

JAERI-M

8 6 6 7

BWR格納容器圧力抑制効果小型試験
データ報告No. 3

(圧力振動のスペクトル解析)
(Runs 214-218, Runs 276-282)

1980年2月

久木田 豊

この報告書は、日本原子力研究所が **JAERI-M** レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

BWR格納容器圧力抑制効果小型試験

データ報告No.3

(圧力振動のスペクトル解析
Runs 214-218, Runs 276-282)

日本原子力研究所東海研究所安全工学部

久木田 豊

(1979年12月27日受理)

本試験研究は、BWR用Mark II 格納容器を模擬した小型の試験装置により、冷却材喪失事故時に格納容器圧力抑制系内に発生する種々の動荷重の原因となる熱水力現象の実験的研究を行うことを目的とする。

原研は1976年12月から77年6月にかけて、わが国のBWR所有者グループ（東京電力（株）、東北電力（株）、中部電力（株）、中国電力（株）、日本原子力発電（株）、日立製作所、東京芝浦電気（株）の各社により構成）からの委託のもとに、受託試験研究「BWR格納容器1/6スケールの健全性に関する試験研究」を実施した。本報告では、受託試験研究の一部として行った蒸気凝縮試験において計測した圧力振動のスペクトル解析の結果を報告し、あわせていくつかの考察を試みる。

Mark II Containment 1/6-Scale Pressure Suppression Test Program:
Data Report No. 3 (Fourier Analysis of Pressure Oscillations;
Runs 214-218 and Runs 276-282)

Yutaka KUKITA
Division of Reactor Safety,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received December 27, 1979)

This report documents results of the Fourier-analysis applied to the pressure oscillations measured during the steam condensation tests, performed in the first test phase of the Mark II Containment 1/6-Scale Pressure Suppression Test. The 1/6-Scale Test was initiated to investigate the thermohydraulic responses of a BWR Mark II pressure suppression system during a postulated LOCA, by means of scale model experiments. From January to June, 1977, a series of tests, including twelve steam condensation tests, were performed for the Japanese BWR Owners' Group. During the steam condensation tests, pressure oscillations associated with unsteady steam condensation were measured, and these data were Fourier-analyzed by a digital computer program. The evaluated quantities are power spectral density (PSD) functions, cross power spectral density (CPSD) functions, phase angles and coherence functions. These results are presented with qualitative interpretations and comparison with other test results.

Keywords: BWR, LOCA, Mark II Containment, Pressure Suppression System,
Pressure Oscillation, Scale Model Experiment, Fourier-Analysis,
Steam Condensation Tests, Power Spectral Density

目 次

1. まえがき	1
2. 試験装置と試験方法	2
2.1 模擬格納容器	2
2.2 計測系	3
2.3 試験方法	4
3. データ処理手順	11
3.1 データ処理プログラムの概要	11
3.2 計算方法	11
4. 解析結果	15
4.1 試験条件	15
4.2 解析結果	16
5. 結論と考察	123
5.1 結果の要約	123
5.2 考察	124
謝 辞	127
文 献	128

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Test Facility and Test Procedure	2
2.1 Test Containments	2
2.2 Instrumentation	3
2.3 Test Procedure	4
3. Data Processing Procedure	11
3.1 Data Processing Program	11
3.2 Calculational Procedure	11
4. Analytical Results	15
4.1 Test Conditions	15
4.2 Analytical Results	16
5. Discussion and Conclusions	123
5.1 Summary of Analytical Results	123
5.2 Discussion	124
Acknowledgement	127
References	128

SUMMARY

This report documents results of Fourier-analysis applied to the pressure oscillations measured during the steam condensation test, which were performed in the first test phase of the Mark II Containment 1/6-Scale Pressure Suppression Test. The 1/6-Scale Test was initiated to investigate the thermohydraulic responses of a BWR Mark II pressure suppression system during a postulated LOCA, by means of scale model experiments. The specific phenomena to be investigated are pool swell caused by rapid growth of air bubbles in the suppression pool, and pressure oscillations associated with unsteady condensation of steam in the pool.

The test facility consists of two 1/6-scale test containments with one and five downcomers respectively, a storage tank which stores simulated primary fluid, control and instrumentation systems. The test containments are cylindrical steel tanks which model the corresponding "cell"s in a typical 1100 MWe class Mark II pressure suppression system. Namely, they were designed to be 1/6-scale in vertical dimensions of the pressure suppression system, diameter and spacing of the downcomers. Pressure, temperature, and dynamic behavior of the pool water level are measured to monitor the pool swell and steam condensation phenomena.

From January to June, 1977, a series of tests were performed for the Japanese BWR Owners' Group, which sponsored construction of the test facility and execution of the tests during this period. These tests included twelve steam condensation tests.

The steam condensation tests performed during this period were designed to reproduce the actual steam mass velocities in a Mark II pressure suppression system during a DBA-LOCA, without any scaling. The steam mass velocities performed in the 1-downcomer tests ranged 20 to 77 kg/m²-sec, whereas the maximum velocity for the 5-downcomer tests was only 35 kg/m²-sec because of the pressure losses in the steam line. The test matrix was designed to identify the effects of the primary variables. Number of the downcomers was varied by using the 1-downcomer and 5-downcomer containments, and blocking three downcomers of the 5-downcomer containment. Most of the tests were performed at elevated wetwell pressures, but a few tests were performed at

atmospheric pressure for comparison. Preceding each test, steam was discharged into the drywell at a very small flow rate to replace the drywell air with steam, and thus to minimize the air content in the vent flow during the tests.

Chugging was observed in all of the steam condensation tests except Case 03, which was a 1-downcomer test performed for the steam mass velocity of $77 \text{ kg/m}^2\text{-sec}$. The raw data from these tests have been published in a separate report (Reference 1). Pressure oscillations measured during the tests were Fourier-analyzed by a digital computer program described in this report. The statistical quantities obtained are, power spectral density (PSD) functions, cross power spectral density (CPSD) functions, phase angles, and coherence functions. These results were reviewed for the better understanding of the effects of the variables on the pressure oscillations. The following is a summary of the conclusions drawn from the comparison.

Observations common to the 1-, 2-, and 5-downcomer chuggings

- (1) The chugging frequency increased with increasing steam mass velocity, ranging 2 to 3 Hz.
- (2) Amplitudes of the pressure oscillations generally increased with steam mass velocity.
- (3) The chugging-frequency component was predominant in the pressure oscillations in the drywell, downcomer(s), and wetwell airspace. In the downcomer(s), however, components with higher frequencies (ranging 30 to 60 Hz) were sometimes as large as the chugging-frequency component.
- (4) Amplitude of the chugging-frequency component was maximum in the downcomer(s).
- (5) In the drywell and downcomer(s), the chugging frequency component was coherent and almost in phase.
- (6) On the wall and bottom of the suppression pool, amplitude of the chugging frequency component was significantly lower than in the drywell and downcomer(s). Components with frequencies higher than 10 Hz showed greater amplitudes than low frequency components.
- (7) Amplitude of the pressure oscillation in the pool was maximum on the bottom, and decreased with height from the bottom.
- (8) Throughout the pool, the pressure oscillations were coherent and in phase.

Observations particular to the 1-downcomer chuggings

- (9) Pressure oscillations in the downcomer and pool wall was coherent, except for the low frequencies including the chugging-frequency, and except for the frequencies higher than 40 Hz.
- (10) Pressure spikes were observed on the pool wall and bottom. Each spike was followed by a decaying high-frequency oscillation. Duration of the oscillation increased with steam mass velocity. These decaying oscillations formed an appreciable peak of the PSD function. Tendency in distribution of the PSD function stated in (6) was extreme for the 1-downcomer chuggings.

Observations particular to Case 03

- (11) The fundamental component was predominant throughout the test containment. The fundamental frequency decreased with increasing pool temperature.
- (12) The dominant components, including the fundamental, were coherent throughout the test containment.

Observations particular to the 5-downcomer chuggings

- (13) The high frequency (higher than 10 Hz) components of the pressure oscillations in the drywell and in the downcomer, in two different downcomers, as well as in the downcomers and on the pool wall, were significantly less coherent than in the 1-downcomer chuggings (cf. (9)), though these components were predominant in the pool.
- (14) Amplitudes of the dominant (chugging-frequency) component in the drywell and downcomers were similar to those in the 1-downcomer chuggings. However, amplitudes of the pressure oscillations in the pool were much lower than in the 1-downcomer chuggings. Difference was significant for the frequencies higher than 10 Hz.

Observations particular to the 2-downcomers chuggings

- (15) Similar to (13) for 5-downcomer chuggings.
- (16) Amplitudes of the dominant (chugging-frequency) component in the drywell and downcomers were lower than in the 1-downcomer and 5-downcomer chuggings. However, amplitudes of the pressure oscillations in the pool were similar to those in the 5-downcomer chuggings.
- (17) Distribution of the PSD functions for the pressures on the pool wall and bottom were similar to those obtained for the 1-downcomer chuggings.

Effects of other variables

- (18) Effect of downcomer submergence was not significant. Further experiments are required to identify the effect of the system pressure.

These statistical results are interpreted qualitatively, and compared with the results of other experiments including the Marviken full-scale pressure suppression test. In the above, (13) and (15) imply that chugging in distinct downcomers were not strictly in phase. This will explain the fact that magnitudes of the high frequency components of the pressure oscillations in the pool and in the drywell, as well as amplitudes of the water level inside the downcomers were significantly lower in the multi-downcomer tests than in the 1-downcomer tests. Namely, in the multi-downcomer chuggings, pressure oscillations in the pool and in the drywell are considered to be 'synthesized' of the disturbances originated from (incoherent) sources located at the outlets of the downcomers.

1. ま え が き

沸騰水型原子炉（BWR）の冷却材喪失事故（LOCA）に際して、格納容器圧力抑制系内には種々の過渡的熱水力現象が発生することが予想される。たとえば、事故発生直後には圧力抑制プール中にドライウエルの空気が流入することによりプール水面の上昇（プール・スウェル）を生じ、さらに時間が経過した後には圧力抑制プール内での蒸気の非定常凝縮にともなう種々の圧力振動が発生する。これらの現象は格納容器およびその内部構造物に対する荷重の原因となり、現象の予測は事故時の格納容器健全性の評価のために重要である。

1976年12月から77年6月にかけて、原研はわが国のBWR所有者グループ（東京電力、東北電力、中部電力、中国電力、日本原子力発電、日立製作所、東京芝浦電気の各社により構成）から「BWR格納容器1/6スケールの健全性に関する試験研究」を受託し、新型のBWRに用いられているMark II格納容器を1/6に縮尺した供試体を用いて、プール・スウェルならびに蒸気凝縮時の圧力振動に関する一連の試験を実施した。試験結果は別報¹⁾にまとめられており、試験結果の検討も行われている。²⁾³⁾ 本報告書は、蒸気凝縮時の圧力振動現象の把握を目的として、上記の試験データの一部についてスペクトル解析を行い、その結果について考察し、さらに他の実験研究と比較した結果をまとめたものである。

2. 試験装置と試験方法

試験装置は試験部である2基の模擬格納容器、蓄圧タンクおよび蒸気・空気配管等によって構成される。

LOCA時の1次系冷却材放出は、模擬格納容器内に圧縮空気ないし加圧蒸気を放出することにより模擬する。蒸気凝縮試験においては、蒸気源として原研所内ボイラ（元圧 $5 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ 、最大供給量 10 ton/hr ）を使用した。

本試験装置では、放出流体の圧力、温度、および格納容器内の圧力、温度、水位、歪、変位の計測を行い、これらの計測器出力をデジタルデータ集録装置により磁気テープに記録し、大型計算機によるオフライン処理を行った。

2.1 模擬格納容器

本試験装置の試験部は、それぞれダウンカマ5本（模擬格納容器Ⅰ）および1本（模擬格納容器Ⅱ）を有する2基の模擬格納容器によって構成される。これらの断面図をFig. 2.1に示す。模擬格納容器は1100MWe級MarkⅡ格納容器を模擬したものであり、ウェットウエル部の寸法は実炉相当部分を1/6に縮尺した値となっている。

格納容器Ⅰは、肉厚12mm、内径760mmの円筒容器であり、5本のダウンカマはFig. 2.2に示すように対称に配置され、ダイアフラムフロアおよびブレイシングにより固定されている。

格納容器Ⅱのウェットウエル部は、肉厚9mm、内径340mmの円筒容器（14B STPG38, SCH20）であり、Fig. 2.1に示すようにダウンカマはダイアフラムフロアおよびブレイシングにより固定されている。ウェットウエル断面積およびドライウエル容積は、格納容器Ⅰのほぼ1/5にとられている。

実炉との対応

Table 2.1に実炉の格納容器諸元と模擬格納容器諸元の比較を示す。

ドライウエルについては容積の模擬のみを考慮し、格納容器Ⅰ、Ⅱについて、それぞれダウンカマ1本あたりの容積を実炉のほぼ1/216とした。

Fig. 2.2に示すように、格納容器Ⅰは、典型的な実炉においてダウンカマが最も密に配置されている部分の模擬を目的としている。ただし、ダウンカマの配置は対称とし、ピッチは実炉相当部分の平均的な値を模擬した。また、試験結果相互の比較を容易にするため、格納容器Ⅰ、Ⅱのダウンカマ1本あたりのブール表面積は等しくとられている。

ダウンカマは4B SCH40の鋼管を使用し、出口部のみ肉厚3mmになるようにテーパをほどこした。ダウンカマ入口部形状や入口高さについては、Fig. 2.1に示すように特に模擬を考慮していない。実炉に用いられているジェット・デフレクタを設けなかったため、本試験装置におけるベント系流動抵抗係数は、実炉における値（約2.1～2.5）よりも小さいと考えられる。

ダウンカマはブレイシングにより固定されているが、ブレイシングの形状、位置は、プールスウェルとの干渉をさけたために実炉とは異なる。ダウンカマの固有振動数の実測値は空中で約 50 Hz、浸水状態で約 35 Hz であった。

格納容器の支持

格納容器内（特に液相部）の圧力変動の計測値は、試験装置の機械的特性の影響を受ける可能性がある。本試験装置は ROSA 試験装置の放出ピット上に配置されており、2 基の格納容器はそれぞれウェットウェル気相部のレベルで架台（200×200 H ビーム 2 本）に結合されている。このような構造をとったために、上下モード、あるいは転倒モードに対する機械的強度が不十分であり、圧力の計測値に対しいわゆる FSI（fluid structure interaction）の影響が生ずるのではないかと疑念が表明された⁴⁾。しかしながら、打撃試験の結果によれば、振動の減衰は速やかであり、機械的共振等は認められなかった。また、容器そのものについても、円筒形容器であり比較的肉厚の大きな材料を用いているため、壁面の変形が現象ないし圧力の計測値に影響をおよぼす可能性は少いと考えられた。

2.2 計測系

本試験装置の計測チャンネルの一覧表を Table 2.2 に示す。また、格納容器 I、II における圧力、温度、水位の計測点を Figs. 2.3 - 2.5 に示す。

圧力計測系

圧力は歪ゲージ式圧力変換器により計測した。本試験で使用した圧力変換器は、別報⁽¹⁾のごとく測定流体温度の変化による零点移動・感度変化、感度の経時変化等の問題を生じた。本報の解析結果の考察上特に問題となる温度上昇による感度変化に関しては、変換器の位置の影響が大きく、すなわちダウンカマ内等大きな温度変化を受ける計測点で変化が大きく、プール底面等では変化が少なかった。本報に示す解析結果のうち、パワースペクトル密度および相互スペクトル密度に関しては、このような感度変化の影響を受けている。

同一の変換器により蓄圧タンクの圧力を計測した。

データ集録装置の集録速度が 300 Hz/ch であるため、歪増幅器の渡波特性は、カットオフ周波数 100 Hz とした。

温度計測系

応答速度を高くするため接地型熱電対を採用した。プール内の熱電対は垂直なロッド上に固定されている。周囲への熱損失の評価を目的としてプール部のシェル外面の温度を計測した。蓄圧タンクおよび放出配管内についても計測を行った。

歪・変位計測系

ダウンカマの水平荷重の評価を目的として、ダウンカマ先端部の変位、および支持部の歪の計測を行った。

水位計測系

電気抵抗式触針型水位計による計測を行った。電極はポリイミド樹脂ひふく銅線であり、直流電圧が印加されている。

データ集録系

データ集録計としては、デジタル・データ集録装置 DATAC-2000B (岩崎通信機製) を使用した。マルチプレクサ 100 チャンネルを使用し、サンプリング周波数は 30 kHz (1 チャンネルあたり 300 Hz) 固定とした。

2.3 試験方法

蒸気源として所内ボイラを使用し、実験中の蒸気流量はできるだけ定常に保ち、人為的な空気の混入は行わなかった。試験に先立って蓄圧タンクおよび配管内の空気を蒸気によってパージし、試験中の空気の混入量の低減をはかった。

試験に際しては、まず小流量の蒸気によってドライウエル内の空気をウェットウエルに掃気し、チャギングが激しくなったことによってベント流中の空気分率が低下したことを確認した後、放出弁を開き、規定流量の蒸気を供給して試験を行った。

プール初期温度は水道水の温度のままとし、試験の経過に伴ってプール温度を自然上昇させる方法をとった。

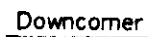
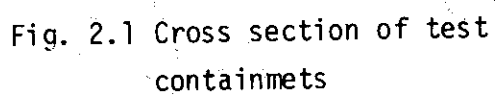


Table 2.1 Comparison table of containment major parameters.

Parameter	Typical 1100 MWe Mark II	JAERI 1/6-scale test facility	
		Test containment I	Test containment II
<u>Volumes</u>			
Drywell (m ³)	5400	1.25	0.25
Wetwell air (m ³)	4100	0.62 - 0.71	0.12 - 0.14
Wetwell water (m ³)	3400	0.48 - 0.58	0.096-0.116
<u>Downcomer</u>			
Number (-)	108	5	1
Diameter (m)	0.59	0.1023	0.1023
Submergence (m)	3.4	0.45 - 0.675	0.45 - 0.675
Clearance, downcomer to pool bottom (m)	3.0	0.50	0.50
<u>Ratios</u>			
Net pool area / vent area (-)	13.4	9.8	9.8
Drywell vol. / vent area (m)	171	30.4	30.4

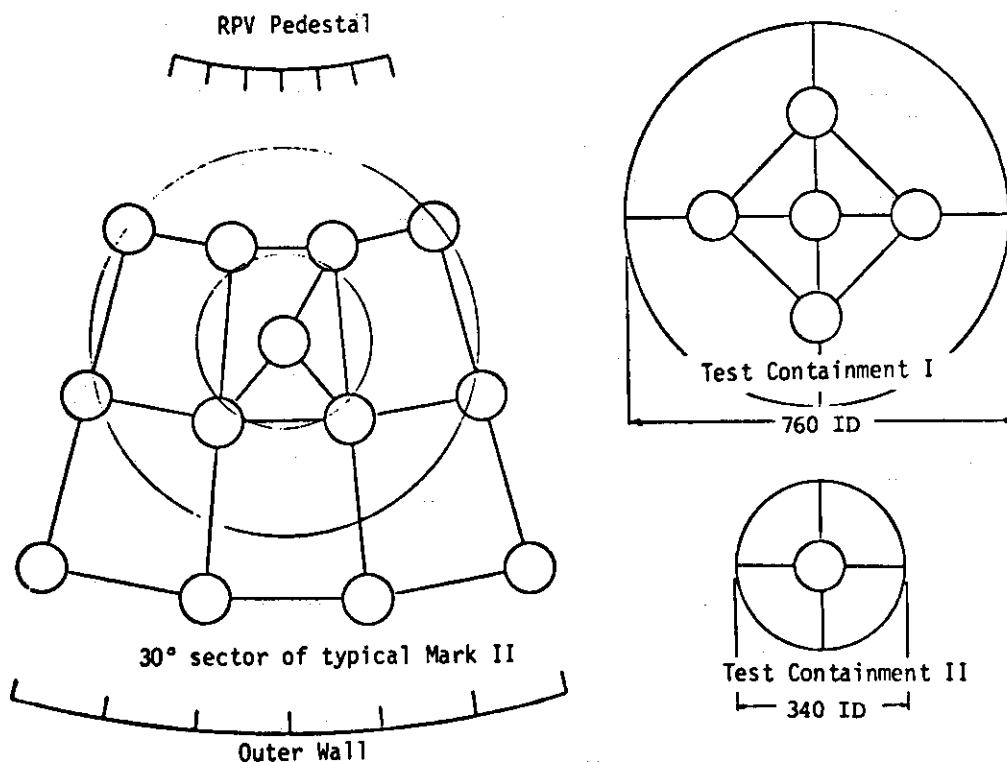


Fig. 2.2 Downcomer arrangement in a typical Mark II containment and 1/6-scale test containments

Table 2.2 Summary of data channels

Ch. No.	Item	Symbol	Meas. in Test Containment- I II	Measuring Point	Remarks
1	Pressure	P1	X	Drywell	See Notes 1,2
2		P2	X	Metwell Airspace	See Note 1
3		P3	X	Downcomer (Center)	
4		P4	X	Downcomer (270°)	
5		P5	X	Downcomer (90°)	
6		P6	X	Pool	
7		P7	X	Pool	
8		P8	X	Pool	
9		P9	X	Pool	
10		P10	X	Bottom	
11		P11	X	Bottom	
12		P12	X	Bottom	
13		P13	X	Metwell Airspace	See Notes 1,2
14		P14	X	Storage Tank	
15		P15	X	Metwell Airspace	
16	Water Level	LCON	X	Metwell Airspace	See Note 3
17	Temperature	T1	X	Drywell	See Note 4
18		T2	X	Metwell Airspace	
19		T3	X	Downcomer	
20		T4	X	Downcomer	
21		T5	X	Downcomer/Pool	
22		T6	X	Pool	
23		T7	X	Pool	
24		T8	X	Shell Outside	
25		T9	X	Pool	
26		T10	X	Bottom	
27	Strain	E11	X	Downcomer (Center)	See Note 5
28		E12	X	Downcomer (90°)	
29		E21	X	Downcomer (90°)	
30		E22	X	Downcomer (270°)	
31		E31	X	Downcomer (270°)	
32		E32	X	Downcomer (270°)	
33	Displacement	D11	X	Downcomer (Center)	See Note 6
34		D12	X	Downcomer (90°)	
35		D21	X	Downcomer (90°)	
36		D22	X	Downcomer (90°)	
37		D31	X	Downcomer (270°)	
38		D32	X	Downcomer (270°)	
39	Water Level	LA1	X	Pool	See Note 7
40		LA2	X	"	
41		LA3	X	"	
42		LA4	X	"	
43		LA5	X	"	
44		LA6	X	"	
45		LA7	X	"	
46		LA8	X	"	
47		LA9	X	"	
48		LA10	X	"	
49		LA11	X	"	
50		LA12	X	"	

Ch. No.	Item	Symbol	Meas. in Test Containment- I II	Measuring Point	Remarks
51	Water Level	LA13	X	"	See Note 7
52		LA14	X	"	
53	Water Level	LB1	X	"	See Note 7
54		LB2	X	"	
55		LB3	X	"	
56		LB4	X	"	
57		LB5	X	"	
58		LB6	X	"	
59		LB7	X	"	
60		LB8	X	"	
61		LB9	X	"	
62		LB10	X	"	
63		LB11	X	"	
64		LB12	X	"	
65		LB13	X	"	
66		LB14	X	"	
67		LB15	X	"	
68	Water Level	LC1	X	Metwell Airspace	See Note 7
69		LC2	X	"	
70		LC3	X	"	
71		LC4	X	"	
72		LC5	X	"	
73		LC6	X	"	
74	Water Level	LVA1	X	Downcomer (Center)	See Note 7
75		LVA2	X	"	
76		LVA3	X	"	
77		LVA4	X	"	
78		LVA5	X	"	
79	Water Level	LVB1	X	Downcomer (90°)	See Note 7
80		LVB2	X	"	
81		LVB3	X	"	
82		LVB4	X	"	
83		LVB5	X	"	
84	Water Level	LVC1	X	Downcomer (270°)	See Note 7
85		LVC2	X	"	
86		LVC3	X	"	
87		LVC4	X	"	
88		LVC5	X	"	
89	Control Sig.	S-1	X	Rupture Disc	
90		S-2	X	Manual Switch	
91	Aux. Ch.				
92					
93					
94	Temperature	T13	X	Storage Tank	
95		T14	X	Inside Piping	

- Notes
1. Strain gage type, Shinkoh PR-105, range: -1 - 10 kg/cm² abs.
 2. Thermally isolated with pressure tube.
 3. Electrostatic type, measurement failed.
 4. 0.5 mm o.d. CA thermocouple, sheathed and grounded.
 5. Alltech SG-125-65 strain gages.
 6. Variable reluctance type, Shinkoh IDS+5mm.
 7. Conductivity type, DC loaded.

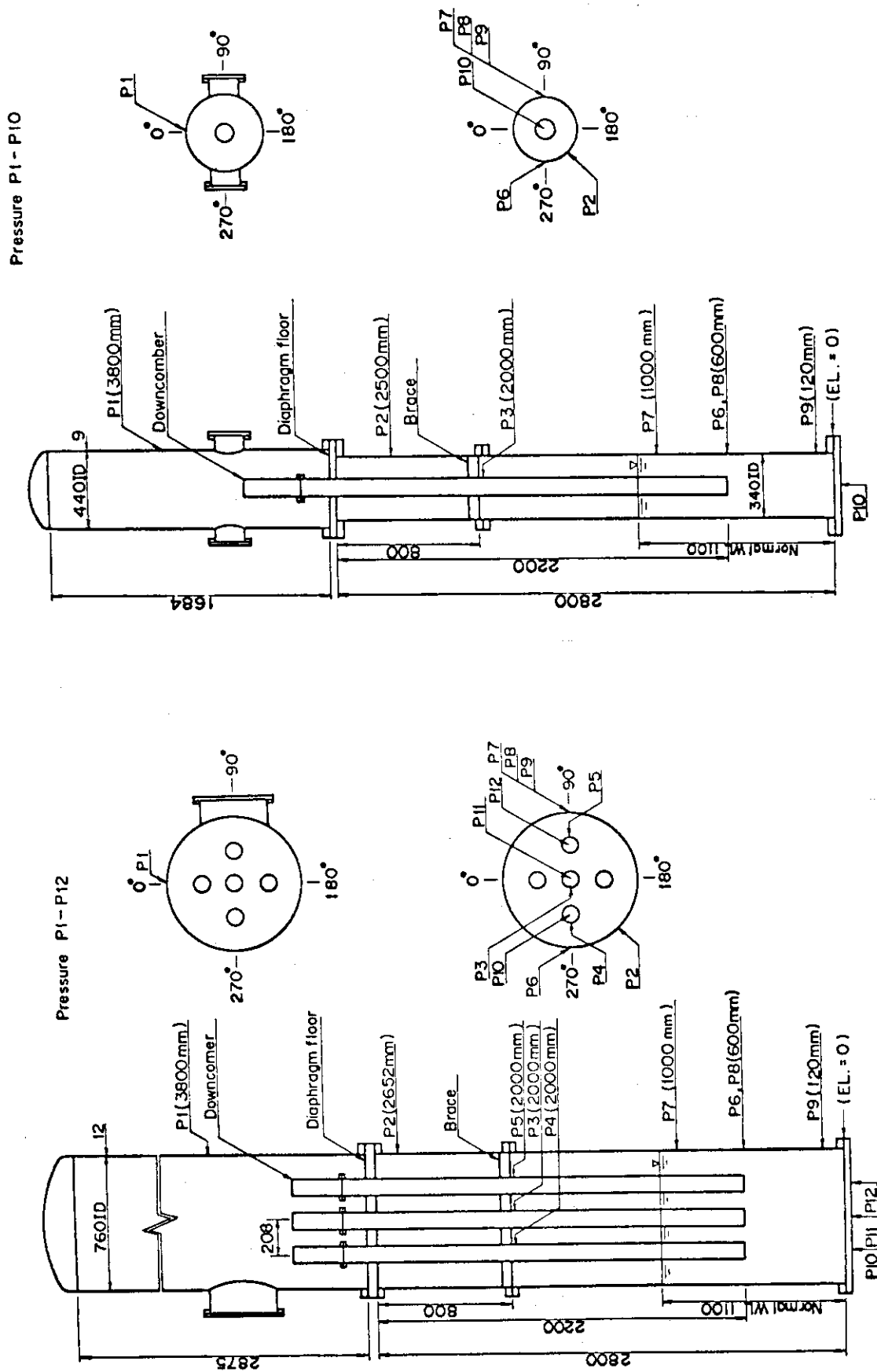


Fig. 2.3 Locations of pressure measuring points

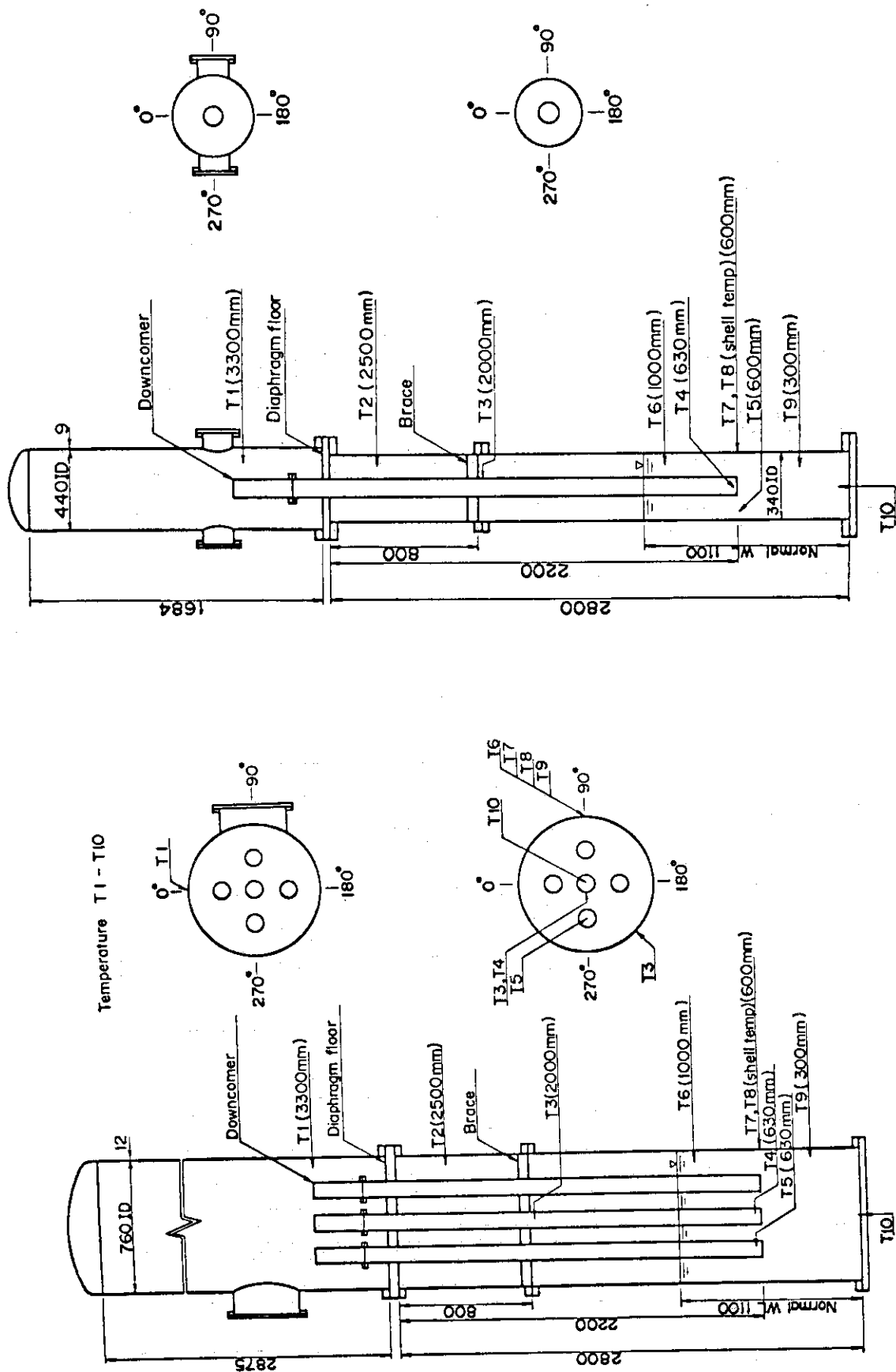


Fig. 2.4 Locations of temperature measuring points

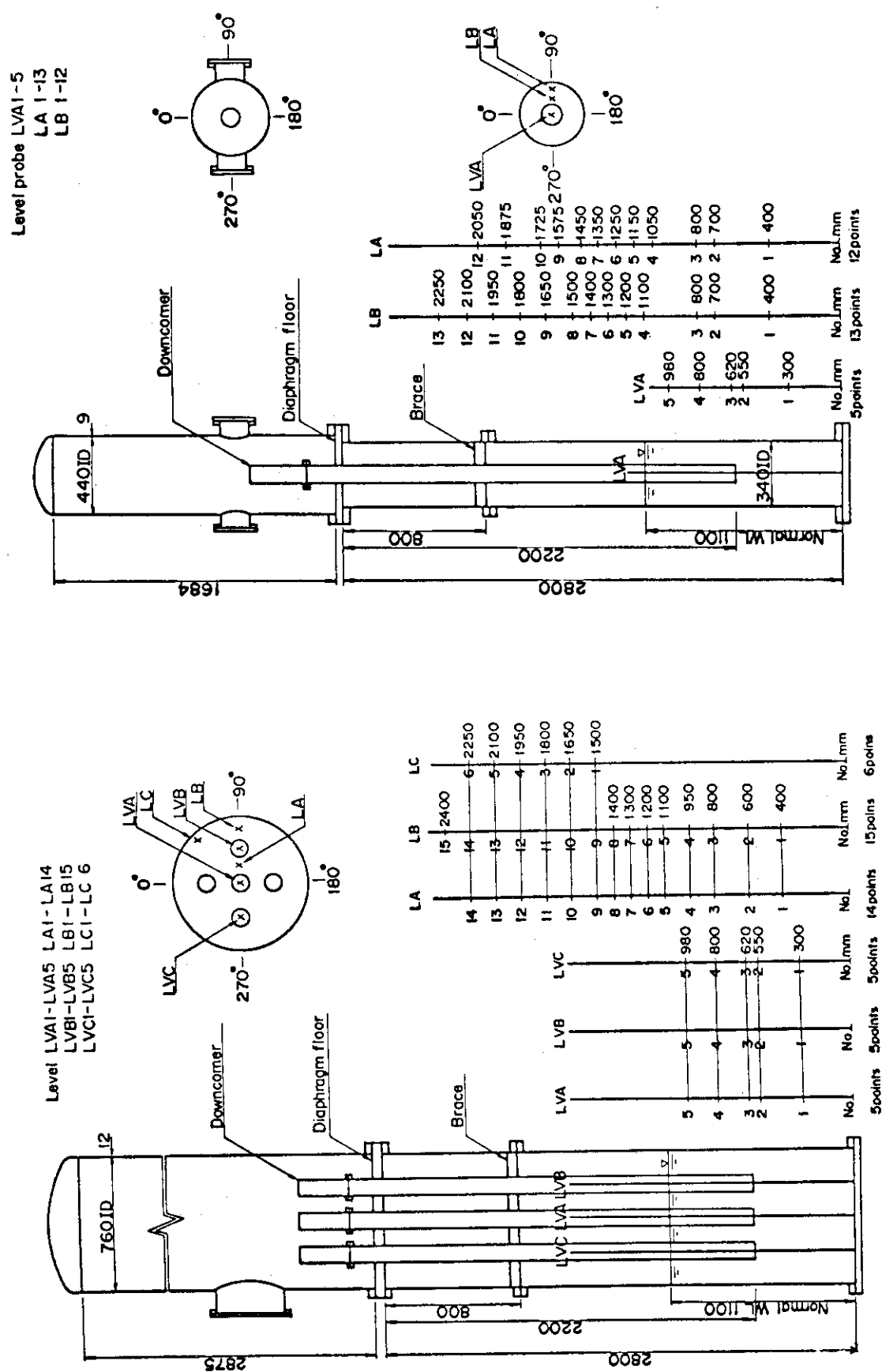


Fig. 2.5 Locations of water level measuring points

3. データ処理手順

蒸気凝縮試験によって得られる、圧力、歪、変位等の変動量のスペクトル解析を目的として計算コードを作成した。

BWR格納容器小型試験装置の試験部は、Mark II 格納容器の圧力抑制系（の一部）を1/6に縮尺したものであり、ダウンカマ1本あたりのプール容積は実炉の1/216である。一方、ダウンカマ内蒸気重量速度は実炉相当値としたため、試験中のプール水温上昇は一般に速やかであり、蒸気凝縮現象を定常系としてとらえることはむずかしい。必然的に、ある時間間隔に関して現象を準定常とみなして解析することになるが、データ数が少いために統計値の誤差の増加はさけられない。このような問題を解決するための試行（いわゆる非定常スペクトルの算出）も報告されているが、^{5) 6)} 本報では標準的な方法による解析結果を報告する。

3.1 データ処理プログラムの概要

物理量に変換された磁気テープから、必要なチャンネル（ここでは格納容器内圧力）のデータを読み出してデータ・ファイルを作成し、これを以下の作業の入力とした。

プログラムの概要をFig. 3.1に示す。まず、入力ファイルから読み込んだデータを各チャンネルごとの時系列に変換し、N個のデータを1単位として高速フーリエ変換（FFT）サブルーチンによりフーリエ変換し、これを作業ファイルに蓄積する。すべてのデータについてフーリエ変換が終了した後、作業ファイルから指定されたチャンネルのフーリエ変換値を読み出してパワースペクトル密度（power spectral density function, PSD function）を計算し、あるいは指定された2チャンネルのフーリエ変換値から、相互パワースペクトル密度（cross power spectral density function, CPSD function）、位相差、コヒーレンス（coherence function）の計算を行う。出力は、M個の（N個のデータによる）小区間の結果を平均し、リストおよびプロット出力を行う。

3.2 計算方法

フーリエ変換は、原研計算センターのライブラリに登録されているサブルーチンFFTSによって行った。データの時系列 $\{X_j\}$ （ $j=1, 2, \dots, N$ ）の有限フーリエ変換は次式であらわされる。

$$\hat{X}_k = \Delta t \cdot \sum_{j=1}^N X_j e^{-2\pi i(j-1)(k-1)} \quad (1)$$

$$(k=1, 2, \dots, N)$$

ここで、 Δt はデータ間の間隔 (sec) であり、データ数 N は 2 のべき乗でなければならない。

使用したデータ集録装置 DATAC-2000B は準同時サンプリング方式をとっているため、チャンネルごとにデータの対応する時刻が異なることを考慮する必要がある。データ集録装置のサンプリング周波数は 30 kHz 一定としたから、第 n チャンネルは第 1 チャンネルに対して $\delta t = (n-1)/30000$ (sec) の時間遅れがあり、各チャンネルのフーリエ変換値に対し次式による補正を行う。

$$(\hat{X}_k)_{\text{compensated}} = \hat{X}_k \cdot e^{-2\pi i f_k \delta t} \quad (2)$$

ここで、 $f_k = \Delta f \cdot (k-1)$ 、 Δf は分解能であって、 $\Delta f = 1/\Delta t \cdot N$ で定義される。計算されたフーリエ変換値を作業用ファイルに書きこむ。ただし、書きこむデータ数 N_p は、表示周波数の上限 $f_{\max}$ に対して、 $f_{\max}/\Delta f \leq (N_p-1)$ をみたす最小の値とする。

パワースペクトル密度 (PSD function) の計算

作業用ファイルからデータのフーリエ変換値を読みこみ、各チャンネルのパワースペクトル密度を計算する。パワースペクトル密度を次式により定義する。

$$G_X(f_k) = \frac{2}{T} \left| \hat{X}_k \right|^2 \quad (3)$$

($k=1, 2, \dots, N_p$)

ここで $T = \Delta t \cdot N$ であり、 $G_X(f_k)$ は周波数 $f_k = \Delta f \cdot (k-1)$ に対応するパワースペクトル密度である。隣接する M 個の小区間について $G_X(f_k)$ を求め、これらの平均値 $\overline{G_X(f_k)}$ を、この区間に関するパワースペクトル密度とする。

相互パワースペクトル密度 (CPSD function) の計算

2 つのチャンネルのデータによる時系列 $\{X_j\}$ 、 $\{Y_j\}$ ($j=1, 2, \dots, N$) の相互スペクトル密度を次式により定義する。

$$G_{XY}(f_k) = \frac{2}{T} \hat{X}_k \cdot \hat{Y}_k^* \quad (4)$$

相互スペクトル密度についても隣接する M 個の小区間に関する平均値を求める。本報ではまず G_{XY} の絶対値を求め、この平均値を求めるという順序をとった。すなわち、本報で表示されるのは、次式で定義される量である。

$$\left| \overline{G_{XY}(f_k)} \right| = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \left| G_{XY}(f_k)_m \right| \quad (5)$$

位相差 (phase angle) の計算

2 つのチャンネルのデータについて、各周波数成分の位相差を求める。位相差は次式で計算される。

$$\theta_{XY}(f_k) = \text{Im} \{ \log(\overline{G_{XY}(f_k)}) \} \quad (6)$$

ここで、

$$\overline{G_{XY}(f_k)} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M G_{XY}(f_k)_m \quad (7)$$

コヒーレンス (coherence function) の計算

コヒーレンスは、2つのチャンネルのデータの各周波数成分間の線型性をあらわす量である。⁵⁾ すなわち、2つのデータの特定周波数成分間の位相差が一定に近い場合コヒーレンスは1に近く、相互に独立な変化をする場合、コヒーレンスは低い。コヒーレンスは次式によって計算する。

$$\Gamma_{XY}(f_k) = \frac{|G_{XY}(f_k)|}{\sqrt{G_X(f_k) G_Y(f_k)}} \quad (8)$$

本報に示した図面では、相互の比較を容易にするため計算上のパラメタはほぼ一定とした。データの集録速度は300 Hz/ch であり、1小区間のデータ数Nは512としたから、分解能は0.586 Hz である。平均の回数Mは標準的な場合で4とし、2から6の範囲で変えた。

計算上、信号の直流分は除去したが、場合によっては低周波成分の除去が充分でなく、グラフのスケールに影響を生じた。グラフは(位相角をのぞき)すべて自動スケールされている。たとえば、縦軸の数値5.0-0.4は 5.0×10^{-4} (kg²/cm⁴・sec)をあらわす。

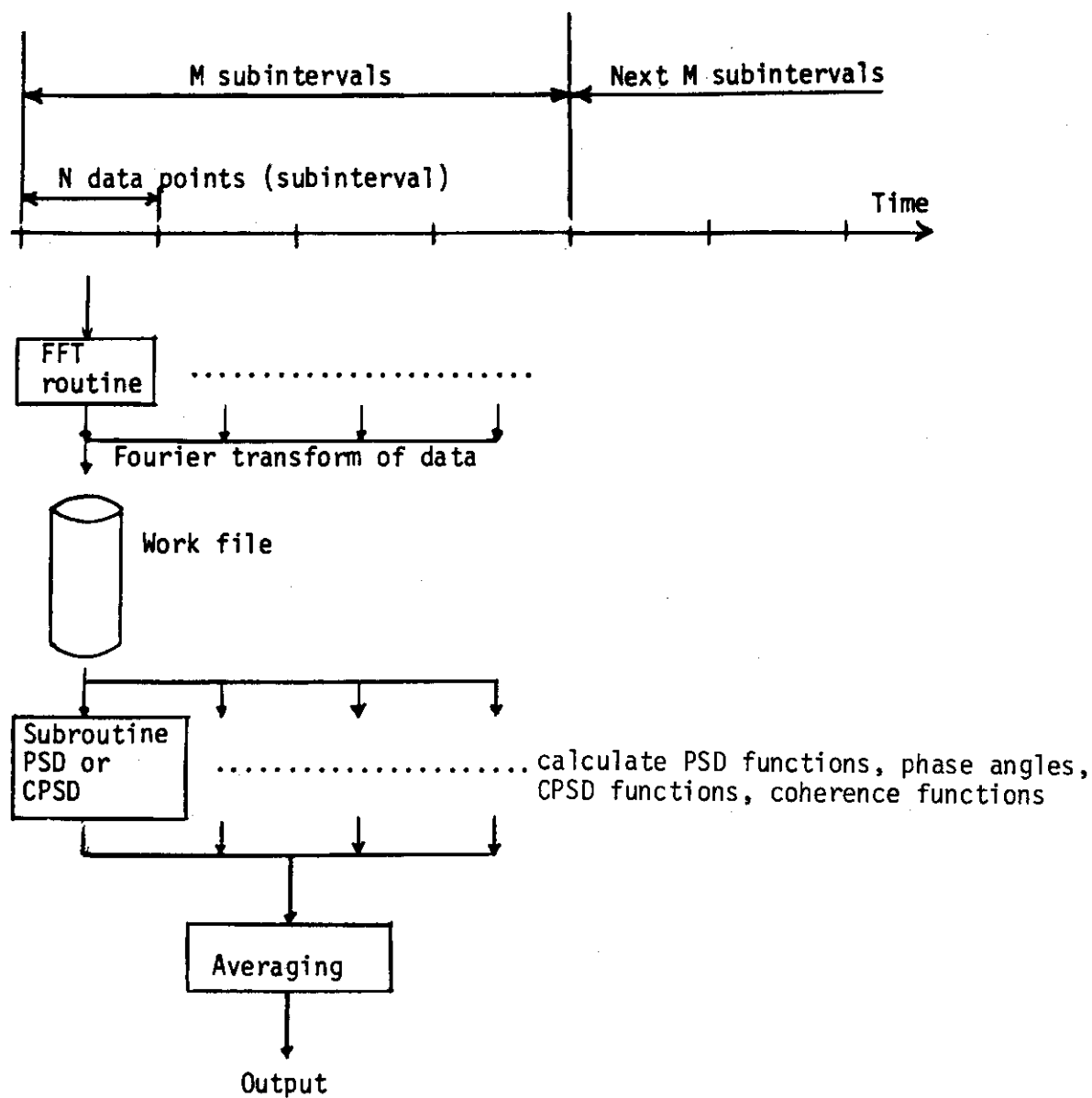


Fig. 3.1 Scheme of data processing procedure

4. 解析結果

4.1 試験条件

昭和52年1月から6月までの試験期間に関して、Table 4.1 に示す12ケースの蒸気凝縮試験が計画された*。表に示すように、ダウンカマ内の蒸気重量速度、ダウンカマ初期浸水深さ、系圧力を試験パラメタとし、格納容器Ⅰ、およびⅡによって同一の条件を反復することにより、ダウンカマ本数の影響を調べることができるよう計画されている。さらに、Table 4.1 中の図に示すように、格納容器Ⅰのダウンカマ5本中の3本を入口で閉鎖し、装置各部容積とダウンカマ本数の比を変化させた試験2ケースが含まれている。

本試験装置はリニアスケール1/6規模であるが、ダウンカマ内蒸気重量速度に関しては、実炉のLOCA時に予想される値をそのまま再現することを意図して設定した。

従来の試験結果によれば、蒸気重量速度が比較的低い条件のもとでいわゆるチャギングが発生し、プール内の圧力振動およびダウンカマへの水平荷重の振幅が大きくなると言われている。チャギングは、ダウンカマ出口での蒸気泡の崩壊をきっかけとして蒸気の供給と凝縮との間の平衡がくずれ、ダウンカマ内に急減圧が発生し、これによってダウンカマ内にプール水が逆流する現象である。また、蒸気泡の崩壊に伴って発生する流動のためにプール壁面およびプール内構造物、ベント管等に動的な荷重が加わる。実物大単一ダウンカマ試験の結果によれば、チャギングの発生条件はプール温度その他のパラメタにより変化するが、ベント管内蒸気重量速度にして約 $30 \text{ kg/m}^2\text{-sec}$ 以下である。

一方、スウェーデンのマルピケン試験施設におけるMX-II試験（実炉の格納容器によるブローダウン試験、ダウンカマ内径300mm、ダウンカマ本数最高57本）では、むしろ蒸気重量速度が比較的大きな条件のもとでダウンカマ内およびプール内の圧力振動の振幅が大きき値を示した。この条件の下では、ドライウエルから供給される蒸気はベント管出口に蒸気塊を形成し、プール水のダウンカマ内への逆流は有ってもわずかである。

本試験ではこのような背景を考慮し、ベント管内蒸気重量速度は $20 \text{ kg/m}^2\text{-sec}$ を下限とする3段階に変化させるよう計画した。

ダウンカマの初期浸水深さは、装置の幾何学的縮尺に従い実炉の値の約1/6として2段階に変化させることとした。

系圧力に関しては、実炉のLOCA時の蒸気凝縮現象と同様な大気圧以上の条件と、ウェットウエル気相部を大気に開放した条件との2種類を計画した。

Table 4.2 に実施された試験条件の要約を示す。蒸気重量速度は放出オリフィス径により制御したが、蒸気供給配管内の圧力損失が著しく、格納容器Ⅰ（5本ダウンカマ）による試験

*この期間の試験は、わが国のBWR所有者グループの出資のもとに実施されたものであり、これらの試験条件はBWR所有者グループとの協議により決定された。

では所定の最大蒸気流速を達成することができなかった(表中Case 07 および Case 08)。

系圧力は、ドライウエルの空気をウェットウエルに掃気することにより上昇させたが、試験開始前のドライウエル内蒸気分圧が一定でないために、必ずしも所定の値は実現されなかった。

プール初期水温に関しては人為的な予熱は行わなかったが、装置の余熱およびプリパージ期間中の温度上昇により、Table 4.2 に示すように試験によってはやや高目となった。

Figs. 4.1 - 4.12 に各試験における系圧力(ウェットウエル気相部圧力)およびプール水温の変化を示す。図に示すようにプール内の温度上昇は一様でなく、格納容器 I, II のいずれにおいても水面に近い計測点(T6)は他の点より低い温度を示し、温度上昇は不規則であった。すなわち、ダウンカマ出口より上方のプール水の混合は円滑でなかった。これらの温度を加重平均して、プール水のエネルギー収支にもとづきダウンカマ内蒸気重量速度を計算した。この結果をTable 4.2 に示す。

ウェットウエル気相部圧力は、プール温度上昇による蒸気分圧の増加、およびダウンカマ、ダイアフラムフロア壁面を通じての加熱により、時間と共に上昇した。

以下で示すパワースペクトル密度分布等のグラフの解釈を助けるため、Table 4.3 にこれらのグラフにおける各フレームとプール温度(プール底面温度T10により代表)の関係を示した。たとえば、Fig. 4.14 のフレーム1(3,000 sec - 9,820 sec)に対するプール温度は41°Cである。

4.2 解析結果

4.2.1 Case 01, Run 216

Case 01は、格納容器II(ダウンカマ1本)を用い、ダウンカマ内蒸気重量速度を約21 kg/m²-secとしたランであり、典型的なチャギングが観察された。Fig. 4.13 に波形の例を示すように、ダウンカマ内の最高水位は少なくとも出口から380 mm以上に達し、最低水位(気泡先端)は少なくとも出口から50 mm下方の点に達した。ダウンカマ、ウェットウエル内の圧力は、鋭いスパイク状の圧力振動を伴っていることが特徴的であり、これらの圧力スパイクの発生は、水がダウンカマ内に流入しはじめる時点に対応している。

Fig. 4.14 - 4.17 に、代表的な圧力計測点に関するパワースペクトル密度分布を示す。ドライウエル内圧力(P1, Fig. 4.14)にみられる低周波数のピーク(約2 Hz)はチャギングの繰返し周波数を示しているが、Fig. 4.13 からわかるように周期性は明瞭ではない。ウェットウエル気相部圧力(P2, Fig. 4.15)は微弱ながら変動を示し、卓越周波数はドライウエルのそれと一致する。すなわちチャギングにともなうプール水面の上下動によって気相部圧力が変動していることを示す。ダウンカマ内圧力(P3, Fig. 4.15)は、全般にドライウエル内圧力より高い振幅(チャギング周波数のパワースペクトル密度にして約2倍)を示し、かつ高周波数成分がやや増加している。プール壁面圧力(P6, Fig. 4.16, ダウンカマ出口レベル)では高周波数成分がさらに増大しているが、Fig. 4.13 にもみとめられるように、チャギング周波数に対応する成分はドライウエル、ダウンカマより小さい。プール底面(P10, Fig. 4.17)では、格納容器全体を通じて高周波数成分の振幅が最も大きい。

チャギング周波数成分が小さいことは壁面 (P6) と同様である。プール内の圧力振動の振幅はプール底面で最大となり、水面に近づくほど小さくなる。壁面上の底面から 120 mm の計測点 (P9), 同じく 1000 mm の計測点 (P7) についてもスペクトル分析を行ったが本報では表示を省略した。なおこれらの波形の例は文献 1 に示されている。

Fig. 4.18 - 4.21 は、2つの圧力計測点間の位相差および相互パワースペクトル密度分布を示す。なお、相互パワースペクトル密度が小さい周波数成分に関して位相差がランダムな変動を示すのは、(後に示すように) 信号間のコヒーレンスが低いことを意味し、場合によってはデータ集録時の量子化誤差等による雑音の影響を受けている。Fig. 4.18 は、ドライウエルとダウンカマに関する結果であるが、約 40 Hz 以上を除けば、ダウンカマに対してドライウエル内圧力に位相遅れがあることが明らかであり、チャギング時のダウンカマ内蒸気流量変動に対してドライウエルが一種のリザーバとして働くことが示されている。同様に Fig. 4.19 は、ダウンカマ内と壁面との関係を示し、高周波数成分に関しては壁面の方がダウンカマ内より位相が進んでいることが読み取れる。また、プールをはさむ壁面上 2 点間 (Fig. 4.20), 壁面とプール底面間 (Fig. 4.21) に関して、位相差は全周波数域ではほぼ零であり、プール内の圧力振動が等位相であることを示す。

Figs. 4.22 - 4.25 は計測点間のコヒーレンスを示す。Fig. 4.22 に示すようにドライウエルとダウンカマ間のコヒーレンスは低周波数領域で高く、周波数の増加とともに (巨視的に) 漸減する。ダウンカマと壁面 (Fig. 4.23) では逆に 10 - 50 Hz の成分のコヒーレンスが強く、チャギング周波数を含む低周波数領域のコヒーレンスが低い。プール内の 2 点間 (Figs. 4.24 - 4.25) のコヒーレンスはほとんど 1.0 に近い。

4.2.2 Case 02, Run 214

Case 02 は、ダウンカマ内蒸気重量速度を約 $35 \text{ kg/m}^2\text{-sec}$ に造加させたランである。前のケースと同様にチャギングが観察されたが、Fig. 4.26 に示すように水位が出口から 380 mm 以上上方に達するひん度は少くなり、逆に、ことにプール水温の上昇とともに、出口より下方への気泡の成長が活発になる。プール内の圧力の波形を Case 01 (Run 216) と比較すると、スパイクの発生後高周波数の減衰振動 (リングング) が持続することが特徴的であり、振幅もやや増大している。

Figs. 4.27 - 4.29 にパワースペクトル密度分布の計算結果を示す。チャギング周波数は Case 01 の場合よりやや増加し、約 2.5 - 3.0 Hz である。ドライウエル、ダウンカマ内のパワースペクトル密度のピーク値は Case 01 の場合と同様な値であり、ダウンカマの方がドライウエルより大きい (約 2 倍) ことも同様である。プール壁面、底面では、プール水温が約 70°C 以下の場合 (フレーム 1 - 4), 20 - 25 Hz 程度の卓越成分を有し、これは Fig. 4.26 にみられる減衰振動の卓越周波数に一致する。プール内圧力のパワースペクトル密度は Case 01 にくらべてかなり大きく、ピーク値にして約 2 倍から 5 倍に達する。

Figs. 4.30 - 4.33 に位相差および相互パワースペクトル密度の分布を示す。主要な傾向は Case 01 の場合と同様であり、ダウンカマに対してドライウエルが、またプール壁面に対してダウンカマが、それぞれ位相遅れを有することが示されている。前ケースと同様、プール

内各点間の位相差は事実上零である。

Figs. 4.34 - 4.36 にコヒーレンスの計算結果を示す。主要な傾向はCase 01の場合と同様であるが、全般に高周波数成分の振幅が増大したため雑音の影響が減少し、たとえばドライウエルとダウンカマ間のコヒーレンスが約40 Hz以下においてかなり高い値を持つことが読み取れる。チャギング周波数成分がコヒーレントであることはCase 01の場合と同様である。

4.2.3 Case 03, Run 215

Case 03は、ダウンカマ内蒸気重量速度を $7.7 \text{ kg/m}^2\text{-sec}$ としたランである。本試験においては、(ダウンカマ1本あたりの)プール容積を実炉の約 $1/2.16$ とし、実炉と同等の蒸気重量を実現したため、プール水温の自然上昇速度は速く、Table 4.3, Fig. 4.3 にみられるように、本ケースにおけるプール水温は実験開始後約20 secで 90°C に達した。

Fig. 4.37 に示すように、圧力の波形は前2ケースとは顕著に異なり、典型的なチャギングはみとめられない。すなわち、ダウンカマ内の水位上昇は少く、出口から200 mmレベルにある水位計まで達することはきわめてまれであり、ダウンカマ外での気泡(塊)の成長が活発である。以上のように、本ケースの結果は中、高蒸気流速の場合にみられるやや規則的な圧力振動の発生を示している。プール内の圧力振動の振幅は前2ケースにくらべて特に大きくはないが、振動のひん度は著しく増大している。

Figs. 4.38 - 4.41 にパワースペクトル密度分布の計算結果を示す。蒸気流速が高いために、約20 sec以後ではプール水温は 90°C 以上に達しており、この期間のデータはやや特殊であるから検討の対象からはずす。ドライウエル圧力の変動は前2ケースより減少しており、これは卓越周波数が増加したために流量変動がドライウエル容積によって吸収されたためであると考えられる。卓越周波数はプール水温の上昇とともに著しく減少するが、Fig. 4.38にもみられるように、周期性は必ずしも明瞭でない。ダウンカマ内の卓越成分のパワースペクトル密度はドライウエルの約10倍以上に達する。プール壁面のスペクトル密度分布はダウンカマ内とほとんど一致する。これは、前2ケースのチャギングの場合に、プール壁面の方が明らかに高周波数成分が大きかったことと対照的である。プール底面は、やや高周波数成分が増大し、全般に振幅が増大した以外は壁面と同様なスペクトル分布を示す。

Figs. 4.42 - 4.45 に位相差および相互パワースペクトル密度分布の計算結果を示す。主要な傾向は前2ケースと同様である。

Figs. 4.46 - 4.48 にコヒーレンスの計算結果を示す。主要な傾向は前2ケースと同様であるが、ダウンカマと壁面間のコヒーレンス(Fig. 4.47)が広い周波数域にわたり高い値を示す点はやや特徴的である。また、全般的に、ドライウエル、ダウンカマ、プール内各点における圧力振動の主要な成分が相互に密接な関係を持つ(コヒーレントである)ことが明らかである。

