

輕水爐核燃料 爐外實證試驗 技術開發

The Development of Flow Test Technology for PWR
Fuel Assembly

研究機關
韓國 에너지 연구소

寄贈	
同	一九八九年
地	六月
寄贈本	二十三日

科學技術處

提 出 文

科學技術處長官 貴下

本 報告書를 輕水爐核燃料 爐外實證試驗 技術開發" 課題의 最終報告書로
提出합니다.

1989년 5월 27일

研究機關名 : 韓國에너지研究所

研究責任者 : 鄭 文基

研 究 員 : 車 宗熙

梁 善奎

鄭 長煥

千 世寧

宋 哲和

鄭 興俊

元 順淵

趙 榮魯

金 福得

監修 委員 : 職級 : 責任研究員

姓名 : 石 鎬千

여 백

要 約 文

I. 題目

PWR 核燃料 爐外實證試驗技術 開發

II. 研究目的 및 重要性

본 연구의 목적은 國產 輕水爐核燃料의 성능을 평가할 수 있는 高溫. 高壓試驗 裝置를 설계. 제작하고, 시험기술을 개발하는데 있다.

국내에서 설계. 제조되는 改良核燃料의 熱水力學的 兩立性 및 健全性を 實證試驗을 통하여 보장하는 것은 核燃料 安全性 확보를 위해서도 매우 중요하다.

III. 研究內容 및 範圍

상기의 목적을 달성하기 위하여 2차년도 연구내용 및 범위는 다음과 같다.

1. 核燃料開發과 관련되는 熱流體 試驗施設 및 試驗技術에 관한 外國의 技術 자료를 수집. 검토하여 장치설계에 반영한다.
2. 미국 ANF社가 보유하고 있던 PWR 爐外實證試驗裝置를 도입하여 당 연구소의 核燃料開發計劃에 부합되도록 시험장치를 재설계하여 既存 Hot Test Loop 건물내에 건설한다.
3. LDV를 이용한 核燃料 副水路에서의 速度測定 技術을 개발하여, 5x5 燃料 棒다발에서의 流速分布 및 Spacer Grid의 流動特性을 평가한다.

IV. 研究結果 및 活用に 대한 建議

原子爐 운전조건하에서 실물크기의 PWR 核燃料集合體에 대한 壓力降下시험, 昇降力 측정시험, Fretting Corrosion 시험등을 수행할 수 있는 PWR-Hot Test Loop시설의 설치공사가 진행되고 있다. 본 시험시설은 既存 核燃料集合體(14x14 FA, 16x16 FA, 17x17 FA)에 대한 熱水力 實驗資料 생산뿐만 아니라 改良 核燃料集合體(KAFA-I, KAFA-II)의 爐外實證試驗에도 활용되도록 설계되었다.

核燃料集合體內에서의 流動現象을 관찰하기 위하여 5x5 燃料棒다발 규모의 시험장치(PWR-Cold Test Loop)를 설계. 제작하였다. Laser를 이용한 流速 測定技術을 개발하였고, 이 기술로 5x5 燃料棒다발의 副水路에서의 流速을 측정하여 Spacer Grid의 混合效果를 평가하였다. Laser Doppler Velocimeter 測定技術은 앞으로 개발될 Spacer Grid의 混合效果, 核燃料集合體間의 Cross Flow, 亂流모델 개발등에 응용될 것이다.

Summary

I. Project Title

Development of flow test technology for PWR fuel assembly

II. Objective and Importance of the Project

The objective of this project is to design and construct a high temperature and pressure flow test facility and to develop flow test technology for the evaluation of PWR fuel performance. For the nuclear fuel safety aspect it is of importance to evaluate the thermalhydraulic compatibility and mechanical integrity of a newly designed fuel through the design verification test.

III. Scope and Content of the Project

The main scope and contents of the project are :

- Survey and review the technical information on thermal hydraulic test facilities and associated test technology for the fuel development.
- Design and construction of PWR-Hot Test Loop facility based on the major equipment obtained from Advanced Nuclear Fuels Corporation for PWR fuel development program by KAERI.
- Development of a measurement technology for a flow velocity and turbulent intensity in subchannels of the 5x5 PWR rod bundles using Laser Doppler Velocimeter.

IV. Results and Proposal for Applications

The PWR-Hot Test Loop facility is under construction to be used to perform a pressure drop test, a lift force test and a fretting corrosion test of a fullsize PWR fuel assembly at reactor operating conditions. This facility was designed to be used to produce the hydraulic parameters of the existing PWR fuel assemblies (14x14 FA, 16x16 FA, 17x17 FA) and to verify a design of advanced fuel assemblies(KAFA-I and KAFA-II) developed by KAERI.

The PWR-Cold Test Loop facility with the 5x5 Rod Bundles in the test section was designed and installed to carry out the flow distribution study by means of Laser Doppler Velocimeter. The LDV techniques have been developed and used to measure the flow velocity and turbulent intensity for evaluating mixing effects of a newly designed spacer grid with and without mixing vanes, cross flow between the fuel assemblies and a turbulent model.

目 次

第 1 章 序 論	17
第 2 章 本 論	19
第1節 PWR - Hot Test Loop 設計, 製作	19
1. 概 要	19
2. 試驗裝置 導入計劃	19
3. PWR - Hot Test Loop 設計, 製作	23
4. THLF의 示方 및 運轉節次	28
第2節 LDV 測定技術 開發	77
1. 概 要	77
2. 副水路內 亂流現象의 理論的 背景	77
3. LDV에 의한 流速測定 原理	88
4. 散亂粒子가 Doppler信號에 미치는 영향	91
5. 測定體積 變位에 대한 修正	92
6. 實驗結果 및 考察	96
7. LDV 測定技術의 추후 活用方案	97
第3節 KWU의 熱水力 設計 및 爐外試驗	115
1. 概 要	115
2. 熱水力 設計 및 解析	115
3. 爐外試驗	124
第4節 불란서의 核燃料 爐外試驗 現況	135
1. 概 要	135
2. OMEGA 試驗施設	135
3. GRAZIELLA 試驗施設	139
4. HYDROMEL 實驗施設	142
5. HYDROMEL-Laser 實驗施設	144

6. EDVIGE 實驗施設	-----	151
第 3 章 結論 及 建議事項	-----	223
參考文獻	-----	225
附 錄 THLF 運轉節次	-----	227

表 目 次

1-1	PWR - Hot Test Loop Reassembling Schedule -----	56
4-1	T/H Test Facilities for the PWR Fuel Qualification in CENG -----	156
4-2	Mass Flowrate Scaling Factor (K) between Water and Freon -----	157
4-3	Range of the CHF Test Parameters in GRAZIELLA -----	157
4-4	Mixing Coefficients for the Different Type of Grids Tested in GRAZIELLA-1 Loop -----	158
4-5	Mixing Coefficients Determined from the Measured Concentration of Fluorescent Tracer in HYDROMEL -----	159
4-6(a)	Average Values of Velocity Components, their Fluctuating Components & Turbulent Kinetic Energy in Configuration-1 -----	160
4-6(b)	Average Values of Velocity Components, their Fluctuating Components & Turbulent Kinetic Energy in Configuration-2 -----	161
4-6(c)	Average Values of Velocity Components, their Fluctuating Components & Turbulent Kinetic Energy in Configuration-3 -----	162

여 백

그림 목차

1-1	THLF Simplified Flow Diagram -----	57
1-2	THLF Piping Plans -----	58
1-3	THLF Piping Elevations -----	59
1-4	PWR - Hot Test Loop Isometric Diagram -----	60
1-5(a)	Map of PT and VT Inspection Areas for PWR - Hot Test Loop (I) -----	61
1-5(b)	Map of PT and VT Inspection Areas for PWR - Hot Test Loop (II) -----	62
1-6	Pit in PWR - Hot Test Loop Building -----	63
1-7	PWR - Hot Test Loop Piping Plan -----	64
1-8	PWR - Hot Test Loop Piping Elevations -----	65
1-9	Typical Inner Structure of THLF Test Chamber -----	67
1-10	Instrumentation of PWR - Hot Test Loop -----	69
1-11	Differential Pressure Transmitter Manifold of PWR - Hot Test Loop -----	71
1-12	Power Supply System of PWR - Hot Test Loop -----	72
1-13	Pump Cooling Water Circulation System -----	73
1-14	Pump Seal Circulation System -----	73
1-15	Pressurizer Vessel -----	74
1-16	Loop Heater Vessel -----	75
1-17	Schematic Diagram of Loop Water Sample Station -----	76
2-1	Dual Beam Laser Optic Alignment (Forward Scattered Alignment) -----	99
2-2	Photography of Test Section & LDV System -----	100

2-3	Schematic Diagram of Dual Beam LDV System Showing Fringe Pattern -----	101
2-4	Unfiltered Doppler Burst from Photodetector (Tracer is Inverted, 50 Ohm Termination) -----	102
2-5	Doppler Signal and Pedestal Component of Doppler Burst -----	103
2-6	Filtered Output of the Amplified Filtered Doppler Signal (Low Limit Set Correctly Removing All of the Pedestal Component of the Raw Signal) (50 Ohm Termination) -----	103
2-7	Photography of LDV System & Acquisition System -----	104
2-8	Probability Distribution Function -----	105
2-9	5x5 PWR Fuel Assembly Test Section -----	106
2-10	Refraction of Laser Beam by Window and Medium -----	107
2-11	Axial Locations of Velocity and Turbulent Intensity Measurements -----	108
2-12	5x5 Spacer Grid Fabricated from the KWU 14x14 Spacer Grid -----	109
2-13	Axial Velocity Distribution at $L/D_h=20$ -----	110
2-14	Axial Velocity Distribution at Transverse Measuring Direction A with Variation of Axial Location -----	111
2-15	Turbulent Intensity Distribution at $L/D_h=20$ -----	112
2-16	Turbulent Intensity Distribution at Transverse Measuring Direction A with Variation of Axial Location -----	113
3-1	Test Setup of LDV -----	130
3-2	Test Assembly & Circuit Design of the Apparatus -----	131
3-3	Typical Pressure Loss along the Test Bundle -----	132
3-4	Experimental Setup of the Test Loop -----	133

3-5	Position of Measurement Attached to each Traverse	----	134
4-1	Specified Flow Diagram of the OMEGA-1 Loop	-----	163
4-2	5x5 Rod Array & Ceramic Inner Body in Test Section of OMEGA-1 Loop	-----	164
4-3	Thermocouple Positions in Subchannels for Guide Tube Cell in OMEGA-1 Loop	-----	165
4-4	Thermocouple Positions in Rod Wall for Guide Tube Cell in OMEGA-1 Loop	-----	165
4-5	Test Fuel Bundle in OMEGA-1 Loop	-----	166
4-6	Test Results under High Heat Flux Conditions	-----	167
4-7	Geometry of Two Types of Mixing Vane for Guide Tube Cell Tested in OMEGA-1 Loop (Run 3000 - 4000)	-----	168
4-8(a)	Variation of the Parameter ξ in 1st Subchannel for Two Types of Grid in OMEGA-1 (Run 3000-4000)	-----	169
4-8(b)	Variation of the Parameter ξ in 2nd Subchannel for Two Types of Grid in OMEGA-1 (Run 3000-4000)	-----	170
4-8(c)	Variation of the Parameter ξ in 3rd Subchannel for Two Types of Grid in OMEGA-1 (Run 3000-4000)	-----	171
4-8(d)	Variation of the Parameter ξ in 4-th Subchannel for Two Types of Grid in OMEGA-1 (Run 3000-4000)	-----	172
4-8(e)	Variation of the Parameter ξ in 5-th Subchannel for Two Types of Grid in OMEGA-1 (Run 3000-4000)	-----	173
4-9(a)	Effects of Grid Type on DNB in OMEGA-1 (I)	-----	174
4-9(b)	Effects of Grid Type on DNB in OMEGA-1 (II)	-----	175
4-9(c)	Effects of Grid Type on DNB in OMEGA-1 (III)	-----	176
4-9(d)	Effects of Grid Type on DNB in OMEGA-1 (IV)	-----	177
4-10	Flow Diagram of the GRAZIELLA-2 Loop	-----	178
4-11	Geometries of APWR Rod Bundle for CHF Test (Tight & Triangular Lattice)	-----	179

4-12	Comparison of the Test Results for Normal(1) and Cut(2) Spacer Grids of Westinghouse Type (GRAZIELLA-1 ; Run 6300-6400) -----	180
4-13	Comparison of the Test Results for Normal(1) and Modified(2) Spacer Grids of AFA Type (GRAZIELLA-1 ; Run 6500-6600) -----	181
4-14(a)	Comparison of Results Measured in GRAZIELLA-1 and Calculated by FLICA Code for Typical Cell -----	182
4-14(b)	Comparison of Results Measured in GRAZIELLA-1 and Calculated by FLICA Code for Guide Tube Cell -----	183
4-15	DNB Test Results for AFA Spacer Grid with AFA- & Westinghouse-Type Mixing Vanes (GRAZIELLA-2 ; Run 6900) -----	184
4-16	Four Types of Spacer Grid for Mixing Test in HYDROMEL Loop -----	185
4-17	Mixing Test Results for 4 Types of Spacer Grid in HYDROMEL -----	186
4-18	Profile of Concentration Measured in HYDROMEL & its Reconstruction by FLICA Code for W-Type Standard Spacer Grid -----	187
4-19	Profile of Concentration Measured in HYDROMEL & its Reconstruction by FLICA Code for AFA Spacer Grid ----	188
4-20	Measured Concentration Distributions for Standard- Type Spacer Grid in HYDROMEL -----	189
4-21	Schematic Diagram of the HYDROMEL-Laser Loop -----	190
4-22	Regulation of Flow Rate & Temperature in HYDROMEL-Laser Loop -----	191
4-23	Test Section of the HYDROMEL-Laser Loop -----	192
4-24	Assembly of the Test Section (HYDROMEL-Laser) -----	193
4-25	5x5 Rod Array in Test Section (HYDROMEL-Laser) -----	194
4-26	Adaptive Piece in Test Section (HYDROMEL-Laser) -----	195

4-27	Spacing Device of Fuel Rods & Geometry of Simulated Fuel Rod -----	196
4-28	Laser Beam Path in LDV System -----	197
4-29	Traversing System of Fiber Optics in LDV System -----	198
4-30	Transmission Curve for Laser in Plexiglass -----	198
4-31	Definition of the Coordinate System for Velocity Measurement -----	199
4-32	Comparison of Velocity Profile in Different Sections Perdicular to the Beam Direction (Preliminary Test No. 1) -----	200
4-33	Comparison of Velocity Profile in Different Sections of Beam Direction (Prelim. Test No. 1) -----	201
4-34	Flow Diagram of the EDVIGE Loop -----	202
4-35	Test Section of the EDVIGE Loop -----	203
4-36	1st Loading Configuration of Test Assemblies -----	204
4-37	2nd Loading Configuration of Test Assemblies -----	205
4-38	3rd Loading Configuration of Test Assemblies -----	206
4-39	AFA Type of Spacer Grid -----	207
4-40	AFA Type of Spacer Grid with Mixing Vanes -----	208
4-41	1x1 Type of Spacer Grid for X1 Fuel Assembly -----	209
4-42	2x1 Type of Spacer Grid for X1 Fuel Assembly -----	210
4-43	Detailed View of Dimples, Mixing Vanes in Cells & a Fuel Rod -----	211
4-44	Frame Work of Test Fuel Assembly -----	212
4-45	Origin of the Velocity Measuring Fields -----	213
4-46	Axial & Transverse Components of Velocity -----	213
4-47	Measuring & Data Acquisition System -----	214

4-48	Transversing Paths of the Laser Beam	-----	215
4-49(a)	Mean Values of Axial Velocity Component in Each Location of the Configuration-1	-----	216
4-49(b)	Mean Values of Axial Velocity Component in Each Location of the Configuraion-2	-----	217
4-49(c)	Mean Values of Axial Velocity Component in Each Location of the Configuraion-3	-----	218
4-50(a)	Representative Amount of Turbulent Kinetic Energy in Each Location of the Configuraion-1	-----	219
4-50(b)	Representative Amount of Turbulent Kinetic Energy in Each Location of the Configuraion-2	-----	220
4-50(c)	Representative Amount of Turbulent Kinetic Energy in Each Location of the Configuraion-3	-----	221
4-51	Results for the Data Reproducibility Test for Configuraratation-2 ($U_q = 6$ m/sec)	-----	222

第 1 章 序 論

核燃料에서 발생하는 熱을 效率的으로 제거시킬 수 있도록 새로운 구조를 갖는 核燃料集合體를 개발하는 것과 爐心の 熱傳達機構를 보다 정확히 해석하는 방법을 개발하여 原子爐 熱的余裕度를 향상시키는 것등은 에너지資源의 효율적 활용을 위해서나 原子爐 安全運轉을 위하여 필요한 일이다. 이를 위하여 核燃料集合體의 熱水力特性을 실험을 통하여 평가한다는 것은 매우 중요한 연구과제라 하겠다.

당 연구소에서 처음으로 설계, 제조한 月城爐型 核燃料의 爐外實證試驗을 수행하기 위하여 CANDU-Hot Test Loop을 설계, 제작한 바 있다. 月城爐型 核燃料의 국산화 사업의 성공에 이어 輕水爐核燃料 국산화 사업이 본격적으로 추진되고 있다. 당 연구소에서 설계한 核燃料集合體는 KNFC에서 제작하게 된다. 따라서 국내에서 설계, 제조되는 核燃料集合體의 性能 및 健全性を 평가할 수 있는 輕水爐 核燃料 高溫, 高壓 流體流動 試驗施設이 필요하게 되었다.

본 연구과제는 1차적으로 高溫, 高壓 流體流動試驗裝置인 PWR-Hot Test Loop을 설계, 제작하고, 관련 熱流體 試驗技術을 개발하는데 그 목적을 두었다. 既存 Hot Test Loop 시설은 CANDU 原子爐의 運轉條件 즉, 溫度, 壓力, 流量 및 水質등을 모의할 수 있는 시설로서 CANDU 核燃料의 熱水力學的 및 機械構造的 性能을 평가하기 위하여 건설된 국내 유일한 高溫, 高壓 試驗裝置이다. 본 사업의 초기에는 既存 Hot Test Loop에 연결하여 6x6 燃料棒다발 규모의 PWR 試驗部를 증설할 계획으로 시험부의 기본 및 상세설계를 완료하였으나 미국 ANF社로 부터 Fullsize PWR 核燃料集合體의 爐外實證試驗裝置(THLF: Thermal Hydraulic Loop Facility)를 도입하여 설치하기로 계획을 변경하였다. 미국의 ANF社는 核燃料 製造 및 核燃料 試驗을 수행하여 왔으나 서독의 Siemens의 KWU社와 합병되었으므로, KWU社와 중복

하여 보유하고 있던 시험장치를 해체할 계획이었다. 그러므로 ANF社에서는 본 시험장치 해체에 따르는 제반 비용만 부담한다면 KAERI에 양도할 용의가 있음을 통보하여 왔고 당 연구소에서는 이를 적극적으로 검토한 후 도입을 결정하였다. 현재 본 시험장치를 당 연구소의 核燃料試驗計劃에 맞도록 재설계하여 증축된 PWR-Hot Test Loop 건물내에 89년 하반기 완공목표로 설치공사가 진행되고 있다. 본 시험장치, PWR-Hot Test Loop는 既存 核燃料集合體의 熱水力 實驗資料 생산뿐만 아니라 改良核燃料集合體 개발에도 활용될 것이다.

본 보고서의 第2章 第1節에는 PWR-HTL의 재설치를 위해 추진된 과정, 시험시설내용 및 시험시설 운전방법등에 관하여 전반적으로 간략히 기술하였다. 제 2절에는 Laser Doppler Velocimeter를 이용하여 5 x 5 PWR 핵연료집합체에서의 유속 분포측정실험 내용을 기술하였다. 또한 서독 KWU의 핵연료노외시험 자료를 수집. 검토한 내용은 제 3절에 기술하였고, 블란스에서의 핵연료개발관련 연구내용은 제 4절에 간략히 기술하였다.

第 2 章 本 論

第1節 PWR-Hot Test Loop 設計. 製作

1. 概要

국내에서 설계, 제조되는 PWR 核燃料集合體에 대한 性能 및 健全성은 원자로 운전 조건하에서 水力學的 流動試驗을 통하여 평가되어야 한다. 이를 위해서는 爐外實證試驗施設이 확보되고 測定技術이 개발되어야 한다.

본 사업의 1차년도에는 月城爐型 核燃料 爐外實證試驗에 활용된 高溫. 高壓流體 流動試驗施設인 Hot Test Loop을 개조. 확장하여 PWR 核燃料試驗에 이용하기 위해 既存 主循環펌프의 용량부족을 고려하여 6x6 核燃料다발 규모의 PWR Test Rig를 설계. 설치하고자 하였으나 미국 ANF社로 부터 Fullsize PWR 核燃料 爐外實證試驗裝置인 THLF를 양도받기로 결정함에 따라 2차년도인 당해년도에는 THLF의 주요장비를 도입하여 KAERI의 核燃料開發 計畫에 부합되도록 다시 설계하여 PWR-Hot Test Loop 건물내에 건설하기로 하였다. 이장치는 既存 CANDU 核燃料試驗裝置와 구분하기 위하여 당분간 PWR-Hot Test Loop 이라고 기술한다. 여기에서는 PWR-Hot Test Loop의 재설치를 위하여 추진된 과정, 시험시설내용 및 시험시설 운전방법등에 대해 기술하였다.

2. 試驗裝置 導入計劃

가. THLF 試驗裝置 概要

본 장치는 Fullsize PWR 核燃料集合體의 爐外實證試驗裝置로써 실제 원자로의 고온, 고압, 유량 및 수질등 流體流動條件을 모의하여 核燃料集合體에 대한

압력강하시험 및 核燃料集合體를 구성하는 각 부품에 대한 Fretting Corrosion 시험등을 수행할 수 있다.

이 장치의 주요 運轉變數는 다음과 같다.

- 流量 23~500 m³/hr
- 壓力 3.5~176 kgf/cm²
- 溫度 327 °C Max.
- 循環用水 De-Ionized Water
- 系統安全밸브 設定 壓力 181 kgf/cm²
- 試驗部 Reynolds 數 ≤ 5x10⁵
- 試驗部 壓力測定탭 개수 24개

그림 1-1에 THLF의 Flow Diagram을 나타낸다.

본 시험장치는 순환펌프, 수직시험용기, 용수가열기, 가압기, 열교환기 및 주입펌프로 구성된 주 Loop 계통과 순환용수 水質處理系統으로 크게 나눌 수 있다. 주 Loop 계통에는 고온.고압의 용수가 흐르고 수질처리계통에서는 常溫.常壓의 용수가 흐르게 되어있다. 주 Loop계통의 모든 배관 및 구성장비는 Stainless 鋼으로 되어있다. 본 장치는 ASME Boiler and Pressure Vessel Code. Section VIII에 의해 설계되었고 그동안 매 2년마다 주기적으로 公認機關에서 점검을 받아왔다.

나. 裝置導入 契約內容

본 연구과제 평가에서 실물크기의 PWR 核燃料 試驗施設의 필요성이 강조되었고 또한 輕水爐核燃料事業部에서도 실물크기의 核燃料集合體에 대한 시험을 당시에 요구한 바 있다. 그리고 PWR 核燃料 改良을 위한 연구가 본격적으로 추진되면 改良核燃料集合體인 KAFA-I과 KAFA-II의 Fullsize 核燃料 爐外實證試驗이 필요하게 될 것이다. 그러나 既存 Hot Test Loop 시설로는 Fullsize PWR 核燃料

試驗條件을 만족시킬 수 없는 실정이다.

THLF의 도입으로 새로운 Fullsize 核燃料試驗裝置를 설계, 제작하는데 소요되는 예산의 10분의1에 해당되는 비용으로 장치를 설치할 수 있게 되었다.

KAERI와 ANF社간의 THLF 장치도입계약은 '88년 9월 12일 締結되었다. 계약 내용중 주요내용을 요약하면 다음과 같다.

- THLF 시설 및 기술제공 내역

- THLF을 구성하는 모든 장치 및 계측장비, 장치의 보조시설인 鐵骨 構造物 및 크레인과 ANF가 소유하는 본 장치에 관련되는 모든 Spare Part, 工具 및 補修裝備를 양도받기로 하였다. 단 2" 이하 의 Stainless 鋼製 配管 및 Fitting류는 국내에서 구하기가 용이하고 새로운 것을 사용하는 것이 장치 재설치시 보다 효율적이기 때문에 양도받지 않기로 하였다.
- THLF에 관한 설계, 제작관련 圖面 및 文書, 運轉, 補修관련 記錄 및 文書, 시험자료 처리용 Software Program등의 모든 기술자료를 제공받도록 하였고 운전 및 整備節次書는 ANF社가 새로이 작성, 제공 하기로 하였다.
- KAERI Site에서의 THLF 再設置 공사기간중 ANF社의 專門家가 1주간씩 3번 방문하여 設置作業에 대한 指導 및 技術諮問을 수행하도록 하였으며 장치설치 완료후에도 ANF 전문가에 의해 4주간 運轉技術 訓練을 받도록 하였다.

- 契約金額 및 支拂方法

THLF 도입, 설치 및 기술자문 등에 소요되는 總額은 356,000 불이며 그중 KAERI에 시험장치가 도착한 후 256,500불을 지불하고 시험장치설치 技術諮問, 運轉技術 訓練등 모든 契約業務가 완료되면 나머지 99,500불을 지불하기로 하였다. 또 시험장치의 KAERI Site까지의 運搬費 및 保險料는 ANF사가 부담하기로 하였다.

- 계약조건

시험장치의 分解 및 包裝作業時와 KAERI Site 까지의 運送時에 발생할 수 있는 장비의 損傷 또는 紛失은 ANF社가 修理 또는 再供給을 보장하기로 하였다.

다. 試驗裝置導入 推進經緯

본 시험장치의 도입과 관련 그동안의 추진경위를 요약하면 다음과 같다.

- ANF社로부터 試驗裝置 分解등 제반비용만 부담하면 KAERI에 양도하겠다는 것을 통보받았고 따라서 ANF社에 裝置讓渡에 대한 Proposal을 보내달라고 요청하였다.(88년 3월)

- ANF社로부터 Proposal을 접수하고 技術的인 內容 및 導入 妥當性을 연구소 내 相關부서와 협의하였다.(88년 4월)

- 본 시험장치 도입을 위하여 연구소 소장의 결재를 받았다. (88년 5월)

- 시험장치의 補修.維持狀態 및 主要부품 作動狀態를 현장에서 확인하고 시험장치도입 타당성 및 技術적 問題점등을 검토. 협의하기 위해 KAERI 전문가를 ANF社로 파견하였다.(88년 6월)

- 본 시험장치 도입을 과학기술처 과학기자재 조정위원회로 부터 승인받았다. (88년 8월 29일)

- 시험장치 도입결정에 따라 장치의 分解 및 包裝 輸送作業에 직접 참여하여 장치의 各 構造나 特性 및 運轉.補修 技術을 파악하고 KAERI Site 再設置時의 問題점을 협의하기 위해 KAERI 技術자 2명을 ANF사에 파견하였다. (88년 8월 31~ 10월 9일)

- 본 시험장치의 도입계약서에 최종 서명하였다.(88년 9월 12일)

- 과학기술처에 본 특성연구과제의 연구내용중 일부 변경승인 요청을 하였고 아래와 같이 승인을 받았다.(88년 10월 31일)

연구내용중.

- 5x5 핵연료집합체의 고온
고압 유체유동시험장치
제작.설치 완료

- Fullsize 핵연료집합체의
고온.고압 유체유동장치
제작.설치

• 시험장치가 KAERI Site에 도착하였고 따라서 현재 시험장치 本體와 Spare Part, 工具類등을 포함한 모든 장비 및 관련 技術資料를 인수 받았다.(88년 12월 21일)

3. PWR-Hot Test Loop 設計.製作

가. 試驗裝置 分解作業

ANF社에서의 裝置分解 및 包裝作業은 88년 8월 중순부터 2개월간 수행되었는데 이 시기에 맞춰서 KAERI 기술자 2명을 8월 31일부터 6주간 ANF社 현장에 파견하여 KAERI와 ANF社 기술자의 협의아래 작업을 수행하도록 하였으며 KAERI Site에 再設置時的 技術的인 問題點에 대해 ANF 기술자로 부터 諮問을 받았다. 동시에 장치의 각 구조나 특성, 운전, 보수기술 및 관련되는 모든 기술자료를 검토.파악하였다.

본 장치와 같은 고온.고압으로 운전되는 시험시설은 性能保存을 위해 구조나 配管系統등의 변경없이 그대로 再設置할 수 있도록 分解方法이나 配管 切斷位置를 고려해야 한다. 그림1-2 및 1-3은 ANF에 설치되어 있는 본 장치의 設置圖面을 보여준 것이다. 장치크기는 높이 13 m, 東西間 및 南北間 거리는 각 8 m 규모이며 KAERI PWR-Hot Test Loop 건물의 유효넓이는 높이는 깊이 2 m의 Pit를 포함해서 15 m, 東西間 및 南北間 거리가 각각 8 m 및 10 m가 되므로[1] 본 장치를

그대로 기존 건물에 설치가 가능하다.

본 장치의 수질처리계통은 常溫.常壓의 用水가 흐르고 모두 2" 이하의 小形 配管을 사용하고 있으며 배관 재질도 거의 PVC로 되어있기 때문에 재설치시 각 장비나 부품의 配置 및 배관길이의 약간의 변경은 장치의 시방 및 성능에 영향을 미치지 않으므로 配管 分離 및 切斷位置의 결정에는 문제가 없었다. 주 Loop 계통은 운전조건이 高溫.高壓이고 大口徑 配管을 사용하고 있기 때문에 배관길이 나 Line 변경은 配管系統에 작용하는 應力의 크기 및 分布의 변화가 야기되고 裝置의 安全性에 문제가 생길수도 있다. 그림 1-4에 주 Loop-계통의 Isometric Drawing을 보여준다. Orifice 流量計에서 垂直試驗容器 입구까지의 배관, 垂直試驗容器 및 用水加熱器는 Grayloc Flange로 연결되어 있어 분리할 수 있었으나 순환펌프를 분리하기 위해 펌프의 吸入 및 排出配管에서 펌프와 배관의 連結部分의 水平 配管 부위를 切斷하였다. 加壓器, 再生熱交換器 및 冷却 熱交換器등은 2" 이하의 배관으로 연결되어 있기 때문에 절단 개소 결정에 어려움이 없이 적당한 위치에서 절단하였다. 따라서 再設置時 切斷部分을 다시 溶接하면 주 Loop 계통은 原形 그대로 설치되고 배관의 切斷, 再溶接으로 인해 짧아지는 배관길이는 수 mm 정도가 되므로 배관의 熱膨脹에 의해 熱應力에 미치는 영향은 무시할 수 있다.

주 Loop 계통의 배관계통은 분해된 후 그 健全성을 조사하기 위해 비파괴 검사가 수행되었다. 檢査方法은 Penetrant Test(PT) 및 Shearwave Ultrasonic Test(UT)가 사용되었다. PT는 配管溶接部 內壁에서 表面 Crack의 발생이 예상되는 개소에 대해 실시되었으며 UT는 10" 및 16" 배관, 加壓器의 2" 連結配管 및 再生/冷却 熱交換器 配管溶接部들에 대해 실시되었다. 그림 1-5(a),(b)에 비파괴 검사부위를 보여준다. 가압기 연결배관은 應力解析結果 본 장치에서 最大 應力이 걸리는 부위이며 열교환기의 배관은 과거에 Crack이 발견된 개소이다. UT에서

10" 배관의 Elbow 용접부 2개소에 약간의 이상이 발견되었으나 Boroscope에 의한 配管内壁에 대한 肉眼觀察 결과 이는 溶接表面의 形狀에 기인한 것으로 판명되었다. 다른 부위에서는 PT 및 UT 어느것이나 이상이 없었다.

순환펌프를 펌프 基礎臺에서 분리하려고 하면 펌프 케이싱, 펌프모터, 각종 펌프 冷却系統등 펌프구성 부품을 모두 분해하여야 하고 펌프의 再組立.設置時 기술적 어려움이 예상되었기 때문에 펌프가 설치된 상태로 基礎臺를 건물 바닥에서 떼어내었다.

본 장치의 분해된 부품, 자재, Spare Part, 공구 및 관련 가자재의 분량은 40 Feet Container 2대 및 20 Feet Container 1대가 되었다.

나. 試驗裝置 再設置 作業

본 시험장치는 PWR-Hot Test Loop 건물의 内部構造物의 변경 없이도 裝置 原形 그대로 설치가능하다. 그림 1-3에 보여준 바와 같이 垂直試驗容器가 깊이 약 5.2 m의 Pit 속에 설치되어 있어 그럴 경우 200 馬力の 大形 순환펌프 및 기타 제반 기기들이 地上 약 3 m의 위치에 설치될 수 밖에 없으며 이는 기기의 振動 및 펌프 基礎臺 製作上 고도의 技術的 및 經費의 문제점이 야기될 수 있다. 따라서 既存 施設內에 地下로 약 3 m의 Pit를 추가 설치하는 것이 본 장치의 原形 維持 및 性能保存을 위해 유익한 것으로 판단되었고 Pit 설치에 따라 水質處理系統의 機器配置는 약간 변경되었다. Pit, 각 기기의 배치, 鐵骨, Platform 및 電源系統에 대한 설계는 장치 분해시 현지에서 작성한 概念設計를 기본으로 하여 당 연구소 건설기술실과 공동으로 수행하였으며 주 Loop 계통 및 計裝系統등 나머지 裝置設置에 필요한 設計圖面 및 관련 技術資料는 ANF社에서 인수받은 것을 그대로 사용하였다. 장치 시공회사의 선전 및 공사계약 업무등은 건설기술실이 맡았다.

裝置設置工事は 89년 1월 Pit 공사를 시작으로 8월 3일 完工目標로 진행 되고 있다. 또 機器設置工事 기간중 ANF社의 전문가가 1주간씩 3번 방문하여 설치작업에 대한 기술자문을 받게 되어 있으며, 장치 설치후의 試運轉時 에도 ANF 전문가에 의한 運轉技術 訓練을 받을 예정이다. 표 1-1은 裝置設置工사의 日定表를 보여주고 있다.

PWR-Hot Test Loop 건물에는 깊이 2 m의 Pit가 설치되어 있으나 위에서 기술한 바와 같이 試驗裝置의 原形維持 및 性能保存을 위해서는 既存 Pit內에 추가로 깊이 3.2 m의 Pit를 설치하기로 하였다.

그림1-6에 Pit의 工事圖面을 나타낸다. Pit의 위치 및 크기는 既存 建物の 기둥基礎 部分을 피해야 하고 Pit의 側面에서 밀려들어 오는 土砂를 막아 건물의 基礎에 영향을 주지 않도록 Pit 주위에 CIP를 박아야 되며 試驗裝置와의 適合性を 고려해야 되는등 제한을 받아 ANF 현장의 Pit 보다 약간 작아졌으나 장치설치 및 運轉補修 作業에 필요한 공간은 충분히 확보되었다.

그림 1-4에 보여준 바와 같이 주 Loop 계통의 배관은 10" Sch. 140 및 16" Sch. 140인 大口徑管으로 되어있고 이러한 배관은 熱膨脹에 의한 熱應力에 대해 충분히 고려되어야 한다. 배관계통을 고정하는 Anchor는 주순환펌프, 시험용기 및 가압기 부위의 3군데이며 펌프 흡입 및 배출배관과 순환용수 가열기에 Spring Hanger를 걸어 裝置荷重과 熱應力을 적절하게 分散시키는 구조로 되어있다.

본 장치의 설치도면을 그림 1-7 및 1-8에 나타낸다. 주 Loop 계통은 원형 그대로 설치된다. 순환펌프는 건물 北西쪽에 위치하며 펌프 排出配管 및 垂直試驗容器는 이번에 추가될 Pit 속에 설치된다. 再生熱交換器 및 冷却熱交換器는 建物 北側壁에 설치되고 이들과 主 配管을 연결하는 배관은 熱膨脹을 고려하여 建物 東側壁과 北側壁에 따라 180° 크게 돌아서 연결된다.

循環用水 水質處理系統 즉, 用水貯藏탱크, 循環用水處理펌프, 注入펌프 및

脫-이온化裝置등은 既存의 2 m 깊이의 Pit 바닥에 설치되나 이들의 배치는 原形과 유사하게 설계하였다.

본 장치의 보수 및 核燃料集合體를 裝填하기 위한 試驗容器的 分解.組立作業을 위해 Pit속 지하 3 m, 1층, 지상 2.5 m 및 지상 4.7 m의 위치에 Platform이 설치된다.

시험용기의 분해.조립 및 核燃料集合體의 移送를 위해서는 既存 建物の 천정에 5 Ton級 機重器를 설치하였다.

그림 1-9는 ANF社에서 인수받은 전형적인 試驗容器 内部構造 圖面이다. 시험용기 내부는 원자로 爐心入口의 流動條件을 모의하기 위한 Flow Diffuser와 下部爐心板, 한개의 Fullsize 核燃料集合體가 장전되는 4角形 試驗流路, 核燃料集合體를 상부에서 고정하기 위한 Flow Extension Assembly 및 壓力測定管 遮蔽板으로 구성되어 있다. 試驗流路의 벽에는 壓力측정탭들이 설치되어 있으며 壓力測定管에 연결된 壓力측정관은 試驗流路和 試驗容器 內壁사이를 따라 壓力測定管 遮蔽板 부분에서 壓力측정관 Head를 통해서 시험용기 외부로 유도된다. 構造物中, 核燃料集合體의 型式에 관계없이 공동으로 사용되는 4각형 시험유로 및 壓力측정관 차폐판을 ANF社에서 인수받았으며 나머지 구조물은 國內 原子力發電所의 原子爐 内部構造物에 맞도록 KAERI에서 설계.제작하여야 한다. 현재 ANF社에서 수집한 Westinghouse 原子爐의 核燃料集合體에 대한 제작도면을 기초로 하여 國產 核燃料集合體에 맞도록 설계작업을 진행하고 있다.

본 장치의 運轉 및 計測計裝系統은 변경없이 그대로 설치된다. 따라서 計裝 工事圖面이 그대로 사용된다. 그림 1-10에 運轉計裝系統의 設置圖面을 보여준다. 운전계장계통의 자세한 내용은 第4節 THLF의 시방에 기술하였다. 差壓測定系統의 設置圖面을 그림 1-11에 나타낸다. 본 장치의 差壓測定 즉, Orifice 流量計에서의 差壓 및 試驗部の 差壓測定에는 3개의 差壓 發信器가 마련되어 있어 分岐밸브

의 操作으로 필요한 부위의 차압을 측정하게 되어있다.

PWR-Hot Test Loop 施設에 사용되는 電源은 115V 單相 및 440V 3相이며 필요한 最大 電力은 약 420 kW이다. 115V 電源은 PWR-Hot Test Loop 건물 건설시 설치된 一般電源이 사용되고 計裝系統 및 기타 補助裝備에 공급된다. 440V 電源은 既存 Hot Test Loop가 440V 電源을 쓰고 있으므로 既存 電源系統에서 分岐시켜 공급하도록 하였다. 그림 1-12에 본 시설의 電源供給系統도를 나타낸다. 既存 電源系統은 연구소 變電室로 부터 6.6 kV, 1,200A 용량의 電源을 既存 Hot Test Loop의 NB-101에 공급받아 NB-102A와 NB-102B로 分岐된 후 각각 6.6 kV/440V 變壓器 및 既存 Hot Test Loop의 주순환펌프로 공급되고 있다. 變壓器에서 440V로 함압된 電源 Line에 새로 配電盤을 증설하여 既存 Hot Test Loop 電源과 PWR-Hot Test Loop 電源으로 分岐시켰다. PWR-Hot Test Loop로 分岐된 電源은 용수순환 펌프, 주입펌프, 용수처리펌프, 용수가열기, 가압기 및 SCR 제어 Unit로 공급된다

4. Thermal Hydraulic Loop Facility의 示方 및 運轉節次

가. Thermal Hydraulic Loop Facility의 示方

1) Thermal Hydraulic Loop Facility 概要

Thermal Hydraulic Loop Facility(THLF)는 원자로의 운전조건, 즉 온도, 압력, 유량 및 수질등을 모의하여 Fullsize PWR 核燃料集合體에 대한 壓力降下特性試驗 및 Fretting Wear 試驗을 수행하기 위한 核燃料爐外實證 流體流動試驗裝置이다.

THLF는 그림1-1에 나타낸 바와 같이 순환펌프, 수직시험용기, 열교환기, 용수가열기, 가압기 및 주입펌프등의 주요부품으로 구성되어 있고 보조시설로서 Loop 순환용수 수질처리를 위해 混合層 脫-이온化用水(Mixed Bed De-Ionized Water)

處理裝置, O₂ 제어를 위한 2실린더식 脫-이온化裝置(De-Ionizer) 및 脫-이온化用水 저장탱크가 마련되어 있다. 또 THLF는 2차 냉각수공급배관, 공기공급배관, 진공배관, 115V 단상 및 440V 3상 전원을 가지고 있으며, 각각 열교환기 및 펌프 냉각기에 냉각수, 空氣壓作動 계장기기에 공기, 계장장비, 전기가열기 및 각종펌프에 전원을 공급한다. Loop에서 脫-이온化用水가 흐르는 배관의 재질은 모두 300 계열의 스테인레스관으로 되어있다. Loop는 ASME Boiler and Pressure Vessel Piping Section VIII 및 ANSI Power Piping B31.1.0의 요구조건에 맞게 설계, 건설되었다. Loop의 설계변수는 다음과 같다.

壓力	176 kgf/cm ²
溫度	327 °C Max.
流量	500 m ³ /hr
循環用水	脫-이온化用水
系統安全밸브 設定壓力	181 kgf/cm ²

운전압력은 온도 16~316 °C에서 3.5~162 kgf/cm²의 범위이며 가열기에 삽입된 SCR 制御加熱器에 의해 수동 또는 자동으로 가압기내 유체의 飽和溫度를 변화시키므로써 조절할 수 있다. 압력측정용 배관에서 공기를 제거할 때와 같은 특별한 운전시에 대해서는 주입펌프 및 Feed and Bleed 운전 Mode를 사용하여 약 20 kgf/cm² 까지의 압력을 유지할 수 있다. 이 운전방법은 가압기내 유체온도가 飽和온도에 도달하면 사용해서는 안된다.

Loop의 설계유량 범위는 102 m³/hr에서 500 m³/hr이다. 유량은 Borg-Warner 사제 無段調節變速器에 의해 펌프 回轉速度를 증감하므로써 조절된다. 따라서 주 Loop는 유량제어용 밸브가 없는 배관계통을 가지고 있다. 순환펌프에서 배출된 순환용수는 유량측정 Orifice를 지나 核燃料集合體가 장전된 수직시험용기를 통과하고 수평으로 설치된 Loop 용수가열기를 거쳐 펌프에 되돌아 온다. Loop 순환용

수에는 脫-이온化用水가 사용되는데 수질을 유지하기 위해 용수의 일부는 펌프 배출배관에서 Bypass되어 再生熱交換器와 冷却熱交換器에서 냉각되고 Loop 순환 용수 수질처리계통을 거쳐 주입펌프에 의해 순환펌프 흡입측 배관에 돌아온다.

Loop 수질처리계통은 Loop 용수의 pH值를 통상 4.5~11.0 범위에서 조절하며 비콘덕턴스는 1 micromhos/cm 이하, 塩化物 濃度를 0.1 ppm 이하로 유지한다.

Loop 계장장비는 다음과 같은 변수를 감지, 기록한다.

Loop 流量	23 - 500 m ³ /hr
Loop 壓力	3.5 - 176 kgf/cm ²
差壓, 15.5 °C에서	0 - 25400 mm H ₂ O
加壓器壓力, 設定壓力	0 - 176 kgf/cm ²
Loop 溫度	常溫 - 343 °C
Loop 循環用水 pH	0 - 12 pH
電氣傳導度, 판넬에서	0 - 10 micromhos/cm
電氣傳導度, Demineralizer에서	0 - 200 micromhos/cm

2) 각 裝備概要 및 運轉

가) Loop 循環펌프 系統

(1) 概要 및 仕様

순환펌프는 7 Vane Impeller, 低水頭, 大容量 "Test Loop Booster" 圓心펌프이며 API Standard 610에 따라 제작되었다. 펌프 케이싱 및 Impeller의 재질은 應力 腐蝕을 고려하여 ASTM A-351(CF3/CF3A)로 되어있다.

펌프 주요사양은 다음과 같다.

United Centrifugal Pumps, Mfg.	Typ J8x17 HTC ES
	Serial No. 41524-1
펌프速度 制御範圍	300 - 1800 RPM
流量	102 - 500 m ³ /hr
水頭	58 m TDH
循環用水 温度範圍	16 - 343 °C
排出壓力	176 kgf/cm ² , Max.

펌프는 상기 범위에서 연속적으로 운전할 수 있으며 베어링, Seal 및 Gland 등에는 냉각계통이 마련되어 있다.

(2) Mechanical Seal

Loop 순환펌프의 1.750" 직경인 펌프軸에 대한 Mechanical Seal은 Crane Packing Co.의 Type 8B1 2 1/16" Dia, Tandem Package Seal을 사용한다. 이 Seal은 外側(Outboard) Seal과 內側(Inboard) Seal로 나누어져 있으며 각 Seal에는 냉각수 순환계통이 마련되어 있다. 각 냉각계통은 Graham Heliflow 열교환기에 의해 냉각된다. 外側 Seal 냉각계통은 Grove 압력 조절기에 의해 펌프吸入側 운전압력의 약 50% 로 가압된다.

(3) 펌프 變速器

펌프 油壓式 變速器에는 Borg-Warner, Model 445TSD-465B 無段調節 變速器를 사용하고 있으며 軸 速度出力을 300 RPM에서 1800 RPM 범위에 걸쳐서 제어할 수 있다. 주요사양은 다음과 같다.

無段調節變速 範圍	300 - 1800 RPM
潤滑油	Dexron ATF

潤滑油 容器容量	38 ℓ
最高運轉溫度	60 °C

(4) 變速器 連結手(Coupling)

펌프와 변속기의 연결에는 Watson WS-70 Flexible 변속기 연결수가 사용된다.

(5) 펌프 排氣(Vent)

Loop 용수 충전시, 펌프 케이싱은 펌프 케이싱 상부에 위치한 밸브를 통하여 배기된다.

(6) Seal Chamber의 排氣

Seal Chamber는 內側 및 外側 Seal 냉각수계통의 각 출구배관에서 가장 높은 위치에 설치된 배기밸브를 통하여 배기된다.

(7) Mechanical Seal 配管系統 運轉

Seal 배관계통에서 內側 및 外側 Seal 사이의 압력차는 일정하게 유지되도록 설계되어 있다. 外側 Seal에서 대기중에 漏水가 발생하면 壓力調節器가 열리고 外側 Seal 배관을 가압한다. 內側 Seal에서 外側 Seal에 漏水가 발생하면 背壓調節器가 열리고 외측 Seal 배관에서의 상승압력을 방출한다. 壓力調節器의 고장이 발생할 경우에는 펌프의 정지없이 Bypass 배관이 압력조절에 이용된다.

(8) 冷却系統

펌프 및 Mechanical Seal 냉각계통의 Flow Diagram을 그림 1-13 및 14에 보여준다. 펌프 베어링 및 축받이는 3/4" 2차 냉각수 배관으로 직접 차례로 냉각된다. 냉각수는 현장 流量指示計를 지나 연속적으로 배수된다.

內側 및 外側 Seal 냉각수 배관은 각각 Graham Heliflow, Model 8S4C10 열교환기를 통과하여 3/4" 2차 냉각수 배관으로 부터의 냉각수에 의해 냉각된다. 2차 냉각수는 현장 流量指示計를 거쳐 배수된다.

Stuffing Box Jacket의 냉각도 3/4" 2차 냉각수 배관에서의 냉각수가 사용되고 현장 流量指示計를 거쳐 배수된다. 펌프 변속기의 냉각에 사용되는 열교환기에는 별도로 2차냉각수가 공급되고 냉각수 배관은 공동 배수관에 연결되어 있다.

외측 Seal과 축패킹마게(Shaft Packing Gland) 사이의 貯藏容器는 異物質의 蓄積을 방지하기 위해 2차냉각수 배관에서의 물로 채워져 있다. 外側 Seal에서의 漏水는 이 저장용기에서의 Overflow로써 감지할 수 있다.

(9) 電子速度制御

Borg-Warner 變速器의 電子速度 制御系統은 속도제어기, 速度感知器 및 제어밸브로 구성되어 있다. 속도제어기는 설정 速度치와 실제 펌프軸速度를 비교하고 閉 loop 系統의 변속기 제어밸브를 전기적으로 조절하므로 원하는 出力速度를 유지한다. 제어기에서의 설정 속도치는 基本速度의 百分率로 고정된 電位差計에 의해 조절할 수 있다. 電位差計는 속도제어기 박스의 전면에 설치되어 있다.

제어밸브는 변속기의 클러치 機構에 걸리는 유압을 조절하고 펌프축에 전달되는 Torque를 제어한다. 제어밸브에서 Orifice 크기를 변경하면 設計速度 이하의 펌프속도제어가 가능하다.

速度感知器는 변속기 出力軸의 Multi-Toothed Gear와 非接觸 磁氣裝置로 구성 되어 있다. 非接觸型 磁氣裝置는 軸速度에 비례한 신호를 발생한다. 磁氣裝置는 외부전원을 필요로 하지않고 움직이는 부분이 없는것이 특징이다.

나) 加壓器 系統

(1) 加壓器容器(그림 1-15)

가압기용기는 ASTM-A312를 만족하는 10", Sch. 160, Type 304L 스테인레스강관으로 ASME Section VIII, Division I의 규격에 따라 제작되어 수직으로 설치되어 있다. 전체길이는 3156 mm이며 설계압력은 온도 354 °C에서 176 kgf/cm²이다. 제작회사는 Gray Tool Co., 이고 Serial No.는 Gray Tool V-5 이다.

(2) 加壓器 加熱器

가압기는 Watlow Electric Manufacturing Company에서 제작된 3개의 4 kW 加熱棒이 가압기용기 밑에서 삽입되어 있다. 加熱棒의 先端은 低水位時의 水面下 279 mm에 위치한다. 加熱棒은 약 10 W/cm²의 面出力密度로 설계되어 있다. 2개의 개-폐 스위치가 SCR 전원에 의해 제어되는 加熱棒의 개수를 제어한다. 2개의 스위치중 하나는 4 kW 부하에 연결되어 있고 다른 또 하나의 스위치는 8 kW 부하에 연결되어 있으므로 Loop 시동시나 Loop 加壓運轉時 등의 조건에 따라 4 kW, 8 kW 또는 12 kW의 부하를 사용할 수 있다.

(3) 加壓器 加熱器 制御

가열기 제어계통은 4-20 mA 출력을 가진 15-2500 psig Fischer-Porter Force Balance 壓力發信器, Honeywell Model R729JC 精密制御器 및 Robi-

con 480V, 단상, 30A SCR 電力制御器로 구성되어 있다. 가압기 운전시 精密制御器는 壓力變換器로 부터의 電氣出力 信號를 받아 설정치와 비교한다. 精密制御器의 制御出力은 加熱棒에 부하되는 SCR 전력을 제어한다.

(4) 加壓器 水位制御

수위제어계통은 Fischer-Porter 差壓發信器 및 Fischer-Porter Model 53PN4520 기록/제어장치로 구성되어 있다. 수위는 Loop 순환용수 Bleed 물과 주입펌프에 의한 Feed 물을 조절하여 원하는 수위로 연속적으로 유지된다. 수위는 Bleed 물보다 큰(작은) Feed 물로 공급하면 증가(감소)한다. 수위는 2개의 압력탭 사이의 壓力差가 수위에 따라 변하는 것을 差壓發信器로 측정하므로써 감시된다. 差壓發信器는 空氣壓信號를 기록/제어장치로 보내고 제어장치의 출력은 Moore Control에 전송된다. Moore Control은 Loop에의 用水注入流量을 증감하기 위해 주입펌프의 行程(stroke)을 조절한다.

(5) 가스充塡

Loop 압력을 제어하기 위해 가압기에 Gas를 주입하는 방법은 현재 사용하지 않는다.

(6) 計裝計測

가압기를 설계대로 운전하기 위해 계장계측 장비가 마련되어 있다. 水位測定發信器는 Fischer-Porter 수위 기록/제어장치 및 Hi-Lo 水位警報器에 연결되어 있다. 가압기에는 壓力變換器가 설치되어 있으며, 壓力變換器로 부터의 신호는 Honeywell R7295C 정밀제어기 및 電氣/空氣壓 信號 變換器로 보내진다. Honeywell 정밀제어기는 SCR 制御加熱器를 제어하며, 電氣/空氣壓信號 變換器에

보내진 전기신호는 空氣壓信號로 변환되어 Fischer- Porter 3 Pen 기록계에 전송되고 Loop 압력이 기록된다.

