1~6	1.3~1.5
VW 190°	1~6	1.2~1.5

Table 2は、バンドパスフィルタによりSN比を改善した時の、定格運転時(460 MWe)の各検出位置での衝撃音信号のSN比を示したものである。この表のデータは、炉内各部に0.2 Jのエネルギーで衝撃を与えた場合のものであり、SN比とともに衝撃位置から検出位置までの距離も示した。0.2 Jのエネルギーに対して上部格子(UG 0°)を除く衝撃位置の音響を少なくとも1個所以上の検出位置でSN比が5以上になっている。

USNRCのRegulatory Guide 1.133では、0.68 Jのエネルギーの衝撃を、その位置から1 mの距離の検出位置でSN比を5以上検出できるようにすることを勧告している⁹⁾。上部格子リム 0°(UG 0°)から各検出位置まではいずれも7 m以上の距離がある。このために衝撃音は検出位置に到達するまでに減衰しSN比が低下している。この表では、音源から検出位置までの距離が6 m以内であれば、0.2 Jの衝撃に対する音を5以上のSN比で検出できており、Regulatory Guideの勧告を十分満足している。なお、次節で述べるように、音響振幅はおよそ距離の1.5乗で減衰する。した

Table 2 S/N of 0.2 J impact sound on BWR at full power operation(Upper column: Distance from impact position to sensor position (m))
(Lower column: S/N)

Sensor position	Impact position					
	FWSP 90°	FWSP 135°	RCSIP 90°	DB 45°	SB 0°	UG 0°
FW 135°	3.7	2.4	3.4	6.1	8.4	7.8
	26	130	5.6	9.1	2.8	3.2
RCS 90°	2.8	4.4	2.4	6.0	7.4	8.0
	20	20	40	11	5.7	4.1
PLR IN 300°	11.4	11.6	10.8	11.6	11.8	11.2
	5.9	11	5.9	9.5	3.4	3.4
PLR OUT 180°	11.1	10.7	11.1	13.5	12.3	11.7
	1.7	2.2	1.7	2.6	1.4	1.3
VW 190°	10.8	10.5	10.8	14.5	10.4	9.8
	2.0	4.9	3.0	4.8	2.3	2.4

がって、衝撃位置から1 mの位置でのSN比は数10～数100となり十分な検出感度となる。

3. 衝撃音の位置情報

LPM では金属異物の存在位置を推定するため衝撃音発生位置を標定することが重要である。衝撃音源の位置は、3個以上の検出位置での音響信号の到達時間差や振幅比の情報を使って標定する。2個所の検出位置への音響到達時間差に媒体の音速を乗じれば、音源から検出位置までの距離差が求まり、音源は検出位置からの距離差が一定となる双曲線上に存在することになる。このようにして決定される2つ以上の双曲線の交点として音源を標定できる。

この方法はいわゆる三角法と呼ばれるもので、AE計測の分野でよく使われるが、LPMでも適用が検討されている⁽⁶⁾。各検出位置における音響信号の振幅比を求め、その値から各検出位置から音源位置までの距離比を決めて位置標定する方法も検討されている⁽⁴⁾。これらの方法により原子炉圧力容器の音源位置標定が可能であるためには、実炉において時間差と距離差が正確な比例関係にあること、あるいは振幅比の対数と距離比の対数とが正確な比例関係にあることが必要である。

Fig. 5 は、音源から検出位置までの距離差と時間差との関係を示したものである。時間差は最初に到達した検出位置の時刻を基準として他の検出位置に到達する時間を示した。時間差に対応する距離差は、音源位置から検出位置まで音響が鋼材中を伝播するとした場合の最短距離の差を示した。同一位置に対しては5～10回の衝撃を与えており、データはそれらの平均値である。5～10回の衝撃に対する時間差データのバラツ

Fig. 5 Relationship between acoustic path length difference and arrival time difference

キは±0.3 ms である。この図において距離差が負の値になっているものがあるが、これは先に音響が到達した検出位置の音源からの距離が後に到達した検出位置の距離よりも遠い場合である。この距離差が負になるデータを除外し、Fig. 5 のデータ点に対する回帰直線の勾配から媒体の音速が約 3,300 m/s であることがわかる。しかしながら、Fig. 5 における時間差のバラツキは、前述の平均値のまわりのバラツキ±0.3 ms に比較して非常に大きく、これらのデータを用いて三角法で位置標定をした場合は大きな誤差となる。このバラ

ツキの原因としては

- (1) 最短の音響伝達経路を伝わるエネルギーが小さいため検出されずに、他の経路を伝わった音響が検出される。
- (2) 音響伝達経路の形状が複雑なため、縦波、横波、表面波が交錯し、見かけの音速が場所により異なる。

などがあるが明らかでない。Fig. 5 のデータのうち、給水配管の衝撃音位置は、給水配管の検出位置から 0.2 m しか離れていない。したがって、給水配管の検出位置には、給水配管衝撃した音響が瞬時(0.1 ms 以内)に検知されるとし、他の検出位置までの距離と到達時間遅れから音速を求めると Table 3 の結果になる。

Table 3 Sound velocity inferred from signal arrival time differences on BWR

Sensor position	Arrival time difference (ms)	Acoustic path difference (m)	Sound velocity (m/s)
FW 135°	0	0	—
RCS 90°	2.6±0.1	5.0	1,900±100
PLR IN 300°	3.3±0.2	12.2	3,700±200
PRL OUT 180°	2.6±0.1	13.3	5,100±200
VW 190°	3.2±0.2	11.1	3,500±200