4.2.4 Case 04, Run 217

本ケースは、Case 01と同様な蒸気重量速度($2.1 \text{ kg/m}^2\text{-sec}$)によるランであるが、

ダウンカマの初期浸水深さが異なる。

本試験は1/6規模の装置による試験であり、装置の制約上、初期浸水深さを大幅に変更することはできなかった。この結果、ダウンカマ浸水深さが圧力変動に与える影響は顕著にとらえられなかった。パワースペクトル密度分布の計算例をFig. 4.49-4.50に示す。

4.2.5 Case 05, Run 218

本ケースも、Case 01と同様な蒸気重量速度 ($19 \text{ kg/m}^2\text{-sec}$) によるランであるが、ウェットウェル気相部を大気圧に開放し、系圧力が蒸気凝縮現象に支える影響を調べることを目的としている。

パワースペクトル密度分布をFig. 4.51-4.52に示すが、Case 01の結果との間に顕著な差異はみとめがたい。ただし、Case 01ではプール水温が約 75°C 以上 (フレーム8) で、プール内の圧力の高周波数成分の減少が顕著になるのに対して、本ケースではプール水温が約 70°C 以上 (フレーム6以後) で同様な傾向があらわれており、これは系圧力の変化による飽和温度の変化の影響と考えられる。

4.2.6 Case 06, Run 279

本ケースは、格納容器I (ダウンカマ5本) を用い、Case 01と同様のダウンカマ内蒸気重量速度 ($19 \text{ kg/m}^2\text{-sec}$) を実現したランであり、Case 01との対比によってダウンカマ本数の効果を調べることを目的としている。

Fig. 4.53に代表的な計測点における圧力変動とダウンカマ内の水位変化の例を示す。チャギングが発生していることはCase 01と同様であるが、Fig. 4.13との比較において明らかなように水位の振幅はより小さく、格納容器内各点の圧力変動の振幅も小さい。なお、Fig. 2.5に示すように一直線上の3本のダウンカマについて水位の計測を行ったが、これらのダウンカマ内の水位変化はほぼ同位相であり、従って5本のダウンカマ内で同位相の水位変化が生じていたと考えられる。

Fig. 4.54-4.57にパワースペクトル密度分布の計算結果を示す。ドライウェル内圧力にはチャギングの繰返し周波数 (約 $2-2.5 \text{ Hz}$) に対応する成分がみとめられるが、それ以外の成分はきわめて微小である。Fig. 4.54 (continued) に示すようにチャギングの周期性はCase 01の場合よりも明瞭であり、チャギング周波数はプール水温とともに増加する。パワースペクトル密度のピーク値はCase 01とはほぼ同等である。またウェットウェル気相部圧力にもチャギング周波数成分が卓越的であり、5本のダウンカマ内で同期した水位変化が生ずることによるプール表面の上下動が気相部圧力を変動させていることを示す。ダウンカマ内では高周波数成分がやや増大し、パワースペクトル密度のピーク値はCase 01の場合と同様である。これに対して、プール壁面および底面に関する結果 (Figs. 4.56, 4.57) をCase 01の結果 (Figs. 4.16, 4.17) と比較すると、本ケースの方が小さいことが明らかである。たとえばプール底面圧力を比較すると、典型的な場合で約5倍ないし10倍Case 01の方が大きなパワースペクトル密度が得られている。また、Case 01の場合プール内圧力の卓越的成分はいずれも 10 Hz 以上の領域にあるのに対して、本ケースの場合、数Hz オーダの領域にも

ピークがみとめられる点が特徴的である。1本ダウンカマの場合と同様、プール内の圧力振動の振幅は底面で最大となり、水面に近づくほど減少する。

Figs. 4.58 - 4.63 に位相差および相互パワースペクトル密度分布の計算結果を示す。ドライウエルとダウンカマはチャギング周波数に関してはほぼ同位相であるが、20 Hz 以上の成分に関してはランダムな位相差を示す。Fig. 4.59 は2本のダウンカマ内の圧力(P4, P5, 位置はFig. 2.3参照)に関する結果である。チャギング周波数に関しては同位相であり、ダウンカマ内水位の挙動と一致するが、15 Hz 以上の成分に関してはほとんどランダムな位相差を示し、50 - 60 Hz に分布する高周波数成分に関しても両者の間に相関はみとめられない。同様に、ダウンカマ内(P5)と壁面(P6)に関する結果(Fig. 4.60)においても、30 - 70 Hz の成分に関する位相差はばらつきが大きい。Figs. 4.58, 4.60 を、それぞれCase 01(1本ダウンカマ)による同様な結果であるFigs. 4.18, 4.19 と比較すると両者の差異は明らかである。プール内の2点間に関する位相差(Figs. 4.61 - 4.63)は、プール内における圧力振動が、1本ダウンカマの場合と同様にほとんど同位相であることを示す。

Figs. 4.64 - 4.68 にコヒーレンスの計算結果を示す。ドライウエルとダウンカマ(Fig. 4.64), 2本のダウンカマ間(Fig. 4.65)に関して、約15 Hz 以上の成分のコヒーレンスが低いことが特徴的であり、またダウンカマ内とプール壁面間(Fig. 4.66)のコヒーレンスは全般に低く、Case 01の結果(Fig. 4.23)を顕著な差を示す。Figs. 4.67, 4.68にみられるように、プール内の2点間のコヒーレンスは(Case 01の場合よりやや低い)一般的に1.0に近い値を示す。

4.2.7 Case 07, Run 281 の結果

本ケースでは、約40 kg/m²-sec程度の蒸気重量速度を目標としたが、実際には約31 kg/m²-sec程度にとどまった。得られた結果は次に示すCase 08の場合と大差なく、Figs. 4.69 - 4.70にパワースペクトル密度分布の計算結果若干例を示すにとどめる。

4.2.8 Case 08, Run 282

本ケースでは、約60 kg/m²-secの蒸気重量速度を目標としたが、蒸気配管内の圧力損失のため、実際には約35 kg/m²-secにとどまった。よって本ケースは蒸気重量速度に関して、1本ダウンカマによるCase 02(Run 214)と同等である。

Fig. 4.71に示すようにチャギングが観察され、Case 06と同様、ダウンカマ内の水位変化はほぼ同位相であったが、蒸気重量速度の増大に対応してダウンカマ内の平均水位は低下し、かつチャギング周波数が増加した(約3.0 - 3.5 Hz)。また格納容器全体で圧力振動の振幅が増大した。Table 4.3, Fig. 4.8に示すように約35 secでプール水温が80℃をこえ、40 secで90℃をこえた。よって、以下の図においてフレーム6以後はデータとしてはやや特殊である。

Fig. 4.72 - 4.74にパワースペクトル密度分布の計算結果を示す。前述のようにチャギング周波数はCase 06よりやや増加し、ドライウエル、ダウンカマ内圧力のパワースペクトル密

度も約2倍に増大している。1本ダウンカマによるCase 02の場合、プール壁面、底面の圧力に約20-25 Hzの卓越成分が観察されたが、本ケースの場合約30-50 Hzにかけてゆるやかなピークが存在するものの値は小さく、壁面(P6)に関してCase 02の約1/5、底面(P10)に関して約1/10程度である。

Figs. 4.75-4.79 に位相差および相互パワースペクトル密度分布の計算結果を示す。Case 02の結果との相違は、Case 06とCase 01の比較において述べたことと同様である。すなわちドライウエルとダウンカマ、2本のダウンカマ間に関して、約15 Hz以上の成分の位相差がランダムであり、ダウンカマとプール壁面に関しても、30 Hz以上の成分は、相互パワースペクトル密度が比較的大きな値を示すにもかかわらず、ほぼランダムな位相差を示す。またプール内では半径方向、上下方向ともに位相差はきわめて少い。

Figs. 4.80-4.83 にコヒーレンスの計算結果を示す。これらの傾向についてもCase 06の場合と同様である。

4.2.9 Case 09, Run 280

本ケースは、1本ダウンカマによるCase 04と同様、ダウンカマ初期浸水深さを変化させたランであり、Case 04と同様、基本ケースとの間の明瞭な差異はみとめられない。Figs. 4.84, 4.85 にパワースペクトル密度の計算結果を示す。

4.2.10 Case 10, Run 278

本ケースは、1本ダウンカマによるケース05と同様、ウェットウエル気相部を大気に開放したランである。パワースペクトル密度分布の計算結果をFigs. 4.86-4.87 に示す。ドライウエル、ダウンカマについては、Case 06と同様であるが、プール内圧力(Fig. 4.87)において15-20 Hz付近にピークがみられ、これは圧力振動の波形(文献・1, Fig. 5.155等)にみられるリングングの発生に対応すると考えられる。

4.2.11 Case 11, Run 277

本ケースは格納容器I(5本ダウンカマ)のダウンカマ入口をTable 4.1中の図のように閉鎖し、2本のみを動作させ、ダウンカマ1本あたりの装置各部容積(あるいはプール表面積)を変化させたランであり、ダウンカマ内蒸気重量速度は標準的な値($20 \text{ kg/m}^2\text{-sec}$)としている。

Fig. 4.88 に示すようにチャギングが観察され、2本のダウンカマ内の水位変動はほぼ同位相であったが、多少の位相および振幅の相違がみとめられた。ダウンカマ1本あたりの気相部容積が大きいためにドライウエル、ダウンカマ内の圧力振動の振幅は小さく、ダウンカマ内の水位も、出口より200 mm上方、あるいは50 mm下方まで達することは比較的まれであった。なお、ダウンカマ本数が2本であるため、Table 4.3, Fig. 4.11に示すように、プール水温上昇は他のケースに比較してゆるやかである。

Figs. 4.89-4.91 にパワースペクトル密度の計算結果を示す。チャギング周波数は20-25 HzでCase 06と同様であるが、対応するドライウエル、ダウンカマ内圧力のパワース

ペクトル密度はCase 06の場合の約 $1/5$ 以下である。プール内圧力に関しては50-60 Hzの成分が卓越的であり、パワスペクトル密度の最大値をCase 06と比較すると、壁面(P6)に関しては、ほぼ同等ないし本ケースの方がやや大、底面(P10)に関してはほぼ同等ないしCase 06の方がやや大であり、またCase 01-Case 10と比較して特徴的な点としては、壁面と底面のパワスペクトル密度の値がほぼ等しいことがあげられる。ここで、壁面上の圧力計測点(P6, P8)は、使用した2本のダウンカマの出口にいずれも近く、またプール壁面上円周方向の振幅の変化は不明である。

Figs. 4.92-4.95 に位相差および相互パワスペクトル密度の計算結果を示す。ドライウエルとダウンカマ間(Fig. 4.92)では10 Hz以上、2本のダウンカマ間(Fig. 4.93)ではチャギング周波数を除く全周波数領域で位相差はほぼランダムな分布を示す。これに対して、ダウンカマ内とプール壁面(Fig. 4.94)に関しては、相互パワスペクトル密度がピークをとる50-55 Hzの位相差が比較的小さく、かつばらつきが少い。プール内の圧力振動がほぼ同位相であることは、1本ダウンカマ、5本ダウンカマの場合と同様である。

Figs. 4.96-4.100 にコヒーレンスの計算結果を示す。主要な傾向はCase 06、およびCase 08の場合と同様である。

4.2.1.2 Case 12, Run 276

本ケースはCase 11を同様な条件でウェットウエル気相部を大気開放したランである。Figs. 4.101, 4.102 にパワスペクトル密度分布の例を示すが、Case 11の結果との間に顕著な差異はみとめられない。

Table 4.1 Proposed test conditions

Case	DISCHARGE CONDITIONS	CONTAINMENT CONDITIONS	INITIAL CONDITIONS	DOWNCOMER CONDITIONS	
	Downcomer Steam Vel. ($\text{kg/m}^2/\text{sec}$)	Wetwell Pressure ($\text{kg/cm}^2\text{abs}$)	Pool Temp. (deg.C)	Number	Initial Subm. (m)
1	20	2	10	1	0.50
2	40	2	10	1	0.50
3	60	2	10	1	0.50
4	20	2	10	1	0.675
5	20	1.03/open	10	1	0.50
6	20	2	10	5	0.50
7	40	2	10	5	0.50
8	60	2	10	5	0.50
9	20	2	10	5	0.675
10	20	1.03/open	10	5	0.50
11	20	2	10	2 of 5	0.50
12	20	1.03/open	10	2 of 5	0.50

Scheme of downcomer blocking
for Cases 11 and 12

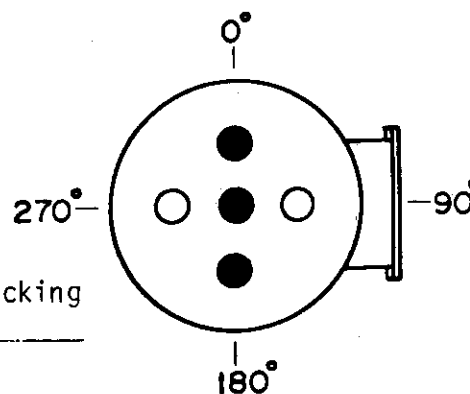


Table 4.2 Test conditions for performed test runs

Case No.	Run No.	INITIAL CONDITIONS		DOWNCOMER CONDITIONS		Rated Steam Mass Velocity (kg/sq.m-sec)
		Wetwell Airspace Press. (ata)	Pool temp. (deg. C)	Number (-)	Submergence (m)	
1	216	1.62	35	1	0.55	21
2	214	1.73	16	1	0.55	35
3	215	1.53	27	1	0.55	77
4	217	1.48	28	1	0.74	20
5	218	1.03 (open)	28	1	0.55	21
6	279	1.59	26	5	0.55	19
7	281	1.48	24	5	0.55	31
8	282	1.79	25	5	0.55	35
9	280	1.52	23	5	0.74	19
10	278	1.03 (open)	43	5	0.55	18
11	277	1.82	25	2	0.55	20
12	276	1.03 (open)	16	2	0.55	20

Table 4.3 Nominal pool temperature vs. frame no.
(Temperatures in deg. C)

Case No.	Run No.	Frame No.							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	216	41	48	55	61	67	71	76	81
2	214	24	35	51	65	76	85	91	98
3	215	40	51	63	73	87	96	100	
4	217	34	43	50	57	61	66	70	74
5	218	38	44	51	58	65	71	76	81
6	279	34	40	46	52	59	66	72	78
7	281	38	48	58	67	76	82	88	93
8	282	40	50	61	70	79	86	88	90
9	280	38	43	48	54	60	65	70	93
10	278	24	30	36	42	50	55	63	68
11	277	33	36	39	42	44	47	49	51
12	276	25	29	32	36	40	43	47	

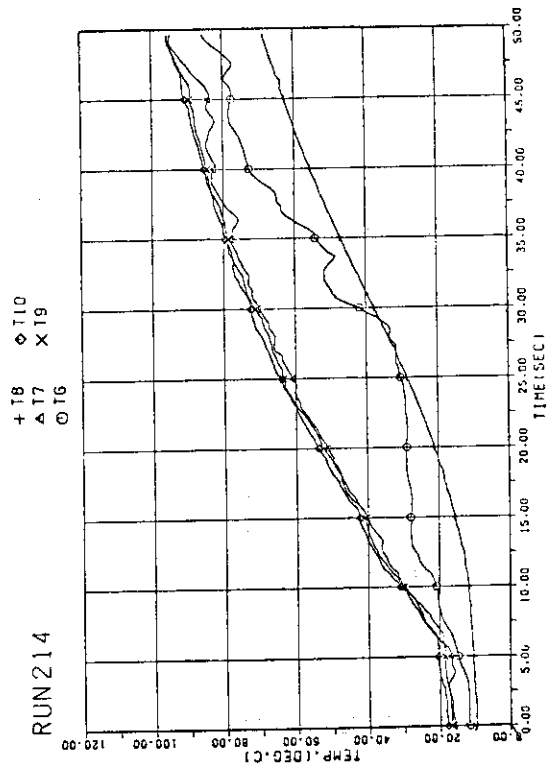
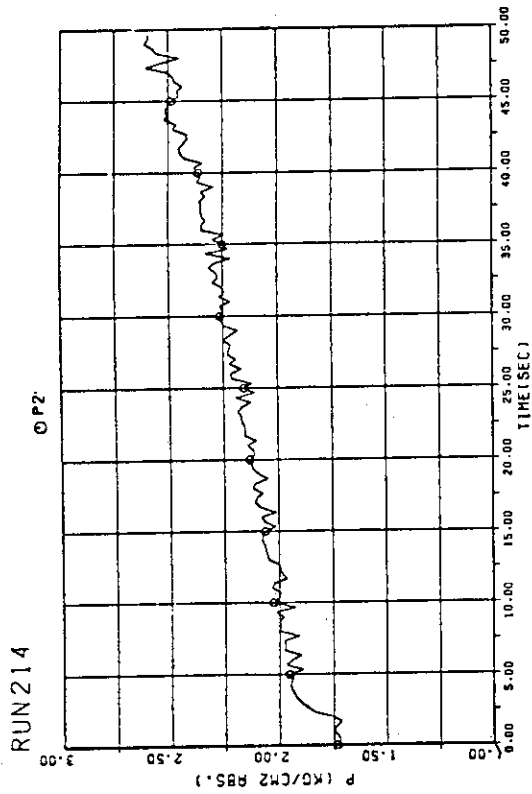


Fig. 4.2 Wetwell pressure and pool temperatures vs. time, Case 02, Run 214

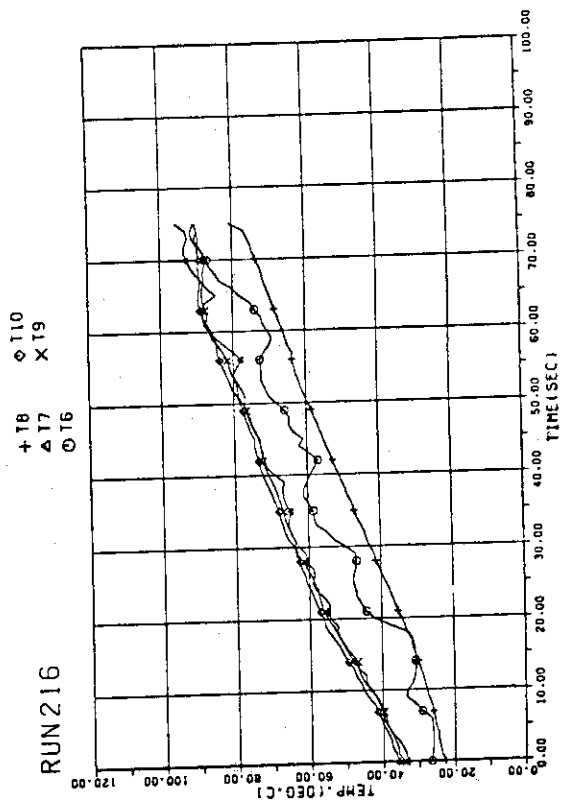
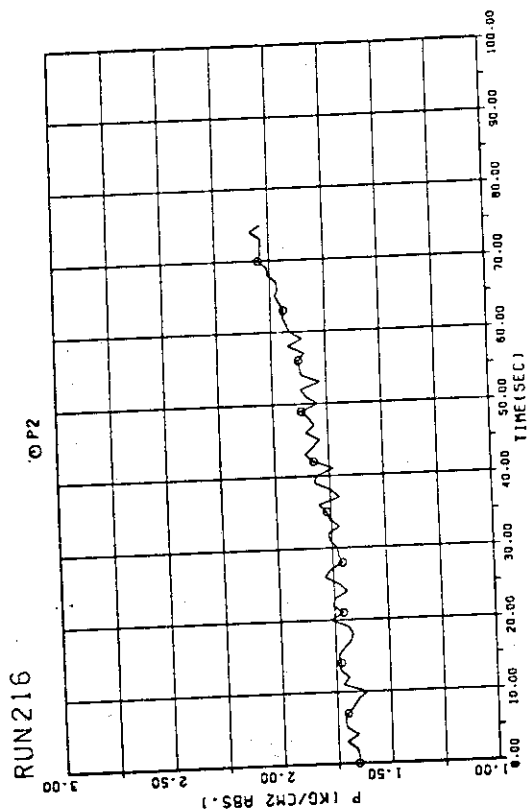


Fig. 4.1 Wetwell pressure and pool temperatures vs. time, Case 01, Run 216

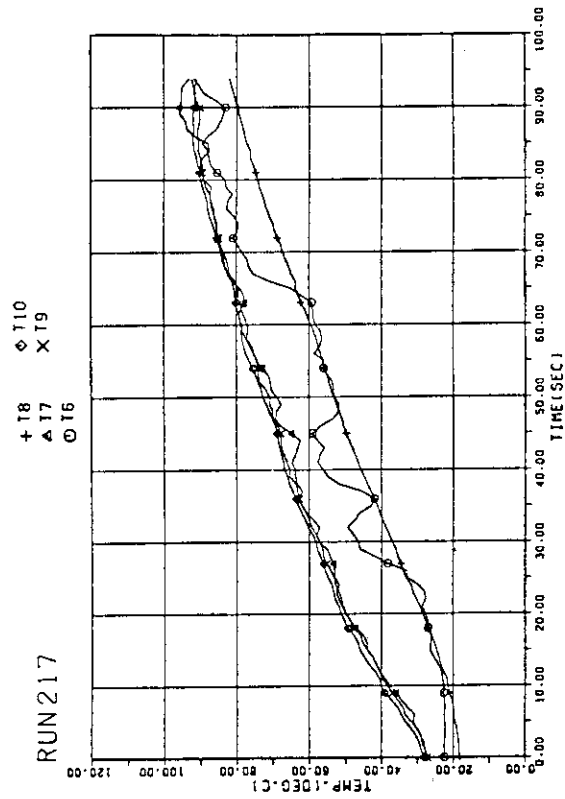
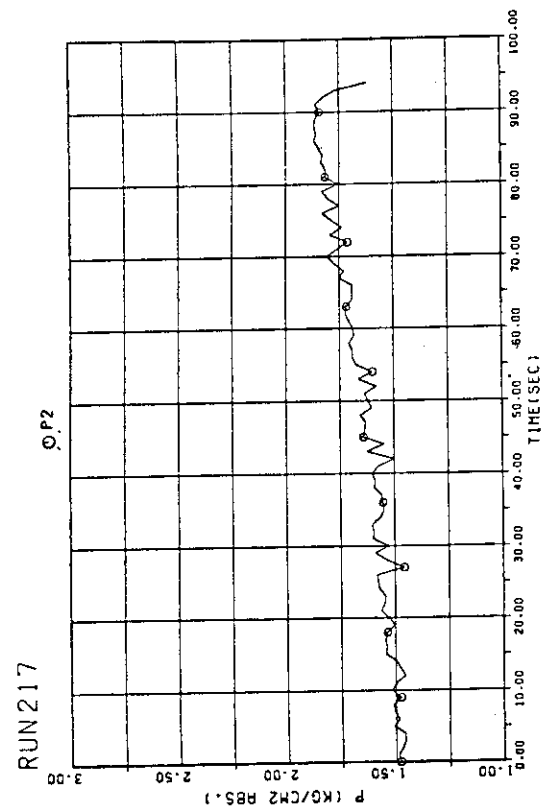


Fig. 4.4 Wetwell pressure and pool temperatures vs. time, Case 04, Run 217

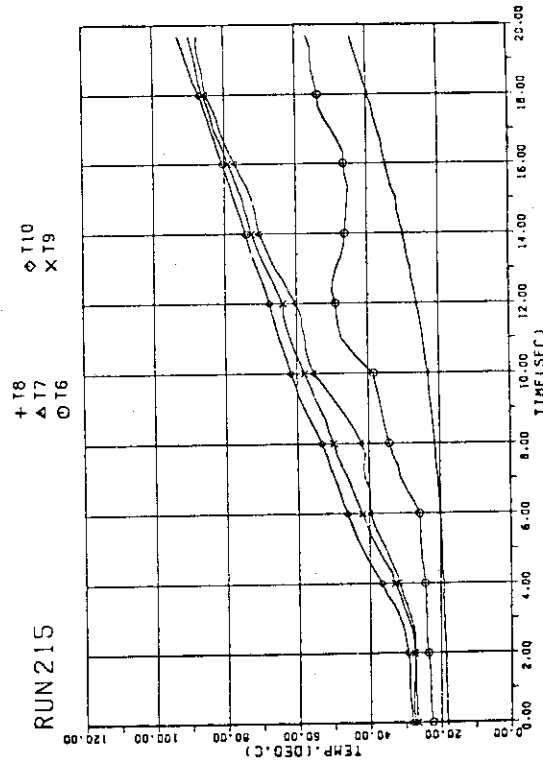
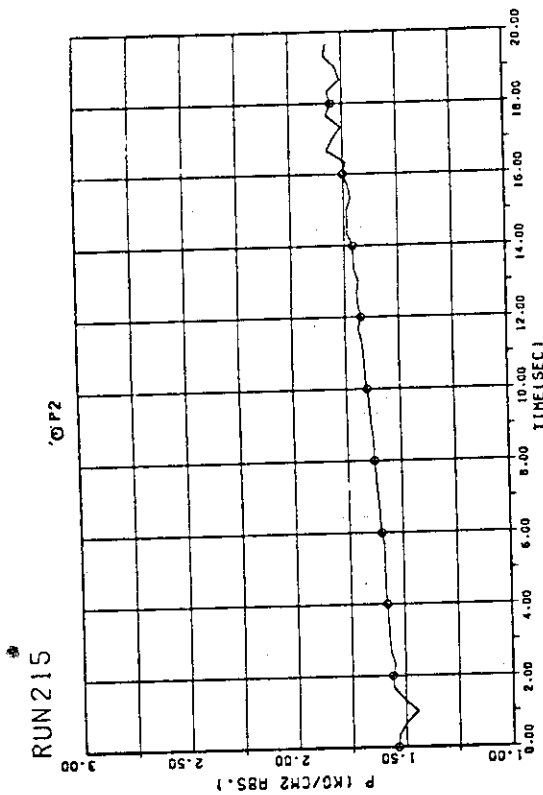


Fig. 4.3 Wetwell pressure and pool temperatures vs. time, Case 03, Run 215

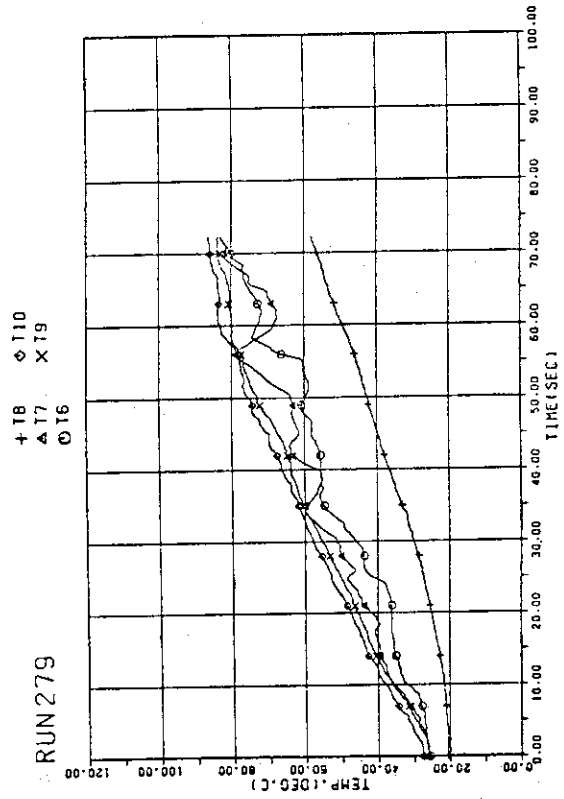
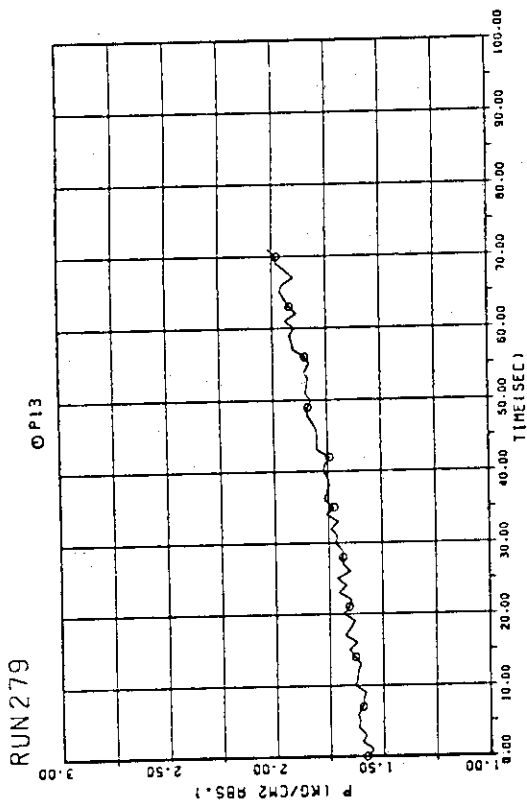


Fig. 4.6 Wetwell pressure and pool temperatures vs. time, Case 06, Run 279

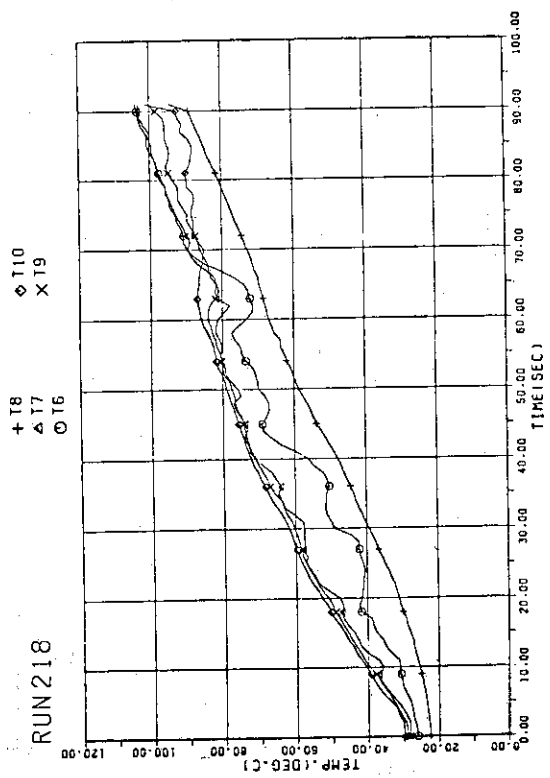
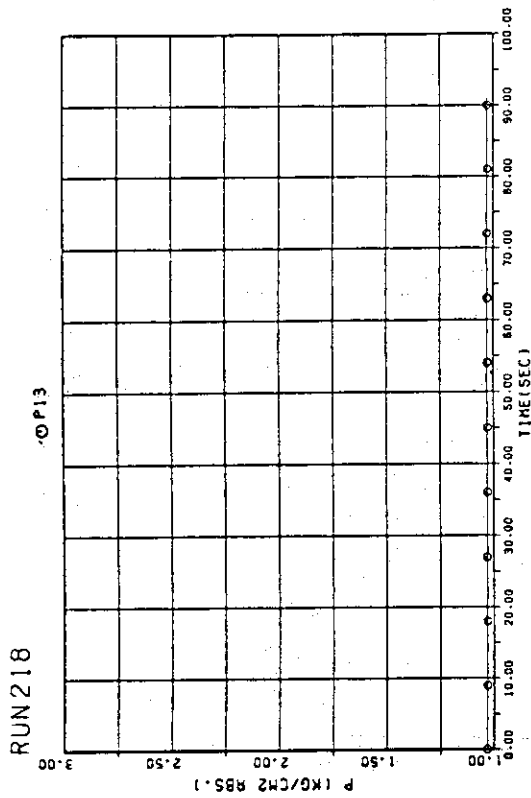


Fig. 4.5 Wetwell pressure and pool temperatures vs. time, Case 05, Run 218

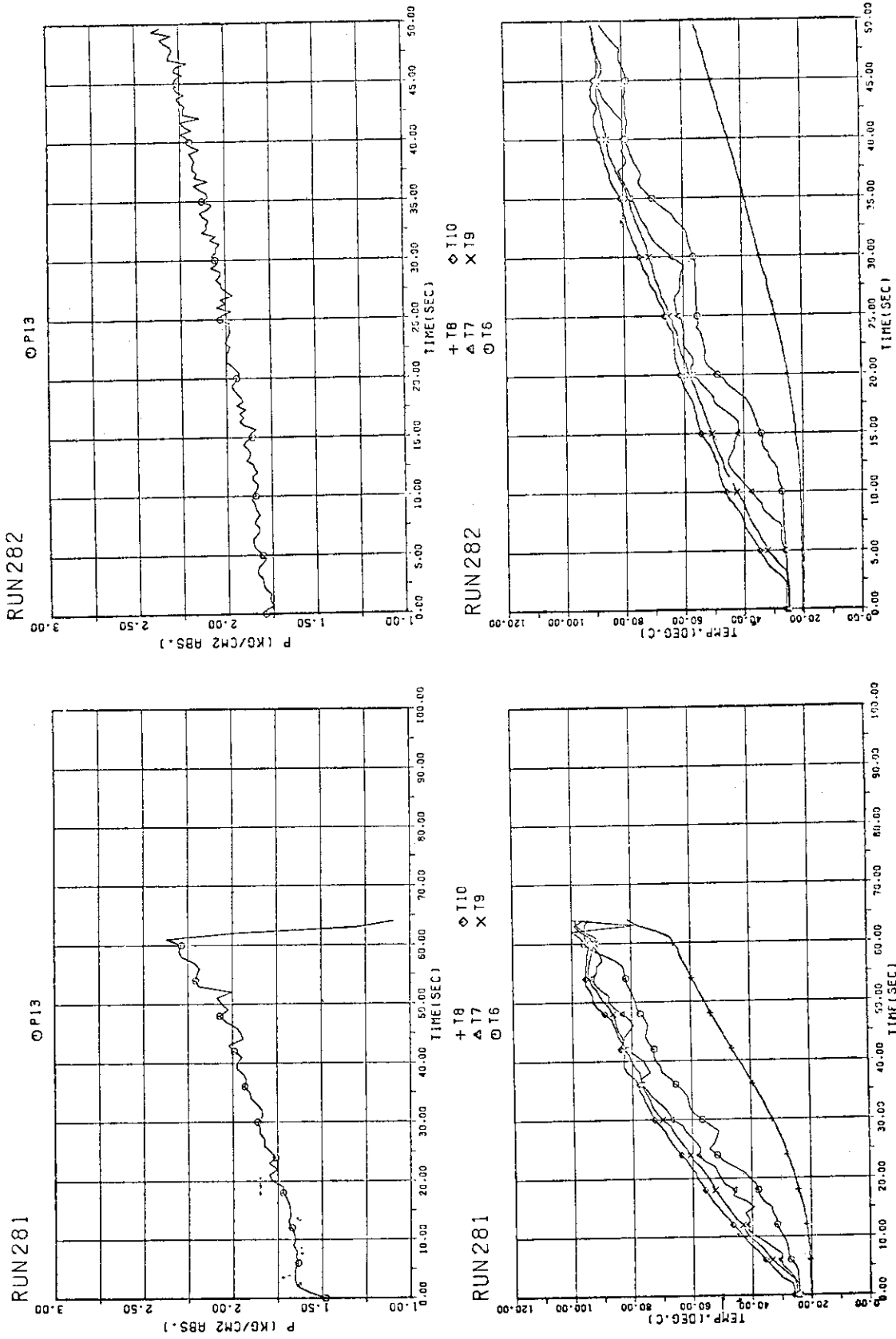


Fig. 4.8 Wetwell pressure and pool temperatures vs. time, Caes 08, Run 282

Fig. 4.7 Wetwell pressure and pool temperatures vs. time, Case 07, Run 281

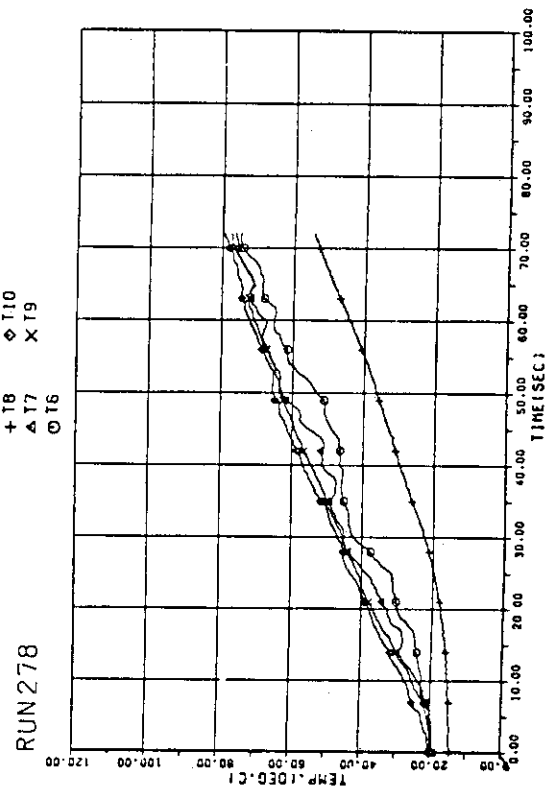
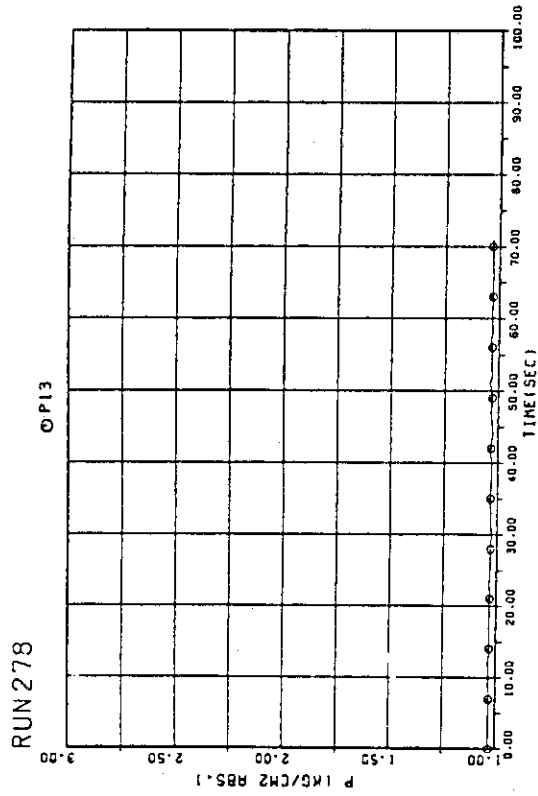


Fig. 4.10 Wetwell pressure and pool temperatures vs. time, Case 10, Run 278

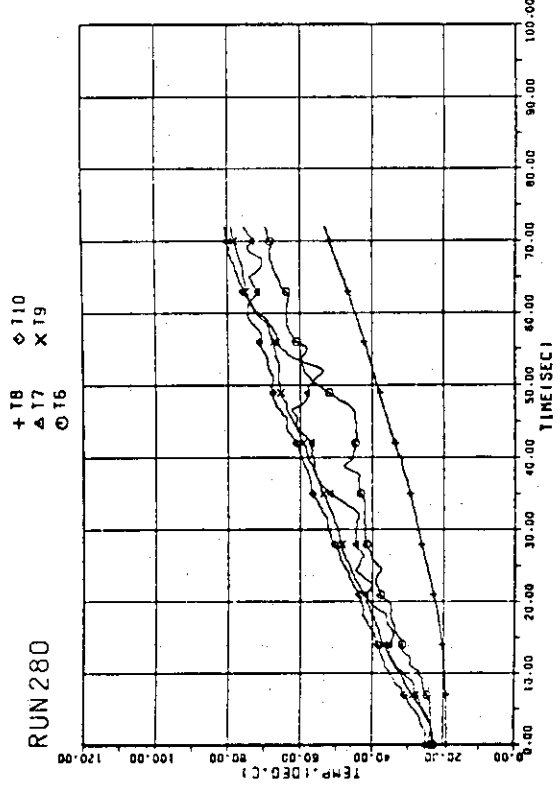
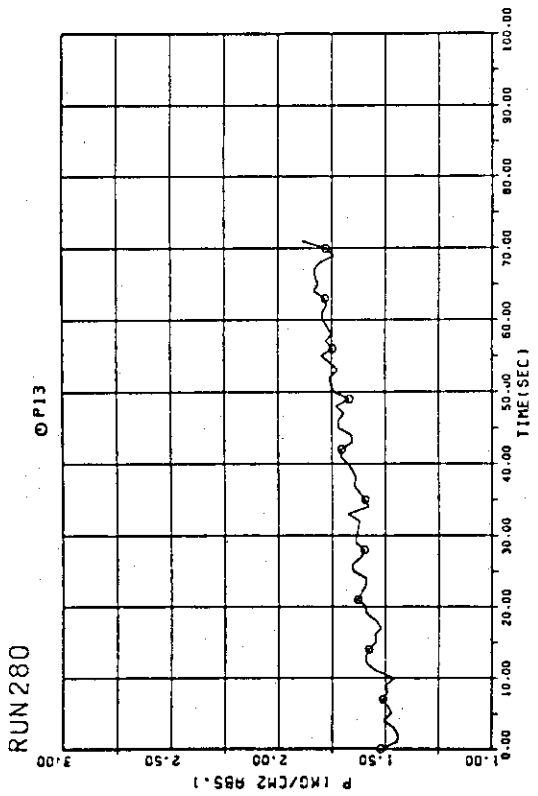


Fig. 4.9 Wetwell pressure and pool temperatures vs. time, Case 09, Run 280

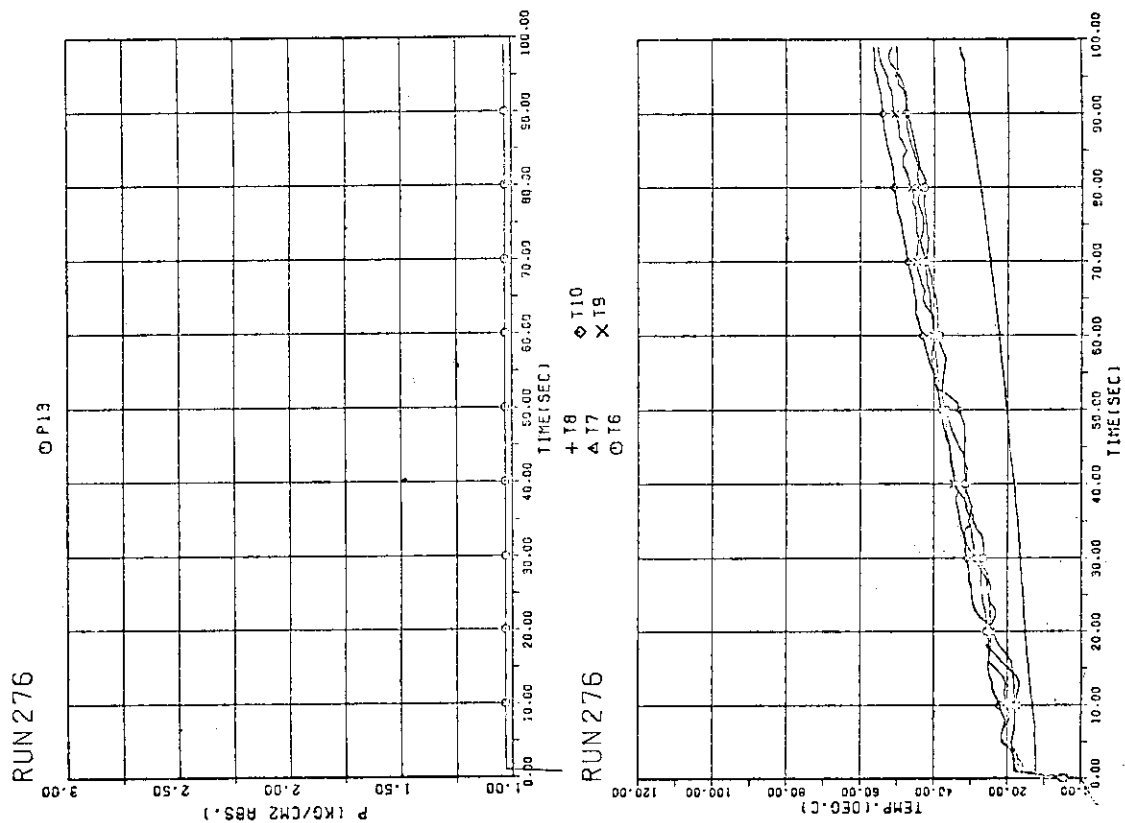


Fig. 4.11 Wetwell pressure and pool temperatures vs. time, Case 11, Run 277

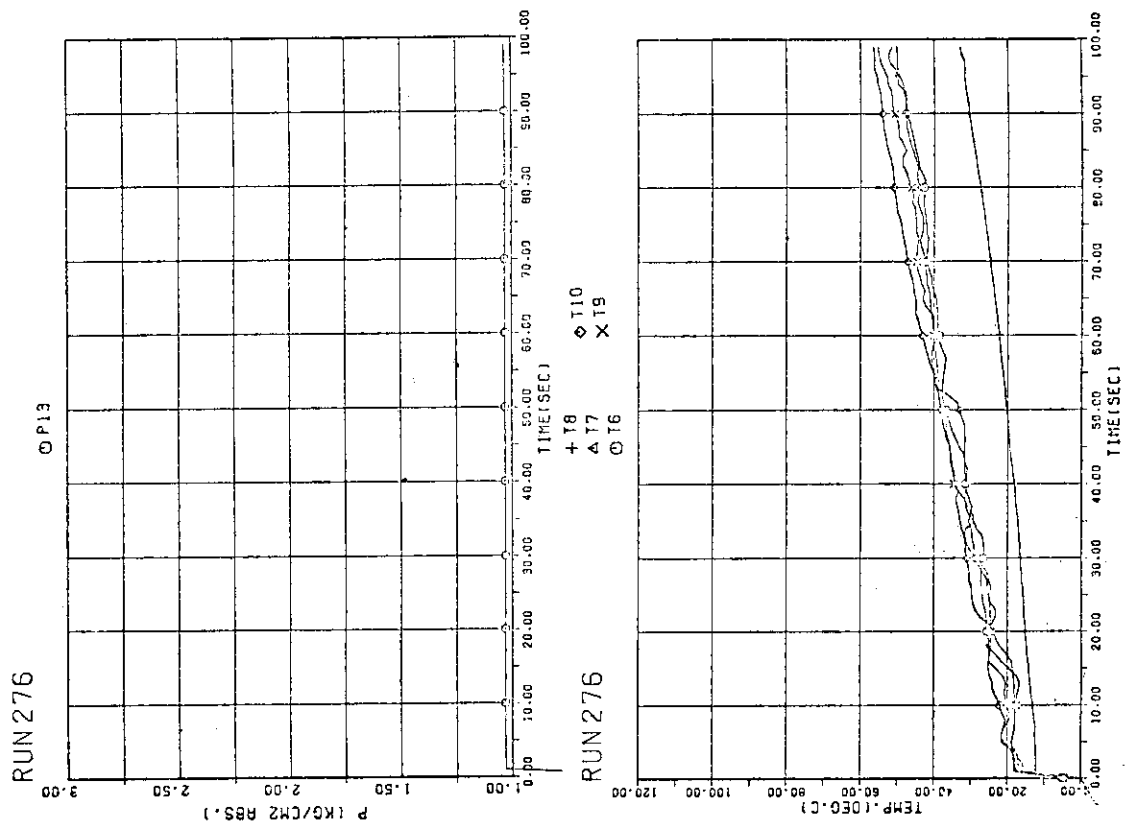


Fig. 4.12 Wetwell pressure and pool temperatures vs. time, Case 12, Run 276

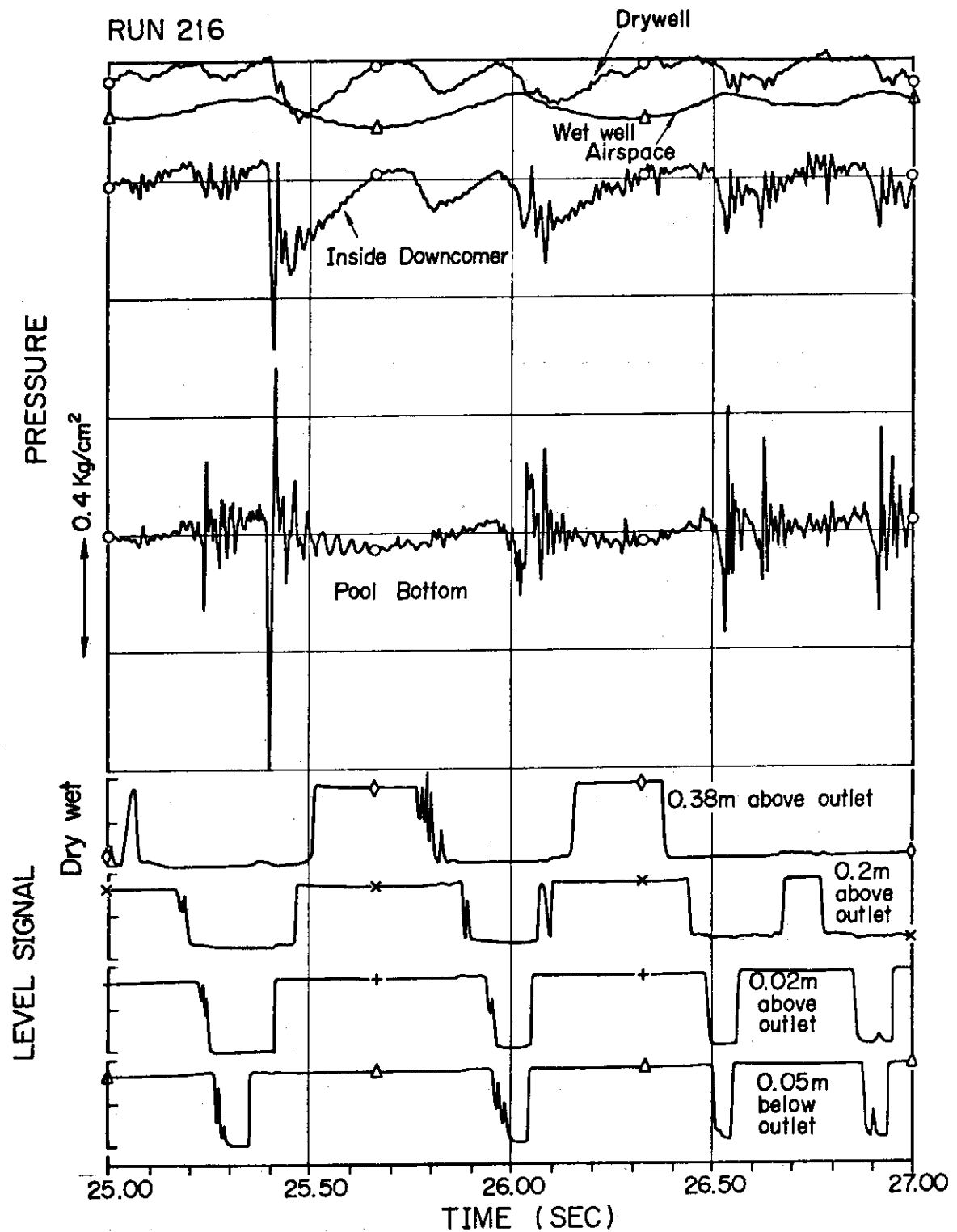


Fig. 4.13 Typical wave forms of pressures and water level signals, Case 01, Run 216

pool temp. = 60 deg. C

RUN 216
P1 : DRYWELL

RESOLUTION = 0.5859 HZ
AVERAGED 4 TIMES

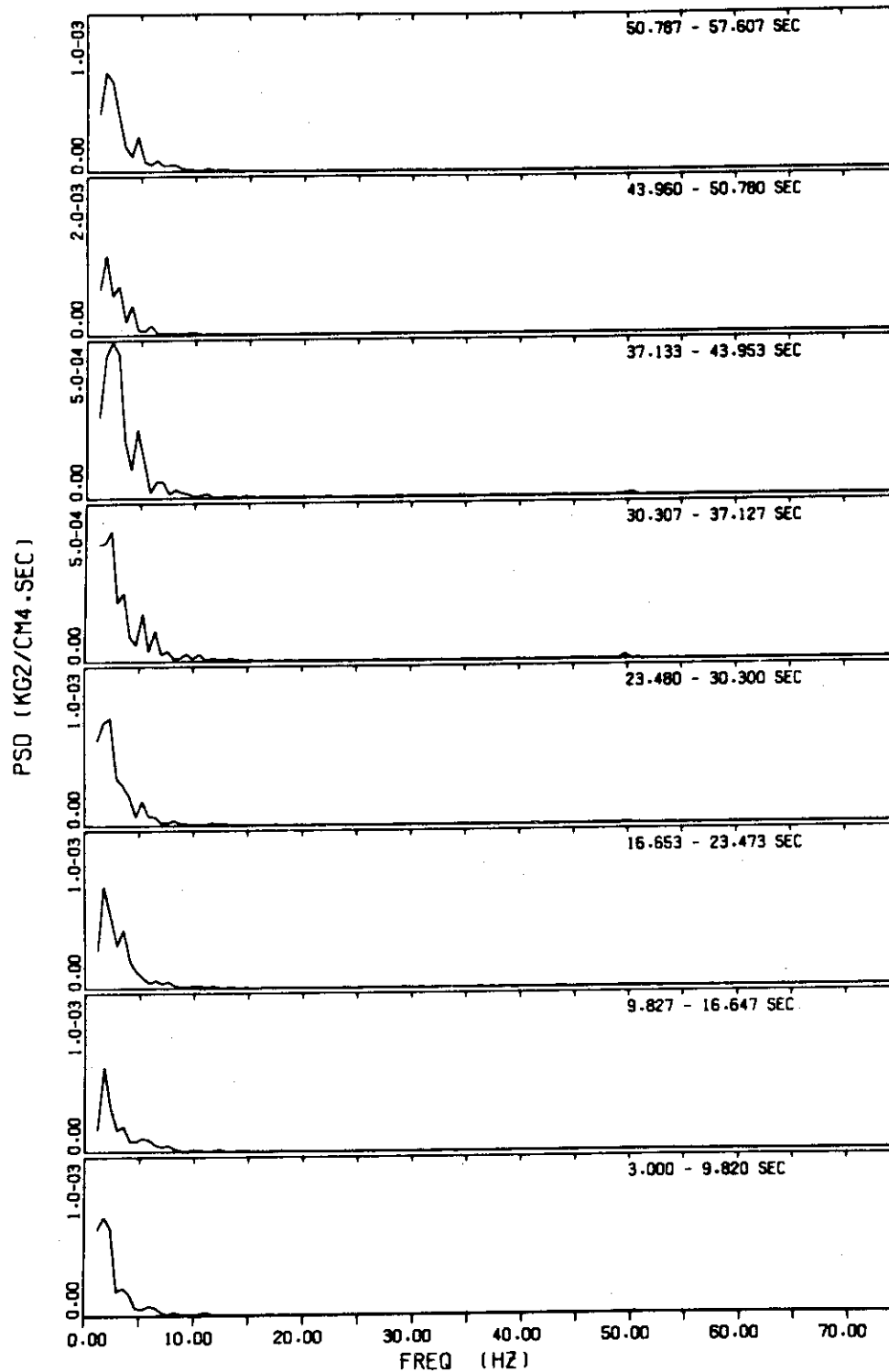


Fig. 4.14 PSD functions, case 01, Run 279

RUN 216
P1 : DRYWELL

RESOLUTION = 0.1465 HZ
AVERAGED 1 TIMES

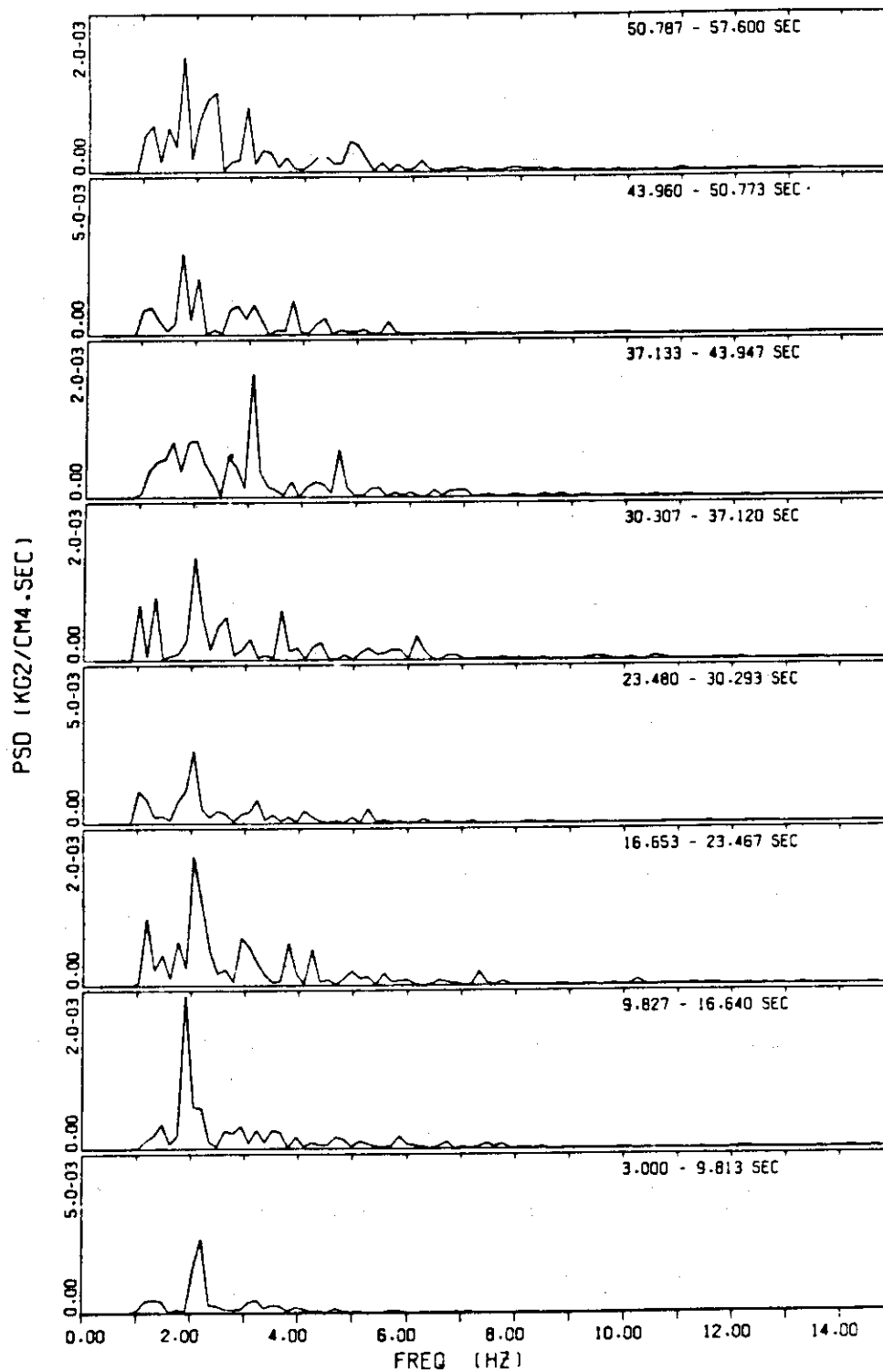


Fig. 4.14 (continued)