(7) 運轉 및 理論

Loop 압력은 가압기로 제어된다. Loop 압력을 증가시킬 때는 가압기 가열기로 가압기의 유체온도를 높이고 압력을 내릴때는 유체온도를 내린다.

다) Loop 加熱器 系統

(1) 加熱器 容器(그림 1-16)

Loop 가열기용기는 ASTM A312의 요구조건을 만족하는 16" Sch. 160, Grade TP304L 스테인레스강관으로 ASME Boiler and Pressure Vessel, Section VIII 규격에 따라 제작되고 수평으로 설치되어 있다. 容器設計壓力은 온도 354 °C 에서 176 kgf/cm²로 大氣壓과 354 °C 사이의 熱週期를 반복할 수 있도록 설계되어 있다.

(2) 加熱器 및 制御

가열기 용기의 先端에는 12개의 20 kW Immersion 가열봉을 삽입할 수 있게 되어있다. 현재 5개의 가열봉을 쓰고 있다. 각 가열봉은 판넬에서 遮斷器를 가지고 있으며 모든 가열봉은 SCR 제어장치로 부터 전력을 공급받는다.

(3) 計裝計測

가열기의 계장장비는 We11형 열전대, SCR 캐비넷에서의 전류계, 가열기 SCR 전원 및 溫度記錄計로 구성되어 있다.

(4) 運轉 및 理論

만약 가열봉을 덮을만큼 큰 기포가 있으면 가열봉 온도의 非定常的인 상승 또는 加熱線(Heater Wire)의 파손등을 초래하여 가열봉 수명이 단축된다. 가열기 용기에는 가열기를 운전하기 전에 용기에서 모든 공기를 배출할 수 있도록 용기의 상부에 排氣밸브가 설치되어 있다.

12개의 가열봉은 Loop 운전조건에 따라 적당한 갯수의 가열봉을 모아 최대 6개까지의 가열기 Bank로 나눌 수 있게 되어있다. 가열기 Bank중 하나는 수동 또는 자동으로 제어할 수 있는 SCR 전원을 가지고 있으며 자동 Mode 운전시에는 SCR 전원과 연결된 열전대 및 設定溫度 制御器가 Loop 온도를 제어한다. 3개의 가열기 Bank는 手動調節 SCR로 제어할 수 있게 되어 있다. 나머지 가열기 Bank 들은 手動 開-閉 遮斷器로 제어된다. 현재 5개의 가열봉을 쓰고 있으며 2개의 가열봉(한개의 가열기 Bank)은 手動 또는 自動制御機能을 가진 SCR 전원을 가지고 있고 3개의 가열봉은 각각 SCR에 의해 수동으로 제어된다.

Loop 가열은 56°C/hr 의 최대 加熱率로 제한된다. 사용되는 가열봉의 갯수는 Loop 온도와 원하는 加熱率에 따라 정해진다. Loop 순환용수가 순환되기전에 가열기(가압기 가열기를 제외)가 작동하는 것을 막기위해 펌프-가열기 Interlock 安全回路가 마련되어 있다.

라) Loop 熱交換器

(1) 再生 熱交換器

再生熱交換器는 Tube in Shell형이다. Shell측은 3" Sch. 80, 304L 스테인레스관이며 管側은 $3/8"$ O.Dx0.035" Wall, T304L 스테인레스관으로 제작되었다. 熱交換 容量은 Demi. Water 조건에서 195 kW이다. Shell 및 Tube는

각각 316 °C에서 176kgf/cm²로 설계되어 있으며 ASME Section VIII에 따라 제작되었다.

(2) 冷却 熱交換器

냉각 열교환기는 Shell 측은 6", Sch.40, 炭素管, 傳熱管側은 22개의 U Tube로 1/2" 0.Dx0.065" Wall, T304 스테인레스관으로 되어있다. Shell측 운전압력은 316 °C에서 7kgf/cm² 이고 ASME Section VIII Division 1에 따라 제작되었다.

(3) Bleed 熱交換器

Bleed 열교환기는 同心 Tube in Shell형이다. Shell 측은 중간에서 스테인레스 膨脹 Bellows로 연결된 1½" 304 스테인레스관이며 전체길이는 3.048m 이다. 고압의 Loop 용수는 外徑 0.64cm, 傳熱面積 0.37 m²를 가진 Tube를 지나간다. Bleed 열교환기는 Loop의 가장높은 위치에서 뽑은 용수가 用水採取 또는 용수저장탱크에 들어가기 전에 용수를 냉각하는 역할을 한다.

(4) 運轉 및 理論

再生熱交換器(RHX)의 우선 목적은 펌프 및 배관계통에서의 熱衝擊을 최소화하기 위해 Loop에 주입되는 용수를 豫熱하고 Loop 온도를 상승시키는데 필요한 가열기의 加熱량을 줄이는 것이다.

冷却 熱交換器(CDHX)는 Loop 정지시 Loop를 냉각하는데 사용된다. 또 가열기에 의한 Loop 온도제어에 필요한 냉각에도 이용된다.

冷却 및 再生熱交換器의 運轉特性은 서로 의존관계에 있다. 펌프 배출배관에서 배출된 일부 순환용수는 RHX의 고온측을 통과하여 CDHX에서 2차계통 냉각수로

냉각되어 주입펌프 배출배관에 합류한다. 합류된 용수는 RHX의 低温側に 들어가 여기서 豫熱되고 주 Loop의 순환펌프 흡입배관에 되돌아 간다.

CDHX의 1차 및 2차측의 유량조절은 정해진 Loop의 冷却率을 넘지않도록 주의 하여야 한다.

마) 循環用水處理/Makeup 系統

(1) 用水 處理施設

용수 처리시설의 주요장치는 Illinois Water Treatment사에서 제작된 混合層 脫-이온化裝置(Model MB875, SN17560) 및 O_2 脫-이온化裝置로 구성되어 있다. 混合層 脫-이온化裝置의 용수처리 용량은 $2.5m^3/hr$ 이며 樹脂層은 2268 g의 $CaCO_3$ 에 해당하는 능력을 가지고 있다. 용수중의 O_2 는 脫-이온化 樹脂가 장전된 2개의 실린더로 구성된 O_2 脫-이온化裝置로 제어된다.

(2) 用水 貯藏탱크

용수 저장탱크는 Polyethylene제로 되어 있으며 약 $2m^3$ 의 용량을 가지고 있다.

(3) 用水 處理펌프

용수 처리펌프(Cabot Piping Systems)는 $75.7l/min$ 의 용량을 가지고 있으며 Loop 용수의 初期充填時나 용수를 脫-이온化 裝置로 순환시킬때에 사용된다.

(4) 計裝計測

수질에 대한 계측장비는 Beckman pH 感知器 및 pH계와 Bechman 電氣傳導度 Probe 및 2개의 電氣傳導度계로 구성되어 있으며 電氣傳導計의 하나는 混合層 脫-이온化 裝置에, 나머지는 제어판넬에 설치되어 있다.

(5) 運轉

混合層 脫-이온化裝置는 정상유량 41.6ℓ/min로 용수를 처리하도록 설계되어 있다. Loop 운전시에서 이 장치는 온도 25°에서 電氣傳導度가 1.0 micromhos/cm를 넘지 않도록 유지된다.

이온 交換過程은 100% 완전하지가 않으며 소량의 이온이 교환되지 않고 통과한다. 처리된 용수가 다시 양이온-음이온 교환계통을 통과하면 아주 高純度인 용수가 얻어진다. 이온 交換樹脂는 오래 사용하면 이온제거 능력이 저하된다. 따라서 주기적으로 이온 交換樹脂를 再生하는 것이 필요하다.

기사용 交換樹脂를 再生하기 위해서는 樹脂層에 再生藥品을 주입/배출한다. 양이온 수지의 再生에는 塩酸이, 음이온 수지의 再生에는 가성소다가 사용된다. 再生用 藥品溶液은 적당한 濃度로 稀釋되어 규정된 양으로 樹脂層에 주입된다. 塩酸은 양이온 樹脂層을 상방으로 흘리고 한편 가성소다는 음이온 樹脂層을 하방으로 통과시킨다. 과다한 再生약품을 제거하기 위해 수지층을 완전히 세척하고 樹脂層을 혼합하면 脫-이온化裝置의 再生은 완료된다.

(6) 酸素制御

산소제어에 사용되는 O₂ 탈-이온화장치는 교환이 가능한 탈-이온화 수지가 장전된 2개의 실린더로 구성되어 있다. 용수처리펌프에 의해 용수저장탱크로 부터 뽑아낸 脫-이온化用水는 이 2개의 실린더를 통과하여 주입펌프의 흡입

측배관에 배출된다. 원한다면 脫-酸素用水를 Bypass 배관으로 용수저장탱크에 돌릴 수가 있다. 이 계통은 연속적으로 용수처리펌프를 사용하도록 설계되어 있다.

(7) 水質制御

용수수질은 시험수행에 따라 변하지만 처리된 수질은 온도 25 °C에서 pH 7.0 電氣傳導度, 1.0 micromhos/cm(1.0 megohm-cm)에 도달한다. 塩化物은 통상 0.1ppm 이하가 된다. 시험시 pH는 5.0~10.5 사이에서 변한다. 따라서 pH 조절용 약품을 용수에 첨가해야 한다. O₂ 감소용 약품도 용수에 첨가할 필요가 있다. 塩化物은 용수를 脫-이온化裝置에 再循環하므로써 감소시킨다. pH 및 電氣傳導度 측정장비는 최소한 매일 교정해야 한다. 주기적인 교정은 Qualified Standard Laboratory에서 수행하여야 한다.

(8) 循環用水 試料採取

用水採取系統의 Schematic Diagram을 그림 1-17에 보여준다. Loop 순환용수 및 산소에 대한 試料採取는 수질을 유지하기 위해 자주 해야한다. 일단 Loop 수질이 요구조건에 도달하면 용수의 試料採取는 24시간마다 또는 시험사양에서 요구되는 조건에 따라 수행되어야 한다.

바) Loop 用水注入펌프

Loop 용수주입펌프는 용수수질을 제어하기 위한 Feed and Bleed Mode 운전 및 Loop 운전시 가압기 수위제어를 위해 사용된다. 그리고 Loop 시동시 가압기와 같이 Loop 가압을 보조하는데도 쓰여진다. 이 펌프는 2개의 Miltion-Roy Positive Displacement형 펌프로 구성되어 있으며 압력 170 kgf/cm²에서 각각 6.2 l/min, 합계 12.4 l/min의 용량을 가지고 있다.

가압기 수위를 제어하기 위해 fischer & Porter 수위기록/제어기가 각 주입펌프에 장착된 Moore Products Co. Model 73N 空氣壓式 容量制御裝置에 공기압신호를 보낸다. 각 공기압 제어장치는 공기압신호와 유압실린더내의 피스톤 위치를 연속적으로 비교하고 요구되는 피스톤 위치를 얻기위해 피스톤의 한쪽에 가해지는 유압을 조절한다. 피스톤에 가해진 유압은 펌프의 용량제어 Spool을 움직이기 위한 힘을 제공한다. Spool은 펌프 行程을 변화시켜 注入 體積流量을 조절한다.

사) 試驗容器

試驗容器는 양단에 Flange를 가진 16", Sch.140 배관으로 ATSM A-312에 따른 재료로 제작되어 있다. 兩端의 Flange 표면사이의 길이는 5461 mm 이다. 하부 Flange(입구)는 순환펌프 배출측 배관에 연결되어 있으며 상부 Flange(출구)에는 壓力測定管 Head가 설치되어 있다. 壓力測定管 Head는 Loop 가열기 입구측 배관에 연결되어 있다. 試驗容器 내부는 원자로 核燃料集合體를 장전하기 위한 試驗部가 설치된다.

아) 試驗部

試驗容器 내부의 試驗部는 원자로노심 입구의 유동조건을 모의하기 위한 Flow Diffuser와 下部爐心板, 한개의 Fullsize 核燃料集合體가 장전되는 4각형 試驗流路, 核燃料集合體를 상부에서 고정하기 위한 Flow Extension Assembly 및 壓力測定管 遮蔽板으로 구성되어 있다. Flow Diffuser, 試驗流路 및 Flow Extension Assembly는 核燃料集合體의 형식(14x14, 16x16 또는 17x17 집합체)에 따라 그 크기는 달리 제작되며 下部爐心板은 실제 원자로와 똑같이 제작된다. 시험용기 내부구조는 試驗部 내부와 외부의 압력차를 없애기 위해 Loop 유량의 일부, 무시할 정도가 試驗容器 내부와 試驗部 사이를 Bypass 할 수 있도록 설계되어

있다. 試驗流路의 벽에는 核燃料集合體 구성부품의 압력강하 특성을 조사하기 위한 압력측정탭들이 설치되어 있으며 압력탭에 연결된 壓力測定管은 試驗流路和 試驗容器 내벽사이를 따라 壓力測定管 遮蔽板 부분에서 壓力測定管 Head를 통해서 試驗容器 외부로 유도된다.

자) 試驗容器 및 試驗部の 取扱節次

(1) 試驗容器的 準備

試驗容器에 試驗部 및 관련부품을 장전하거나 들어올릴 때는 Loop에서 試驗容器를 제거하고 건물 Pit의 서측 바닥에 위치한 조립받침대에 옮긴다. 試驗容器 상단부에 설치된 3개의 훅(Hook)을 가진 Yoke와 건물 Floor 위치에 있는 고정장치를 연결하여 試驗容器的 옆방향의 움직임을 구속한다. 試驗容器的 이동 및 試驗部 부품의 장전, 제거에는 건물에 설치된 5 Ton 기중기를 이용한다.

(2) 試驗部の 組立

試驗部 하부에 위치하는 Flow Diffuser의 두 측면에는 Tab가 설치되어 있으며 이 Tab는 試驗部の 試驗容器內 장전시 試驗容器 입구부 내벽에 부착된 Lug에 걸리게 되어있어 試驗部荷重을 지지한다. 試驗部の 組立節次는 다음과 같다.

- 4각형 試驗流路에 압력측정탭 Fitting과 적당한 길이의 壓力測定管을 설치한다. 壓力測定管을 試驗容器的 外部管에 연결할때의 식별을 위해 번호를 기입하여야 한다.
- 기중기로 試驗流路를 올린 상태에서 下部爐心板을 試驗流路에 고정시킨 다음 수직으로 세워진 Flow Diffuser 위에 試驗流路

를 올려놓고 Flow Diffuser와 下部爐心板을 부착시킨다.

- 試驗容器내에 試驗部를 장전할 때 壓力測定管들이 파손하지 않도록 壓力測定管을 試驗部에 고정한다.

(3) 試驗部 裝填

위에서 組立된 試驗部는 다음과 같은 절차로 試驗容器에 장전된다.

- Flow Diffuser와 下部爐心板이 장착된 試驗流路는 기증기를 사용하여 올리고 組立받침대에 수직으로 고정되어 있는 試驗容器내에 천천히 내려진다. 試驗部는 試驗容器 입구내벽의 Lug에 Flow Diffuser의 Tab가 걸리도록 내려져야 한다.
- 核燃料集合體를 올리고 核燃料集合體 하부의 誘導 Pin이 下部爐心板 誘導 Pin 구멍에 완전히 들어갈 때까지 試驗流路내에 천천히 내리게 한다.
- 試驗部가 장전된 試驗容器를 Loop에 이송하기 위해 試驗容器 上端部の 옆방향 固定裝置인 Yoke를 푼다.

(4) 試驗容器 組立

- Loop와 試驗容器 입구의 연결부에서 Loop측 Flange부에 Grayloc Seal Ring을 낀다.
- 試驗容器 上端部 Yoke에 기증기를 연결한다. 試驗部가 장전된 試驗容器를 올리고 상기 Grayloc Seal Ring의 위치에 천천히 놓는다.
- Seal Ring의 설치상태를 검사하고 Grayloc Clamp과 볼트를 낀다.
- Flow Extension Assembly를 試驗容器에 삽입한다.

- 試驗容器 上部의 Flange 부분에 Grayloc Seal Ring을 끼고 壓力測定管 Head를 올려놓는다.
- 壓力測定管과 壓力測定管 Head 내부의 外部誘導管 Fitting을 연결한다.
- 壓力測定管 遮蔽板을 壓力測定管 Head내에 설치한다.
- 壓力測定管 Head의 상부 Flange에 Grayloc Seal Ring을 끼고 試驗容器 上部 Elbow 배관을 올려 놓는다. 모든 Grayloc Clamp를 끼고 규정된 Torque로 볼트를 죄는다.
- 試驗容器 외부의 壓力測定管들과 壓力測定管 Head에서 외부로 유도된 外部 誘導管들을 연결한다.

(5) 試驗容器 및 試驗部の 分解

試驗容器 및 試驗部の 분해는 組立節次를 역순으로 수행하면 되고 다음과 같은 절차로 분해된다.

- 試驗容器 상부 Elbow 배관을 풀어 제거하고 壓力測定管 遮蔽板을 壓力測定管 Head에서 뺐는다.
- 試驗容器 외부의 壓力測定管 및 壓力測定管 Head 내부의 외부유도관 Fitting을 푼다.
- 壓力測定管 Head를 제거한 후 Flow Extension Assembly를 뺐는다.
- 試驗部가 장전된 試驗容器를 組立 받침대에 이송하고 고정한다.
- 試驗部를 壓力測定管이 파손하지 않도록 試驗容器에서 천천히 올려 제거한다.

3) 計裝 및 安全系統

가) 序論

Loop의 계장은 Loop 운전변수를 監視, 記錄 및 制御하는데 필요한 기기와 試驗部에서의 壓力降下特性을 정확히 측정하는데 필요한 기기로 구성되어있다.

Loop 계장중 몇가지 기기는 空氣壓 作動方式 때문에 이들 기기에는 항상 Clean, Dry and Oil Free의 공기공급을 필요로 한다. 전기 作動方式인 計裝器機는 최상의 성능을 얻기 위해 $\pm 5\%$ 내의 변동을 가진 115V AC 전원을 필요로 한다.

나) 差壓測定 系統

Loop 유량 Orifice 및 試驗部 압력탭 사이에서의 差壓은 같은 계장계통으로 측정/기록된다. 이 계통은 3개의 Fischer-Porter 空氣壓信號式 差壓發信器, Fischer-Porter 3 Pen 圓形記錄紙 記錄計 및 0-15 psig Wallace & Tiernan Bourdon관 壓力計로 구성되어 있다.

0-50", 0-250" 및 0-1000" H₂O의 差壓範圍를 가진 差壓發信器 중에서 적당한 것이 밸브조작에 의해 선택된다. 이들 差壓發信器는 非指示計 Force Balance型이며, 差壓入力에 비례한 3에서 15psig 범위의 空氣壓 出力으로 발신한다. 3개의 差壓發信器로 부터의 空氣壓 出力은 Fischer-Porter 3 Pen 기록계의 2개의 Pen만 사용하여 기록된다. 기록계는 3에서 15psig인 入力信號를 0에서 1000의 균등 눈금으로 기록한다. 동시에 差壓發信器 출력은 空氣壓출력의 정확한 측정을 위해 0~15psig Wallace & Tierman 壓力計로 지시된다.

(1) 流量

Loop 유량은 교정된 Orifice의 上下流 사이의 差壓을 측정하므로써 결정된다. 이 差壓의 측정은 3개의 Fischer-Porter 差壓계중 差壓의 크기에 따라

하나가 선택 사용된다. 差壓發信器로 부터의 3~15psig 出力信號는 Fischer-Porter 3 Pen 기록계에서 기록된다. 동시에 Wallace & Tiernan 壓力計에도 지시된다.

(2) 試驗部 差壓

試驗部 4각형 試驗流路의 압력측정탭에 연결된 壓力測定管들은 壓力測定管 Head에서 20개의 1/8" Dia. 배관과 6개의 1/4" Dia. 배관으로 分岐 밸브 판넬에 연결되어 있다. 分岐밸브 판넬에서 적당한 압력탭 사이의 差壓이 밸브조작으로 선택되고 기록계 또는 壓力計에서 지시된다. 필요에 따라서는 試驗部 전체의 압력차도 기록할 수 있다.

다) Loop 壓力測定

Loop 압력은 가압기 용기에 설치된 15~2500psig Fischer-Porter 압력 발신기에 의해 측정된다. 壓力發信器의 4~20mA 출력은 가압기 가열기의 제어기 및 電氣/空氣壓 信號 變換器에 보내진다. 電氣/空氣壓 信號變換器에서의 3~15psig 출력은 3), 나)에서 기술한 3 Pen 기록계에 기록된다. 또한 압력의 지시를 위해 0~3000psig Heise 壓力計가 마련되어 있다.

라) 溫度測定

온도감시 장치에는 Well식 J Type 熱電對 및 몇개의 다이얼 온도계등이 있다. 熱電對는 시험용기 입구 바로 상류측에 설치되어 있다. 熱電對 출력은 Honeywell Electronik III, 단일 Pen 帶狀記錄紙 기록/제어기에서 기록된다. 운전시 熱電對 신호는 기록계의 설정치와 비교되고 제어기에서의 출력은 SCR 제어 Loop 가열기 제어회로에 보내져 Loop 온도를 위해 가열봉에 필요한 전류를 증감한

다. 수동제어 Loop 가열기는 SCR 가열기가 제어가능 범위내에 남도록 필요에 따라 개-폐된다.

마) 循環用水 化學處理, 制御 및 分析

Loop 循環用水 수질제어 계장장비는 Beckman 電氣傳導度 Cell, 비콘덕탄스를 측정하기 위한 Beckman 電氣傳導度 Bridge, Beckman pH Probe 및 Beckman Model 940 pH 分析器로 구성되어 있다.

Beckman 電氣傳導度 Bridge는 Bleed 배관에 설치되어 있어 따라서 System Bleed 밸브가 열려있는 사이에는 연속적으로 수질을 감시한다. Bleed 배관은 또한 pH 시료를 공급하고 pH는 연속 또는 주기적으로 감시할 수 있다.

(1) Loop 用水에서 過剩 하이드라진(Hydrazine)에 대한 試驗

Loop 용수내 過剩 하이드라진은 필요에 따라 시험분석된다. Hach Chemical Co.에서 제작된 試驗器具가 사용된다. 이 器具의 원리는 하이드라진이 존재하면 試驗試藥이 황색으로 변하는 것을 이용하고 있다. 5ml Loop 用水試料 및 5ml Demi. Water 試料에 試驗試藥 세방울을 첨가하면 존재하는 하이드라진의 양에 비례해서 Loop 用水試料는 황색으로 변한다.

過剩 하이드라진의 量을 측정하기 위해 Loop 用水試料와 Blank 標準試料는 교정된 Color Wheel을 사용하여 비교된다. 분석범위는 0 에서 1.0ppm이다.

(2) 溶解酸素試驗

THLF loop 용수내의 溶解 酸素分析에는 Chemetrics에서 제작된 2개의 試驗器具가 사용된다. 하나는 0~100ppm의 분석범위를 가지고 또 하나는 0~1ppm의 분석범위를 가지고 있다. 이 試驗器具는 用水試料와 試驗試藥이 혼합되면

用水試料内の 溶解酸素量에 비례하여 색이 변하는 것을 比較器(Comparator)와 비교하여 직접 溶解酸素 濃度를 측정할 수 있다.

(3) Ammonia Nitrogen 試驗

Chemetrics에서 제작된 試驗器具를 사용하여 하이드라진의 分解生成物인 Ammonia Nitrogen을 측정한다. Loop에서 採集된 20ml試料는 Calcium 및 Magnesium에 의한 混濁을 막기 위해 Stabilizer 溶液의 1~2 방울로 처리된다. 이 試驗器具도 試料와 시약이 혼합시의 색변화를 교정된 比較器와 비교하여 Ammonia Nitrogen을 분석한다.

바) Loop 監視 및 停止系統

THLF Loop에는 Loop 운전시의 Out-of-Limit Condition(이상)을 감지하고 故障信號를 전송하는 안전장치가 갖추어져 있다. 故障信號는 고장조건에 따른 Annunciator 회로를 작동시켜 警告燈이 키고 경보를 울리게 한다. 동시에 Shunt-Trip 회가 작동되어 주 遮斷器 및 순환펌프 회로의 遮斷器를 OFF로 한다.

(1) High-Low 加壓器 壓力

Model 1838 Mon-0-Con 壓力計가 가압기에서의 압력을 감시한다. 이 壓力計는 고압 및 저압 限界를 설정할 수 있고 Out-of-Limit Trip을 작동시킨다.

(2) High-Low Loop 溫度

Honeywell J Type 熱電對 및 고온 또는 저온 Trip 작동을 시키는 제한 스위치가 장착된 Honeywell Electronic III 온도제어/기록계가 Loop 온도를 감시한다.

(3) High-Low 加壓器 水位

3층 Platform의 가압기 근처에 설치된 Fischer-Porter 差壓發信器가 가압기내 수위에 비례하는 신호를 전송하고 고수위 또는 저수위 한계 설정치에 따라 Mercoid Tripping 스위치가 작동되어 경보를 올리고 Bata 表示器 판넬의 불이 켜진다.

(4) High-Low 加壓器 壓力(Original Installation)

Fischer-Porter 壓力變換器가 Panalarm만을 작동시키는 電壓을 공급한다.

(5) 펌프 Seal 冷却水 低流量

펌프 Seal의 냉각계통은 2개의 냉각수 배관계통으로 구성되어 있다 그중 한 배관계통에는 Hayes Sure-Flo 유량 스위치가 다른 배관계통에는 Meletron 0.5~80psi 壓力作動 스위치가 마련되어 있고 어느한쪽 배관계통에서 低流量이 감지되면 Loop는 정지된다.

(6) High-Low 用水貯藏탱크 水位

저장탱크에는 #304, W/702-C3-T24 Probe와 702-C3-T30L Probe가 장착된 Level-Tek 수위계가 설치되어 있으며 각각 80% 수위 및 20% 수위에 설정되어있다. 고수위용 Probe는 경보만을 올리고 저수위용 Probe는 정지 Trip을 작동시킨다.

(7) 펌프變速器 低速度

Borg-Warner 無段變速器 제어판넬은 변속기 回轉速度計로 부터의

저속도를 지시하는 신호를 받아 저 전압신호를 Acromag 경보 계전기에 전송하고 Shunt-Trip 회로를 작동시킨다.

(8) 펌프變速器 오일 低水位

변속기 오일 저장용기에 설치된 702-C3-12 Probe가 장착된 Level-Tek 수위지시계가 변속기 오일저장용기의 오일 수위를 감시한다.

(9) 펌프變速器 오일 高温度

변속기 오일배관에 설치된 温度感知器가 Allen-Bradly 온도 스위치를 작동시킨다.

(10) 펌프 Seal 高温度-內側 및 外側 冷却水 循環系統

Trip 설정치를 조절할 수 있는 United Electric 指示 制御器가 温度感知器에 의해 작동한다.

(11) 펌프 Thrust 베어링 高温度

펌프 베어링 Housing내에 설치된 Leeds & Northrup J Type Well 형 熱電對가 Robertshow Controls Fultronic 온도제어기 #ET111-AI-D에 温度 電壓信號를 보낸다. 이 온도제어기는 Trip 설정치를 조절 할 수 있다.

(12) Loop Inline Filter 高壓力降下

Loop 유량 Orifice의 下流(High)와 試驗部 入口(Low)의 壓力測定 탭 #1 사이의 壓力降下를 측정하기 위해 Fischer-Porter 差壓發信器가 사용된다. 差壓發信器에서의 出力信號는 Barksdale 가변 압력스위치로 전송된다. 이것은

Loop Filter가 THLF에 설치될 대만 사용된다.

(13) 2次 冷却水 低壓力

2차냉각수의 압력이 저하되면 판넬에 위치한 Mercoid 압력 스위치가 작동하고 Loop는 정지한다.

(14) 주입펌프 電源喪失

주입펌프 전원이 상실하면 Loop의 Bleed 배관에 설치된 Solenoid 식 밸브가 닫히고 Loop 압력은 천천히 내려간다.

(15) Annunciator

2가지 Annunciator 장비가 Loop 제어판넬에 마련되어 있다. 주 Annunciator는 Beta Optronics Unit이다. 이것은 15개의 警報 및 警音器를 작동시키고 主 遮斷器 및 순환펌프회로 遮斷器에 Shunt-Trip 신호를 보낸다. Beta Optronics Unit는 처음 点滅燈을 작동시켜 이상(Off-Normal) 상태를 표시하고 이어서 정상등으로 변한다. 한번 警報등이 켜지면 계통의 상태가 정상으로 복귀되도 "Reset Button" 으로 해제될 때까지 등은 켜진 상태로 유지된다. "Horn Science" Button은 등표시 상태의 변화없이 警報를 끈다. 모든 등 및 Shunt-Trip 회로의 작동상태를 시험하기 위한 "Test" Button이 마련되어 있다.

2차 Annunciator인 Panalarm은 보조적인 異常表示 機能만을 가지고 있으며 Loop 停止機能을 가지고 있지 않다.

(16) Interlocks 및 Bypass

- Interlocks

전기적 Interlock은 가압기 및 용수가열기 회로의 작동을 제어 하는데 사용된다. 이들 Interlock은 Bypass Switch의 영향을 받지 않는다. 가압기의 가열기 Interlock은 저수위 Trip 조건보다 높은 가압기 水位條件에서 작동한다. 용수가열기 Interlock은 Loop 유량 즉 펌프속도가 펌프 변속기 저속도 Trip 조건보다 큰 조건에서 작동한다.

- Bypass Switches

- 停止系統 : Annunciator에서의 정지회로의 Bypass Switch는 Loop 시동, Loop 운전시의 Trip 설정치 변경, 高温 再稼動 및 Loop 책임자의 지도 하에서의 특별 운전시등에 Loop 정지없이 Loop를 운전할 수 있게 한다. Bypass Switch는 3개의 Trip 회로에 마련되어 있으며 정지계통이 정상일때 Loop의 Off-Normal 조건하에서 상기의 특별한 운전작업을 할 수 있게 한다.

- 加壓器 高水位 : 가압기를 Flashing 하기전에 정지계통을 사용하여 Loop를 운전할 수 있다.

- 加壓器 低水位 : Loop 압력이 저압력 설정치 이하일 때 정지계통을 사용하여 Loop를 운전할 수 있다.

- 펌프 Seal 冷却水 : Loop 책임자에 의한 특별 지시이외에는 사용하지 않는다.

4) 建物 Services

Loop 운전에는 필요한 건물 Services는 다음과 같다.

가) 2次冷却水

2개의 열교환기, 순환펌프 및 펌프변속기의 냉각계통, 용수처리장치등에 필요한 4.2~5.6 kgf/cm²의 수압을 가진 냉각수를 공급한다.

나) 空氣

脫-이온化裝置內的 樹脂攪拌 및 모든 空氣壓作動 계장장비에 Clean, Dry, Oil Free의 6.3 kgf/cm²의 空氣壓을 가진 공기를 공급한다.

다) Demineralized Water

Demi. Water는 용수저장탱크에 공급된다.

라) 電源

전원은 115V 단상 및 440V 3상이 필요하다. 115V 단상전원은 계측장비, 각종 보조펌프 및 용수저장탱크의 교반기등에 사용된다. 440V 3상 전원은 순환펌프, 용수가열기, 가압기 주입펌프, 용수처리펌프 및 SCR 제어 Unit에 공급된다.

나. THLF 運轉節次

THLF 운전시에는 다음과 같은 일반운전 지침에 따라야 한다. THLF 一般 運轉指針은 다음과 같다. 자세한 運轉節次는 부록에 수록하였다.

- 가-1)에 기술된 바와 같은 운전조건을 넘지 않도록 유량을 제한한다.
- 가압기 가열기는 통상 4 kW 가열 Mode를 사용하고 始動時에는 8 kW 가열기를 추가로 사용할 수 있다.
- 正常運轉時에는 항상 자동정지계통 사용하에서 운전한다. 특별히 제한조건을 벗어나 운전을 해야될 경우는 Loop 책임자 임회하에서 운전해야 한다.
- THLF가 자동정지된 경우 Loop 책임자에 보고해야 한다. 警報器의 Reset나 Loop의 再稼動을 시키면 안되며, 警報音 정지 Button 만을 누른다. 表示計에 나타난 모든 Loop 조건을 運轉日誌에 기록한다. THLF 再稼動은 停止原因이

밝혀지고 停止發生에 대한 평가가 이루어진 후 Loop 책임자 입회 감독하에서 행해야 한다.

- Loop는 Loop 책임자가 없을때에는 "Hands Off" Mode로 운전되어야 한다. Loop 운전조건 변경이나 운전과 관련된 작업이 필요할때는 책임자에 보고해야 하며 책임자는 그러한 행위를 수행하는 동안 입회해야 한다.

다음과 같은 경우에는 이 지침에서 제외된다.

- THLF 운전사양에 따른 緊急事態時의 運轉節次
- 책임자에 의해 허가된 Loop 用水의 採取
- 책임자에 의해 허가된 Loop 用水處理 施設의 再生
- Loop를 200 °F(93 °C) 및 500 psi(35 kgf/cm²) 가 넘는 조건에서 운전할때 시험용기의 북쪽구역에 대한 접근은 제한적으로 허용되나 책임자의 허가없이 층계참 플랫폼 아래 북쪽구역 및 3층 플랫폼 북쪽의 가열기 북쪽 先端區域에 대한 접근은 금지된다.

Table 1-1 PWR - Hot Test Loop Reassembling Schedule

Item \ Date	Jan.	Feb.	March	April	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
<ul style="list-style-type: none"> • Building <ul style="list-style-type: none"> - Pit Construction Work - Reinforced Concrete Work - Plastering & Waterproofing - Structural Framework - Painting 												
<ul style="list-style-type: none"> • Facility <ul style="list-style-type: none"> - Piping Work - Equipment Arrangement 												
<ul style="list-style-type: none"> • Electrical <ul style="list-style-type: none"> - Electrical Power Wiring & Tubing - Instrumentation Wiring & Tubing 												
<ul style="list-style-type: none"> • Technical Consultation 												
<ul style="list-style-type: none"> • Operation <ul style="list-style-type: none"> - Operational Training - Test Operation 												

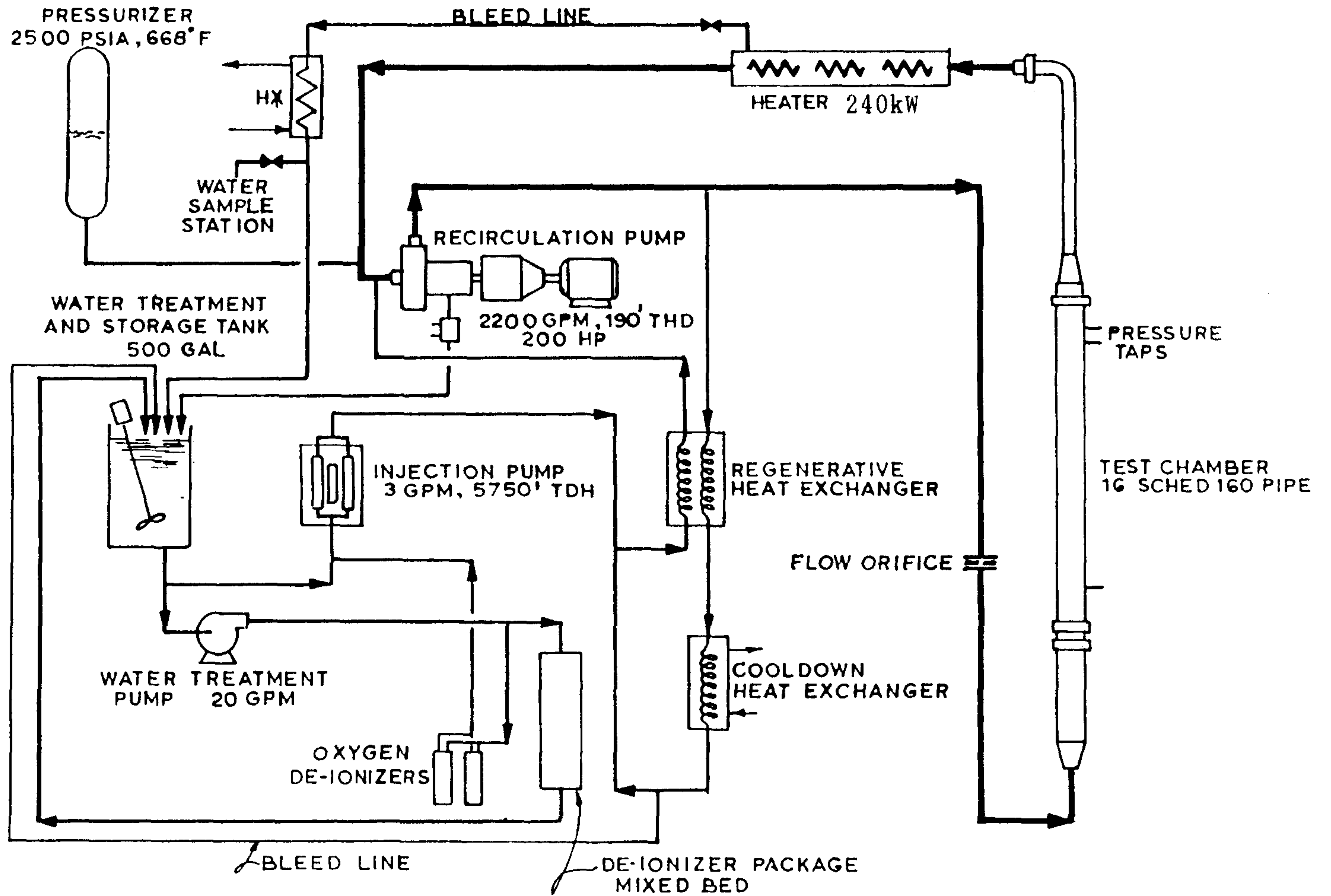


Fig. 1-1 THLF Simplified Flow Diagram

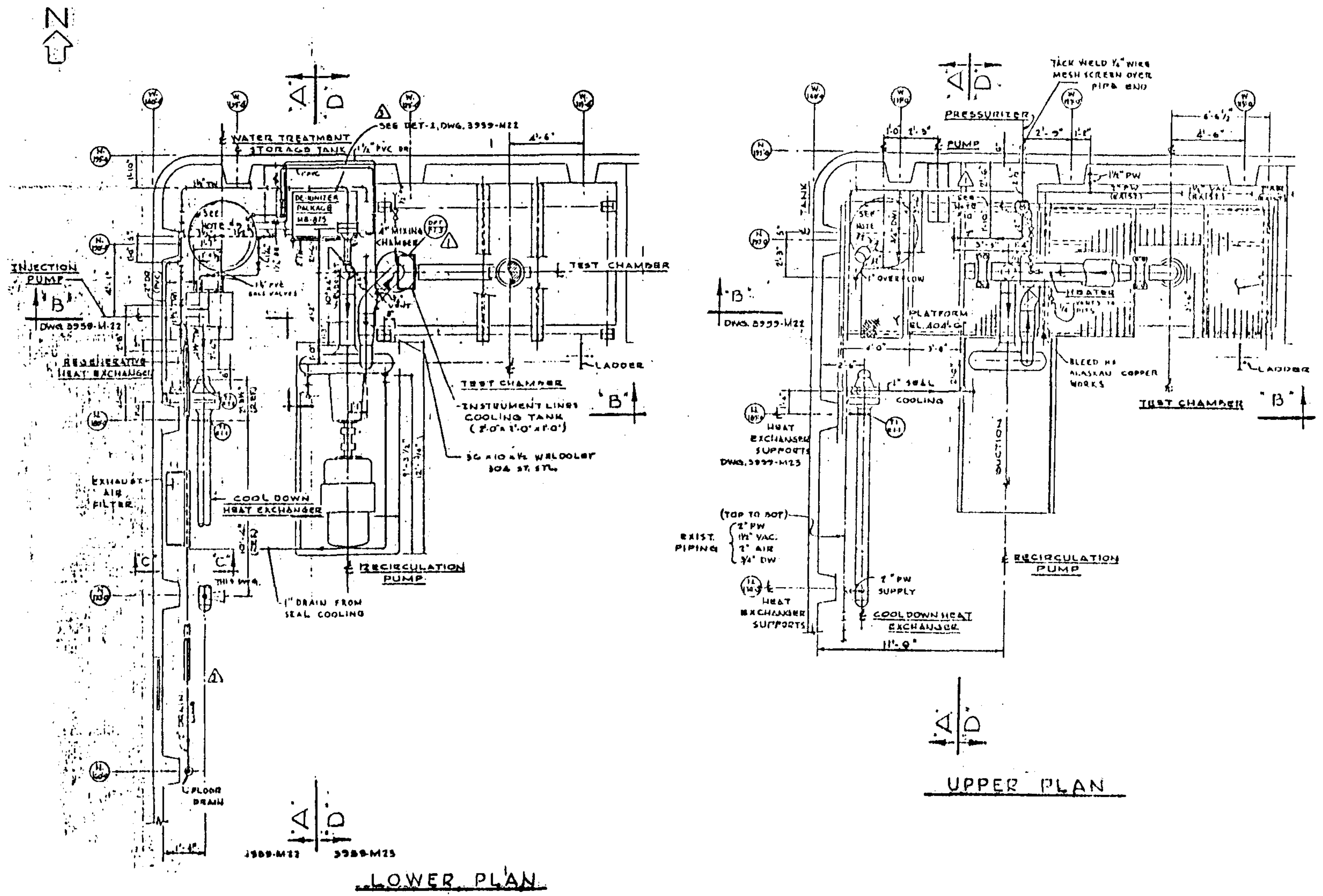


Fig. 1-2 THLF Piping Plans

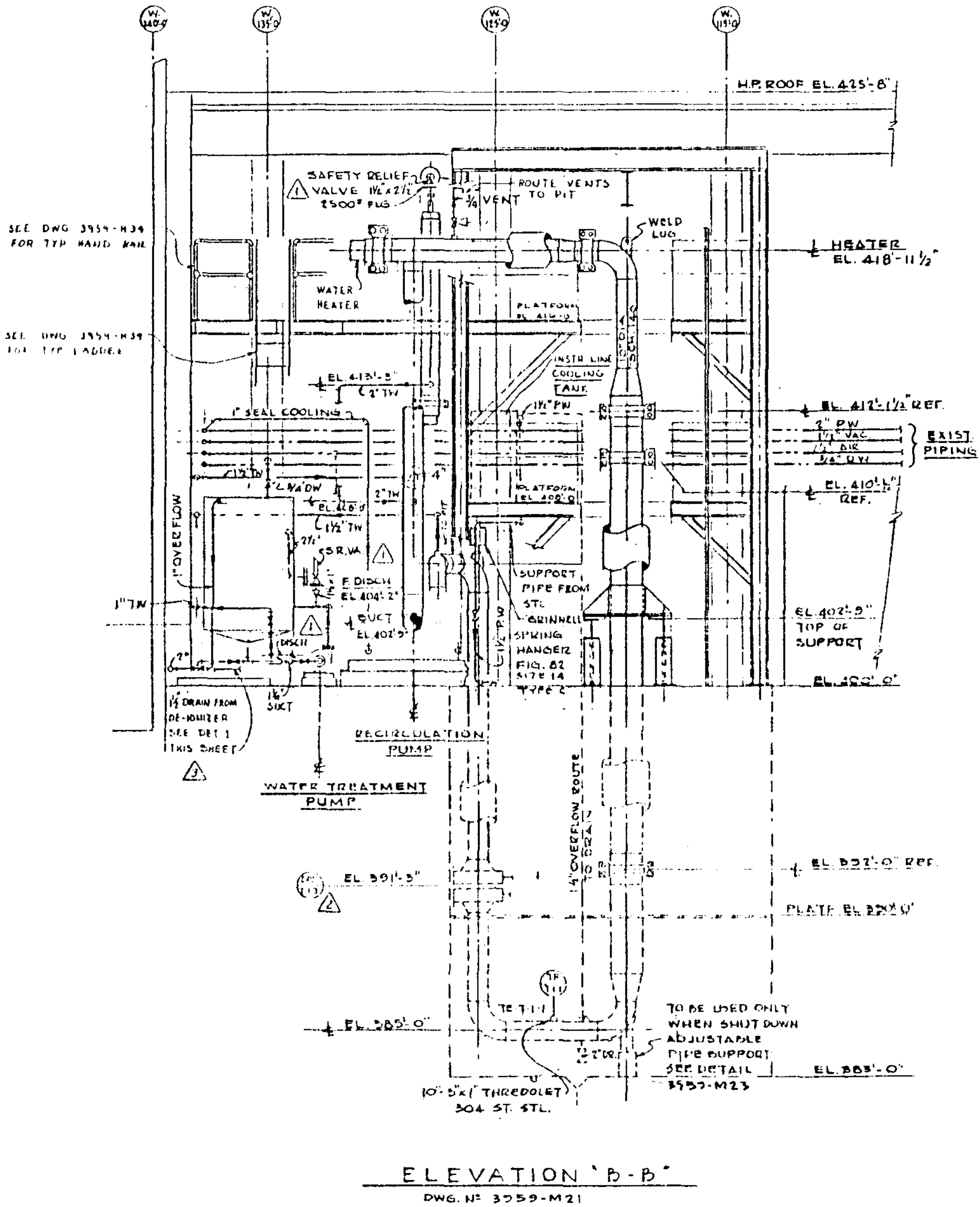


Fig. 1-3 THLF Piping Elevations

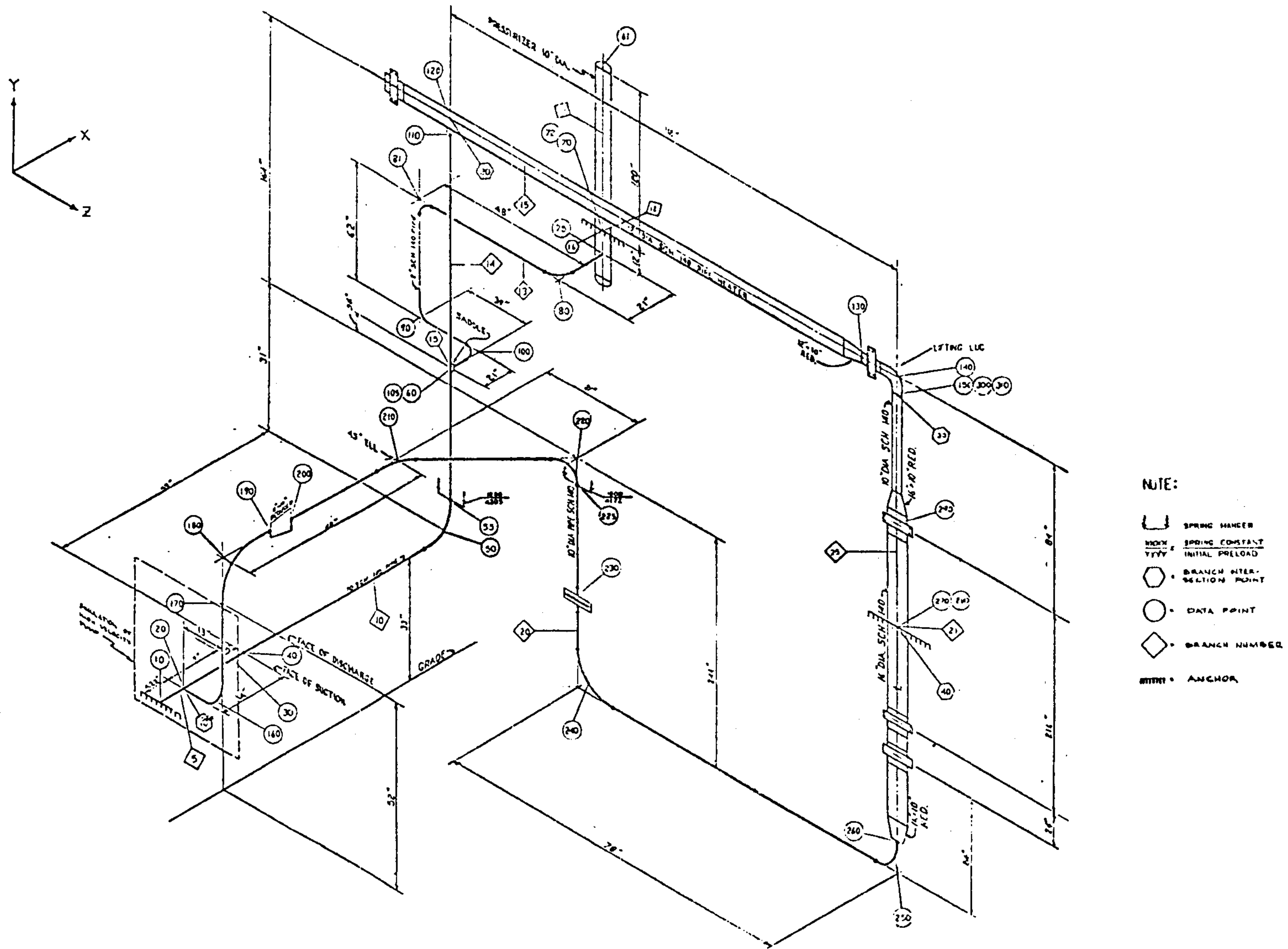


Fig. 1-4 PWR - Hot Test Loop Isometric Diagram

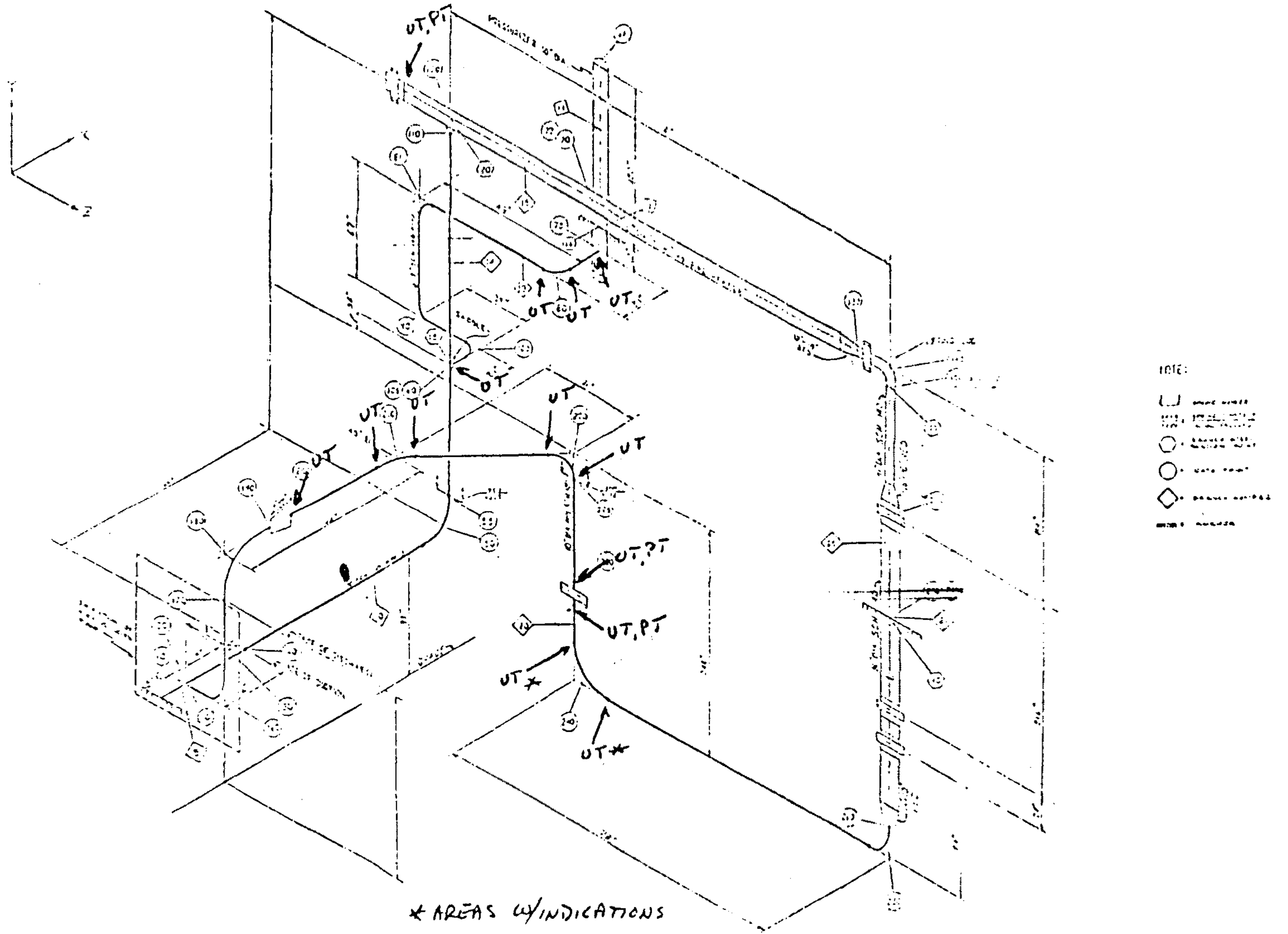
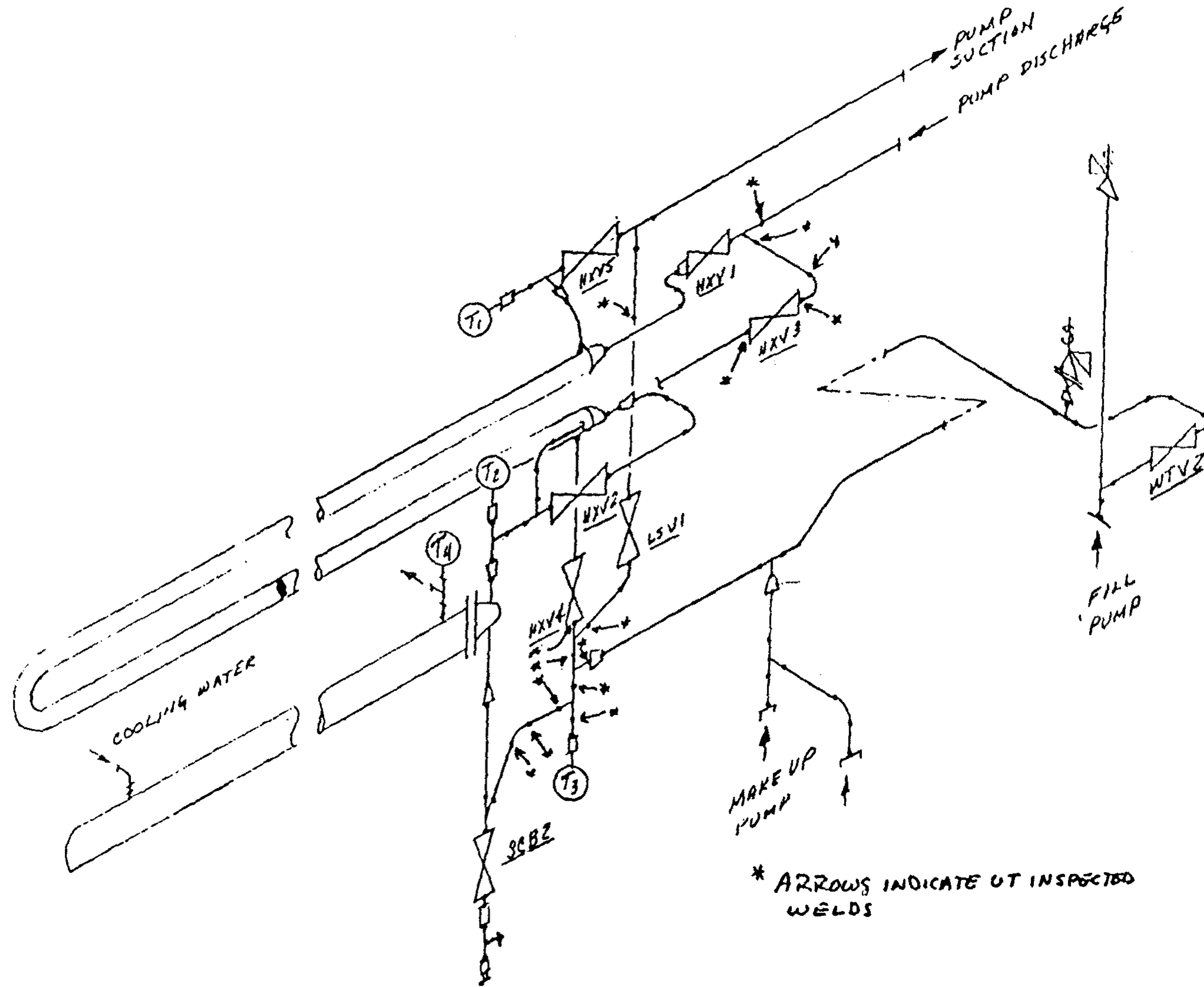