時間遅れのデータは10回の衝撃データの平均値で、そのバラツキも記してある。このデータから求めた音速は、検出位置ごとに明らかな違いを示している。このことから、原子炉圧力容器のように内部に構造物を含む複雑形状の音響媒体に対して、同一音速を仮定して音源位置標定をすることには無理がある。

振幅情報から音源位置を標定する手法に関しては、Kryter らの研究がある⁽³⁾。この手法の原理は次のようなものである。

i 番目の検出位置での振幅を a_i とし、 K, J を定数とすれば、

$$a_i = K \cdot r_i^{-J} \quad (1)$$

ここに、 r_i : 音源から i 番目の検出位置までの距離と表わせる。別の検出位置 j に対しても同様に

$$a_j = K \cdot r_j^{-J} \quad (2)$$

となるので、これらの比をとれば、

$$\frac{r_i}{r_j} = \left(\frac{a_j}{a_i} \right)^{1/J} \quad (3)$$

となり、2つの検出位置 i, j からの距離の比が一定の軌跡、すなわち円の上に音源があることになる。したがって、いくつかの検出位置に対するこれらの軌跡の交点から音源が決定できる。この方法においては、振幅の距離による減衰定数 J が一定であることが必要条件となる。Fig. 6 は振幅比と距離比との関係を示したものである。この図は給水配管の検出位置に対する距離比と振幅比とを示してある。振幅比は5～10回の衝撃の平均値で、平均値まわりのバラツキは±30%である。この図から回帰直線の勾配を求め、(3)式を用い

れば J は約 1.5 となる。ただし各衝撃位置により、同一の距離比であっても振幅比は約 2 桁にわたってバラツいており、同一点の衝撃に対する平均値のまわりのバラツキ±30%に比較して極めて大きい。この原因も時間差の場合と同様に音響媒体の形状が複雑なためと考えられる。

Fig. 6 Relationship between ratio of acoustic path length and amplitude ratio

(1)式における J の値は、音響媒体が棒状(1次元)、平板(2次元)あるいは3次元の広がりをもつ場合で当然異なる。また、音響の伝播過程で相互に干渉が起こ

って振幅が変化する。したがって、振幅比によって音源位置を標定する際に、 J を一定として取り扱うことには無理がある。

以上の結果から、音速および減衰定数とも原子炉圧力容器では場所に依存して変化するものと考えるのが妥当と考える。ただし、前述したように、同一位置の音源に対する時間差、波高比の再現性は良好であり、Fig. 5, 6の各点は音源位置に固有の値と考えてよい。このことは、音源位置を標定する前に、原子炉圧力容器の既知の位置の衝撃音に関係するデータをあらかじめ採取しておけば、その参照データと未知音源に対するデータとを比較することで、音源を標定することが可能なことを示唆している⁶⁾。

IV. 結 論

BWR内の金属異物の存在を金属相互間の衝突音により検知する方法を検討するため、BWRの圧力容器内外に衝突音を発生させた場合の音響データ、および原子炉運転時におけるバックグラウンド雑音のデータを採取して解析した。その結果、次の結論を得た。

- (1) 原子炉運転時のバックグラウンド雑音のレベルは検出位置により大きく異なり、また再循環流量、給水流量に依存し、定格運転時に最大となる。
- (2) 衝撃音はバンドパスフィルタによりバックグラウンド雑音と区別でき、衝撃音信号のSN比を改

善できる。バンドパスフィルタを用いることで、0.2Jのエネルギーの衝撃を原子炉に与えた場合の衝撃音は、衝撃位置から6m以内にある検出器により5以上のSN比で検知できる。

- (3) 原子炉圧力容器は炉内構造物を含んだ複雑形状のため、媒体の音速および減衰定数は音響伝達経路により大きく異なり、時間差あるいは振幅比の情報から解析的に音源位置を標定することは難しい。ただし、同一位置の音源に対する時間差は ± 0.3 ms、波高比は $\pm 30\%$ 程度の良好な再現性をもつ。

以上の結果から、BWRにおいて金属異物の衝突音は十分なSN比で検知することが可能である。しかし、音源位置標定に関しては三角法などの解析的な手法に代わり参照音源データを使う方法の開発が必要である。

—参考文献—

- (1) MARINI, J., BENARD, D.: *Prog. Nucl. Energy*, **9**, 519 (1981).
- (2) U.S.NRC: Regulatory Guide 1.133, (July 1980).
- (3) KRYTER, R.C., SHAHROKHI, F.: *ORNL-TM* 7967, (1981).
- (4) DIO, W.H., *et al.*: *Prog. Nucl. Energy*, **1**, 747 (1977).
- (5) FUJITA, K., TANAKA, M.: *ibid.*, **9**, 531 (1981).
- (6) IZUMI, S., *et al.*: *J. Nucl. Sci. Technol.*, **21**(2), 94 ~102 (1984).

☆高放射性物質取扱い施設とロボット☆

「遠隔操作技術」研究専門委員会成果報告書

1983年11月30日発行 好評発売中

B5判 タイプオフ印刷 432ページ、定価 8,000円(会員特価 6,000円)(〒400円)

「遠隔操作技術」研究専門委員会は1980年10月本会に設置され、原子力施設とくにホットセルにおける遠隔操作技術に関し、種々の実地見学および調査結果に基づき討論を行なって来た。

その中から日本における高放射性物質取扱い施設(ホットセル施設)およびロボット技術を中心とした遠隔操作技術について取り纏め、本委員会の成果報告書として出版されたものである。内容の詳細は「本誌」25巻、8号(p.672)をご参照下さい。

ご希望の方は学会事務局へお申込み願います。(10部以上一括お申込みの場合は送費無料です)