RUN 216
P2 : WETWELL AIRSPACE P3 : INSIDE DOWNCOMER

RESOLUTION = 0.5859 HZ
AVERAGED 4 TIMES

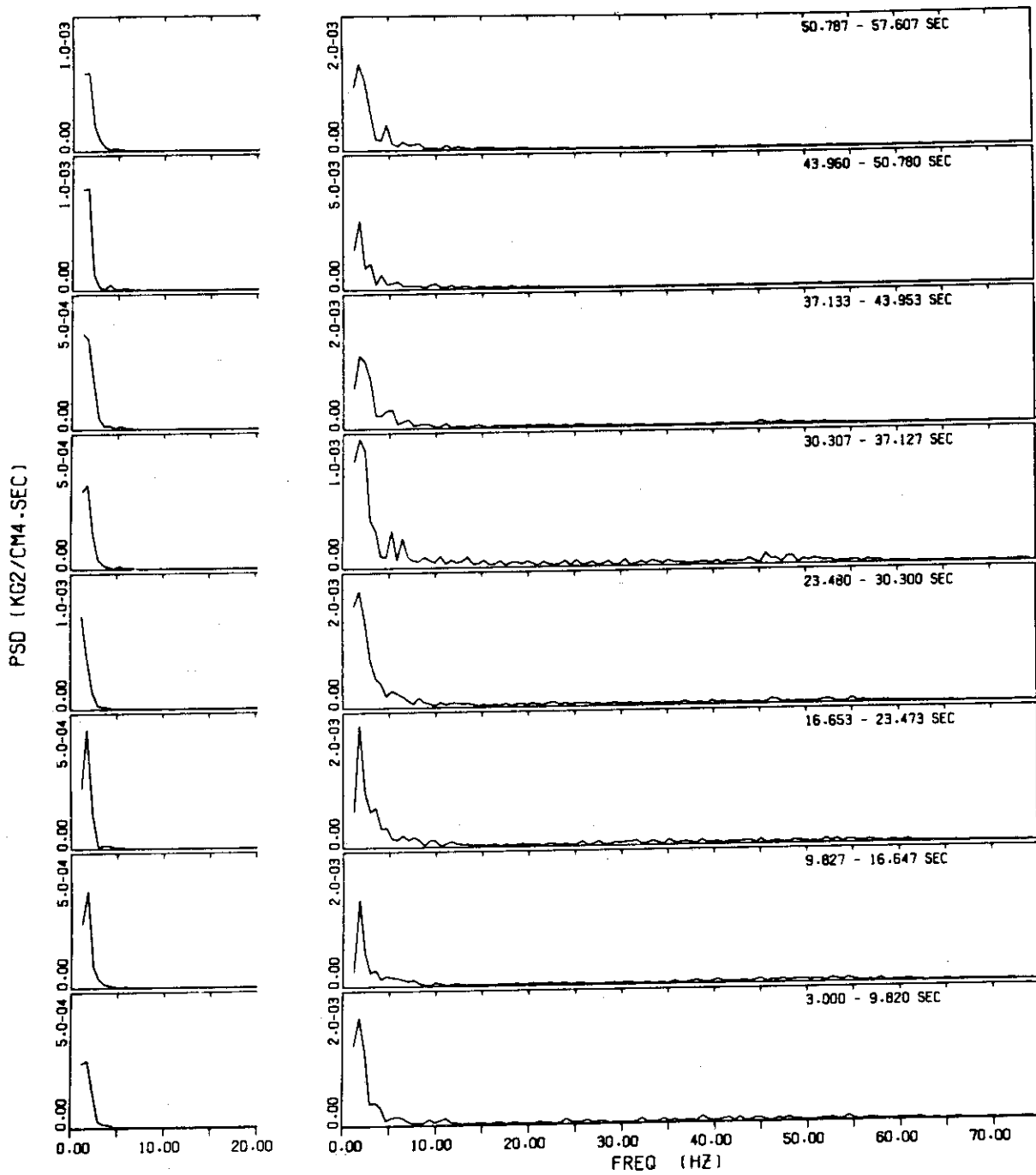


Fig. 4.15 PSD functions, Case 01, Run 216

RUN 216
P6 : WALL (EL = .6 M)

RESOLUTION = 0.5859 HZ
AVERAGED 4 TIMES

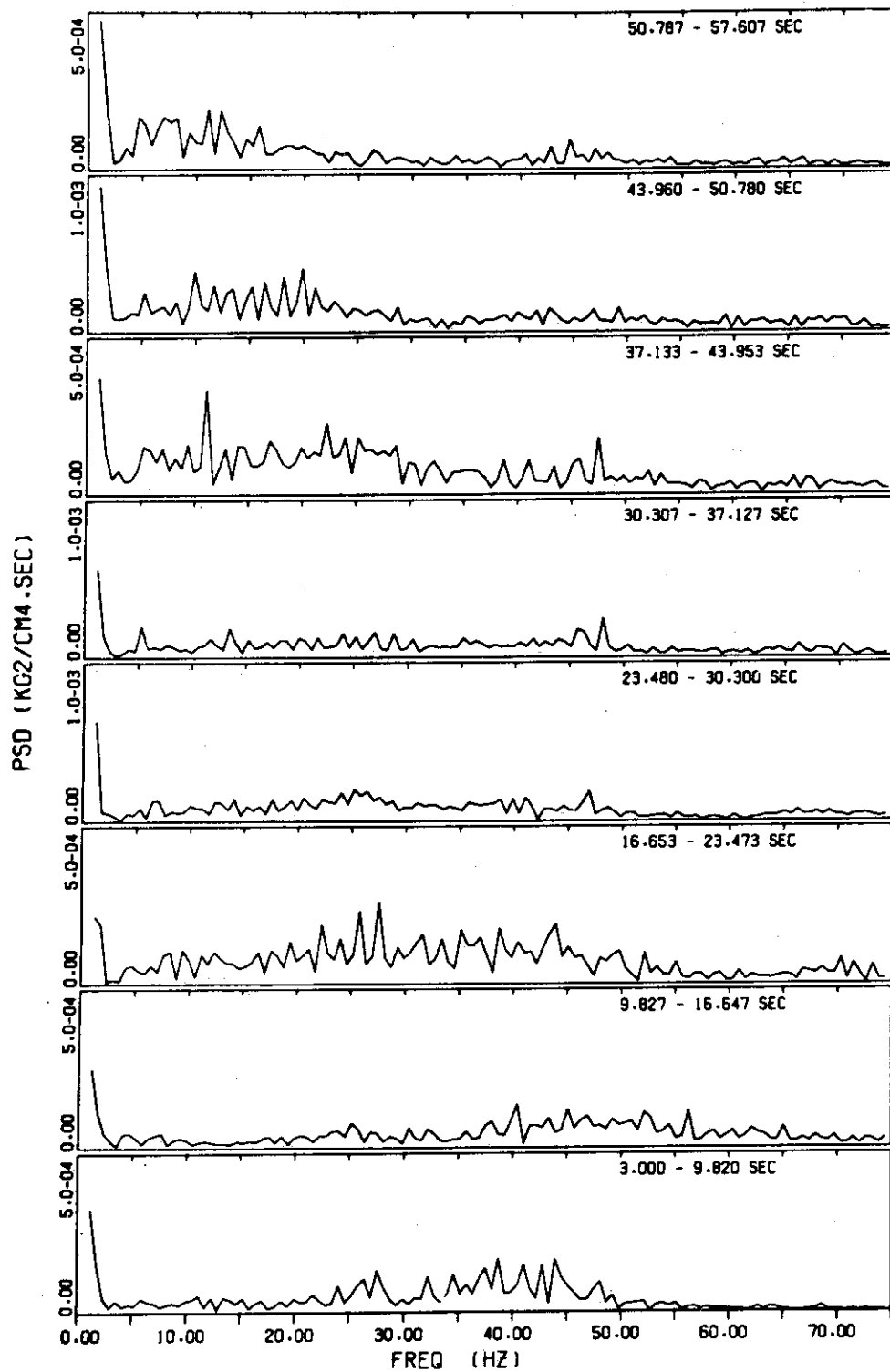


Fig. 4.16 PSD functions, Case 01, Run 216

RUN 216
P10 : POOL BOTTOM

RESOLUTION = 0.5859 HZ
AVERAGED 4 TIMES

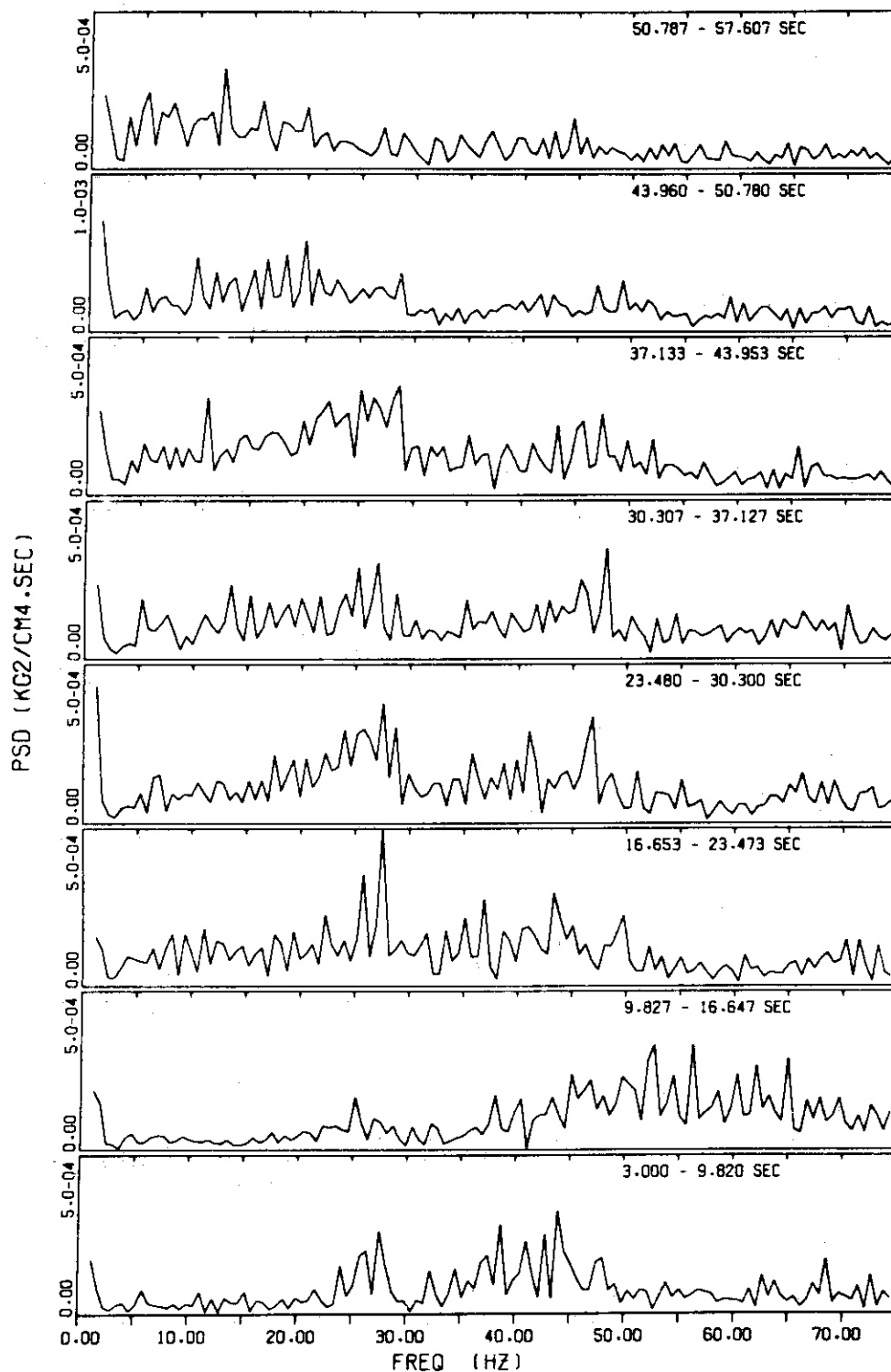


Fig. 4.17 PSD functions, Case 01, Run 216

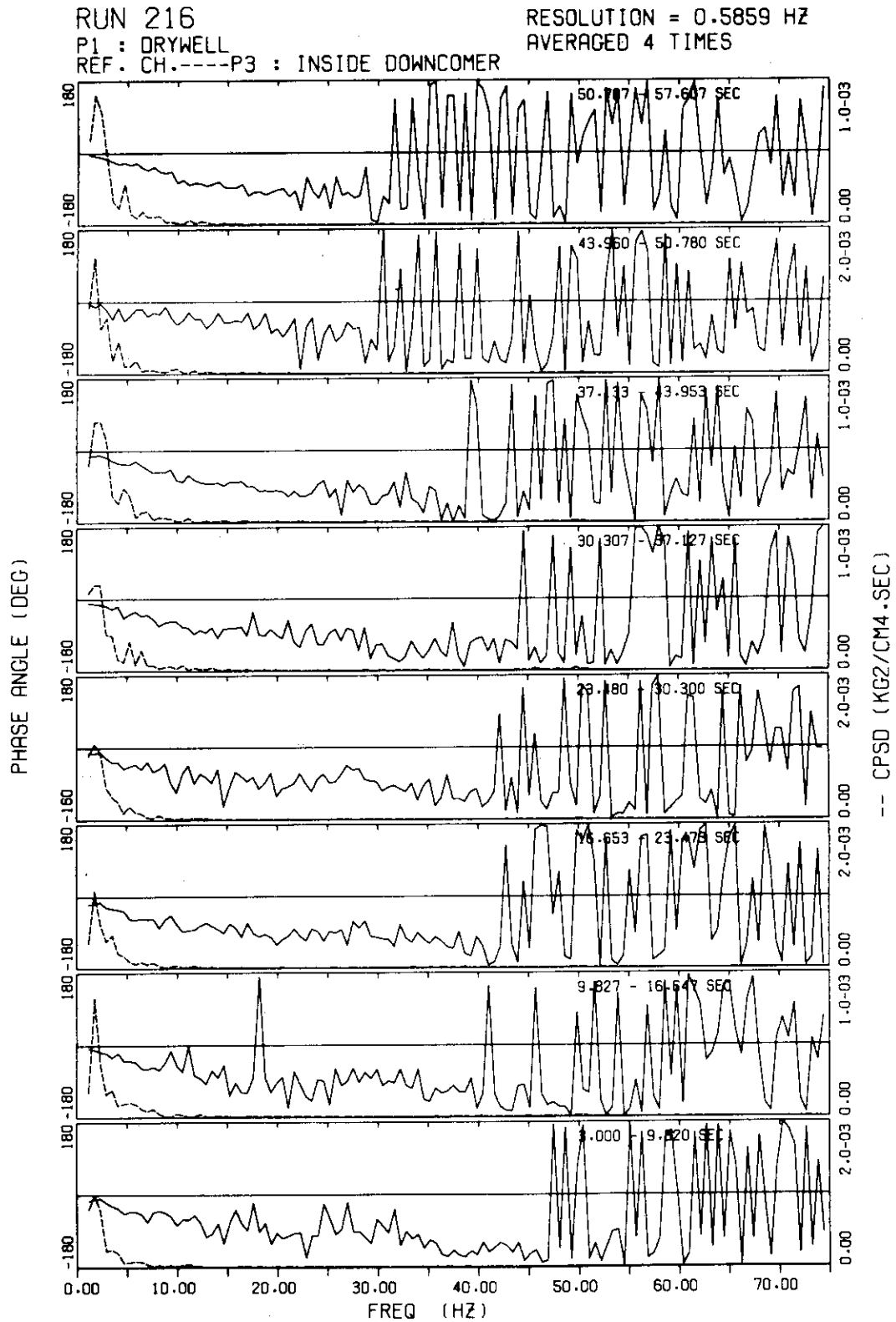


Fig. 4.18 Phase angles and CPSD functions, Case 01, Run 216

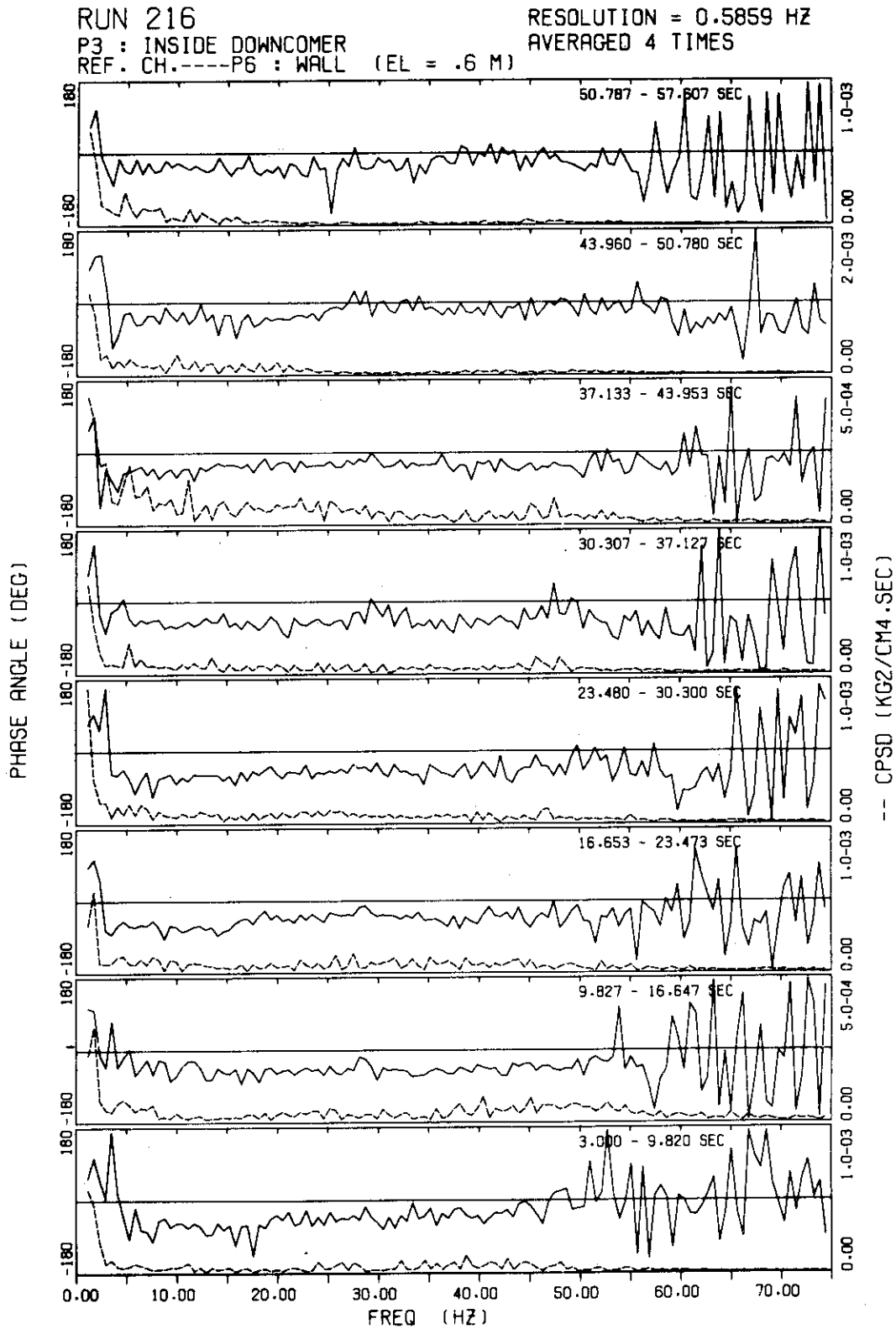


Fig. 4.19 Phase angles and CPSD functions, Case 01, Run 216

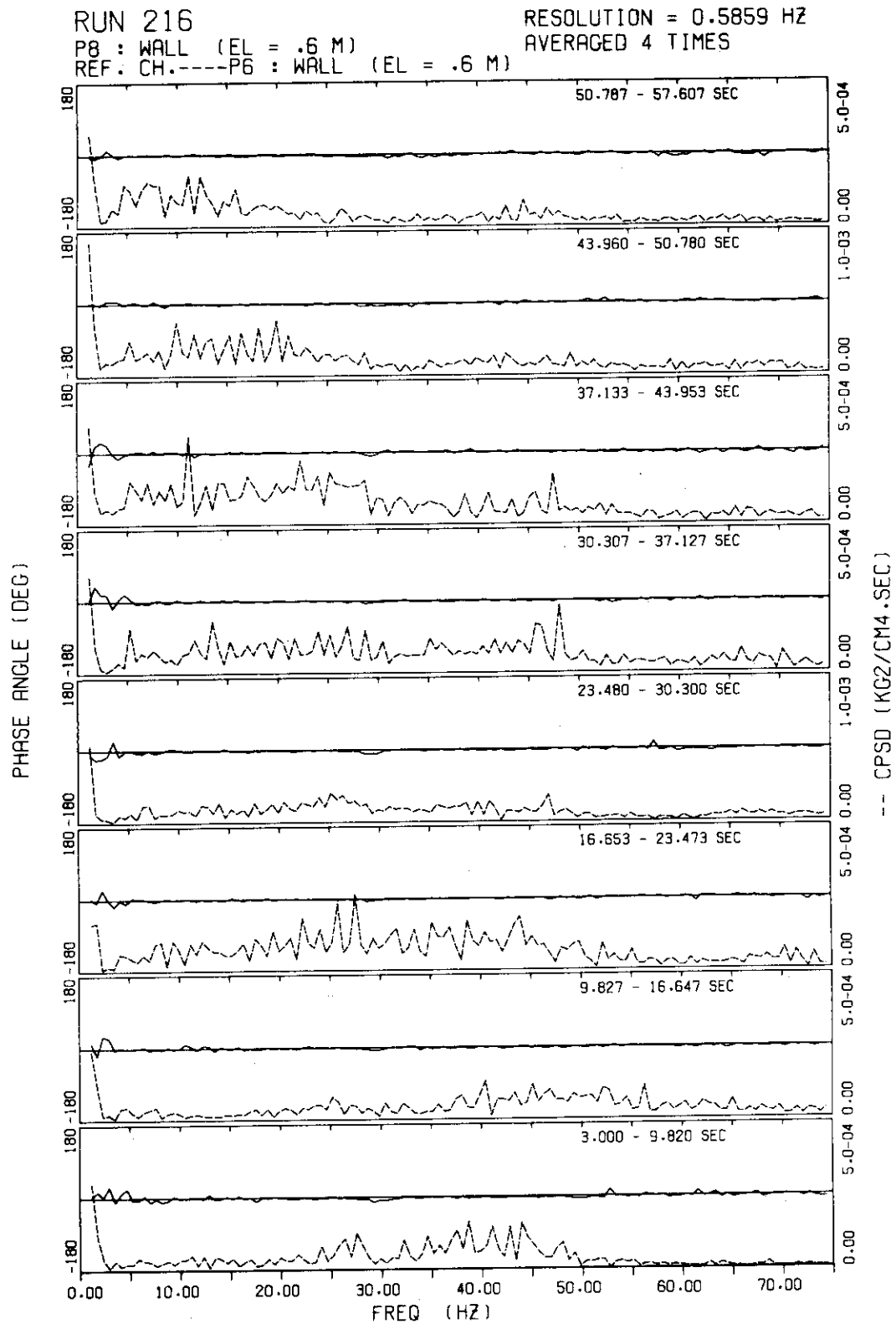


Fig. 4.20 Phase angles and CPSD functions, Case 01, Run 216

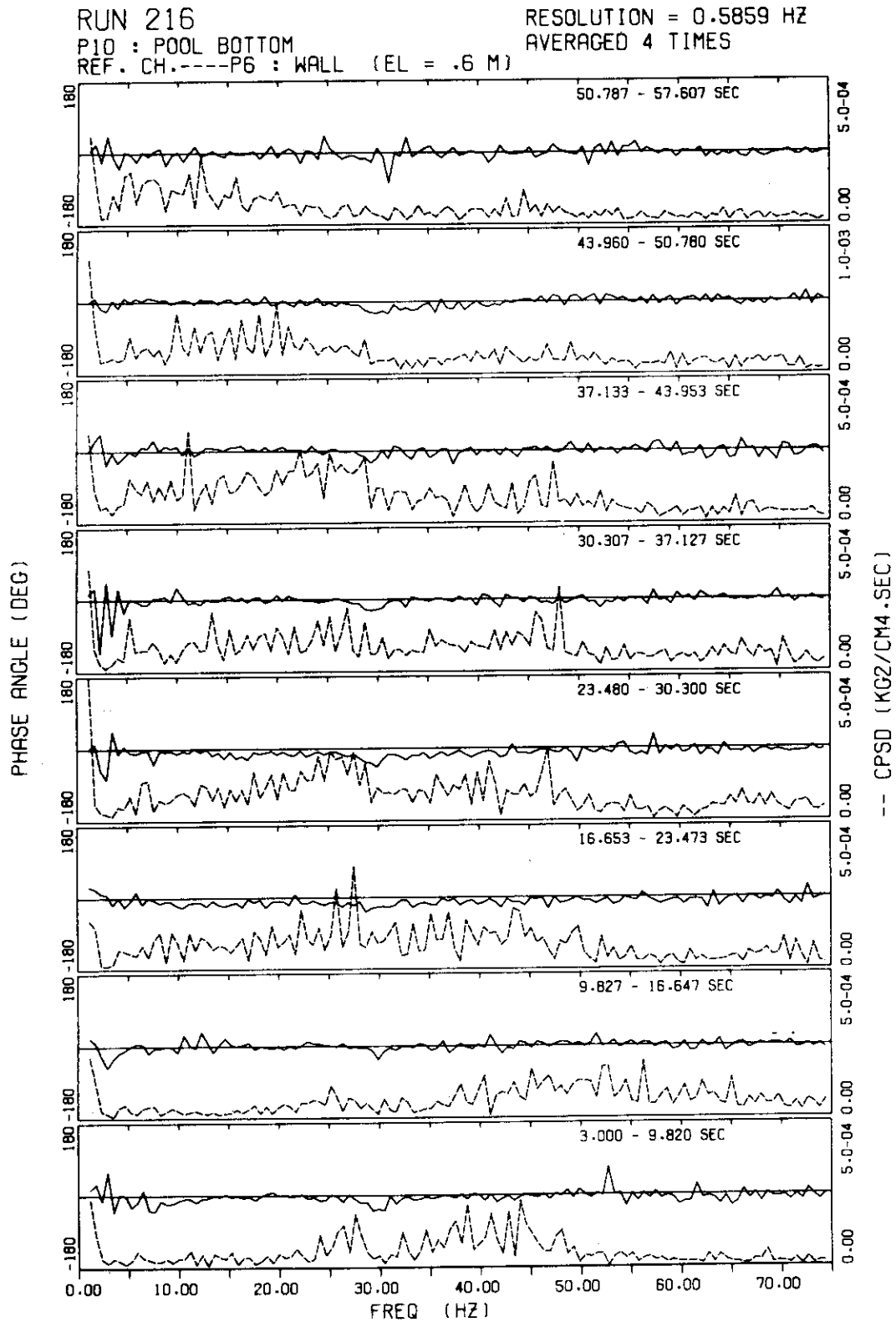


Fig. 4.21 Phase angles and CPSD functions, Case 01, Run 216

RUN 216

P1 : DRYWELL

REF. CH.-----P3 : INSIDE DOWNCOMER

RESOLUTION = 0.5859 HZ

AVERAGED 4 TIMES

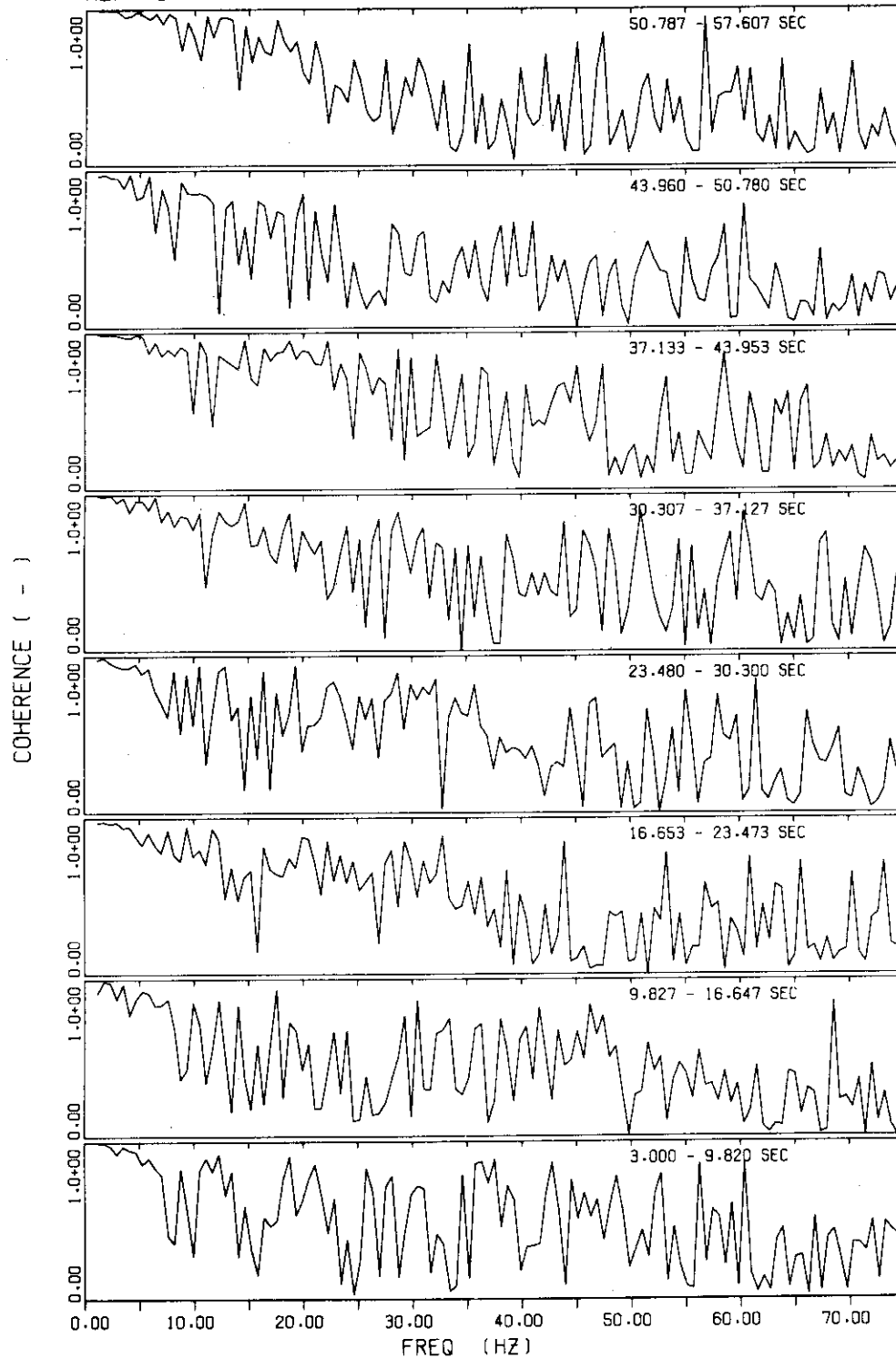


Fig. 4.22 Coherence functions, Case 01, Run 216

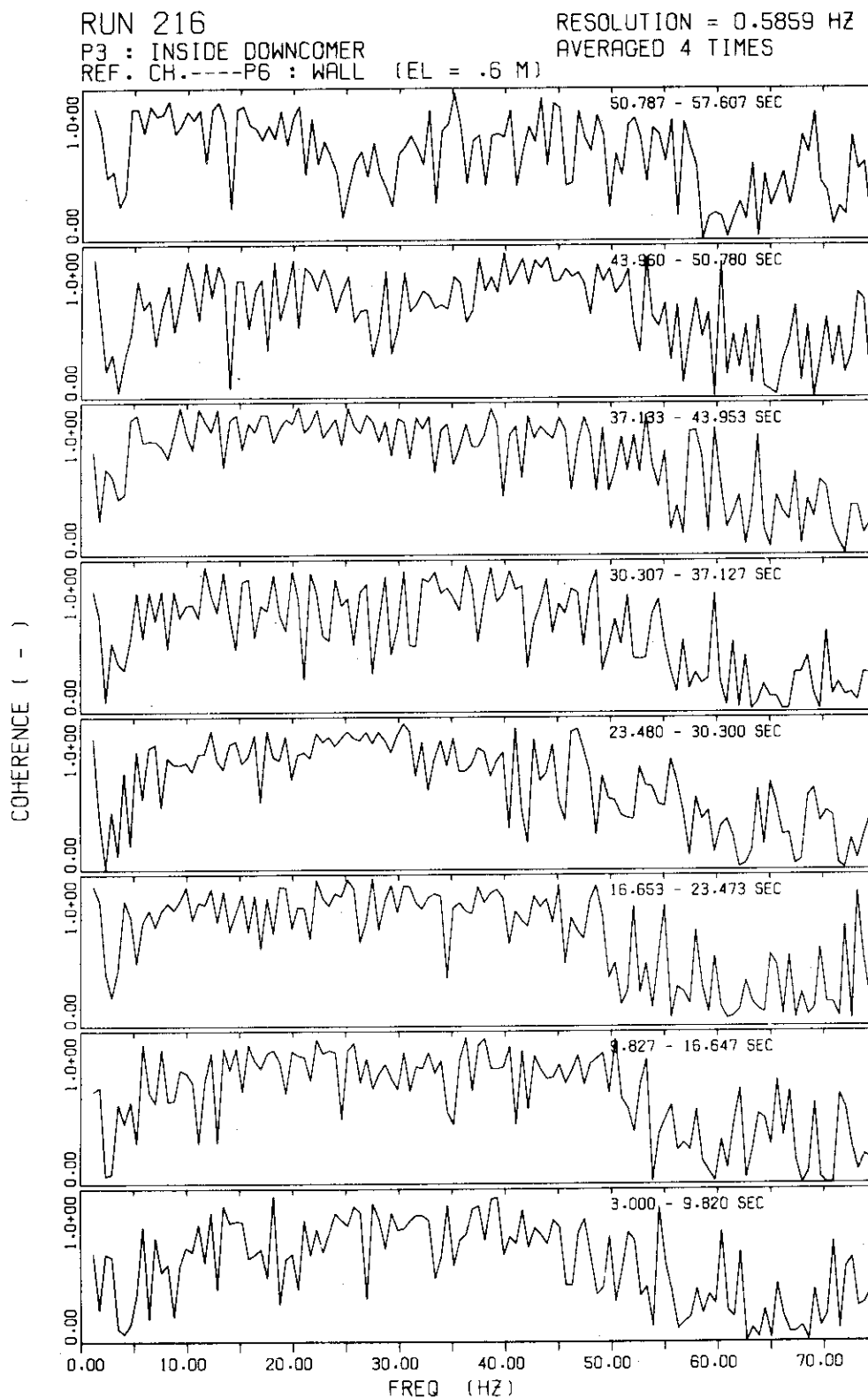


Fig. 4.23 Coherence functions, Case 01, Run216

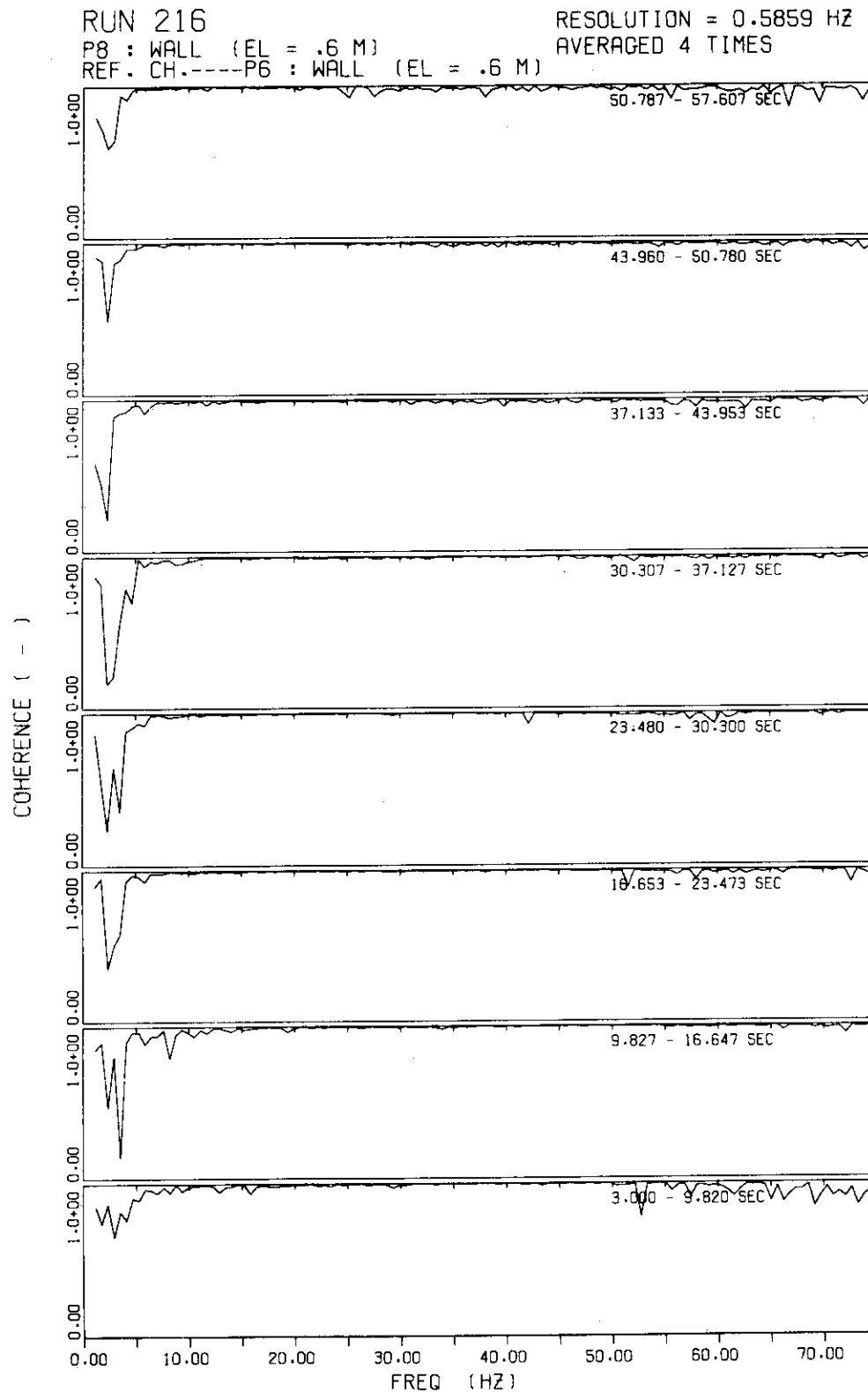


Fig. 4.24 Coherence functions, Case 01, Run 216

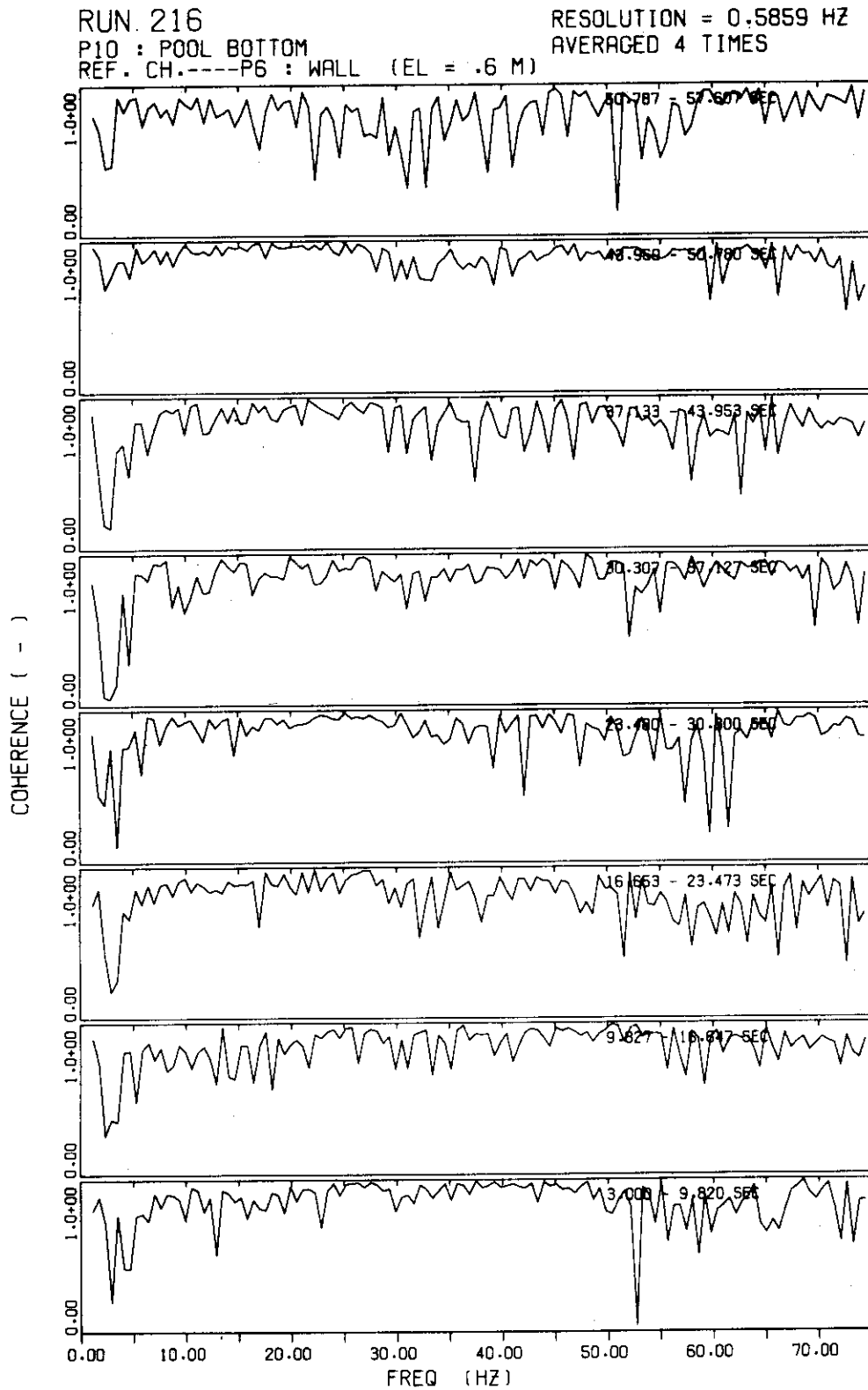


Fig. 4.25 Coherence functions, Case 01, Run 216

RUN 214

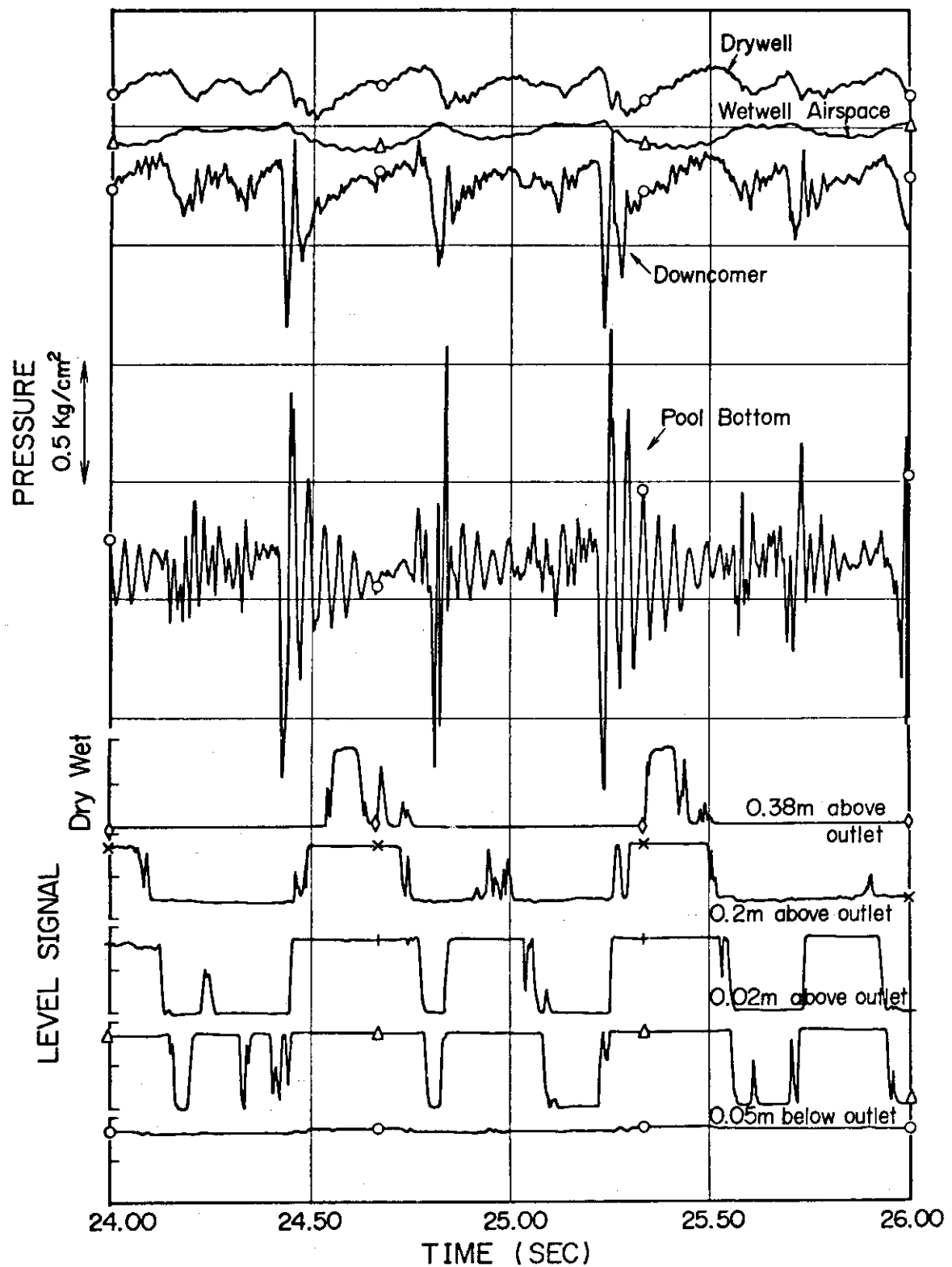


Fig. 4.26 Typical wave forms of pressures and water level signals, Case 02, Run 214

pool temp. = 62 deg. C

RUN 214
P1 : DRYWELL

P3 : INSIDE DOWNCOMER

RESOLUTION = 0.5859 HZ
AVERAGED 4 TIMES

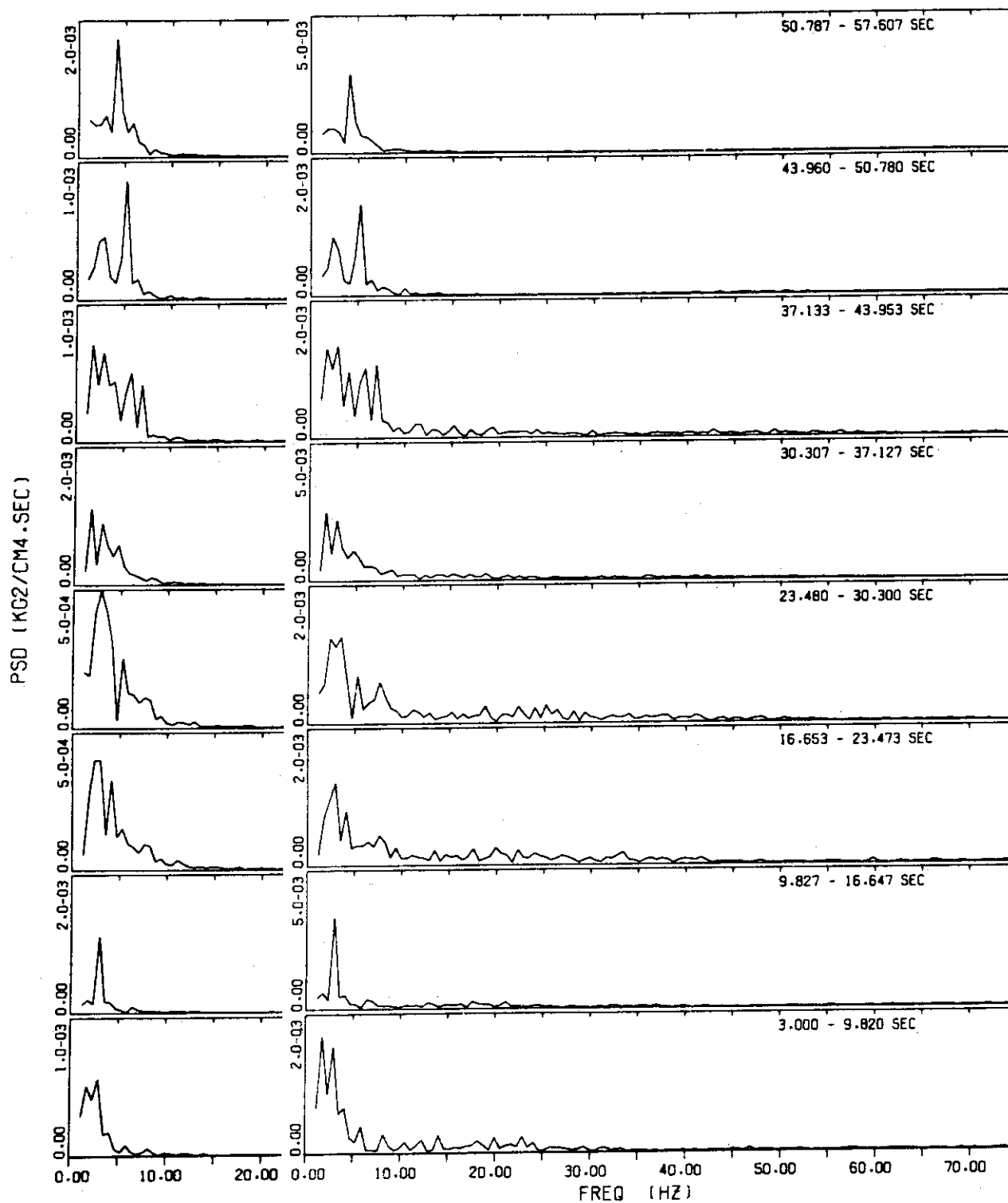


Fig. 4.27 PSD functions, Case 02, Run 214

RUN 214
P6 : WALL (EL = .6 M)