Fig. 1-5(a) Map of PT and VT Inspection Areas for PWR - Hot Test Loop (I)



* ARROWS INDICATE UT INSPECTED WELDS

Fig. 1-5(b) Map of PT and VT Inspection Areas for PWR - Hot Test Loop (II)

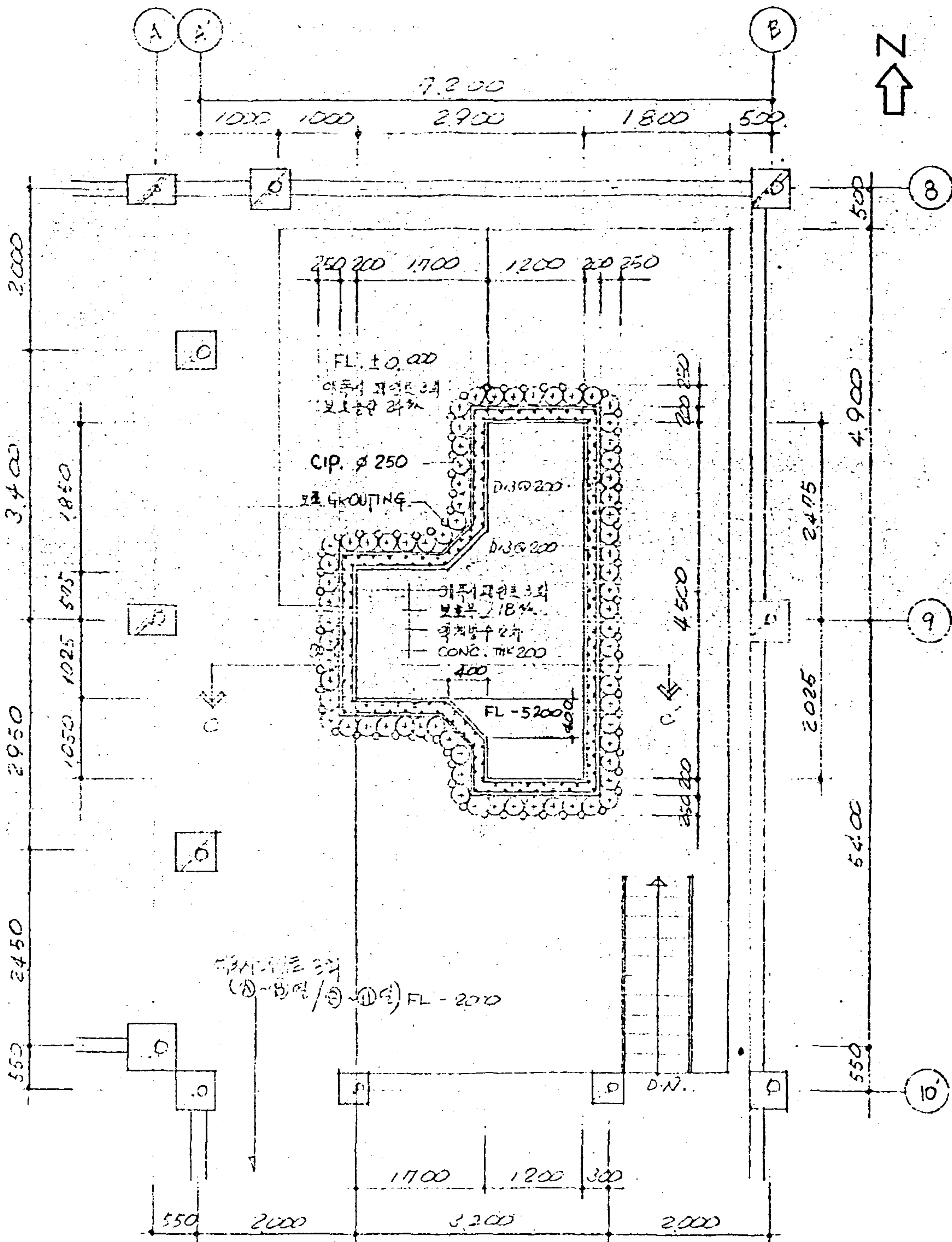


Fig. 1-6 Pit in PWR - Hot Test Loop Building

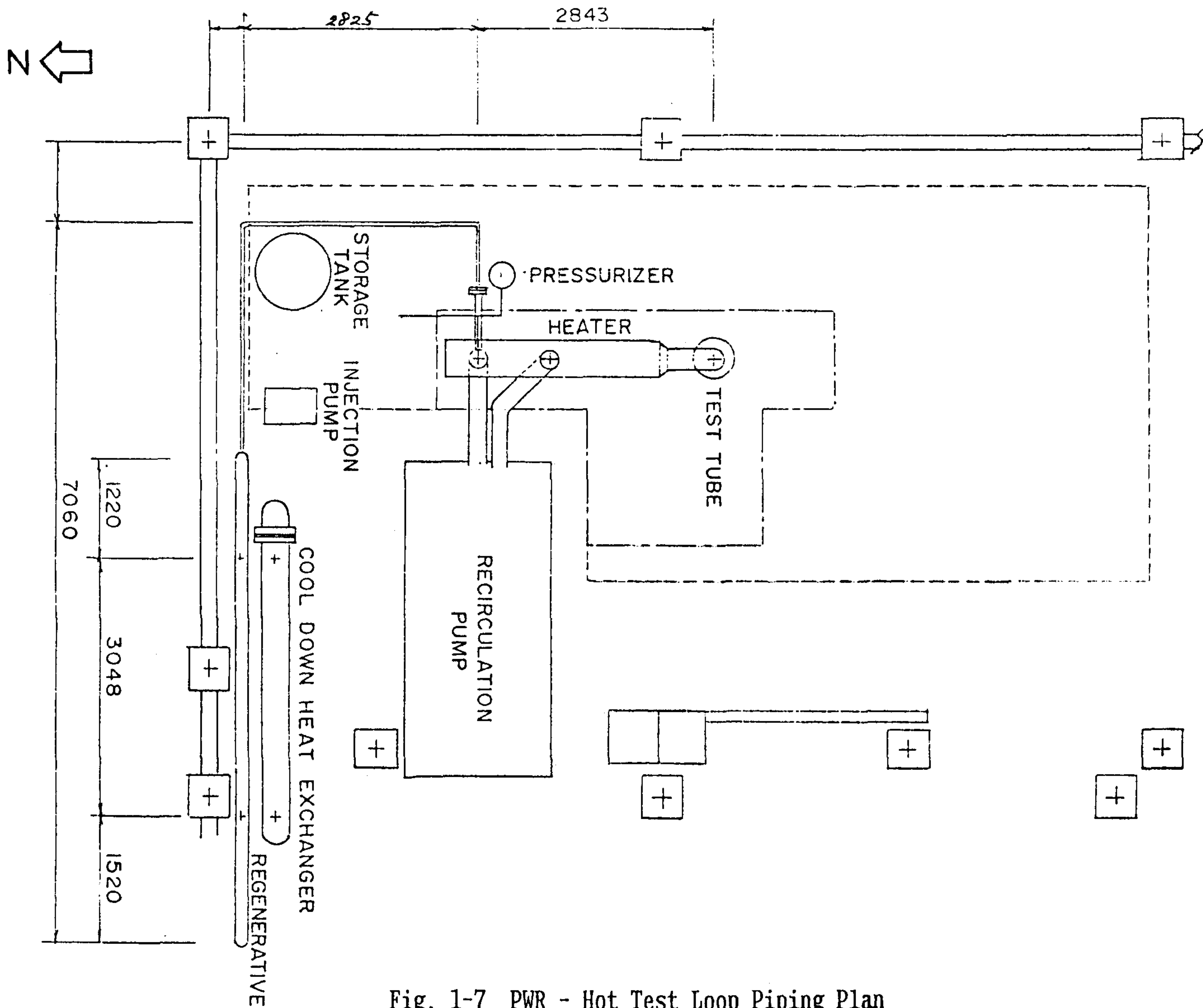


Fig. 1-7 PWR - Hot Test Loop Piping Plan

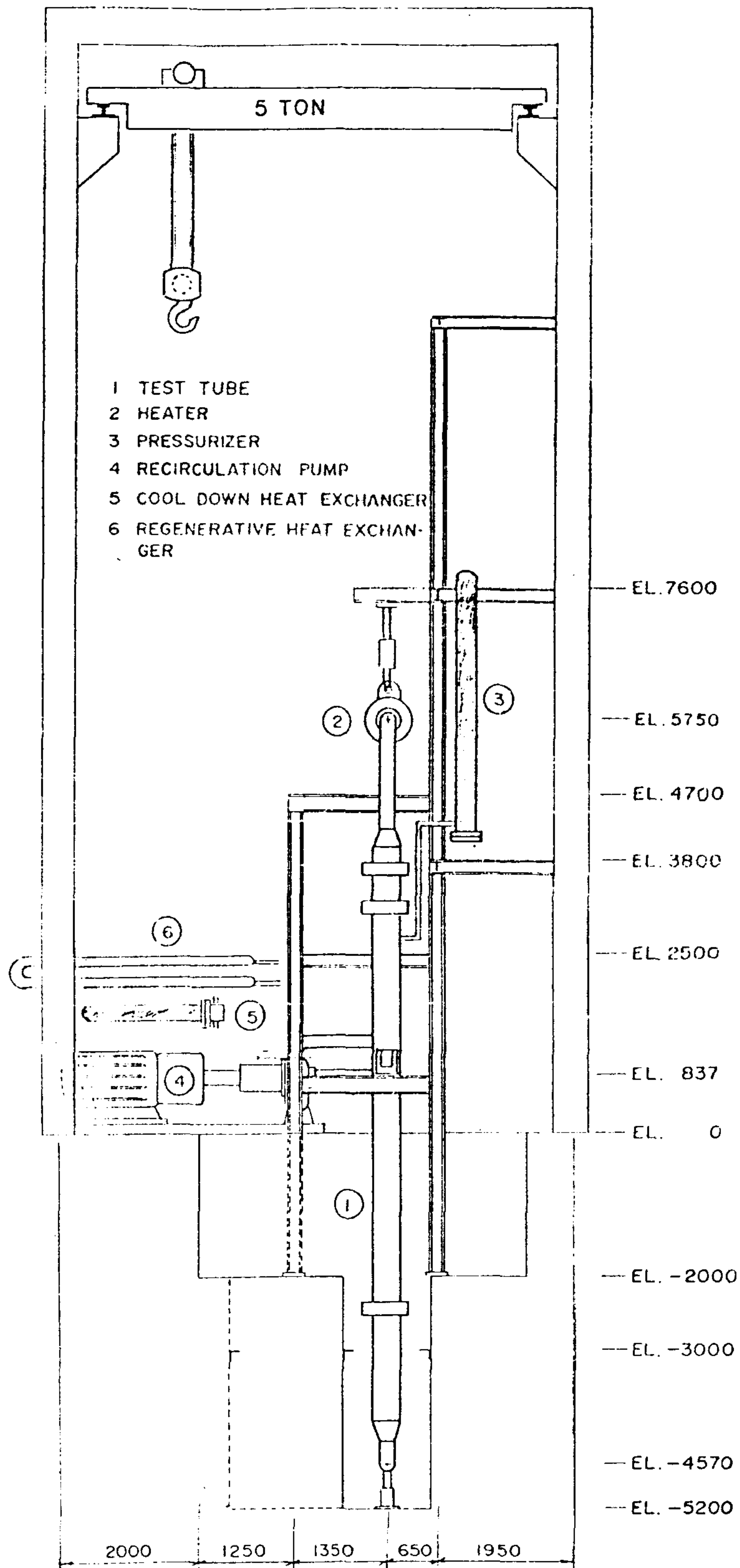
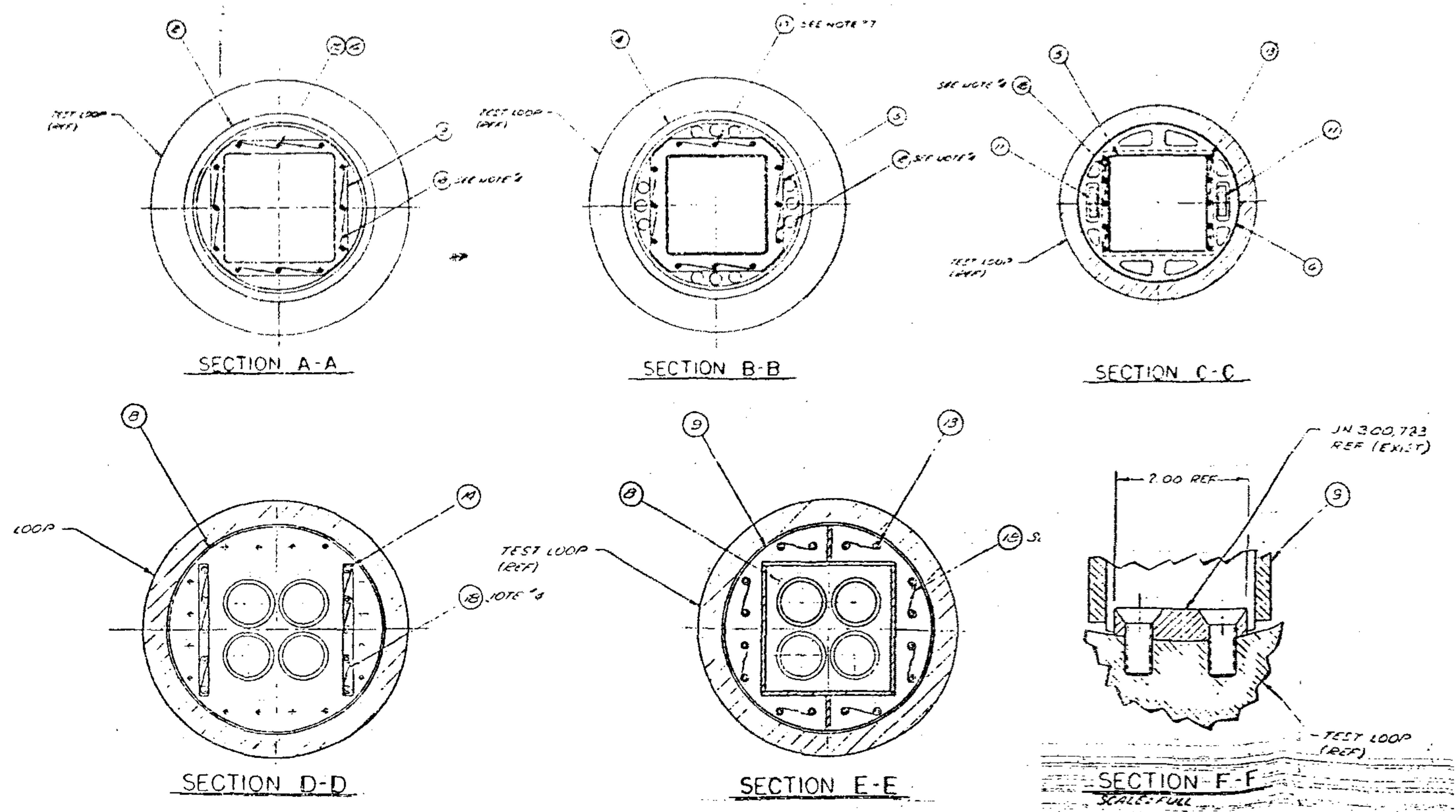
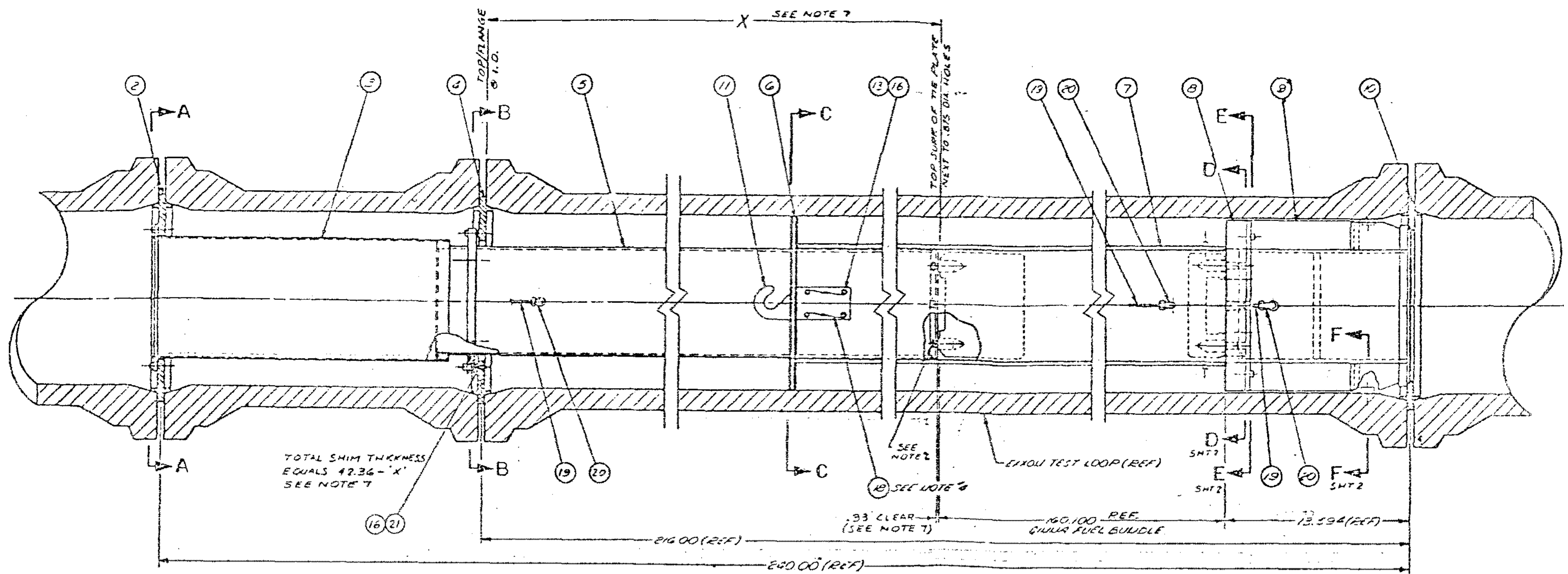


Fig. 1-8 PWR - Hot Test Loop Piping Elevations

여 백



ITEM NO.	QTY	DESCRIPTION	REMARKS
1	1	ASSEMBLY	
2	1	SEAL RING - UPPER	JN-300,781
3	1	INSTRUMENTATION SHIELD	JN-300,718
4	1	SEAL RING - CENTER	JN-300,780
5	1	FLOW EXTENSION ASSY	JN-300,717
6	1	TEST CHANNEL SUPPORT	JN-300,864
7	1	TEST CHANNEL	JN-300,850
8	1	LOWER CORE SUPPORT PLATE	JN-300,719
9	1	FLOW DIFFUSER WLDG.	JN-300,867
10	1	SEAL RING - LOWER	JN-300,866
11	2	HOOK	JN-301,122
13	34	SOC HD CAP SCREW $\frac{3}{16}$ -18UNC-3A x 1.00 LG	SST GRADE 303
14	10	$\frac{3}{16}$ -18UNC-3A x 1.50 LG	
15	12	$\frac{3}{16}$ -18UNC-3A x 1.75 LG	
16	5/R	WASHER, PLAIN $\frac{3}{16}$ NOM ID. x .06 THK	SST TYPE 303
17	12	SOC HD CAP SCREW $\frac{3}{16}$ -18UNC-3A x 1.75 LG	HASTELLOY C
18	AR	LOCKWIRE .032 DIA (SEE NOTE 4)	SST TYPE 303
19	300	$\frac{1}{8}$ TUBING .022 WALL ANNEALED PACKED	SST TYPE 316
20	26	EO $\frac{1}{2}$ MALE ELBOW 1200-E-2-316	SWAGelok
21	AR	SHIM WASHER-.34 I.D. .62 OD. .050 THK	SST TYPE 303
22	AR	ROQUARD COLLOIDAL GRAPHITE	SEE NOTE 3

Fig. 1-9 Typical Inner Structure of THLF Test Chamber

여 백

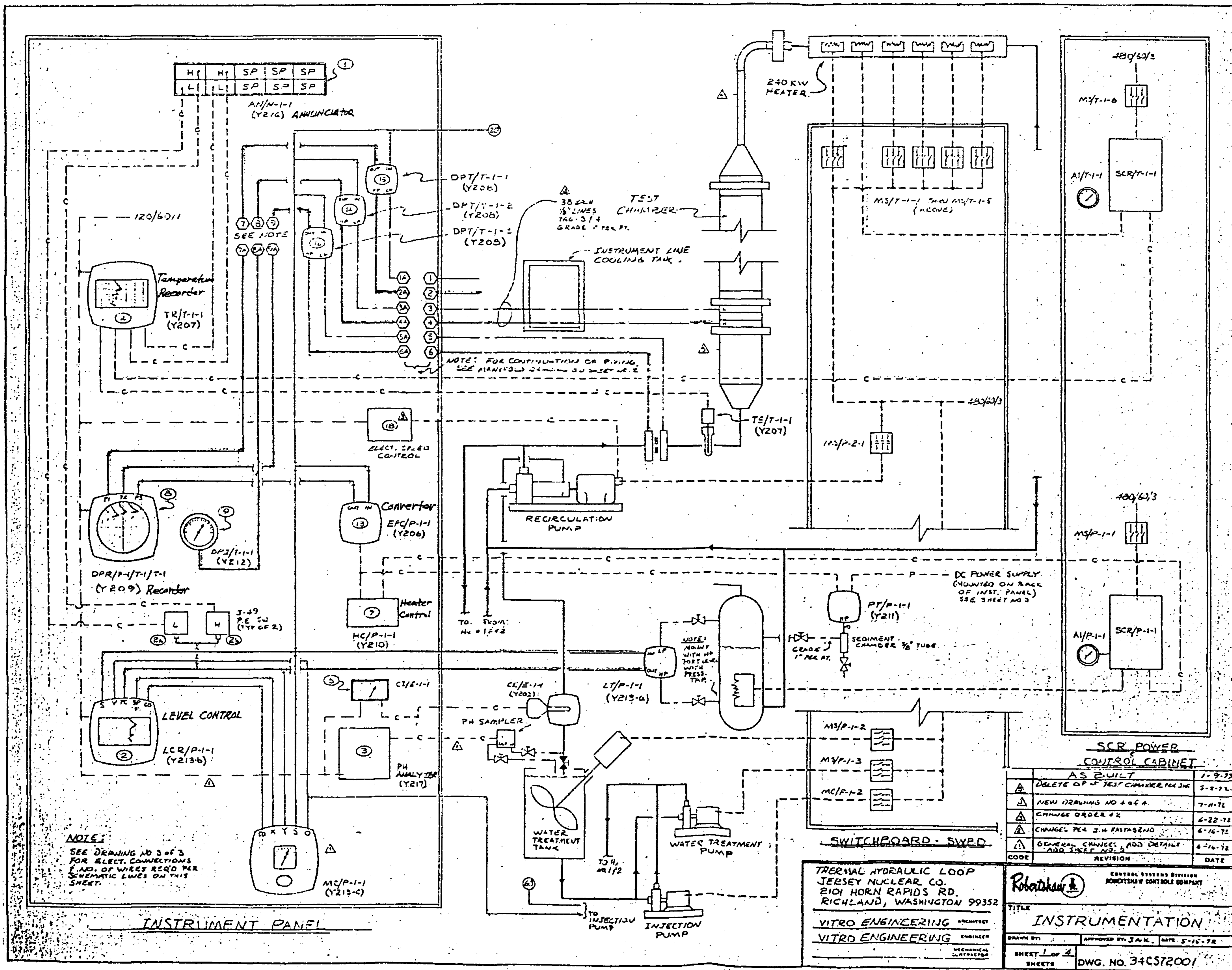


Fig. 1-10 Instrumentation of PWR - Hot Test Loop

여 백

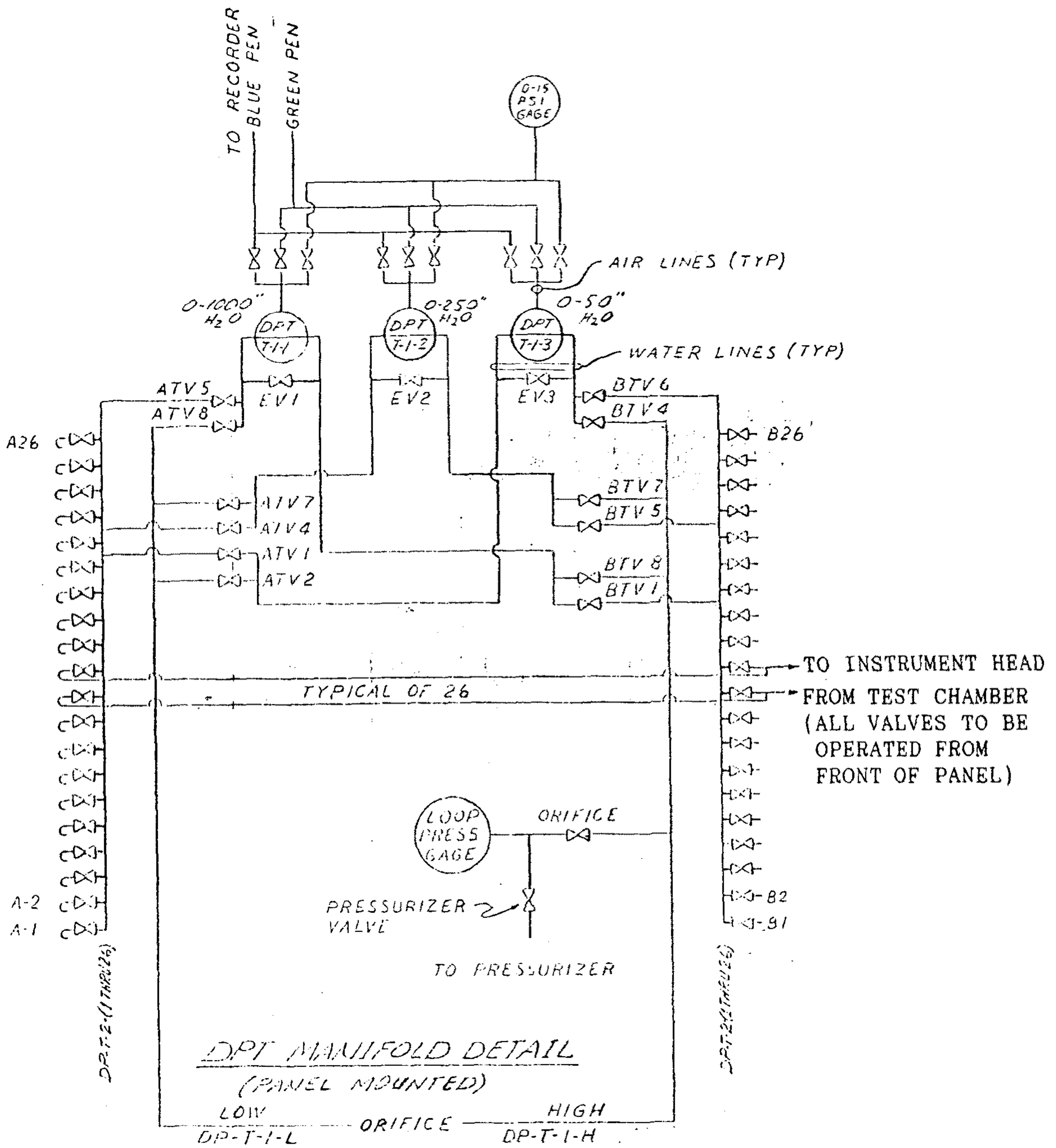


Fig. 1-11 Differential Pressure Transmitter Manifold of PWR - Hot Test Loop

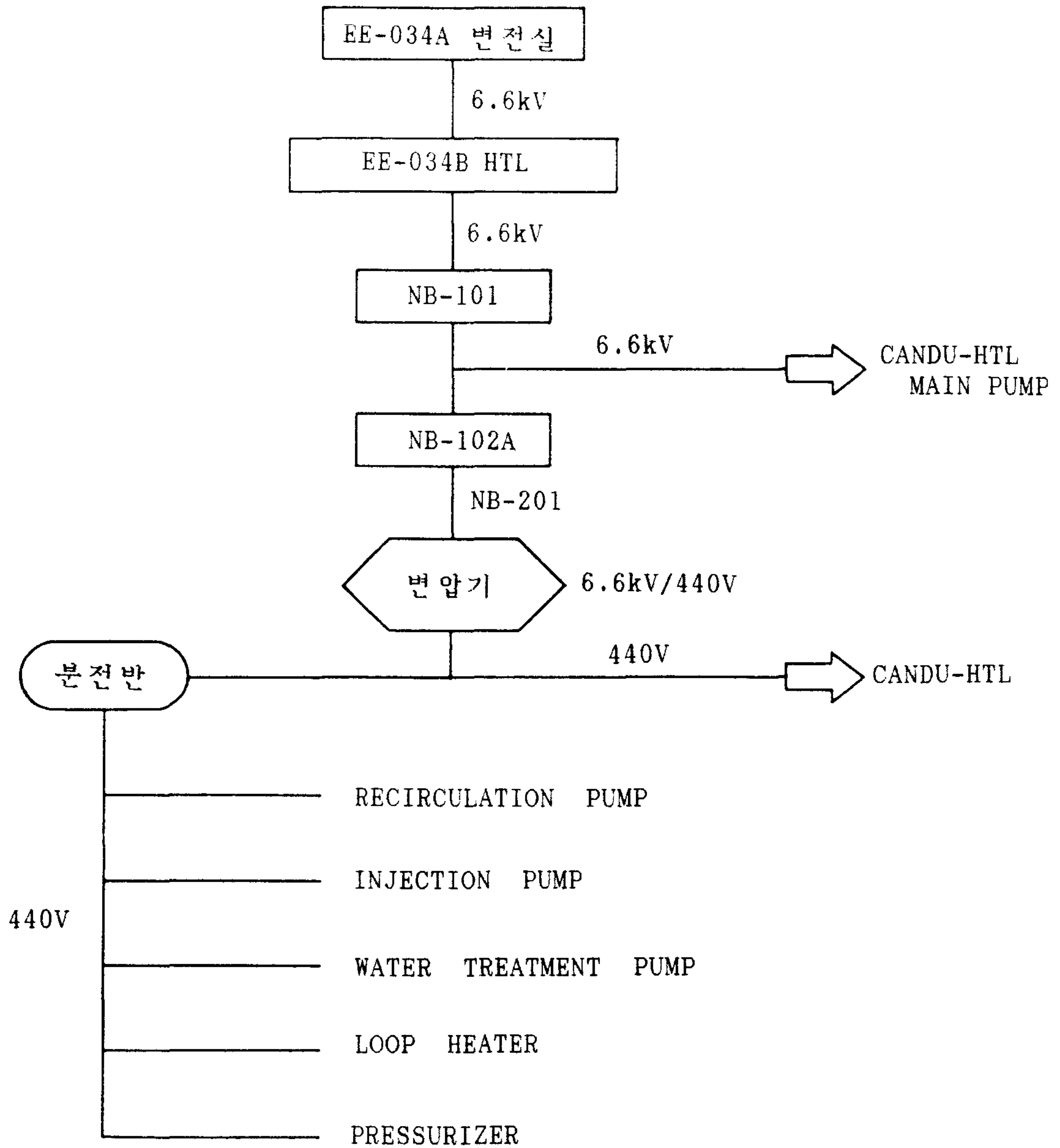


Fig. 1-12 Power Supply System of PWR - Hot Test Loop

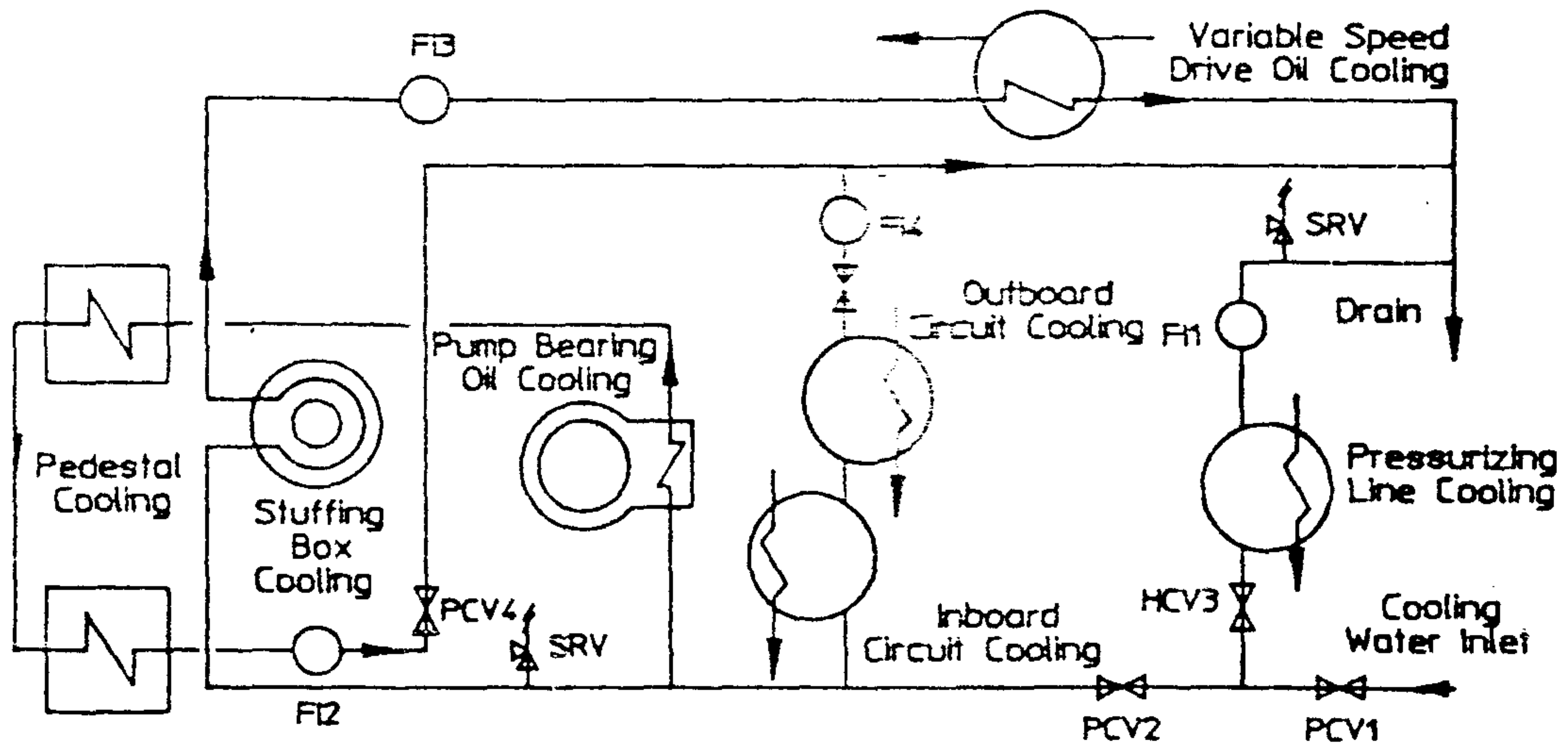


Fig. 1-13 Pump Cooling Water Circulation System

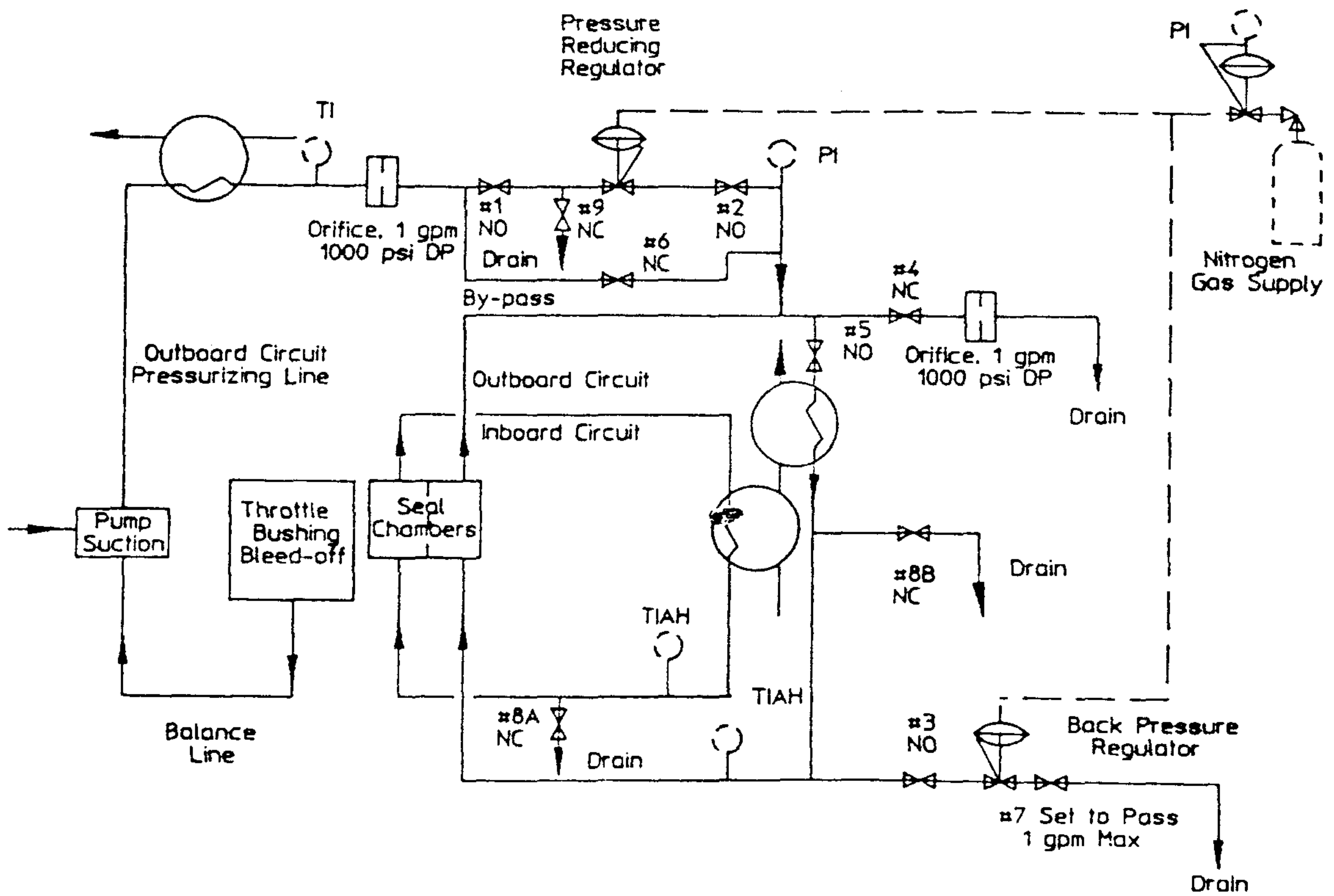


Fig. 1-14 Pump Seal Circulation System

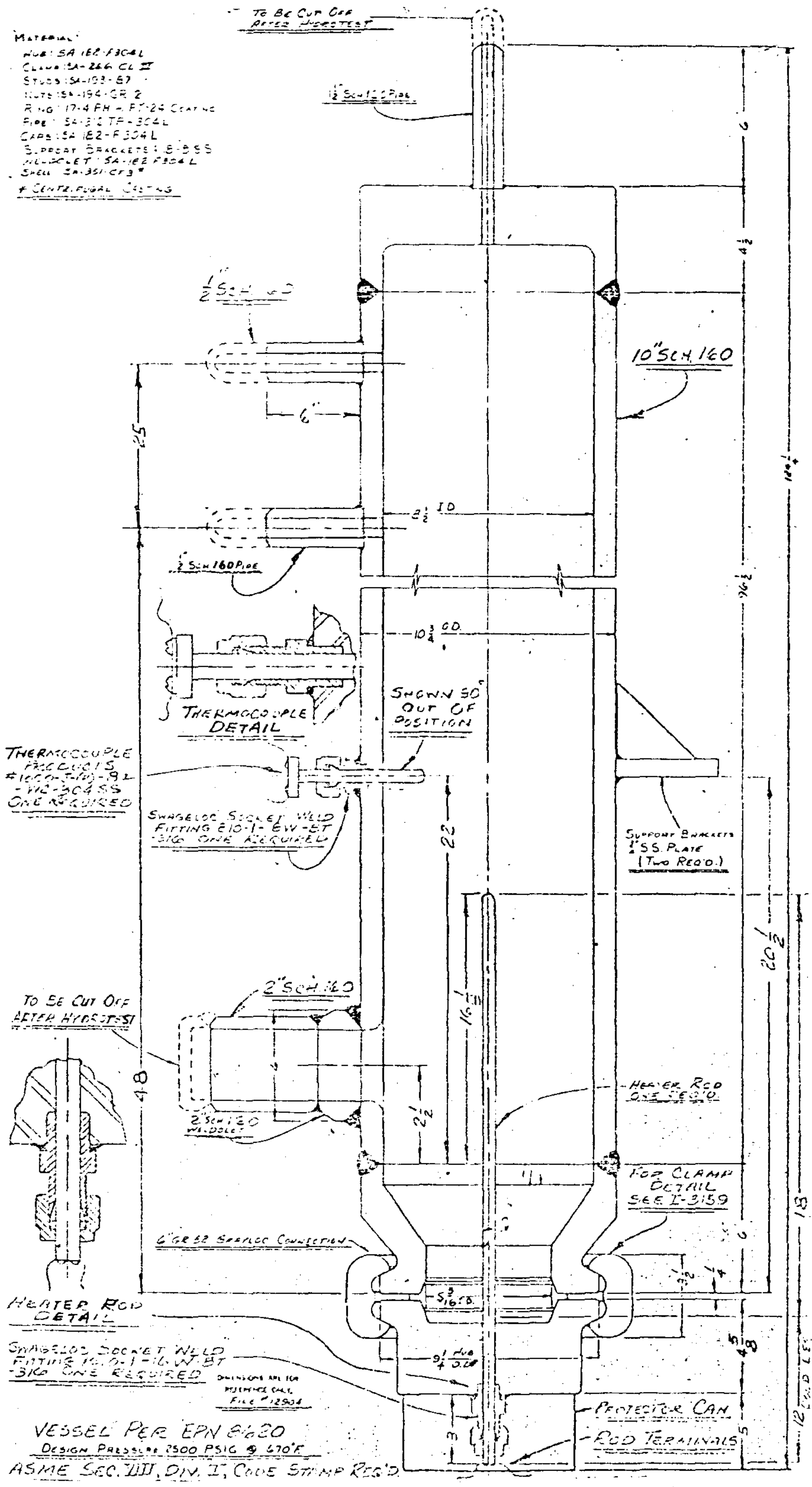
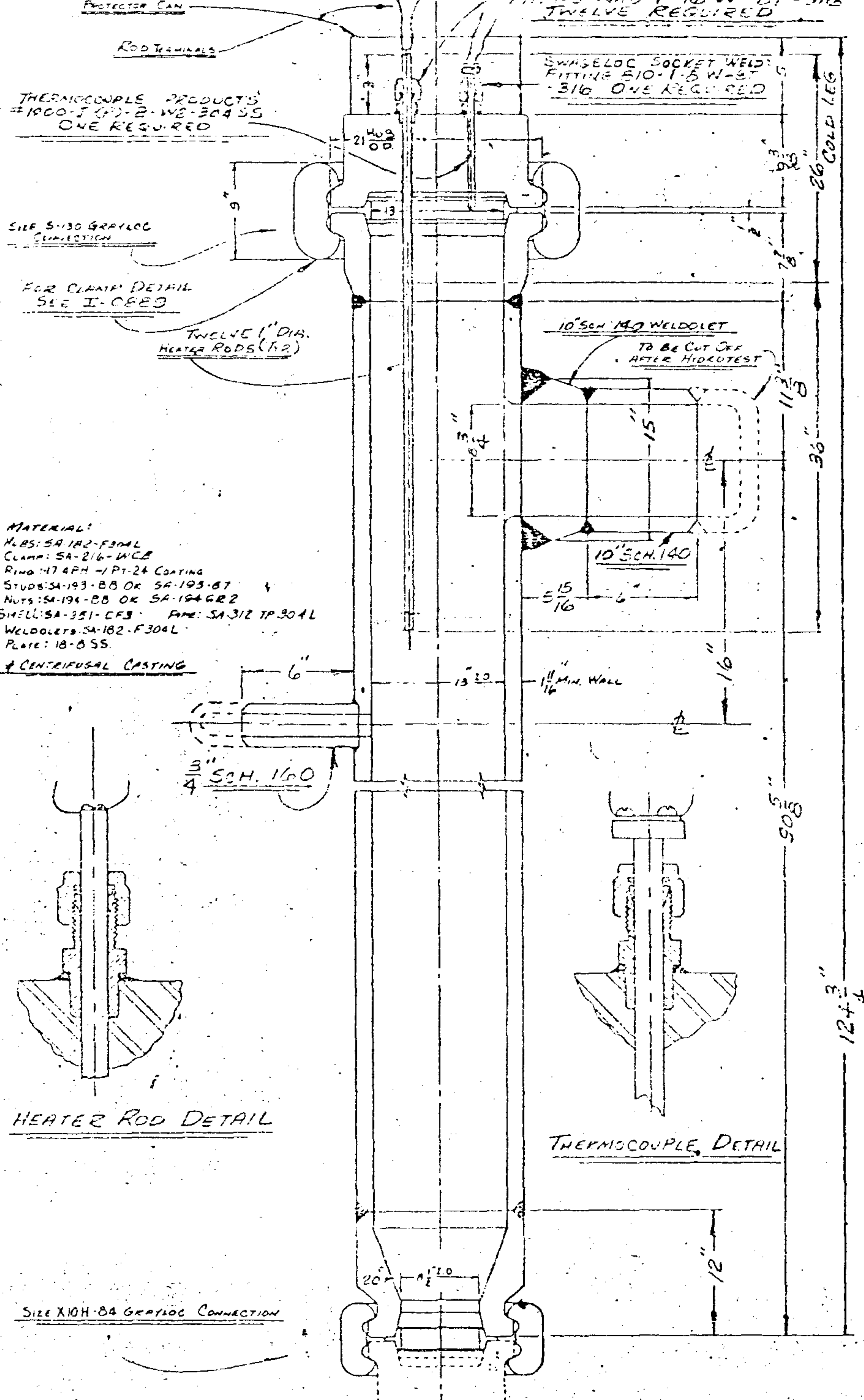


Fig. 1-15 Pressurizer Vessel

HEATER LOCATION PER P-1-15-72



VESSEL PER EPN-8640
ASME SEC VIII, DIV. I, CODE STAMP REQ'D
DESIGN PRESSURE 2500 PSIG @ 500°F

Fig. 1-16 Loop Heater Vessel

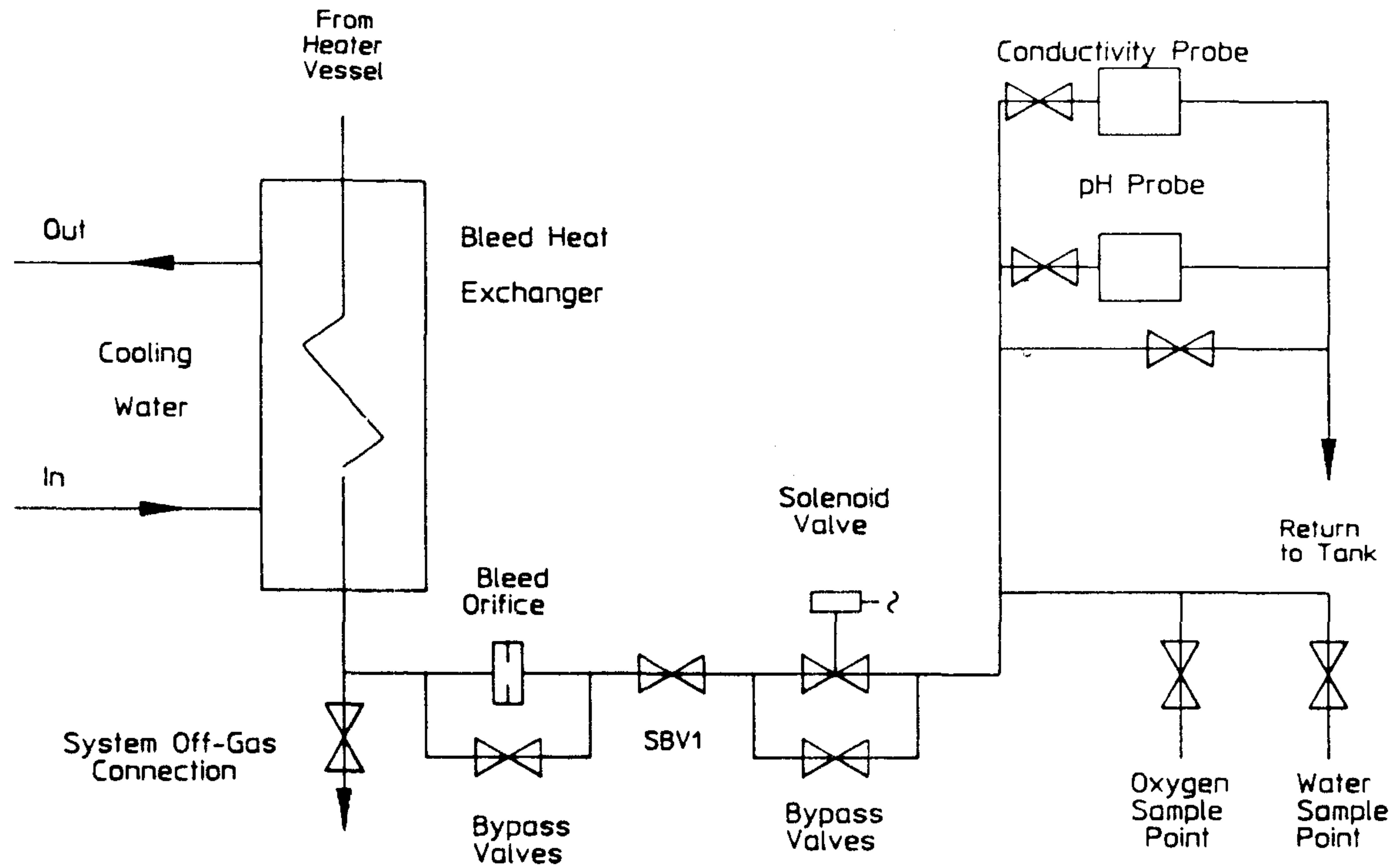


Fig. 1-17 Schematic Diagram of Loop Water Sample Station

第2節 LDV 測定技術開發

1. 개요

LDV를 이용한 열유체 실험목적은 核燃料集合體 副水路内の 流動과 熱傳達 특성에 대한 상세한 局部정보를 습득함으로써 原子爐内の 物理的現象을 더욱 잘 이해하고 부수로 熱水力現象에 관한 解析的研究의 妥當性を 검증하는데 있다. 핵연료집합체 부수로의 形狀은 内部副水路, 壁面副水路, 모서리副水路등 여러 形態로 되어있다. 이와같은 여러 形態의 副水路는 斷面들이 서로 다르기 때문에 부수로간 流動特性은 더욱 복잡한 양상을 보여주고 있다. 부수로 유동측정방법중 지금까지 널리 쓰여졌던 Pitot tube 측정방법이 있는데 이는 난류강도, Reynolds응력등은 측정할 수 없고 시간평균속도만 측정되기 때문에 측정에 제한이 있다. 이를 극복하기 위해 Hot Wire Anemometer를 사용하나 이 또한 감지부분이 취약하고 오염되기 쉽기때문에 물같은 유체유동측정에는 어려움이 따른다. Pitot Tube나 Hot Wire Anemometer로 測定하는 경우, 측정 Probe를 측정유체내에 삽입해야되기 때문에 유동에 방해를 주어 오차가 큰 단점이 있다. 最近에 측정 Probe가 필요없는 LDV (laser Doppler velocimeter)測定裝置가 副水路 유동실험에 사용되고 있는데 이는 Laser beam을 사용한 것이다.

본 연구의 목적은 LDV 측정기술을 개발하여 핵연료집합체 부수로에서의 수력학적인 특성을 관찰하는데 있다. 이를 위하여 당해년도에는 5x5 PWR 핵연료집합체에 대한 수력실험을 수행하였다. 제2절에서는 부수로내 난류현상의 이론적 배경과 열수력특성중 속도분포와 난류강도를 LDV로 측정한 결과를 기술하였다.

2. 부수로내 난류현상의 이론적 배경

原子爐 爐內에서 發生되는 熱水力現象을 이해하기 위해서 선결되어야 할 문제는 副水路內의 流體力學的 現象을 正確히 理解하는 것이다. 부수로내 유체역학적 現象을 說明하는 많은 實驗的 關係式들이 文獻에 發表되고 있으나 각기 다른 기하학적형상을 가진 核燃料集合體에 一般的으로 적용될 수 없다. 이와 같이 일반성을 갖는 實驗關係式이 없는 이유는 副水路內 유체역학적 미세구조를 명확히 糾明하지 못하는데 있다.

現在 副水路內에서 잘 이해되어야 할 亂流現象은 2次流動(secondary flow)과 亂流强度의 비등방성(anisotropy)이라 하겠다. 2次流動은 主流動 速度 크기보다 작지만 溫度分布를 再分布(redistribution)해주는 효과때문에 重要하게 이해되어야 할 現象이다. 이것은 주유동 이외에 부수로 모서리 부분에 주로 생기는 流動으로 副水路 剪斷面방향의 속도성분에 의한것이다. 2次流動을 이해하는데 어려운 점은 우선 2차유동의 실험적측정이 용이하지 않다는데 있다. 실제로 2次流動의 速度는 다른 주유동 속도보다 상대적으로 크기가 작기 때문에 速度의 크기가 測定裝置誤差 혹은 不確實性(uncertainty) 안에 포함될 수 있다. 하지만 속도의 크기가 작아도 부수로내의 열수력현상에 큰 영향을 주므로 2次流動현상은 잘 이해되어야 한다.

核燃料集合體 副水路에서 亂流强度의 비등방성(anisotropy) 또한 重要하게 이해 되어져야 하는데 이는 비등방성으로 인해 亂流모델의 어려움이 있기때문이다. 一般的인 標準亂流모델은 등방성 가정에 의한 것이므로 副水路內 流動을 수치적으로 解析하는데는 비등방성이 고려된 亂流모델을 사용해야한다. 비등방성이 고려된 亂流모델을 開發하기 위해서는 副水路內 亂流 성분을 정확히 測定하여 비등방성의 정도를 규명해야한다.

Rowe et al. [2]은 봉간격(rod gap spacing)이 流動構造에 영향을 주는 가장 重要的 기하학적 要素임을 관찰하였는데 봉간격이 감소함에 따라 亂流强度

longitudinal macroscale, 主亂流주파수가 增加하고 이러한 亂流要素들은 Reynolds 수에 덜 민감함을 관찰했다. Macroscopic 流動過程은 rod gap 근처에서 존재하고 이것은 공간격이 감소할 때 2次流動을 포함하고 增加된 척도, 流動 pulsation의 增加된 주파수를 보여준다.

봉다발의 熱水力 性能은 橫流混合過程을 통한 亂流流動構造와 관련되어 있는데 이러한 混合은 冷却材溫度를 平衡狀態로 유지시켜 주는 役割을 한다. 봉다발 副水路의 設計計算에 많이 적용되는 "lumped parameter" 解析에서는 平行한 流動 副水路들이 접촉되어 있어 橫流混合에 의해 서로 결합되어 있다.

橫流混合은 아직까지 明確한 相關式들이 闕如된 상태이므로 實驗적으로 널리 研究되어지고 있다. 만약 어느 기하학적 形狀에 대한 橫流 相關式이 유도되었을 지라도 一般的인 기하학적 形狀에 대한 相關式을 얻기 어려운 것은 亂流構造의 不完善的한 이해, 봉다발의 기하학적 形狀 影響의 不完善的한 이해에 기인된 것이다.

원형관 流動으로 부터 외삽하여 봉다발 流動解析에 사용되나 부분적인 성공만 거두었을 뿐이다. 봉다발 副水路 混合過程을 이론적으로 정리해 보면 다음과 같다. Scalar량의 亂流傳達는 Hinze[3]에 의해

$$\rho \overline{v'v'} = \epsilon \rho \frac{\partial \overline{\Gamma}}{\partial y} \tag{2-1}$$

로 정의되는데 봉다발 副水路解析에서 Scalar 량의 亂流傳達는

$$\epsilon \rho \frac{\partial \overline{\Gamma}}{\partial y} (S \Delta x) \simeq \epsilon \rho S \frac{\partial \overline{\Gamma}}{\partial y} \Delta x \tag{2-2}$$

$\epsilon s / \Delta y \equiv w'$: 單位길이당 亂流橫流 混合率

s : rod gap spacing

y : 副水路 사이의 centroid 혹은 混合(mixing) 거리

ϵ : 亂流擴散係數(eddy diffusivity)

로 表現된다.

w' 를 無次元 形態로 表現하면

$$\frac{w'}{GD_h} = \left(\frac{\epsilon}{UD_h} \right) \left(\frac{s}{\Delta y} \right) \quad (2-3)$$

G : mass flow (ρU)

D_h: hydraulic diameter

(4A/P_w)

w'/GD_h : mixing Stanton number

인데 이것은 混合인자(w'/GD)는 亂流 Peclet 수의 역수(ϵ/UD)와 기하학적인인자 ($s/\Delta y$)로 表現될 수 있다는 것을 보여준다. 식(2-3)는

$$\frac{w'}{Gs} = \left(\frac{\epsilon}{UD} \right) \left(\frac{D}{\Delta y} \right) \quad (2-4)$$

로 表現하기도 한다.

다른 研究者들은 식(2-4)의 우변은 Reynolds수에 따라 거의 일정하거나 약하게 의존된다고 하였고 w' 는 봉간격에 비례한다고 하였다.

Ibragimov et al. [4]은 복잡한 기하학적 現象에 대한 wall shear stress와 溫度分布의 運動量 傳達은 2개의 傳達構造에 기인한다고 說明했다. 그 하나는 molecular friction과 small-scale turbulent eddy에 의한 運動量의 勾配傳達

(gradient transfer)이고 두번째는 eddy의 large-scale 運動에 기인한 運動量의 對流傳達(convective transfer)이다.

Ibragimov et al.은 勾配傳達은 流動의 局部特性에 의해 결정되지만 대류傳達은 주로 수로내의 기하학적 特性에 의해 의존된다고 說明했다. 복잡한 副水路에서 large-scale eddy의 速度장에 미치는 영향은 速度勾配가 적은 方向으로 가장 강하게 나타난다. Channel perimeter에 垂直한 方向으로는 速度勾配가 매우 크기 때문에 運動量의 對流傳達은 작은 役割을 하지만 勾配傳達은 그 現象을 支配하게 된다.

對流傳達은 급격히 변하는 斷面에서 더 重要한데 이때 아주 다른速度의 eddy 사이에서 서로 상태량의 교환이 일어난다. Scalar 傳達量에 대한 亂流擴散은 Hinze[3]가 說明한 바와 같이 Taylor 이론에 Lagrangian 亂流인자를 적용하여 計算할 수 있다.

亂流擴散係數 ϵ 는

$$\epsilon = v' \Lambda_L \quad (2-5)$$

v' = Lagrangian lateral flow fluctuation

Λ_L = turbulence macroscale

로 計算된다.

Scalar 傳達은

$$\overline{v'Y} = \overline{v'L} \frac{\partial \bar{\Gamma}}{\partial y} \quad (2-6)$$

가 되는데 $\overline{v'L}$ 은 亂流擴散係數가 된다.

亂流強度와 混合길이 L의 곱은 Taylor에 의해서 얻어진 것과 유사하며 混合길이는 搖動速度 v를 갖는 流體가 움직인 軸方向의 거리이다. 벽으로 부터 떨어진 亂流 Core에서 이 크기는 longitudinal macroscale의 크기보다 작거나 같은 정도이다. 만약에 Ibragimov의 증첩이론이 옳다면 L은 봉표면으로부터 半徑方向보다 圓周方向으로 더 클 수 있다. Macroscopic flow pulsation이 있을 때 Hinze는 亂流擴散에서 macroscopic 流動을 說明하기 위해

$$\overline{v'y} = \epsilon_y \frac{\partial \bar{\Gamma}}{\partial y} + \overline{V'y} \quad (2-7)$$

V' : macroscopic velocity fluctuation

의 關係式을 제안했다. 이 식과 동일한 方程式이 Ibragimov et al.에 의해 제안되었는데 $\overline{V'y}$ 은

$$\overline{V'y} = \overline{V'L} \frac{\partial \bar{\Gamma}}{\partial y} \quad (2-8)$$

로 表現할 수 있어 식(2-7)은

$$\overline{v'y} = (\epsilon_y + \overline{V'L}) \frac{\partial \bar{\Gamma}}{\partial y} \quad (2-9)$$

가 된다.

Macroscopic pulsation에 의한 scalar 傳達과 混合길이에 의한 재래의 亂流 요동에 기인한 傳達이 scalar 傳達에 기여함을 식(2-9)으로 알 수 있다.

식(2-9)의 우변 괄호안은 亂流擴散係數라고도 볼 수 있는데 반드시 單順流動

에서의 亂流擴散係數와 일치하는 것은 아니다. Scalar 傳達은 식 (2-9)에 나타나 있듯이 副水路內 流動의 亂流強度와 副水路의 기하학적 形狀 效果를 포함한다.

側方向 Lagrangian 요동速度와 macroscale이 橫流를 支配하는 근본적인 인자가 되므로 Eulerian과 Lagrangian 亂流인자들의 關係式을 얻는다면 편리할 것이다. 이것은 Eulerian 實驗으로 부터 流動의 Lagrangian 現象을 이해할 수 있게한다. 그러나 불행하게도 Eulerian과 Lagrangian의 相互關係式이 많이 알려져 있지않다.

均質亂流(homogeneous turbulence) 流動場에서 v' 는 亂流速度와 같다고 할 수 있으나 비균질 亂流流動場에서는 꼭 같다고 할 수 없다. v' 와 亂流速度가 꼭 같다고 할 수 없으나 크기의 order는 거의 같다고 할 수 있다.

Λ_L 과 Λ_f (longitudinal space macroscale) 사이의 關係式들이 등방성 亂流에서 조차 이론적으로 說明되어지고 있질 못하다. Hinze에 의하면 큰 Reynolds수에서 Lagrangian correlation coefficient $R_L(\tau)$ 와 longitudinal spatial correlation coefficient $f(r)$ 은 유사한 모양을 가지며 각각 exponential 함수, $\exp(-\tau/T_L)$, $\exp(-r/\Lambda_f)$ 로 表現된다. 이와같이 서로 같은 形態를 갖는다고 할 수 있으므로 Lagrangian integral scale과 Eulerian integral scale은 서로 비례한다고 간주될 수 있다.

Lagrangian 亂流인자와 Eulerian 亂流인자 사이의 關係式이 완전히 정립되어 있지 않지만 봉다발 流動의 亂流構造에서는 두 인자들 사이에 충분한 상사성이 있음을 알 수 있다. Taylor의 가설에 의하면 longitudinal macroscale은

$$\Lambda = \bar{U} T_E \quad (2-10)$$

로 정의되고, macro time scale T_E 는

$$T_E = \int_0^{\infty} R_E(\tau) d\tau \quad (2-11)$$

이다. Longitudinal Eulerian time autocorrelation은

$$R_E(\tau) = \frac{\overline{u(t) u(t-\tau)}}{\overline{u^2}} \quad (2-12)$$

로 정의된다.

유동장이 X-方向으로 일정한 平均速度 \bar{U} 라면 Taylor의 가설은 봉다발 부수로 流動에 대해 대략적으로 적용될 수 있다.

난류확산계수는 剪斷應力과 速度勾配의 實驗的 結果로 부터 얻어질 수 있다. 壁面에 垂直한 方向의 난류확산계수는 다음과 같이 정의된다.

$$\epsilon_r = \frac{-\overline{u'v'}}{\partial U / \partial r} \quad , \quad \epsilon_y = \frac{-\overline{u'v'}}{\partial U / \partial y} \quad (2-13)$$

r : 봉 표면에 垂直한 좌표

y : 壁面에 垂直한 좌표

無次元 난류확산계수는 다음과 같다.

$$\epsilon_r^+ = \frac{\epsilon_r}{L U^*} \quad , \quad \epsilon_y = \frac{\epsilon_y}{L U^*} \quad (2-14)$$

L : the length of the velocity profile measured normal to the wall between the wall and the position

U^* : the local friction velocity

τ_w : the shear stress at the wall

圓周方向 혹은 壁面에 平行한 方向의 난류확산계수는

$$\epsilon_{\varphi r} = \frac{-\overline{u'w'}}{\partial U / r \partial \varphi}, \quad \epsilon_{\varphi y} = \frac{-\overline{u'w'}}{\partial U / \partial x} \quad (2-15)$$

w' : the velocity fluctuation in the circumferential direction or parallel to the wall

이다. 無次元 난류확산계수 $\epsilon_{\varphi r, y}^+$ 는

$$\epsilon_{\varphi r, y}^+ = \frac{\epsilon_{\varphi r, y}}{L U^*} \quad (2-16)$$

로 정의된다.

비등방성계수 ϕ 를 $\phi = \epsilon_{\varphi r, y} / \epsilon_{r, y}$ 로 정의하면 ϕ 는 일반적으로 1보다 큰 값을 보여준다.

Vonka[5]는 Vortices를 測定함으로써 2次流動을 測定했는데 이론적배경은 다음과 같다. 비압축성 定常狀態에서 質量保存 方程式을 Cartesian tensor 표기법으로 表現하면

$$\frac{\partial U_\ell}{\partial x_\ell} = 0 \quad (2-17)$$

이고, 여기서 U_ℓ 은 時間平均速度이다.

時間平均 Navier-Stokes equation은

$$\rho \frac{DU_i}{Dt} = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_\ell} \left(\mu \frac{\partial U_i}{\partial x_\ell} - \rho \overline{u_i u_\ell} \right) \quad (2-18)$$

이다. 이 식에 rotation을 취하면 時間平均 Vorticity 平衡方程式이 된다.

$$\rho \frac{D\Omega_k}{Dt} = \underbrace{\mu \frac{\partial^2 \Omega_k}{\partial x_\ell^2}}_I + \underbrace{\rho \Omega_\ell \frac{\partial U_k}{\partial x_\ell}}_II + \underbrace{\rho \epsilon_{ijk} \frac{\partial^2}{\partial x_\ell \partial x_j} \overline{u_i u_\ell}}_III \quad (2-19)$$

$$\Omega_k = -\epsilon_{ijk} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \text{ (Vorticity)}$$

식(2-19) 좌변은 時間平均 vorticity의 총 변화율이고 우변의 첫번째항(I)은 時間平均 vorticity의 點性擴散, 두번째항(II)은 時間平均 vorticity의 stretching과 skewing을 나타낸다. k=3이면 2번째항은 橫方向 壓力勾配 혹은 body force에 의한 平均剪斷의 deflection 혹은 skewing인데 流動方向 vorticity의 生成을 의미한다. 이러한 構造로 인한 2次流動은 亂流成分에 의한 것이 아닌데 이 2次流動을 Prandtl[15]은 제1종(first kind) 2次流動이라 정의했다. 이러한 2次流動은 完全확립된 條件에서는 生成되질 않는다. 完全확립된 流動에서

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_3} = 0 \quad (2-20)$$

이므로

$$\Omega_\ell \frac{\partial U_3}{\partial x_\ell} = \Omega_1 \frac{\partial U_3}{\partial x_1} + \Omega_2 \frac{\partial U_3}{\partial x_2} + \Omega_3 \frac{\partial U_3}{\partial x_3}$$

$$= \frac{\partial U_1}{\partial x_3} \frac{\partial U_3}{\partial x_2} - \frac{\partial U_2}{\partial x_3} \frac{\partial U_3}{\partial x_1}$$

Production of streamwise vorticity

$$+ \frac{\partial U_2}{\partial x_1} \frac{\partial U_3}{\partial x_3} - \frac{\partial U_1}{\partial x_2} \frac{\partial U_3}{\partial x_3}$$

Stream vortex stretching

$$= 0 \quad (2-21)$$

이 성립된다.

식(2-19) 우변 마지막항(III)은 亂流流動일때 생기는 항으로 제2종(second kind) 2次流動이라 정의된다. 이 항은 亂流 vorticity의 時間平均 生成效果와 時間平均 對流(convection) 效果를 나타낸다. k=3일때 이항은

$$\epsilon_{ij3} = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \overline{u_i u_l} = \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\frac{\partial \overline{u_1 u_3}}{\partial x_2} - \frac{\partial \overline{u_2 u_3}}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_2} (\overline{u_1^2} - \overline{u_2^2}) + \left(\frac{\partial^2}{\partial x_2^2} - \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} \right) \overline{u_1 u_2} \quad (2-22)$$

로 된다.

제2종 2次流動은 亂流應力텐서(tensor) $\overline{u_i u_l}$ 의 비등방성과 관련되어있다. 식(2-22) 우변 첫번째항은 완전확립된 流動에서 "0"이나 비등방성 亂流流動에서 一般的으로 다른 항들은 "0"가 아니다. 이러한 이유로 인해 완전확립된 channel 流動條件에서 축대칭이 아닌 제2종 2次流動이 생기게 된다.

3. LDV에 의한 유속측정원리

그림 2-1은 전방산란방법에 의한 기본적인 dual beam laser optic alignment를 도식적으로 보여주고있다. 그림 2-1의 4자리 숫자번호는 제품회사(TSI)의 고유모델 번호로 다음과 같이 표시된다.

9178 - Rotating Mount for Beamsplitter

9115 - Beamsplitter

9179 - Rotating Mount

9140 - Receiving Assembly

9176 - Ring Mount

9118 - Transmitting Lens

9162 - Photomultiplier System

9104 - Alignment Mask

본 연구에서는 주위 빛 혹은 laser 빛의 반사가 LDV signal에 미치는 영향을 줄이기 위해서 Field Stop System(TSI Model 9143)을 Photomultiplier 전방에 설치하였다. 그림 2-2는 본 연구의 LDV system에 대한 사진이다. LDV system에 대한 자세한 설명은 문헌 [1]을 참조하면된다.

Laser source로 부터 발사된 laser beam은 beamsplitter를 거치면서 2 beam으로 나뉘고 다시 transmitting lens를 통과하면서 2 beam은 교차하게된다. 교차된 beam은 교차된 부분에서 그림 2-3와 같이 멩암이 있는 fringe 형태의 측정체적이 형성된다. 이 측정체적을 측정하고자하는 점에 일치시켜 측정을 하는데 측정체적에 산란입자가 통과하면 그림 2-4와 같은 Doppler burst가 생긴다.

Doppler burst는 photomultiplier로 부터 감지되는데 그림 2-5와 같이 A - C 성분과 pedestal 성분으로 나뉜다. 그림 2-5에서 A - C 성분을 pedestal성분으로 나눈것은 visibility라 정의된다.

그림 2-4, -5 의 Doppler burst에서 속도를 계산할 수 있는 신호로 바꾸기 위해서는 이 신호를 여과(filtering)해야한다. 속도로 환산할 수 있는 A - C 성분인 Doppler신호는 그림 2-6와 같이 된다. 그림 2-4, -5 의 A -C 성분과 pedestal 성분으로 나타내지는 Doppler burst가 생기는 원리를 Bachalo[6]는 다음과 같이 설명했다. 측정체적을 통과하는 산란입자의 강도 (I)는

$$I \propto \iint_A (|E_{s1}|^2 + |E_{s2}|^2 + 2|E_{s1}||E_{s2}|\cos\alpha) dA \quad (2-23)$$

E_{s1}, E_{s2} : complex scattered field of two beams

α : phase angle between the scattered fields E_{s1} and E_{s2}

A : area of collecting lens

이다. 식(2-23)에서 D-C 성분으로 표현되는 Pedestal 성분은

$$\text{Pedestal 성분} = \iint_A (|E_{s1}|^2 + |E_{s2}|^2) dA \quad (2-24)$$

이고 A-C 성분의 Doppler 주파수 성분은

$$\text{Doppler 주파수 성분} = 2 \int_A \int |E_{s1}| |E_{s2}| \cos \alpha dA \quad (2-25)$$

가 된다.

그러므로 Visibility V 는

$$V = 2 \left| \frac{\int_A \int |E_{s1}| |E_{s2}| \cos \alpha dA}{\int_A \int (|E_{s1}|^2 + |E_{s2}|^2) dA} \right| \quad (2-26)$$

이다.

식(2-26)로 정의되는 Visibility는 산란입자 신호를 해석하는 중요한 인자가 된다. 여과된 Doppler 주파수 신호로부터 주파수를 계산하여 속도로 환산하는데 주파수와 속도의 관계식은

$$f = \frac{2 U \sin k}{\lambda} \quad (2-27)$$

f = frequency

U = fluid velocity

K = half angle of laser beam intersection

(dual seam)

λ = laser wavelength

그림 2-7은 LDV system, 측정부위, data acquisition system 등을 보여준다. 측정체적에 산란입자가 통과하면 photomultiplier에 의해 Doppler burst를 만들어 내는데 이 신호를 counter type 신호분석장치(TSI Model 1980B)로 받게된다. 신호 분석장치에는 주파수를 여과(filtering)하는 장치가 포함되어있다. 실험부위의 최대속도, 최소속도를 고려하고 또한 오실로스코프에 나타난 신호를 관찰하면서

고주파수의 잡음(noise)과 저주파수의 pedestal 주파수를 여과시킨다. 이와같이 여과된 신호는 속도로 환산할 수 있는 순수한 Doppler 신호가 된다. 부수로 유속 측정에서 data acquisition은 신호분석장치의 digital신호를 개인용 컴퓨터에 연결하고 신호분석프로그램으로 신호의 확률분포함수, 속도, 난류강도등을 구하였다 (그림 2-8 참조)

Counter type 신호분석장치와 개인용컴퓨터와의 digital interface는 IBM interface card (TSI Model 6260/6265)로 하였고 interface software는 1 혹은 2 - channel counter system software (TSI Model 6220/6225 & 6230/6235)을 사용하였다. Sampling time은 100 us, sampling data 수는 256개로 하였다. 평균 속도, 평균편차, 난류강도등의 계산과정은 다음과 같다.

$$\text{평균속도} = 1/N \sum_{i=1}^N X(i) = \bar{X} \quad (2-28)$$

$$\text{평균편차} = \left[(1/N \sum_{i=1}^N X(i)^2 - \bar{X}^2) \right]^{1/2} = \sigma \quad (2-29)$$

$$\text{난류강도(\%)} = (\sigma/\bar{X}) 100 \quad (2-30)$$

여기서 N = sampling data 수

X(i) = 각 sample에 대한 속도

4. 산란입자가 Doppler 신호에 미치는 영향

본 연구에서 후방산란방법(backward scattered alignment)과 전방산란방법(forward scattered alignment)등 두가지 경우에 대해 모두 측정에 적용해 보았다

후방산란방법에서는 산란입자를 물에 혼입하여야만 processing 할 수 있는 신호가 발생되었다. 전방산란 방법에서는 산란입자를 물에 혼입하지 않아도

doppler 신호가 발생되나 산란입자를 혼입할 때 보다 신호강도가 양호하질 못했다. 그래서 본 연구에서 가장 양호한 신호를 추출하기 위해 산란입자를 혼입했다. 산란입자로 우유와 Silicone carbide를 시험해 본 결과 Silicone carbide 입자가 더 양호한 신호를 발생시켰다. Silicone carbide의 물성치들은 다음과 같다.

Particle shape : irregular

Density : 3.2 g/cm³

Refractive index : 2.65

Mean diameter : 1.5 μm

Geometrical standard deviation : 1.4

5. 측정체적 변위에 대한 수정(Correcting for Measuring Volume Displacement)

유체가 내부유동으로 제한되어져 있을때 laser beam은 window를 거쳐야 한다. 이 window는 공기와 다른 굴절율을 갖고 있다. 그러므로 laser beam은 굴절하게 된다. 내부유동의 유체가 공기가 아닌 다른 유체일때도 마찬가지로 측정체적의 위치와 두 beam의 교차각이 변하게 된다. 그러나 교차각이 변하여도 calibration factor d_{ϵ} (distance between fringes, in μm)는 변하지 않는다. 왜냐하면 wave length도 매체의 굴절율에 의존되기 때문이다.

본 연구의 측정장치는 그림 2-9,-10과 같이 optical axis가 window에 수직하고 window는 편평하다.

Snell 법칙으로 부터

$$N_1 \sin K_1 = N_2 \sin k_2 \quad (2-31)$$

인데, 여기서

N = 매체의 굴절율

K = 매체간 interface에 수직한 방향과 laser beam이 이루는 각도

이다. 방정식 (2-31)로 부터

$$N_A \sin K_A = N_w \sin K_w = N_f \sin K_f \quad (2-32)$$

의 식이 성립된다.

식(2-32)에서

N_A = transmitting lens와 window 사이 매체의 굴절율.

(공기일때 $N_A = 1$)

N_w = window의 굴절율(보통 유리일때 $N_w=1.52$, cast acrylic

[Plexiglas]일때 $N_w = 1.49$)

N_f = 유체의 굴절율 (물일때 $N_f = 1.32$)

K_A = incident beam이 optical axis와 이루는 각

K_w = window내 beam이 optical axis와 이루는 각

K_f = 유체내의 beam이 optical axis와 이루는 각

이다.

그러므로 공기의 굴절율이 증가할 수록 window에 수직한 방향에 대해 beam이 이루는 각은 감소한다. K_f 는 window 두께나 굴절율에 무관하며 공기일 때 $K_f=K_A$ 이다. 공기가 아닌 다른 유체일때

$$K_f = \sin^{-1} \left[\frac{N_{air}}{N_f} \sin K_A \right] \quad (2-33)$$

의 관계식이 성립된다.

fringe 사이 간격 d_f 는

$$d_f = \frac{\lambda}{2 \sin k} \quad (2-34)$$

이다. 여기서

λ = laser광의 wave length

d_f = fringe 사이의 거리, μm

k = 교차하는 beam이 이루는 각의 반

이다. 매체에 대한 wavelength의 의존도는

$$\lambda_f = \frac{\lambda_A}{N_f} \quad (2-35)$$

이므로 새로운 매체에 대하여

$$k_f = \frac{\sin k_A}{N_f} \quad (2-36)$$

$$d_f = \frac{\lambda_f}{2 \sin k_f} = \frac{\lambda_A / N_f}{2 \sin k_A / k_f} = \frac{\lambda_A}{2 \sin k_A} \quad (2-37)$$

이 성립되어 d_f 는 일정하다.

새로운 초점거리 F 를 구하기 위해 다음과 같은 방정식이 사용된다.

$$F = F_0 \frac{\tan k_A}{\tan k_f} + t \left[1 - \frac{\tan k_w}{\tan k_f} \right] + d_f \left[1 - \frac{\tan k_A}{\tan k_f} \right] \quad (2-38)$$

여기서

F = 새로운 초점거리, mm

F_D = 본래 lens의 초점거리, mm

t = window의 두께, mm

d_1 = lens 앞면으로부터 window까지의 거리, mm

이다. 제한공간에서 유체가 공기일때 식 (2-33)에서 $K_f = K_A$ 관계식이 성립되므로 식 (2-38)은

$$F = F_D + t \left[1 - \frac{\tan K_w}{\tan K_f} \right] \quad (2-39)$$

이 된다.

본 연구의 그림 2-9와 같은 측정단면에서 제한유동의 유체가 액체이므로 측정체 적안의 초점거리는 식(2-38)에 의해서 계산되어 진다.

굴절율은

$N_A = 1$ (공기)

$N_w = 1.52$ (window)

$N_f = 1.32$ (물)

이고 본 연구의 transmitting lens의 초점거리는 $F_D = 250$ mm이며 $K_A = 5.52^\circ$, $t = 10$ mm이다. 그러므로 K_w 는

$$\begin{aligned} K_w &= \sin^{-1} \left[\frac{N_A \sin K_A}{N_w} \right] \\ &= \sin^{-1} \left[\frac{1 \cdot \sin 5.52}{1.52} \right] = 3.628^\circ \end{aligned}$$

로 계산되고 $\tan K_w = 0.063412$, $\tan K_A = 0.096641$ 이므로

$$K_\varepsilon = \text{Sin}^{-1} \left[\frac{N_A \sin K_A}{N_\varepsilon} \right] = \text{Sin}^{-1} \left[\frac{1 \sin 5.52}{1.32} \right]$$

$$= 4.179^\circ$$

$$\tan K_\varepsilon = 0.073068$$

이 된다.

식 (2-38)에서

$$F = 250 \frac{0.096641}{0.073068} + 10 \left[1 - \frac{0.063412}{0.073068} \right]$$

$$+ d_1 \left[1 - \frac{0.096641}{0.073068} \right] = 331.9715 - 0.3226d,$$

이다.

Channel내 Window에서 촛점까지의 거리를 X라 하면

$$321.9715 - d_1(1.3226) = X \quad (2-40)$$

인 관계식이 성립되므로 측정부위 내부에서의 이송거리는 측정부위 외부에서의 이송장치에 의한 이송거리의 1.326배 이다. 그러므로 측정부위내의 측정거리 측정은 laser beam의 교차점을 window의 안쪽면에 일치시킨 후 그 위치로 부터 이송장치에 의해 이송하여 이송한 거리에 1.326배를 곱하면 실제 측정부위에서의 측정거리가 계산된다.

6. 실험결과 및 고찰

본 실험의 유량은 $0.0145 \text{ m}^3 / \text{sec}$ 로 하였는데 이때 부수로내 평균속도 U_{av} 는 4.05 m/sec 가 된다. 그리고 핵연료봉의 수력직경 D_h 는 11.75 mm 이다.

측정단면과 laser beam이 투사되는 위치등은 그림 2-9에 나타나 있다. 측방향의 측정위치는 그림 2-11에 나타나 있는 바와 같이 spacer grid로 부터 $10 D_n$, $20 D_n$ 거리에서 측정했다. Spacer grid는 KWU 14x14 spacer grid를 분할하여 사용하였다 (그림 2-12 참조). 횡방향의 측정위치는 그림 2-13에 표현되어 있는데 window로 부터 부수로의 횡방향으로 측정했다. 그림 2-13의 화살표 A, B, C는 측정방향과 위치를 표현한 것으로 A, B는 내부 부수와 벽면부수로 되어있고 C는 벽면부수로만 구성되어 있다.

그림 2-13은 측방향의 위치 L/D_n 가 20일 때 횡방향 A, B, C의 위치에서 측정한 것이다. 그림에서 보면 A, B의 속도분포는 평균속도보다 큰 부분이 대부분을 차지하고 C의 속도분포는 평균속도보다 작게 분포되어 있다.

A는 측정단면의 중심부수로 구성되어 있기 때문에 유량이 가장 크게 나타남을 알 수 있고 B는 벽면의 영향으로 A보다 유량이 작게 나타난다. C는 벽면부수로만 이루어져 A, B 보다 훨씬 작은 속도분포를 보여준다. 그림 2-14는 횡방향의 위치 A 일때 L/D_n 가 10, 20의 경우에 대해 측정한 속도분포이다. $L/D_n = 10$ 일때 window 가까운 영역에서 $L/D_n = 20$ 보다 크게 속도가 분포되어 있다.

그림 2-15는 난류강도 분포로 $L/D_n=20$ 일때 A, B의 위치에서 측정한 것이다. Window에 접근할 수록 난류강도가 증가되고 중심부로 갈수록 난류강도가 점차 작아지는 경향을 보여준다. A와 B를 비교할 때 B의 난류강도분포가 A 보다 큰 것은 B의 위치가 벽면부수로 C에 접근되어 있기 때문이다. 그림 2-16은 A의 위치에서 $L/D_n = 10, 20$ 일때 측정한 것으로 $L/D_n=10$ 일 경우 벽면부분에서는 $L/D_n=20$ 일 때보다 작게 분포되어 있고 중심부분에서는 크게 분포되어 있다.

7. LDV 측정기술의 추후 활용방안

副水路 解析에서 가장 重要的 變數中 하나인 流體速度는 지금까지 대부분 Pitot Tube나 Hot Wire Anemometer로 측정되었고 이러한 자료를 토대로 熱水力 解析코드가 개발되었으나 최근 개발된 Laser Doppler Velocimeter 副水路의 유속 분포측정에 적용한다면 부수로 해석코드개발에 크게 기여하리라 기대된다. 改善된 부수로 해석코드는 열수력여유도를 증가시키므로 原子爐 安全運轉에도 기여하게 된다.

본연구를 통하여 개발된 LDV 측정기술을 이용, 앞으로 核燃料集合體 부수로 내의 유속분포와 난류특성실험등을 수행하게되면 爐心熱水力 設計뿐만 아니라 사고시 安全解析을 위한 노심열수력 현상파악에도 크게 도움되리라 기대된다.

LDV 측정기술의 추후 활용방안을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 높은 분해도로 국부유속과 난류성분을 측정함으로써 높은 분해도의 개선된 부수로 해석코드개발에 적용할 수 있는 실험자료를 얻을 수 있다.
- (2) 부수로내의 미세한 유동구조를 측정함으로써 열전달현상의 근본구조와 Mixing vane에 의한 복잡한 난류현상을 이해하고 Mixing performance를 측정할 수 있다.
- (3) 부수로간 핵연료봉사이의 속도와 난류성분을 측정하여 부수로간 횡류혼합 현상을 정량적으로 계산할 수 있다.
- (4) 부수로내의 2차유동, 비등방성등을 측정하여 해석코드의 2차유동 모형화, 비등방성모형화, 모델상수등에 적용할 수 있다.
- (5) 시간과 공간의 autocorrelation을 측정하여 난류확산에 대한 근본적 이론을 이해할 수 있다.

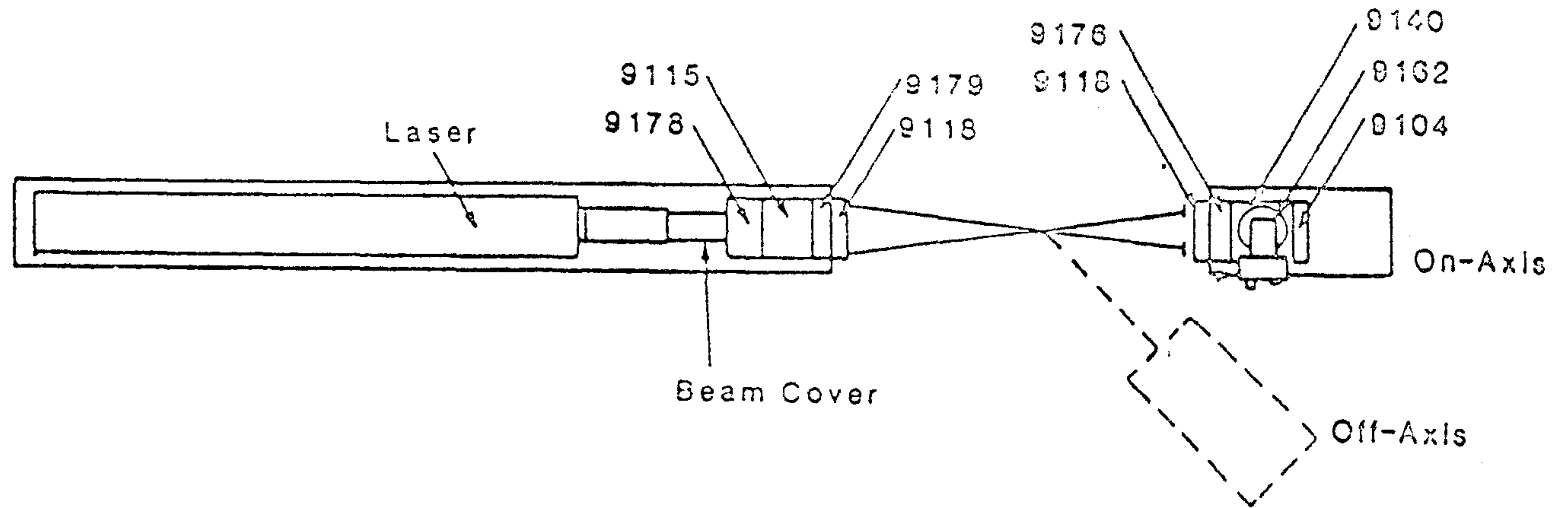


Fig.2-1 Dual Beam Laser Optic Alignment(Forward Scattered Alignment)

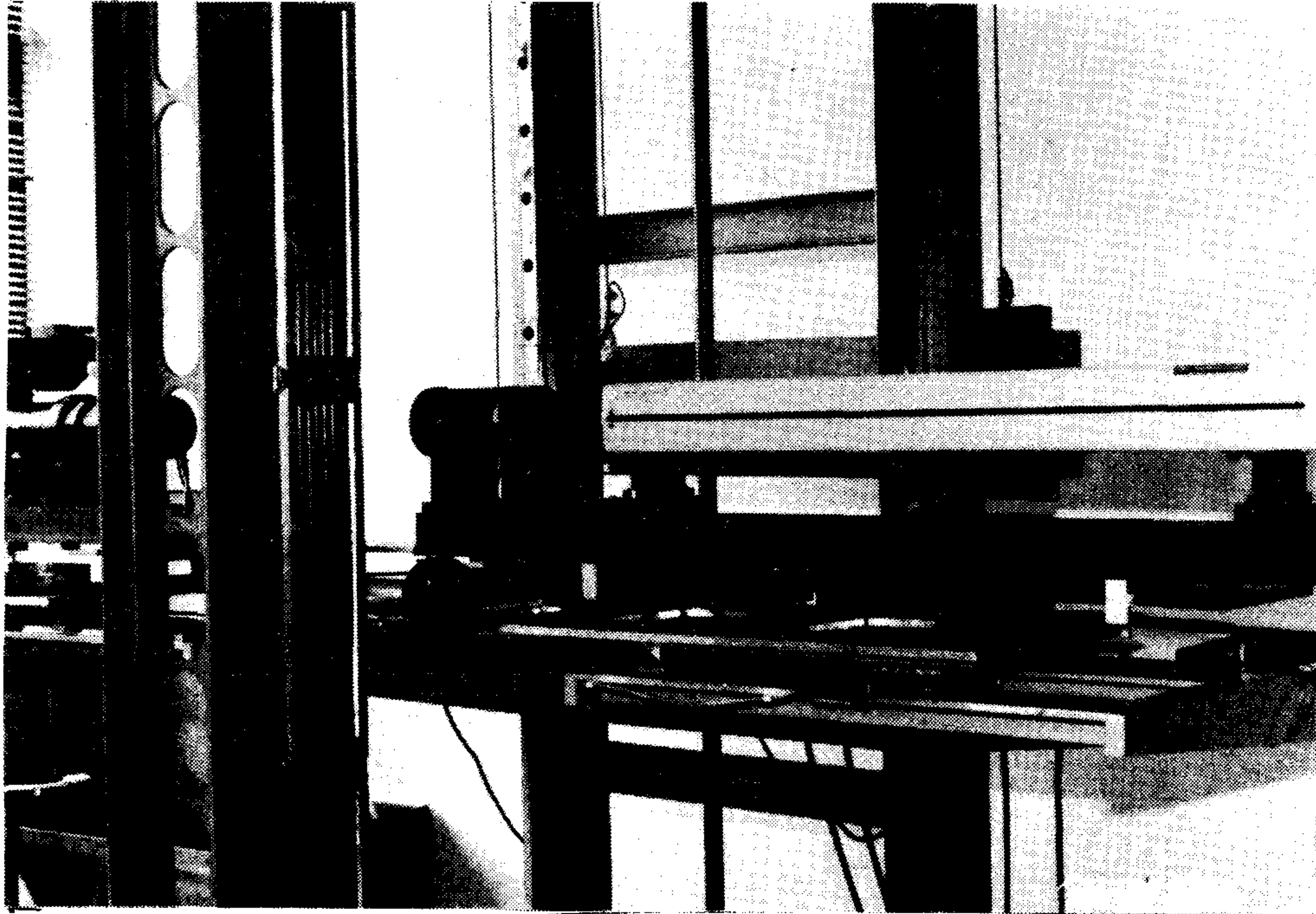


Fig.2-2 The Photography of Test Section and LDV System

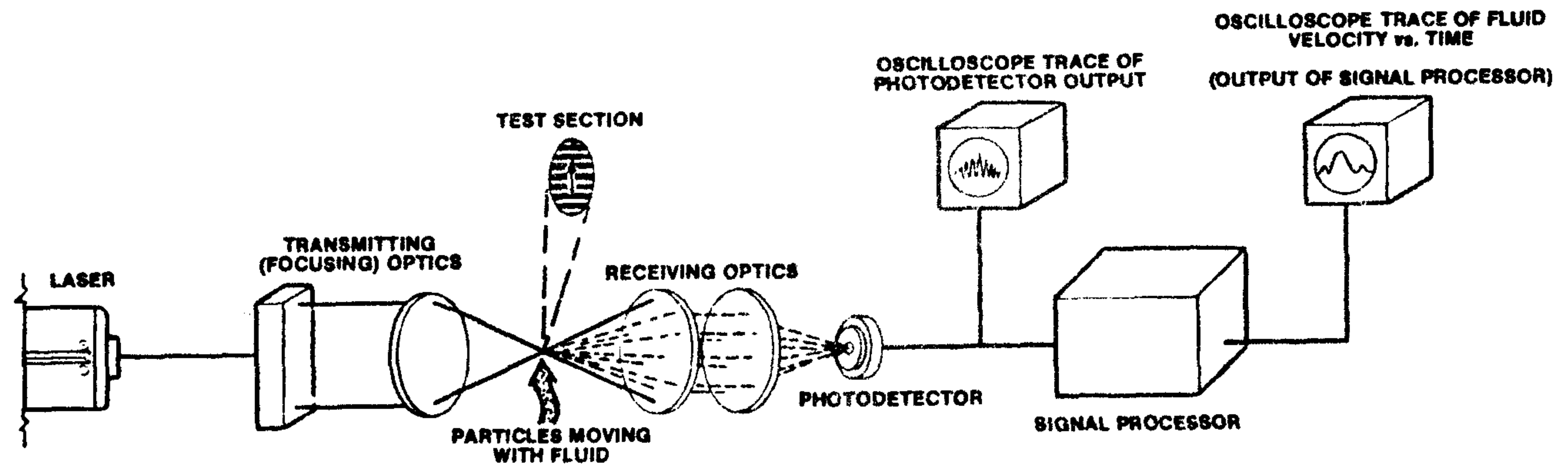
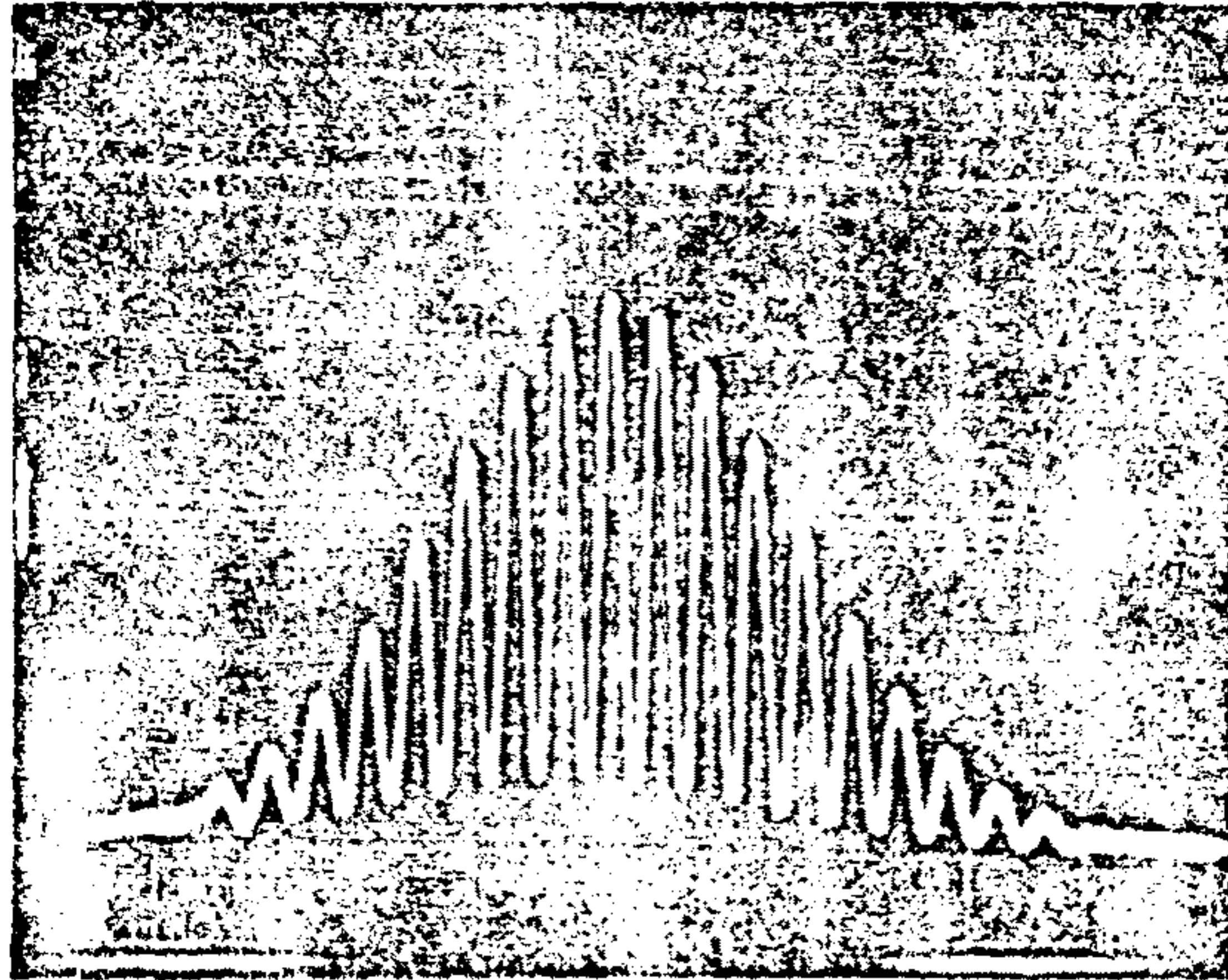


Fig.2-3 Schematic Diagram of Dual Beam LDV System Showing Fringe Pattern



20 mV/div

2 μ s/div.