RESOLUTION = 0.5859 HZ
AVERAGED 4 TIMES

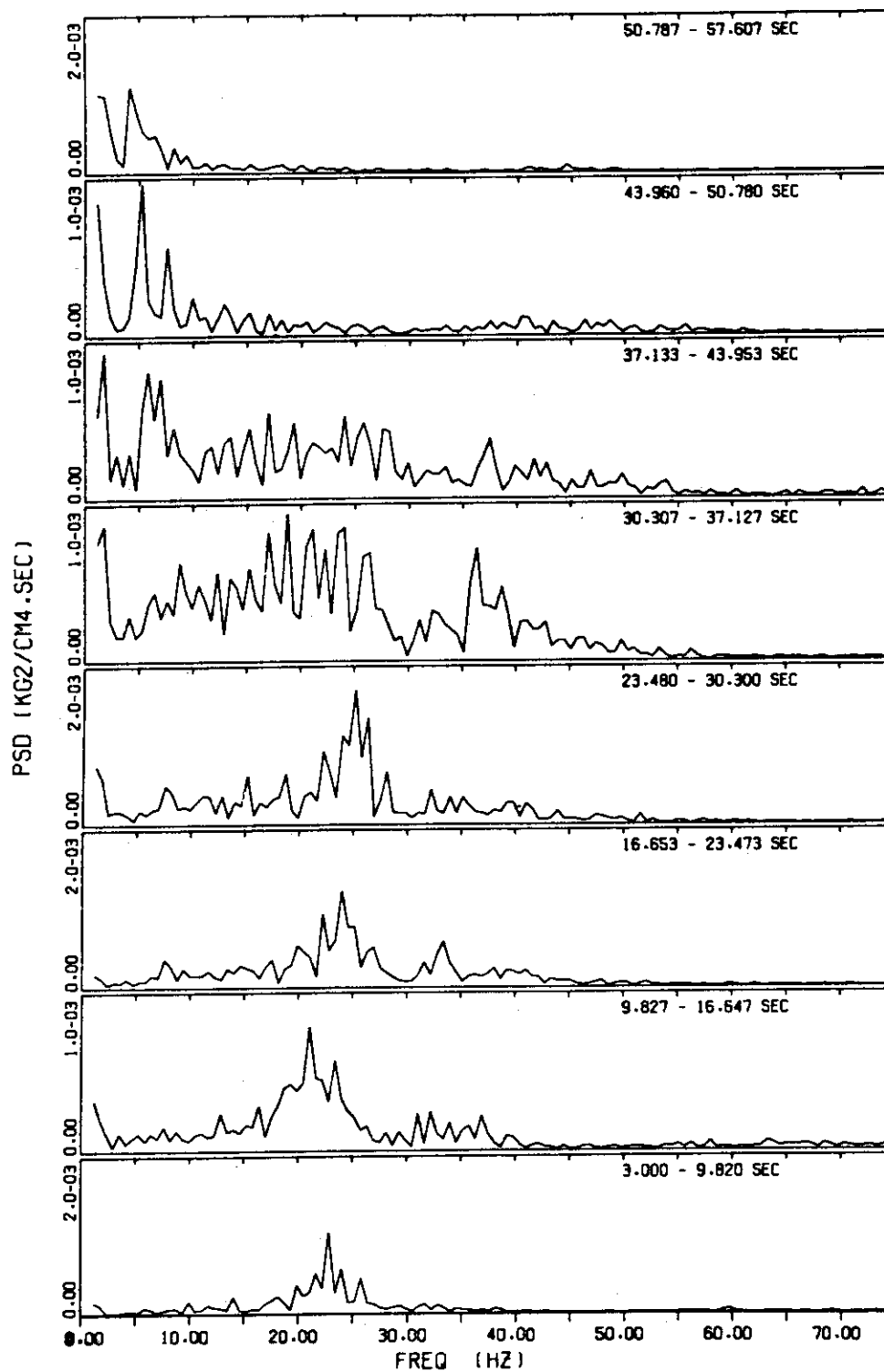


Fig. 4.28 PSD functions, Case 02, Run 214

RUN 214
PIO : POOL BOTTOM

RESOLUTION = 0.5859 HZ
AVERAGED 4 TIMES

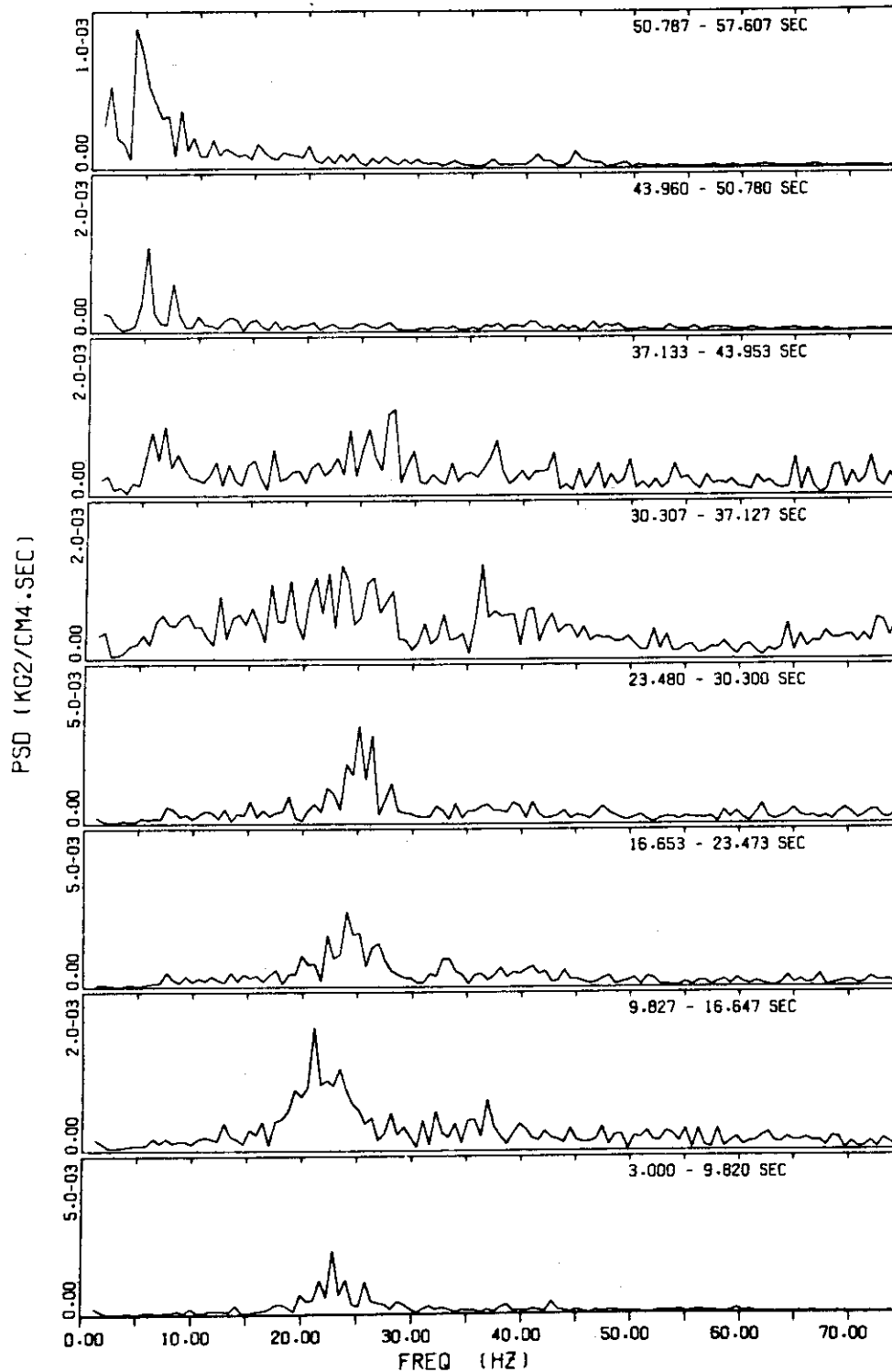


Fig. 4.29 PSD functions, Case 02, Run 214

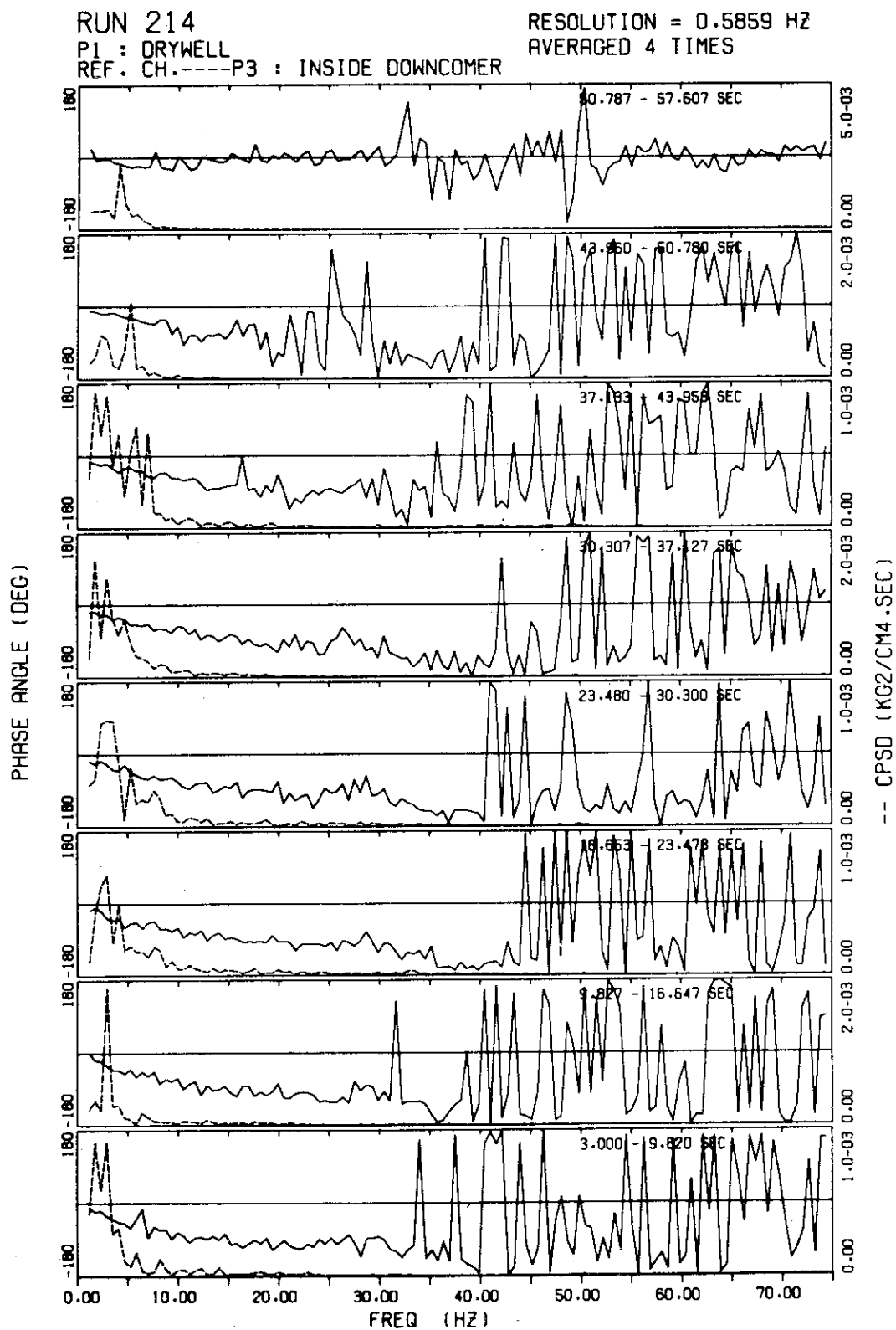


Fig. 4.30 Phase angles and CPSD functions, Case 02, Run 214

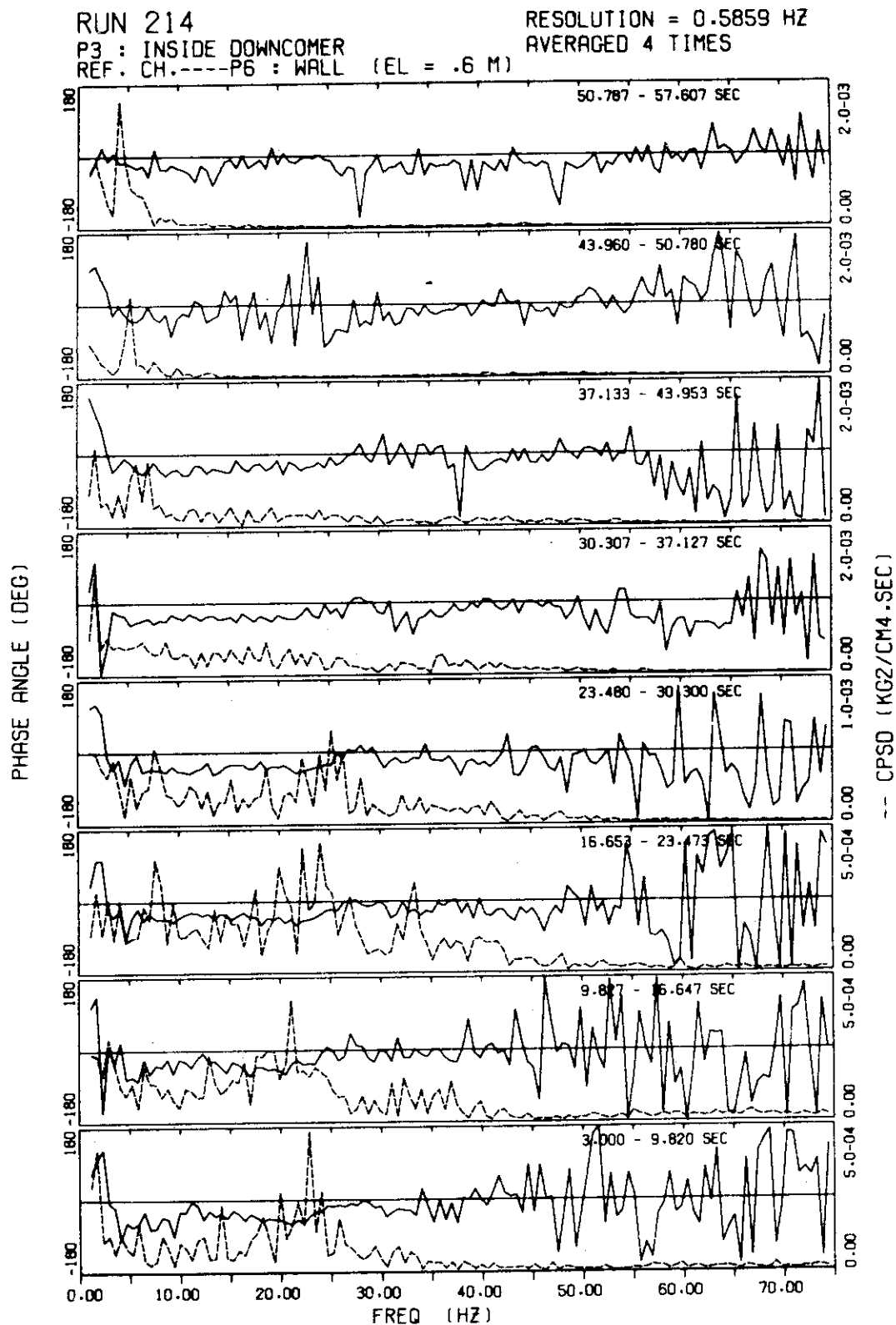


Fig. 4.31 Phase angles and CPSD functions, Case 02, Run214

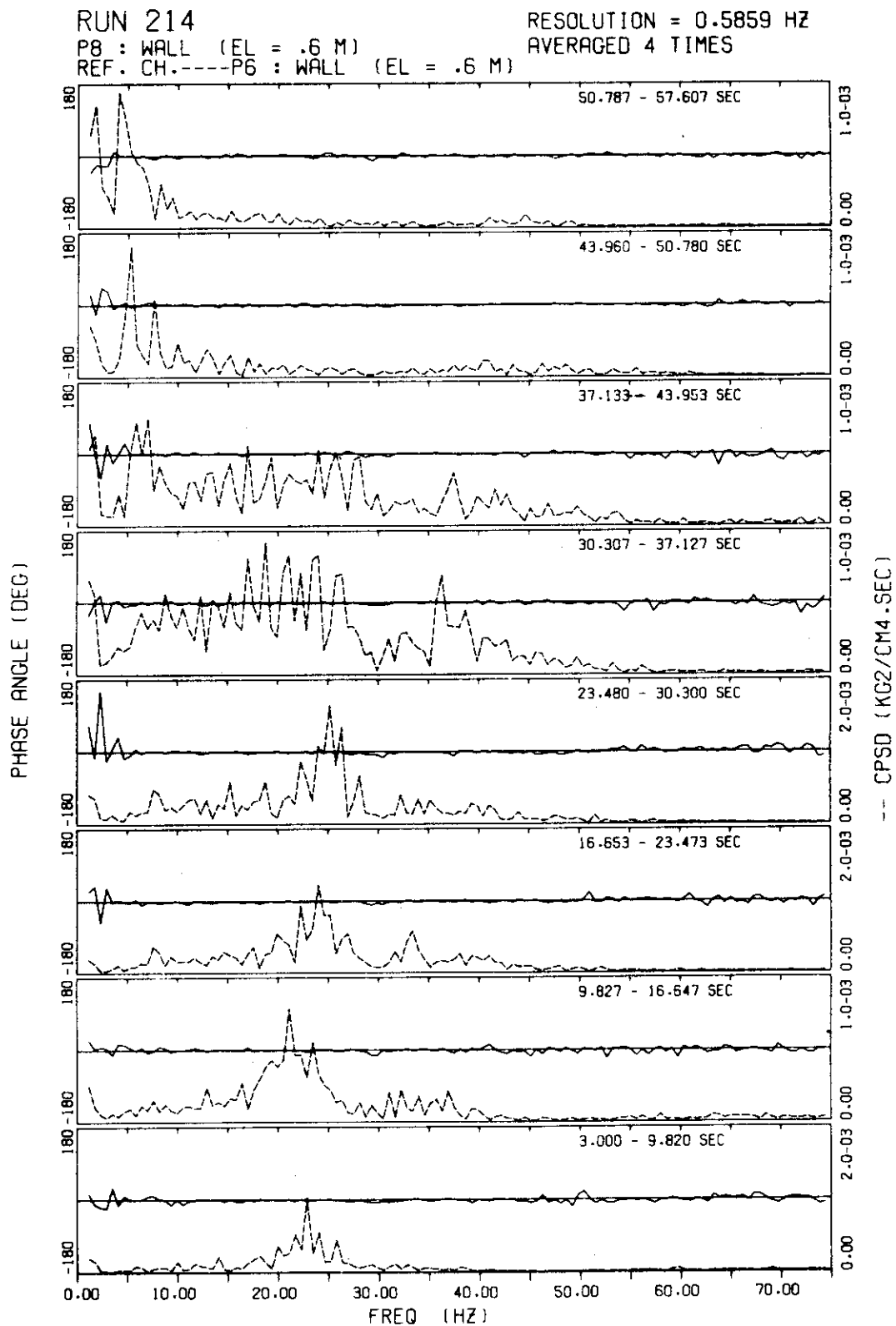


Fig. 4.32 Phase angles and CPSD functions, Case 02, Run 214

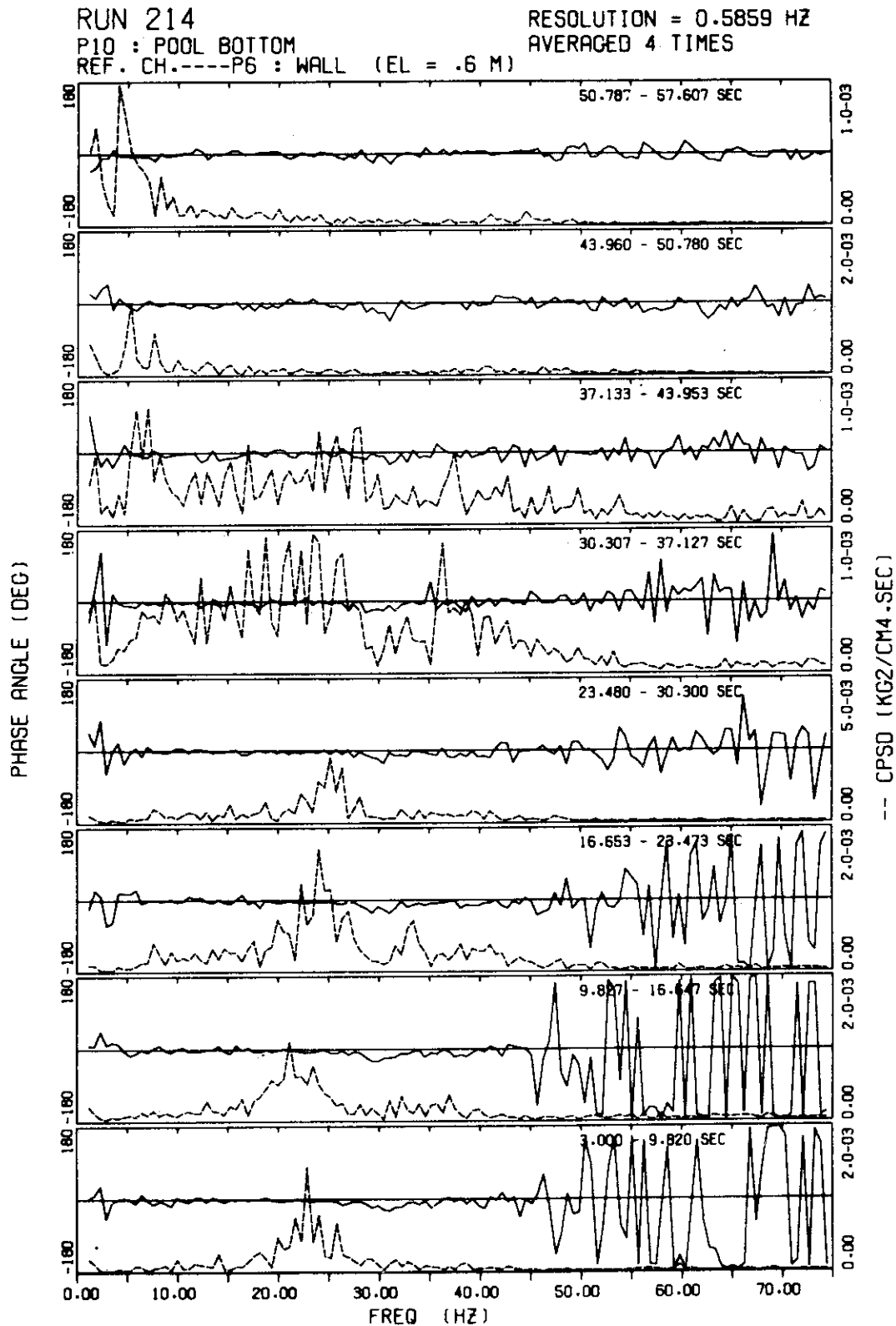


Fig. 4.33 Phase angles and CPSD functions, Case 02, Run 214

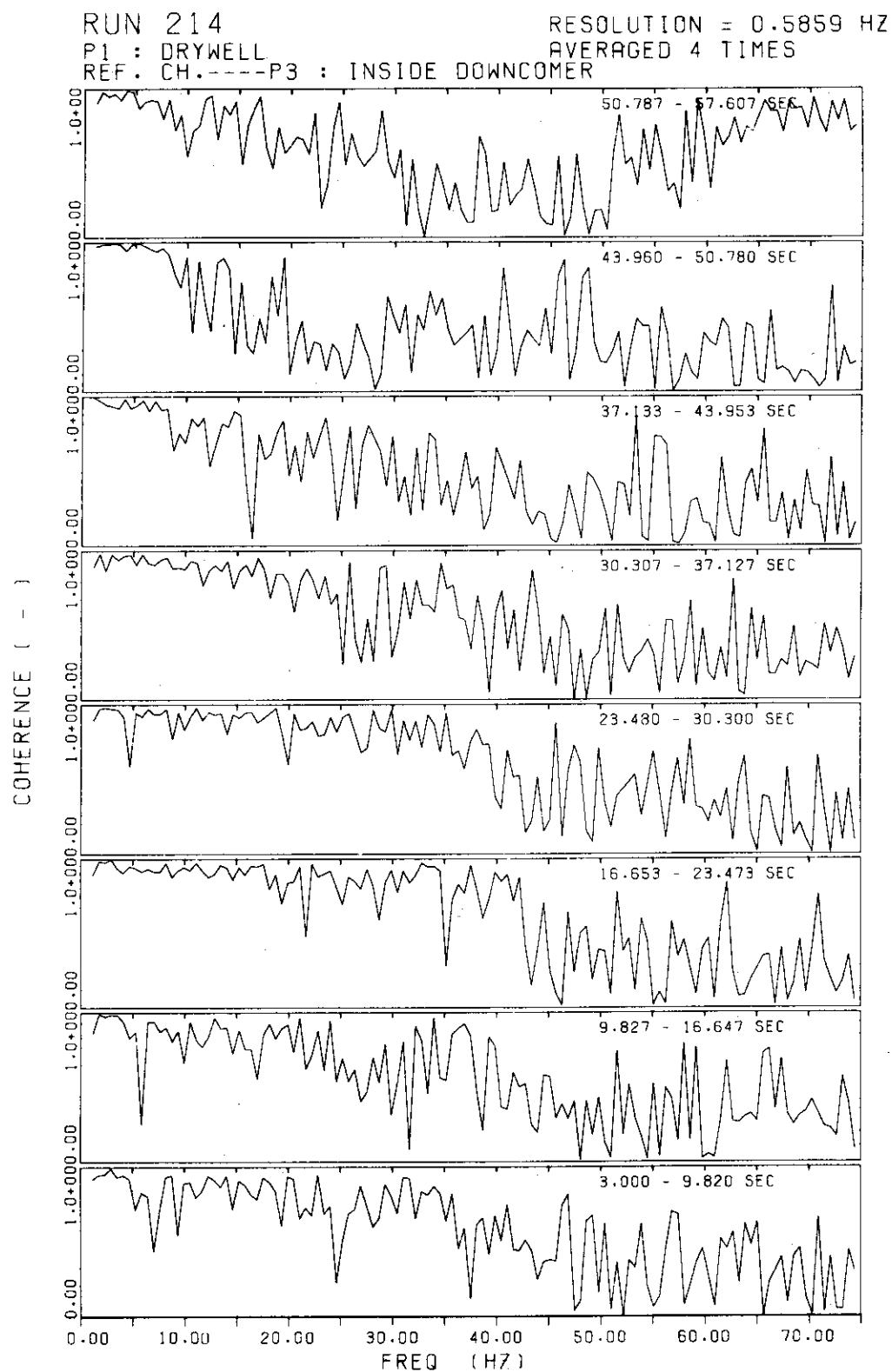


Fig. 4.34 Coherence functions, Case 02, Run 214

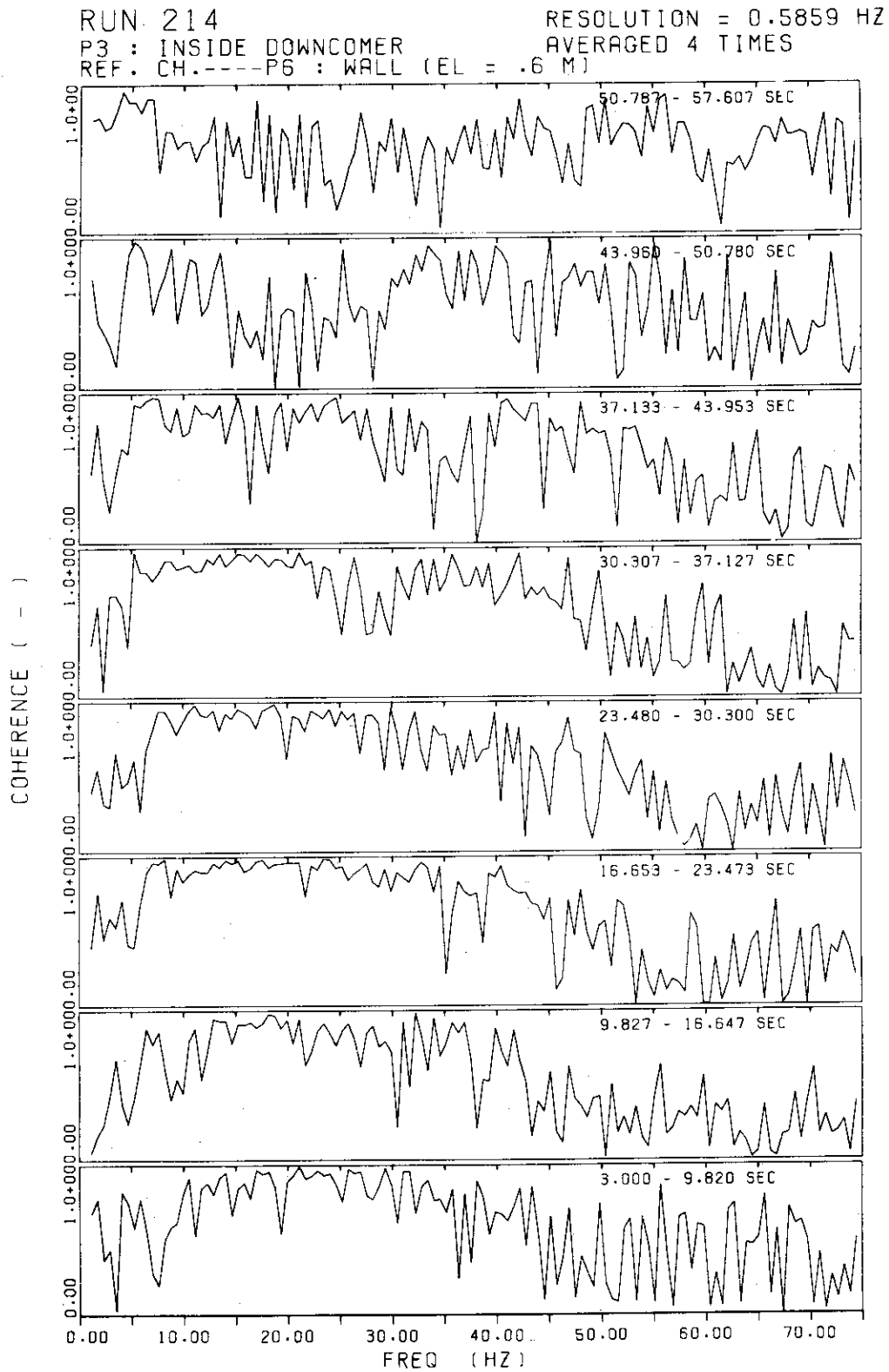


Fig. 4.35 Coherence functions, Case 02, Run 214

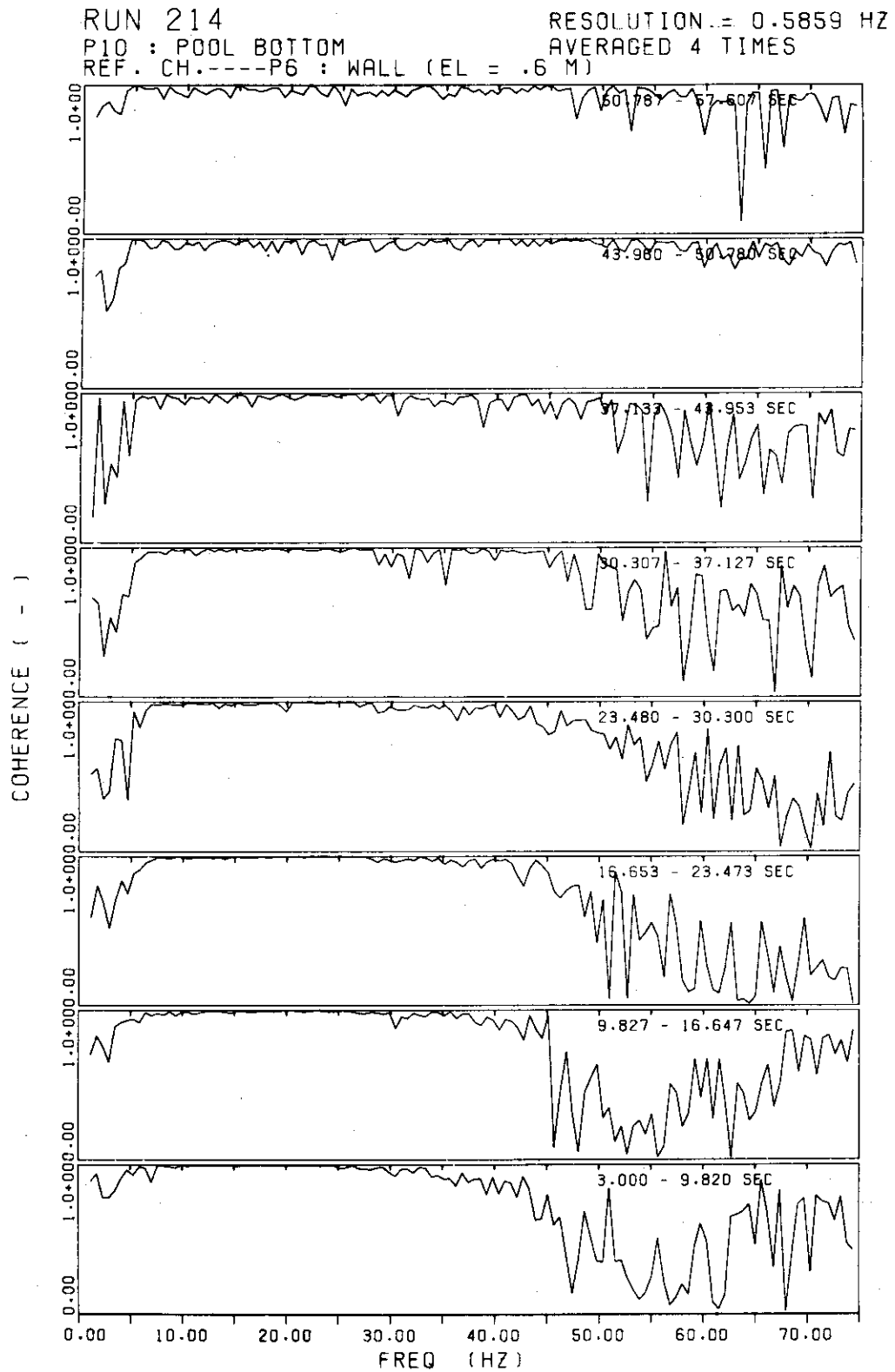


Fig. 4.36 Coherence functions, Case 02, Run 214

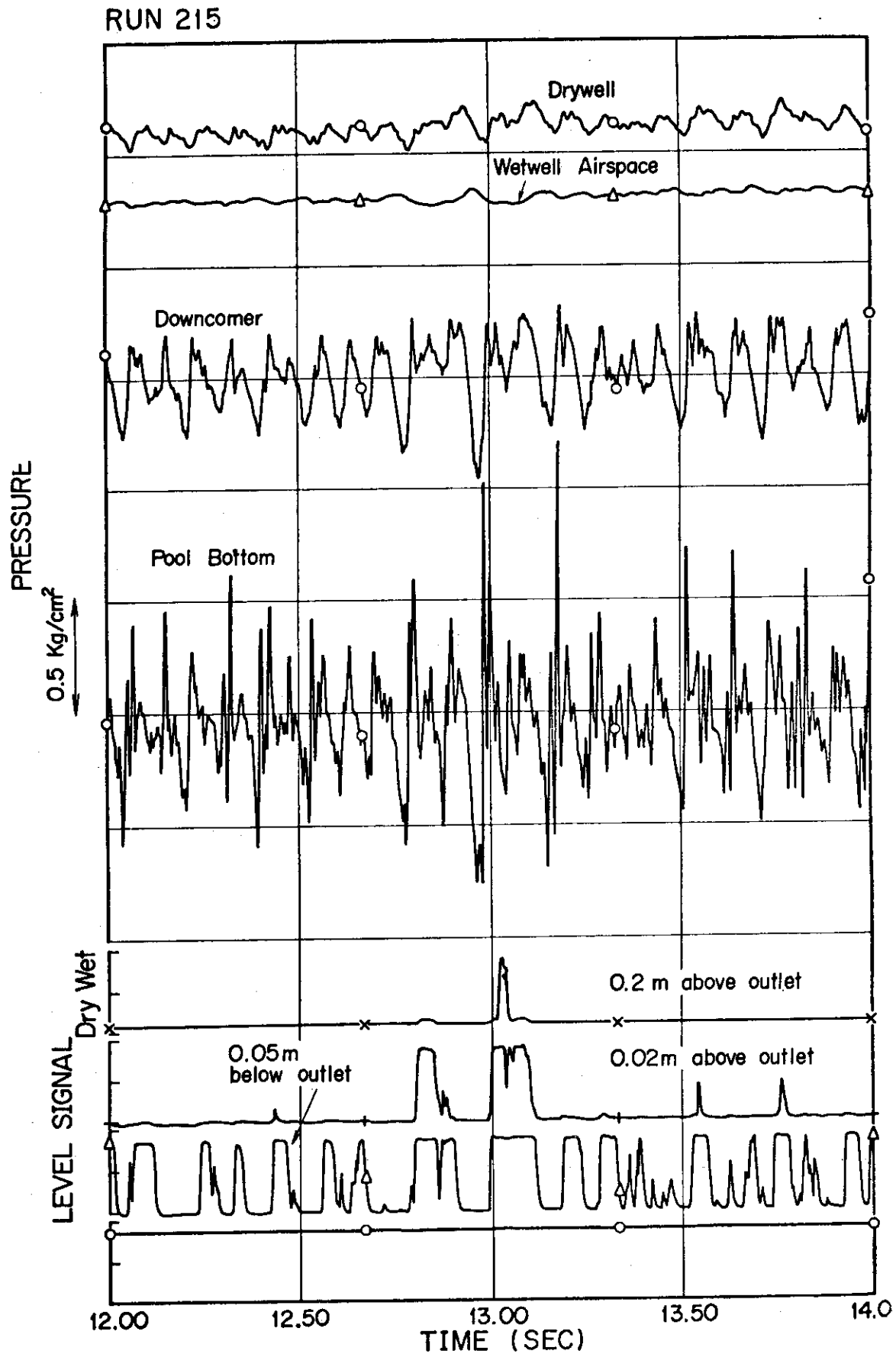


Fig. 4.37 Typical wave formes of pressures and water level signals,
Case 03, Run 215
pool temp. = 68 deg. C

RUN 215
P1 : DRYWELL

RESOLUTION = 0.5859 HZ
AVERAGED 2 TIMES

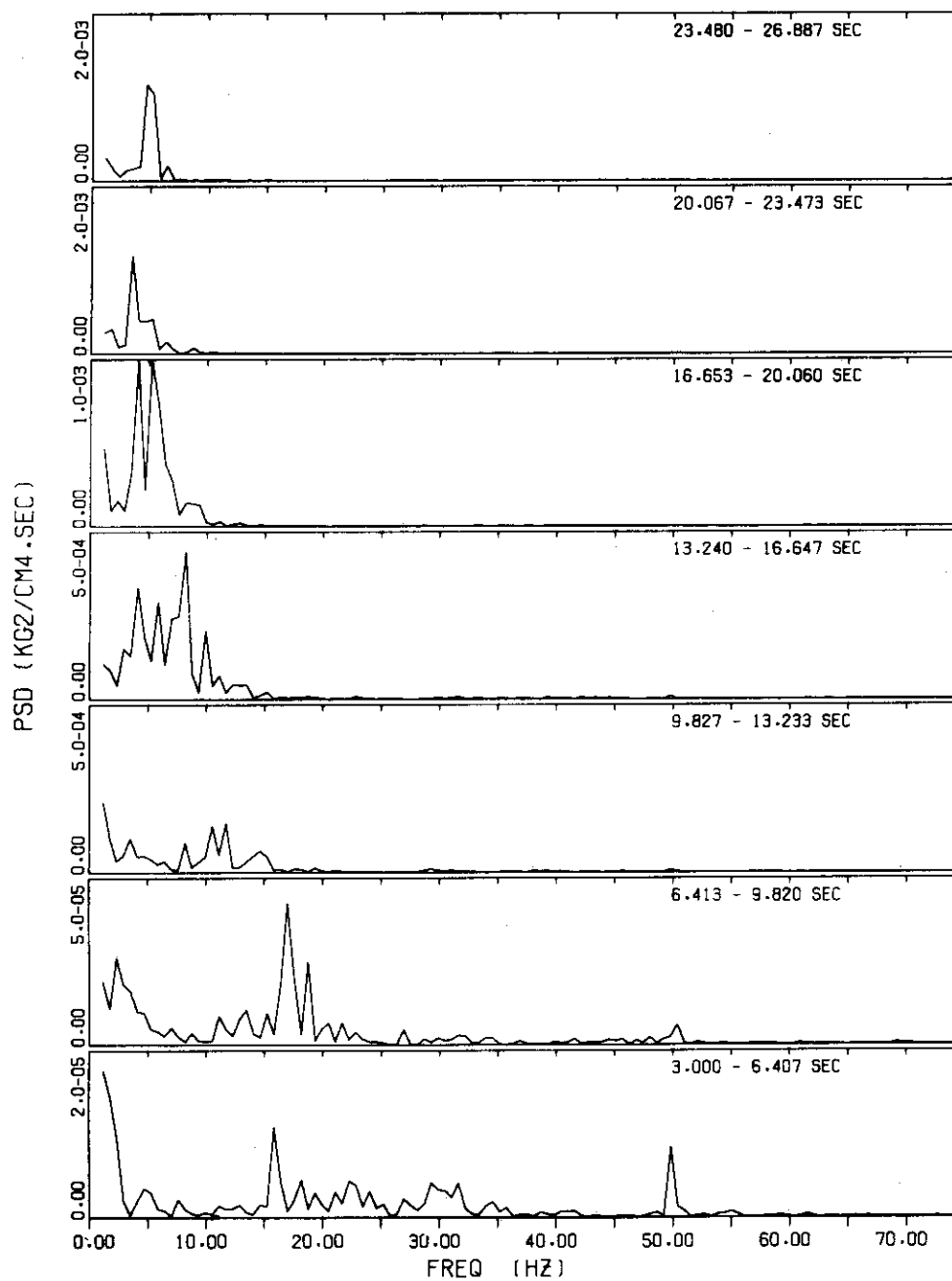


Fig. 4.38 PSD functions, Case 03, Run215

RUN 215
P3 : INSIDE DOWNCOMER

RESOLUTION = 0.5859 HZ
AVERAGED 2 TIMES

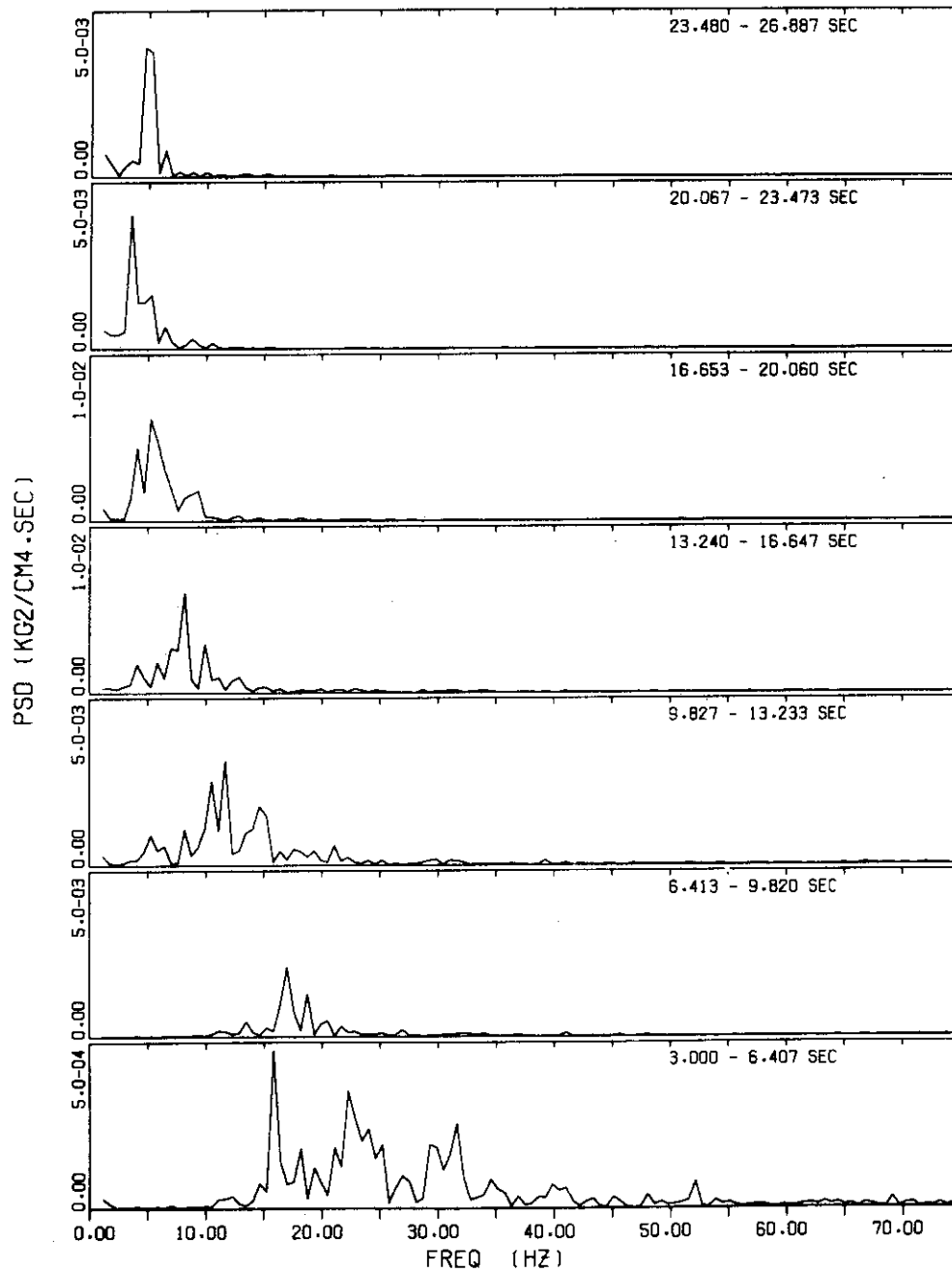


Fig. 4.39 PSD functions, Case 03, Run 215

RUN 215
P6 : WALL (EL = .6 M)

RESOLUTION = 0.5859 HZ
AVERAGED 2 TIMES

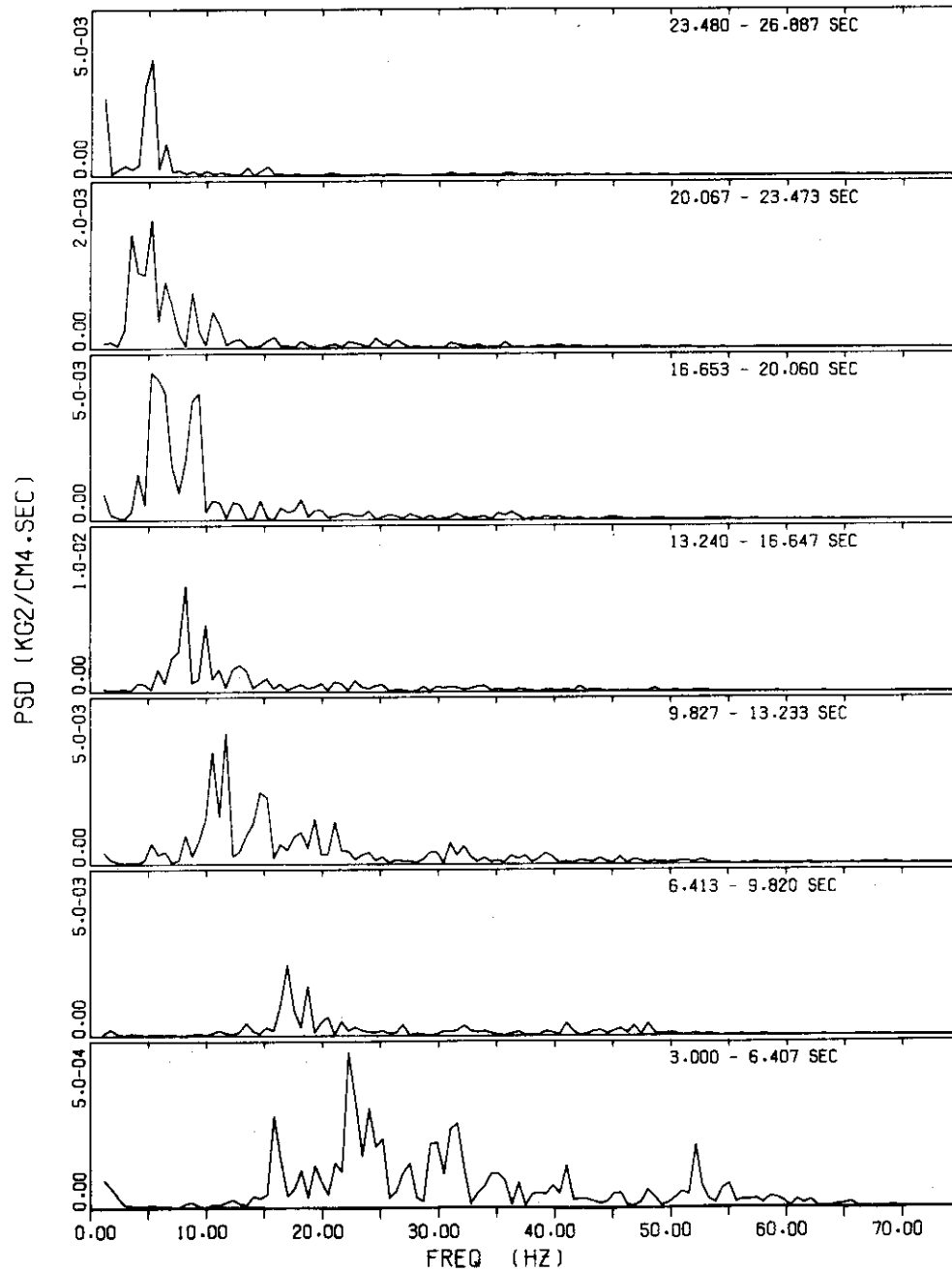


Fig. 4.40 PSD functions, Case 03, Run 215

RUN 215
P10 : POOL BOTTOM

RESOLUTION = 0.5859 HZ
AVERAGED 2 TIMES

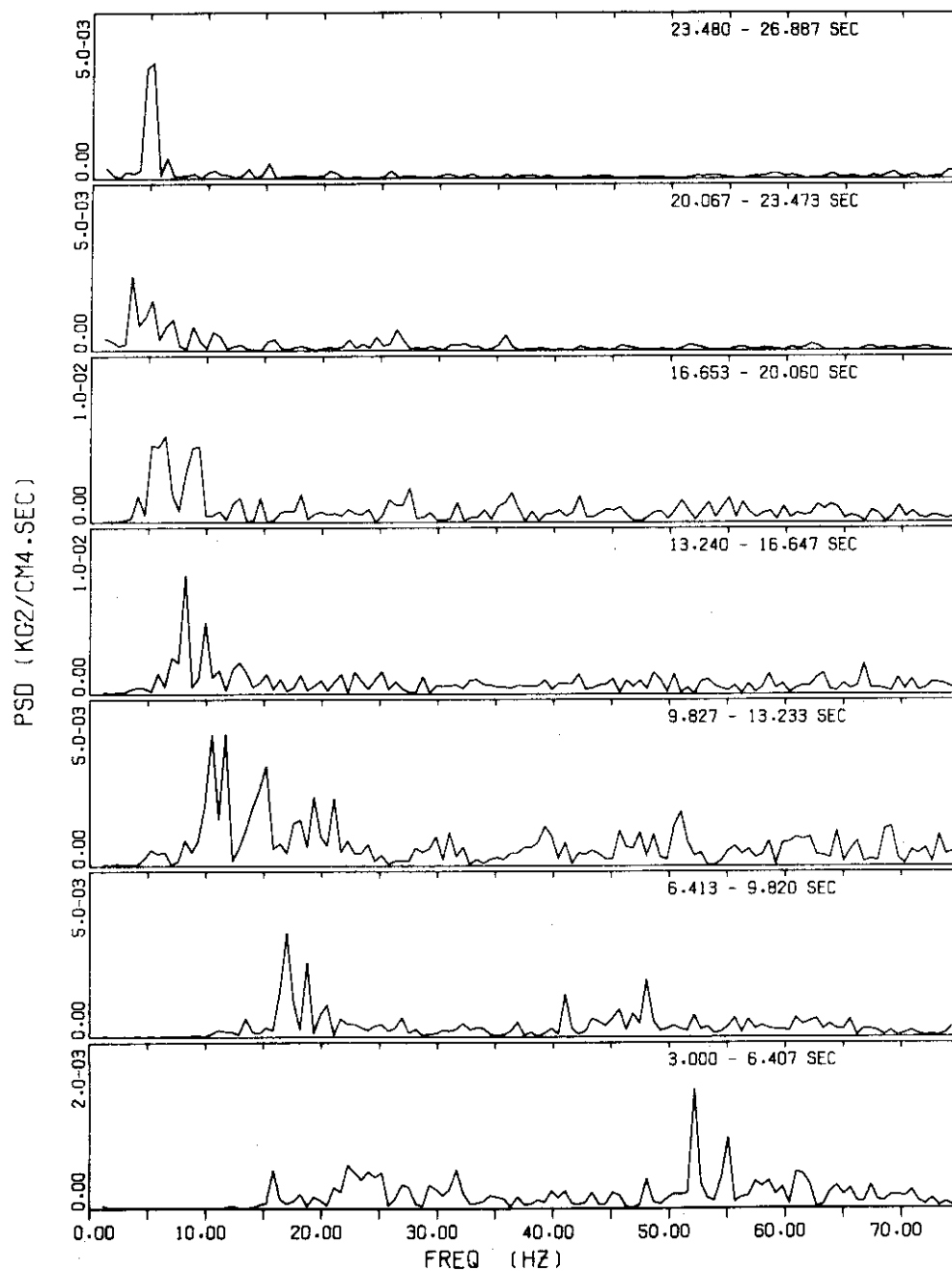


Fig. 4.41 PSD functions, Case 03, Run 215

RUN 215

P1 : DRYWELL

REF. CH.----P3 : INSIDE DOWNCOMER

RESOLUTION = 0.5859 HZ

AVERAGED 2 TIMES

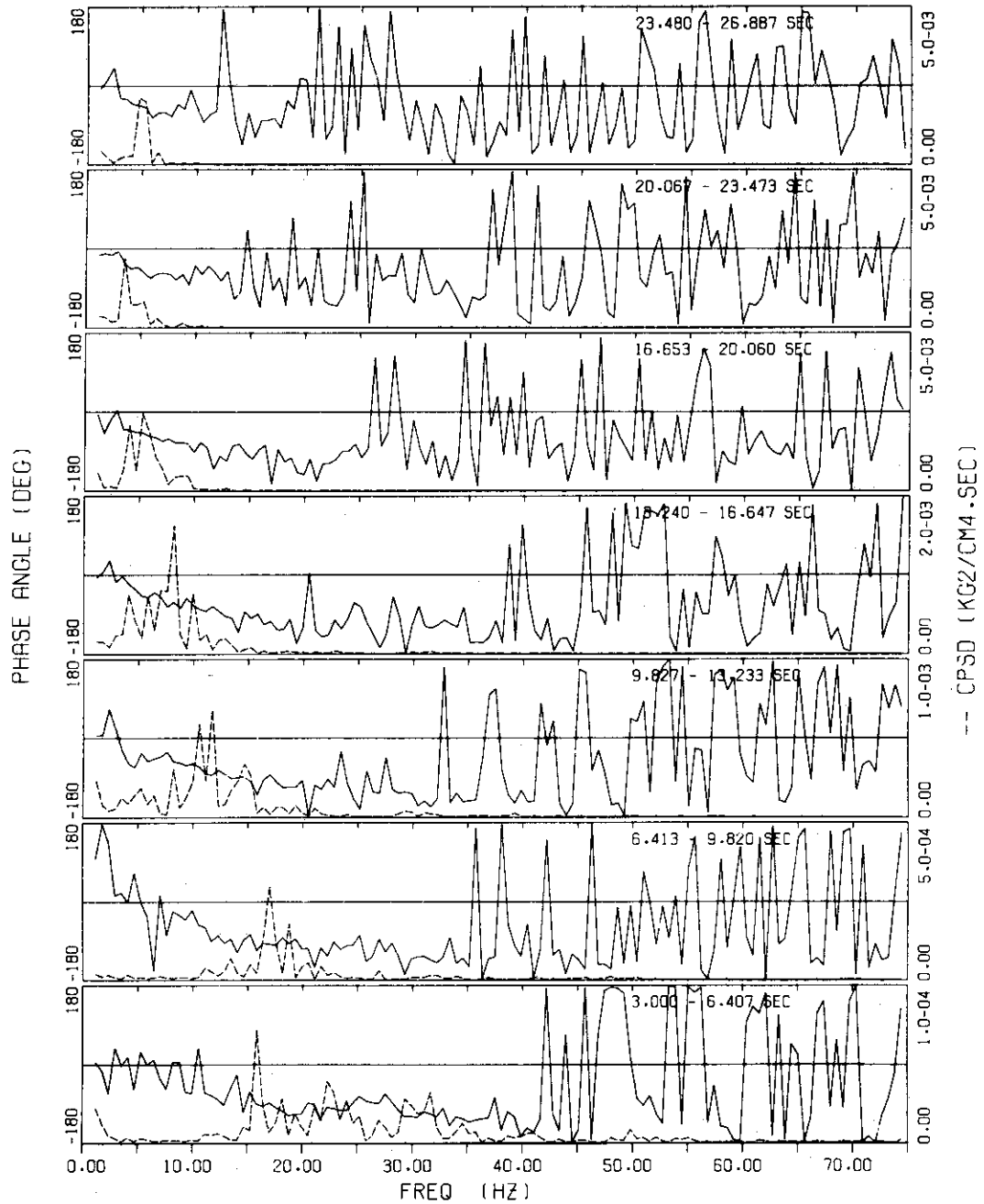


Fig. 4.42 Phase angles and CPSD functions, Case 03, Run 215

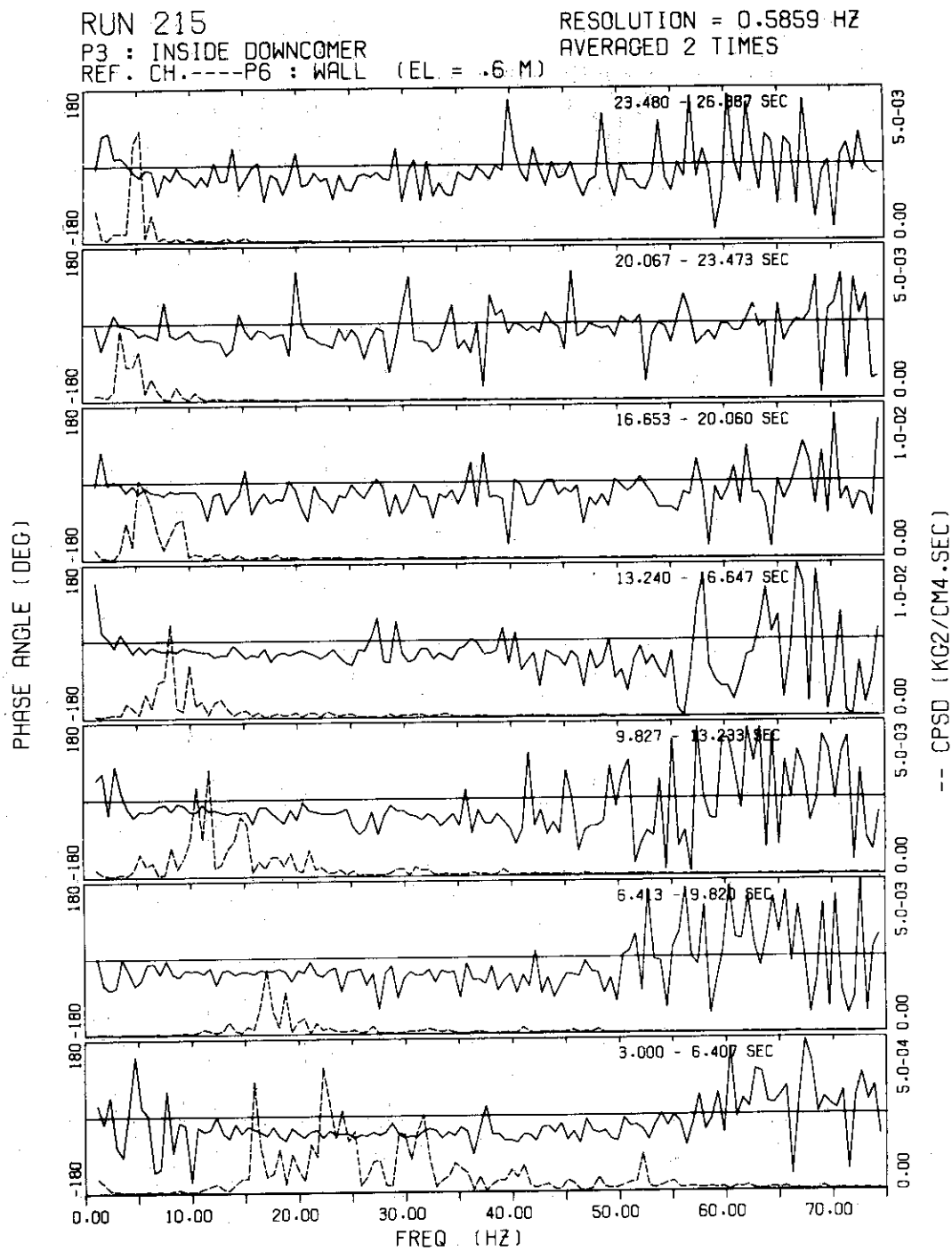


Fig. 4.43 Phase angles and CPSD functions, Case 03, Run 215

RUN 215

RESOLUTION = 0.5859 HZ

P8 : WALL (EL = .6 M)

AVERAGED 2 TIMES

REF. CH.----P6 : WALL (EL = .6 M)

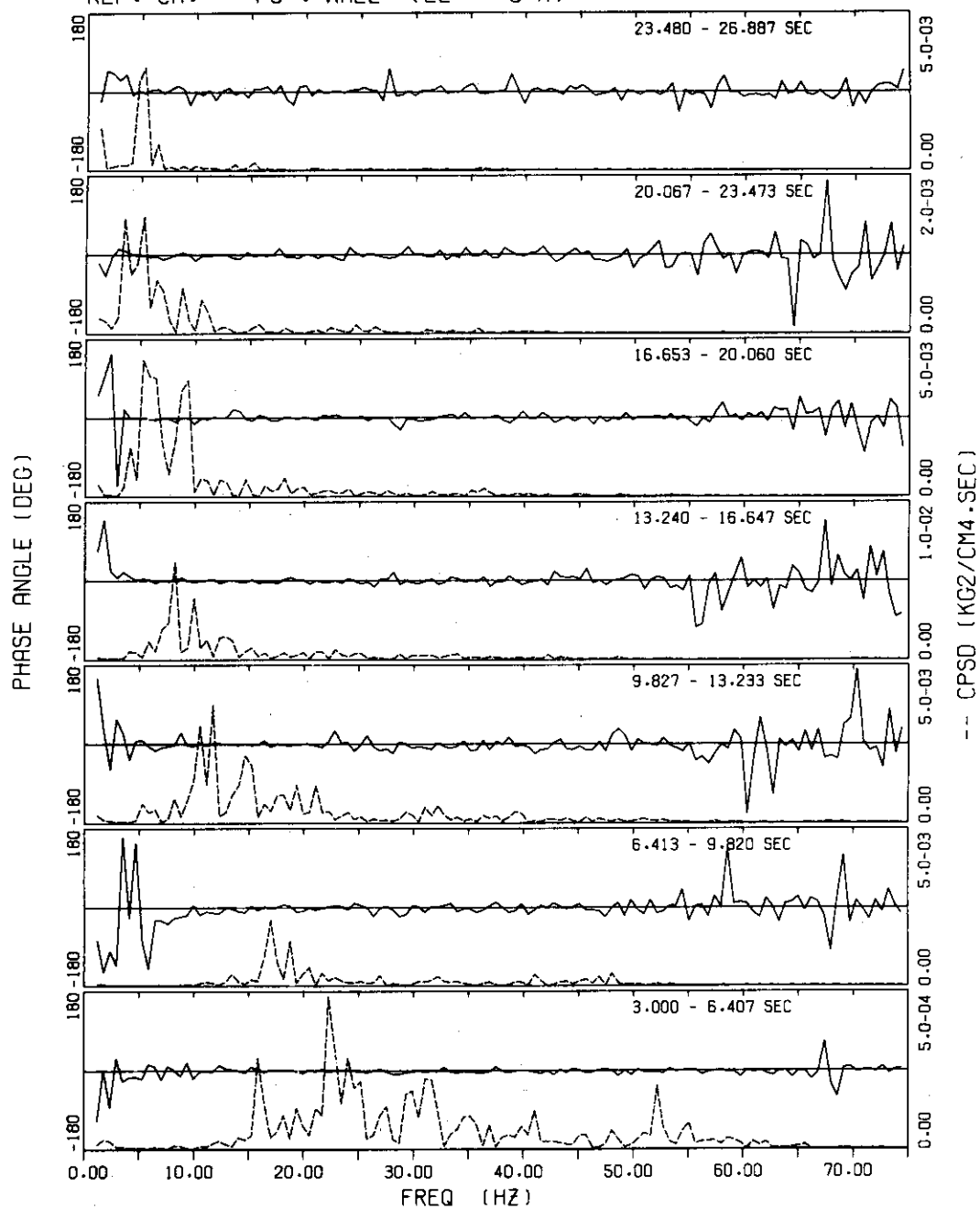


Fig. 4.44 Phase angles and CPSD functions, Case 03, Run 215

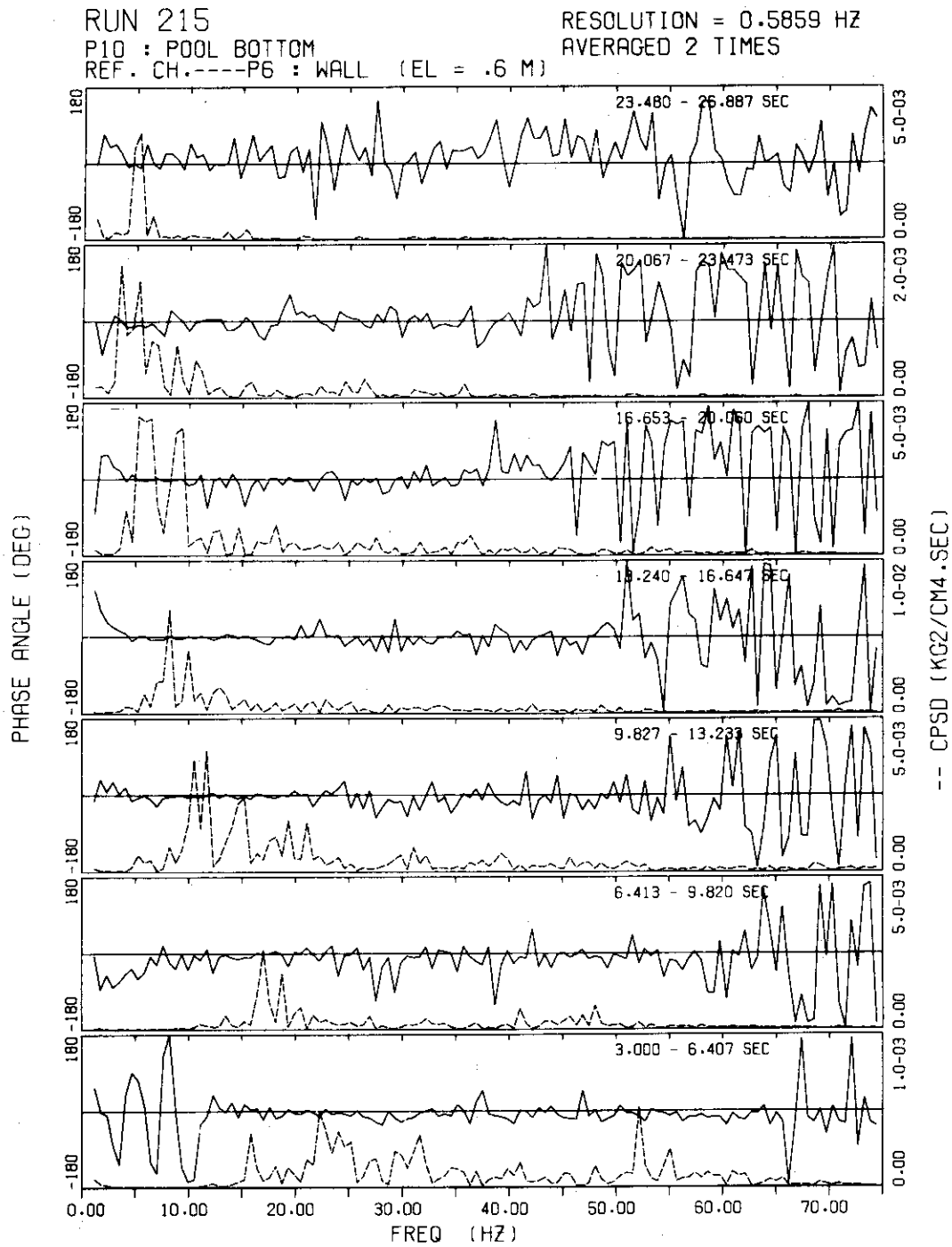


Fig. 4.45 Phase angles and CPSP functions, Case 03, Run 215

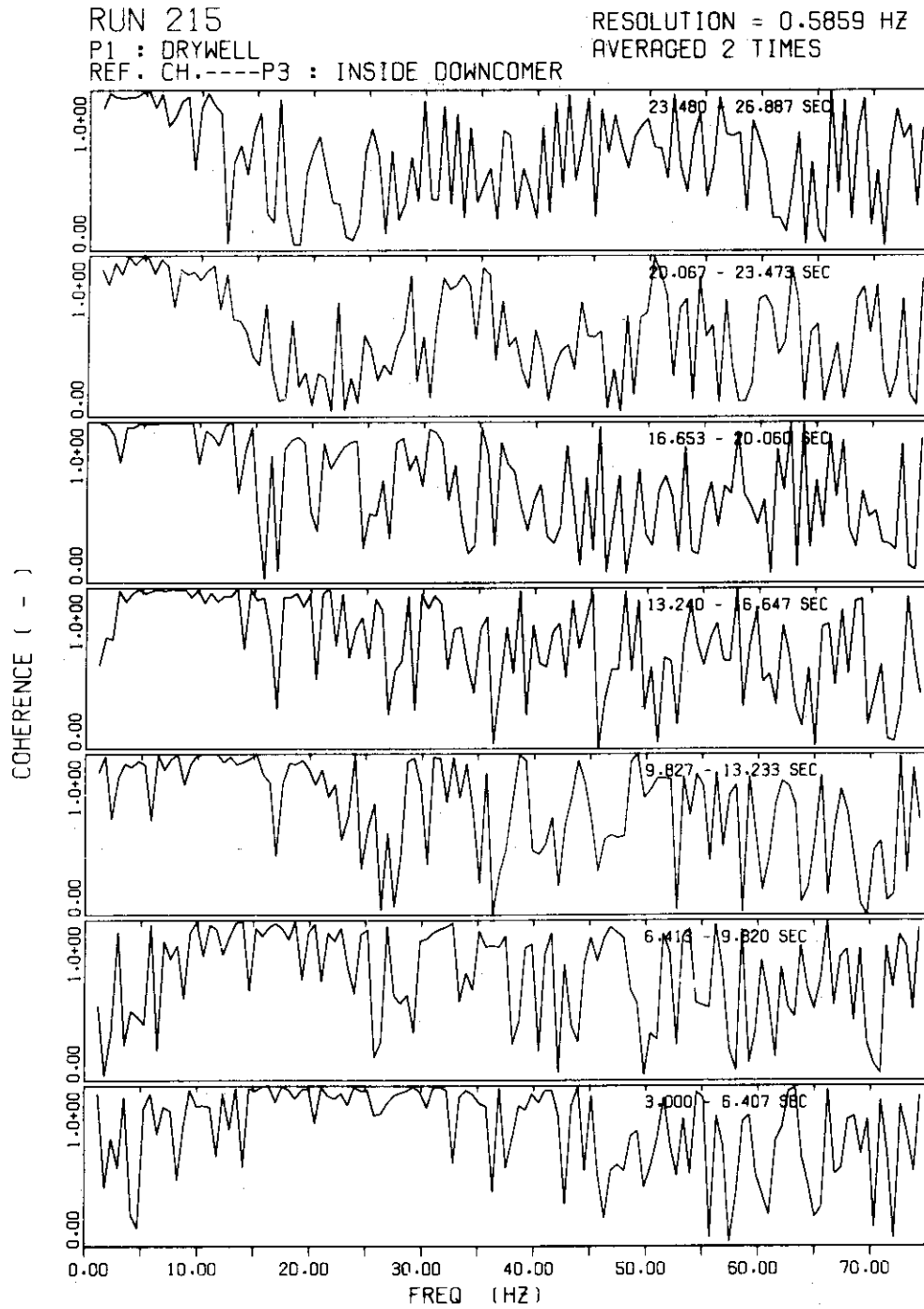


Fig. 4.46 Coherence functions, Case 03, Run 215

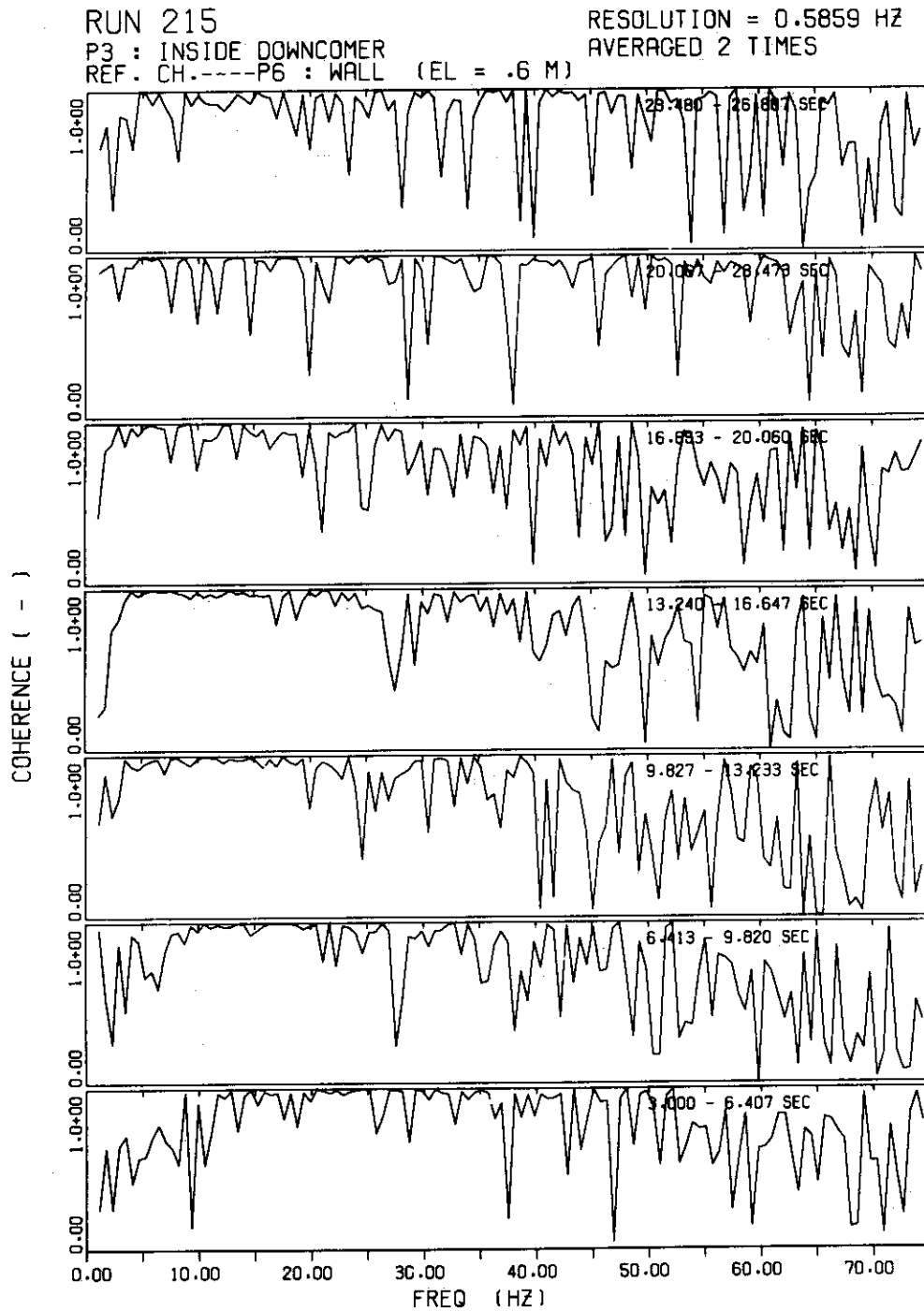


Fig. 4.47 Coherence functions, Case, 03, Run 215

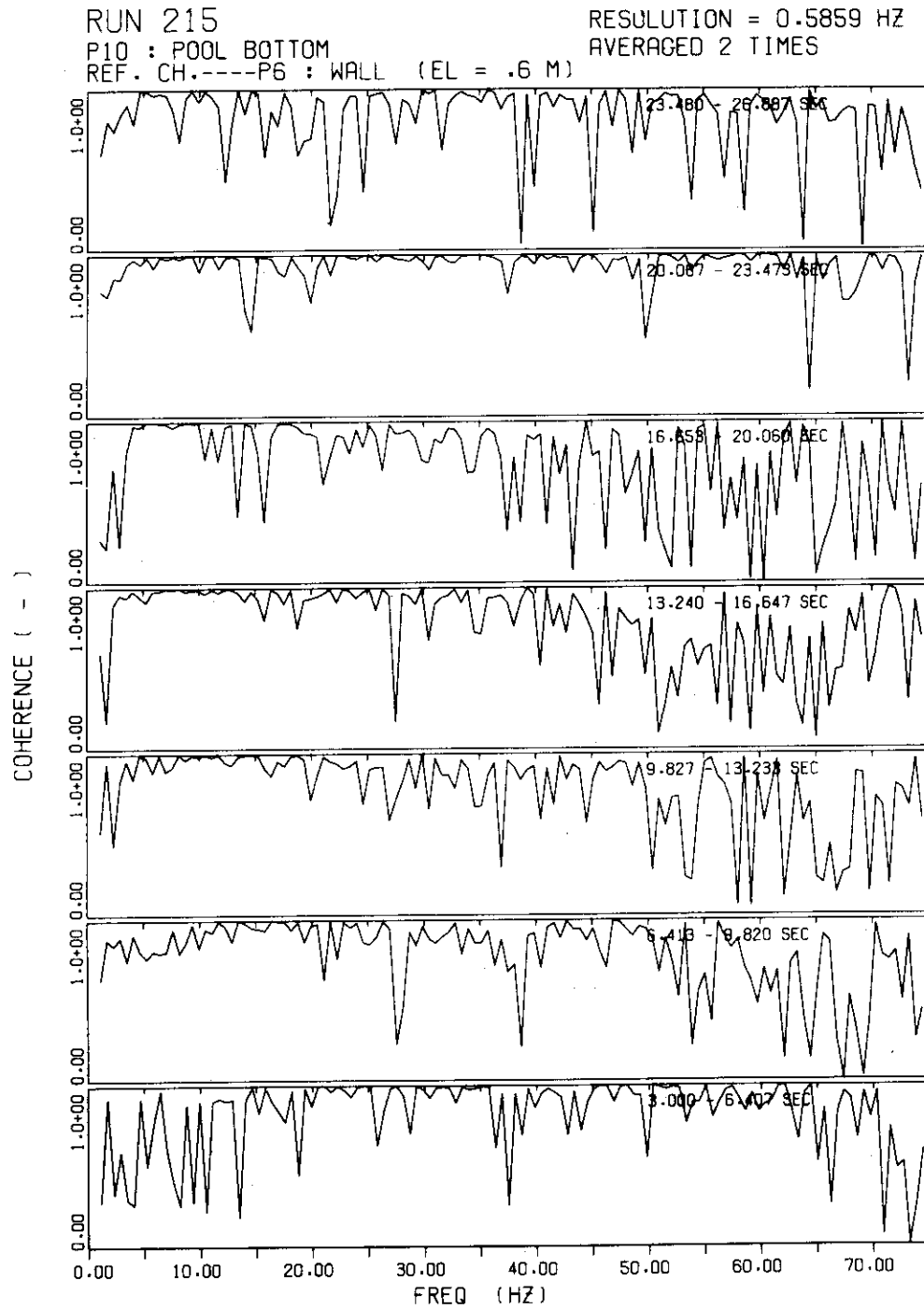


Fig. 4.48 Coherence functions, Case 03, Run 215

RUN 217
PI : DRYWELL

P3 : INSIDE DOWNCOMER

RESOLUTION = 0.5859 HZ
AVERAGED 4 TIMES

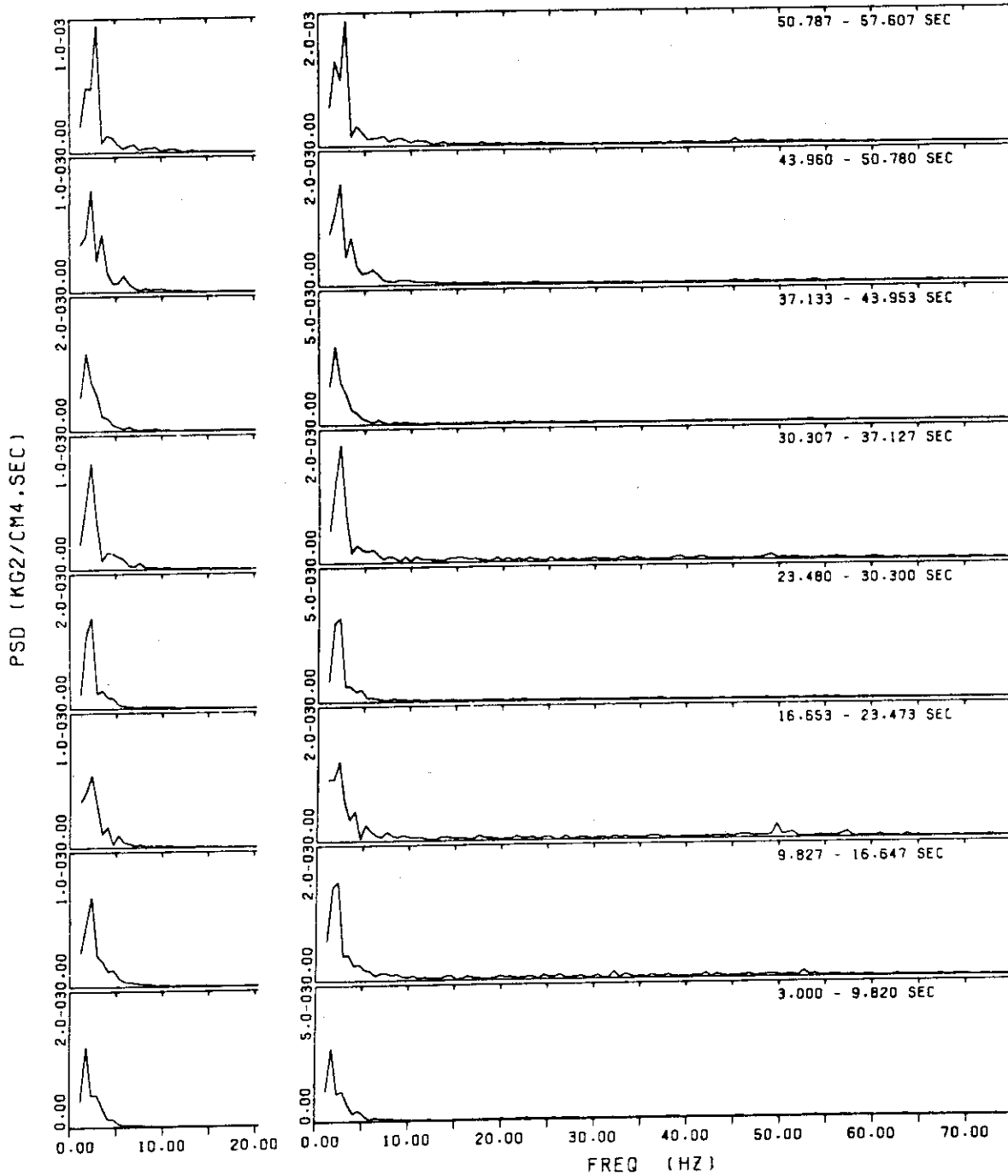


Fig. 4. 49 PSD functions, Case 04, Run 217

RUN 217
P10 : POOL BOTTOM

RESOLUTION = 0.5859 HZ
AVERAGED 4 TIMES

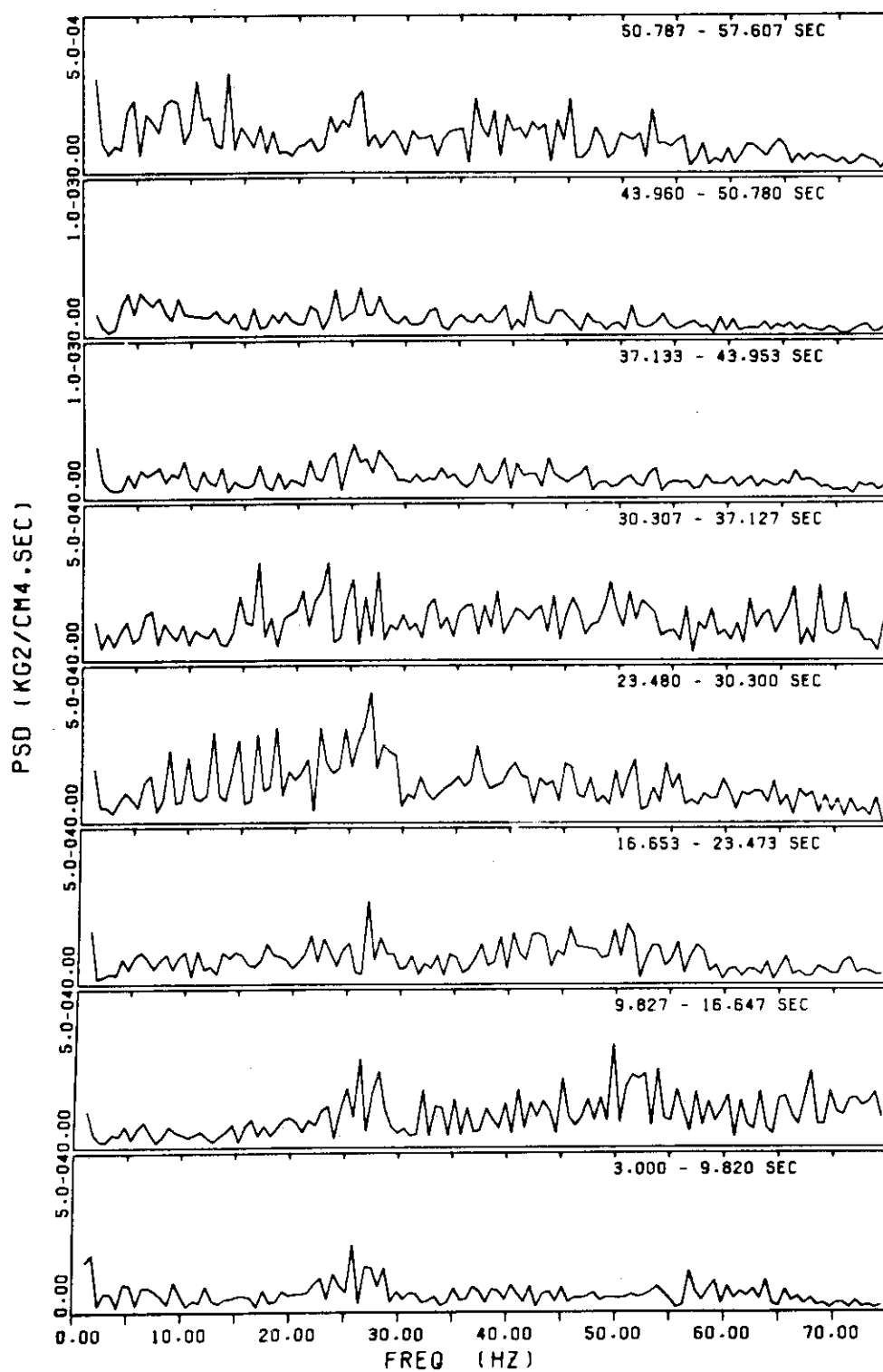


Fig. 4.50 PSD functions, Cae 04, Run 217

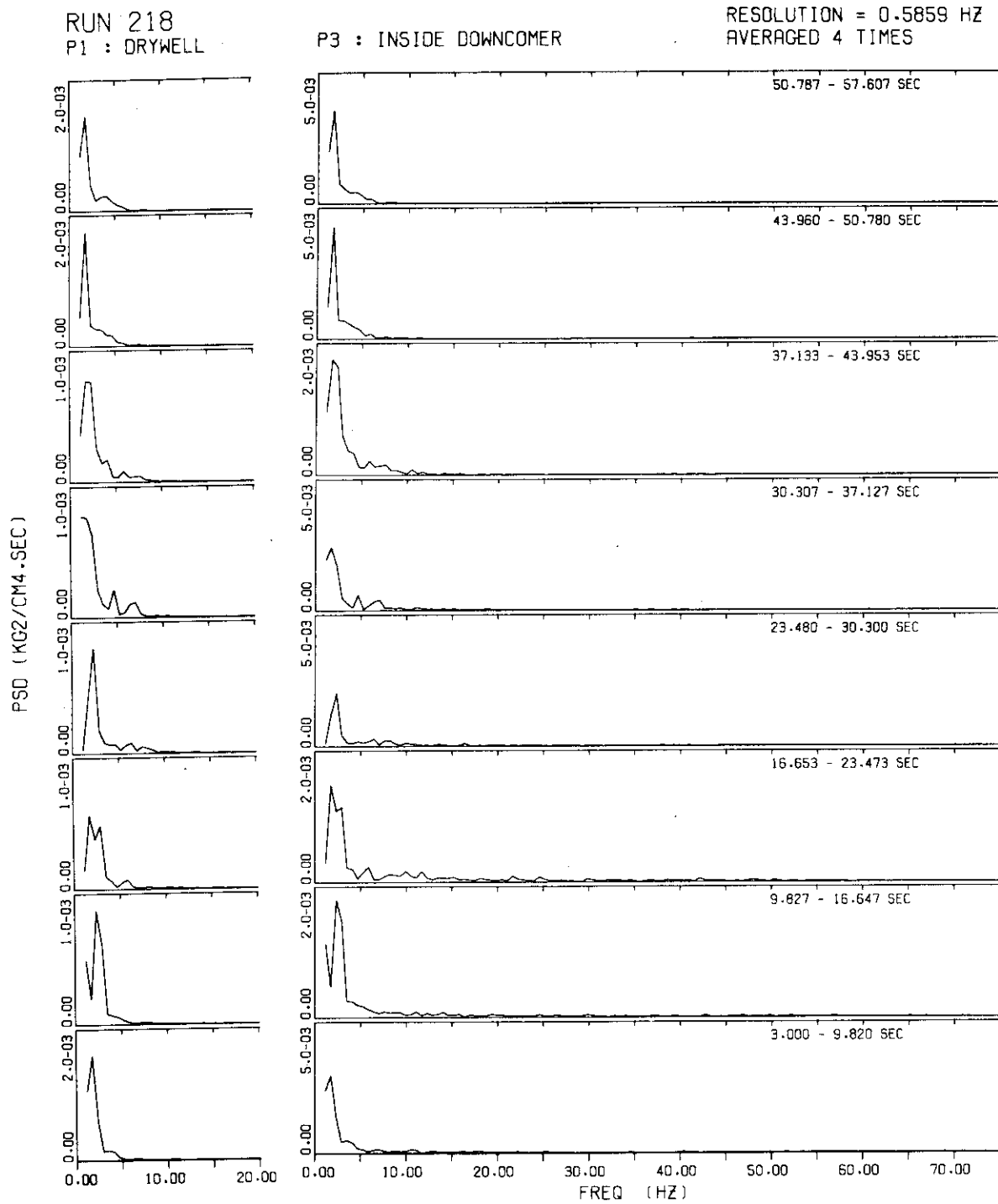


Fig. 4.51 PSD functions, Case 05, Run 218

RUN 218
P10 : POOL BOTTOM

RESOLUTION = 0.5859 HZ
AVERAGED 4 TIMES

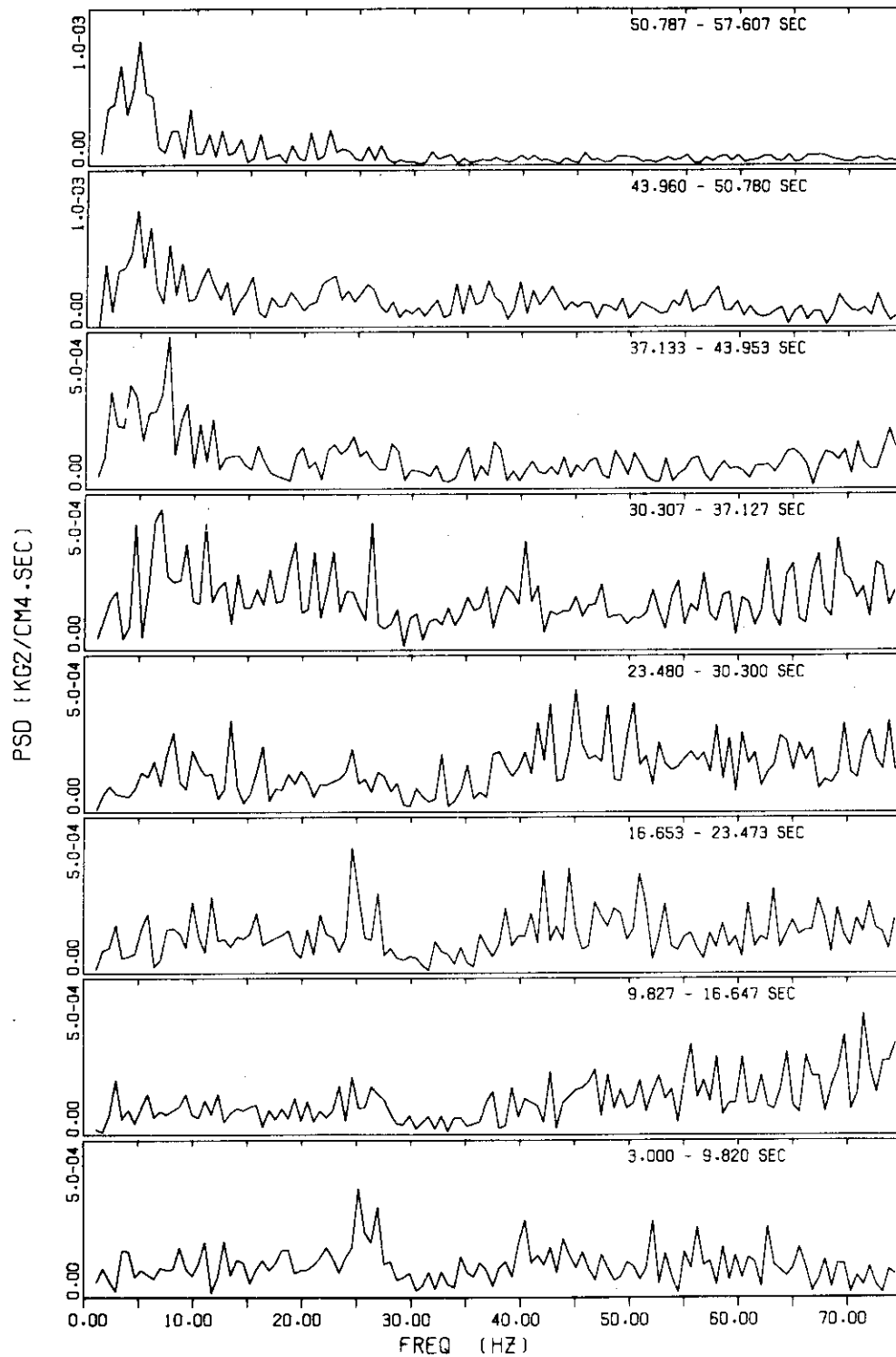


Fig. 4.52 PSD functions, Case 05, Run 218

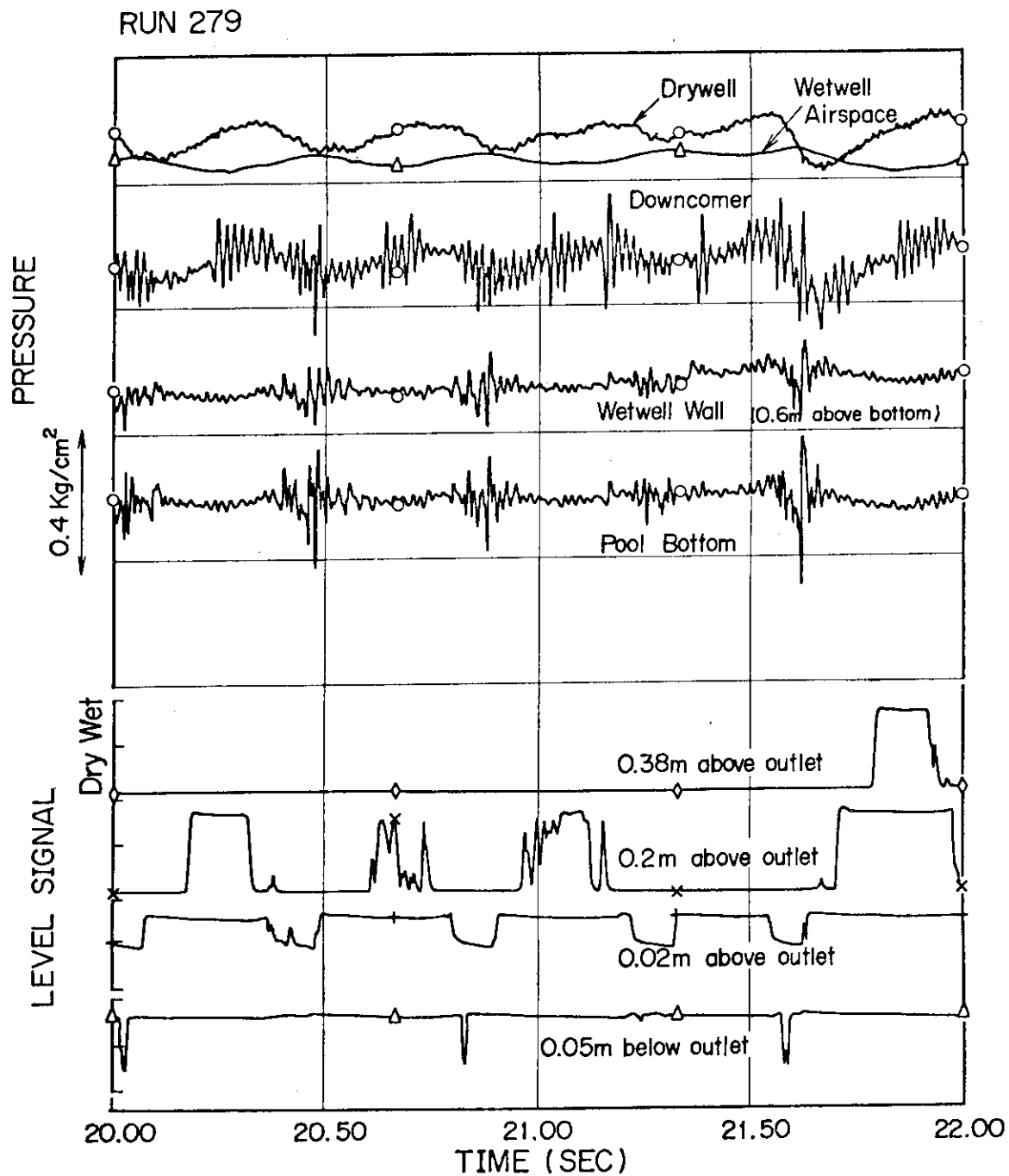


Fig. 4.53 Typical wave formes of pressures and water level signals, Case 06, Run 279

pool temp. = 48 deg. C

RUN 279
P1 : DRYWELL

P2 : WETWELL AIRSPACE

RESOLUTION = 0.5859 HZ
AVERAGED 4 TIMES

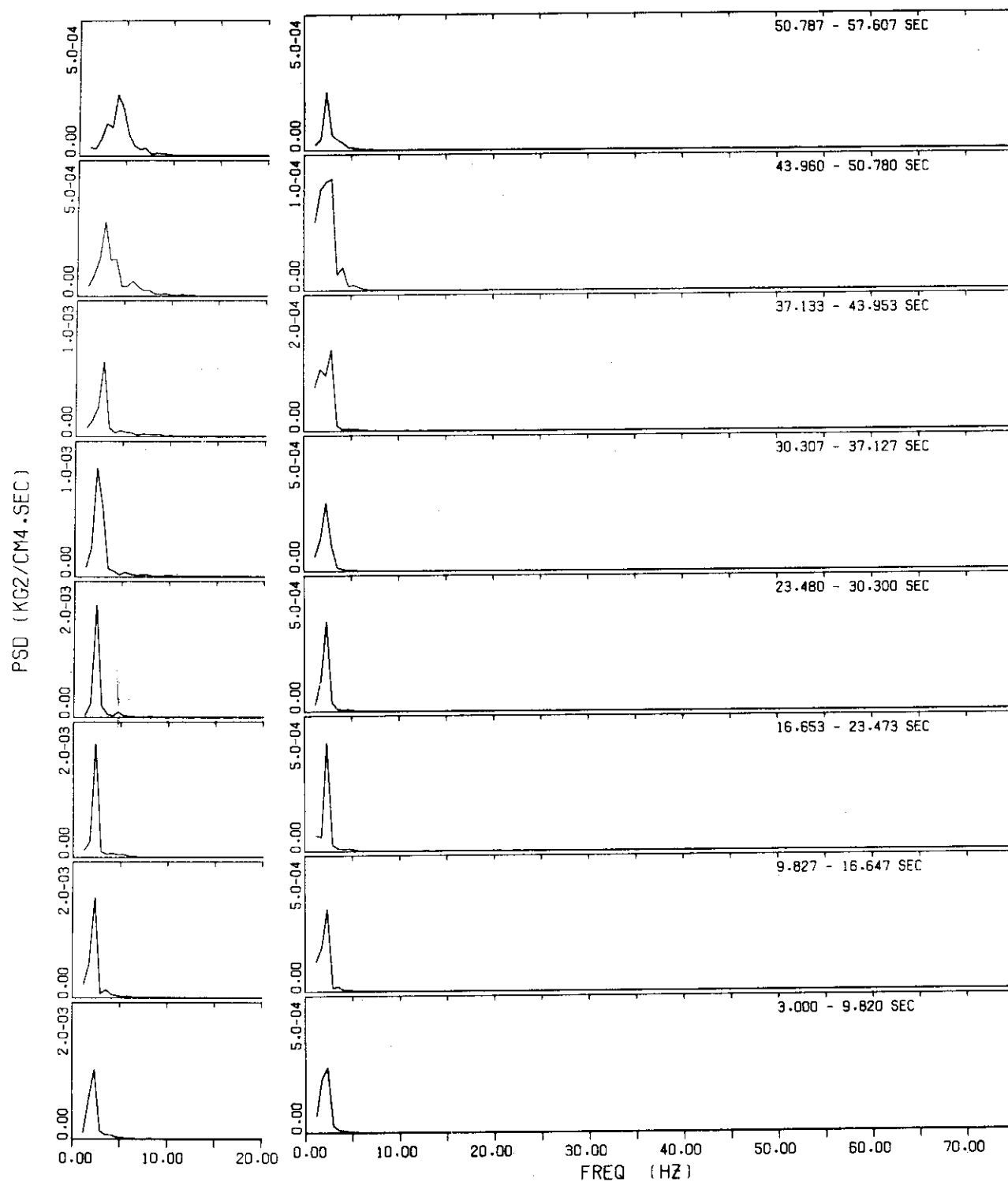


Fig. 4.54 PSD functions, Case 06, Run 279

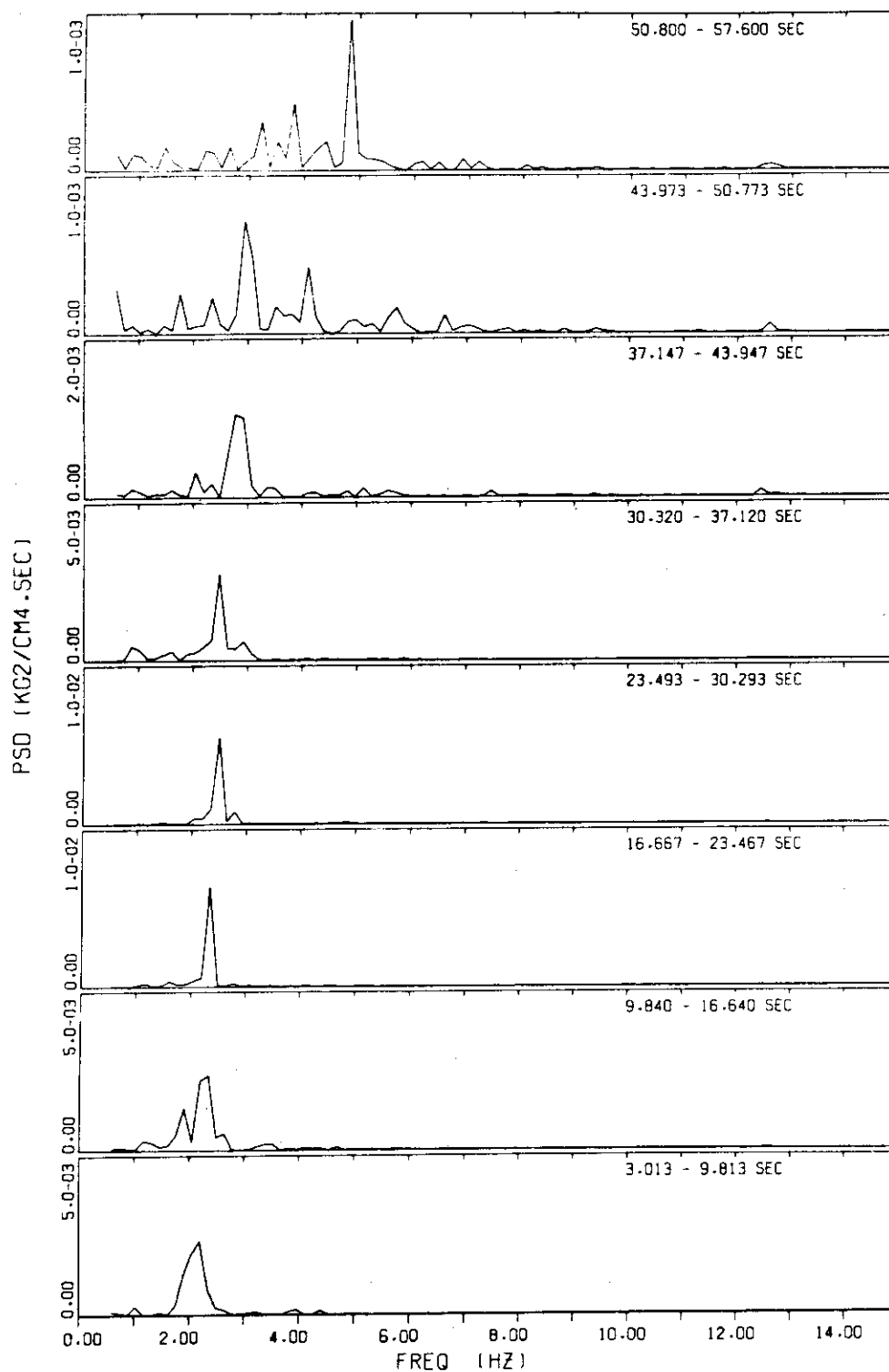
RUN 279
P1 : DRYWELLRESOLUTION = 0.1465 HZ
AVERAGED 1 TIMES

Fig. 4.54 (continued)

RUN 279
P4 : INSIDE DOWNCOMER

RESOLUTION = 0.5859 HZ
AVERAGED 4 TIMES

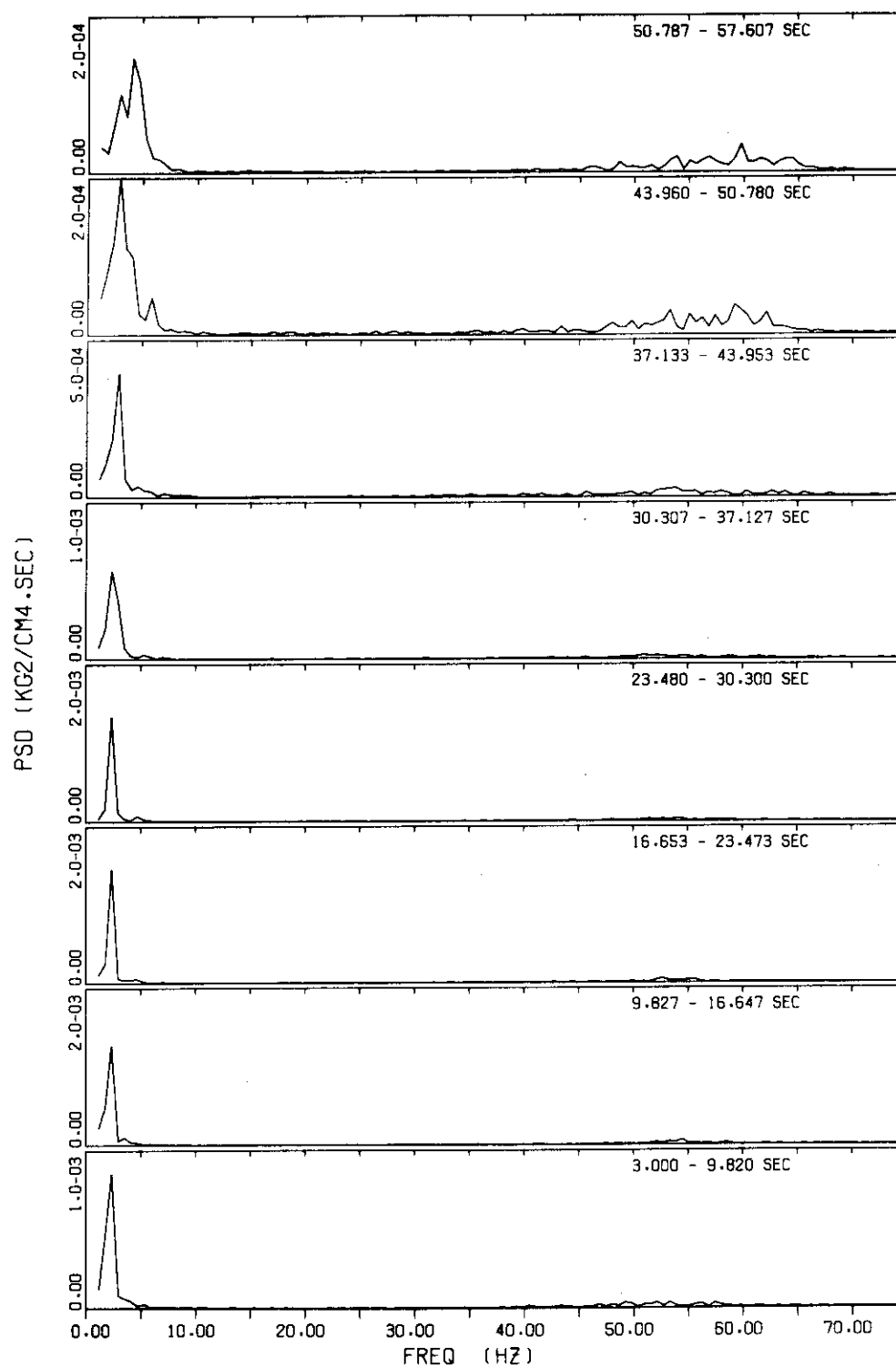


Fig. 4.55 PSD functions, Case 06, Run 279

RUN 279
P6 : WALL (EL = .6 M)

RESOLUTION = 0.5859 HZ
AVERAGED 4 TIMES

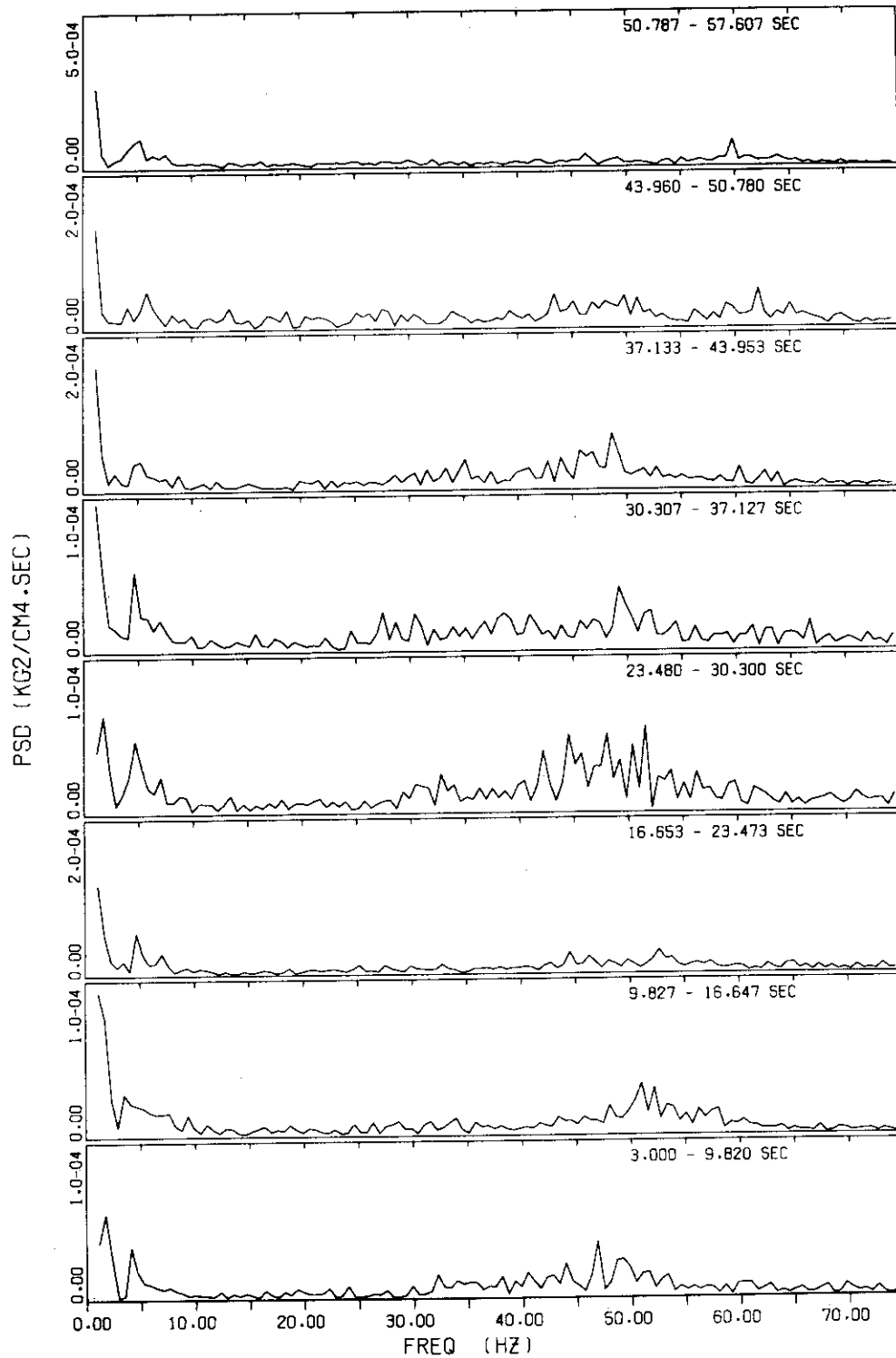


Fig. 4.56 PSD functions, Case 06, Run 279

RUN 279
P10 : POOL BOTTOM

RESOLUTION = 0.5859 HZ
AVERAGED 4 TIMES

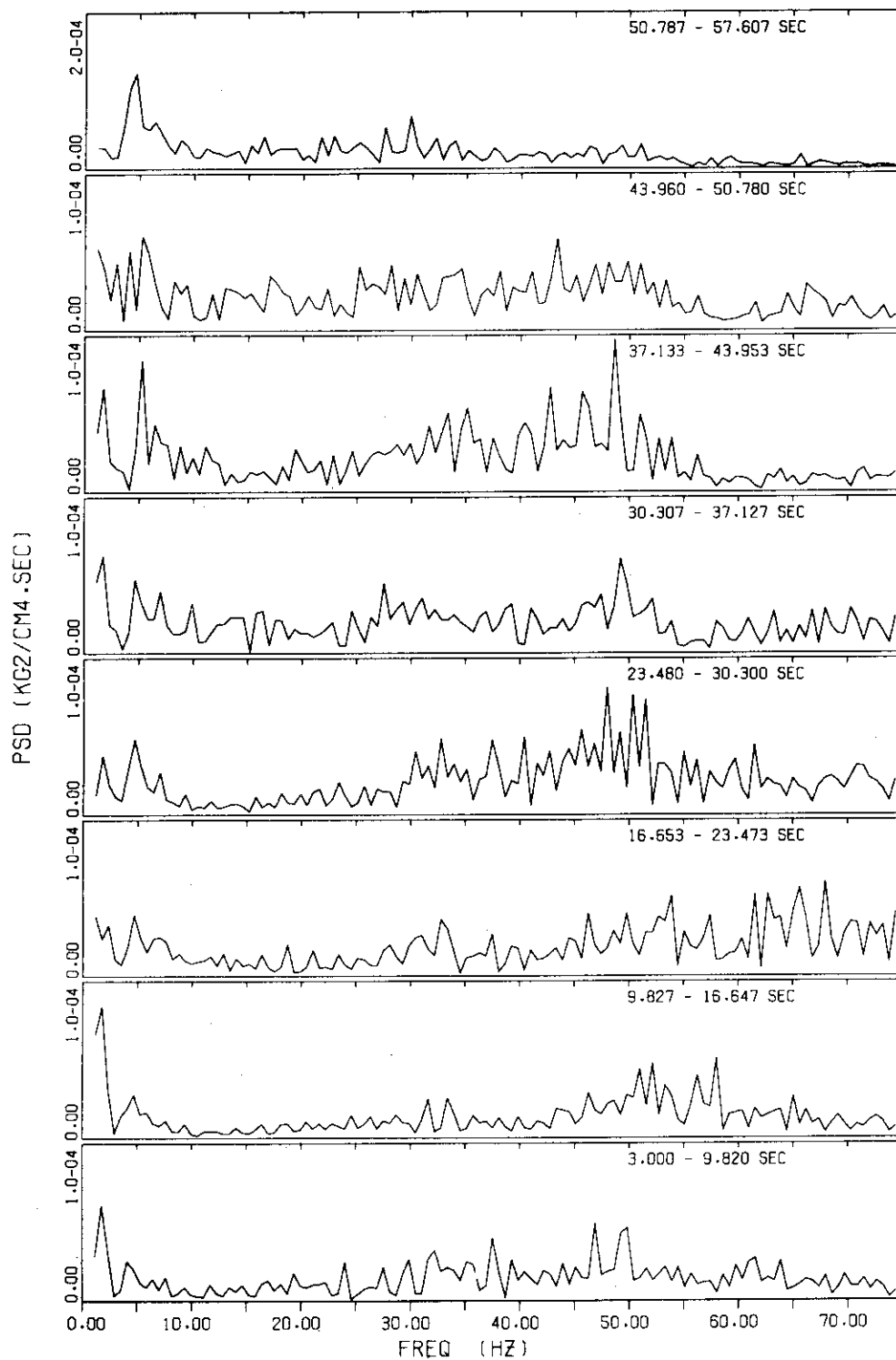


Fig. 4.57 PSD functions, Case 06, Run 279

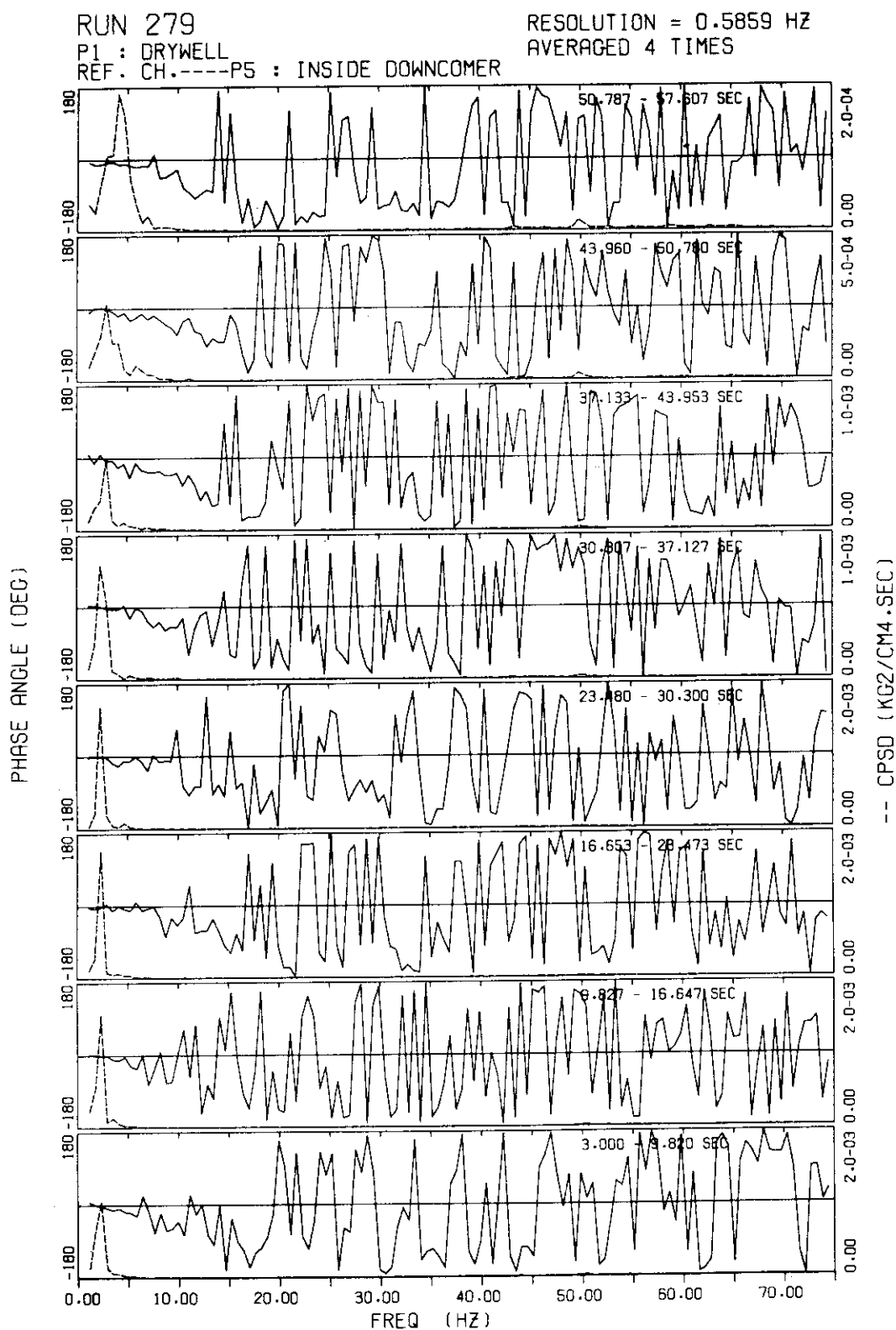


Fig. 4.58 Phase angles and CPSD functions, Case 06, Run 279

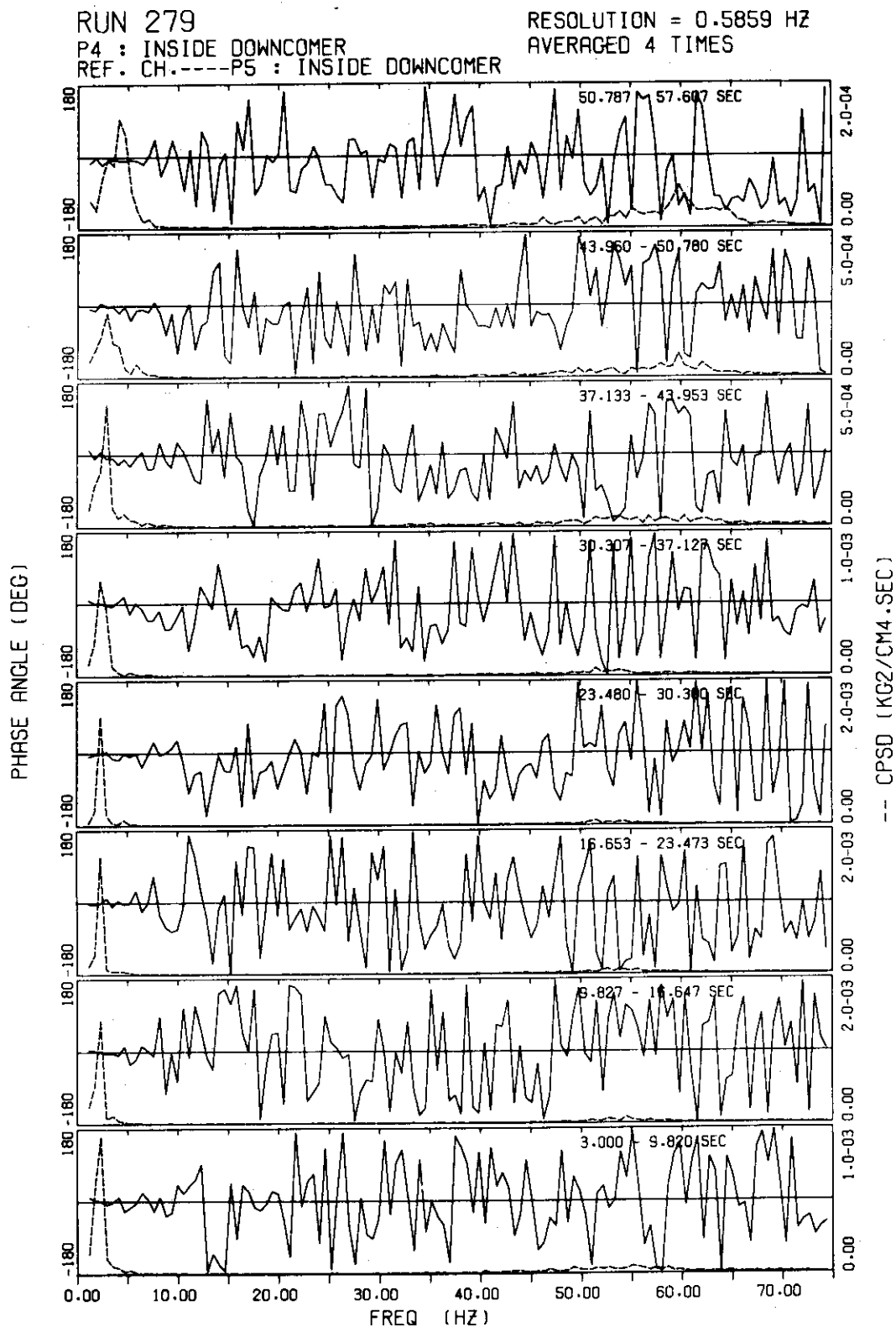


Fig. 4.59 Phase angles and CPSD functions, Case 06, Run 279

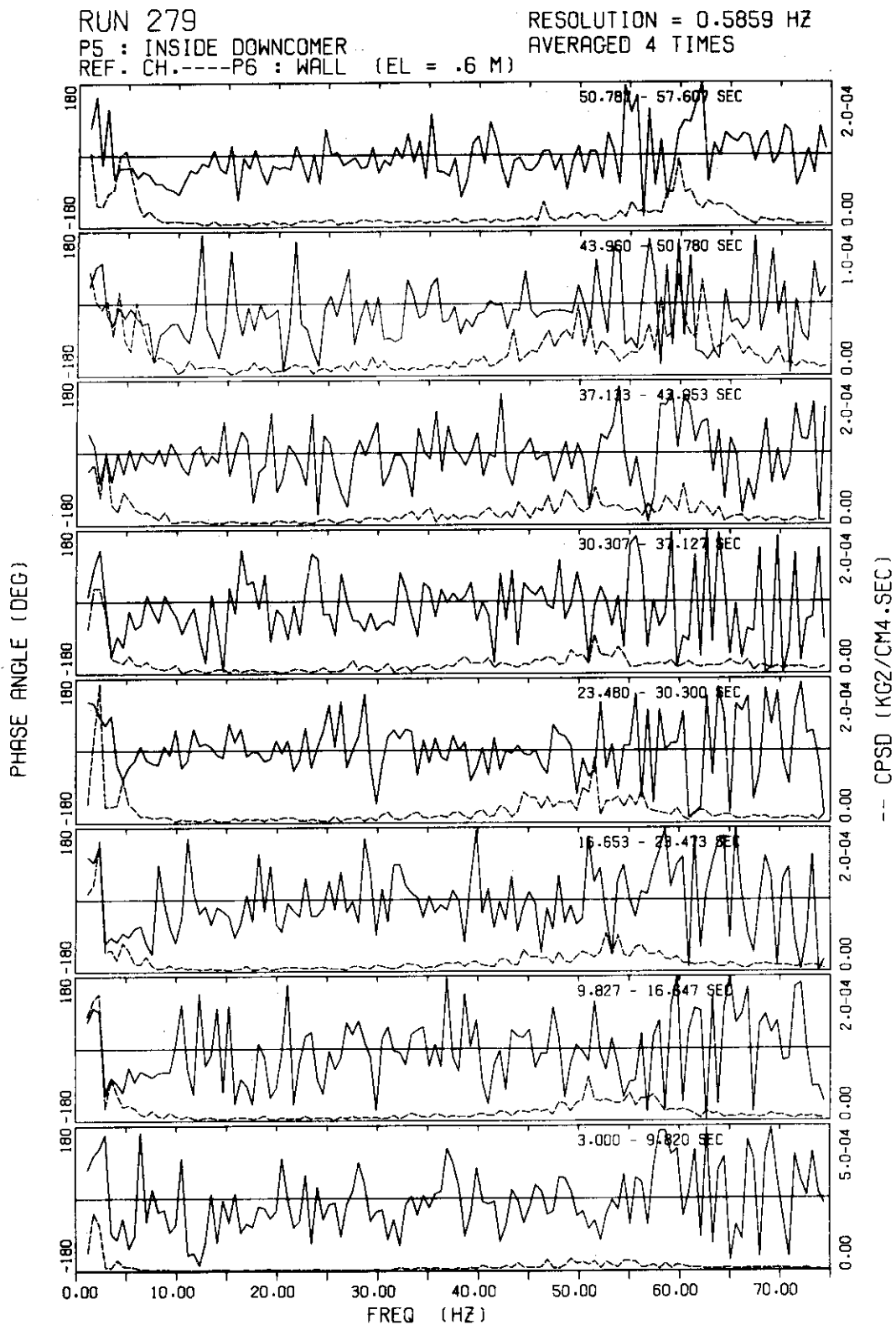


Fig. 4.60 Phase angles and CPSD functions, Case 06, Run 279

RUN 279

RESOLUTION = 0.5859 HZ

P8 : WALL (EL = .6 M)