Fig.2-4 Unfiltered Doppler Burst from Photodetector(Trace is Inverted ,50 Ohm Termination)

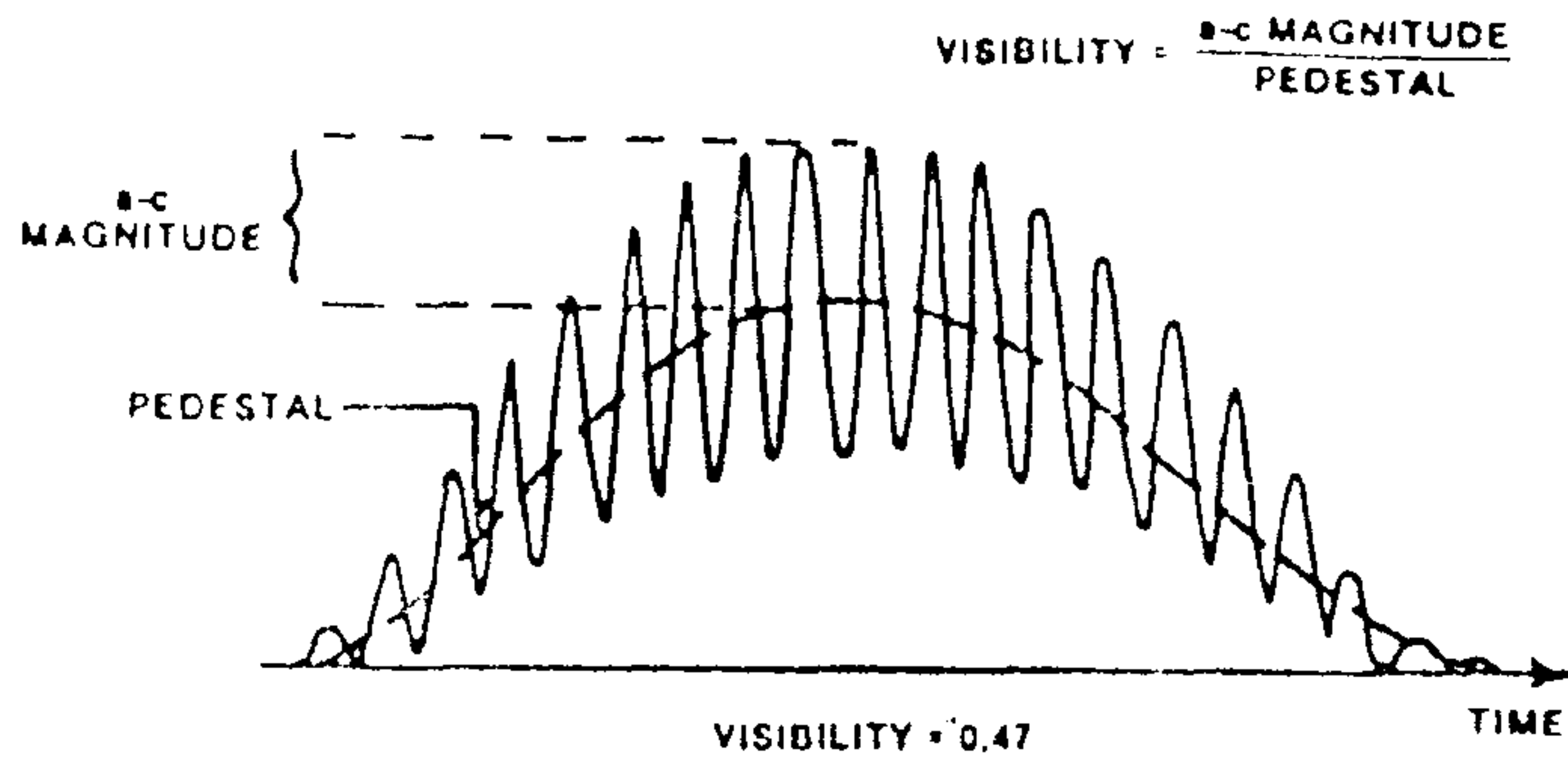


Fig.2-5 Doppler Signal and Pedestal Component of Doppler Burst

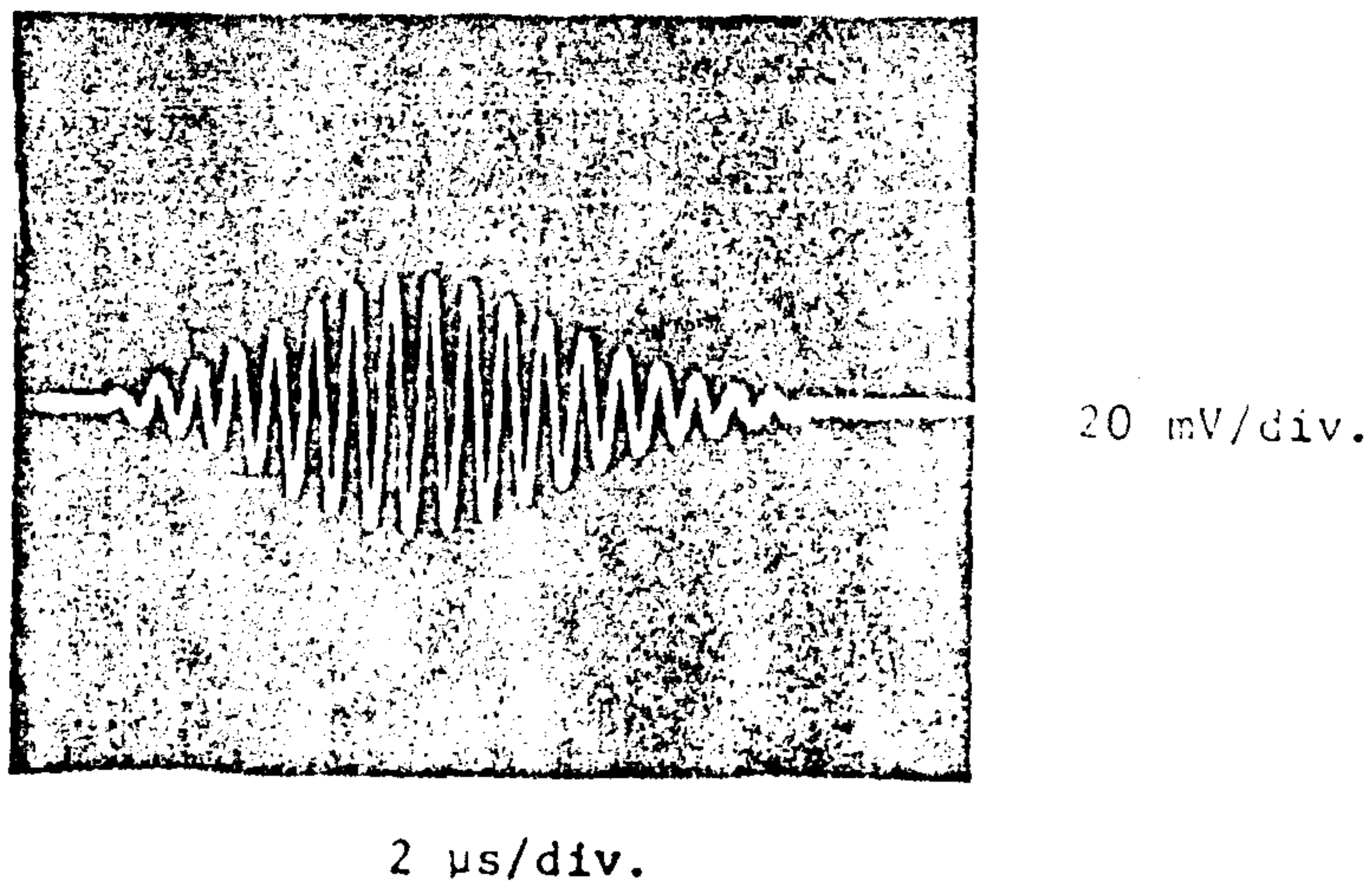


Fig.2-6 Filtered Output of the Amplified Filtered Doppler Signal (Low Limit Set Correctly Removing All of the Pedestal Component of the Raw Signal) (50 Ohm Termination)

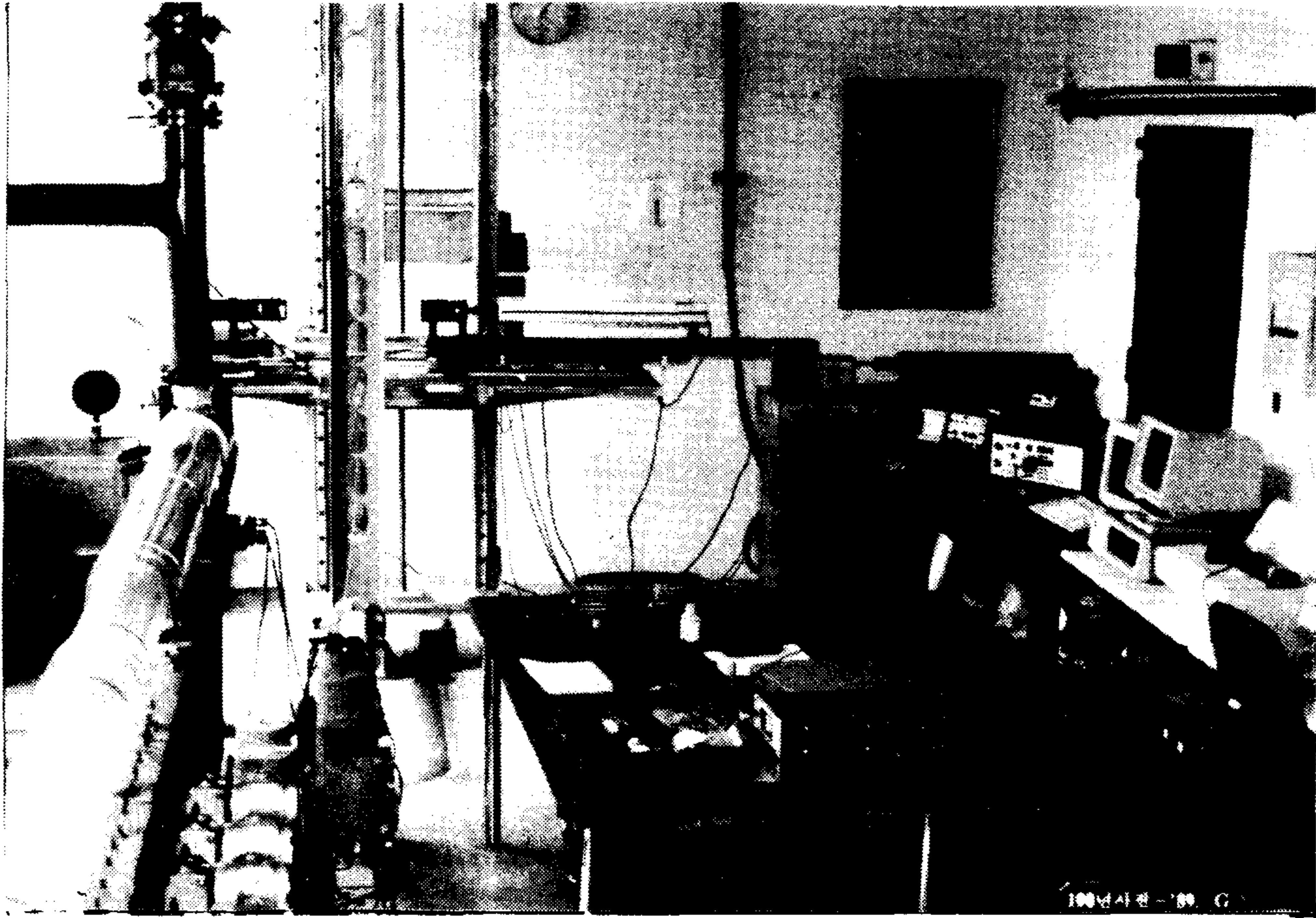


Fig.2-7 The Photography of LDV System and Acquisition System

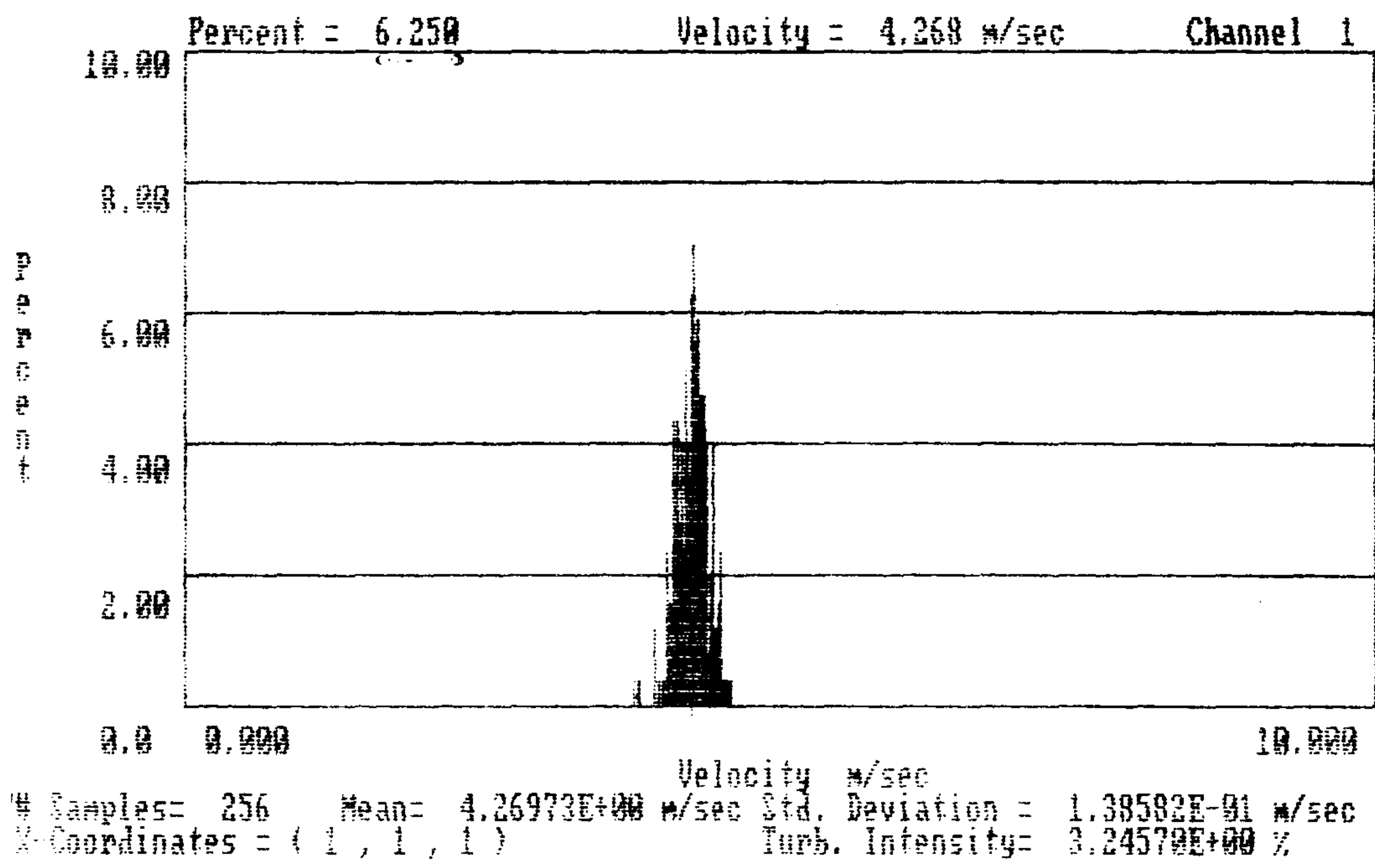


Fig.2-8 Probability Distribution Function

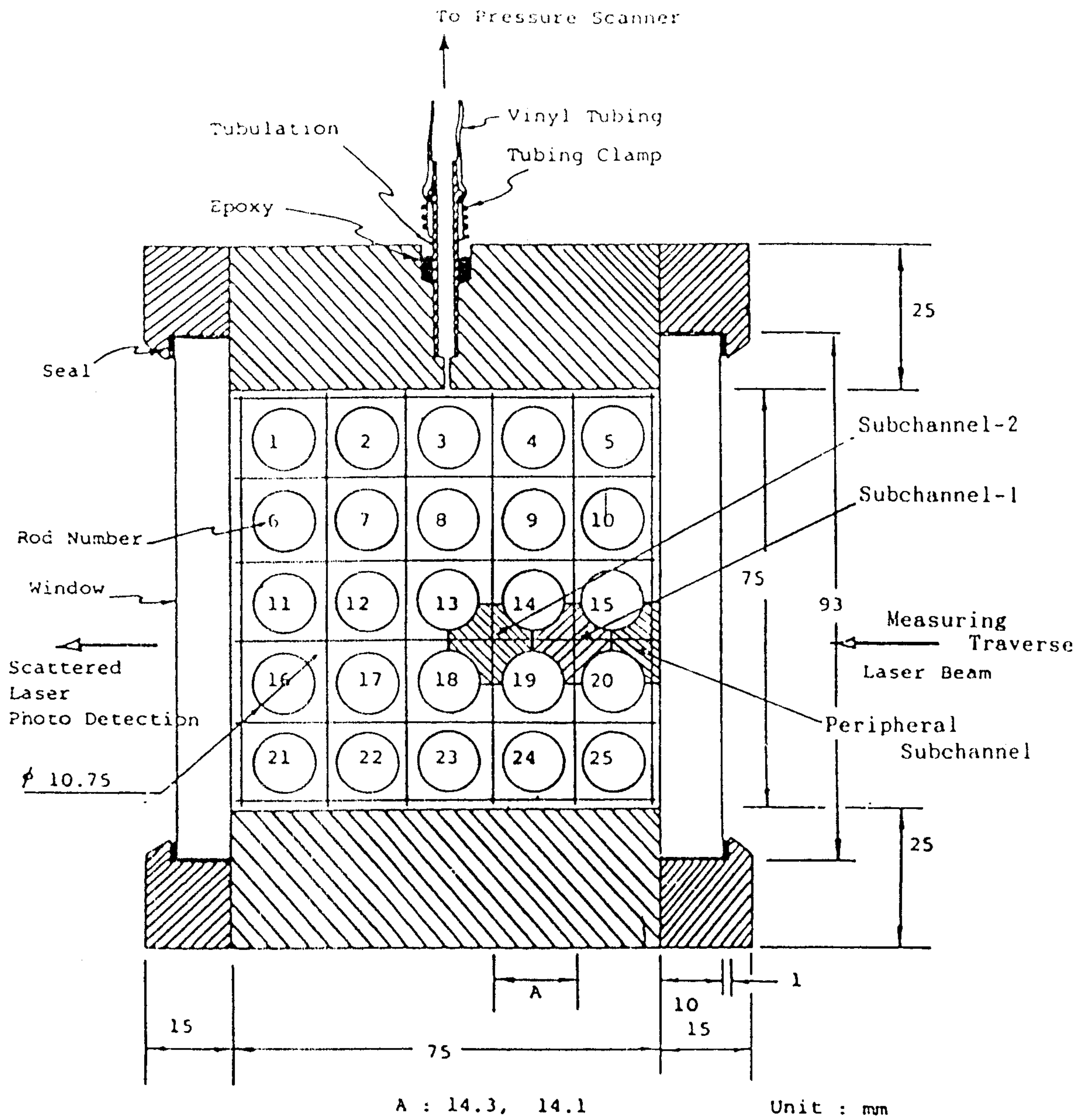


Fig.2-9 5x5 PWR Fuel Assembly Test Section.

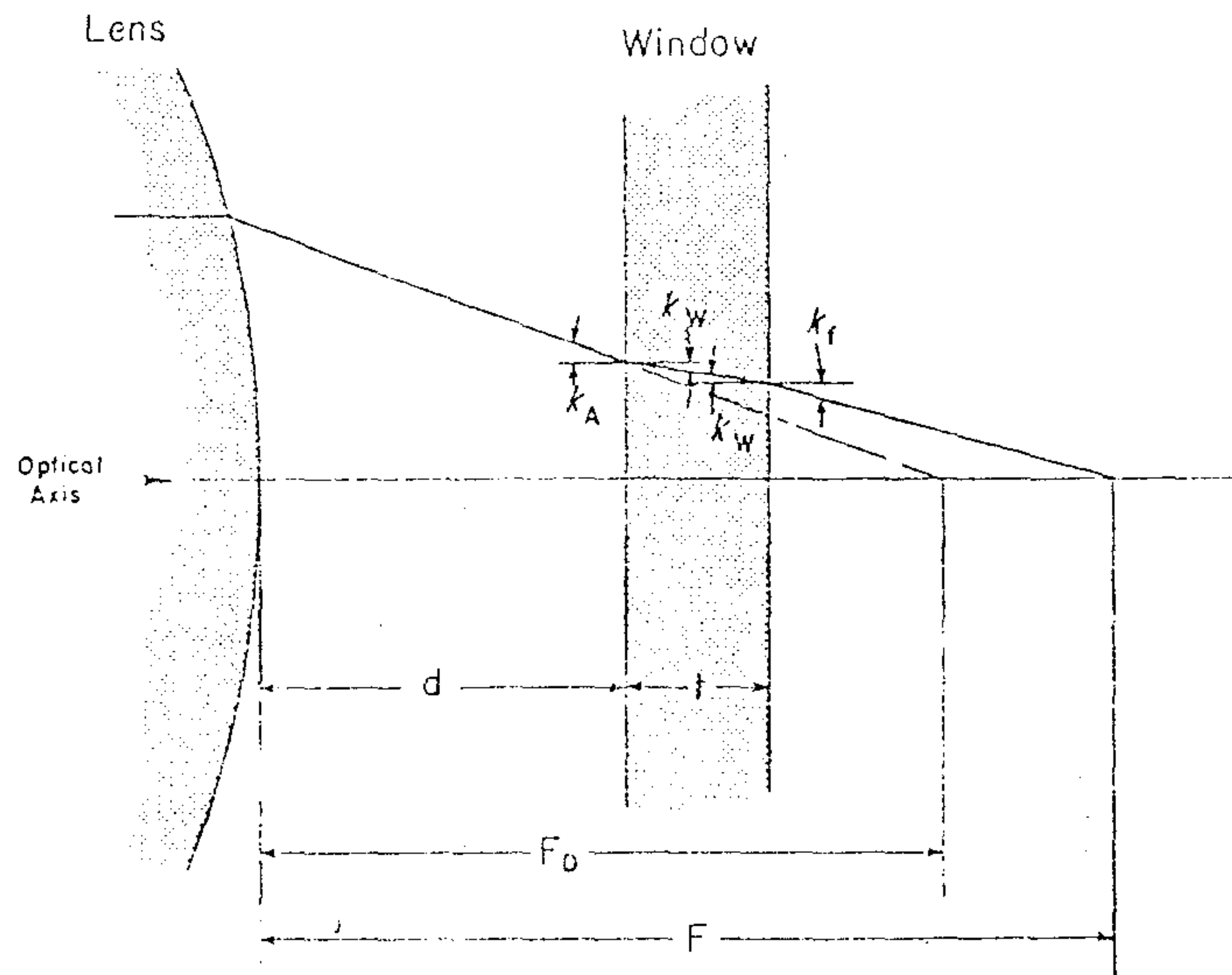


Fig.2-10 Refraction of Laser Beam by Window and Medium

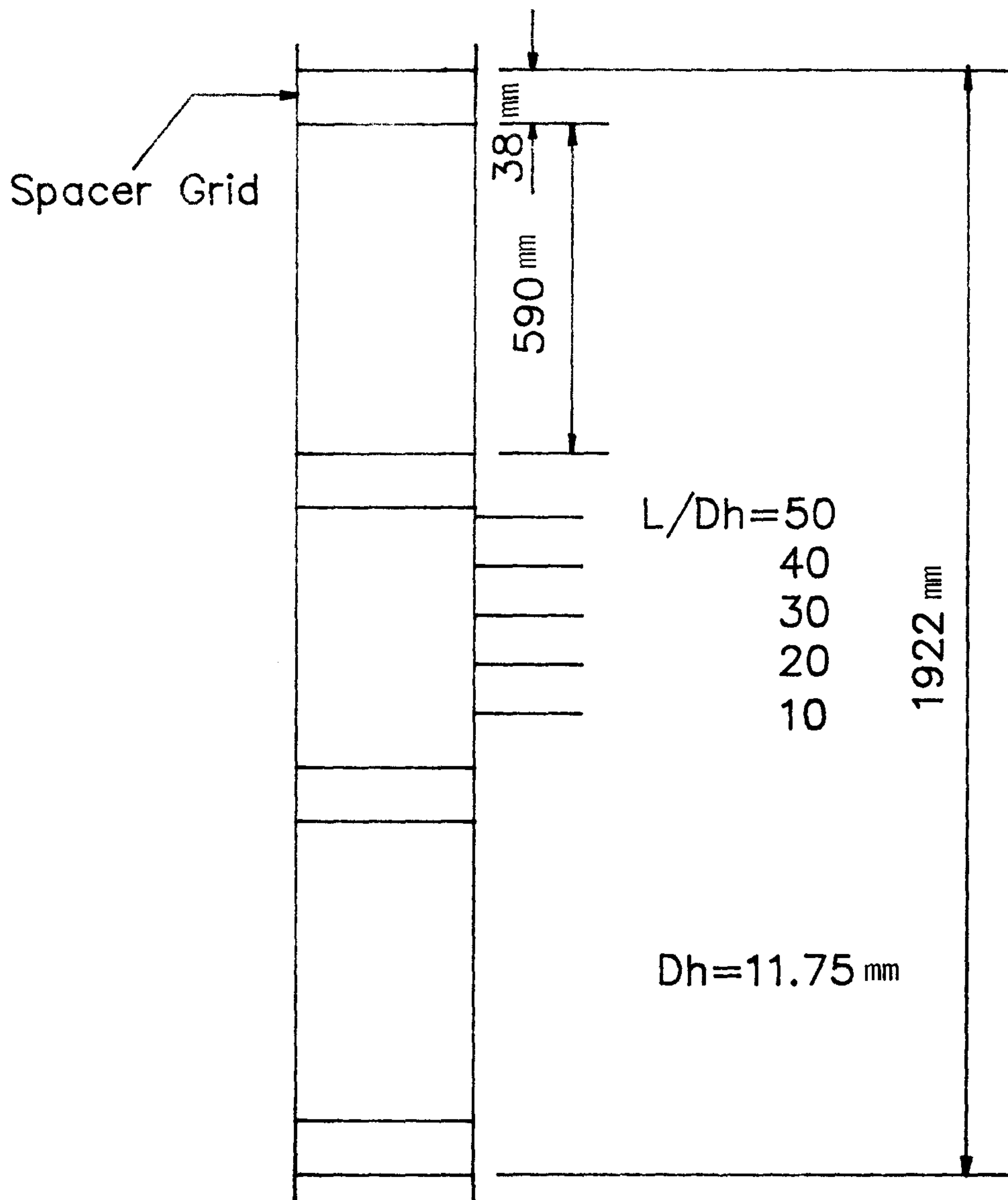


Fig.2-11 Axial Locations of Velocity and Turbulent Intensity Measurements

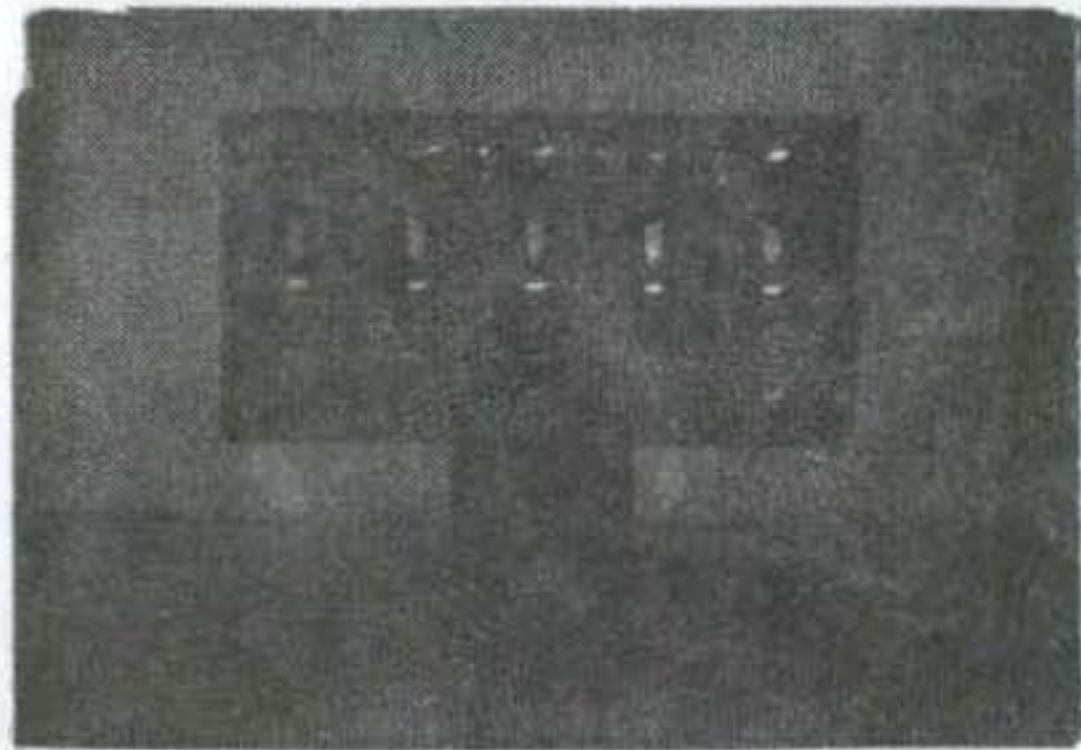
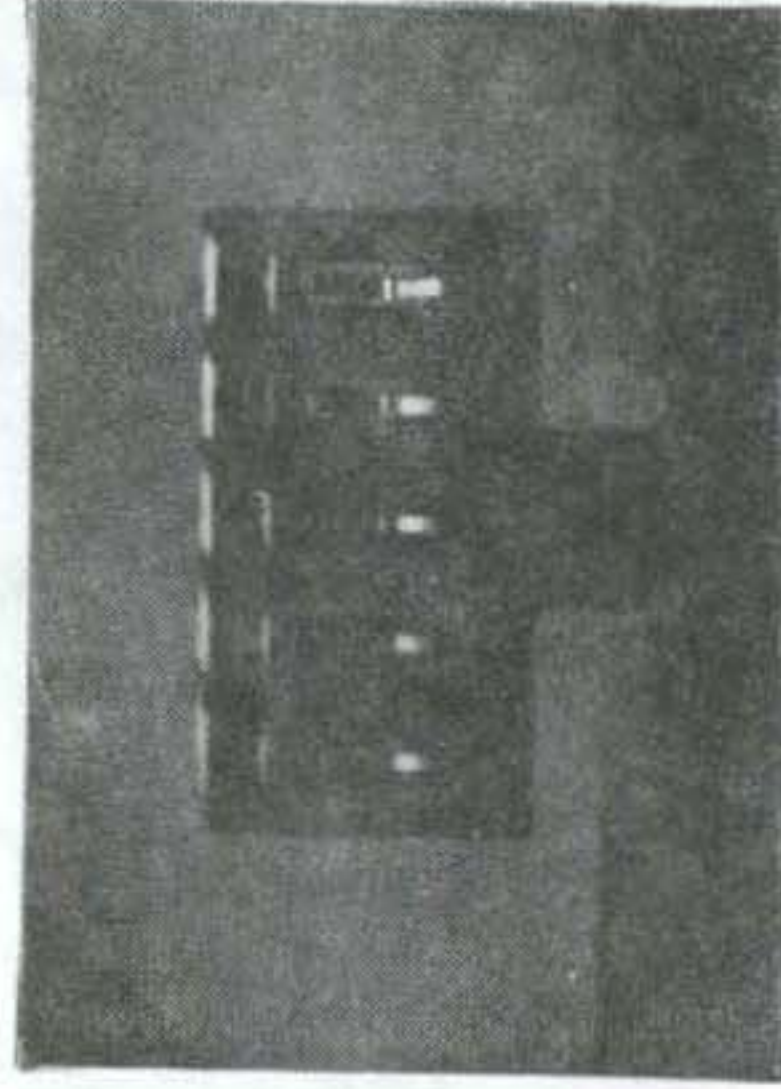
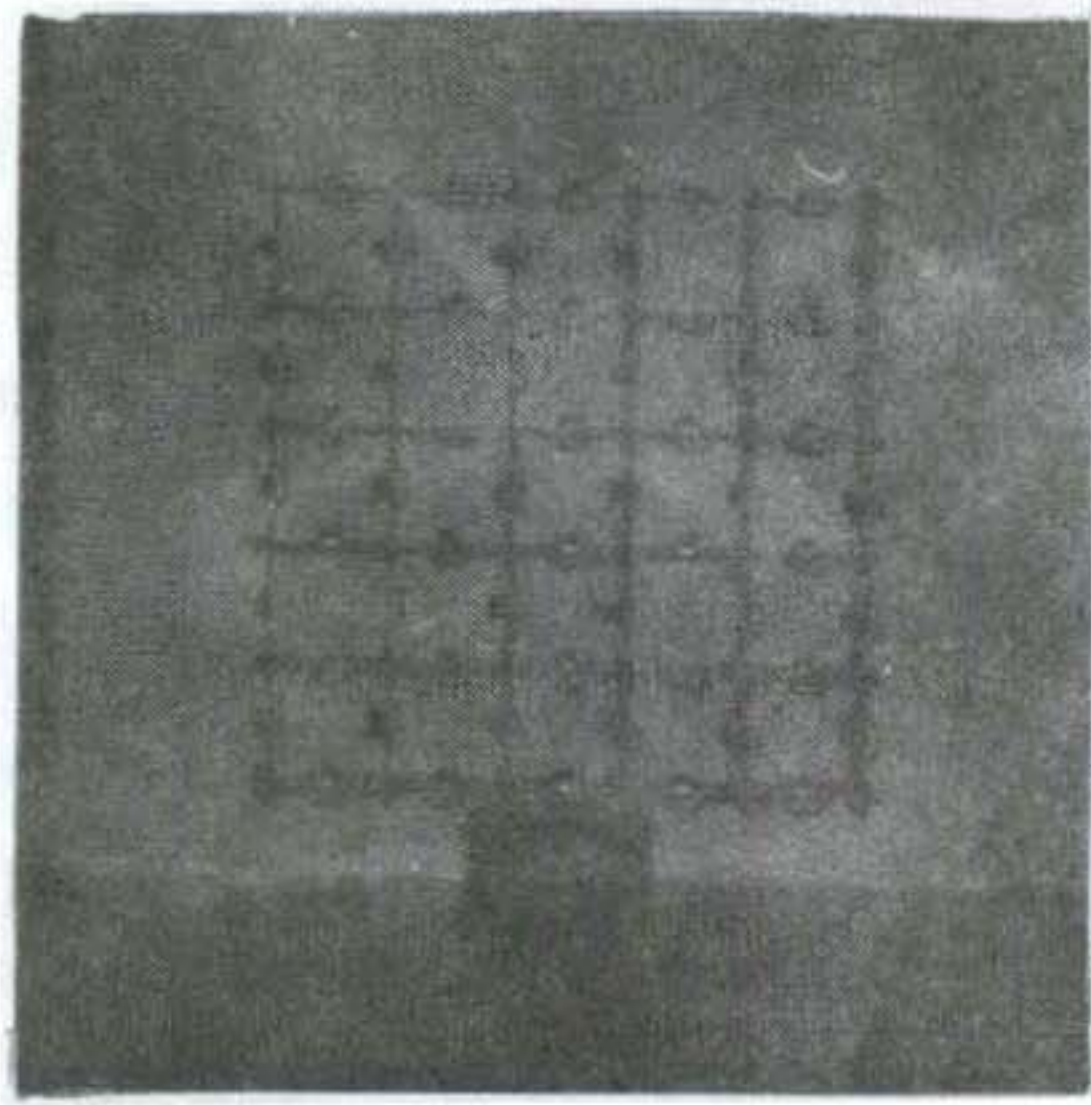


Fig.2-12 5x5 Spacer Grid Fabricated from the KWU 14x14 Spacer Grid

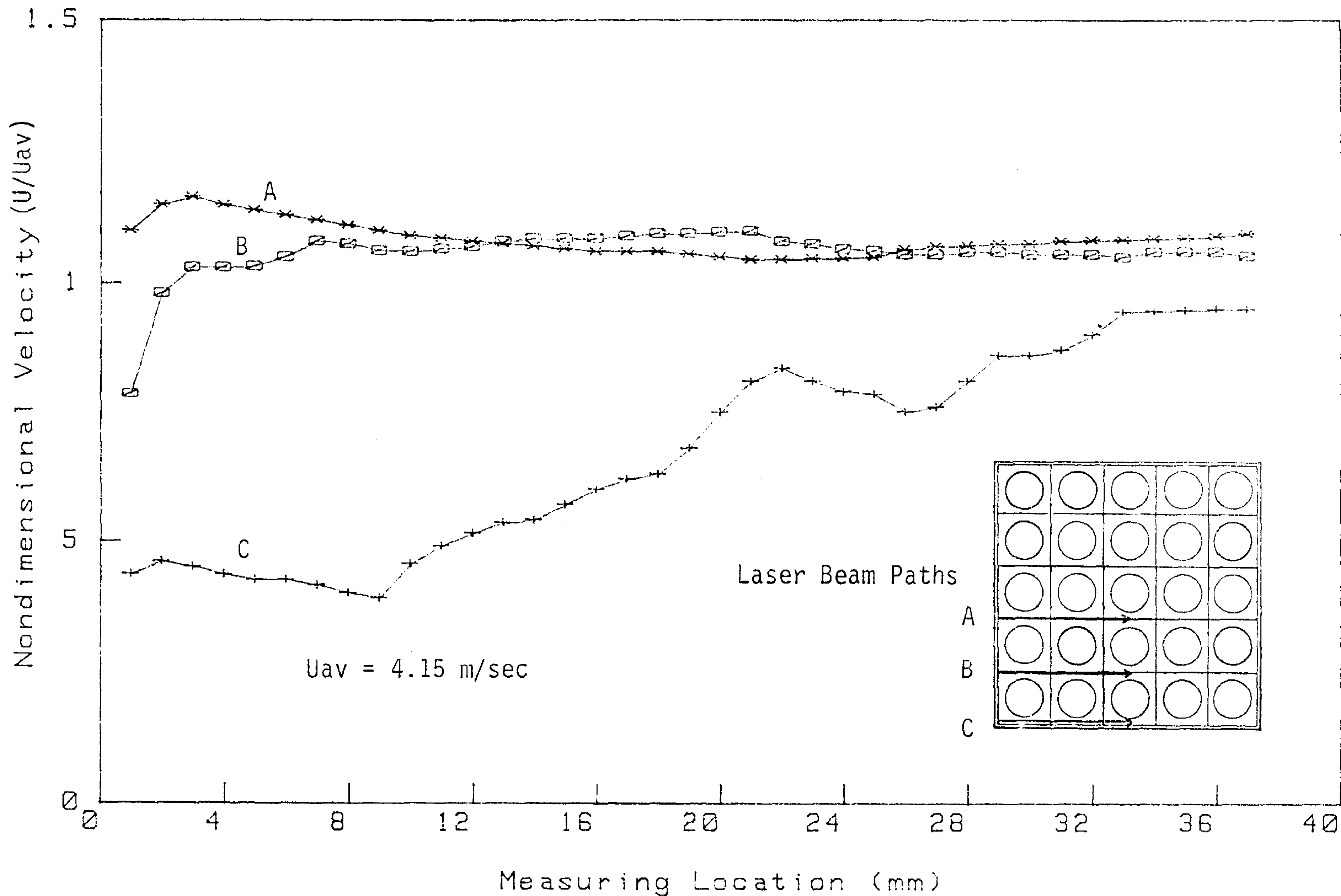


Fig.2-13 Axial Velocity Distribution at $L/D_h=20$

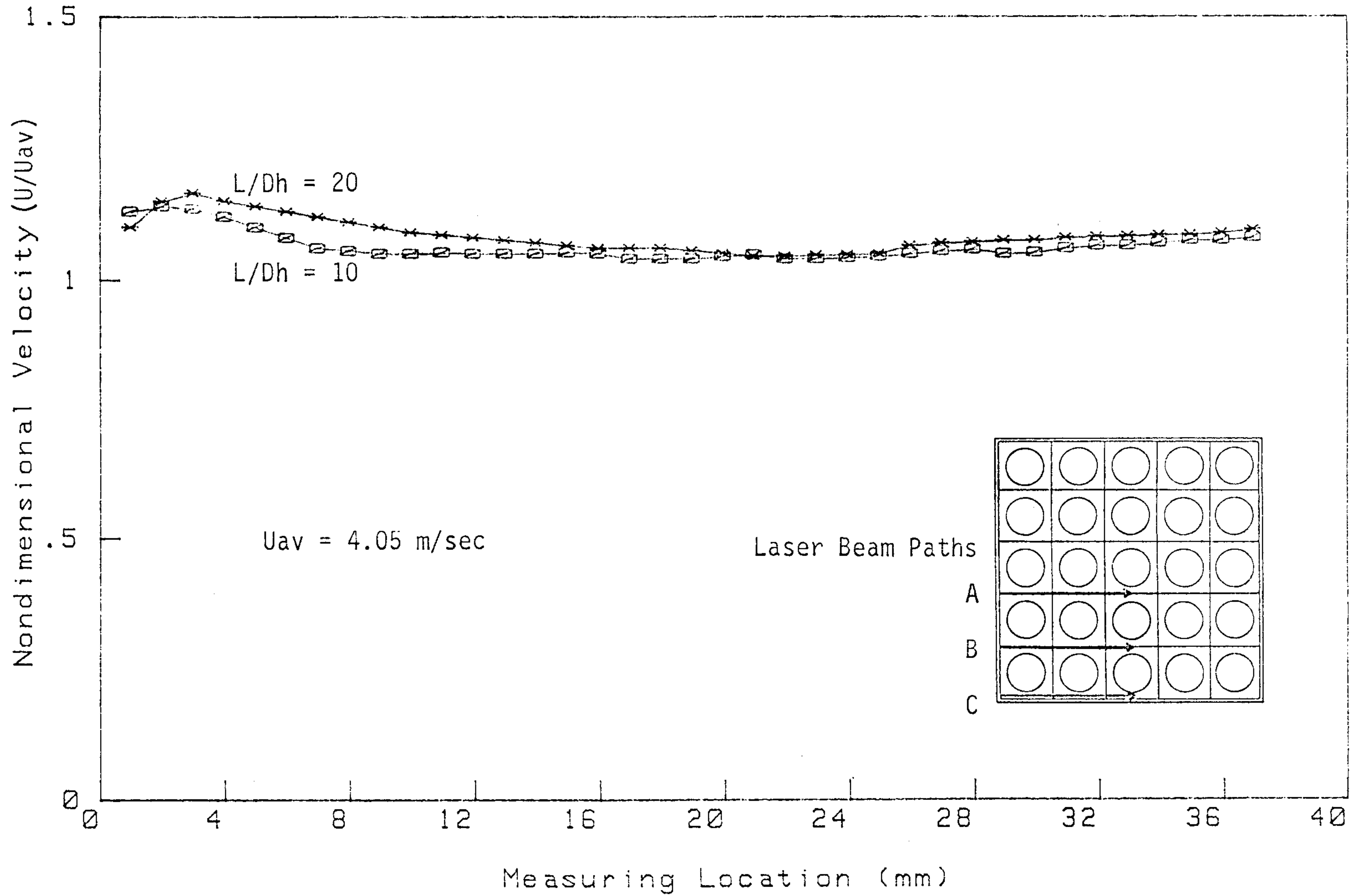


Fig.2-14 Axial Velocity Distribution at Transverse Measuring Direction A with Variation of Axial Location

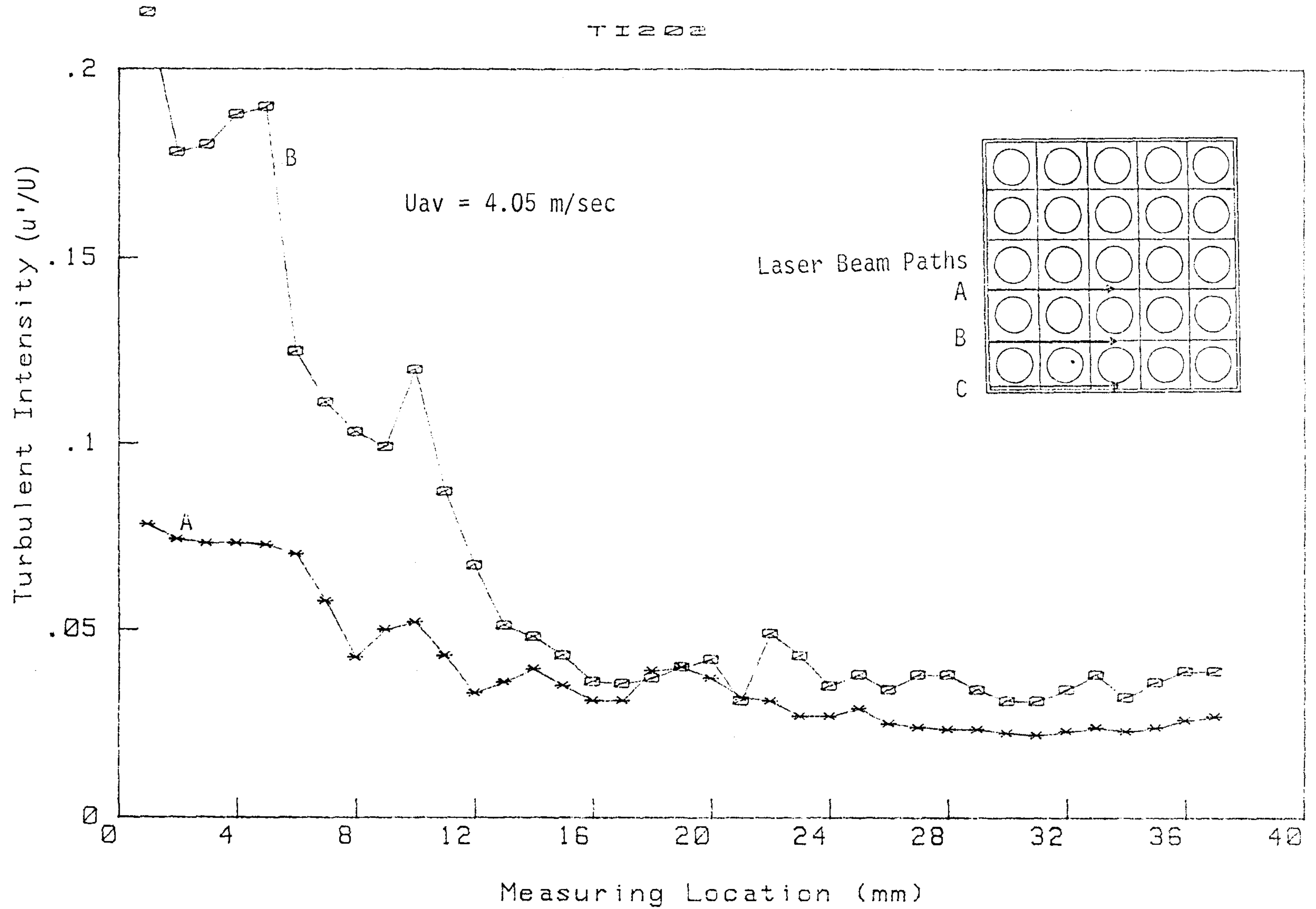


Fig.2-15 Turbulent Intensity Distribution at $L/Dh=20$

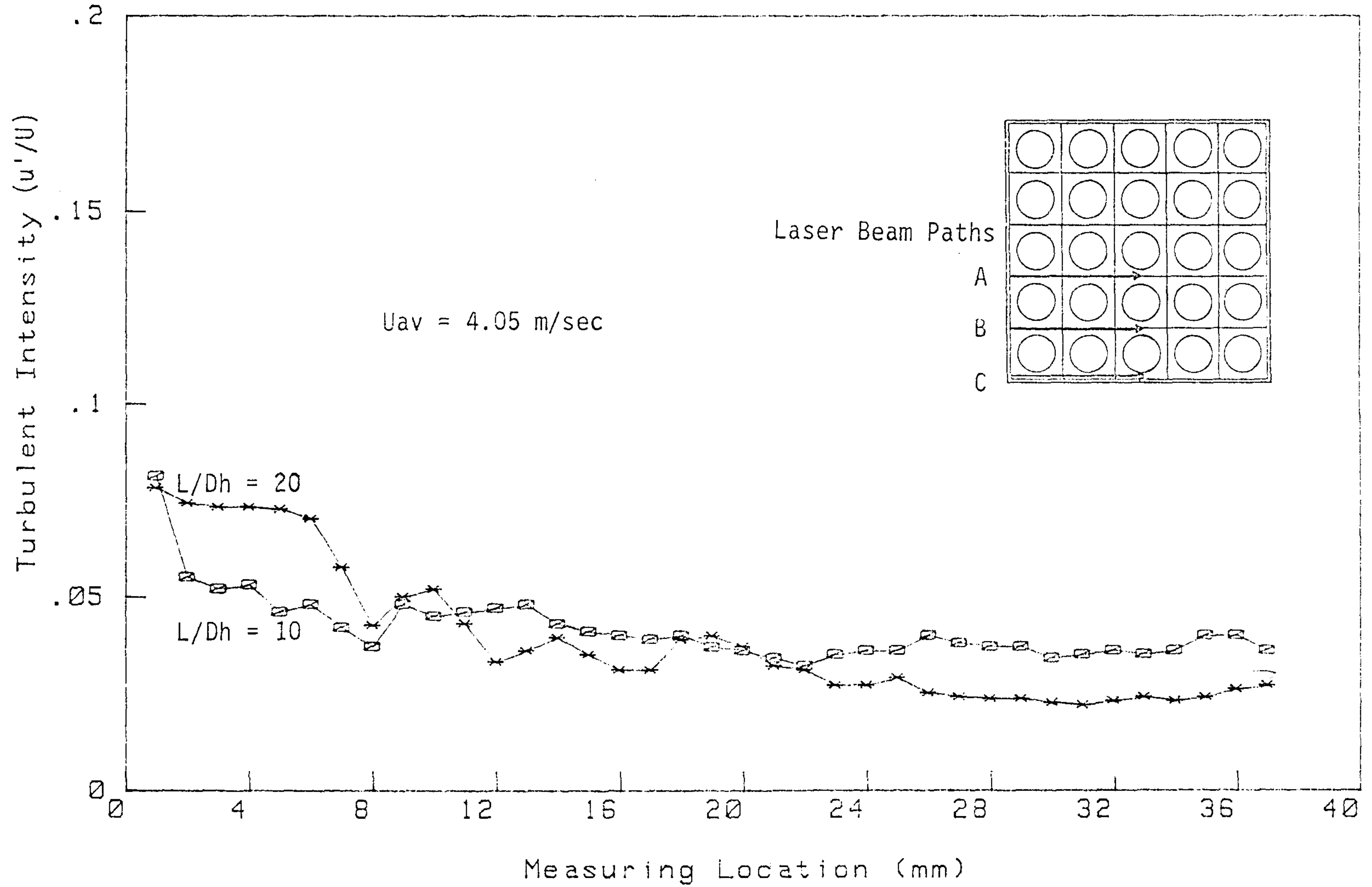


Fig.2-16 Turbulent Intensity Distribution at Transverse Measuring Direction A with Variation of Axial Location

여 백

第3節 KWU의 熱水力 設計 및 爐外試驗

1. 概要

본 절에서는 KWU에서 수행하고 있는 재장전 핵연료집합체의 熱水力 設計 및 이와 관련된 熱水力 試驗에 대하여 기술하였다. 재장전 핵연료집합체가 장전된 혼합 노심이 발전소의 안전 한계치 내에서 운전되고 있음을 보여 주기 위해서는 熱水力 電算코드를 이용한 熱水力 解析이 요구되며, 熱水力 解析시에는 실험으로부터 구한 핵연료집합체의 열수력 특성치와 각종 실험 계수가 필요하다. 그러므로 熱水力解析 結果의 신뢰성을 높이기 위해서는 해석 방법 및 절차 뿐만 아니라 관련된 실험의 내용, 실험 방법 및 실험결과에 대한 검토가 수반되어야 한다. 따라서 본 절에서는 KWU의 熱水力設計, 解析과 兩立性 解析에서의 일반적인 개요와 水力學的 解析 항목인 핵연료집합체의 壓力損失, 浮揚力 및 橫流에 대하여 조사하였고, 이와 관련된 실험으로서 KWU에서 수행한 실물 핵연료집합체의 壓力降下試驗, 5 X 5 모형 핵연료집합체의 壓力降下試驗 및 橫流試驗 등의 실험장치, 실험 방법 및 절차, 실험 결과의 해석 및 결과의 적용 등에 관하여 기술하였다. 본 절에 수록된 내용은 PWR 핵연료집합체의 국산화와 관련하여 앞으로 연구소에서 수행될 각종 爐外試驗을 위한 기초자료로 활용되며, 올해 설치될 PWR 핵연료 爐外試驗施設(PWR Hot Test Loop)의 測定裝置의 설계, 실험변수의 설정 및 실험자료의 解析에 있어서 크게 도움이 될 것이다.

2. 熱水力設計 및 解析

가. 再裝填 核燃料의 熱水力設計

원자로 노심에 대한 열수력설계의 목적은 원자로의 운전범위 및 보호계통의 안전한계가 초과되지 않는 범위내에서 핵연료의 단위길이당 발생열, 노심의 유량, 入口 溫度 및 系統의 壓力들을 결정하는데 있다. 재장전 노심의 열수력설계에

있어서는 기존 핵연료집합체와 재장전 핵연료집합체가 FSAR과 Technical Specification에 기술된 사항들이 발전소의 안전한계치 내에서 운전되고 있음을 보여줘야 한다. 그러므로 재장전 핵연료집합체와 기존 핵연료집합체 사이의 熱水力學的 양립성을 壓力損失, 횡류 및 CHF에 대하여 검토하며, 아울러 핵연료봉의 중심부의 용융이 피복재의 안전성에 영향을 미치지 아니하나 fission gas의 발생을 증가시킬 수 있으므로 핵연료봉의 중심부는 용융되지 않음도 보여줘야 한다.

1) 壓力損失 및 橫流

기존 노심에 KWU의 핵연료를 장전하면 一次系統內에서 유로는 노심내에서 변경될 수 있다. 그러므로 一次系統의 水力學的 특성은 재장전 핵연료집합체의 壓力損失係數가 기장전 핵연료집합체와 다를 경우에는 바뀌게 된다. 노심의 전체流量은 핵연료집합체의 壓力損失係數가 변경됨으로 약간 달라질 수 있으며 각각의 핵연료집합체에서의 局所 流量은 보다 민감하게 영향을 받을 수 있다. 아울러 노심내 핵연료집합체간의 水平 流動 즉 횡류도 증가될 수 있다. 그러므로 재장전 노심의 설계에 있어서는 기존 발전소의 水力學的 특성의 변화를 최소화 하기 위하여 재장전 핵연료집합체의 損失係數를 기존핵연료집합체의 損失係數와 동일하게 되도록 핵연료집합체의 구조를 설계하며 이로서 기존의 안전해석보고서(safety analysis report)의 요구조건을 만족시킬 수 있다.