AVERAGED 4 TIMES

REF. CH.----P6 : WALL (EL = .6 M)

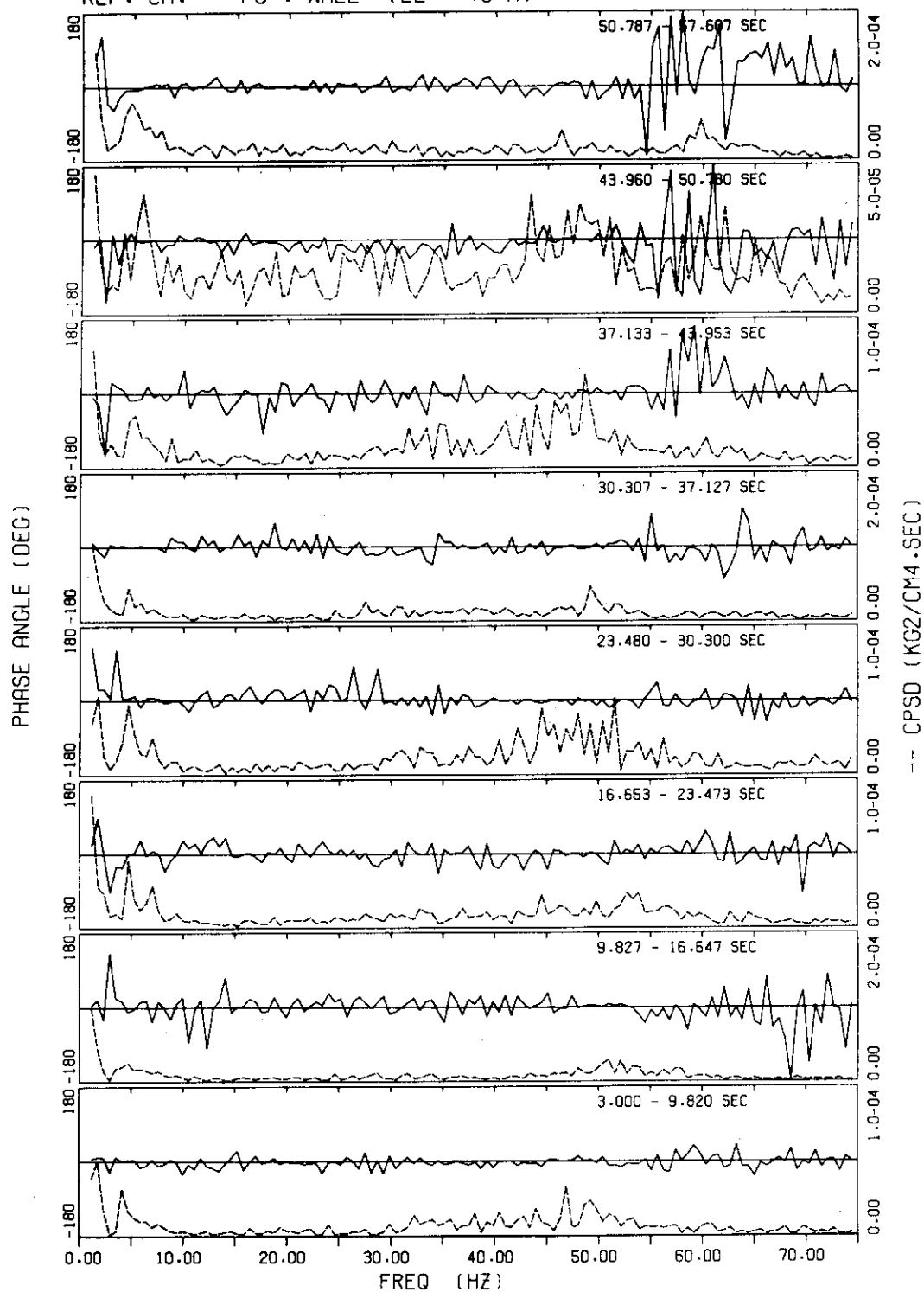


Fig. 4.61 Phase angles and CPSD functions, Case 06, Run 279

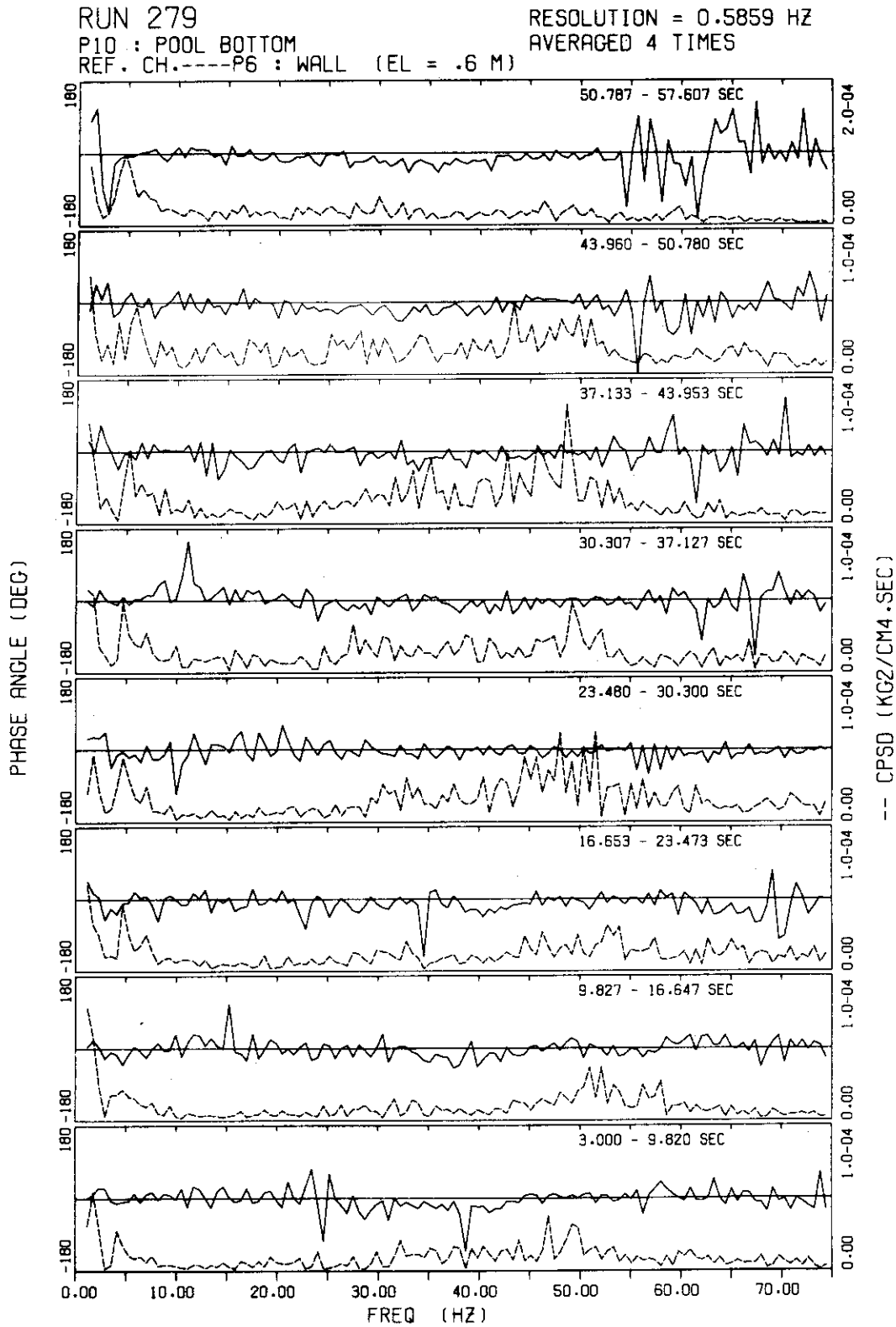


Fig. 4.62 Phase angles and CPSD functions, Case 06, Run 279

— 83 —

RUN 279
 P1 : DRYWELL
 REF. CH.----P5 : INSIDE DOWNCOMER

RESOLUTION = 0.5859 HZ
 AVERAGED 4 TIMES

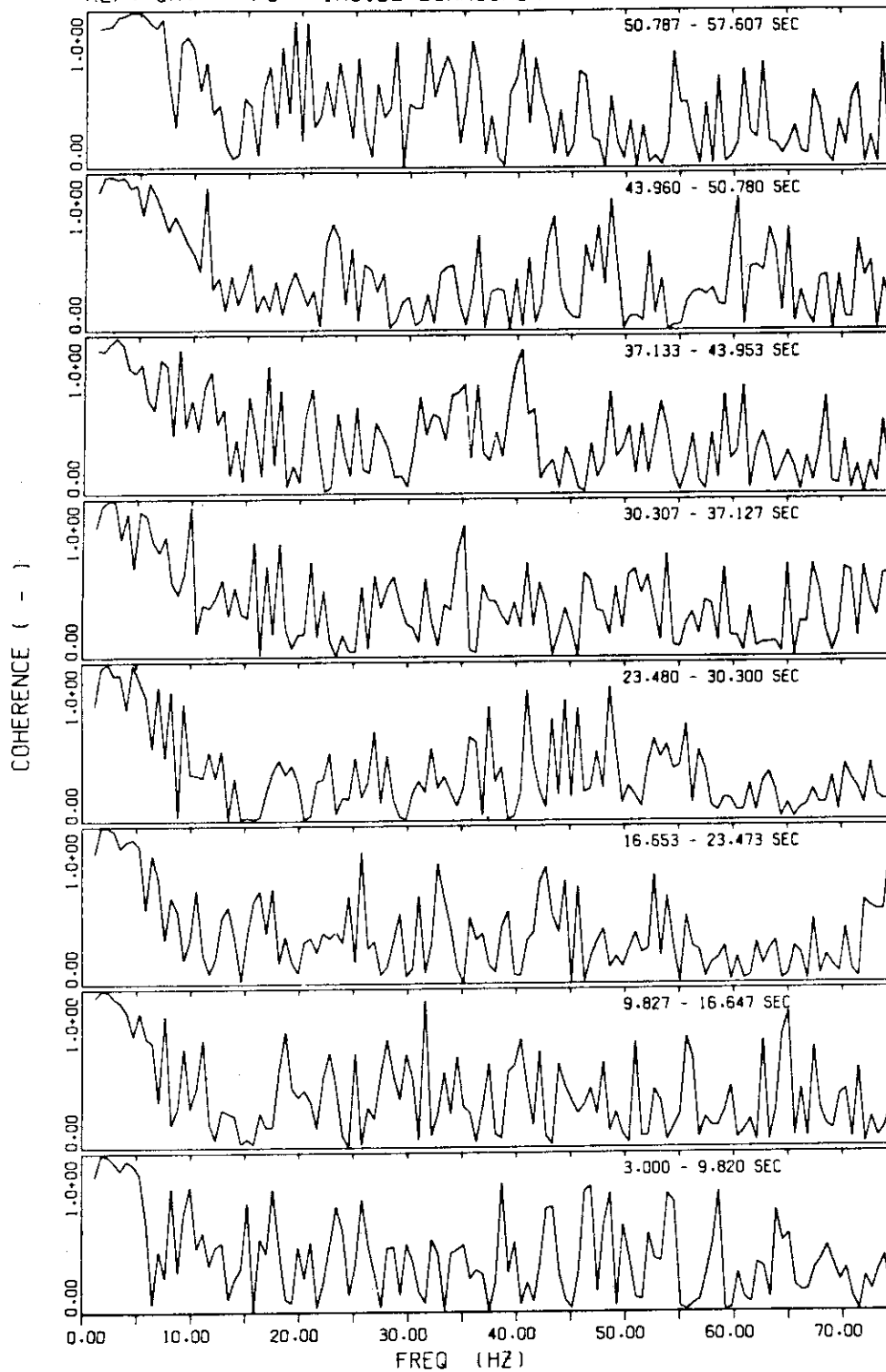


Fig. 4.64 Coherence functions, Case 06, Run 279

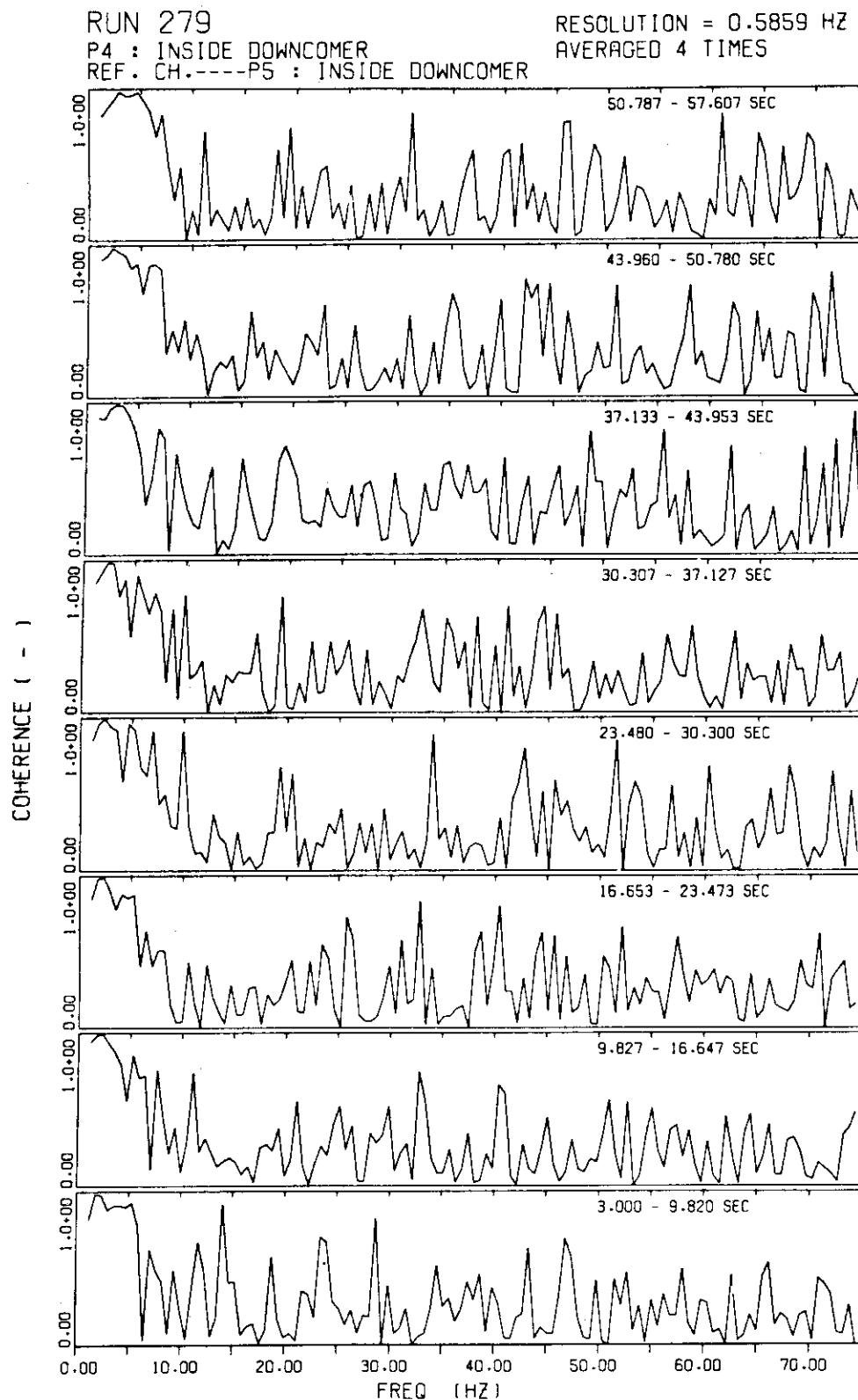


Fig. 4.65 Coherence functions, Case 06, Run 279

RUN 279

P5 : INSIDE DOWNCOMER

REF. CH.----P6 : WALL (EL = .6 M)

RESOLUTION = 0.5859 HZ

AVERAGED 4 TIMES

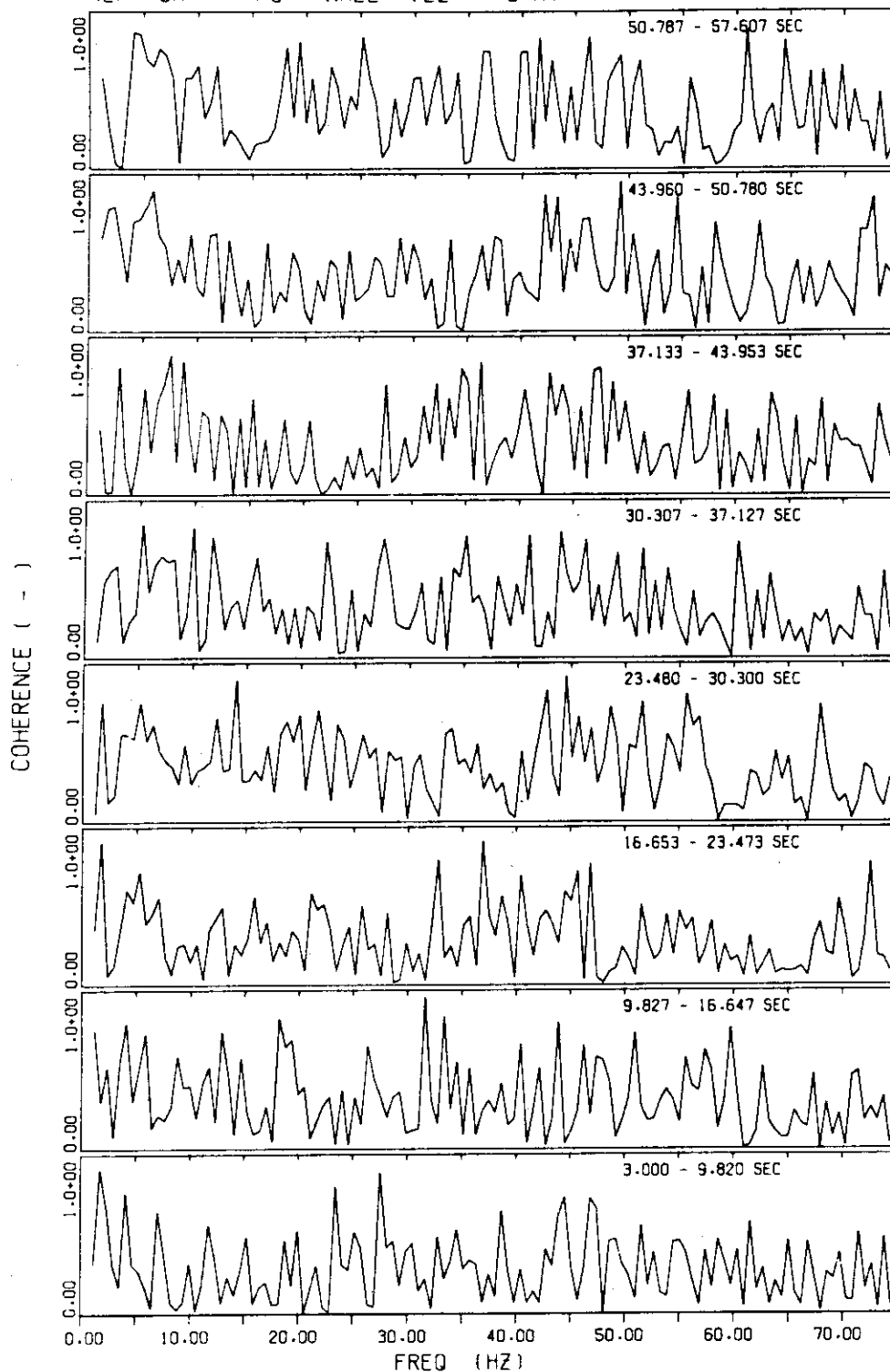


Fig. 4.66 Coherence functions, Case 06, Run 279

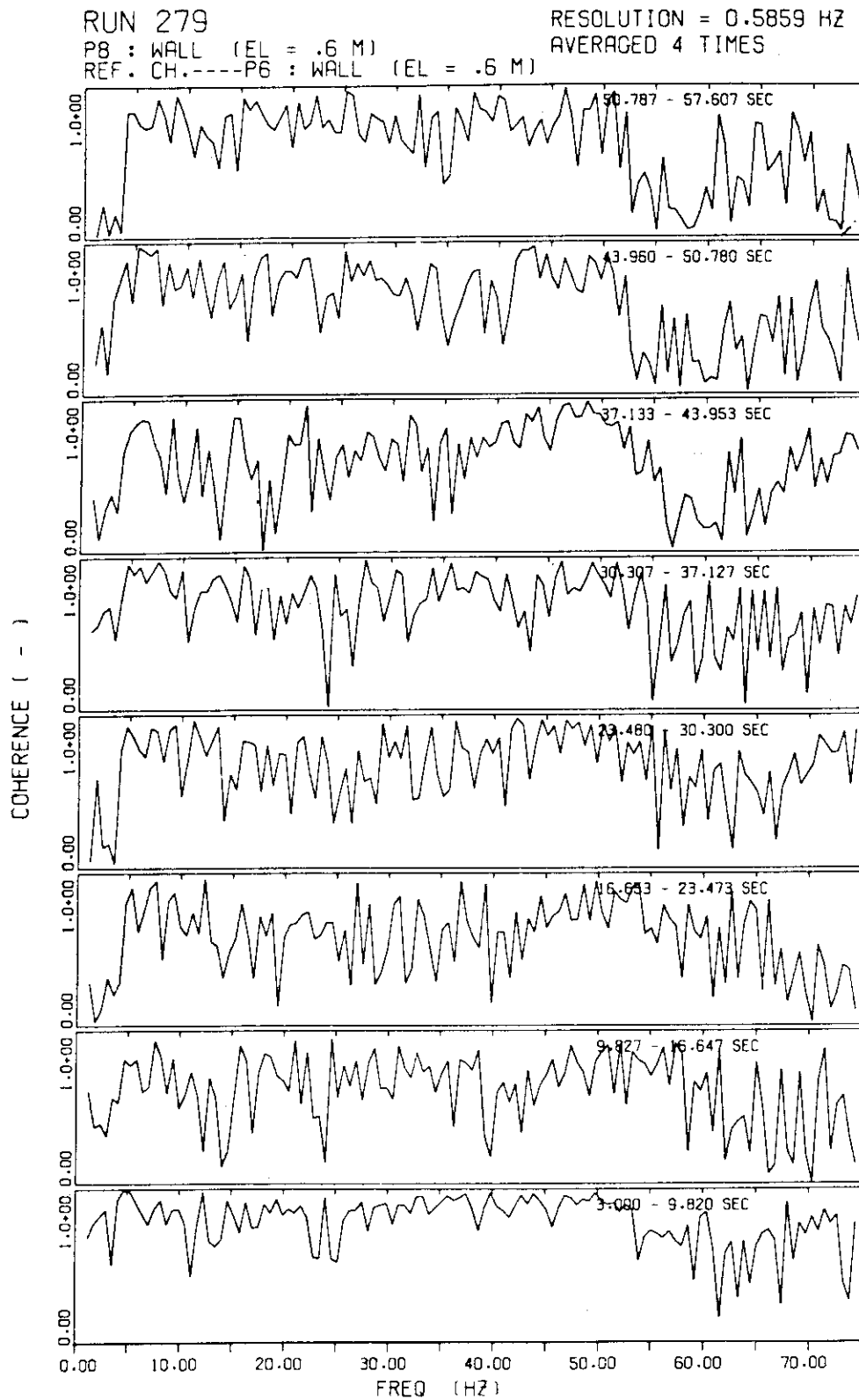


Fig. 4.67 Coherence functions, Case 06, Run 279

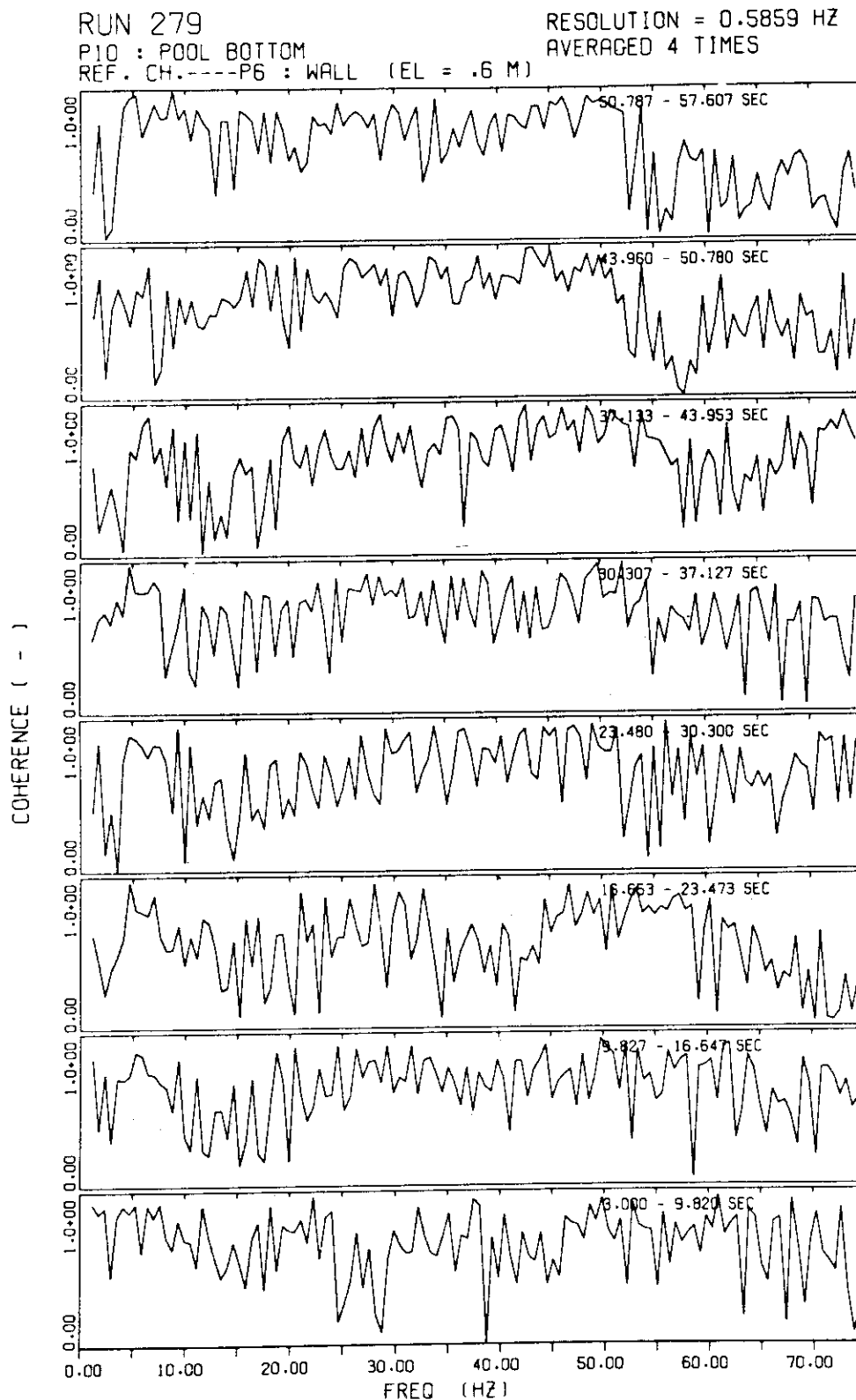


Fig. 4.68 Coherence functions, Case 06, Run 279

RUN 281
P1 : DRYWELL

P4 : INSIDE DOWNCOMER

RESOLUTION = 0.5859 HZ
AVERAGED 4 TIMES

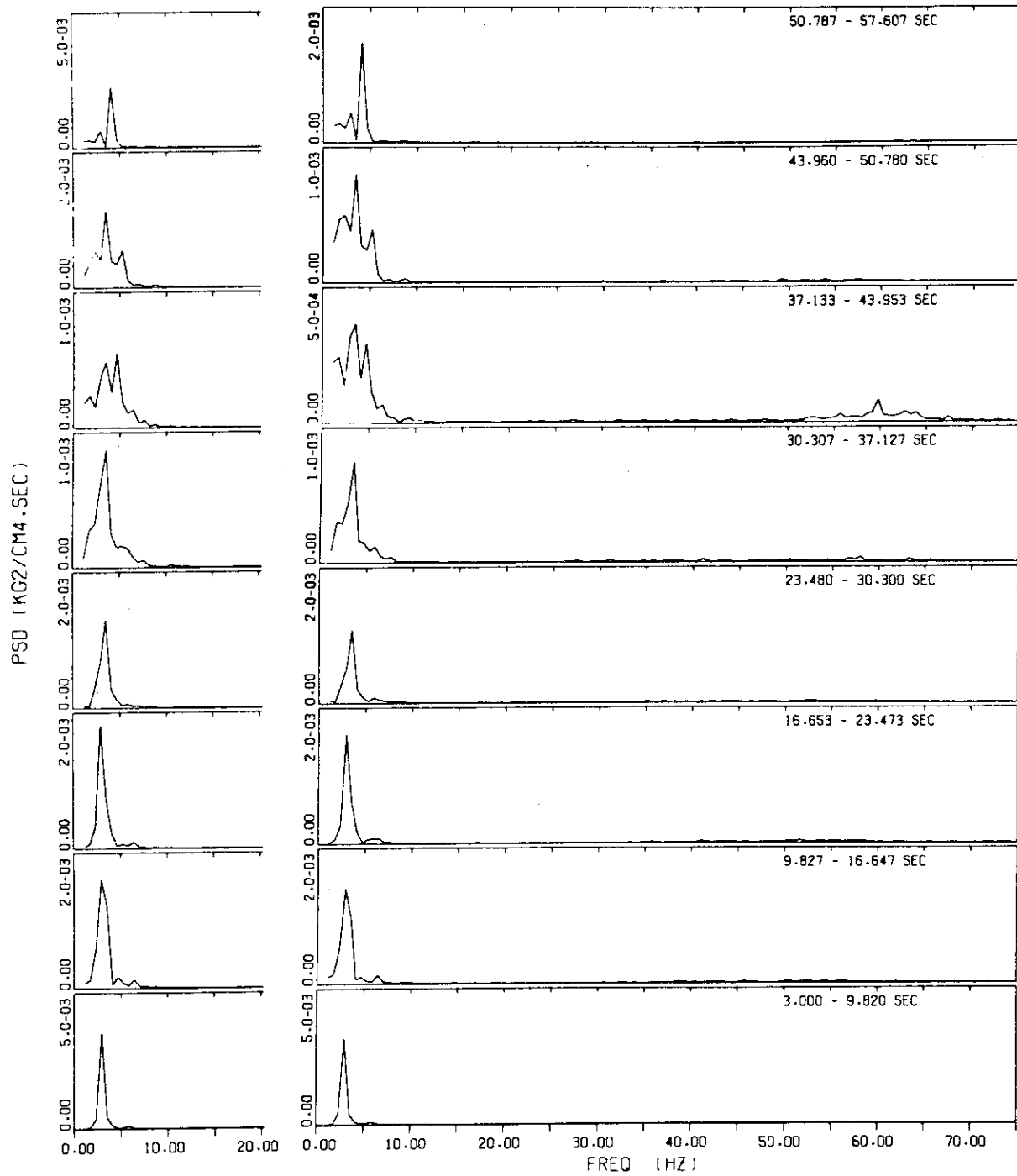


Fig. 4.69 PSD functions, Case 07, Run 281

RUN 281
P10 : POOL BOTTOM

RESOLUTION = 0.5859 HZ
AVERAGED 4 TIMES

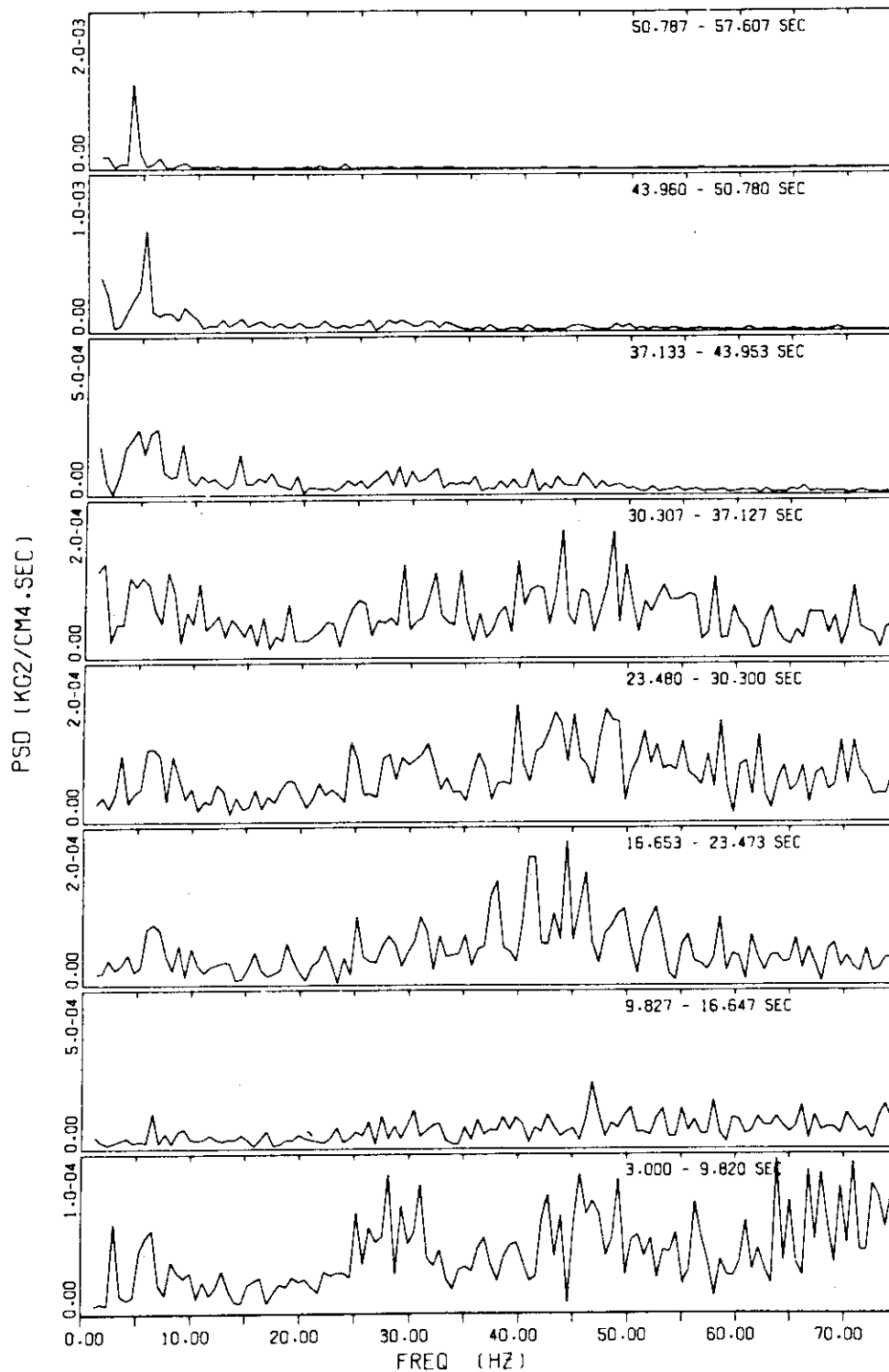


Fig. 4.70 PSD functions, Case 07, Run 281

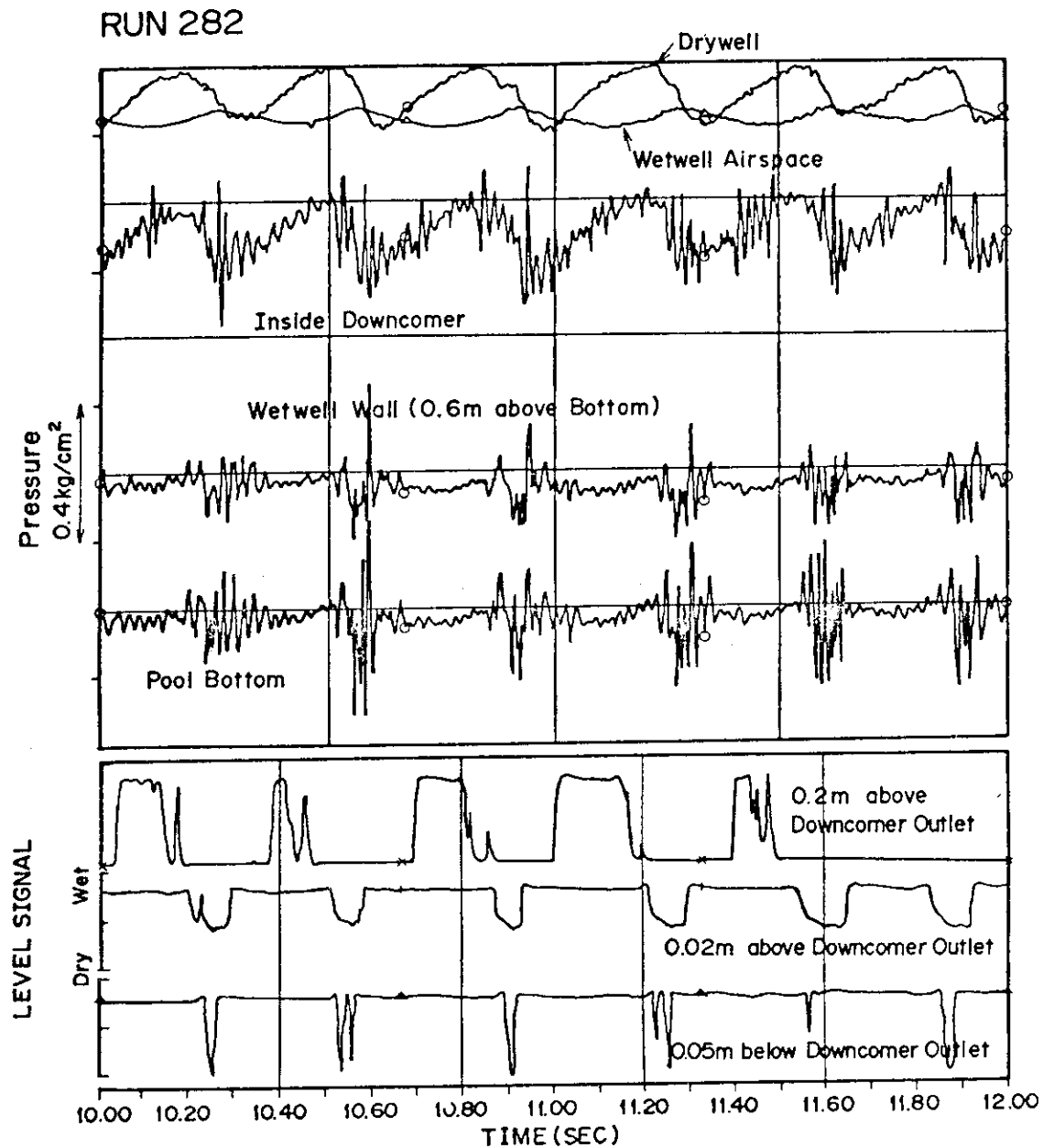


Fig. 4.71 Typical wave forms of pressures and water level signals, Case 08, Run 282

pool temp. = 48 deg. C

RUN 282
P1 : DRYWELL

P4 : INSIDE DOWNCOMER

RESOLUTION = 0.5859 HZ
AVERAGED 4 TIMES

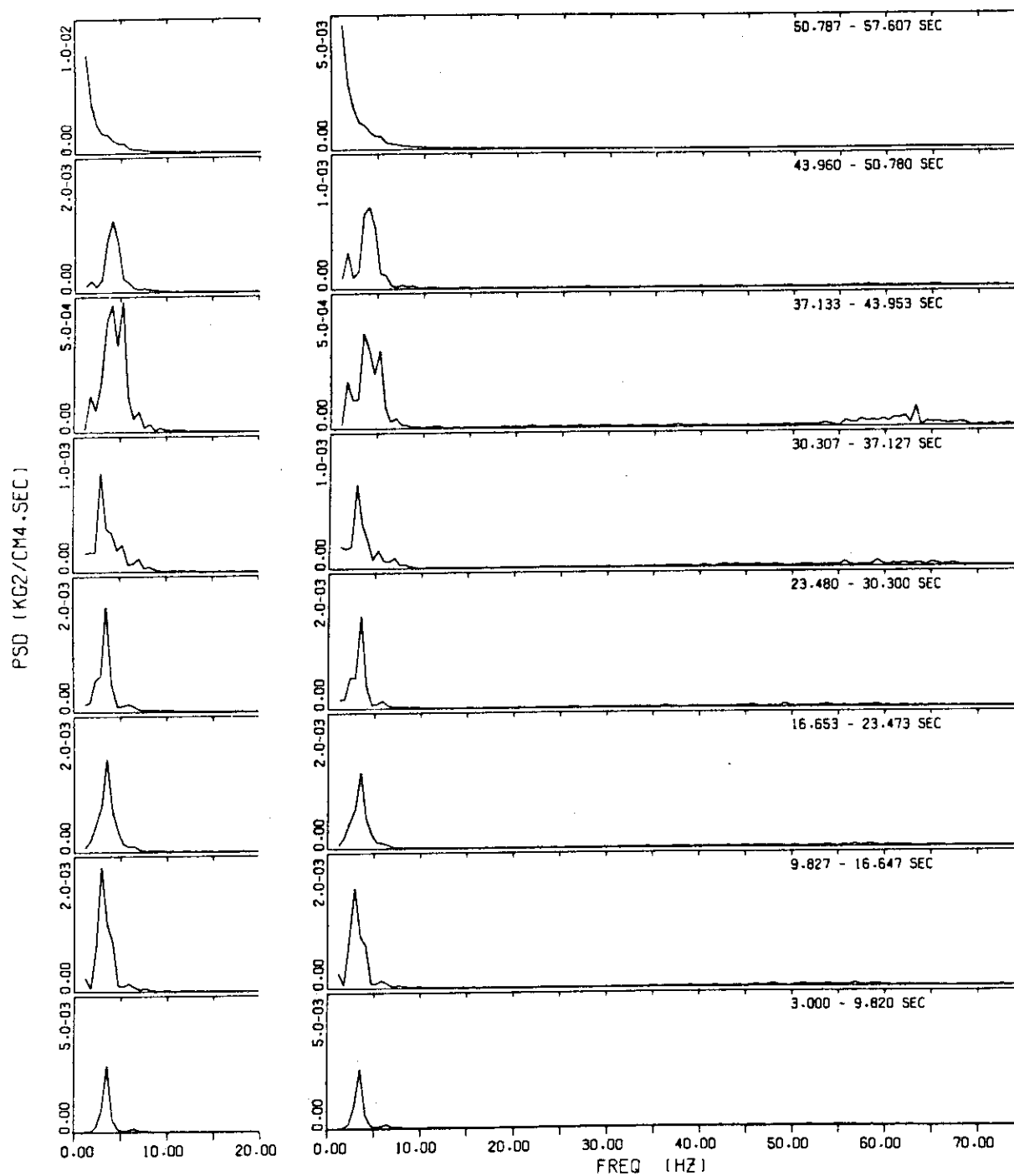


Fig. 4.72 PSD functions, Case 08, Run 282

RUN 282

P6 : WALL (EL = .6 M)

RESOLUTION = 0.5859 HZ

AVERAGED 4 TIMES

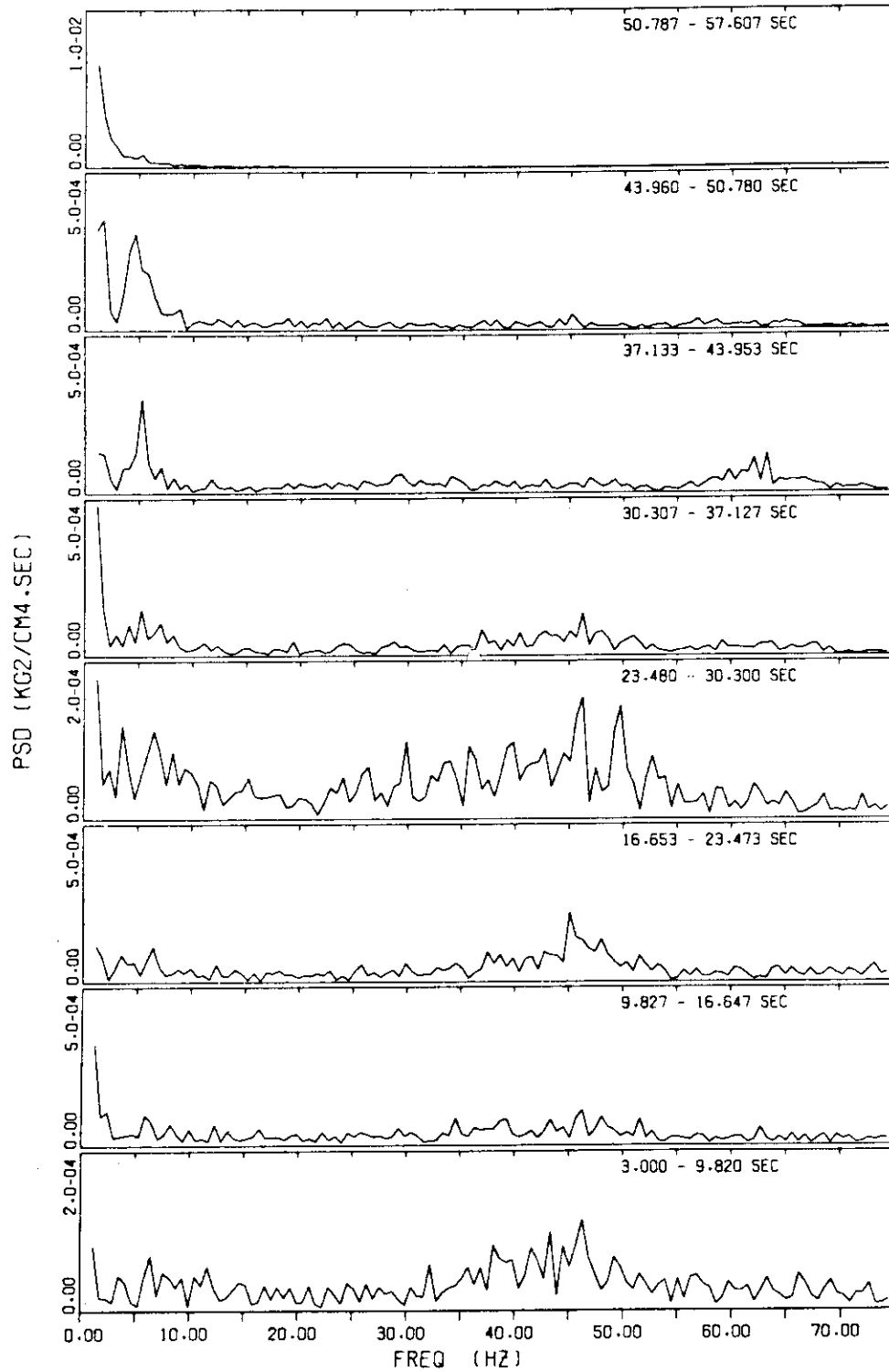


Fig. 4.73 PSD functions, Case 08, Run 282

RUN 282
P10 : POOL BOTTOM

RESOLUTION = 0.5859 HZ
AVERAGED 4 TIMES

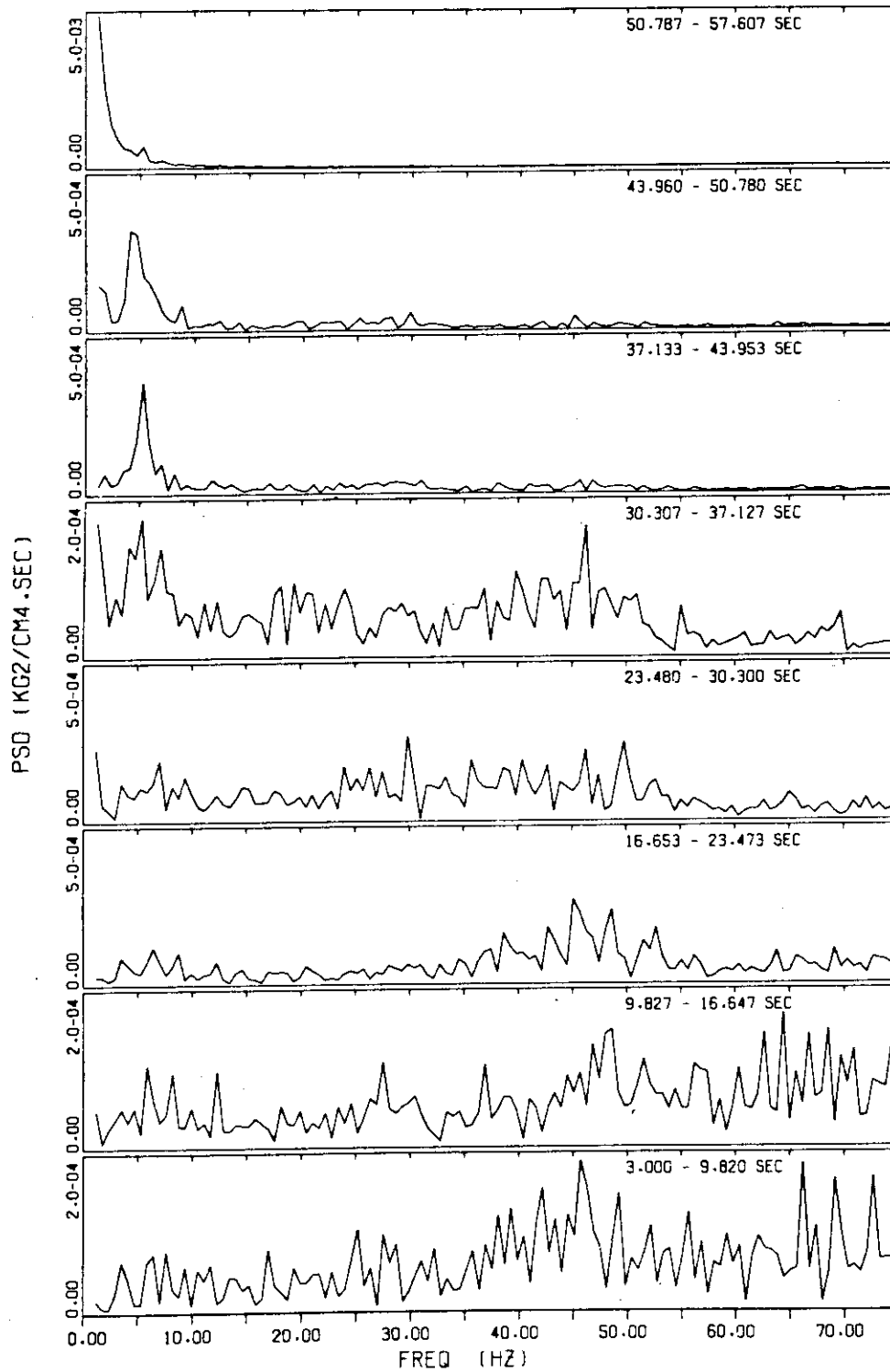


Fig. 4.74 PSD functions, Case 08, Run 282

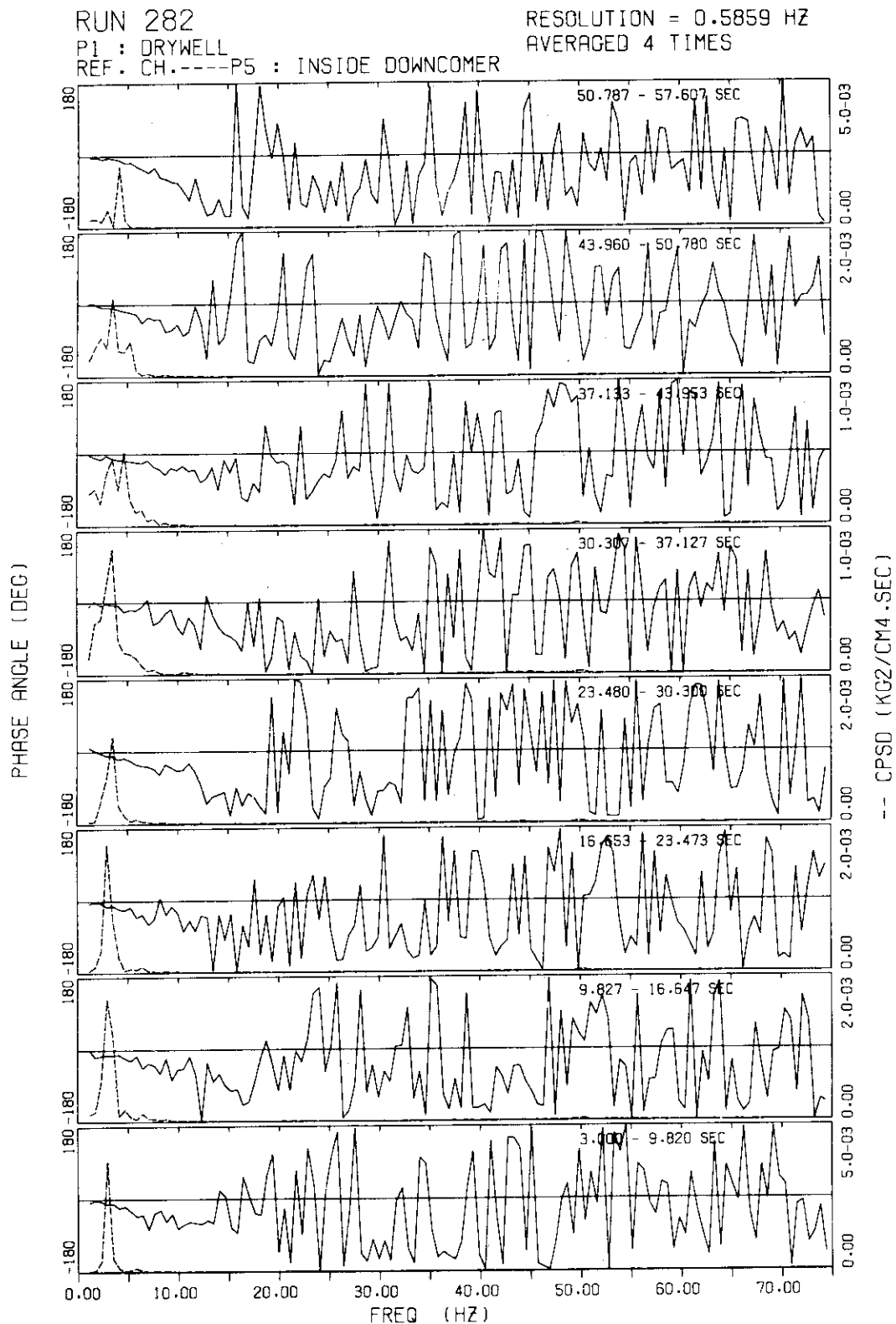


Fig. 4.75 Phase angles and CPSD functions, Case 08, Run 282

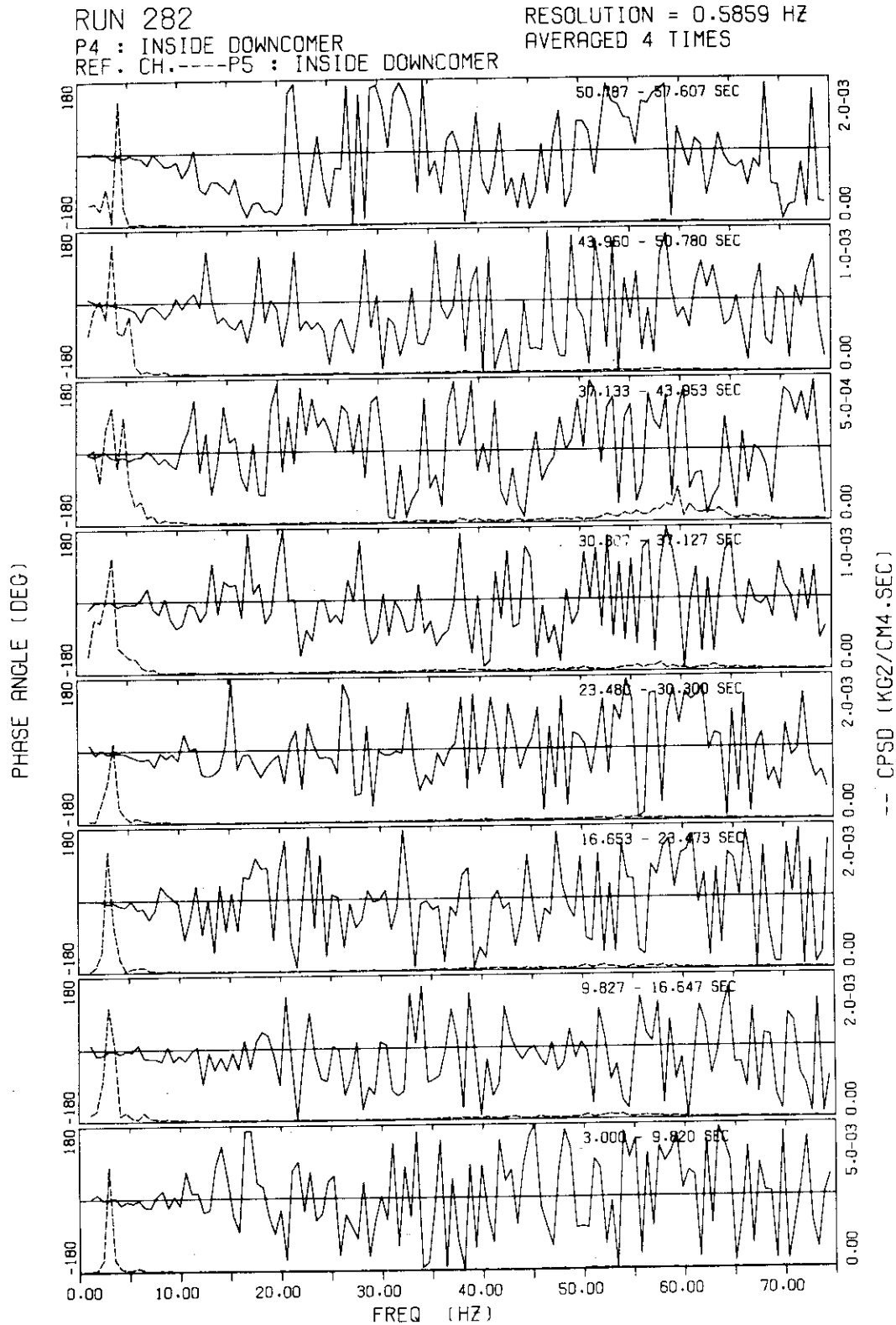


Fig. 4.76 Phase angles and CPSD functions, Case 08, Run 282

RUN 282

P5 : INSIDE DOWNCOMER

REF. CH. --- P6 : WALL (EL = .6 M)