2) Critical Heat Flux

피복재의 구조적변화를 피하기 위해서는 피복재의 溫度는 500 °C 이하로 유지되어야 한다. 일반적으로 film boiling을 피하기 위한 요구조건이 충족되면 상기의 설계요건을 만족시키게 된다. 노심의 열수력설계에 있어서는 핵연료의 熱流束이 DNB(Departure from Nucleate Boiling)에 해당되는 熱流束보다 같거나 큰 값에서 어느기간 동안 유지되면 핵연료의 피복재는 손상되는 것으로 가정한다. DNB의 여유는 DNBR(Departure from Nucleate Boiling Ratio)로 표시되며, DNB 열

유속과 실제 熱流束과의 비로서 나타낸다. 이때 DNB 熱流束은 DNB 실험자료를 기초로 한 相關式으로 부터 구해진다. 최소 DNBR은 95%의 신뢰도와 95%의 확률로서 DNB가 일어나지 않음을 확인하기 위하여 실험자료를 평가함으로써 구해진다.

재장전 KWU 핵연료의 설계에서는 transient와 사고시의 解析을 위한 조건들의 변화가 일어나지 않도록 하기 위하여 기존 핵연료의 DNB 여유를 만족시키고 있다. 그러나 이런 조건이 만족되지 않을 경우에 Technical Specification은 수정되어야 하며 DNB와 관련된 transient 解析을 수행하여야 한다.

나. 兩立性 解析

1) 兩立性 解析의 方法

양립성의 解析은 재장전 핵연료집합체를 노심에 장전하였을 때 새로운 노심은 기존노심에 비하여 수력학적 열적 특성이 크게 변하지 않음을 보여주는데 그 목적이 있다. 그러므로 양립성 해석에서는 핵연료집합체의 壓力損失, 氫류 및 CHF에 대한 양립성 검토가 수행되어야 한다.

양립성 해석은 KWU의 기존 설계코드와 방법 및 모델들로서 계산을 수행하며, 최초 핵연료 공급자에 의해서 주어지는 자료들을 기초로 하여 계산한다. 그러나 발전소의 동일한 조건들을 입력자료로 사용하더라도 설계방법과 모델에 따라서 壓力降下와 DNB는 약간 다르게 계산될 수 있다. 그러므로 양립성 계산에 있어서 첫번째 단계는 이미 설정된 발전소 조건들을 입력자료로 하여 앞선 주기에 대한 DNBR과 壓力損失을 산출한다. 이로서 앞으로 사용될 혼합노심에서 계산되는 결과들과 비교할 수 있는 기초자료 $DNBR_{FA}$ 를 얻게 된다.

다음 단계로서는 일정한 량의 재장전 핵연료집합체를 기존 핵연료집합체와 교체하였을 때의 노심에 대한 解析으로서, 두 종류의 핵연료집합체에서의 流量은 기장전 핵연료집합체에 대한 壓力損失 예측량과 재장전 핵연료집합체의 壓力損失

係數를 이용하여 산출한다. 아울러 혼합노심에서의 핵연료집합체의 압력손실, 국부유속을 구하며, 이 값을 이용하여 각각의 핵연료집합체에 대한 $DNBR_{CFA}$ 와 $DNBR_{RFA}$ 와 비교하게 된다. 이와같이 첫단계에서 계산된 $DNBR$ 이 둘째 단계에서 계산된 값과의 차이가 미소할 때에는 혼합노심에 대한 안전한계를 수정할 필요가 없게되고 모든 핵연료집합체는 양립성을 만족하게 된다. 그러나, $DNBR$ 의 계산에 있어서 큰 차이가 나타나게 되면 양립성의 만족을 위한 Technical Specification에서의 수정과 핵연료의 사용에 있어서 적절한 조치를 검토하여야 한다. 사고해석에 있어서 FSAR의 초기조건들이 변하지 않을 경우에는 요구조건 즉, Technical Specification은 혼합노심에서 그대로 적용된다.

2) 水力學的 解析

水力學的 解析에서는 노심에 장전되는 모든 종류의 핵연료집합체를 대상으로 하여 壓力損失量과 壓力損失係數를 비교한다. 이것은 일차노심과 재장전에 따르는 천이노심내에 장전된 모든 핵연료집합체를 대상으로 한다. 또한 핵연료집합체의 hold down 裝置의 설계에 이용되는 부양력도 모든 천이노심에 대하여 해석되어야 한다.

가) 壓力損失 解析

재장전 핵연료집합체에 대한 정상운전시의 壓力損失係數는 재장전 핵연료집합체의 구조적 설계자료와 압력손실 자료를 얻은 운전조건을 근거로 하여 電算 코드를 이용하여 계산되며, 이 값들을 customer's 핵연료집합체의 壓力損失係數와 비교하여야 한다. 핵연료집합체의 熱水力解析에 있어서는 일차노심의 핵연료집합체 및 천이노심에서 장전되는 모든 종류의 핵연료집합체에 대한 수력학적 자료가 요망된다. 수력학적 자료는 전체 핵연료집합체, 摩擦, 스페이서 그리드, 하부 및 상부노즐에 대한 자료로 구성되며, 이들 자료는 壓力損失量에 기초한 자료와 무차원 변수인 Re수에 기준을 두고 산출한 壓力損失係數에 기초한

자료로 나타 낼 수 있다. 이와 더불어 전체 流量, bypass, 壓力, 입구 및 출구 溫度 및 핵연료집합체에서의 流動 面積 등의 자료도 필요하다.

핵연료집합체의 水力學的 특성의 규명과 열수력설계 코드를 검정을 위한 壓力 降下 試驗에서는 길이 方向으로 壓力탭을 설치된 試驗部에 핵연료집합체를 장전 한 후 壓力탭 조합에서 壓力降下量을 測定한다. 이때 2개의 壓力탭에서 測定된 壓力값으로 부터 두 지점 사이의 壓力損失은 구해진다. 그러나 시험부와 壓力 測定 配管에서 중력에 의한 壓力차이가 존재할 때와 핵연료집합체에서 열이 발생될 때에는 중력과 가속도에 의한 항도 고려하여야 한다. 핵연료집합체의 壓力損失係數의 특성은 실험에서 구한 壓力損失量을 기초로 하여 Reynolds 수에 대하여 산출된다. 그러나 이와같은 방법으로 계산된 壓力損失係數는 핵연료봉, 試驗部の 하우징 및 스페이서 그리드를 포함한 전체 시험부에서의 測定값임을 유의 하여야 한다.

핵연료집합체의 水力學的 兩立性 解析에 있어서 일반적인 고려사항은 다음과 같다.

- 재장전 핵연료집합체의 모든 부위의 壓力損失係數는 기장전 핵연료집합체의 상관된 값과 근접할 수록 좋다. 만일 관련된 값들이 동일하면 핵연료 집합체는 완전한 양립성을 갖게된다.
- 만일 윗항이 만족되지 않으면 전체 핵연료집합체의 壓力損失係數가 동일함을 보일 수 있고, 이때 재장전 핵연료집합체는 거의 완전한 양립성을 갖게 된다.
- 실제적으로 위의 두항을 만족시키기가 어려우며 이때는 $K_{FA, R-FA}$ 가 $(0.95-1.05) * K_{FA, customer}$ 이거나 혹은 $K_{I, R-FA}$ 가 $(0.90-1.10) * K_{I, customer}$ 의 오차 범위내에 있으면 이 핵연료집합체는 水力學的 양립성을 갖게된다. 그러나, 횡류와 부양력 및 열적특성에 관한 영향력은

고려하여야 한다.

- 만약 K_1 와 K_{FA} 에서 큰 차이가 발생되면 기계적 설계 변경에 대한 검토가 요망된다.

나) 浮揚力 解析

핵연료집합체는 원자로 내에서 流體 流動으로 인한 수직 상향의 부양력을 받게 되며 이는 핵연료집합체의 hold down 裝置에 의해 지지된다. 그러므로 hold down 裝置의 설계시에는 핵연료집합체에 작용하는 외력의 합으로 표시되는 다음식으로 부터 자료를 얻게 된다.

$$F_{HD} > F_{LU} + F_{BU} - F_w \text{ [kN]}$$

F_{HD} : Force which has reliable to be obtained by the hold down spring

F_{LU} : Hydraulic flow force on the FA

F_{BU} : Buoyancy force of the FA

F_w : Force by the weight of the FA

윗식의 F_{LU} 는 열수력설계 부서에서 컴퓨터 코드를 이용하여 구하며, 이 자료를 기계설계 부서에 보내어 hold down 裝置의 설계에 이용케 한다. 재장전 핵연료집합체의 설계에 있어서 F_{LU} 값은 기계설계 부서에서 가능한한 일찍 요구하게 되나 설계코드로서 최종적인 F_{LU} 값을 구하는데는 시간을 요하게 된다. 그러므로 설계시의 모든 불확실성을 포함할 수 있는 보수적인 F_{LU} 를 예비적으로 구하는 것이 필요하며, 이후에 최종적인 F_{LU} 를 계산하게 된다.

부양력의 계산에 있어서는 hold down 裝置가 충분한 강도를 갖도록 설계하기 위하여 다음과 같이 流量, bypass, 入口 流量分布, 壓力損失 오차, 펌프의 over-

speed 등에서 보수적인 가정을 하게 된다.

- 流量 : 기계적 설계유량이 사용되어야 하나 측정오차가 포함된 시운전시의 測定流量도 사용된다.
- Bypass : 기계적 설계시에 안내관으로 흐르는 bypass 流量이 사용되며 노심 중심부의 5개의 핵연료집합체가 "man hole"에 위치함으로 인한 영향이 고려된다.
- 壓力損失 오차 : 전체 핵연료집합체의 壓力損失係數에 대한 최대 오차가 이용된다.
- 펌프의 overspeed : 펌프의 과속영향은 고온 full power 조건에서만 중요한 것으로 가정되며, 이는 hold down 裝置의 설계에는 적절하지 않다. 그러나 재장전 핵연료집합체의 부양력은 기존 핵연료집합체의 값과 비교되며, 이로서 펌프의 과속운전사고시의 hold down 裝置의 효과에 대한 정보를 얻을 수 있다.

모델링되는 노심은 반경방향으로 서로 대칭이 됨으로 1/4 노심의 사용이 바람직하다. 流量 再分布에 대한 반경방향 出力分布의 영향은 혼합노심에서는 무시할 수 있으며 특히 스페서 그리드의 壓力損失이 매우 다를 때에는 더욱 그러하다. 그러므로 電算解析時에는 동일한 출력분포가 사용된다. 만약 실제 혼합노심에 대한 적절한 출력분포를 얻을 수 없으면 FSAR의 초기노심의 반경방향 출력분포를 사용한다. 그리고 軸方向의 出力分布는 열설계시의 chopped cosine 分布가 이용된다. 노심내의 특정한 구역에서의 流動은 입구 유동의 maldistribution에 따른 평균유량의 multiplier로 고려되며 다음과 같다.

- 주변의 핵연료집합체는 최소 流量係數가 적용되며 5%의 핵연료집합체는 최대 流量係數를 갖게한다.
- 流量係數는 대칭선을 따라서 선형적 값을 갖도록 하며 나머지 핵연료집합체

도 이와 같은 방법으로 적절한 값을 갖도록 한다.

- "manhole"의 영향은 5%의 係數를 갖도록 한다.
- 이와같이 선정된 값은 평균값에 대하여 normalize 시킨다.

電算解析시에는 핵연료집합체의 壓力損失係數의 오차가 고려된 壓力損失係數에 관한 자료가 요구된다. 일반적으로 KWU 핵연료를 제외한 핵연료집합체에서는 $\pm 10\%$ 의 오차가 사용되며, KWU 핵연료에서는 이보다 더 적은 값이 사용되나 보수적인 결과를 요구 할 때에는 $\pm 10\%$ 오차를 재장전 핵연료집합체에 적용 시킨다.

모든 수축, 확장에 대한 壓力損失係數는 각 핵연료집합체의 壓力損失係數에 적절한 값을 고려하여 사용한다. 摩擦에 의한 壓力損失은 다음식으로 나타내며,

$$\lambda = A + B \text{Re}^C$$

여기서 A, B, C는 電算코드의 입력값이 된다.

혼합노심에서는 모든 핵연료집합체에 대하여 부양력을 계산하며, 특히 기장전 핵연료집합체에 대한 부양력 계산은 재장전 핵연료집합체의 양립성의 검토에 있어서 도움이 되며 이로서 과도한 流動에 의한 상부 plenum의 내부구조물의 손상을 방지할 수 있게 된다. 보수적인 부양력 값을 얻기 위하여 입구 流量의 maldistribution에 따른 최대 유량조건에서 한종류의 9개의 핵연료집합체가 노심의 중심부에 위치하며 다른 종류의 핵연료집합체는 노심의 나머지 위치에 있는 것으로 가정하여 먼저 계산한다. 두번째 계산에서는 핵연료집합체의 위치를 서로 바꾸어서 부양력을 계산한다. 만약 두종류 이상의 핵연료집합체가 노심에 장전될 때에는 모든 경우에 대하여 각각 이와 같은 방법으로 解析하며, 아울러 한종류의 핵연료집합체만 노심에 존재할 때도 가정하여 모든 종류의 핵연료집합체에 대해서

도 解析한다. 아울러 부양력은 핵연료집합체의 壓力損失係數를 이용하여 다음식으로 부터 손으로 계산한다.

$$F_{LU} = \Delta P \cdot (FA_{pitch})^2 \quad [kN]$$

또한 FSAR, 기존핵연료집합체 및 재장전 핵연료집합체에 대하여 부양력 계산결과를 서로 비교하며, 그중 최대치를 설계값으로 이용한다.

다) 橫流 解析

핵연료집합체를 노심내에 장전시키면 노심 입구에 流入된 냉각재는 流動이 발달함에 따라서 핵연료집합체 사이의 橫류가 발생된다. 특히 설계가 다른 두 종류의 핵연료집합체 사이에서는 핵연료봉과 스페이서 그리드의 구조와 淸수가 서로 다름으로 냉각재의 橫류 유동이 발생된다. 그러므로 橫流 速度의 한계치는 아래 예와 같이 기준 자료로 주어진다.

$$V_{cross} = 2.0 \text{ ft/s} = 0.61 \text{ m/s}$$

16x16 fuel

[fuel rod diameter 9.5 mm
pitch 12.3 mm

$$= 3.0 \text{ ft/s} = 0.91 \text{ m/s}$$

14x14 fuel

[fuel rod diameter 10.75 mm
pitch 14.12 mm

두 핵연료집합체 사이의 단위 길이당 횡류유량은 熱水力解析코드에 의해 길이方向의 각각의 노드에서 구해진다. 그리고 횡류유속은 다음식에 의해 횡류유량으로부터 구해진다.

$$V_{cross} = \frac{W \cdot \Delta X}{\Delta X \cdot \rho_{Local} \cdot S_{gap}} = \frac{W}{S_{gap} \cdot \rho_{Local}}$$

W : local cross flow rate per unit length [kg/sm]

V_{cross} : local cross flow velocity [m/s]

ρ_{Local} : coolant density in the axial node [kg/m³]

ΔX : length of axial nodes [m]

상기 방정식으로 산출된 V_{cross}는 한계치인 V*_{cross}보다 작아야 한다.

3. 爐外試驗

가. Full Scale 核燃料集合體의 壓力降下 試驗

핵연료집합체에 대한 壓力降下試驗의 목적은 정상상태에서 Full Scale 핵연료집합체의 壓力損失 자료를 생산하며 電算 코드로서 예측된 발전소의 운전 조건에서의 壓力損失의 적용 여부를 검토하기 위한 기본적인 정보를 획득하는데 있다.

核燃料試驗裝置는 폐쇄 순환 가압수 루프로서 그림 3-1과 같이 主循環 펌프, 가열기, 냉각기, 試驗部 및 연결配管으로 구성되어 있다. 이 裝置의 운전 조건은 溫度 340 °C, 壓力 170 bar, 流量 160 kg/s이다.

시험변수로서 溫度는 160 °C, 150 °C 및 300 °C이며, 流量 범위는 35 kg/s에서 140 kg/s (Re: 30,000 ~ 700,000)이다. 流體의 溫度, 流量 및 壓力과 핵연료 집합체의 상하부 End Piece 및 Spacer Grid에서 발생하는 差壓이 測定된다.

실험결과는 컴퓨터 프로그램에 의해 처리되며 코드의 입력자료는 差壓, 오리피스 양단의 差壓, 溫度, 壓力, 試驗部 및 핵연료집합체의 구조 등이며, 質量流量, Reynolds수, 유속 및 壓力損失係數등이 계산된다. Reynolds수 계산에서는 bare rod에서의 流動 面積과 水力學的 直徑을 기준으로 하였다.

실험결과로서 스페이서 그리드를 포함한 구역, 하부 노심판, Bottom End Piece, Top End Piece 및 전체 핵연료집합체 등에서 발생하는 壓力損失係數가 도출되며, 각 구역에서의 壓力損失係數의 산출 방법은 다음과 같다.

스페이서 그리드를 포함한 구역에서의 壓力損失係數는 그림의 ΔP_{BE} (5개 스페이서 포함) 및 ΔP_{DE} (3개 페이서 포함)에서 測定된 壓力降下값으로 부터 구한다. 하부노심판의 壓力損失係數는 ΔP_{AB} 로 부터 구한다. 이 구역은 하부노심판의 損失과 시험부 입구 配管에서 하부 노심판으로의 위치변경에 의한 유동면적의 증가에 따른 損失量이 포함된다. Bottom End Piece에서의 壓力損失係數는 ΔP_{KB} 로 부터 구하나 ΔP_{KB} 에는 Bottom End Piece 뿐만 아니라 첫번째 스페이서 그리드 및 bare rod의 壓力損失量이 포함된다. Top End Piece에서의 壓力損失係數는 ΔP_{EG} 로 부터 구하며 ΔP_{EG} 에는 End Piece, 마지막 스페이서, Flow Restrictor Plate 및 bare rod에서의 壓力損失가 포함된다. 전체 핵연료집합체의 壓力損失係數는 $\Delta P_{AG} - \Delta P_{AK}$ 로 부터 구한다. 이 구역에는 bare rod의 摩擦, 스페이서, Bottom End Piece, Top End Piece 및 Flow Restrictor Plate에서의 壓力損失量이 포함된다.

실험에서 사용된 시험부의 구조는 발전소와 동일하지 않으므로 실험에서 구한 壓力損失係數를 원자로의 운전조건에 바로 적용할 수는 없다. 그러므로 원자로의 조건과 구조에서 적용할 수 있는 壓力損失係數는 컴퓨터 코드를 이용하여 구하며, 水力學 설계코드를 검정하기 위해서는 여러 운전조건에서 실험한 壓力損失 결과와 비교한다. 즉, 각각의 운전조건에서 핵연료집합체의 각 부위에 대하여 계산된 壓力損失係數와 測定된 壓力損失係數와 표준편차를 구하며, 이 값들이 코드 검정

한계내에 있으면 이 코드로 계산된 값은 특별한 제한없이 熱水力 設計에 적용할 수 있다.

나. 5x5 核燃料集合體의 壓力降下試驗

5x5 핵연료집합체에 대한 壓力降下試驗의 목적은 설계 코드의 검정 작업의 일환으로 핵연료집합체 설계에 적용되는 스페이서의 壓力損失을 測定하며, 설계에 적용되는 모델을 조사하기 위하여 혼합날개의 壓力損失을 얻는데 있다.

이 壓力降下 試驗裝置는 상온 상압에서 운전되는 5x5 핵연료집합체를 수용하는 試驗部를 갖는 순환수 루프로서, 그림 3-2와 같이 主循環 펌프, 물저장조, 터빈 流量計 및 試驗部로 구성되며 최대 流量은 $60 \text{ m}^3/\text{h}$ 이다. 流量은 터빈 流量計로 測定하고 壓力은 試驗部 입구에서 測定한다. 시험용 핵연료집합체는 외경이 10.75 mm인 25개의 지르칼로이 봉으로 구성되며 각각의 핵연료집합체에는 동종의 스페이서 그리드가 5개씩 설치된다. 試驗部에 설치된 壓力탭에서 測定된 壓力差는 두 壓力탭 사이에서 발생하는 핵연료집합체의 壓力損失이 된다. 각각의 壓力탭은 전기적으로 작동되는 스캐너(scanner)에 연결되어 있다. 差壓은 압력변환기로 測定되며 測定 精度는 약 1%이다. 신호는 디지털 멀티메타로 읽으며 Recorder에 기록된다. 실험은 상온에서 수행되며 流量은 $30 \sim 60 \text{ m}^3$ 로서 이때 Reynolds No.는 35000~75000이다. 측정 변수로는 溫度, 流量 및 스페이서 그리드와 bare rod에서 발생한 差壓이다.

壓力損失係數를 계산하는데 있어서 컴퓨터 프로그램이 이용되었다. 프로그램의 입력자료는 體積流量, 溫度, 壓力탭사이에서의 壓力差, 流動面積, 연료봉 구역에서의 水力直徑, 스페이서 그리드의 위치이며, 계산된 출력자료는 流體의 비체적, 동점성 계수, 유동면적, 연료봉 구역에서의 수력직경, 유속, 스페이서 그리드 스팬(span)에서의 壓力損失係數, 스페이서 그리드에서의 壓力損失係數 및 摩擦係數

이다. 모든 Reynolds 수는 bare rod 구역에서의 유동면적과 수력직경을 기초로 하여 계산된다.

스페이서 그리드 사이에서 測定된 壓力損失量은 각 구역에서 선형화 되었다. 그림 3-3 에서와 같이 첫번째 스페이서 그리드 스펠에서의 壓力損失量은 $P_2 - P_1$ 이며 두번째 스페이서 그리드 스펠에서의 壓力損失量은 $P_3 - P_2$ 이다. P_1, P_2, P_3 는 스페이서 그리드의 스펠과 선형화된 壓力損失 관계식으로 부터 계산된다. 스페이서 그리드의 壓力損失係數는 그림 3-3에서 와 같이 $P_{SG11}, P_{SG12}, P_{SG21}, P_{SG22}$ 로 부터 구하며, 差壓의 선형 회귀선의 기울기는 연료봉의 摩擦에 의한 壓力損失量으로 부터 구한다. 혼합날개의 壓力損失係數는 혼합날개 그리드와 일반 스페이서 그리드의 구조적 차이로 인하여 혼합날개가 부착된 스페이서 그리드가 설치된 핵연료집합체의 실험 결과와 혼합날개가 없는 핵연료집합체의 실험결과의 차이로 부터 직접적으로 구할 수 없다. 그러므로 혼합날개의 壓力損失係數는 혼합날개 그리드를 설치한 실험에서 測定된 壓力損失係數로 부터 혼합날개가 없을 경우를 가정하고 계산된 값의 차이로 부터 구한다.

실험에서 구한 壓力損失係數는 試驗臺의 벽면의 영향, 스페이서 그리드의 차이, Re수의 차이 및 전체 핵연료집합체에서 일부만을 떼어낸 봉집합체 등으로 인하여 원자로 조건에 직접적으로 적용할 수 없다. 그러므로 원자로에서의 구조와 운전 조건에서의 壓力損失係數는 설계코드를 이용하여 계산함으로써 구할 수 있다. 그리고 이 코드를 이용한 계산값과 실험 결과를 서로 비교함으로써 코드의 검증 작업은 수행된다.

다. 橫流 試驗

혼합노심에서 KWU 공동설계 핵연료집합체와 W 핵연료집합체는 노심내에서 서로 이웃하여 장전된다. 공동설계 핵연료집합체의 봉다발의 壓力損失量은 W-OFA

핵연료집합체보다 높고 스페이서 그리드의 壓力損失量은 W-OFA 핵연료집합체의 혼합날개가 부착된 스페이서 그리드보다 낮지만 두 핵연료집합체의 전체 壓力降下量은 비슷하게 된다. 혼합노심에서 두 종류의 핵연료집합체의 봉의 摩擦損失量과 스페이서 그리드의 壓力損失量이 서로 상이함으로 인하여 발생하는 핵연료집합체 사이의 횡류가 중요함으로 이에 관한 연구로서, 단상 亂流流動에서 수력학적 저항이. 다른 두 종류의 핵연료집합체 사이에서 발생하는 국부 횡류유동에 대한 실험적 결과를 얻기 위하여 두 종류의 핵연료집합체가 장전된 실험대 내의 스페이서 하류측에서 水平方向 流動의 유속을 測定하였다.

實驗裝置는 그림 3-4와 같이 펌프, 流量計, 저장조 및 試驗部로 구성되어 있다. 試驗部는 수직형이며 길이 2.2 m의 6x6 핵연료집합체를 장전할 수 있으며 알루미늄으로 제작되었으며, 試驗部の 전방과 후방에는 0.199 m x 0.056 m의 borosilicate crown glass의 창이 설치되어서 Laser beam이 試驗部를 관통할 수 있게 되어 있다.

유속은 one component dual beam Laser-Doppler Velocimeter로 測定하였고 전방 산란방법을 적용하였다. 일반적인 유속 測定裝置와 비교할 때 LDV는 流動의 교란이 없으며 測定點의 크기가 작고 교정이 요구되지 않는다는 장점이 있다. Laser source로는 He-Ne Laser가 사용되었고, LDV는 3차원 traversing table 에 설치된다. Doppler 신호는 오실로스코프로 관찰되며 counter type 프로세스로 처리되어 컴퓨터에 의해 速度가 산출된다. 유속은 流體流動이 발달된 부분에서 測定하였고 경계면에서 부터 측정자료를 수집하였다. 또한 스페이서 그리드의 후방 軸方向으로 水力直徑의 3~50 배 범위내 7개의 위치에서 測定되었다. 또한 각각의 軸方向 측정위치에서 3곳의 橫方向으로 각각 25~30개 점에서 速度分布를 測定하였다. 즉, 첫번째는 그림 3-5의 공동설계 핵연료집합체의 gap 2에서, 다음은 공동 설계 핵연료집합체와 W-OFA 핵연료집합체가 만나는 gap 3에서,

그리고 W-OFA 핵연료집합체의 gap 4에서 각각 유속이 測定된다.

횡류가 국부적인 유동특성을 갖는지 혹은 핵연료봉들을 가로지르는 일반적인 流動을 갖는지를 판단하기 위해서는 횡류 速度分布와 횡류 평균유속을 찾아내는 것이 중요하다. 그러므로 軸方向 각 위치의 gap에서 발생하는 수평방향의 국부 速度分布와 각각의 gap에서 발생하는 水平方向 유속을 橫方向의 각 測定点에서 평균을 취한 평균유속을 구하였다. 그러므로 평균유속은 부수로내 중심선을 가로질러 발생하는 실질 流動量을 나타내므로 수평방향 평균유속이 0이 되지 않으면 이는 測定 gap의 중심선을 가로질러 흐르는 실질 流動이 있음을 말해 준다. 그러나, 測定에서 橫流流動의 미소 scale은 고려되지 않았고, 이송의 한정에 의한 速度分布에서 인위적인 비대칭성의 발생 여부에 대한 검토가 수반 되어야 한다. 평균유속은 다음식으로 계산되며,

$$V_{horiz} = \frac{1}{No.max} \cdot \sum_{i=1}^{No.max} V_i$$

여기서 No.max는 각 gap에서 測定点의 수이다.

본 실험으로 부터 구한 두 핵연료집합체 사이의 횡류의 평균유속은 횡류에 대한 速度 한계치보다 작아야 한다.

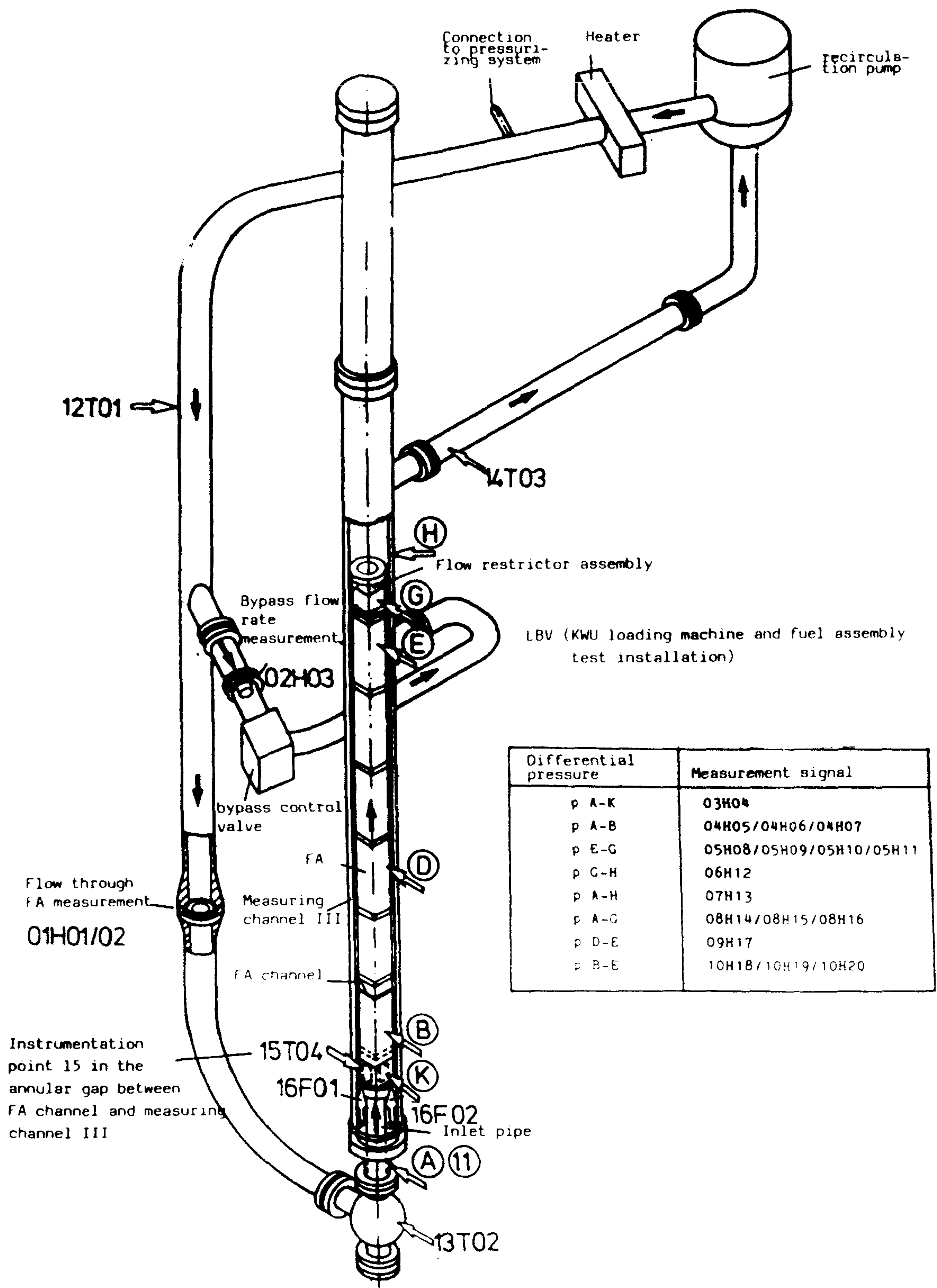


Fig. 3-1 Test Setup of LBV

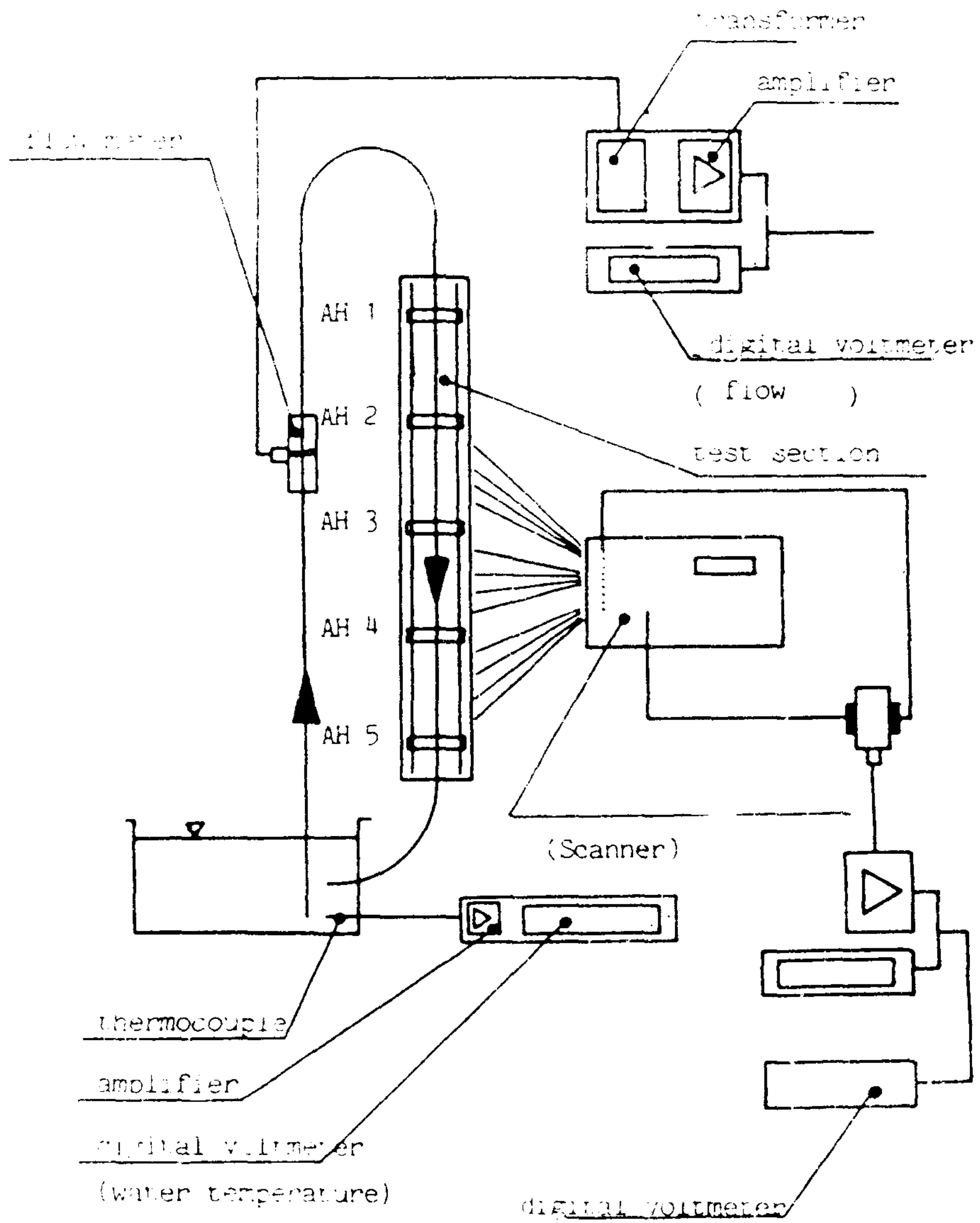


Fig. 3-2 Test Assembly and Circuit Design of the Apparatus

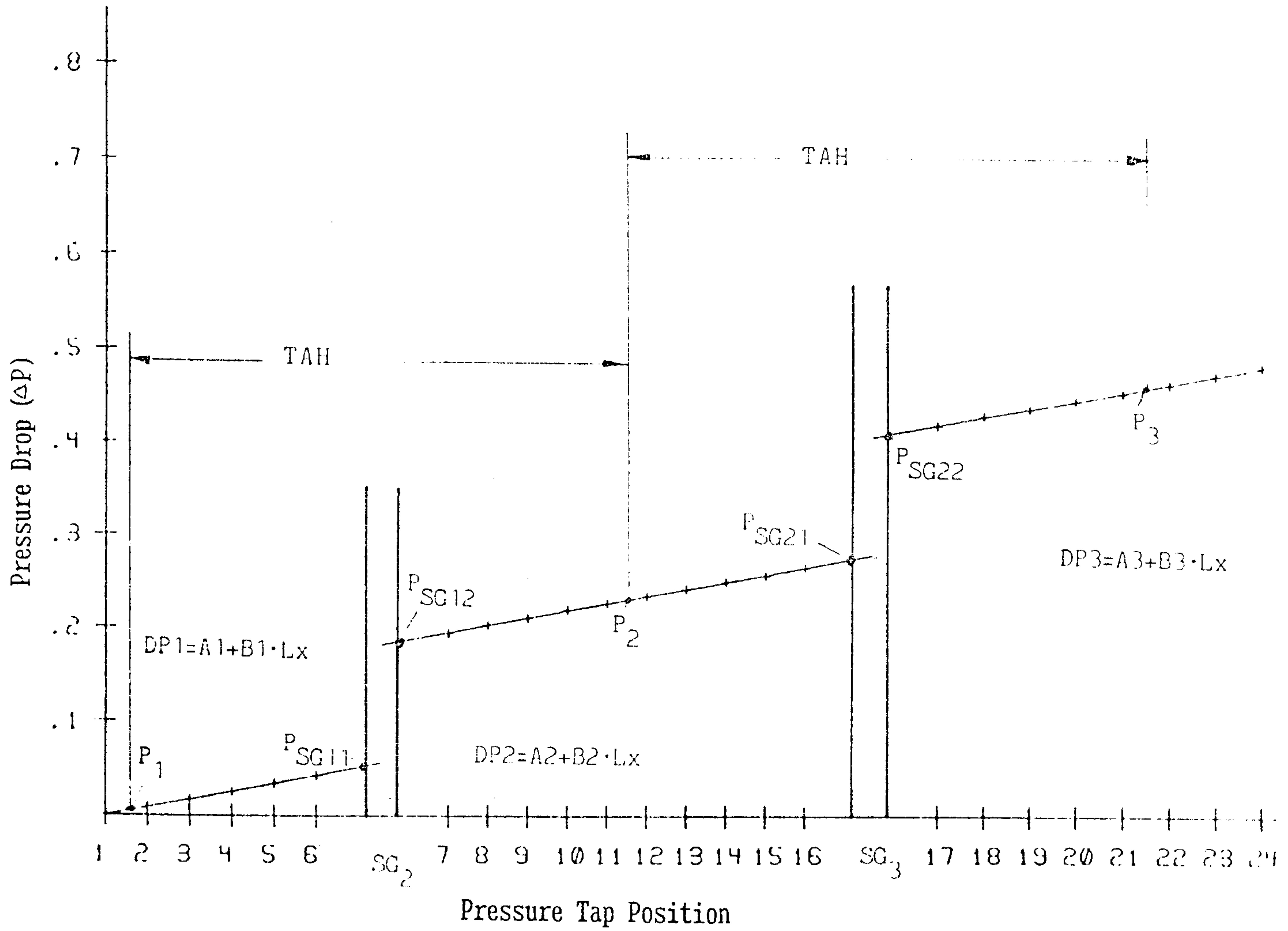


Fig. 3-3 Typical Pressure Loss along the Test Bundle

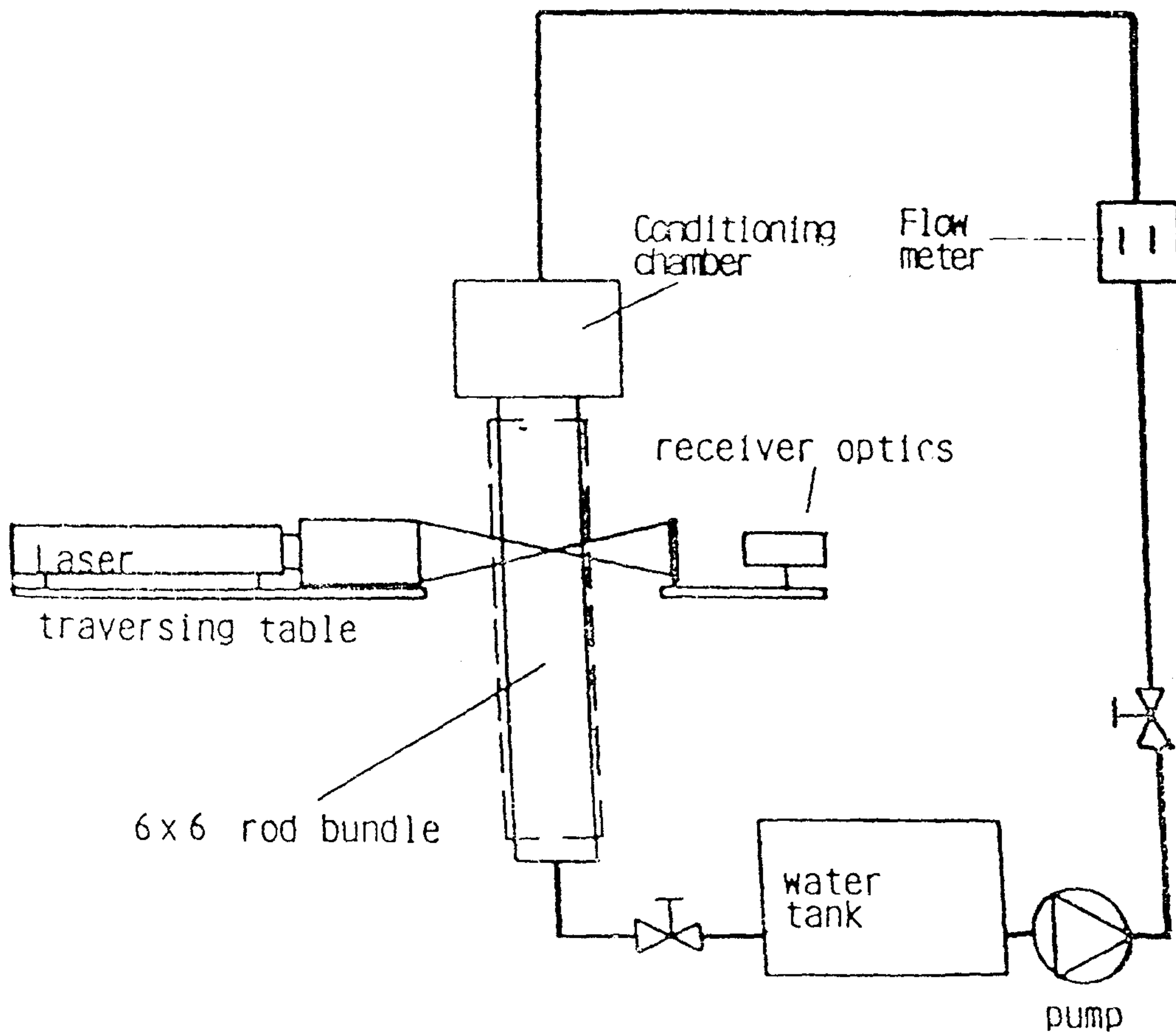


Fig. 3-4 Experimental Setup of the Test Loop

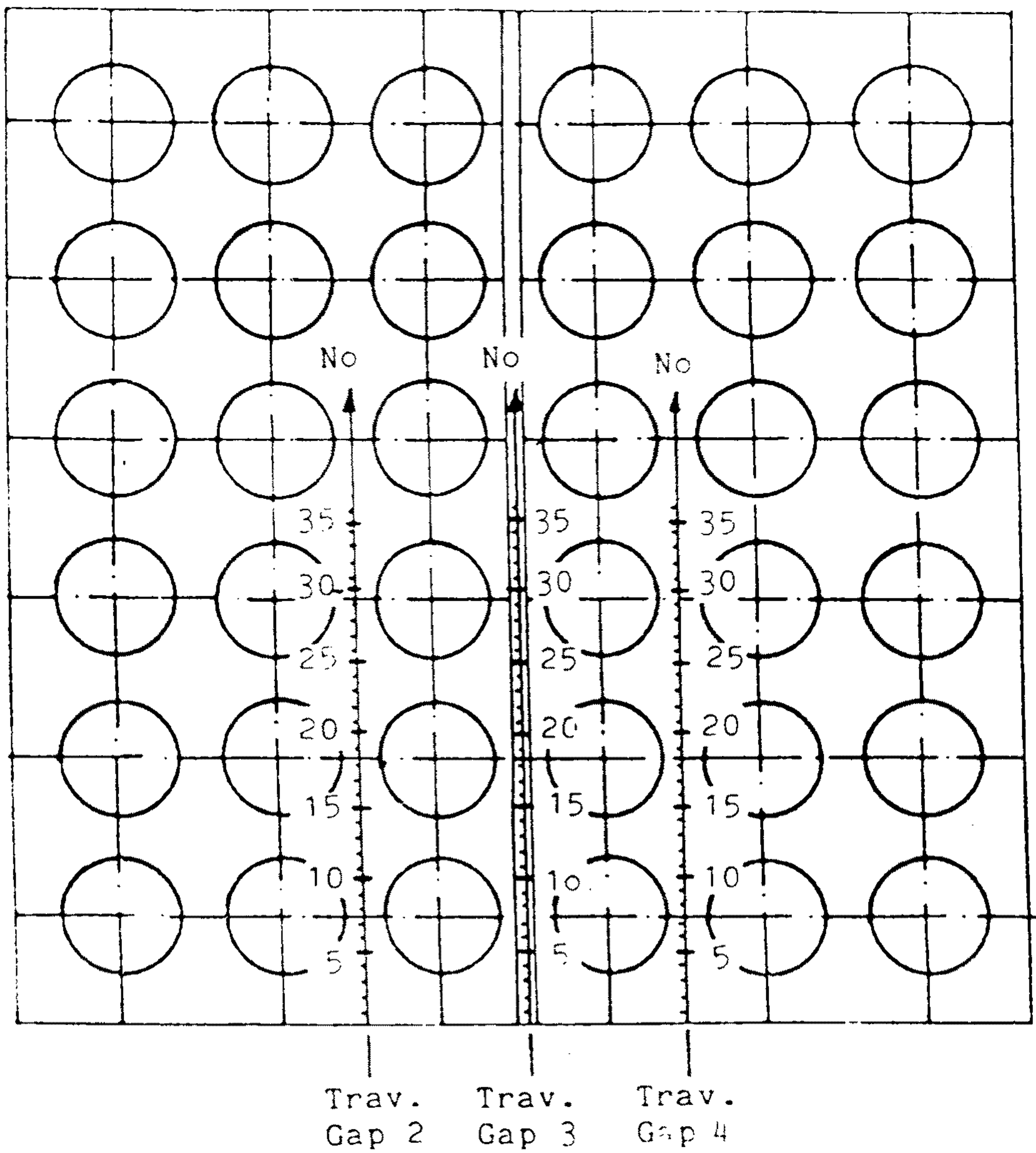


Fig. 3-5 Position of Measurement Attached to each Traverse

第4節 불란서의 核燃料 爐外試驗 現況

1. 概要

불란서의 核燃料 개발 연구는 CEA (French Atomic Commission), Framatome, EdF 등 세 기관의 긴밀한 협력하에 이루어지고 있는데, Framatome(Fragema)社에서 개발 또는 제작하고 있는 핵연료 및 그 부속부품들에 대한 爐外實證試驗을 CENG (Grenoble 원자력연구소)를 중심으로 수행하고 있다. (표 4-1 참고)

핵연료에 대한 爐外試驗은 두가지로 분류될 수 있는데, 첫째로 臨界熱流束試驗으로서, 이는 CENG의 OMEGA, GRAZIELLA, PATRICIA 시험시설을 중심으로 수행되고 있다. PATRICIA 설비는 船舶用 板形 핵연료에 대한 시험장치이고, 나머지 두 설비는 發電用 原子爐의 棒形 핵연료에 대한 장치이다.

둘째로 핵연료에 대한 水力學的 實證試驗으로서는 스페이서 그리드에 의한 유체의 亂流混合效果 및 壓力降下등의 측정을 위한 HYDROMEL, HYDROMEL-Laser, EDVIGE 설비등이 있으며, 또한 혼합그리드에 의한 압력강하 및 유동의 발달 정도를 고찰하기 위한 AGRIPA 시설, 그리드에 의한 난류혼합효과를 연구하기 위해 설치한 EDGAR 설비등 EdF社의 노외시험설비가 있다. [7] Framatome社의 노외시험 현황은 참고문헌[1]에 기술되어 있다.

본 절에서는 불란서 핵연료 개발 연구기관에서의 核燃料 및 그 附屬部品들의 연구, 개발에 관한 현황에 대하여 실험장치를 중심으로 기술하였다.

2. OMEGA 試驗施設

가. 設置 目的

본 시설은 1974년 이래 불란서의 핵연료개발과 관련된 가장 중요한 설비

로서 이용되어 왔는데, 그 설치목적으로는 다음과 같은 두가지가 있다.[8]

첫째는 핵연료에 대한 臨界熱流束 試驗으로서, 핵연료 및 그 부속부품에 대한 改良案이 선정되면 먼저 HYDROMEL, HYDROMEL-Laser, GRAZIELLA 실험시설에서 熱水力的 試驗을 수행한 후 양호하다고 판단되는 개량안에 대한 임계열유속 實證試驗을 본 설비에서 수행하게 된다. 실제 爐心과 동일한 열수력적 실험 조건하에서 5x5 燃料棒 排列에 대한 열수력적 거동을 조사, 검증하고 또한 임계 열유속에 대한 相關式을 개발한다.

둘째는 블로우다운 실험으로서, 원자력발전소 1차계통의 減壓상태시 核燃料 被覆管의 온도변화를 조사하는데 그 목적이 있으며, 6x6 棒排列 또는 單一棒을 이용하여 실험해 왔다.

나. 設備 概要

그림 4-1에 나타난 바와 같은 熱出力 9MW의 OMEGA설비는 압력 170 bars, 온도 350 °C에서 견딜 수 있도록 스테인레스강으로 설계되어 있으며, 최대流量 20 kg/sec, 排出揚程 125m 의 성능을 갖는 펌프가 설치되어 있다. 또한 용량 0.6 m³의 加壓器와 최대 熱除去能力이 9MW인 熱交換器가 설치되어 있다.

試驗臺는 두 개의 스테인레스 圓筒으로 되어 있는데 내부의 원통은 여러 조각의 圓管들로 연결되어 있으며, 그림 4-2에서 보는 바와 같이 내부 원통에 위치한 세라믹 용기가 시험대 내면의 사각형 형상을 유지하고 있다. 세라믹 용기는 열충격에 잘 견디고 열변형이 작아서 좋으나, 高價이며 또한 시험용 핵연료 봉다발의 장전시 굽힐 염려가 있다.

試驗用 核燃料集合體는 피치가 12.6 mm인 5x5 연료봉 배열을 갖고 있으며, 연료봉의 外徑은 9.5 mm이고, 案内管 셀에 설치되는 안내관의 외경은 12.25 mm, 12.05 mm의 두 종류가 있어서 스페이서 그리드의 종류에 따라 선택

되어 사용되며, 이는 핵연료집합체의 나머지 부분과 전기적으로 絶緣되어 있다. 燃料棒은 그 내부의 두께를 변화시켜 직접 가열시켜서 Cosine형상의 軸方向 熱流束을 모의하게 되며, 棒 내부는 압력이 系統壓力보다 높은 질소가스로 충전되어 연료봉의 파손을 방지하게 된다. 직접 가열되는 연료봉들(열출력 9MW)은 시험대 상하단과 절연판을 통해 전기적으로 절연되어 있으며, 연료봉의 가열 길이는 3.65 m(12 ft), 4.2 m(14 ft)의 두 종류가 있다.

그림 4-3, 4-4에는 시험대 출구의 각 副水路 中心溫度 측정을 위한 熱電對의 위치와, 연료봉 벽면의 온도측정을 위해 설치된 열전대의 위치가 나타나 있는데, 그림 4-5에 나타난 바와 같이 시험용 핵연료집합체의 축방향 여러 위치에서 각 연료봉당 4개의 열전대가 부착되어 있다.

시험시의 경제적 측면을 고려하여 시험용 핵연료집합체내의 연료봉들 중에서 가장 먼저 임계열유속에 도달하리라 예상되는 燃料棒상의 위치에 열전대를 집중적으로 설치함으로써 시험을 수행하게 되는데, 이때 임계열유속 발생 예상 지점을 잘못 예측, 선정함으로써 실제로 임계열유속에 도달한 후까지 열출력을 증가시켜 임계열유속을 측정하지도 못한 채 시험용 핵연료집합체가 파손되는 수도 있다.

測定機器로는 다음과 같은 것들이 설치되어 있다. 시험대 입구 온도 측정을 위해 2개의 熱電對와 1개의 白金抵抗온도계가 설치되어 있으며, 시험대 가열부 先端에 2개의 壓力變換機, 시험대 출구에 1개의 압력변환기가 설치되어 있다. 시험대로 유입되는 유량측정을 위해 1개의 터빈流量計와 2개의 벤튜리가 설치되어 있다. 그런데 입구온도 측정시는 $\pm 3 - 4^{\circ}\text{C}$ 정도의 不確實性, 熱流束 측정시는 $\pm 2.5 - 4\%$ 정도의 불확실성을 보이고 있다. 이러한 OMEGA 설비는 1990년 신설되는 OMEGA-2(열출력 10MW) 설비로 교체될 예정으로 있다.

다. 臨界熱流束 試驗方法

임계열유속에 영향을 미치는 媒介變數로는 시험대 입구에서의 유체온도, 유체의 질량유속, 시험압력, 시험용 핵연료집합체의 水力直徑, 가열되지 않는 案内管의 벽온도, 그리고 스페이서 그리드의 混合效果등이 있다.

본 시설에서의 임계열유속 측정시험시에는 다음과 같은 두 단계로 시험을 수행하고 있다. 먼저 單相流動 조건하에서 全 質量流束 범위에 대해 시험대 입출구 온도차를 50°C 로 유지하면서 그림 4-3에 나타난 바와 같이 시험대 출구 부근의 36개 副水路 중심온도를 측정하며, 또한 각 부위의 壓力降下도 측정한다. 이 실험은 각 부수로간의 혼합효과를 파악하기 위해 수행된다.

그 다음에는 沸騰危機試驗으로서, 시험압력, 유량과 연료봉의 열유속을 일정하게 유지한 채로 시험대 입구에서의 유체의 온도를 그림 4-4에 나타난 바와 같이 설치된 연료봉 벽면의 열전대가 비등위기를 검출할 때 까지 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 이하의 증가속도로 서서히 증가시키며, 비등위기가 검출되는 순간 연료봉의 열출력을 순간적으로 절반까지 감소시킨다. 이때 각 부위의 압력강하도 동시에 측정한다. 그러나 열전대가 설치된 부위 이외의 곳에서 비등위기가 발생할 경우 이를 검출하지 못하여 그림 4-6에 나타난 바와 같이 연료봉 파손이 가끔 발생하기도 하였다.

이와 같은 시험방법은 GRAZIELLA 시험시설에도 동일하게 적용되나, 다만 單相流動시험시의 입출구 온도차와 沸騰危機 시험시 시험대 입구온도의 증가속도만이 다르다.

라. 試驗結果

그림 4-7와 같이 案内管셀에 장전되는 웨스팅하우스社의 標準形 스페이서 그리드와 混合形(Hybrid) 그리드에 대한 시험결과를 소개하고자 한다.

먼저 單相流動 조건하에서의 副水路 중심온도 분포 측정시험으로서, 시험대 입구온도(T_i)를 100°C , 출구온도(T_o)를 150°C 로 고정시키고, 질량유속(G)과 시험압력을 변화시키면서 36개 부수로 출구에서의 부수로 중심의 온도(T_i)를 측정하였다. 이때 중앙부수로 (6번 부수로) 의 온도에 대한 상대적 온도차를 다음의 매개변수 X_i 로 정의하고,

$$X_i = \frac{\bar{T}_s - \bar{T}_i}{T_s - T_i} \times 100 (\%)$$

그 결과를 그림 4-8(a),(b),(c),(d),(e)에 나타내었다. 혼합형 그리드의 경우가 웨스팅하우스社 그리드에 비해 副水路간 混合效果가 좋지 않았다.

그리고 임계열유속 시험결과는 그림 4-9 (a),(b),(c),(d) 에 나타난 바와 같이 낮은 質量流束하에서는 혼합형 그리드의 경우가 임계열유속이 더 높고, 높은 유속하에서는 웨스팅하우스社의 그리드가 더 양호함을 알 수 있다. 그 이유로서는 높은 질량유속하에서는 혼합깃이 연료봉 표면에 형성되는 蒸氣膜의 발생을 억제하는 역할을 하지만, 낮은 질량유속, 높은 乾度 조건하에서는 혼합깃이 연료봉 표면에 발생하는 液體膜을 파괴하여 임계열유속 측면에서 볼 때 불리한 결과를 초래하는 것으로 나타났다.

3. GRAZIELLA 試驗施設

가. 設備 概要

임계열유속 시험시 시험경비를 줄이기 위해 Freon-12 (CCl_2F_2)를 作業流體로 사용하여 高温高壓하의 물의 熱水力적 상태를 模擬한 설비로서, OMEGA 실험설비의 예비실험적 성격을 띄고 있다.

최대 운전조건으로 압력 30 bar, 온도 90 °C, 유량 20kg/sec, 열출력 850 kW의 설비능력을 갖추고 있으며, 시험용 핵연료집합체는 OMEGA 시험시설과 동일한 5x5 燃料棒 排列을 이루고 있어서, Framatome사에서 고려하고 있는 핵연료 집합체의 스페이서 그리드, 혼합깃등의 개선효과를 실험적으로 검토하고 있다.

본 설비는 1970년대 부터 사용되어 오던 GRAZIELLA-1 설비의 노후문제로 1983년 설비를 신설하여 GRAZIELLA-2로 명명하였는데, 설비의 성능은 전과 동일 하나 콘덴서를 제거하였으며, 주로 計裝설비 및 측정기기의 개선에 중점을 두었다. (그림 4-10 참고)

시험대 입출구의 온도는 Cr-Al 熱電對와 백금저항온도계를 이용하여 측정하고, 유량은 다이아프램과 터빈유량계를 이용하여 측정하며, 실험데이타의 획득과 제어를 위해서 HP-36 컴퓨터를 사용하고 있다. 본 설비에는 2개의 試驗臺를 설치할 수 있는데, 하나는 5x5 봉배열의 PWR형 연료봉(가열길이 3.65 m)를 장전할 수 있으며, 또 하나는 그림 4-11 에 나타난 바와 같은 형상을 갖는 가열 길이가 2 m인 개량형 핵연료봉 (삼각형 副水路형성) 19개 또는 24개를 장전할 수 있다. [9]

나. Freon의 스케일링

高温高压상태의 물을 Freon으로 모의하기 위해서는 다음과 같은 세가지를 만족해야 한다. 첫째로 시험대상 물체의 기하학적 형상은 두 경우 모두 동일해야 하며, 둘째로 기체와 액체의 體積質量比도 동일하고, 셋째로 全體 質量流量比는 다음의 관계식을 만족해야 한다.

$$K = M_w / M_f$$

여기서 M_w , M_f 는 각각 물과 프레온의 質量流量을 의미한다. 상수 K 값은 Stevens등 [10,11]에 의해 증기발생기의 봉배열에 대해 처음으로 설정되었으나, Grenoble연구소 열수력실험실(SETH)에서 BWR 및 PWR 연료봉 다발에 대하여 설정하였는데, 그 값은 표 4-2에 나타나 있다.

실험결과 K 값은 압력에 따라 달라지나, 검증범위내에서는 봉 집합체의 형상에는 무관한 것으로 나타났다. 본 설비를 이용한 시험조건 범위와 그에 대응하는 물에 대한 조건이 표 4-3에 나타나 있다. [9]

다. 試驗方法 및 結果

시험방법은 OMEGA-1 시험시설의 경우와 동일하나, 單相流動조건 시험시 시험대 입출구의 온도차를 20°C 로 설정하며, 臨界熱流速 시험시에는 입구온도의 증가속도를 $0.3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 이하로 유지한다는 점이 다르다.

표 4-4에는 여러가지 그리드형상을 대상으로 시험한 결과 (混合係數 : M_T)를 나타내고 있다. 표준셀에서는 웨스팅하우스社의 표준형 그리드의 경우가 AFA형 그리드의 경우보다 혼합계수가 크며, 안내관 셀에서는 두 경우의 값이 거의 유사하다.

그림 4-12에는 표준셀에서의 웨스팅하우스社 표준형그리드의 경우(1)와 혼합깃의 선단부위가 절단된 경우(2)에 대한 임계열유속이 입구온도의 변화에 따라 표시되어 있는데, 혼합계수의 값은 표준형의 경우가 매우 크나 임계열유속은 두 경우 유사함을 알 수 있다.

그림 4-13에는 AFA형 표준그리드(1)와 변형된 그리드(2)의 두 경우에 대한 임계열유속이 나타나 있는데, 두 경우 혼합계수는 거의 유사하나, 변형된 그리드의 경우(2)가 임계열유속이 큼을 보여주고 있다.

그림 4-14(a),(b)에는 시험결과와 副水路 解析 코드인 FLICA코드[12]의 계산

결과가 표준셀과 안내관셀의 경우에 대하여 비교되어 있다.

혼합깃이 없는 경우는 두 셀의 경우에 대해 거의 유사한 값을 보이고 있으나, 혼합깃이 있는 경우는 구석 부수로(1), 벽면 부수로(2,4), 내부 부수로(3,5)의 순서로 副水路 出口溫度가 높았으며, 계산 및 시험결과의 차이는 AFA형 표준 그리드의 경우가 웨스팅하우스社의 그리드보다 매우 큼을 알 수 있다.

그림 4-15 에는 AFA형 NAY2-2형 스페이서 그리드에 장착되는 AFA형 혼합깃과 웨스팅하우스社형 혼합깃에 대한 임계열유속 시험결과를 표시하였는데, AFA형 혼합깃의 경우가 4 - 22 % 정도 임계열유속이 작았다.

4. HYDROMEL 實驗施設

가. 設置 目的

본 시설은 Framatome社에서 고려하고 있는 스페이서 그리드와 이에 부착된 혼합깃의 水力學的 特性 즉, 混合效果 및 單相流動하에서의 이들에 대한 壓力降下를 시험하기 위한 常溫常壓 실험시설이다.

나. 實驗條件 및 試驗臺

시험용 핵연료집합체는 직경이 9.5 mm인 연료봉이 9x9 연료봉 배열을 이루며, 집합체 축방향으로 세 위치에 스페이서 그리드가 설치되어 있다.

作業流體로는 상온상압의 물이 30 m³/hr (질량유속 100 g/cm²sec)의 유량으로 시험대에 공급되며, 수평으로 설치된 시험대 내에 시험용 핵연료집합체가 설치된다.

시험대 입구측 첫째 스페이서 그리드 상류측에 螢光物質을 주입하고, 각 부수로 내 형광물질을 채취하여 擴散量을 결정한다. 이때 시험대내에 설치되는 세 개

의 스페이스 그리드 하류측에는 각각 형광물질 채취계통이 설치되어 각 부수로 내 형광물질을 채취하며, 이들 채취계통은 시험대 축방향으로 이동할 수 있다.

시험대 입구측의 첫번째 스페이스 그리드와 형광물질 주입구 사이에는 한 개의 fluorimeter가 설치되어서 주입되는 형광물질의 濃度를 측정함으로써 형광물질 농도의 기준값을 설정하게 된다.

다. 實驗結果

본 시설을 이용하여 웨스팅하우스社의 여러 형태의 스페이스 그리드에 대한 실험을 수행하여 data base를 확보하고, Fragema社의 AFA형 핵연료집합체에 부착되는 표준형, SWEEP-1형, NAY-1형 스페이스 그리드 (그림 4-16 참고)에 대하여 실험을 수행한 바 있으며, 이에 대한 실험결과가 그림 4-17에 나타나 있다. 이러한 실험결과 (각 부수로내 형광물질의 濃度)는 FLICA 코드의 계산결과와 비교하게 되는데, 이때 한 부수로내 엔탈피값은 실험시 그 부수로의 형광물질의 농도에 대응하는 것으로 간주한다.

이러한 계산은 다음과 같은 두가지 경우에 대해 수행된다. 첫째로 일정한 값의 混合係數 (K_T)를 사용한다. 둘째로 스페이스 그리드 통과후의 거리변화를 고려한 혼합계수를 사용하며, 이는 다음과 같다.

$$K_T = K_1 \exp(-K_2 (Z-Z_G))$$

여기서 상수 K_1, K_2 는 中央副水路의 형광물질 농도측정치로 부터 결정되며, $(Z-Z_G)$ 값은 스페이스 그리드로 부터의 거리를 나타낸다. 그림 4-18, 19, 20에는 실험결과와 코드에 의한 계산결과를 비교한 것이 나타나 있으며, 표 4-5에는 계산된 혼합계수값이 나타나 있다.

본 실험시설을 이용하여 실험을 수행함으로써, 실험대상 스페이서 그리드에 의한 혼합효과를 규명하고, 스페이서 그리드의最適形態를 결정하게 된다.

5. HYDROMEL-Laser 實驗施設

가. 設置 目的

본 시설은 스페이서 그리드와 이에 부착된 혼합깃이 부수로내의 流動現象에 미치는 영향 즉, 亂流混合효과를 규명하기 위한 常溫常壓하의 副水路 流速測定用 실험시설이다. [13]

유속측정용 LDV의 레이저 散亂粒子를 인위적으로 주입시키는 閉回路를 이루고 있으며, 실제 爐心의 流動條件 즉, 부수로내의 평균속도를 5 m/sec로 모의하고, 실험온도를 80 °C로 유지하여 動粘性度(dynamic viscosity)를 상온 조건 (1 bars, 25 °C)에서 보다도 2배이상 낮추어 실제 노심의 레이놀드數에 가깝게 실험조건을 모의하였다. 이때 過熱로 인해 발생될 문제를 피하기 위해 실험압력을 3×10^5 Pa로 선택하였으며, 시험대 각 부위의 팽창을 흡수하고 시험대의 振動을 최대한 줄여 測定體積의 振動을 최소화하도록 시험대를 설계하였다.

또한 실험특성상 요구되는 유량의 높은 안정성과 정확한 조절, 그리고 시험대 내의 singular ΔP 가 최소화되도록 하였으며, 高感度 光學性을 갖는 투명한 시험대 벽면을 설치하여 레이저 빔의 통과시 문제가 발생치 않도록 하였다.

나. 實驗裝置

그림 4.21 에 나타난 바와 같이 펌프에 의해 공급되는 유체는 그 일부가 熱交換器를 통과하여 펌프의 發熱에 의한 가열효과를 제거하여 유체의 온도를

80 °C로 일정하게 유지한 후, 정지밸브(VA), 流量計(Q1), 유량조절밸브(VR1)을 거친뒤 시험대에 공급되며, 이는 다시 펌프로 유입됨으로써 폐회로를 이룬다.

펌프를 통해 공급되는 유체가 유량계를 지나기 전에 바이패스 라인이 설치되어 있는데, 여기에는 유량계(Q2), 유량조절밸브(VR2), 역류방지용 板(C)이 설치되어 있으며, 이러한 바이패스회로는 펌프에 공급되는 定常流量을 일정하게 유지함으로써 펌프의 진동과 유량의 변동을 최소화하게 된다.

이외에도 加壓機(P), 열교환기의 2차회로, 유체 再充填회로, 드레인 밸브등이 설치되어 있다. 모든 배관의 재질은 SUS-304L로 되어있고, 최초 조립후 배관내의 모든 불순물들을 제거하였으며, 재충전 회로에서는 새로이 시험장치에 공급되는 유체의 불순물이 1 μ m 이하가 되도록 한다.

1) 펌프

실험장치 全 回路에 대해 산정된 전체 압력강하량(약 3×10^5 Pa)을 이겨낼 수 있고, 또한 시험대에서 5 m/sec의 평균유속을 발생시킬 수 있는 정상유량을 갖는 펌프를 선정하였으며, 그 사양은 다음과 같다.

- . 소요전력 : 15 kW
- . 입출구 배관직경 : 80 mm, 60 mm
- . 정상유량 : 80 m³/hr
- . 배출양정 : 30 m

2) 熱交換器

실험장치 내에서 유체의 온도를 증가시키는 요인으로는 약 12 kW 정도의 펌프의 消散熱이 있으며, 감소시키는 요인으로는 大氣온도(20 °C)와 유체와의 온도차에 의한 熱損失이 있다. 열교환기 1,2차측의 유량, 2차측의 온도 등을 조절하여 초과열량을 제거함으로써 유체의 온도를 80 °C로 유지시킨다. 열교환기 1차측에는 유량조절기(Co)와 유량조절 코크(PR)가 설치되어 있고, 2차

회로 하류측에는 유량조절밸브와 온도측정용 센서(platine RTD)가 설치되어 있으며, 이들에 대한 사양은 다음과 같다.

- . 1차측 : 유 량 ; $1 \text{ m}^3/\text{hr}$

입구온도 ; $80 \text{ }^\circ\text{C}$

출구온도 ; $40 \text{ }^\circ\text{C}$

- . 2차측 : 유 량 ; $1 \text{ m}^3/\text{hr}$

입구온도 ; $17 \text{ }^\circ\text{C}$

출구온도 ; $45 \text{ }^\circ\text{C}$

3) 밸브類

그림 4-22 에 나타난 바와 같이 시험대 상류측에는 수동조작 정지 밸브(VA1)가 설치되어 펌프가동중에 이 밸브를 잠금으로써 유체를 바이패스 시켜 시험대에 유체가 유입되지 않은 상태에서 유량계(Q1)의 零點을 확인하며, 열교환기 1차측 상류에 설치된 수동조절밸브(RR)을 이용하여 열교환되는 시험 유체의 양을 조절하게 된다.

그리고 electro-pneumatic형 유량조절밸브가 시험대 상류측(VR1), 바이패스라인(VR2), 열교환기 2차측 하류에 설치되어 있다.

4) 測定機器

- . 전자기식 유량계 ; 2개의 유량계가 시험대 입구측과 바이패스 라인상에 설치.

- 압력 측정 ; 압력변환기를 시험대 출구에 설치하였으며, 스페이서 그리드에 의한 압력강하량을 측정하기 위해 시험대 내에 差壓변환기 설치.

- 온도 측정 ; 시험대 입구와 열교환기 2차측 하류에 백금저항온도계(platine RTD)를 설치.

다. 試驗臺 및 試驗用 核燃料集合體

그림 4-23,24 에 나타난 바와 같이 시험대는 유속측정용 레이저빔이 통과할수 있는 투명용기(Transparent Box), 이를 상하에서 지지하는 두 개의 금속용기(Upper & Lower Box), 금속용기를 지지하는 두 개의 안내용기 (Upper & Lower Adaptive Piece), 회전대(Turning Table)와 회전플랜지(Turning Flange), 그리고 진동흡수용 조인트(anti-vibration joint) 등으로 구성되어 있다.

1) 투명용기

투명용기는 실험조건 80°C , $3 \times 10^5 \text{ Pa}$ 하에서 견딜 수 있도록 두께 25 mm, 길이 810 mm인 네면의 plexiglass로 되어 있으며, 이들은 접착제로 상호간에 연결되어 있고, 내면은 한변의 길이가 66.1 mm인 정사각형의 형상이다. (그림 4-25 참고) 처음에는 pyrex재질을 사용하였으나, 레이저빔의 透過特性이 불량하고, 연료봉다발의 장전시 굽힐 염려가 있어 plexiglass로 교체하였다.

2) 금속용기 및 안내용기

투명용기 상하에 漏水防止板(flat joint)을 통해 연결봉(connecting rod)에 의해 연결되어 투명용기의 형상을 유지하며, 기존의 실험설비와 시험대를 연결시키는 역할을 한다. 상부용기는 길이 400 mm이고, 하부용기의 경우는 320 mm 이다. 이들은 알미늄을 전기부식법에 의해 가공하여 사용하였으나, 스테인레스 재질과의 접촉부위의 酸化로 인해 LDV의 신호처리에 문제가 발생하여 곧 스테인레스로 교체할 예정으로 있다.

그림 4-26 에 나타난 바와 같은 안내용기는 금속용기에 연결되어 있으며, 하부금속용기내에는 혼합기(homonizer)를 설치하여, 시험대 입구배관의 굴곡이 시험대내의 유속에 미치는 영향을 제거하도록 하였다.

3) 회전대

회전대는 하부 금속용기를 지지하면서 시험대가 90° 회전할 수 있

도록 하며, 여러 요인으로 인한 진동이 시험대에 전달되지 않도록 화강암 지지대 (granite table)에 연결되어 있고, MICRO-CONTROLE社의 회전테이블 (RT-300형)을 사용하였다.

4) 지지대

지지대는 시험대, 회전대 및 시험대에 부착되는 유속측정용 fiber optics 등의 모든 하중을 지지해 주고 있으며, 높은 정밀도의 평면도를 유지함으로써 시험대와 fiber optics간의 상호위치를 미세하게 조절할 수 있도록 해준다.

5) 시험용 핵연료집합체

핵연료집합체는 직경 9.5 mm인 연료봉이 12.6 mm의 피치를 갖는 5x5 봉배열 구조의 25개 연료봉으로 구성되어 있다. (그림 4-25 참고)

그림 4-27(b)에 나타난 바와 같은 형상의 연료봉의 재질은 SUS-304L이며, 연료봉의 강도를 유지하기 위해 내부가 채워져 있다. 이들 연료봉의 간격을 유지해주는 2개의 지지판 (Upper & Lower Spacing Device; 그림 4-27(a) 참조)가 연료봉의 상하부에 연결되어 있는데, 상부에 위치한 지지판은 연료봉과 나사로 고정되어 있으나, 하부의 지지판은 연료봉과 고정되지 않아서 연료봉의 길이 변화로 인한 변형이 생기지 않도록 하였다. 이러한 상하부 지지판은 SUS-304L의 재질로서, 전기부식법에 의해 가공하였다.

라. LDV 系統

시험용 핵연료집합체내 부수로 유속측정기기로는 fiber optics를 이용한 DANTEC社의 Two-component LDV 장치를 사용하여 임의의 측정체적내에서의 서로 직교하는 두가지 속도성분을 측정하고, 시험대를 90°회전시켜 두 속도성분을 측정함으로써 한 지점에서의 세 속도성분을 모두 측정하도록 되어있다.

LDV 계통은 다음과 같은 요소들로 구성되어 있다. (그림 4-28 참고)

- Laser source ; Argon ion laser, 水冷式
- Beam splitter
- Photo-detector
- Signal processing system ; BSA
- Color separator ; green beam ($\lambda = 514.5 \text{ nm}$) &
blue beam ($\lambda = 488 \text{ nm}$)
- Coupling system with manipulators
- Traversing system of fiber optics

여기서 照射되는 빔의 직경이 60 mm인 fiber optics를 사용함으로써 레이저 신호처리장치로 사용되는 BSA (Burst Spectrum Analyser)는 작은 SNR(signal-to-noise ratio)의 경우에도 매우 효과적이며, IEEE 488 버스에 의해 컴퓨터와 연결됨으로서 기능이 조절된다. 또한 레이저의 조절을 위해 IEEE 488 버스로 전원공급기가 컴퓨터와 연결된다.

그림 4-29 에 나타난 바와 같이 fiber optics의 미세한 이동조절을 위해 DANTEC 社의 移送裝置를 사용하였는데, 이는 다음과 같은 요소들로 구성되어 있다.

- 시험대 지지대 위에 고정된 지지판
- fiber optics 移送가이드와 수직이송모터가 장착된 수직지지봉
- fiber optics의 수평이동을 감지하는 센서가 부착된 두개의 지지대

마. 豫備實驗 및 實驗結果

1) 실험장치의 검증

- 시험대 상류측의 영향조사 ; 시험대내에 시험용 핵연료집합체를 설치하지 않은 상태에서 시험대 임의의 단면내 여러 위치에서 축방향 속도를

측정함으로써 유속이 안정되고 또한 對稱分布를 이루고 있는지를 살펴보고, 이때 시험대 상류측 형상에 의한 영향이 존재하는지를 확인한다.

- 레이저빔 照射角度的 最適化 ; 시험대내에 봉다발을 삽입하지 않은 상태에서 빔이 조사되는 각도의 최적값을 결정한다. 예비실험 결과로부터 fiber optics의 조사방향이 수평방향으로 부터 30° 정도일 때가 가장 적합했으며, 이때 시험대내에서의 조사각은 약 21° 정도가 된다.

이러한 빔의 조사각도는 散亂빔의 강도(intensity)에 큰 영향을 끼치므로 매우 중요하다. 그림 4-30 에는 두께 3 mm인 plexiglass에 대한 투과율이 나타나 있다.

2) 예비실험조건

- 유량 : 50 m³/hr
- 온도 : 35 °C
- LDV 계통 :
 - Frequency shift ; 500 kHz
 - Max. power of laser ; 4 W
 - Frequency centering ; BSA-1 : 2.89 m/sec
BSA-2 : 2.74 m/sec
 - Band pass ; BSA-1 : 2.89 m/sec
BSA-2 : 2.74 m/sec
 - Photomultiplier voltage ; 800 V

3) 실험결과

그림 4-31 에 나타난 바와 같은 좌표계에 대해 X방향의 다섯지점 (X = 10, 23, 33, 43, 56)에서 50개의 data를 얻고 난 후, 시험대를 90° 회전하여 X = 10, 20, 33, 46, 56의 위치에서 50개의 data를 얻었다. 이와같은 측정을 수직 방향(Z-방향)의 두 단면 즉, 시험대 투명용기 하단으로 부터 150 mm 상방지점과 520 mm 상방지점에 대하여 수행하였다. 이에 대한 결과가 그림 4-32, 33 에

나타나 있으며, 유량계로 부터 산출된 평균속도값(3.25 m/sec)과 비교할 때 본 예비실험에서 측정된 평균속도값 ($V_z = 2.99$ m/sec)은 8 %의 오차를 보이고 있다.

6. EDVIGE 實驗施設

가. 設備 概要

본 시설은 핵연료집합체 부수로내 축방향 및 횡방향 속도성분의 평균값과 搖動成分을 측정함으로써 시험용 핵연료집합체 연료봉의 振動현상 규명을 위한 data base를 확보하는데 그 목적이 있다. [14]

본 실험에서는 레이저流速計로 速度場을 측정하고, 측정기기가 內藏된 연료봉을 사용함으로써 연료봉의 진동과 충격을 측정하며, 또한 압력강하도 측정하게 된다.

나. 實驗裝置

1) 설비 개요

그림 4-34 에 나타난 바와 같이 EDVIGE 실험설비는 다음과 같은 요소들로 이루어져 있다.

- 펌프 : 최대유량 270 m³/hr, 배출양정 42 m 의 水藏形 펌프
- 유량조절밸브와 바이패스 밸브
- 전자기식 유량계
- 貯水용기 : 용량 20 m³
- 시험대

그림 4-35에 나타난 바와 같은 시험대는 스테인레스로 되어 있고, 시험대 前面의 벽은 두께 30 mm의 plexiglass로 되어 있으며 교환이 가능하도록 설계되어 있다. 시험대 입구에는 스틸링튜브(stilling tubes)가 설치되어서 펌프

에 의해 공급되는 물의 攪動을 최대한 제거하여 시험대에 공급되도록 한다. 시험대 내에 설치되는 두 개의 핵연료집합체의 각각에 유입되는 유량은 시험대 입구에 있는 벤츄리유량계를 갖춘 2개의 관에 의해 측정된다. 물의 온도는 저수용기내의 지속적인 물갈이를 통해서 26 °C 정도로 유지된다.

2) 시험용 핵연료집합체

시험대내에는 8x8 봉배열을 갖는 두 개의 집합체가 설치되는데, 연료 봉은 외경 9.5 mm인 Zircaloy 튜브로 되어 있으며, 내부는 UO₂ 와 밀도가 유사한 펠렛形의 납으로 채워져 있다. 시험대 좌측에 장전되는 표준형 핵연료 집합체는 표준형 AFA형 스페이스그리드와 혼합깃을 갖춘 AFA형 집합체이며, 우측에는 시험하고자 하는 형상의 X1형 집합체가 장전되는데, 이들은 다음과 같은 세가지가 있다. 제1형(混合形) 집합체는 그림 4-36과 같이 1개의 AFA 그리드와 4개의 1x1형 그리드로 이루어져 있으며, 제2형(純粹形)은 그림 4-37 과 같이 2개의 AFA 그리드와 2개의 2x1형 그리드로 이루어져 있다. 제3형은 제2형과 동일하나, 두 집합체와의 사이에 격리판이 놓여져 있다.(그림 4-38)

AFA형 스페이스 그리드의 각 셀(cell)은 그림 4-39 와 같이 두 개의 딥플(dimple)에 의해 연료봉이 지지되도록 두 개의 인코넬 스프링이 부착되어 있으며, 상부에는 그림 4-40 과 같은 형상의 혼합깃이 부착되어 있다.

X1형 집합체 스페이스 그리드의 각 셀은 연료봉과 0.2 mm의 여유간극을 유지하여 연료봉이 스페이스 그리드에 의해 구속되지 않도록 하였는데, 이에 사용되는 스페이스 그리드는 1x1 형 (그림 4-41)과 2x1형(그림 4-42)의 두가지 형태가 있다. 1x1형 그리드내 각 셀에는 동일한 수직위치에 4개의 딥플이 위치해 있으며, 2x1형의 경우 그리드 상하부의 두 곳에는 각각 4개의 딥플이 위치해 있고, 이들 두 경우 모두 혼합깃이 부착되어 있다. 그림 4-43 에는 딥플, 혼합깃 그리고 연료봉에 대한 상세한 내용이 나타나 있다.

핵연료집합체는 그림 4-44 와 같이 8x8 봉배열의 상하부에 있는 상부 접합부와 하부 접합부에 의해 봉배열 구조를 갖추게 되며, 상하부 접합부는 연료봉과 동일한 외경을 갖는 4개의 안내관(guide tube)에 의해 연결된다. 그리고 이러한 핵연료집합체는 그림 4-35 에서와 같이 상하부 용기에 의해 측 방향으로 구속되어 시험대내에 위치하게 된다.

다. 측정방법

부수로내의 측방향 및 횡방향 유속측정 (그림 4-46) 에는 레이저流速計가 사용되는데, 이는 spectra physics社의 레이저 소스, DANTEC社의 focusing receiving optics와 신호처리장치를 사용하며, 신호처리장치는 IEEE 488 버스에 의해 HP-300계열 컴퓨터에 연결되어 제어된다. (그림 4-47 참조)

레이저 유속계의 移送裝置는 3次元的 이동이 가능토록 되어 있으며, 매 측정시마다 그림 4-45 에 나타난 바와 같이 霧點조정을 수행한다.

제1형 집합체 배열 (그림 4-36) 의 경우는 그림 4-48(a) 에서와 같이 X1형 집합체내 A,B 연료봉사이, AFA형 집합체내 G,H 연료봉사이, 그리고 두 집합체 사이의 측방향 7 지점에서의 유속을 측정한다. 제2형 집합체 배열 (그림 4-37) 의 경우는 그림 4-48(a) 에서와 같이 첫째 그리드 하류지점에서 X1형 집합체에 대해서는 A와 B, 그리고 D와 E 연료봉 사이의 부수로 유속을 측정하고, AFA형 집합체에 대해서는 G, H와 D, E 연료봉 사이의 유속을 측정하며, 다음은 두번째 스페이스 그리드 상, 하류 지점의 A, B (X1형에 대해) 와 G, H (AFA형에 대해) 연료봉 사이의 유속만을 측정한다. 제3형 집합체 배열 (그림 4-38) 의 경우 유속측정 위치는 그림 4-48(b) 에 나타나 있다.

이러한 세가지 배열의 각 측정위치에서 그림 4-48 에 나타난 바와 같이 流路내 레이저 透過經路 90 mm 상에서 매 2 mm 마다 45개의 測定點에서 그림

4-46 에 표시된 副水路내 유속의 軸方向 성분(U)과 橫方向 성분 (V)을 측정하였다. 이때 매우 큰 초점거리 (f=600 mm) 와 작은 빔간격 (e=13 mm)을 채택하였음에도 불구하고 레이저 빔의 최대 침투거리(Z=90 mm) 근처에서는 횡방향 성분(V)을 직접 측정할 수가 없어서, 그림 4-46 에 나타난 바와 같이 fiber optics를 $\pm 45^\circ$ 회전시켰을 때의 속도를 측정하여 횡방향 성분을 결정하였다. 여기서

$$V = (U_+ - U_-) / \sqrt{2}$$

$$v' = (u_+^2 + u_-^2 - u^2)^{1/2}$$

모든 실험은 유량 $270 \text{ m}^3/\text{hr}$, 온도 26°C 에서 수행되었으며, 두 방향의 속도성분(U,V) 이외에 亂流運動에너지 (K)도 결정하였다.

$$K = \frac{1}{2} [u'^2 + 2v'^2]$$

라. 實驗結果

세가지 형태의 집합체 배열에 대하여 축방향의 平均速度성분과 亂流運動에너지가 그림 4-49 (a),(b),(c) 와 그림 4-50 (a),(b),(c)에 나타나 있다. 이때 난류운동에너지는 圓으로 표시되어 있는데, 원의 면적은 圓중심지점에서의 난류운동에너지 값에 비례하도록 표시하였고, 축방향 평균 속도성분은 Z=0 인 선 상 즉, 레이저 빔이 통과하는 선상의 속도값의 평균치로 표시하였는데, 이때 벽면의 영향을 받지않는 33개 지점 (Z=20~84)에서의 값만을 취하여 평균하였다.

표 4-6 (a),(b),(c) 에는 세가지 집합체 배열에서의 측정된 平均速度값 (U, V), 搖動成分(\bar{u}', \bar{v}') 그리고 亂流運動에너지(\bar{K}) 값이 나타나 있다. 여기서 X-좌표계는 측정되는 지점의 측방향 위치를 표시하고, Y-좌표계는 레이저 빔이 통과되는 부수로의 위치를 나타낸다.

그림 4-51 에는 실험자료의 재현성 (reproducibility) 을 검증하기 위해 동일한 실험조건하에서 시간간격(2일)을 두고 측정했을 경우의 결과를 표시 하였다. a), b) 경우의 오차는 1.2 % 정도이고, c), d) 경우는 2.8 % 정도로서, 검증실험을 위한 전체 실험결과의 경우 平均誤差 2 %를 보이고 있었다.

Table 4-1. T/H Test Facilities for the PWR Fuel Qualification in CENG

Facility	Conditions	Test Bundle	Test
GRAZIELLA-2	850 kW; 30bars; Freon	- 5x5 rod array - 3.65, 4.2m in length	- CHF test - ΔP test
OMEGA-1	9 MW; 170 bars; Water	- Uniform & cosine flux	- Mixing test
HYDROMEL	Adiabatic Cold Water	- 9x9 rod array - 2m in length	- ΔP test - Mixing test
HYDROMEL - LASER	Adiabatic Cold Water	- 5x5 rod array	- Velocity measurement by LDV

Table 4-2 Mass Flowrate Scaling Factor (K) between Water and Freon

P (MPa)	K
6.9	1.152
11	1.170
12.5	1.087
13.9	1.031
16	1.000

* Remarks : $K = M_w/M_f$

Table 4-3 Range of the CHF Test Parameters in GRAZIELLA Loop

	Freon-12	Equivalent Water
Pressure (MPa)	1.2 to 2.9	7.6 to 16
Mass flux ($Mg/m^2 \cdot s$)	2 to 9	2 to 8
Steam quality	-0.2 to 0.4	-0.2 to 0.4
Heat flux (kW/m^2)	40 to 330	500 to 3800

Table 4-4. Mixing Coefficients (M_T) for the Different Test Grids in GRAZIELLA-1 Loop

Cell	Rod Dia.	Flux Ratio	Run No.	Grid Type	M_T
Typical Cell	0.95 cm	1.315	3600, 3700	Westinghouse Type	0.075
			5600, 5700	AFA - Type	0.045
			6300, 6400	W - Vane without Edge	0.045
			6500	Modified AFA - Type	0.040
Typical Cell	0.90 cm	1.106	4500, 4600	Westinghouse Type	0.045
			4700, 4800	W - Type (Thick)	0.035
			4900, 5100	W (Thick, without Vanes)	0.007
Guide Tube Cell	0.95 cm	1.315	3800, 4000	Westinghouse Type	0.040
			5200, 5300	AFA - Type	0.040
			5400, 5500	AFA without Vanes	0.015
			5800, 5900	Westinghouse Type	0.040

Table 4-5. Mixing Coefficients Determined from the Measured Concentration of Fluorescent Tracer in HYDROMEL Loop.

Grid	K_1	K_2	$K_T(Z)$	K_T (constant)
Westinghouse (sp. 52 cm)	0.35	0.10	0.067	0.065
Westinghouse (sp. 44 cm)	0.35	0.10	0.079	0.075
AFA-Type (sp. 44 cm)	0.070	0.020	0.047	0.045

* $K_T(z)$: 이웃하는 두 스페이스 그리드 사이영역의 평균치.

Table 4-6(a) Average Values of Velocity Components, their Fluctuating Components & Turbulent Kinetic Energy in Configuration-1

Coord.X	Coord.Y	\bar{U}	\bar{V}	\bar{u}'	\bar{v}'	\bar{k}
170.0	13.6	5.933	.131	1.376	.727	1.476
170.0	0.0	5.089	.088	.785	.511	.553
170.0	-13.6	5.657	-.074	1.380	.326	1.810
325.0	13.6	5.897	.060	.527	.391	.292
325.0	0.0	6.107	.061	.469	.355	.253
325.0	-13.6	6.068	.062	.635	.409	.368
480.0	13.6	5.969	.332	.598	.577	.512
480.0	0.0	5.776	.400	.547	.504	.404
480.0	-13.6	5.514	.537	.825	.486	.577
565.0	13.6	7.328	-.081	.609	.489	.424
565.0	0.0	5.579	-.078	.814	.314	1.167
565.0	-13.6	5.134	-.155	.926	.929	1.292
710.0	13.6	6.432	-.543	.728	.622	.551
710.0	0.0	6.734	-.552	.705	.735	.789
710.0	-13.6	6.071	-.466	.576	.633	.566
830.0	13.6	5.564	.377	.743	.764	.860
830.0	0.0	6.225	.356	.764	.926	.974
830.0	-13.6	7.926	.587	.736	.738	.916
860.0	13.6	5.848	.175	.761	.586	.633
860.0	0.0	7.087	.592	1.159	.614	1.049
860.0	-13.6	7.134	.718	.729	.752	.832

* COMMENTS : - ; Averaging on the Beam Path
X ; Axial Location to be Measured
Y ; Beam Path (Measuring Subchannel Location)
Y=13.6 ; Location between G & H in AFA-F/A
Y= 0 ; Interfacing Region between Two F/A's
Y=-13.6 ; Location between A,B in X1-F/A

Table 4-6(b) Average Values of Velocity Components, their Fluctuating Components & Turbulent Kinetic Energy in Configuration-2

Coord.X	Coord.Y	\bar{U}	\bar{V}	$\overline{u'}$	$\overline{v'}$	\bar{k}
450.0	0.0	6.338	.044	.492	.233	.175
450.0	-13.6	5.648	.050	.568	.508	.419
450.0	13.6	5.964	.073	.553	.436	.343
450.0	-51.4	7.535	-.105	.591	.472	.397
450.0	51.4	6.980	-.103	.702	.424	.426
720.0	0.0	6.811	-.227	.524	.437	.329
720.0	-13.6	6.678	-.144	.613	.427	.370
720.0	13.6	6.316	-.055	.634	.457	.410
805.0	0.0	5.881	-.159	1.256	1.350	2.610
305.0	-13.6	6.674	-.026	1.525	.761	1.744
805.0	13.6	5.843	-.047	1.240	1.092	1.961

* COMMENTS : - ; Averaging on the Beam Path
X ; Axial Location to be Measured
Y ; Beam Path (Measuring Subchannel Location)
Y=13.6 ; Location between G & H in AFA-F/A
Y=51.4 ; Location between D & E in AFA-F/A
Y= 0 ; Interfacing Region between Two F/A's
Y=-13.6 ; Location between A & B in X1-F/A
Y=-51.4 ; Location between D & E in X1-F/A

Table 4-6(c) Average Values of Velocity Components, their Fluctuating Components & Turbulent Kinetic Energy in Configuration-3

Coor.X	Coor.Y	\bar{U}	\bar{V}	$\overline{u'}$	$\overline{v'}$	\bar{k}
450.0	14.1	6.865	-.068	.647	.520	.480
450.0	26.7	7.458	-.095	.607	.481	.415
450.0	39.3	7.704	-.059	.627	.512	.459
450.0	51.9	7.950	-.084	.632	.616	.579
450.0	64.5	7.905	-.012	.728	.819	.936
450.0	89.7	6.332	-.030	.593	.389	.327
450.0	77.1	6.722	-.027	.668	.404	.386
450.0	64.5	7.503	-.025	.666	.533	.506
450.0	51.9	7.056	-.068	.660	.461	.430
450.0	39.3	6.702	-.116	.628	.480	.428
805.0	89.7	5.011	-.079	1.299	1.146	2.153
805.0	77.1	6.521	-.033	1.308	1.145	2.166
805.0	14.1	6.654	-.153	1.356	1.108	2.148
805.0	26.7	6.953	-.076	1.595	1.119	2.525

* COMMENTS : - ; Averaging on the Beam Path
X ; Axial Location to be Measured
Y ; Beam Path (Measuring Subchannel Location)

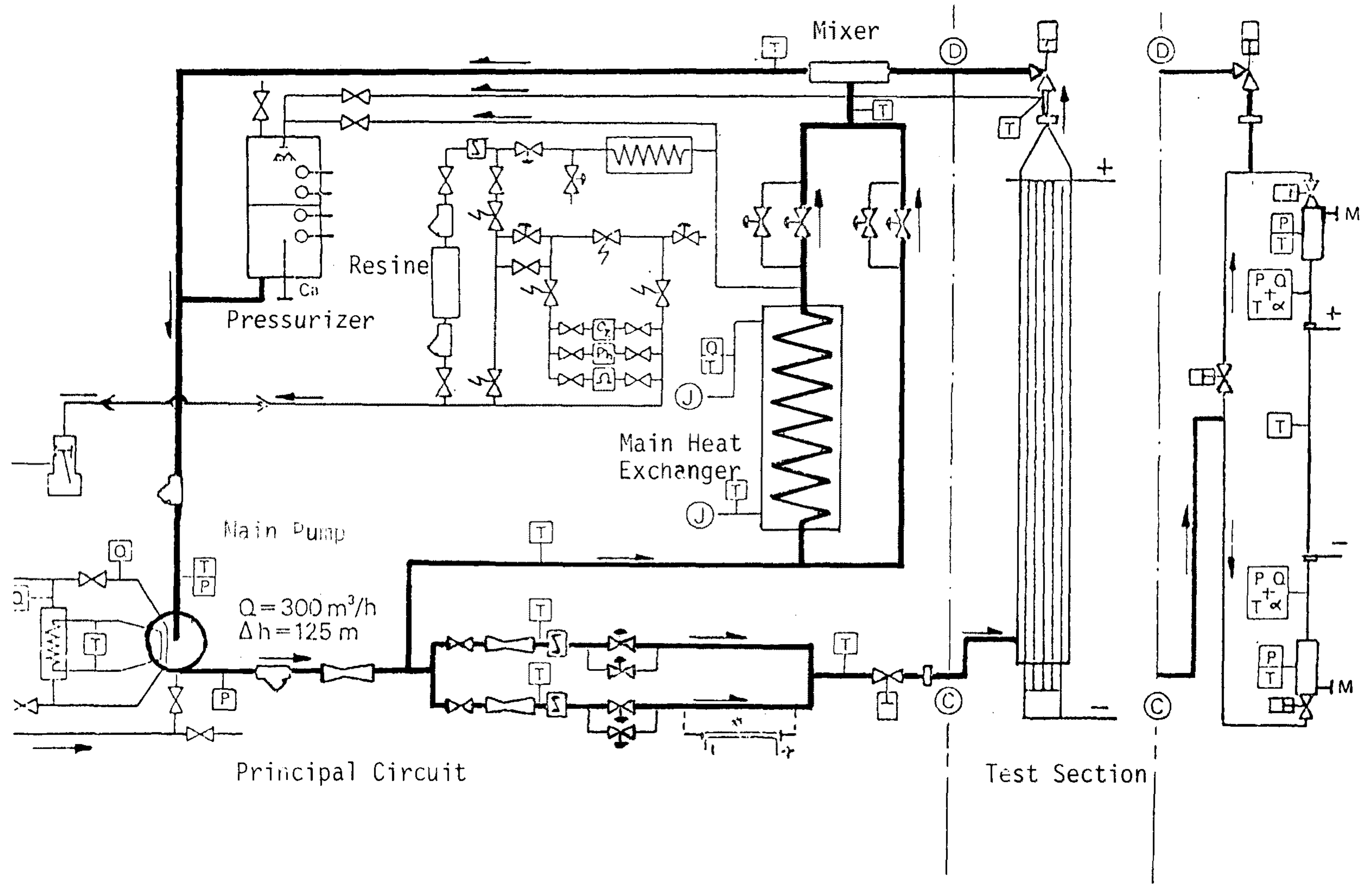
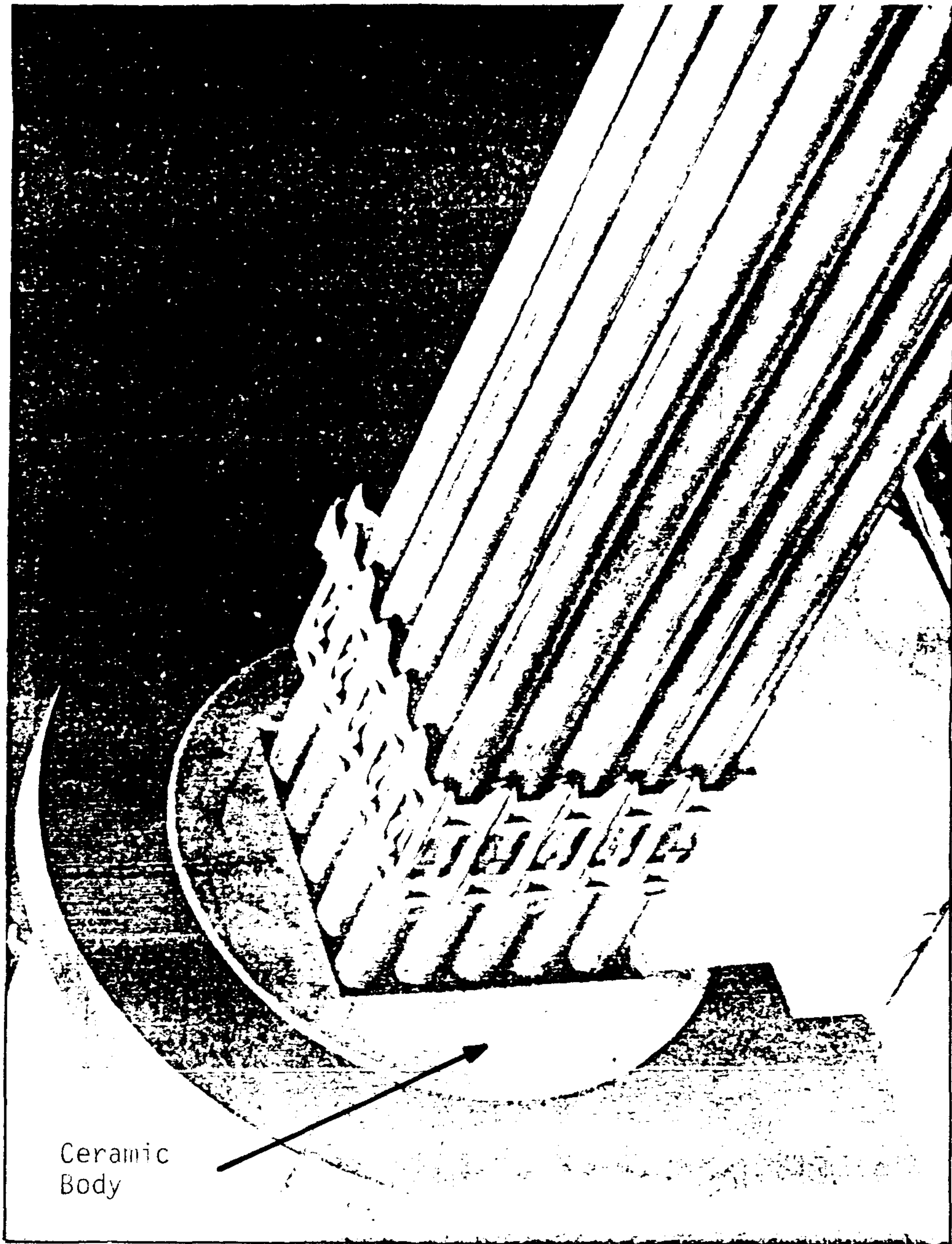


Fig. 4-1 Specified Flow Diagram of the OMEGA-1 Loop



Ceramic
Body

Fig. 4-2 5x5 Rod Array & Ceramic Inner Body in Test
Section of OMEGA-1 Loop

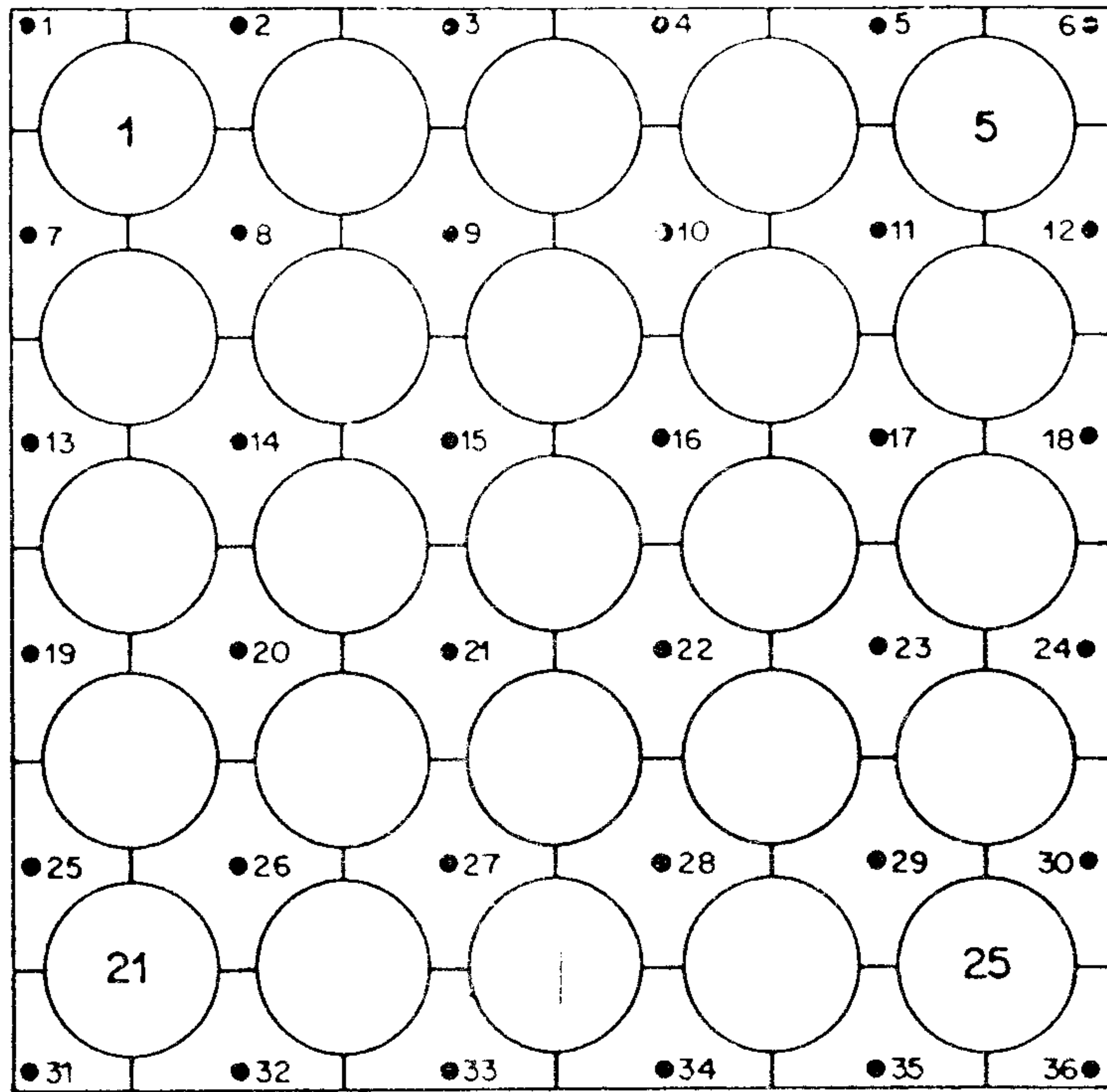


Fig. 4-3 Thermocouple Positions in Subchannels for Guide Tube Cell in OMEGA-1 Loop