RESOLUTION = 0.5859 HZ

AVERAGED 4 TIMES

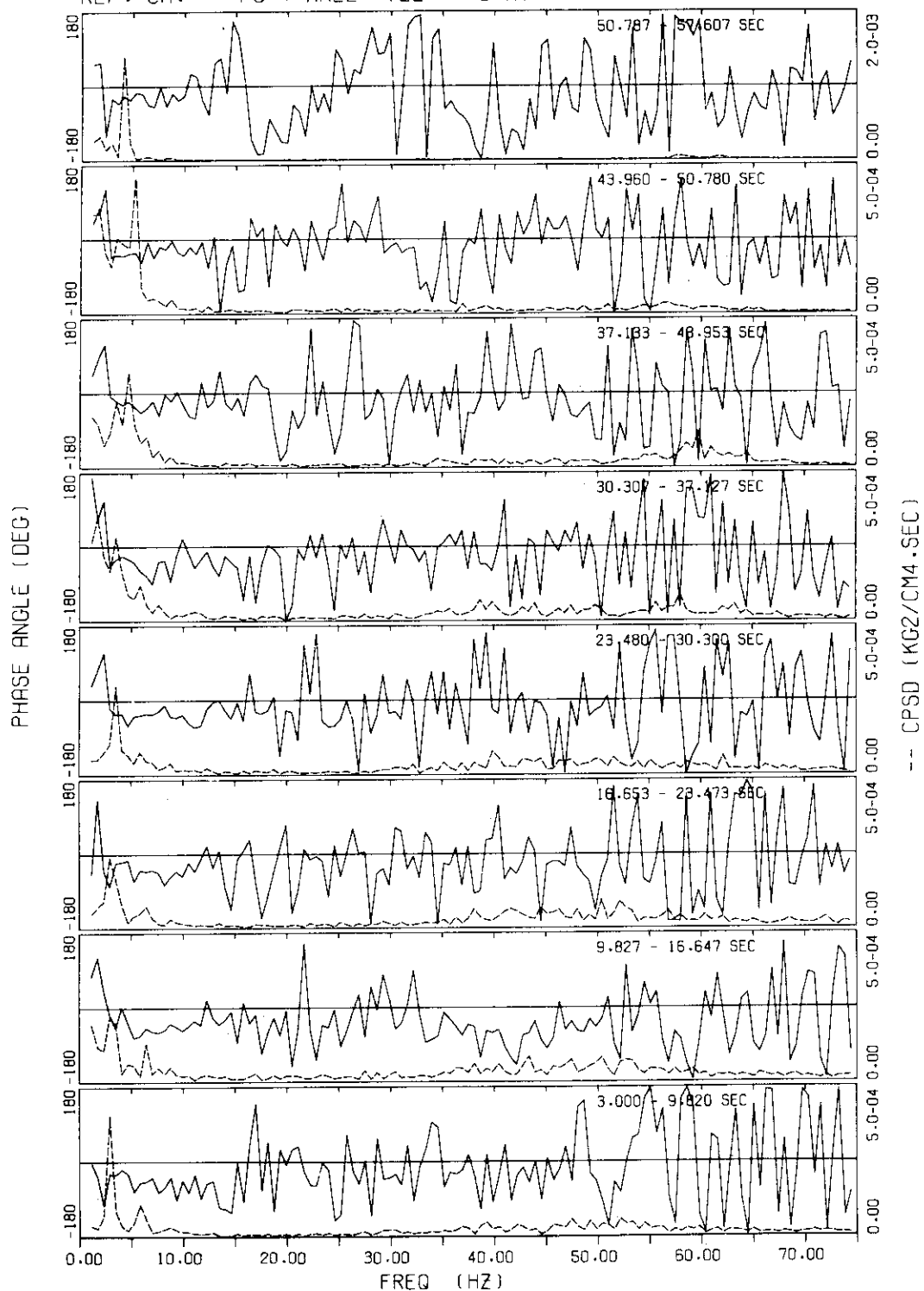


Fig. 4.77 Phase angles and CPSD functions, Case 08, Run 282

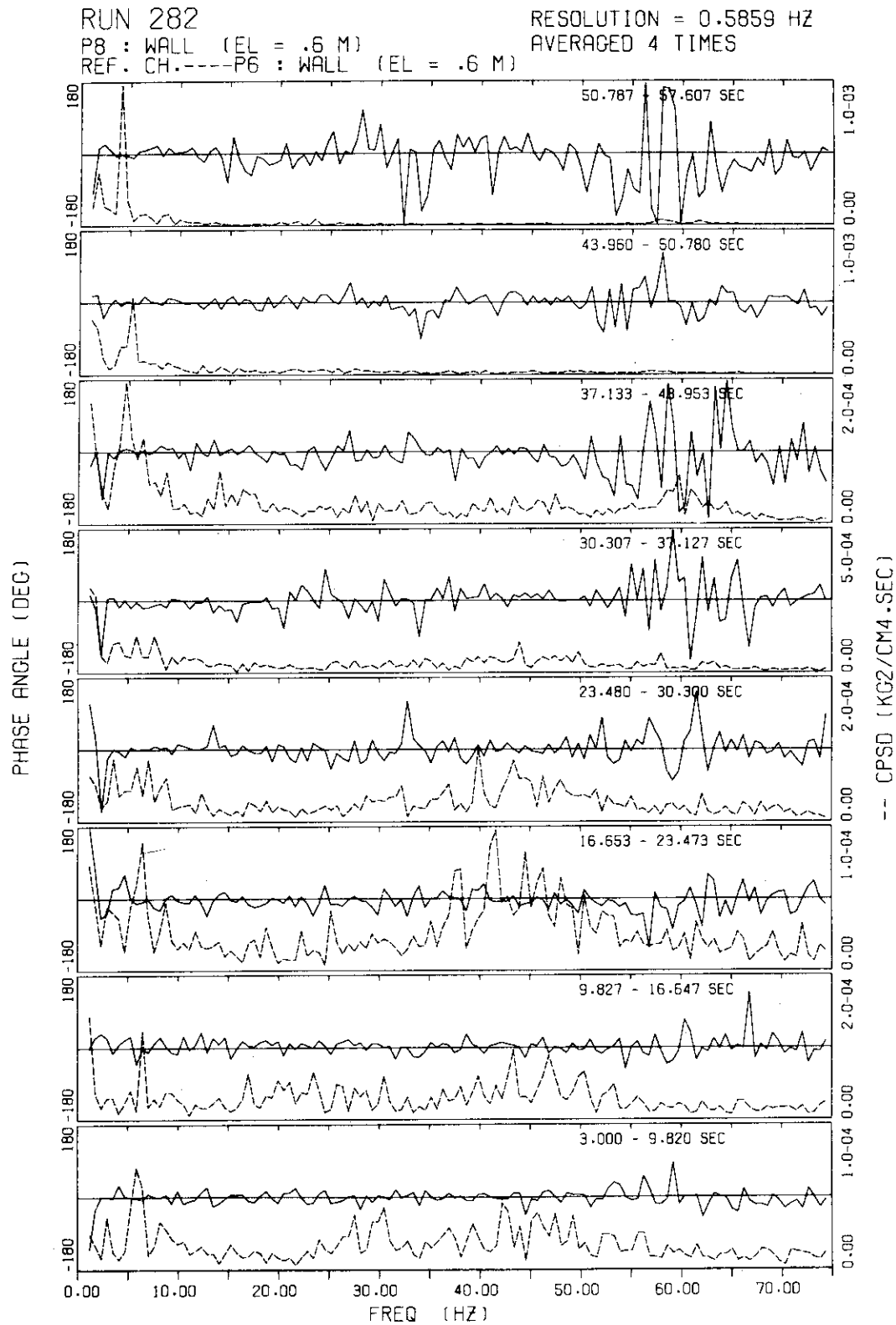


Fig. 4.78 Phase angles and CPSD functions, Case 08, Run 282

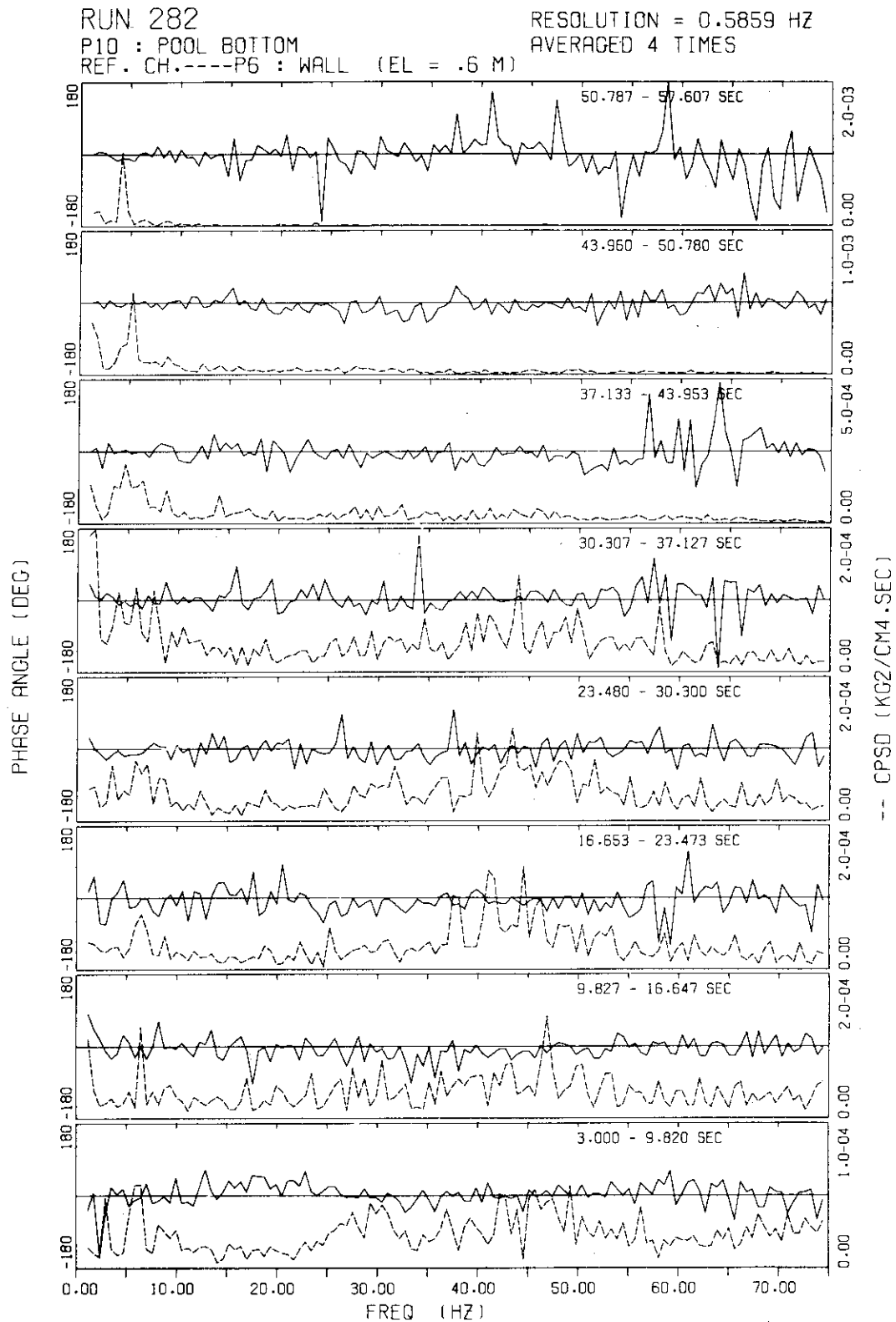


Fig. 4.79 Phase angles and CPSD functions, Case 08, Run 282

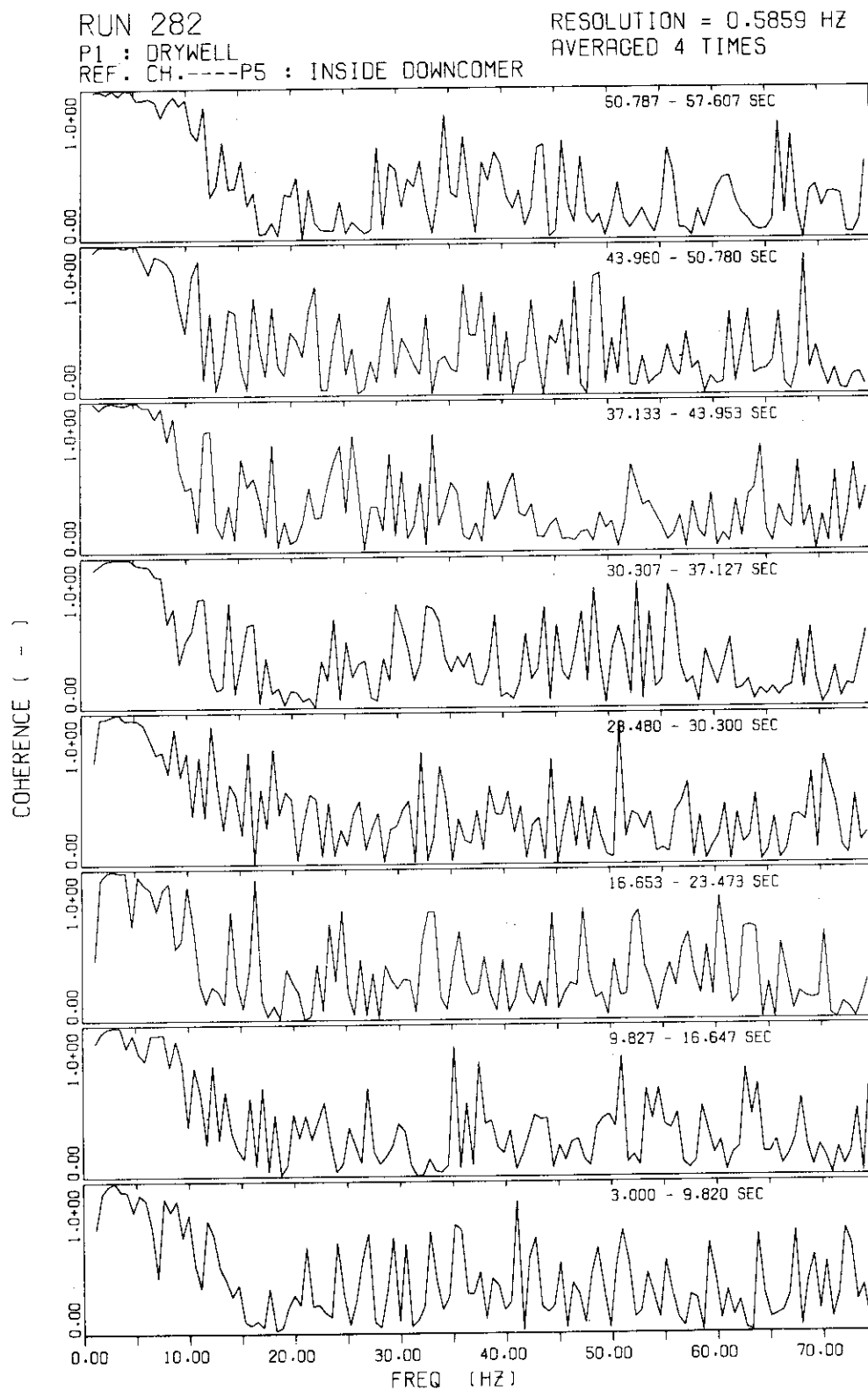


Fig. 4.80 Coherence functions, Case 08, Run 282

RUN 282

RESOLUTION = 0.5859 HZ

P4 : INSIDE DOWNCOMER

AVERAGED 4 TIMES

REF. CH.----P5 : INSIDE DOWNCOMER

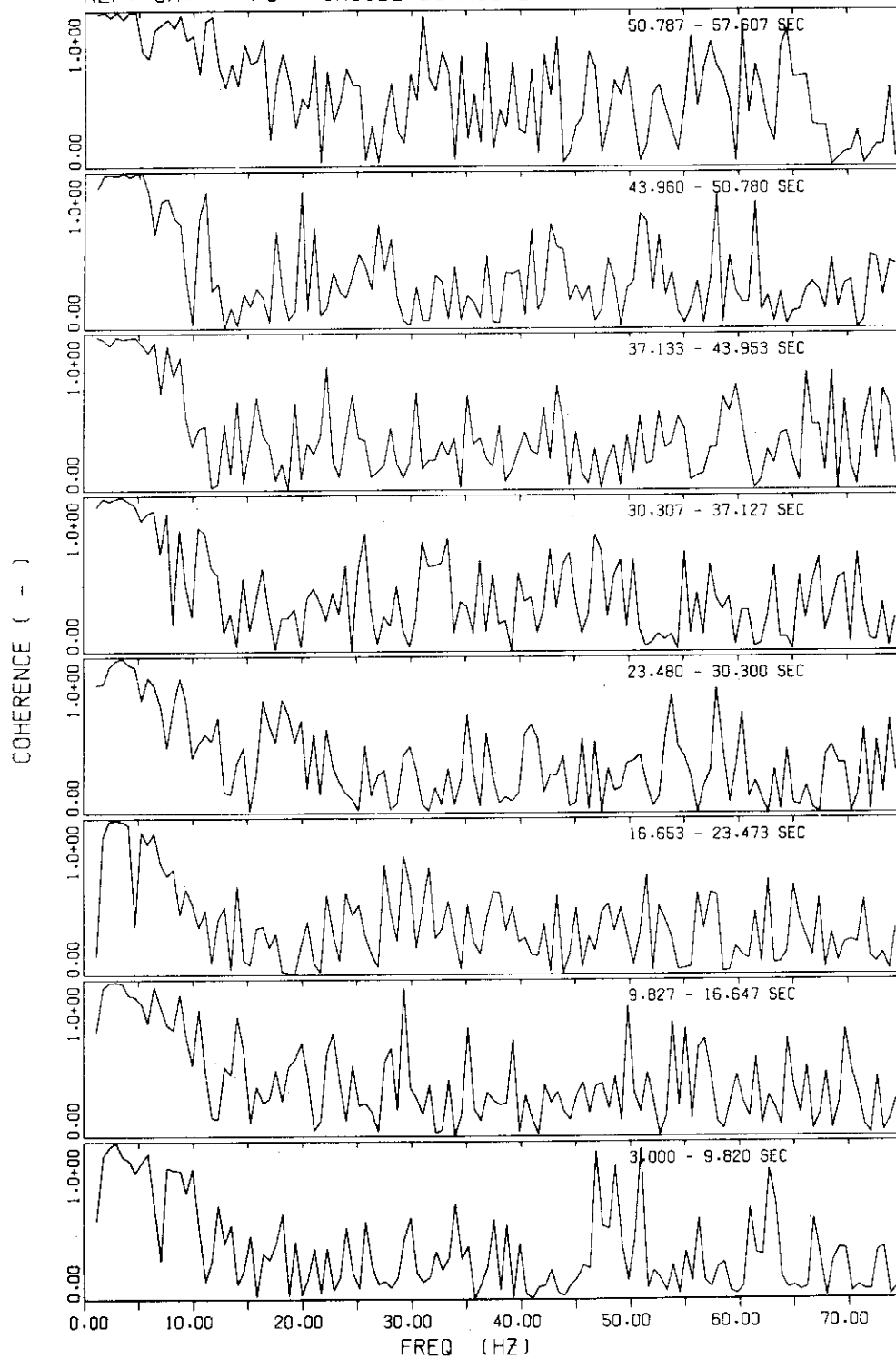


Fig. 4.81 Coherence functions, Case 08, Run 282

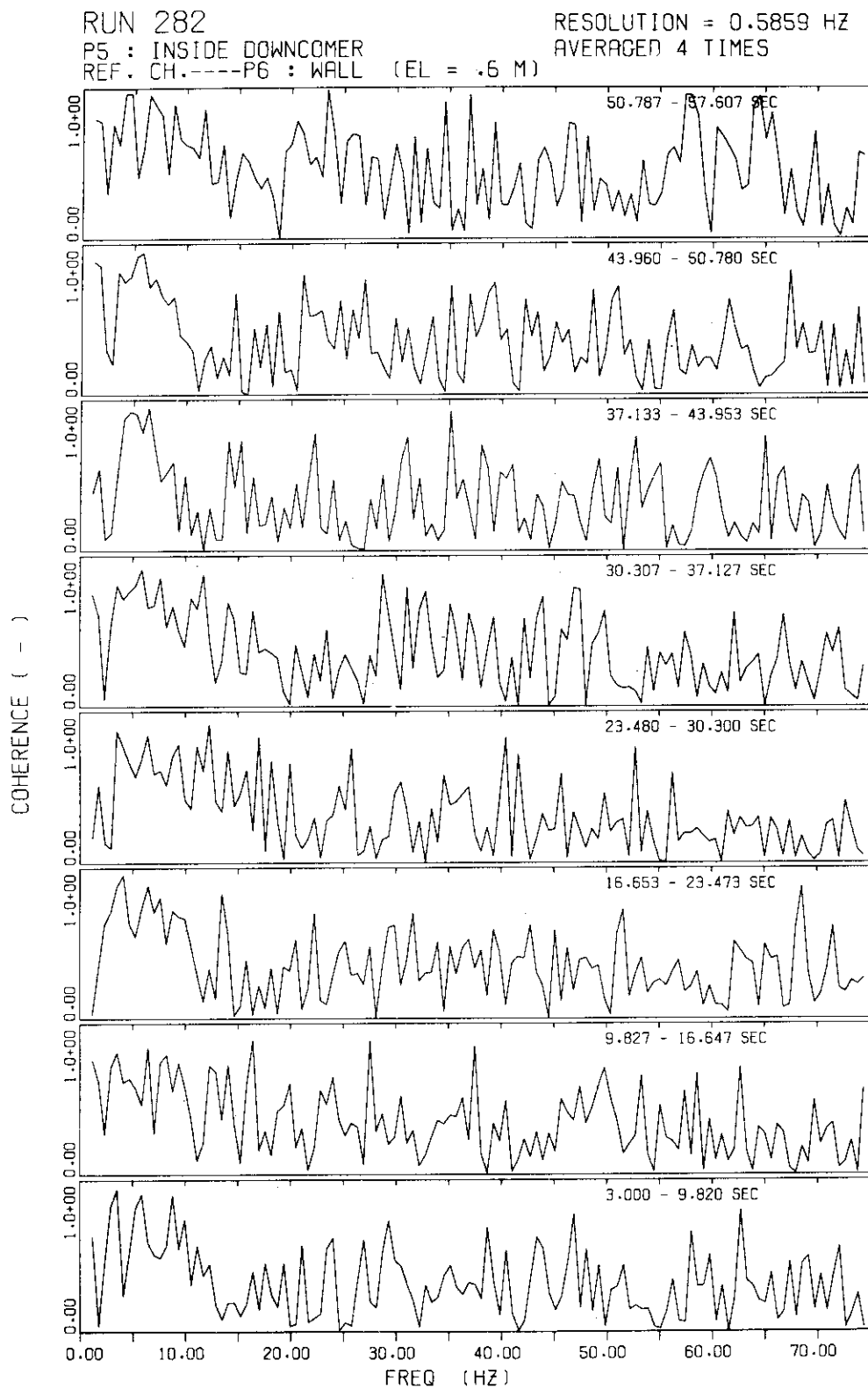


Fig. 4.82 Coherence functions, Case 08, Run 282

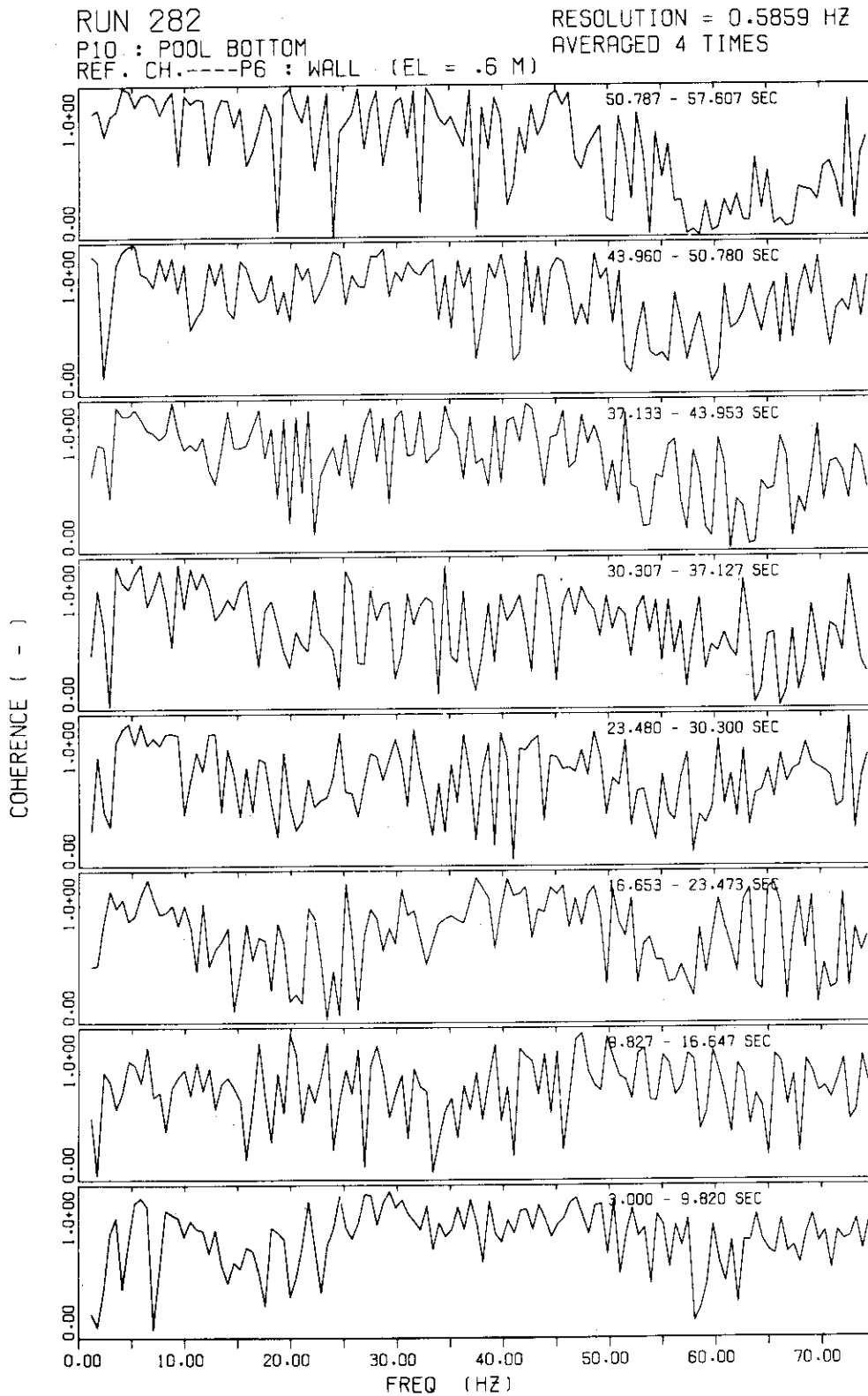


Fig. 4.83 Coherence functions, Case 08, Run 282

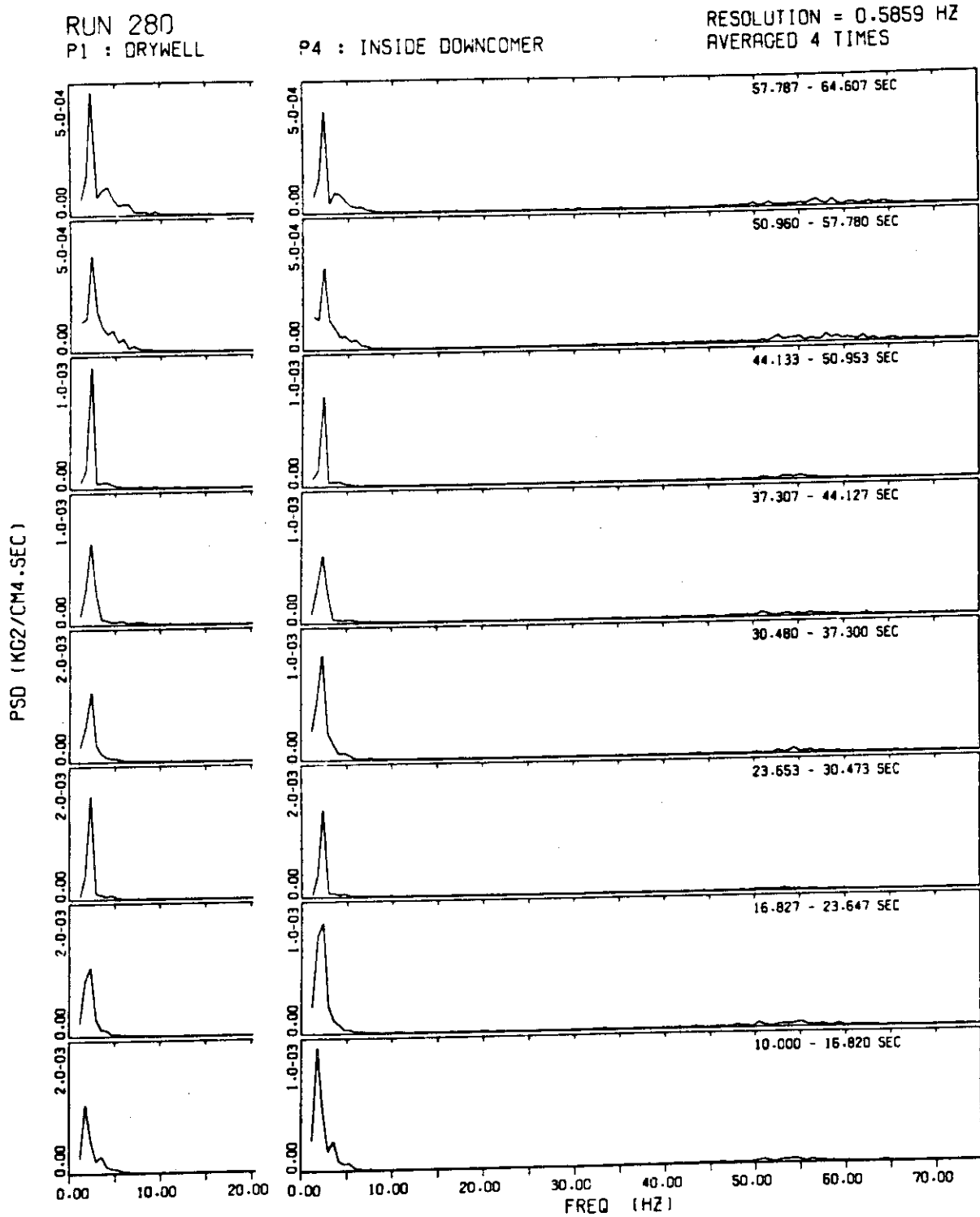


Fig. 4.84 PSD functions, Case 09, Run 280

Fig. 4.84 PSD functions, Case 09, Run 280

RUN 280
PIO : POOL BOTTOM

RESOLUTION = 0.5859 HZ
AVERAGED 4 TIMES

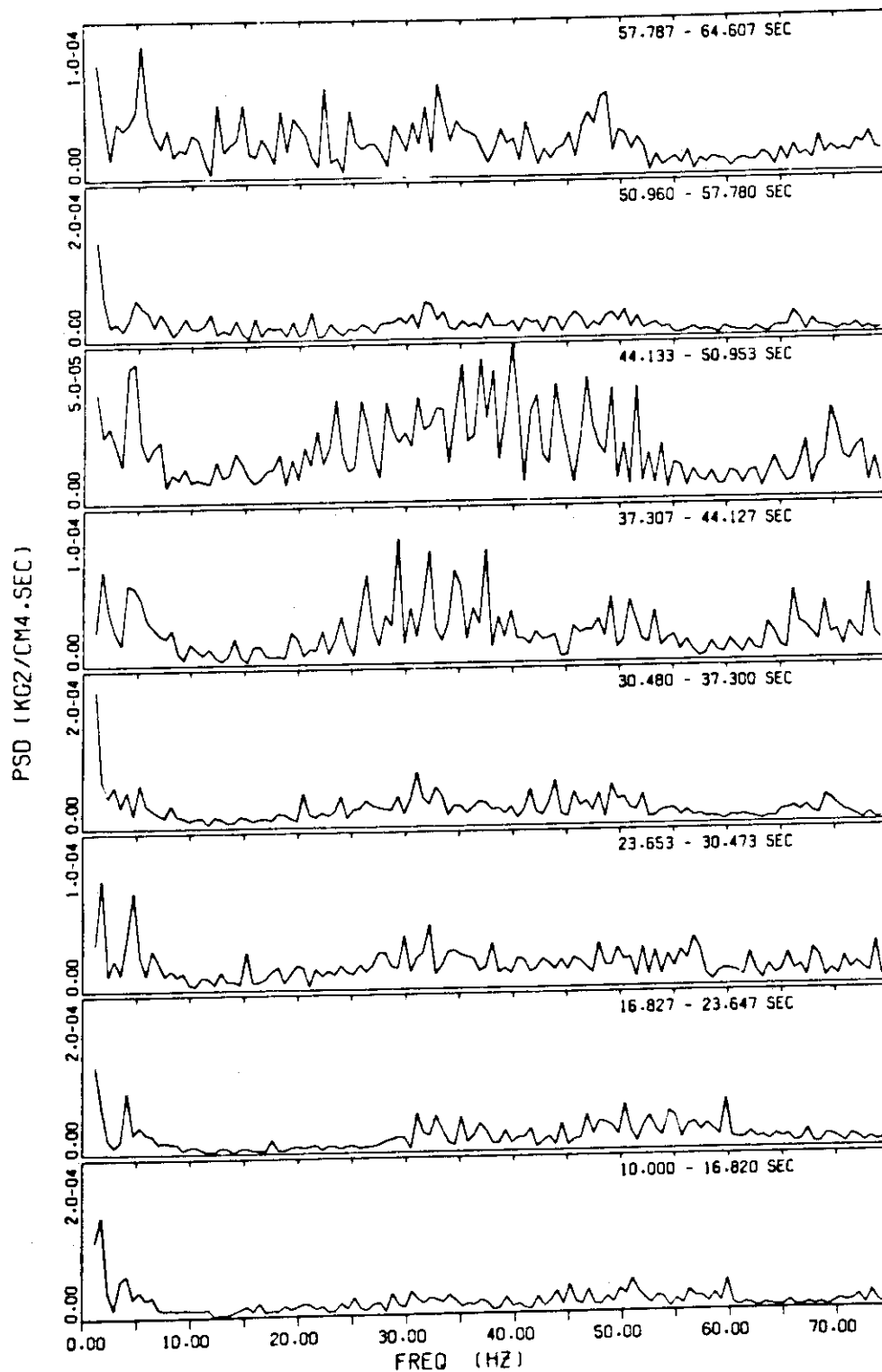


Fig. 4.85 PSD functions, Case 09, Run280

RUN 278
P1 : DRYWELL

P4 : INSIDE DOWNCOMER

RESOLUTION = 0.5859 HZ
AVERAGED 4 TIMES

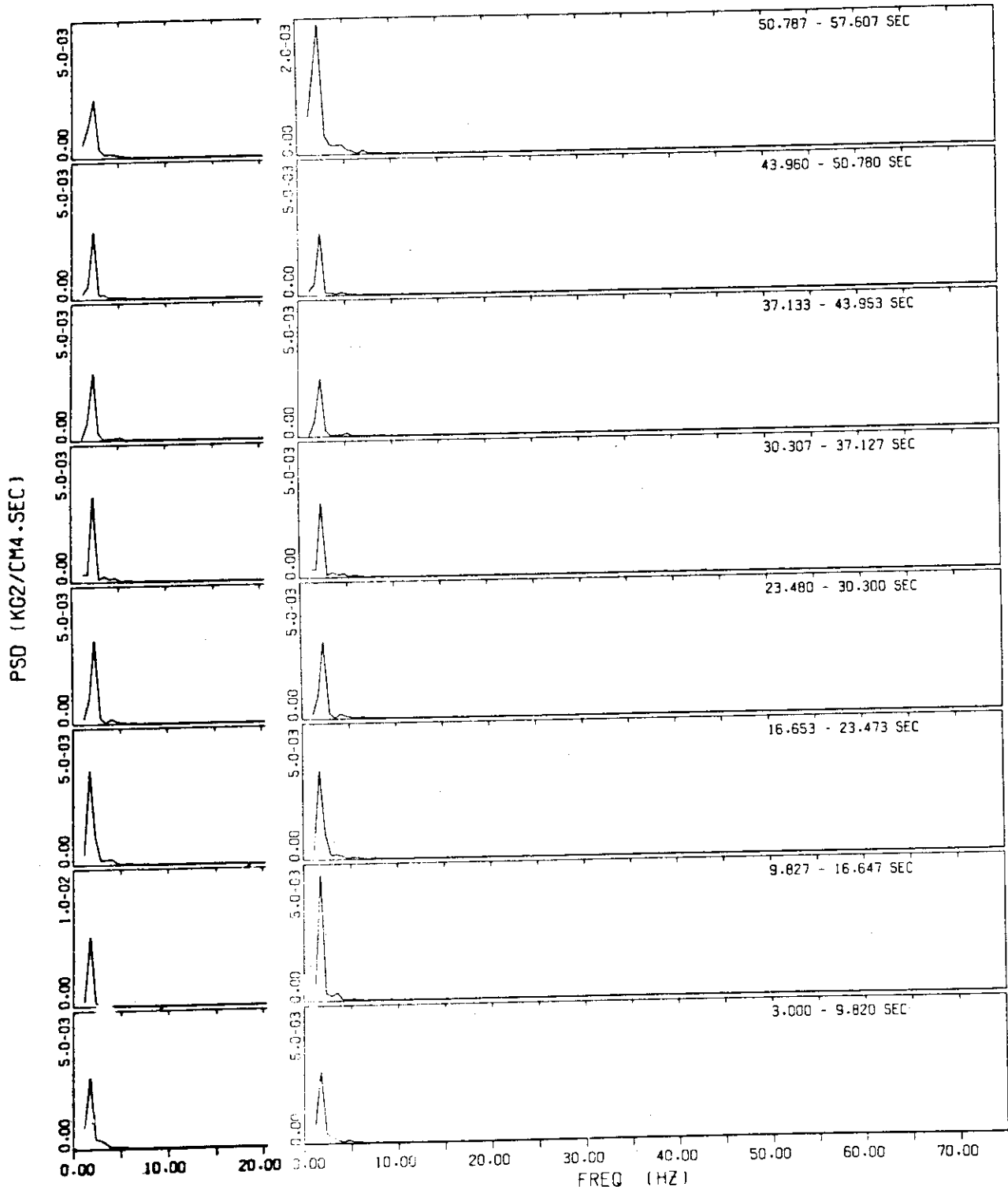


Fig. 4.86 PSD functions, Case 10, Run 278

RUN 278
P10 : POOL BOTTOM

RESOLUTION = 0.5859 HZ
AVERAGED 4 TIMES

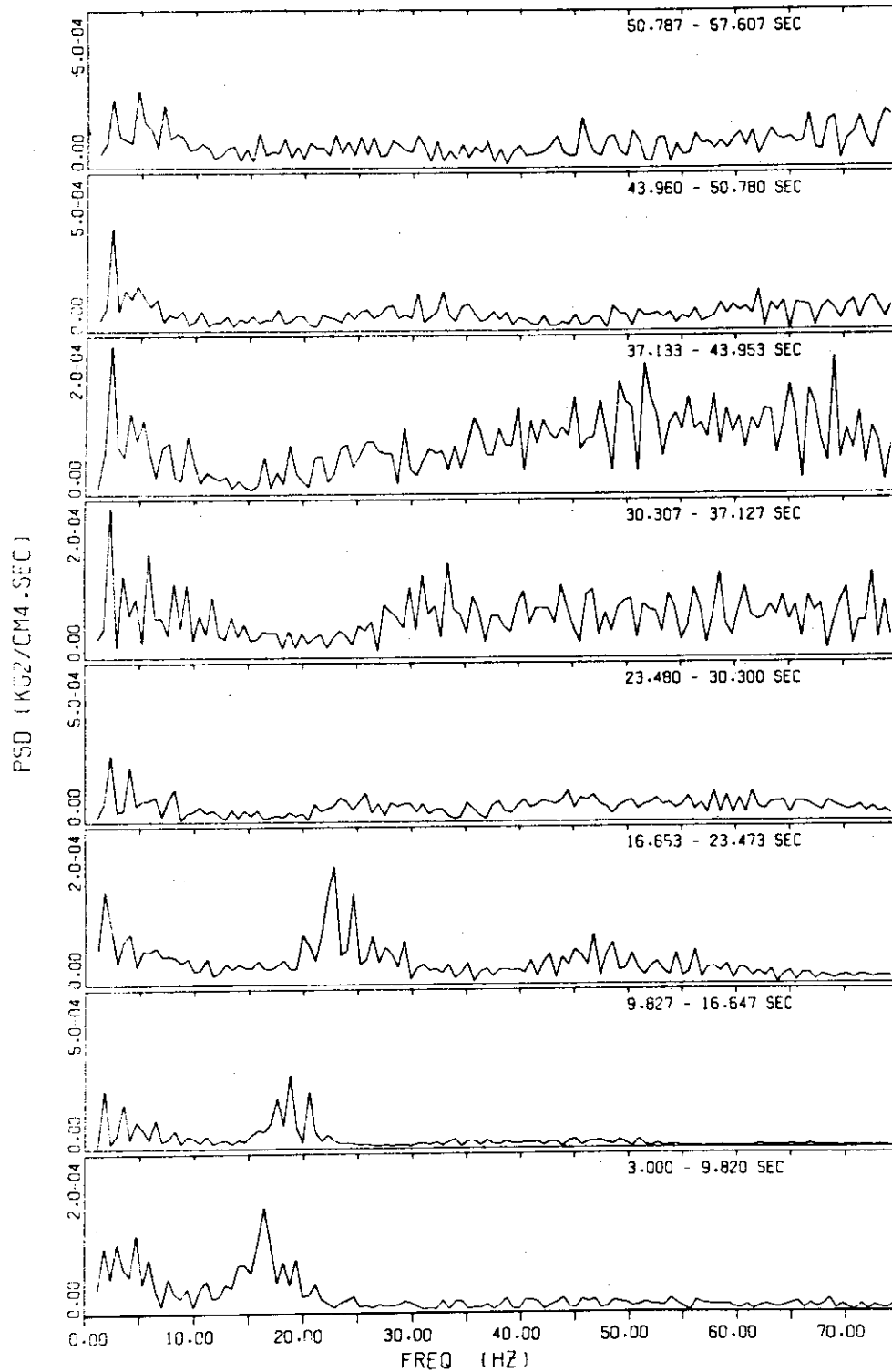


Fig. 4.87 PSD functions, Case 10, Run 278

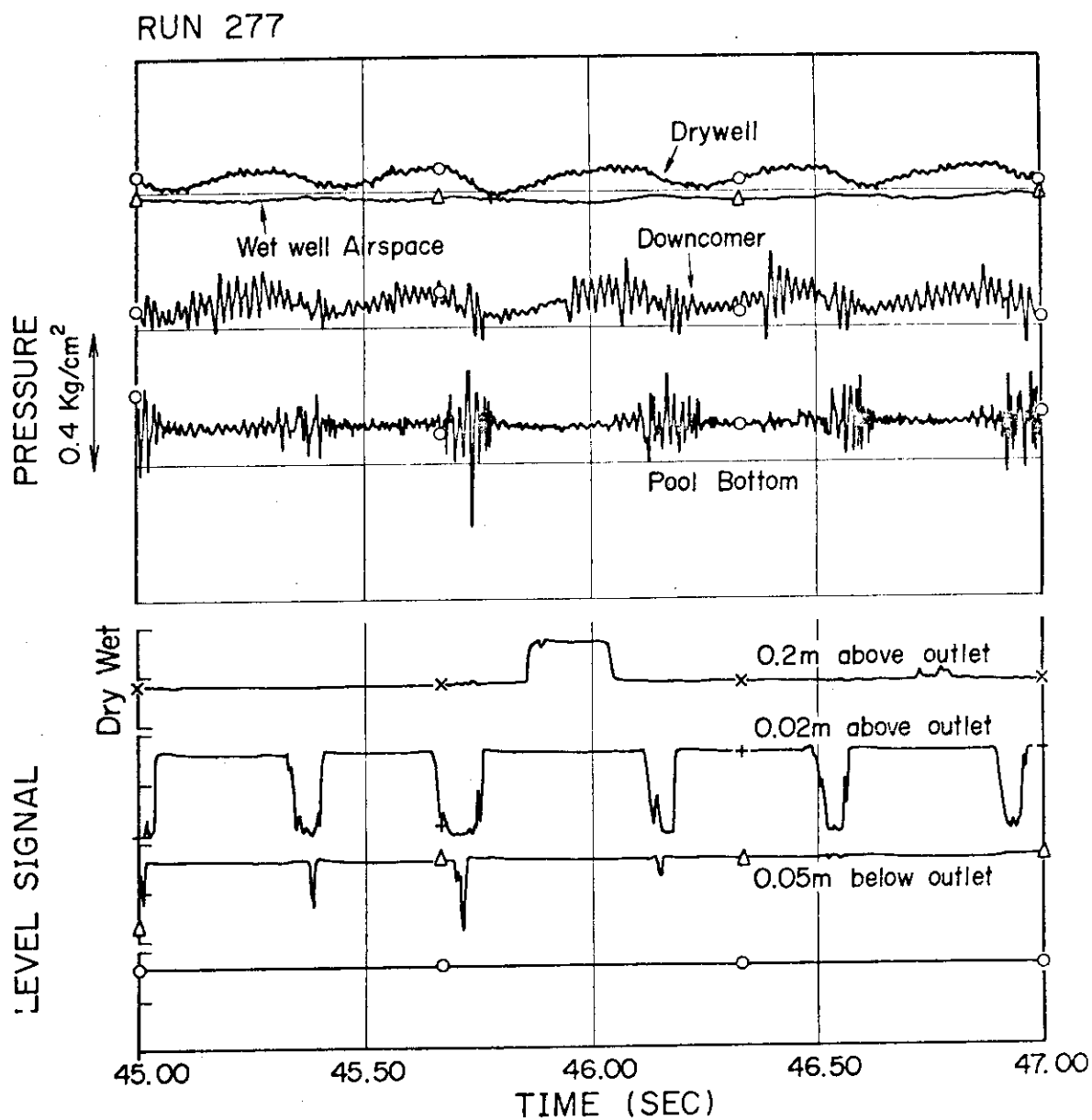


Fig. 4.88 Typical wave formes of pressures and water level signals,
Case 11, Run 277

pool temp. = 43 deg. C

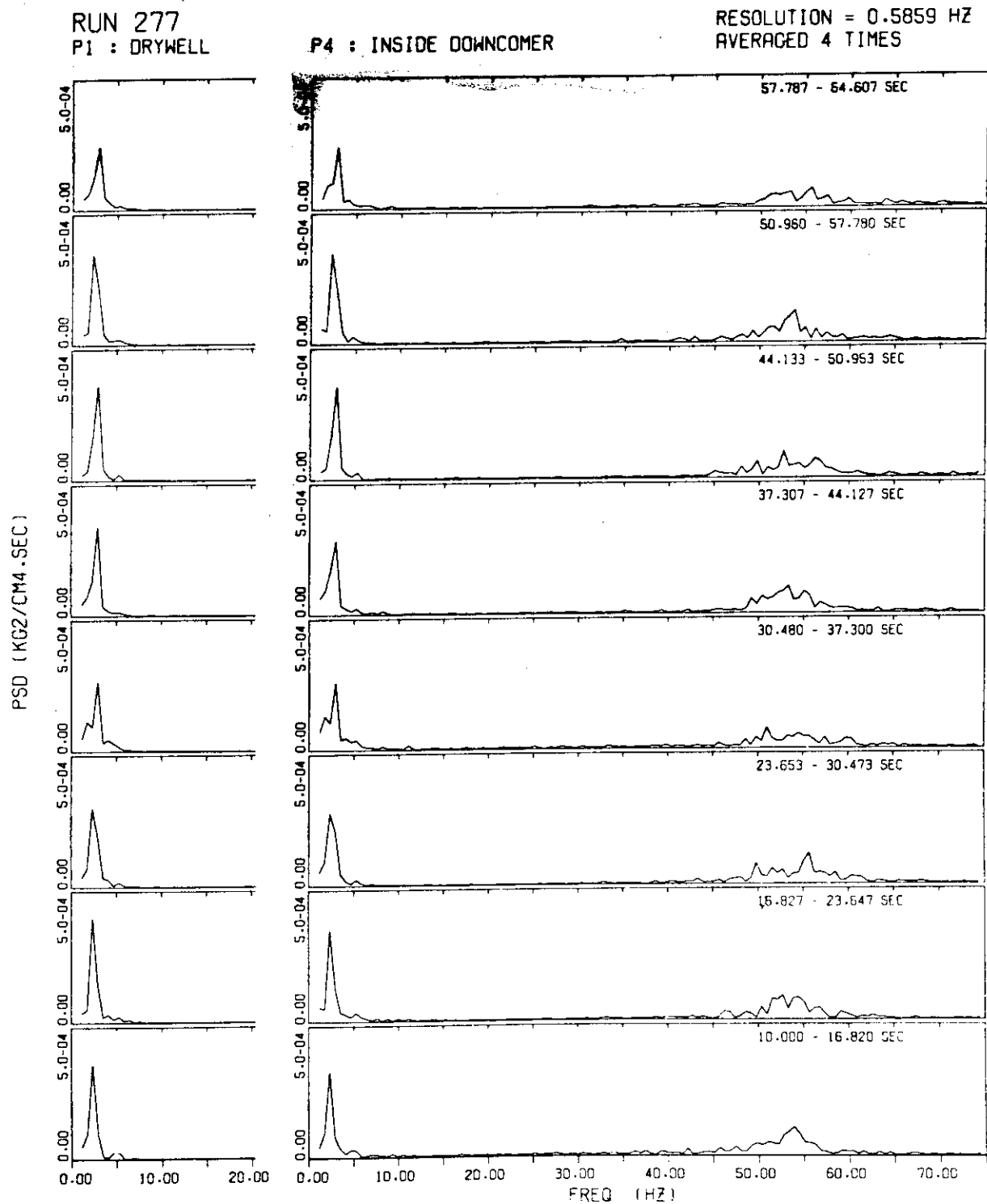


Fig. 4.89 PSD functions, Case 11, Run 277

RUN 277
 P6 : WALL (EL = .6 M)

RESOLUTION = 0.5859 HZ
 AVERAGED 4 TIMES

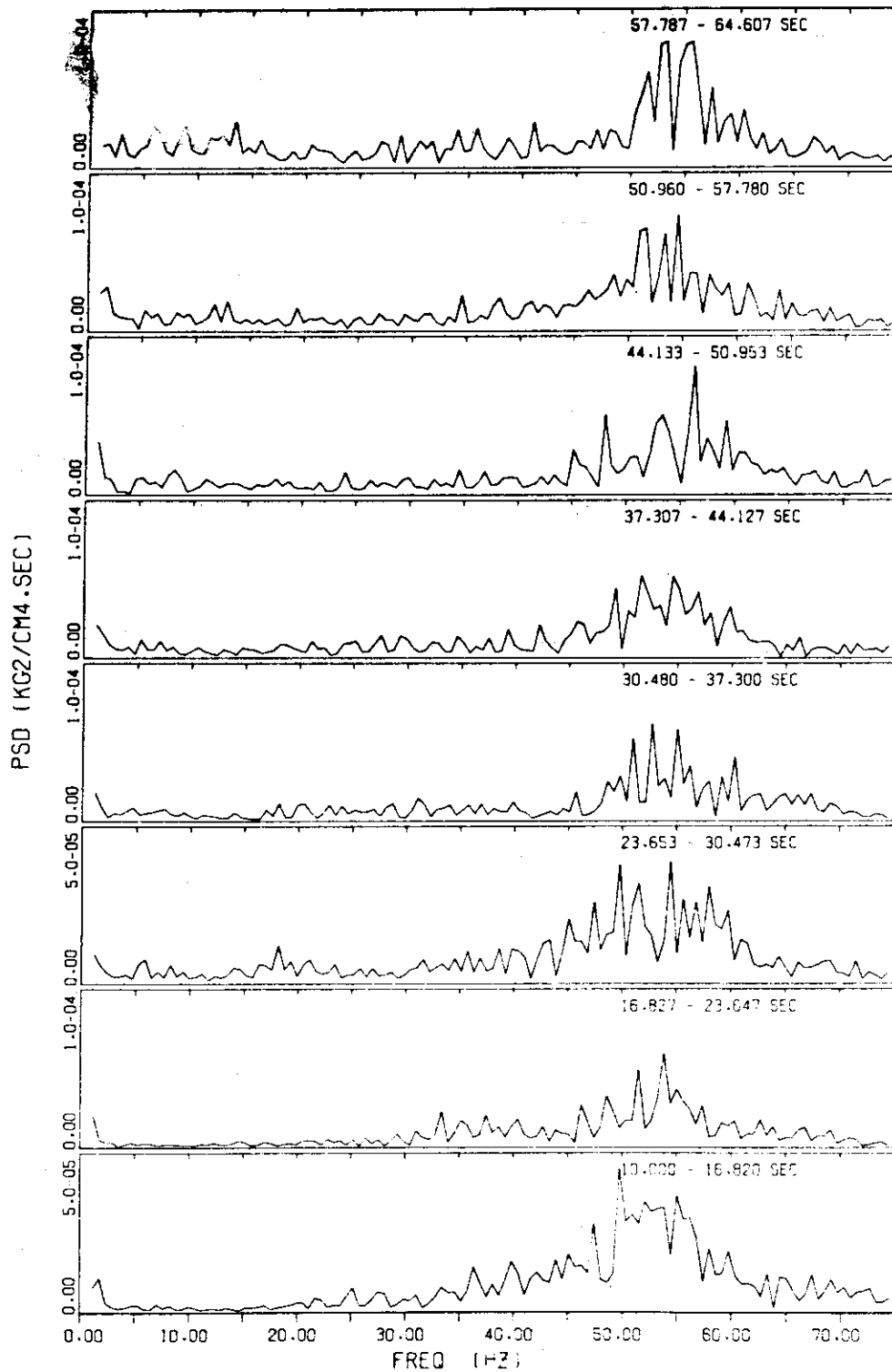


Fig. 4.90 PSD functions, Case 11, Run 277

RUN 277
P10 : POOL BOTTOM

RESOLUTION = 0.5859 HZ
AVERAGED 4 TIMES

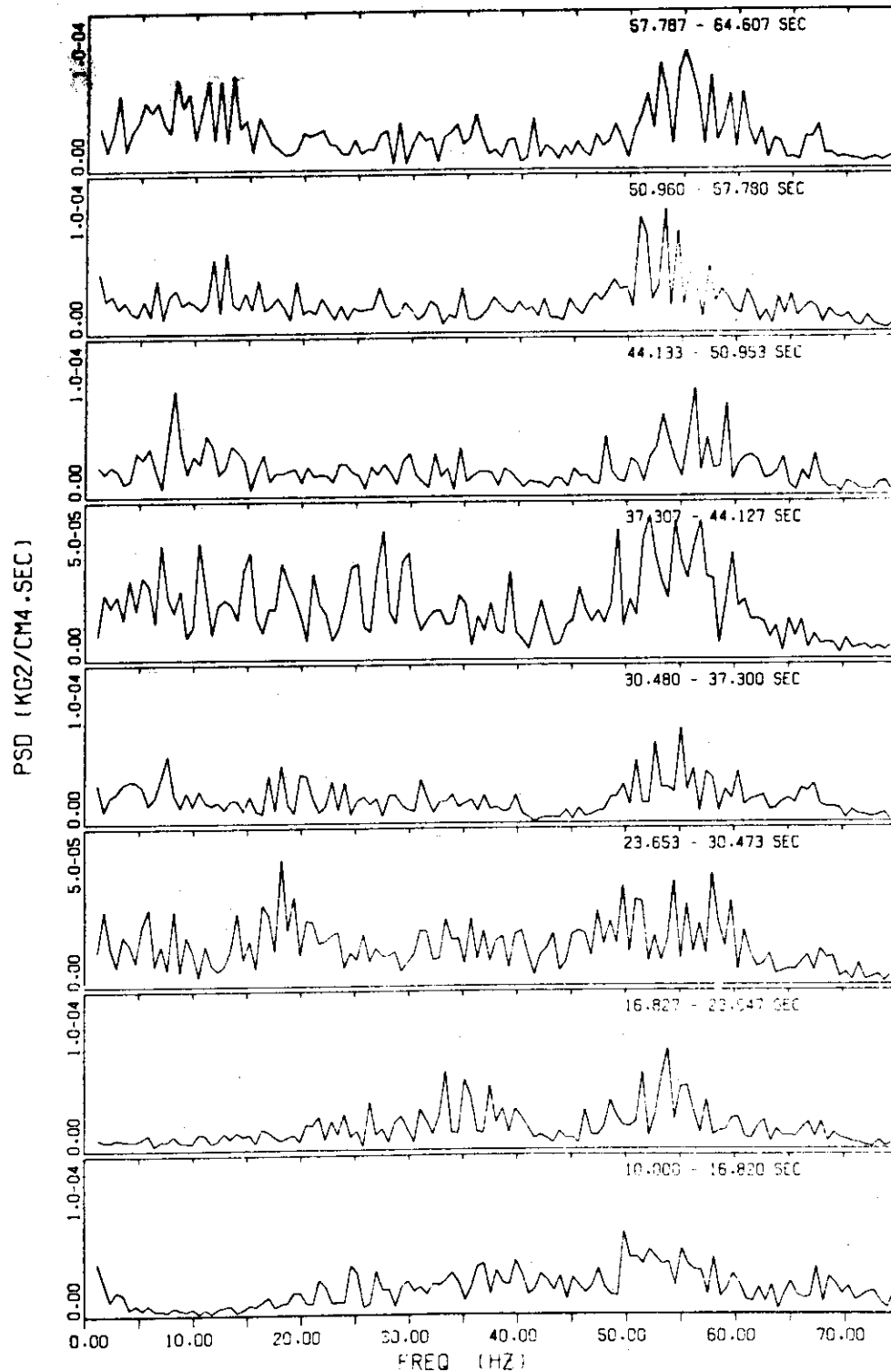


Fig. 4.91 PSD functions, Case 11, Run 277

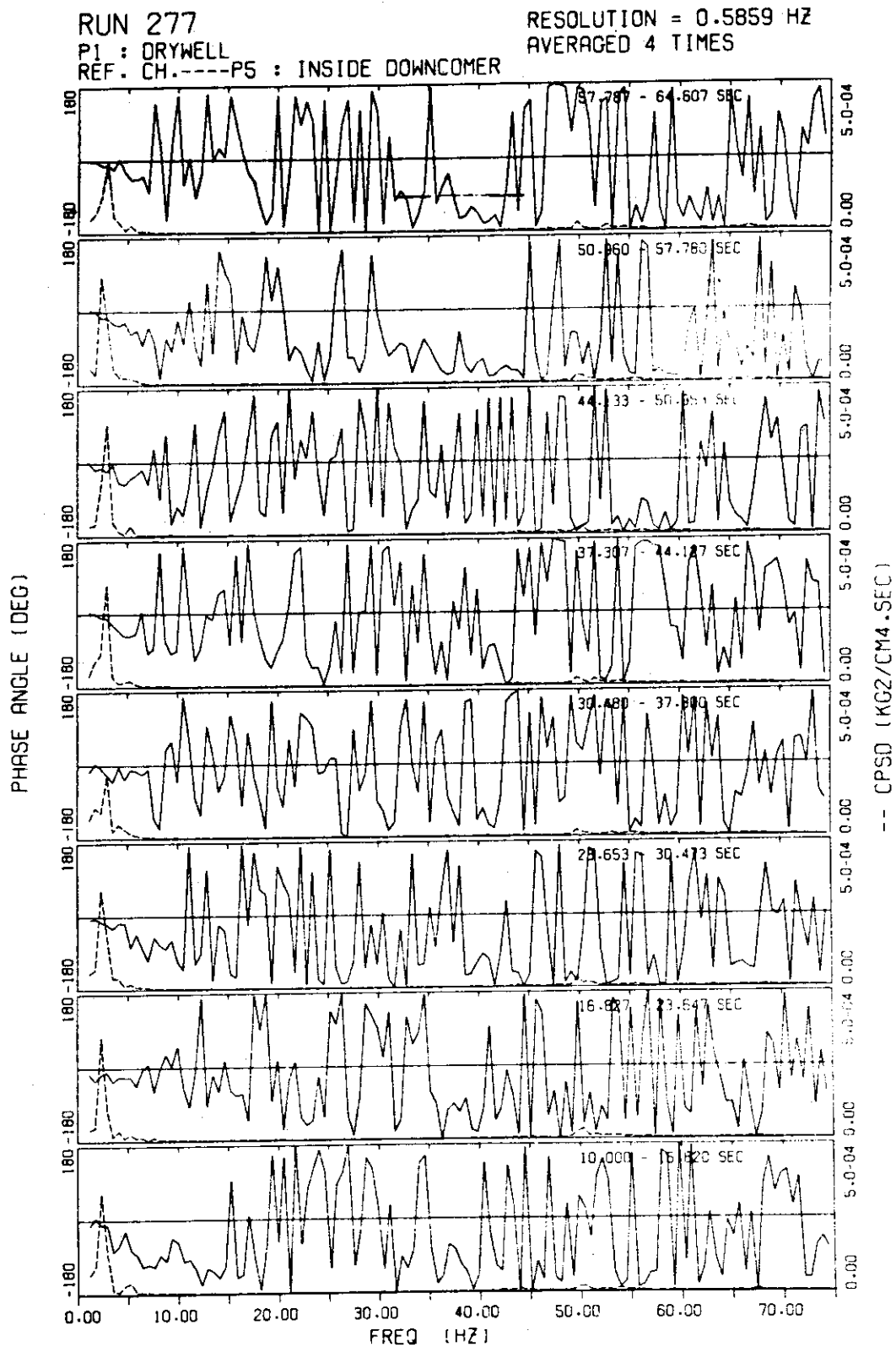


Fig. 4.92 Phase angles and CPSD functions, Case 11, Run 277

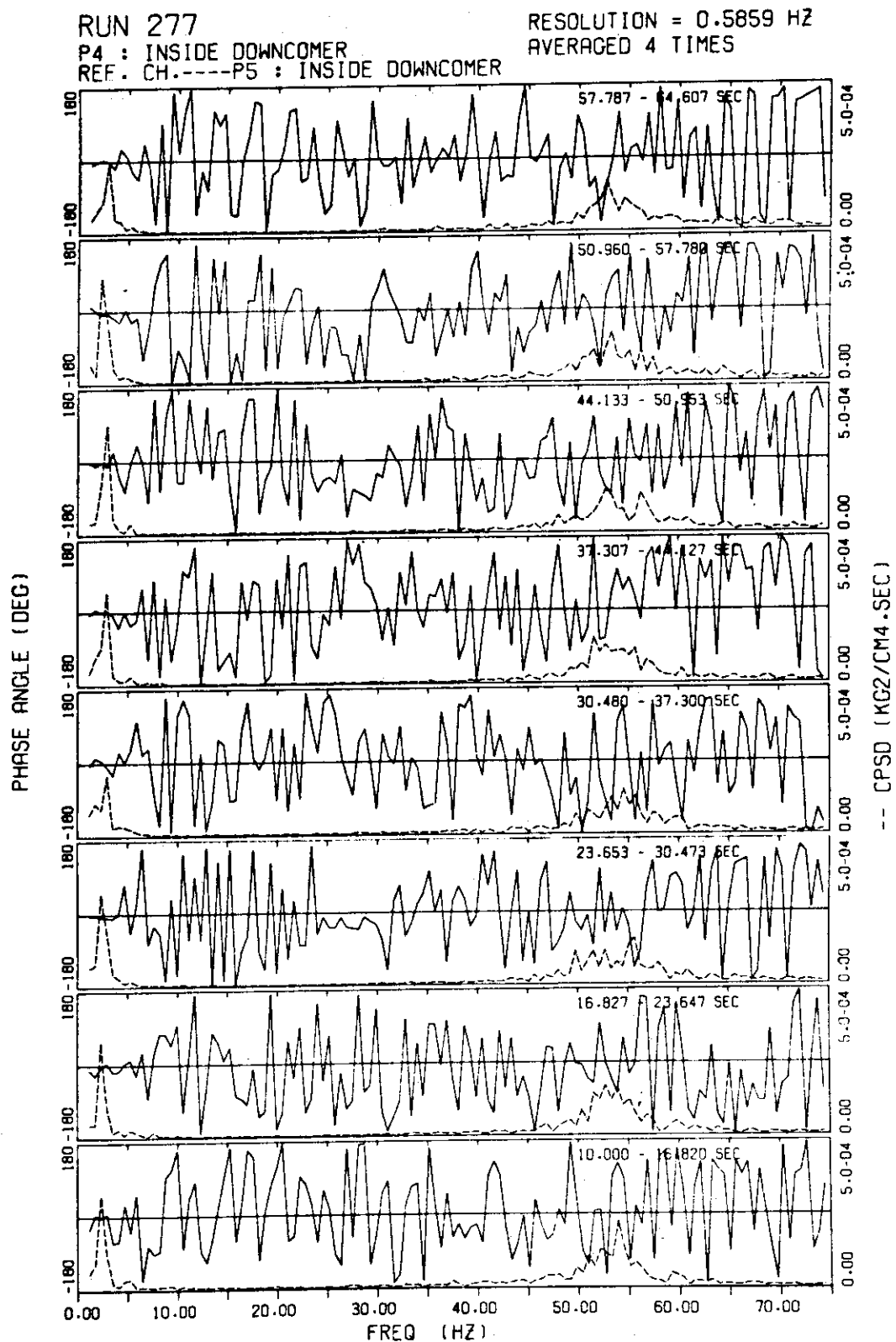


Fig. 4.93 Phase angles and CPSD functions, Case 11, Run 277

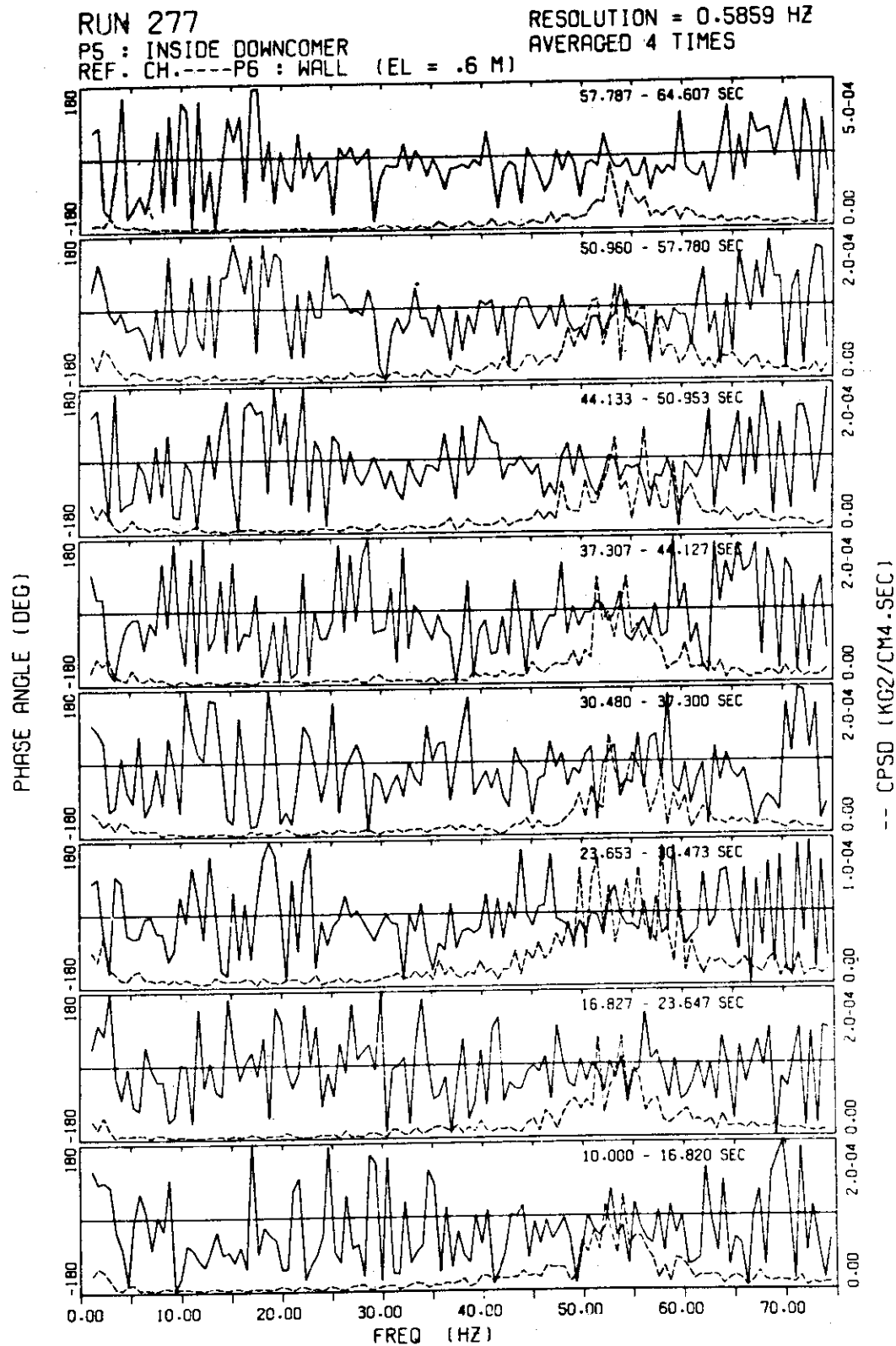


Fig. 4.94 Phase angles and CPSD functions, Case 11, Run277

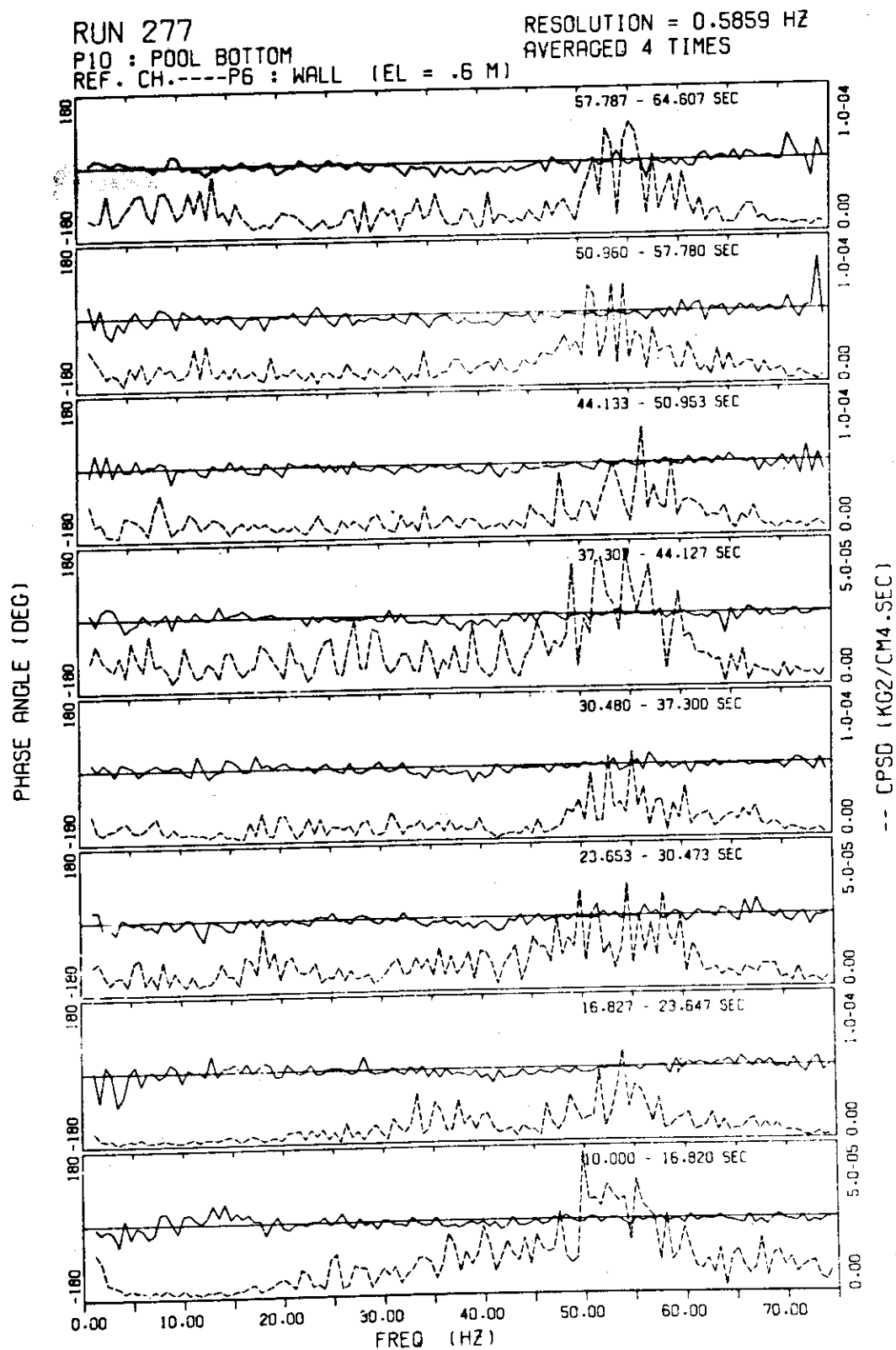


FIG. 4.95 Phase angles and CPSP functions, Case 11, Run 277

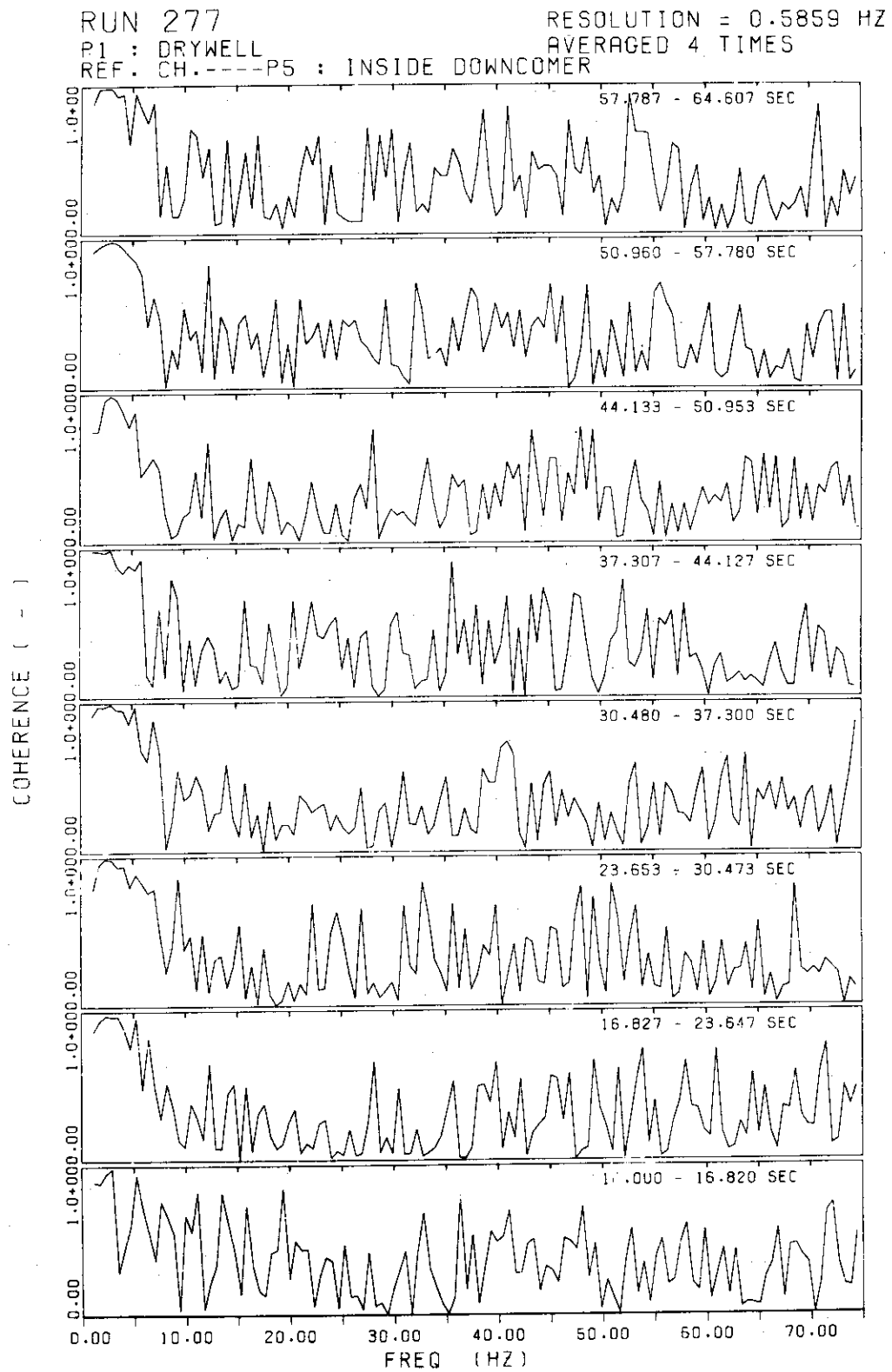


Fig. 4.96 Coherence functions, Case 11, Run 277

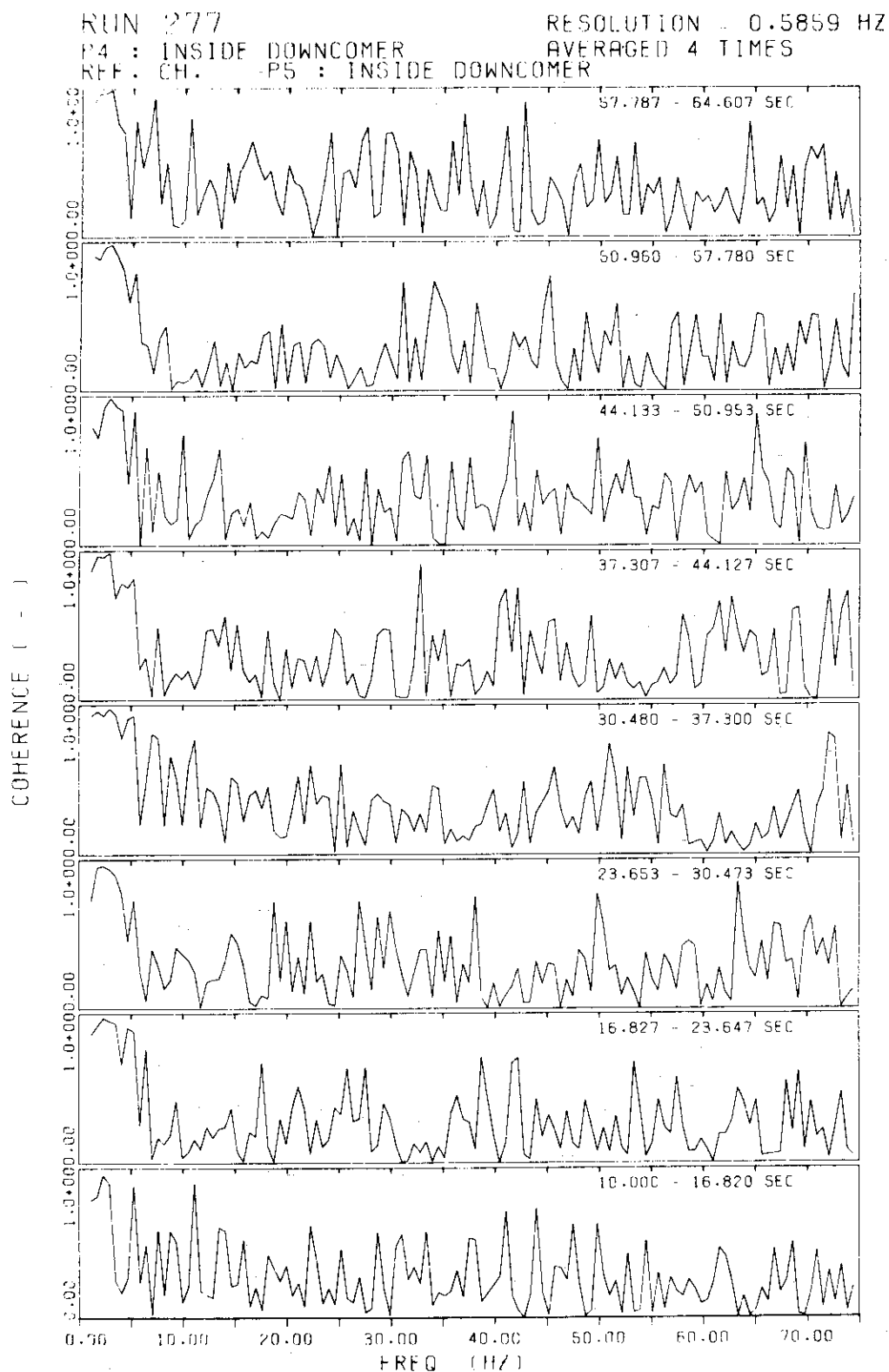


Fig. 4.97 Coherence functions, Case 11, Run 277

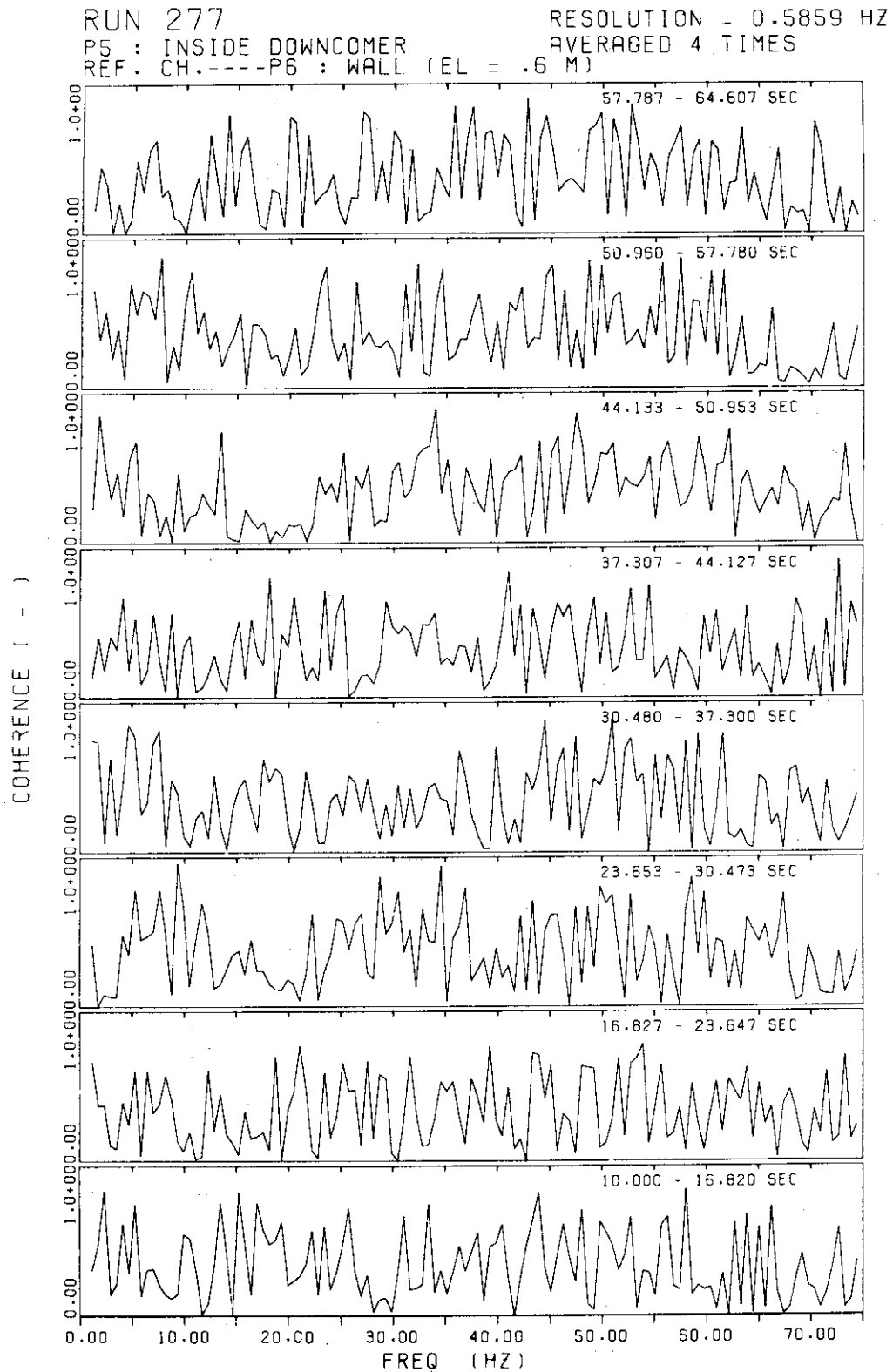


Fig. 4.98 Coherence functions, Case 11, Run 277

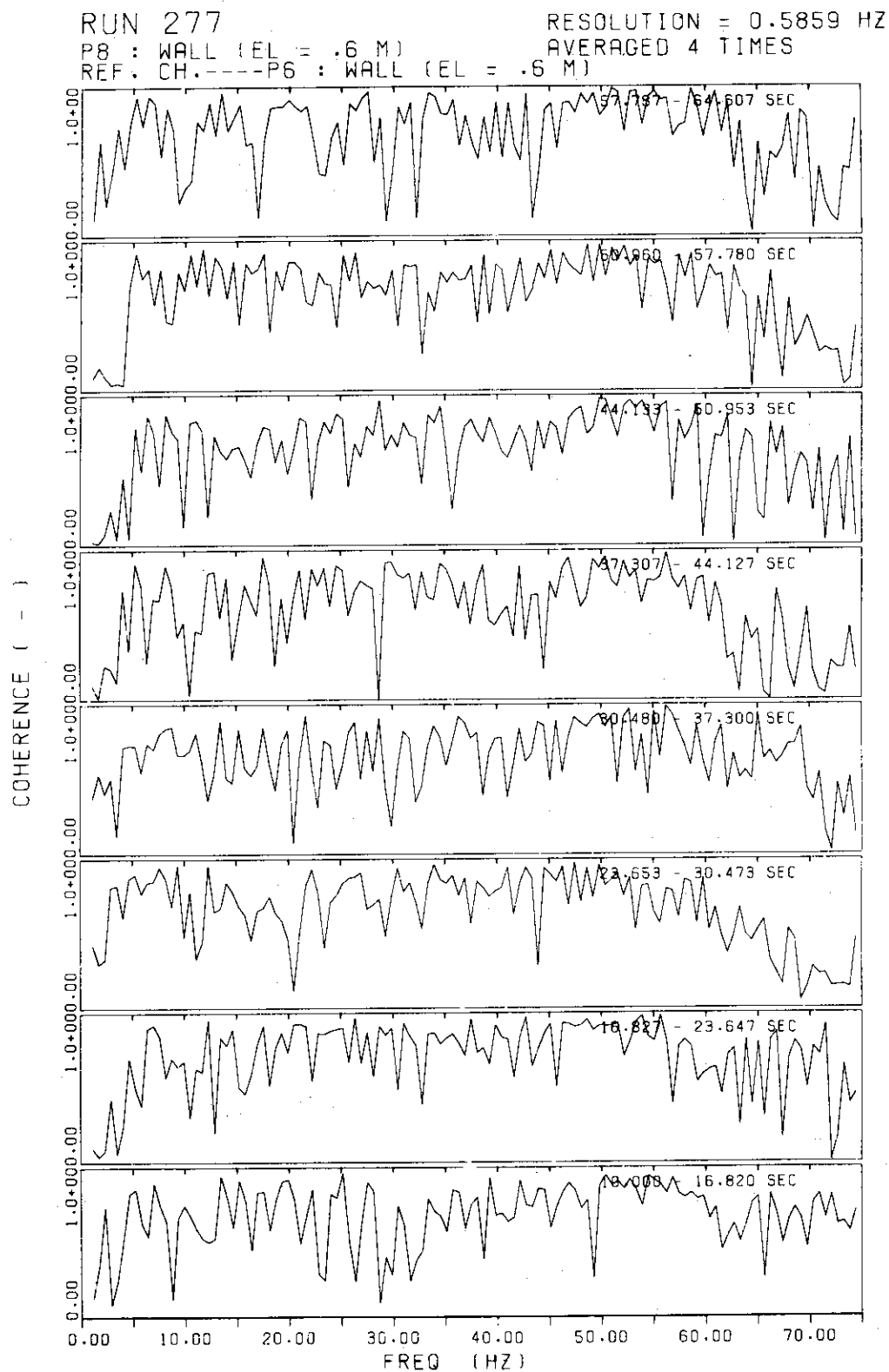


Fig. 4.99 Coherence functions, Case 11, Run 277

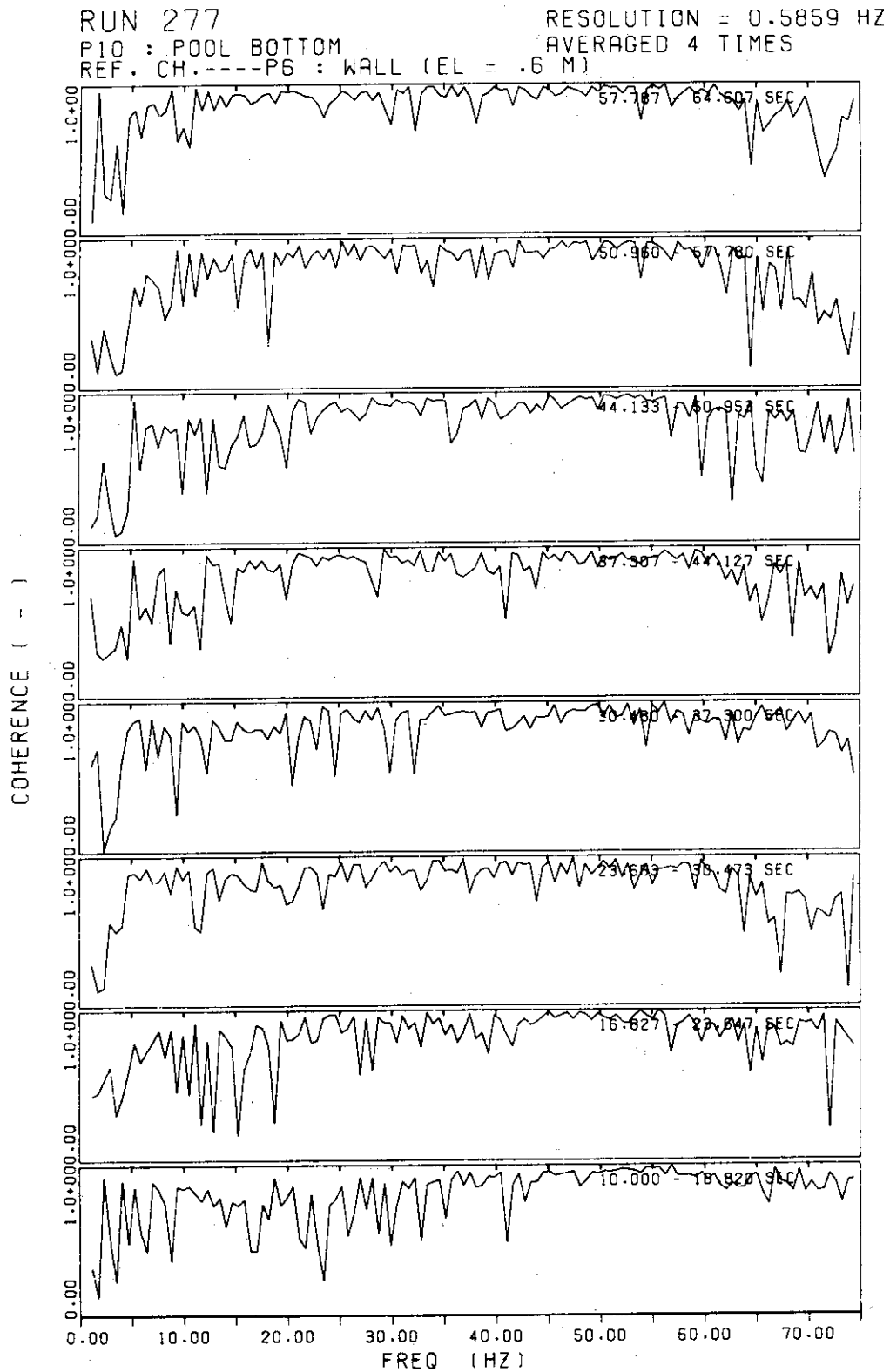


Fig. 4.100 Coherence functions, Case 11, Run 277

RUN 276
P1 : DRYWELL

P4 : INSIDE DOWNCOMER

RESOLUTION = 0.5859 HZ
AVERAGED 6 TIMES

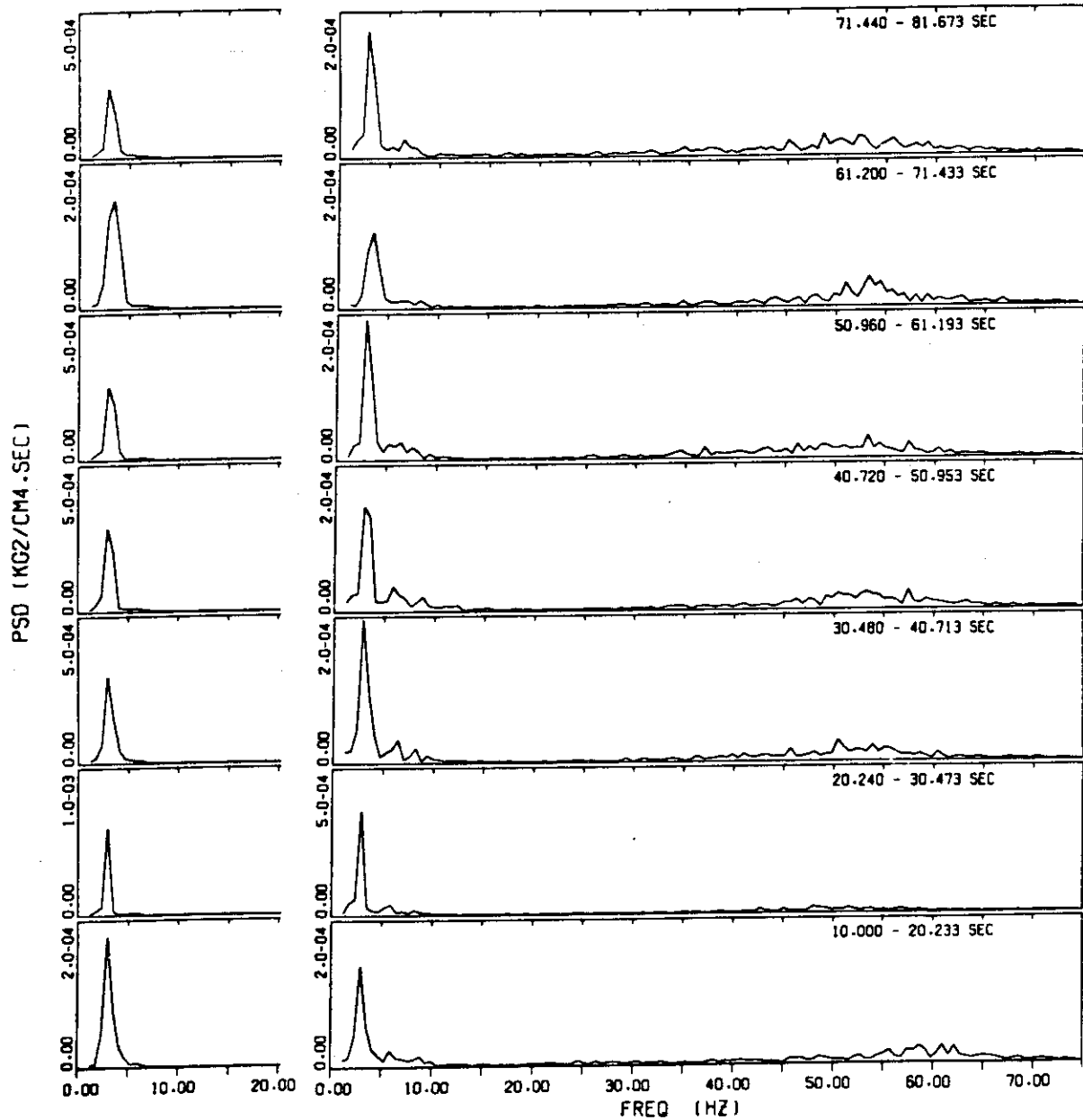


Fig. 4.101 PSD functions, Case 12, Run 276

RUN 276
P11 : POOL BOTTOM

RESOLUTION = 0.5859 HZ
AVERAGED 6 TIMES

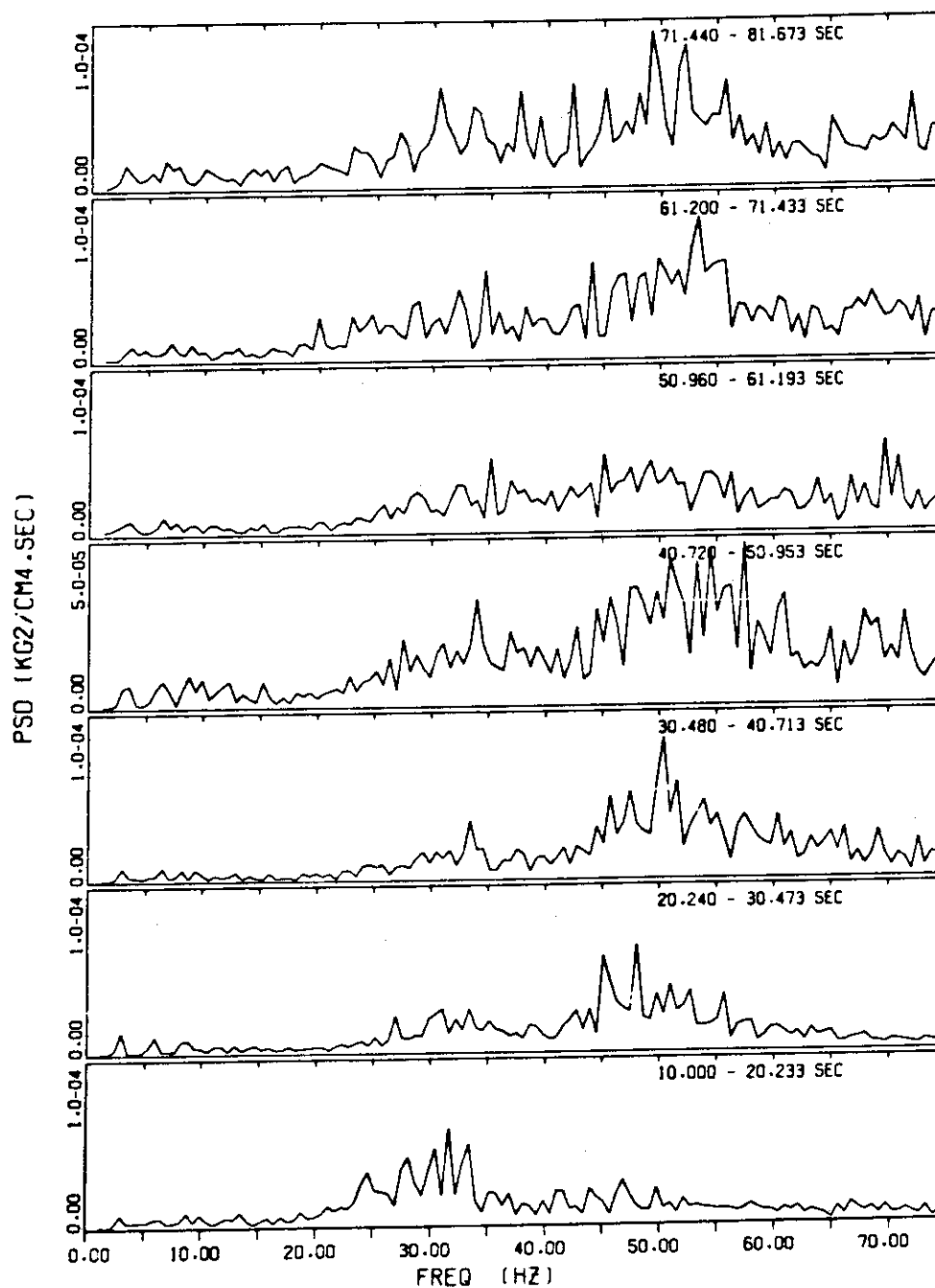


Fig. 4.102 PSD functions, Case 12, Run 276

5. 結 論 と 考 察

5.1 結果の要約

計 12 ケースの蒸気凝縮試験によって得られた圧力振動のデータを解析し、結果に対する検討を加えた。これらの試験では、1 ケース (Case 03) を除き、いずれもチャギングが発生した。

スペクトル解析の結果は以下のように要約される。なお以下において、特にことわらないかぎり“低周波数”とは 10 Hz 以下を“高周波数”とは 10 Hz 以上の周波数をそれぞれあらわすものとする。

1 本、2 本、5 本ダウンカムによるチャギングに共通

- (1) チャギング周波数は蒸気重量速度の増加とともに増加する。^{注)}
- (2) 圧力振動の振幅は、一般に蒸気重量速度の増加と共に増加する。^{注)}
- (3) ドライウエル、ダウンカム、ウェットウエル気相部圧力の変動成分の大半はチャギング周波数に対応するものであり、ダウンカム内では他の 2 点より大きな高周波数成分が観察される。
- (4) チャギング周波数成分はダウンカム内で最大である。
- (5) ドライウエル、ダウンカム内の圧力振動のチャギング周波数成分は、コヒーレントかつほぼ同位相である。
- (6) プール内では、ドライウエル、ダウンカムにくらべてチャギング周波数成分ははるかに小さく、高周波数成分の割合が大きい。
- (7) プール内の圧力振動の振幅はプール底面で最大となり、水面に近づくほど小さくなる。
- (8) プール内の圧力振動はコヒーレントかつ同位相である。

注) 2 本ダウンカマの場合については未確認。当然ながら蒸気重量速度はチャギング発生範囲内。

1 本ダウンカムによるチャギング (Cases 01, 02, 04, 05) に関して

- (9) ダウンカム内とプール内の圧力振動は、チャギング周波数を含む低周波数領域を除き、コヒーレントであり、位相差は少い。
- (10) プール内の圧力振動ではチャギング周波数成分は微弱であり、高周波数の成分が大半を占める。蒸気流速を増加させると、プール内の圧力振動の波形にはリングングの発生が観察され、これはパワースペクトル密度上のピークをもたらす。

1 本ダウンカムによる Case 03 (蒸気重量速度 = 77 kg/m²-sec, 非チャギング) に関して

- (11) 格納容器全体を通じて、圧力振動の基本波成分が卓越的であり、基本波周波数はプール温度上昇にともない低下した。
- (12) 圧力振動の主要成分は格納容器全体でコヒーレントであった。

5 本ダウンカマによるチャギング (Cases 06-10) に関して

- (13) ドライウエルとダウンカマ、2本のダウンカマ、ダウンカマとプール内、のそれぞれに関して、(プール内の圧力振動の主成分である)高周波数の成分のコヒーレンスは、1本ダウンカマの場合にくらべて著しく低い。また、ドライウエル内の高周波数成分は1本ダウンカマの場合より小さい。
- (14) ドライウエル、ダウンカマ内の圧力振動の振幅は1本ダウンカマの場合と同程度であるが、プール内の振幅は1本ダウンカマの場合より著しく(典型的な場合でパワースペクトル密度にして約1桁)小さい。両者の相違は高周波数の領域において著しい。

2 本ダウンカマによるチャギング (Cases 11, 12) に関して

- (15) 5本ダウンカマに関する(13)と同様。
- (16) ドライウエル、ダウンカマ内のチャギング周波数成分の振幅は、1本、5本ダウンカマの場合より小さいが、プール内の圧力振動の振幅は5本ダウンカマの場合と同程度である。
- (17) プール内の圧力振動の大半は、1本ダウンカマの場合と同様に、高周波数の成分が占める。

その他のパラメータの効果

- (18) ダウンカマ初期浸水深さおよび系圧力の影響は顕著でなかった。前者についてはスケージングに問題があり、後者についてはさらにデータの蓄積が必要である。

5.2 考察

前節で要約した結果に考察を加えるにあたり、いくつかの実験結果を参照する。これらのうち、最も大規模なものはスウェーデンのマルビケン試験施設で実施されたMX-I⁹⁾、MX-II⁸⁾試験であり、使用された格納容器は内径300mmのダウンカマ57本を有する実物大のものである。ダウンカマは、容積約80m³のヘッダ、内径1.2mのベント管4本を経てドライウエルに接続されており、圧力抑制系の構成はMark I 格納容器に類似している。MX-I試験では計16回、MX-II試験では計9回の放出試験が行われた。放出流量が小さい条件の下ではダウンカマ内へのプール水の逆流(ベント管内の最高水位は出口から300mm程度)が見られたが、典型的なチャギングは観察されなかった。

結果 (3), (4), (5) について

ドライウエルは、チャギングに伴うダウンカマ内蒸気流速変動に対してリザーバとして作用し、高周波数の変動成分は吸収される。なお、本試験装置におけるダウンカマ内圧力の計測点はFig. 2.3に示すように比較的入口に近い位置にあるが、より下流側では高周波数の成分が

より豊富であると予想される。またチャギング周波数成分が異なるダウンカマ間で同位相であることは、ダウンカマ内水位の（巨視的）運動がほぼ同位相であることと符合する。

MX-II試験⁸⁾においては典型的なチャギングは観察されなかったが、ドライウエルおよびベント系の上流部で高周波数の振動成分が少いことは本試験結果と同様であり、基本周波数成分（約4 Hz）は異なるダウンカマ間でコヒーレントかつ同位相であった。

結果 (6), (7), (8)について

本試験装置は1/6スケールであり、ダウンカマ浸水深さに関しても実炉の1/6となっている。また、ウェットウエル気相部の圧力変動は小さく、プール水面の圧力はほぼ一定とみなされる。すなわち、プール内の音響インピーダンスは低く、（チャギング周波数のような）低周波数の圧力振動は発生しにくい。

同様に、半径方向のスケールも1/6であるため、プール内の音速に対してプールの寸法は十分に小さい。本試験においてはこのためにプール内の圧力振動はコヒーレントかつ同位相であるという結果が得られたものであり、この傾向は1本ダウンカマの場合に特に著しい。これに対して、MX-II試験ではプールの寸法が大きく、圧力変動の発生源（ダウンカマ）の数が多いため、プール内においても高周波数（5ないし10 Hz以上）の成分に関するコヒーレンスは低い。また、MX-II試験においては高周波数成分がもっとも大きいのはダウンカマ内であり、プール内ではこれより小さくなる傾向を示した。

結果 (9), (10)について

1本ダウンカマの場合、圧力振動の発生源は（1本の）ダウンカマ出口に集中しており、このためダウンカマとプール出口の圧力振動はかなり高い周波数（～50 Hz）までコヒーレントである。またプール内には、気泡の崩壊に伴う圧力波が直接伝播するため、高周波数の成分がドライウエルおよびダウンカマ内より豊富である。

結果 (11), (12)について

すでに述べたように、MX-II試験ではダウンカマ内蒸気重量速度が比較的高い条件を中心に試験が行われ、チャギングは観察されなかった。圧力振動の基本周波数成分（約4 Hz）は本試験結果(11), (12)と同様に格納容器のすべての部分で卓越的であり、かつコヒーレントであった。

また筆者らは内径35.7 mm¹⁰⁾¹¹⁾のダウンカマを用いて同様に蒸気重量速度が高い条件を中心に実験を行い、卓越周波数および振幅がダウンカマ長さ、および上流のリザーバの容積の影響を受けることを示した。典型的な実験結果において、卓越周波数はプール水温の上昇とともに低下した。プール水温による卓越周波数の変化に関しては、福田¹²⁾、有信¹³⁾、横田¹⁴⁾らによっても報告されており、いずれも同様な傾向を示している。

以上のように、Case 03の結果は、蒸気重量速度が高い条件での従来の実験結果と定性的に一致している。

結果 (13), (14), (15), (16) について

圧力振動のコヒーレンスに関して、(14)と同様な結果がMX-II実験においても観察された。すなわち、基本周波数(約4 Hz)以上の成分に関しては異なるダウンカマ間、あるいはダウンカマとプール内の圧力振動間のコヒーレンスが低く、相互に独立な傾向がみられた。

ダウンカマ内の圧力振動は、個々のダウンカマの先端付近(の凝縮領域)で発生する圧力振動と密接な関係を持つものと考えられる。5本ダウンカマ試験においては、2本のダウンカマ間、あるいはダウンカマとプール間のコヒーレンスが高周波数領域で低く、かつダウンカマ内の圧力振動の振幅が小さいことが特徴的であった。異なるダウンカマ間のコヒーレンスが高周波数領域で低いことは、チャギングが完全には同位相でないことを意味し、このためダウンカマ出口から見た上流側の音響インピーダンスは(1本ダウンカマの場合より)低く、この結果、圧力および水位の振幅は小さくなるものと考えられる。

筆者らは、すでに引用した小規模の実験において、ダウンカマの長さ、ダウンカマ上流のリザーバの容積を変化させ、ダウンカマ長さを短くしリザーバ容積を大きくするとダウンカマ内の圧力振動の振幅が著しく低下することを示した。

同様に、小林⁵⁾らはダウンカマの中途にオリフィスを設けると、下流側の圧力振動の振幅が増大することを示した。

斎藤⁷⁾らによって述べられているように、チャギングはダウンカマ出口における凝縮量の変動がダウンカマ内の急減圧をもたらす現象であり、ダウンカマ出口から見た上流側の音響インピーダンスが高いほど発生しやすいと考えられる。従って、各ダウンカマにおけるチャギングの発生が完全に同位相でない場合、ダウンカマ本数の増加(とそれにもなうドライウエル絶対容積の増加)はチャギングにともなうダウンカマ内圧力振動の振幅を減少させ、かつチャギングの発生を抑制すると思われる。

ただし、このような効果が直接プール内圧力振動の振幅の減少にむすびつくとは断定できない。これは、ダウンカマ内とプール内の圧力振動の関係が十分に解明されていないことによる。たとえば、ダウンカマ先端から離脱した蒸気泡の崩壊による圧力波はプール内の圧力振動をもたらすが、ダウンカマ内の圧力に対する影響は少ないと考えられる。

一方、1本ダウンカマによるチャギングにおいてプール内で高い振幅の圧力振動が観察されたが、この主成分(スパイクおよびリングング)は比較的高い周波数を有するものであった。結果(6)に示すように、本試験におけるプール内の圧力振動は(いくつかの)波源から発生した圧力波が“合成”されたものと考えられるが、5本および2本ダウンカマの場合、圧力振動の高周波数成分は複数のコヒーレントでない発生源から生ずるため“合成”された圧力振動の振幅は個々のスカラー和より小さくなることが予想され、これが5本、2本ダウンカマの場合と1本ダウンカマの場合のプール内圧力振動の振幅の相違の原因の一つであると考えられる。さらに、以上述べた以外に、ダウンカマが複数本ある場合、プール内の圧力波によって隣接する凝縮領域間に種々の干渉(たとえば、気泡が多数共存することによる圧力振動の振幅への影響)を生ずる可能性も考えられるが、現時点では明らかでない。

謝 辞

本報で報告した結果は、わが国のBWR所有者グループ（東京電力、東北電力、中部電力、中国電力、日本原子力発電、日立製作所、東京芝浦電気の各社により構成の委託のもとに実施された受託試験研究「BWR格納容器1／6スケールの健全性に関する試験研究」に際して得られた試験データに基くものである。

スペクトル解析の作業は、受託試験研究の終了後、昭和52年6月から10月にかけて、原研計算センターにおいて行った。

本報の公開は上記各社の同意の下に行われるものであり、ここに謝意を表す。

また、本報の内容に関して御討論いただいたBWR所有者グループの各位ならびに安全工学第1研究室斯波正誼室長、生田目健氏、岡崎元昭氏、西独KWU社Dr. E.H.Kochに深く感謝する。

参 考 文 献

- 1) 久木田, 岡崎, 生田目, 斯波: JAERI-M 8355 (1979)
- 2) 久木田, 岡崎, 生田目, 斯波: 日本原子力学会昭和52年秋の分科会 (1977)
- 3) 有信, 日本BWR格納容器所有者グループ: 日本原子力学会昭和53年秋の分科会 (1978)
- 4) U. S. Mark II Owners' Group: private communications, April 1977.
- 5) 日野: 「スペクトル解析」, 朝倉書店, 1977
- 6) 赤池, 中川: 「ダイナミックシステムの統計的解析と制御」, サイエンス社, 1972
- 7) Saito, T. et al.: "On the unsteady phenomena relating to vapor suppression", ASME Paper 74-WA/HT-47, 1974.
- 8) MXB Reports, Joint Reactor Safety Experiments in the Marviken Power Station, Sweden, 1974.
- 9) MXB Reports, Joint Reactor Safety Experiments in the Marviken Power Station, Sweden, 1974.
- 10) 岡崎, 久木田, 斯波: 昭和52年日本原子力学会年会, 1977
- 11) Okazaki, M., Kukita, Y. and Shiba, M.: "Effects of geometry changes in the vapor suppression system on the pressure oscillation phenomena", IAEA Technical Committee Meeting on Thermohydraulic Consequences of LOCA inside and outside the Containment, Cologne, 1976.
- 12) 福田, 斎藤, 内田: 日本機械学会講演論文集No 750-20, 1975
- 13) 有信, 丹羽, 和田: 安全工学シンポジウム, 1977
- 14) 横田: 昭和53年日本原子力学会秋の分科会, 1978
- 15) 小林他3名: 第29回船舶技術研究所発表会講演集, 1977