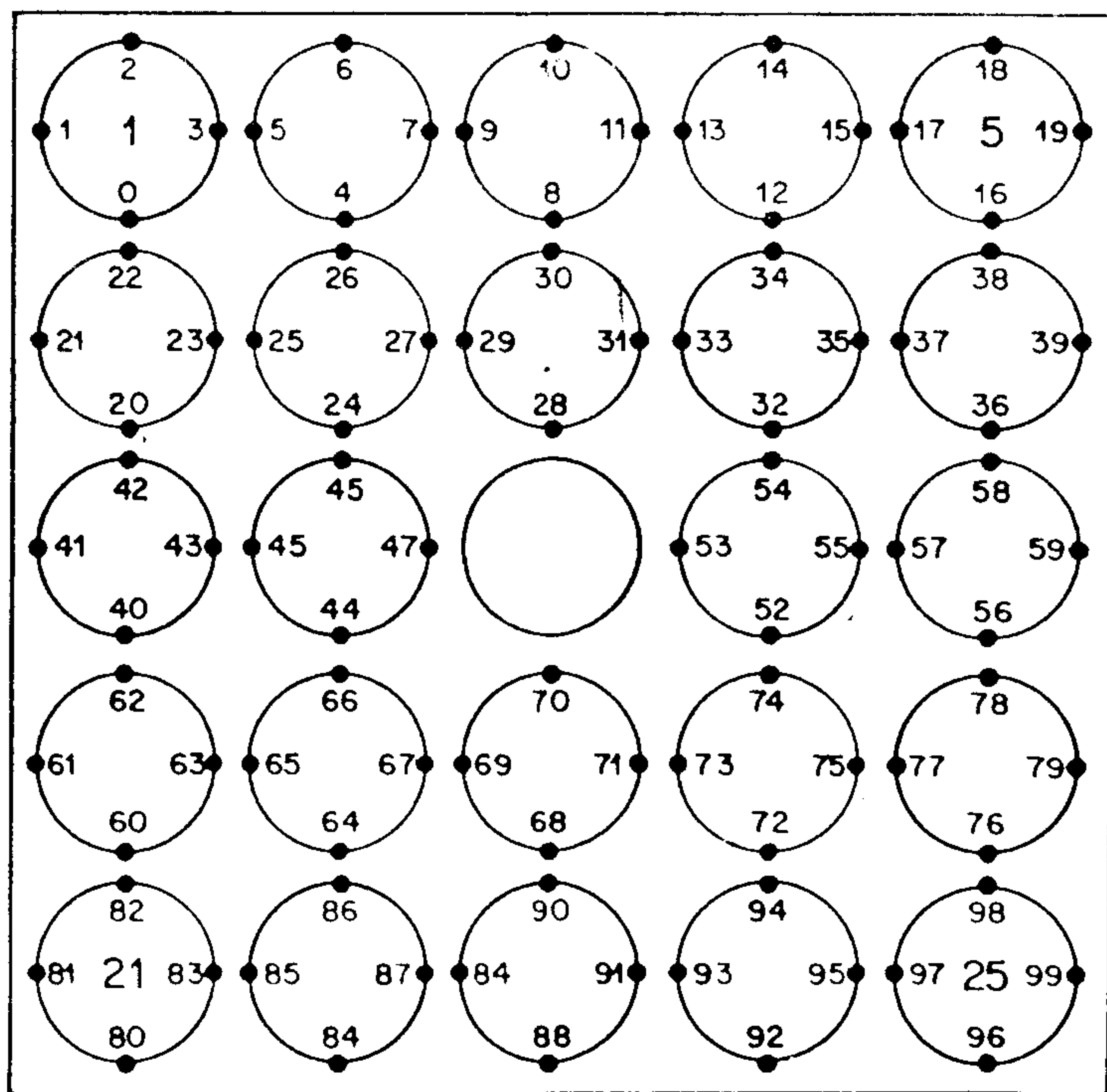


Fig. 4-4 Thermocouple Positions in Rod Wall for Guide Tube Cell in OMEGA-1 Loop

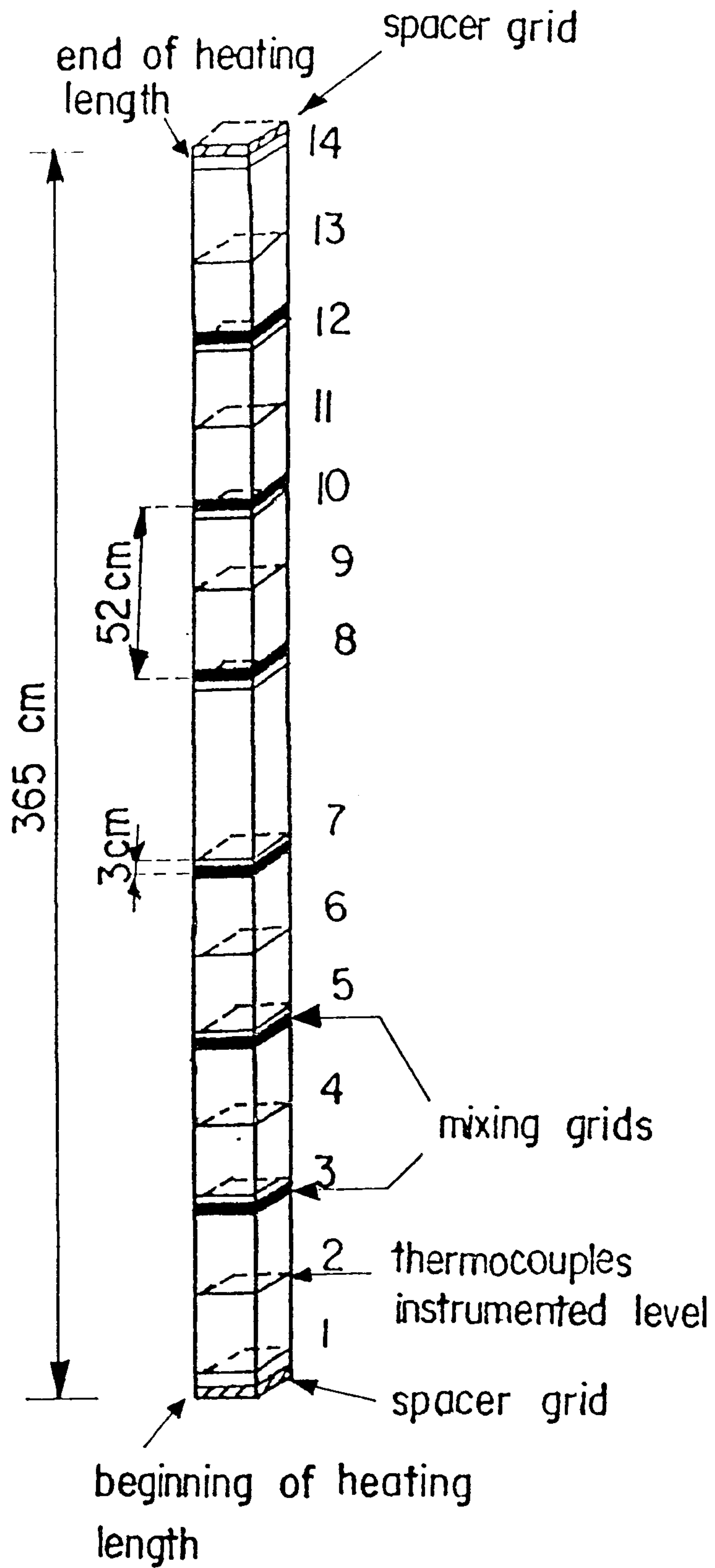


Fig. 4-5 Test Fuel Bundle in OMEGA-1 Loop
 - 166 -

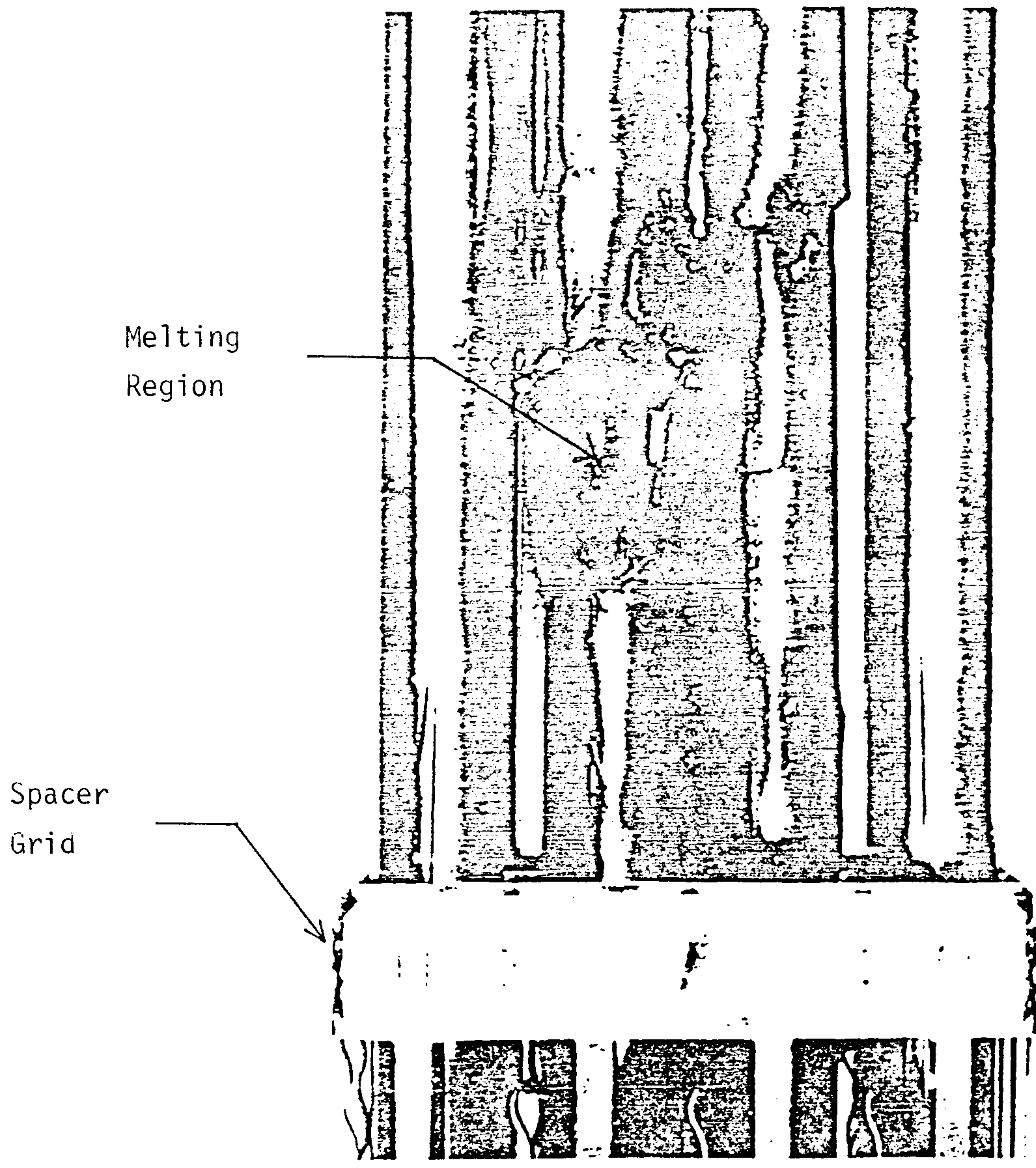
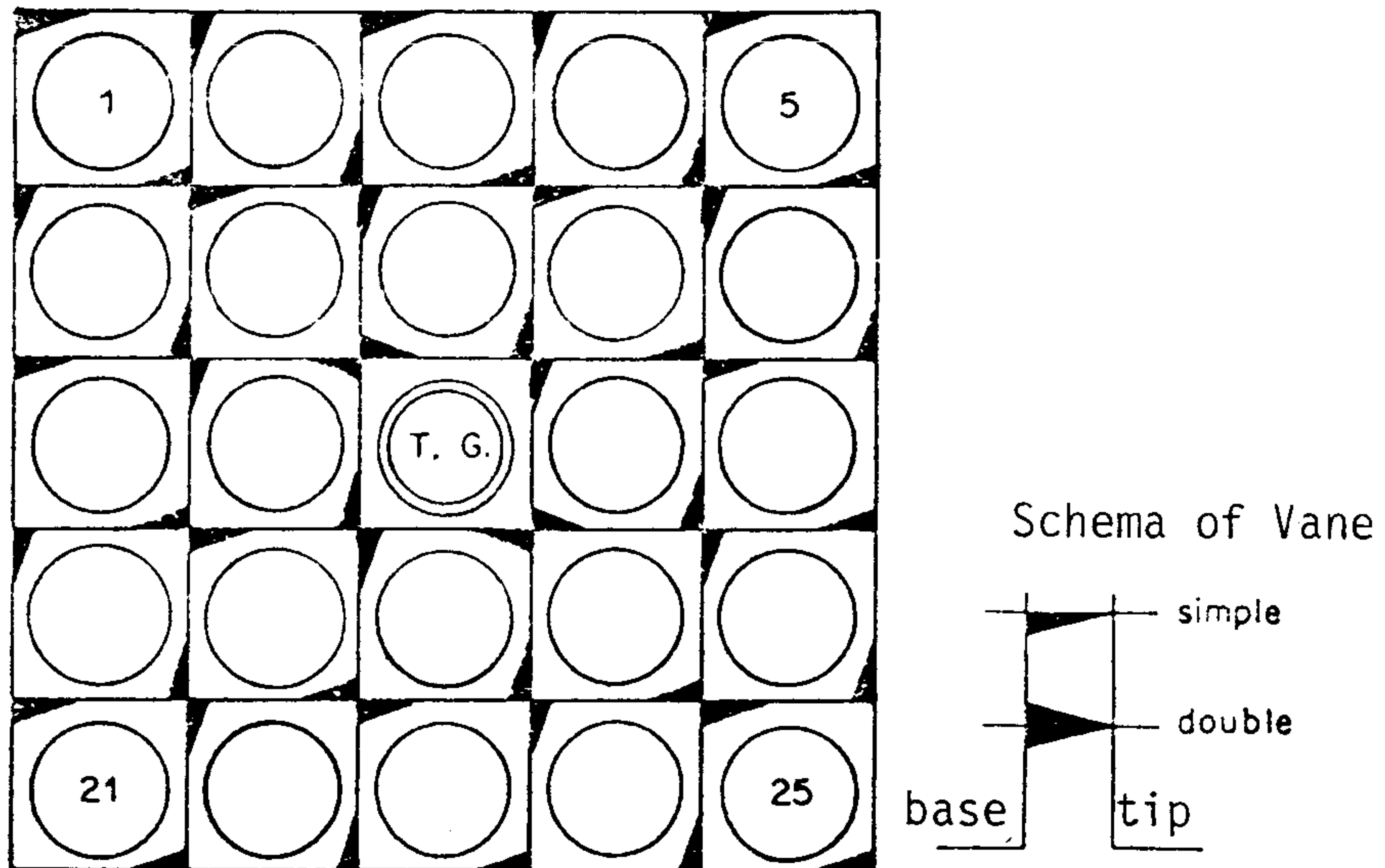
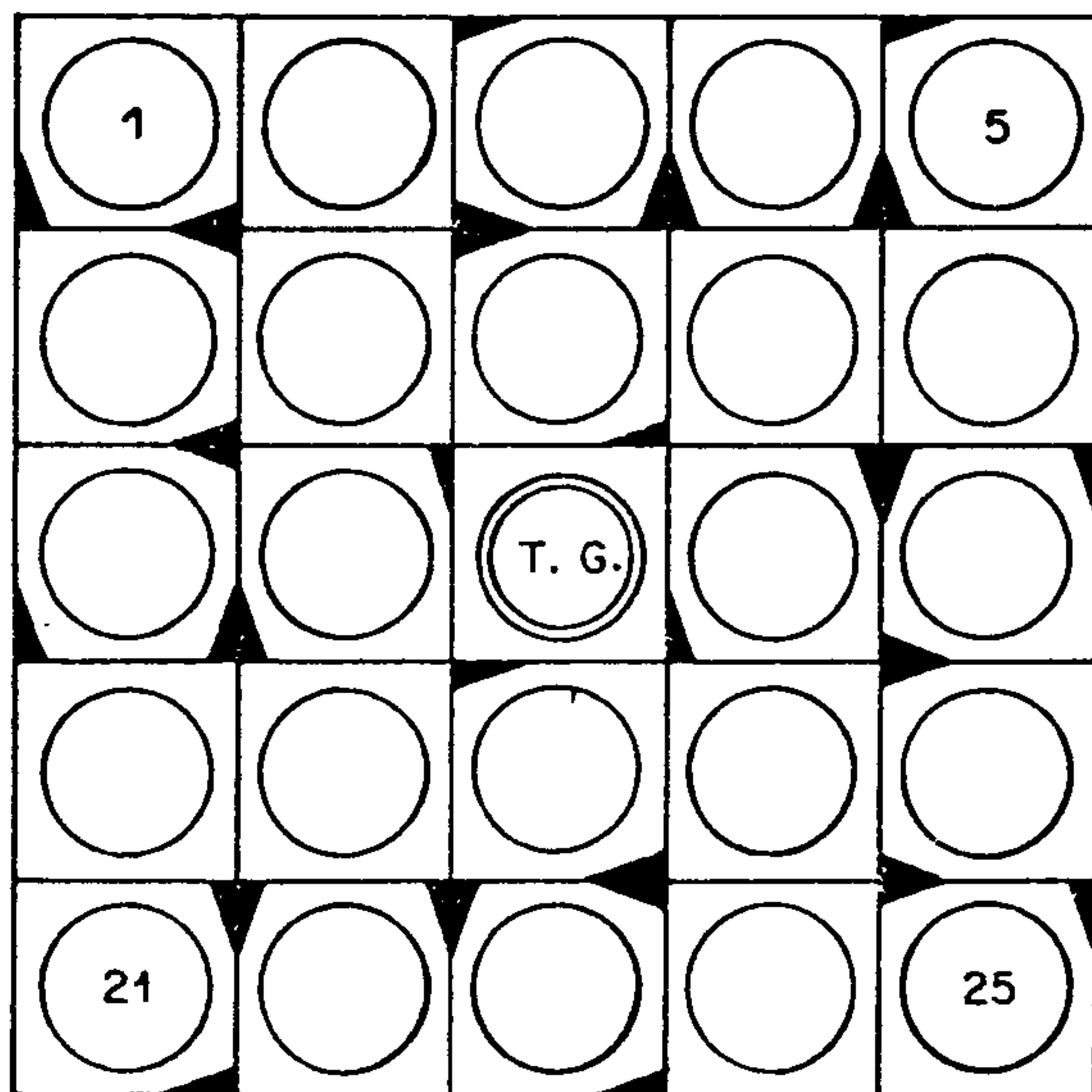


Fig. 4-6 Experimental Results under High Heat Flux Conditions (C.E.N.-Grenoble)



a) Westinghouse Standard Grid



b) Hybrid Grid

Fig. 4-7 Geometry of Two Types of Mixing Vane for Guide Tube Cell Tested in OMEGA-1 Loop (Run 3000 - 4000)

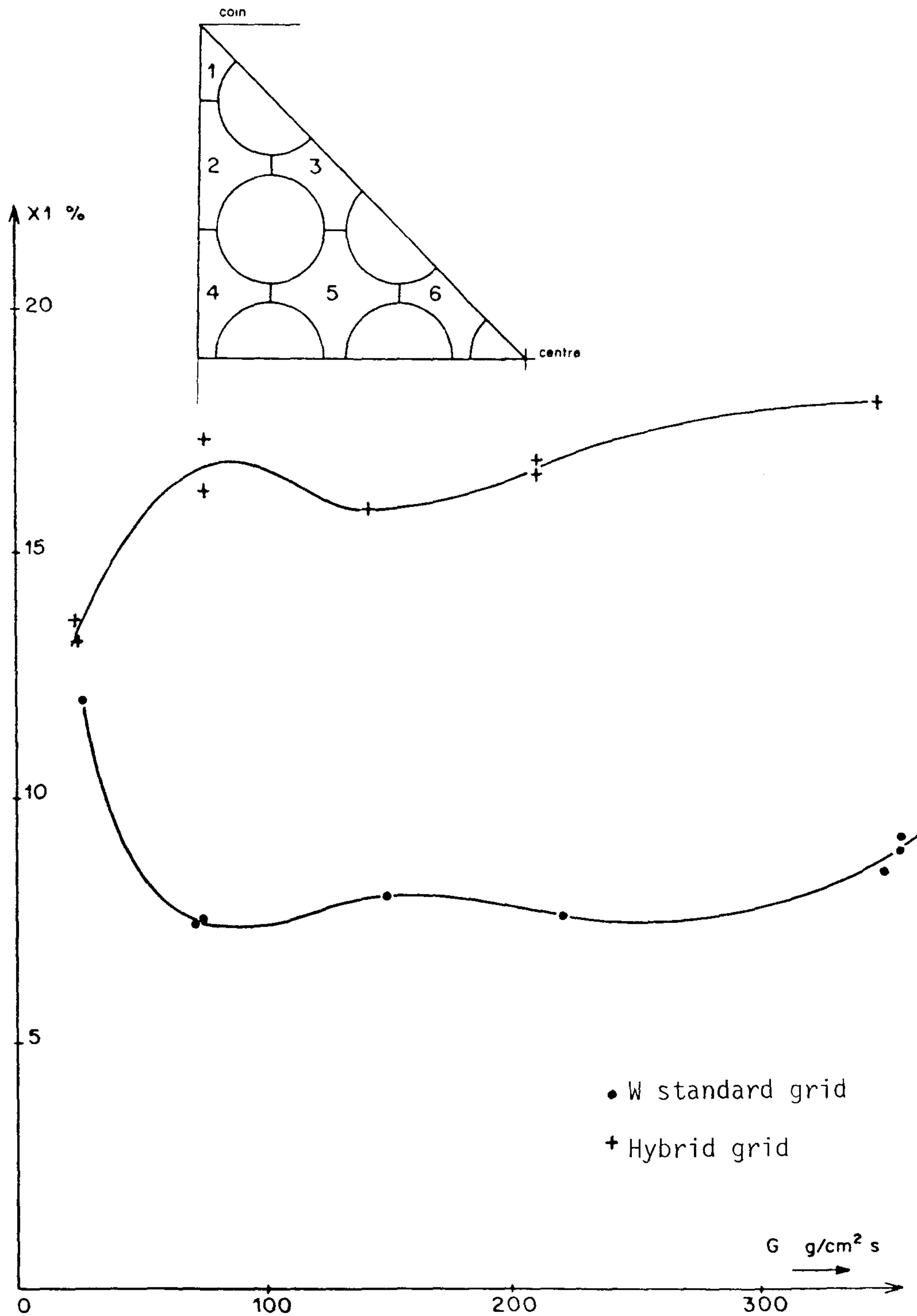


Fig. 4-8(a) Variation of the Parameter ξ in 1st Subchannel for Two Types of Grid in OMEGA-1 Loop (Run 3000 - 4000)

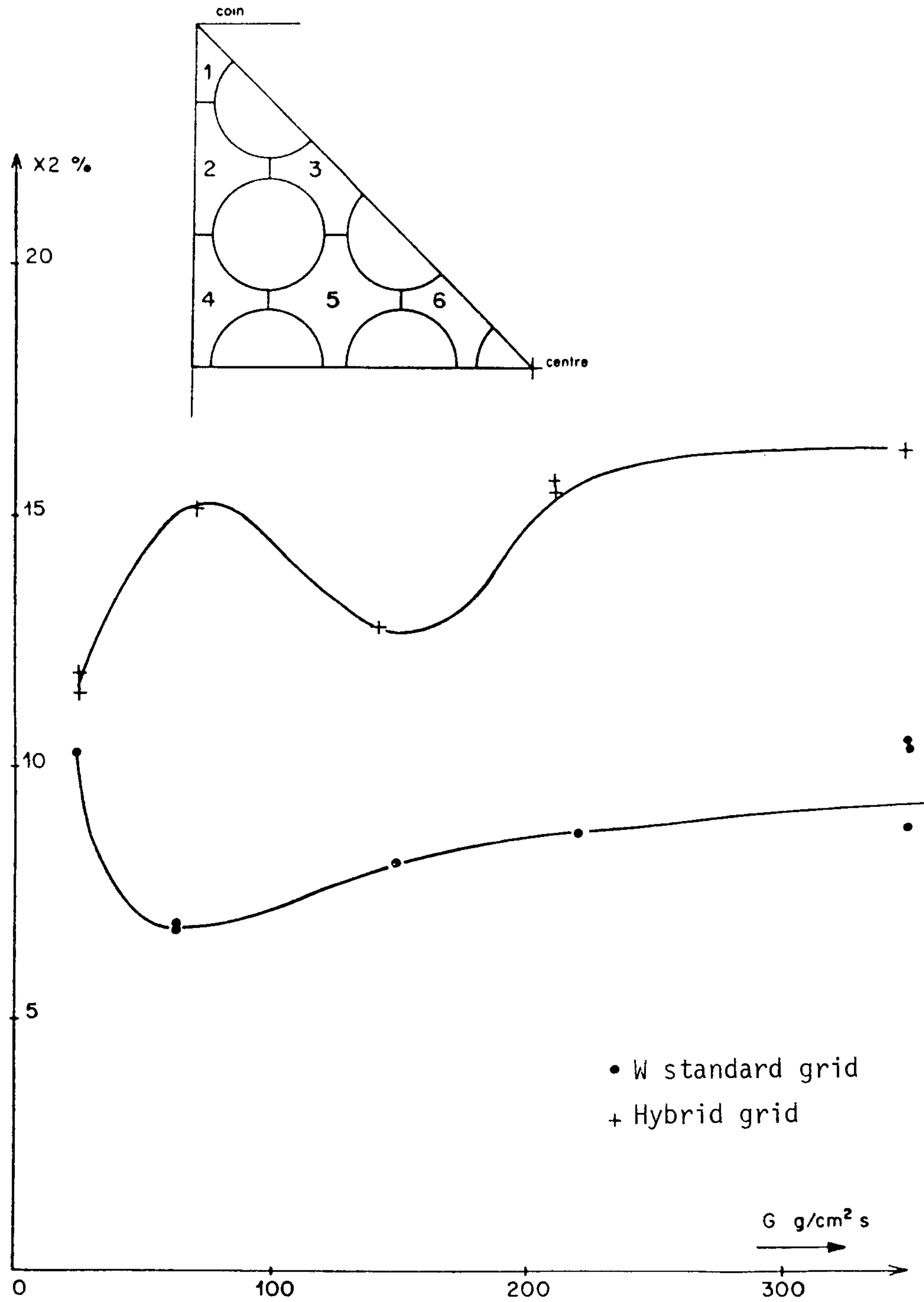


Fig. 4-8(b) Variation of the Parameter ξ in 2nd Subchannel for Two Types of Grid in OMEGA-1 Loop (Run 3000 - 4000)

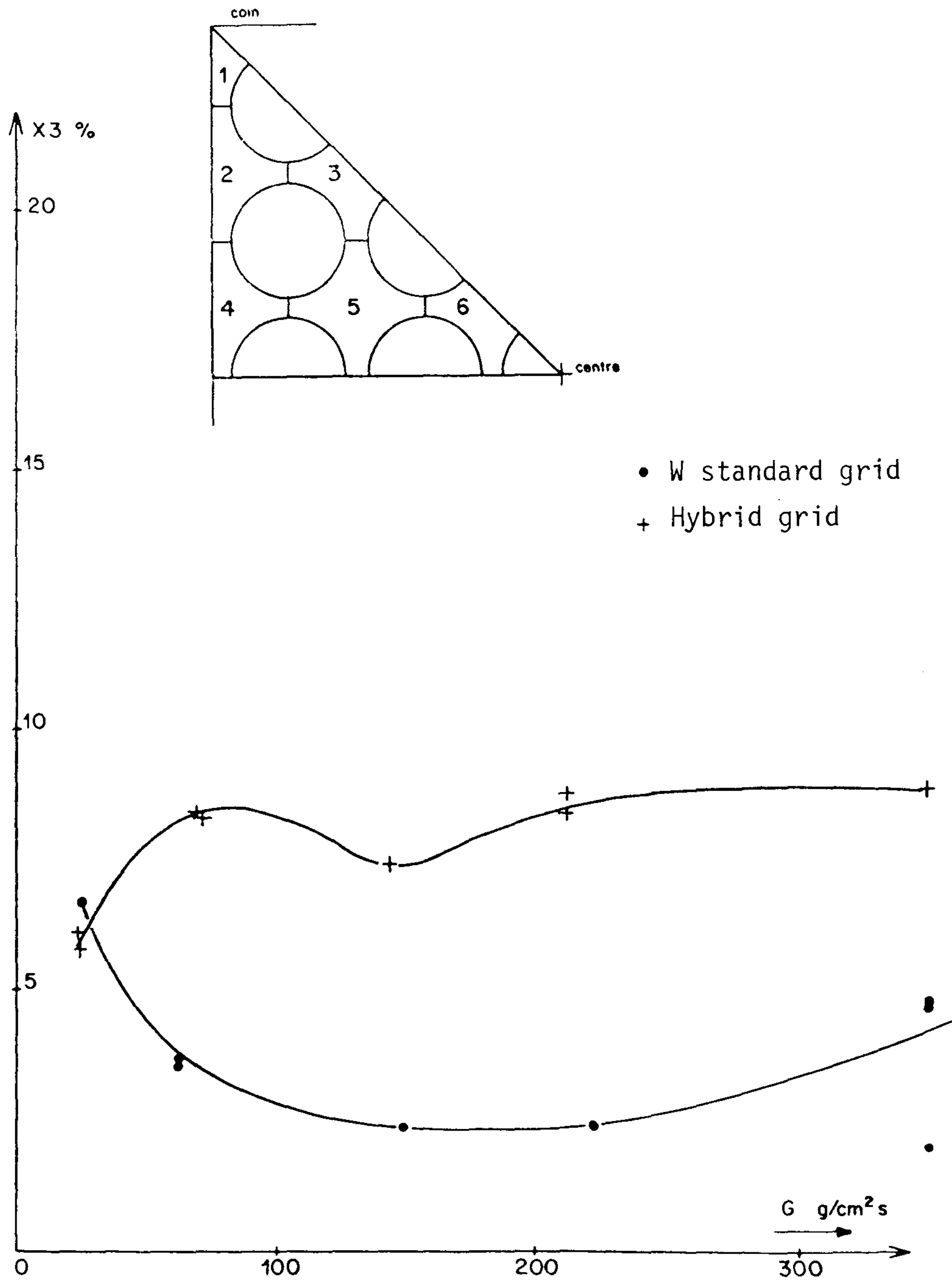


Fig. 4-8(c) Variation of the Parameter ξ in 3rd Subchannel for Two Types of Grid in OMEGA-1 Loop (Run 3000 - 4000)

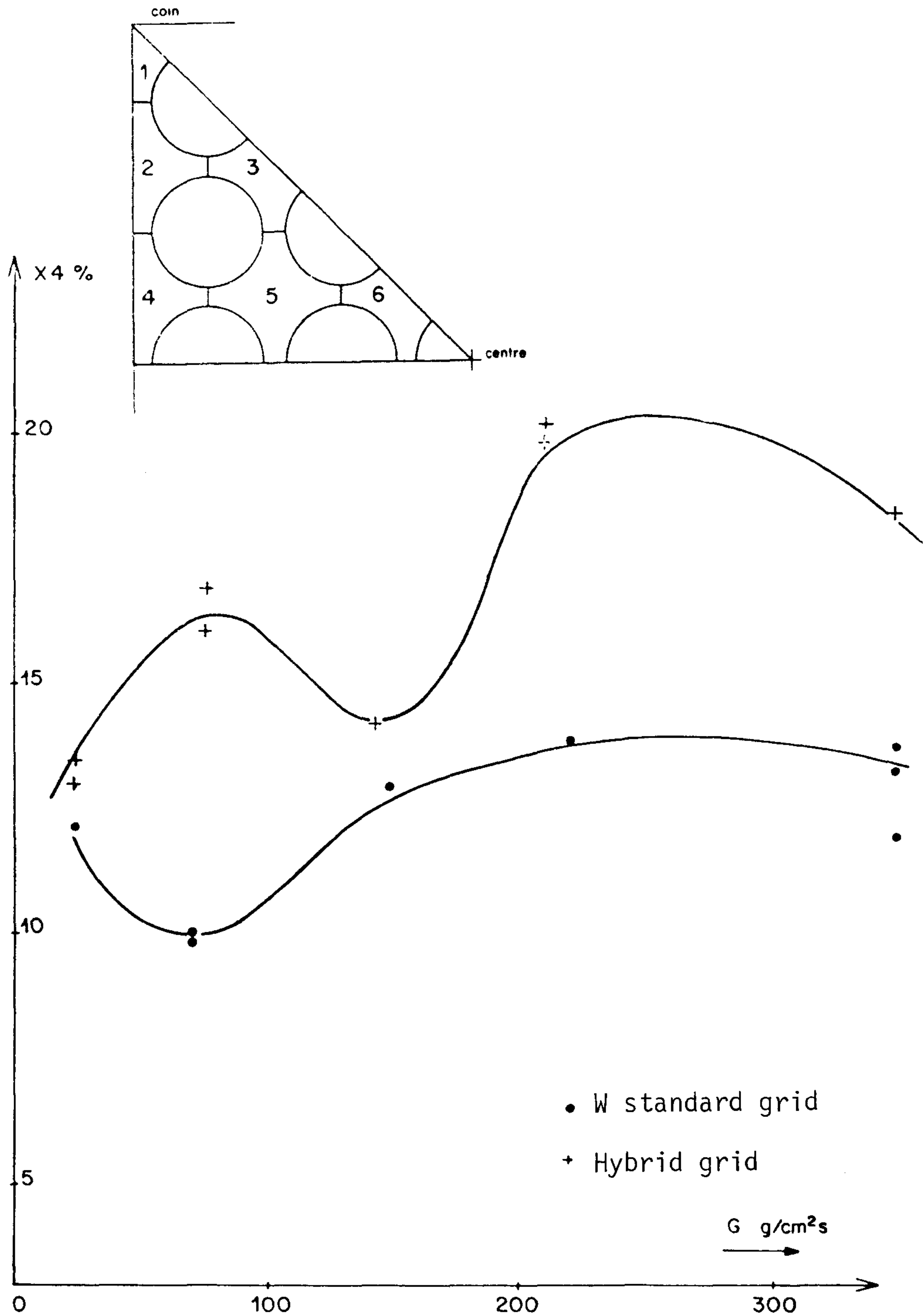


Fig. 4-8(d) Variation of the Parameter ξ in 4-th Subchannel for Two Types of Grid in OMEGA-1 Loop (Run 3000 - 4000)

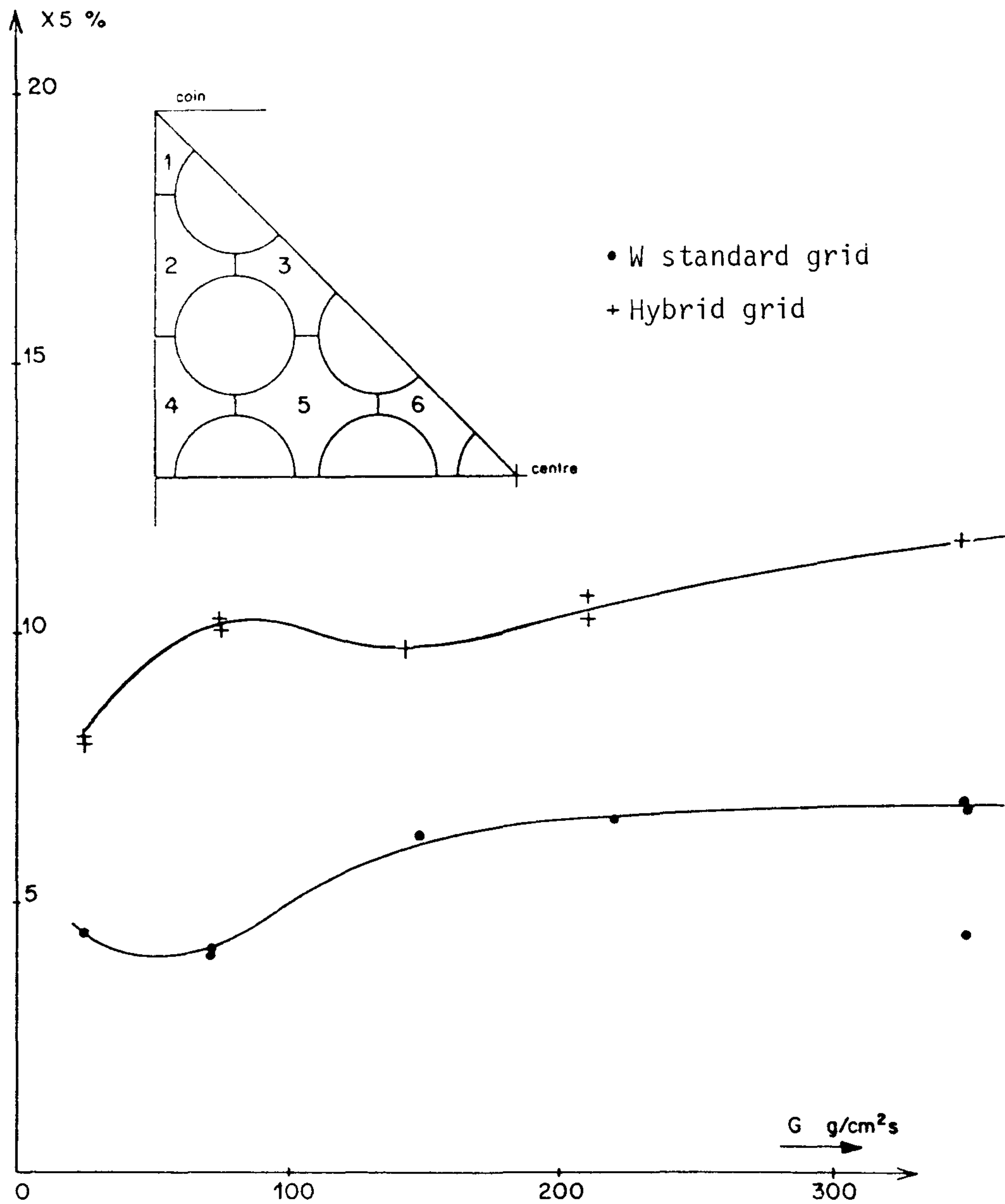


Fig. 4-8(e) Variation of the Parameter ξ in 5-th Subchannel for Two Types of Grid in OMEGA-1 Loop (Run 3000 - 4000)

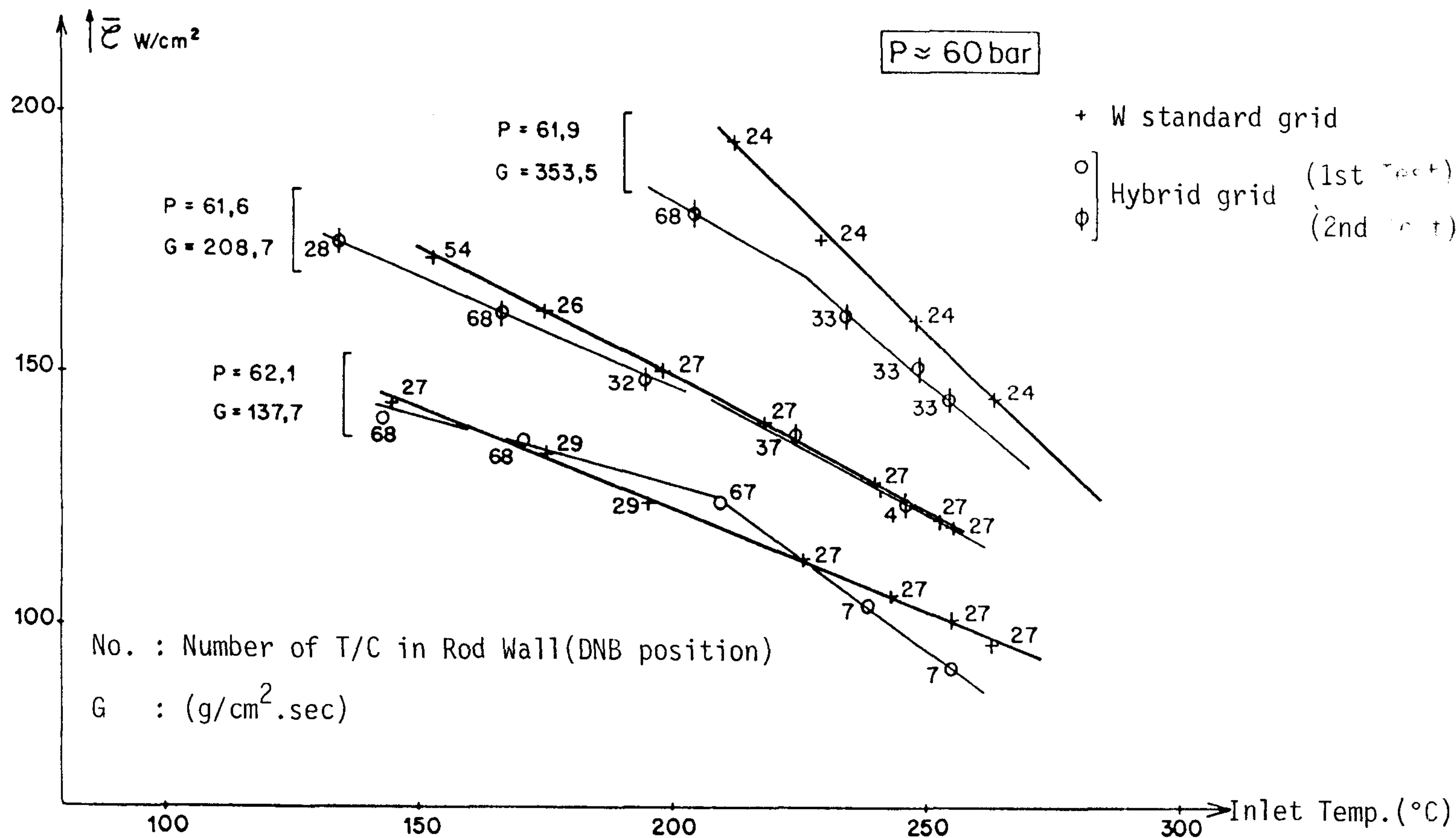


Fig. 4-9(a) Effects of Grid Type on DNB in OMEGA-1 Loop (I)

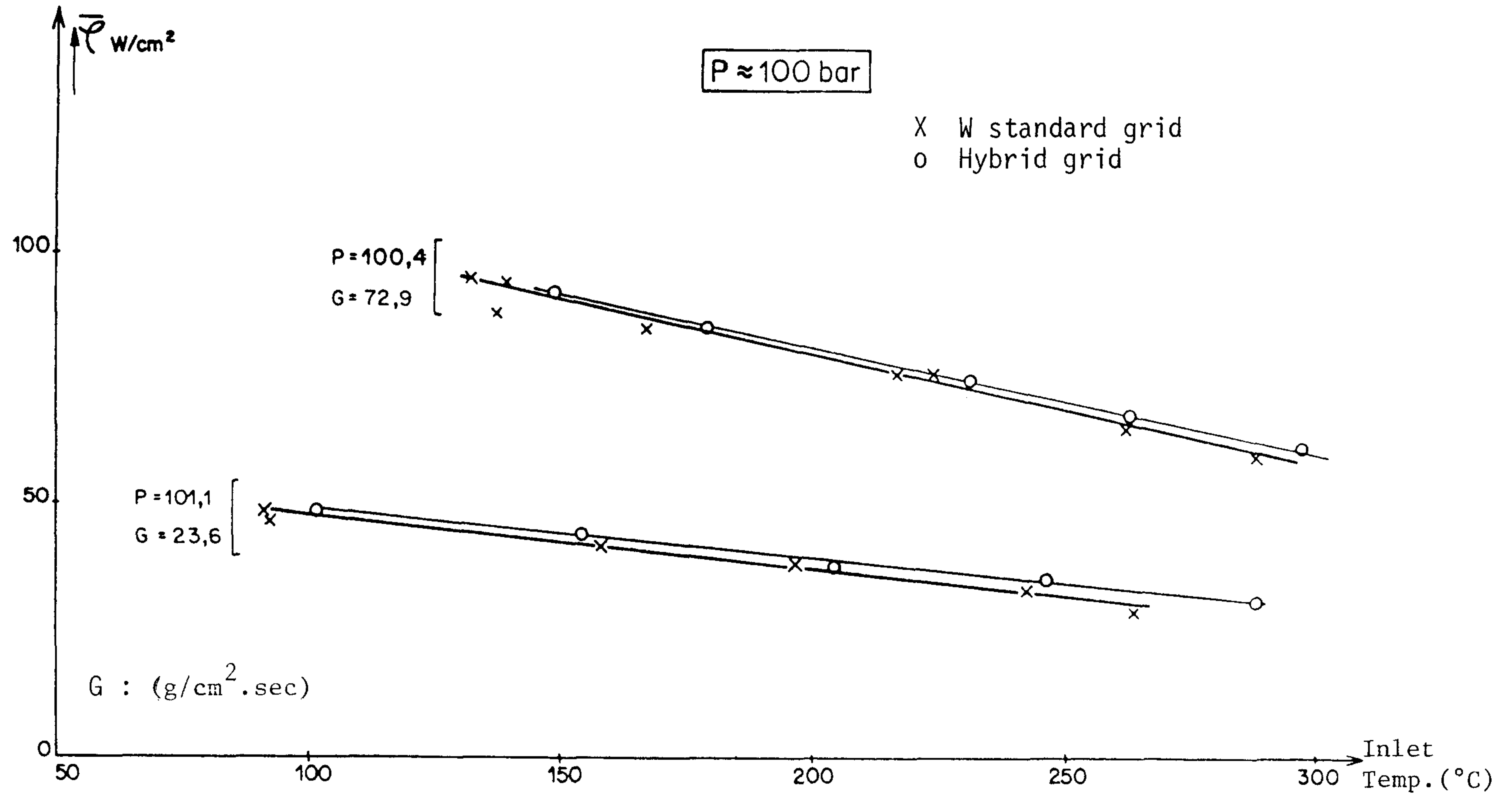


Fig. 4-9(b) Effects of Grid Type on DNB in OMEGA-1 Loop (II)

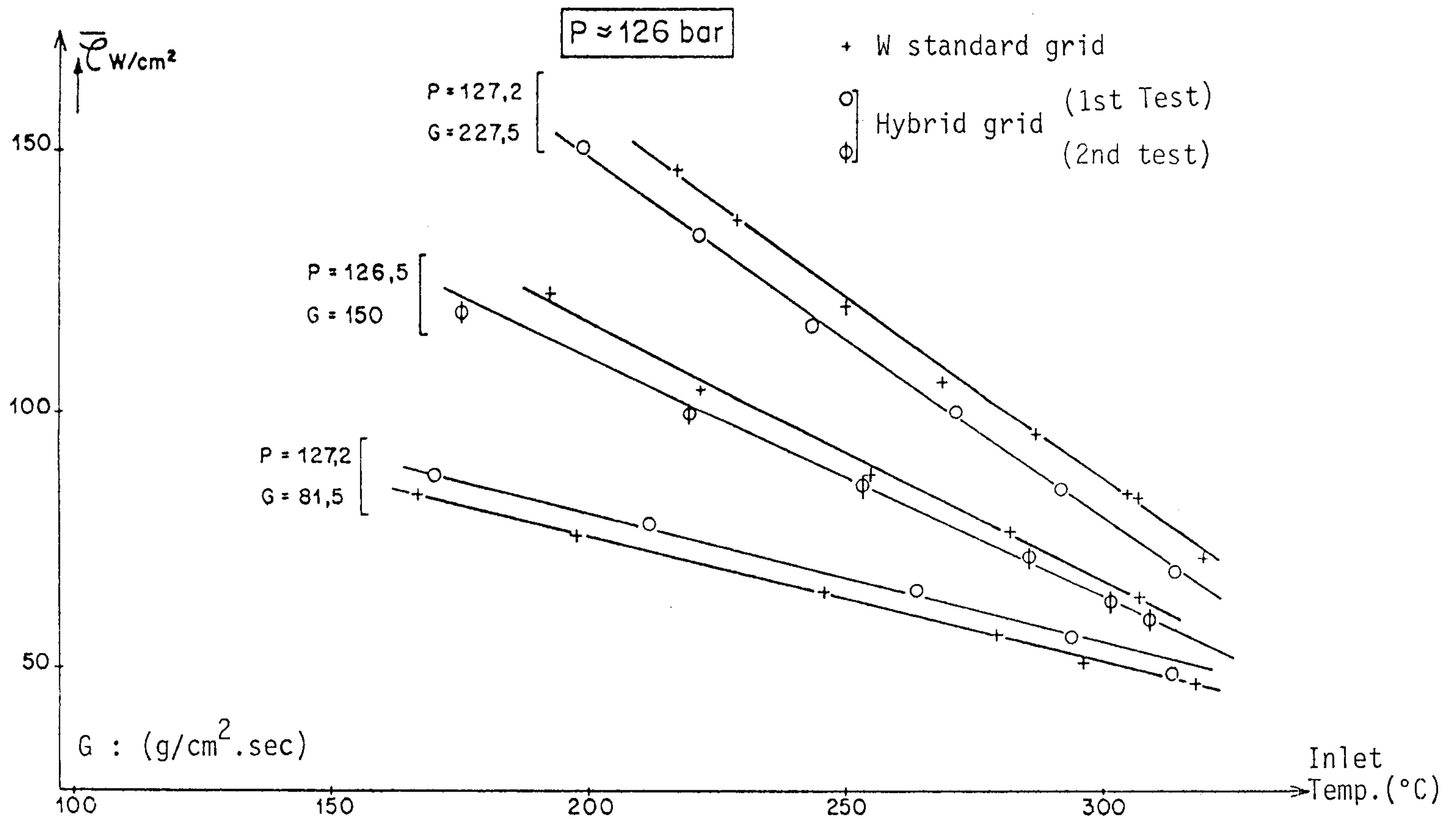


Fig. 4-9(c) Effects of Grid Type on DNB in OMEGA-1 Loop (III)

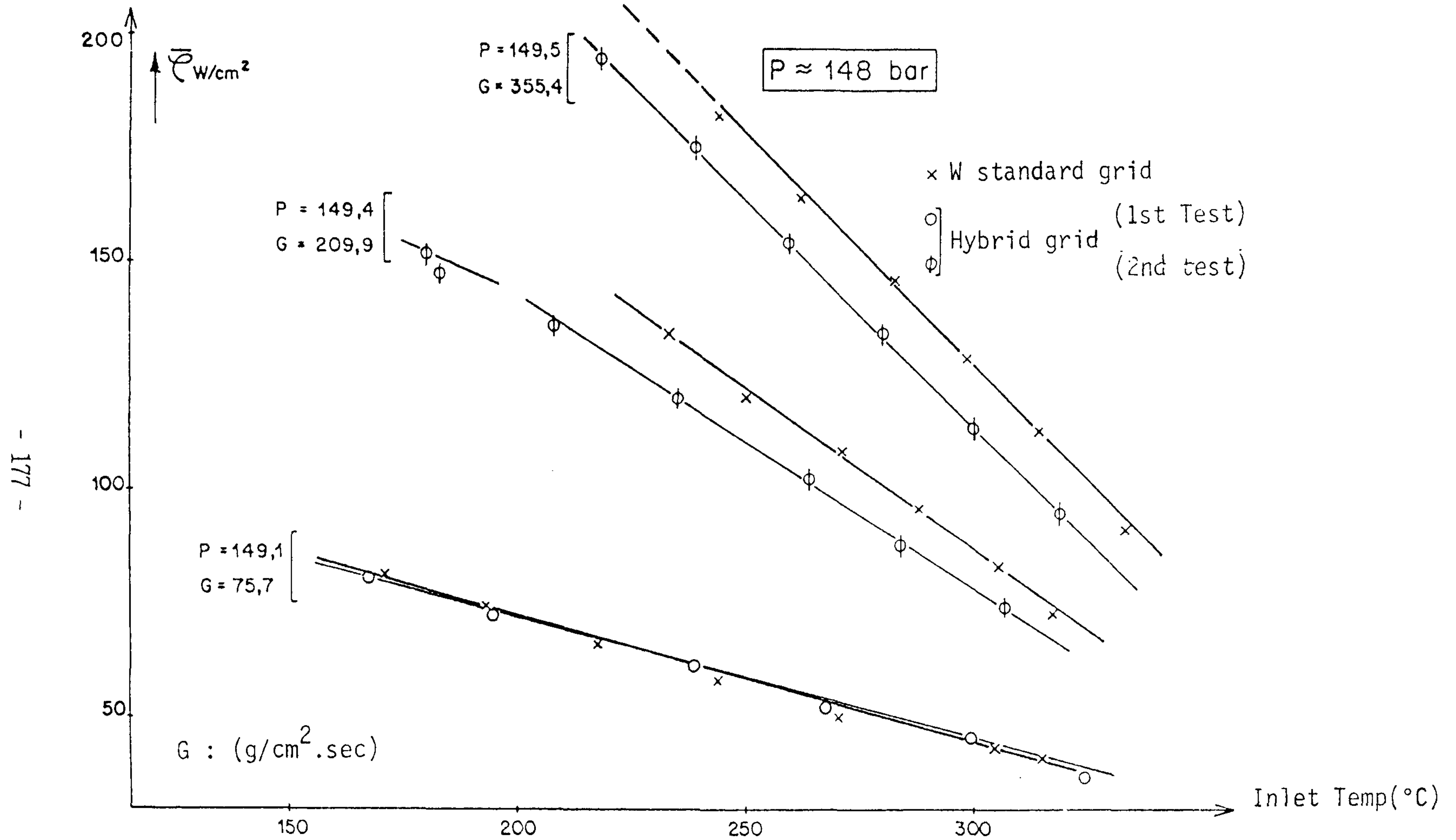


Fig. 4-9(d) Effects of Grid Type on DNB in OMEGA-1 Loop (IV)

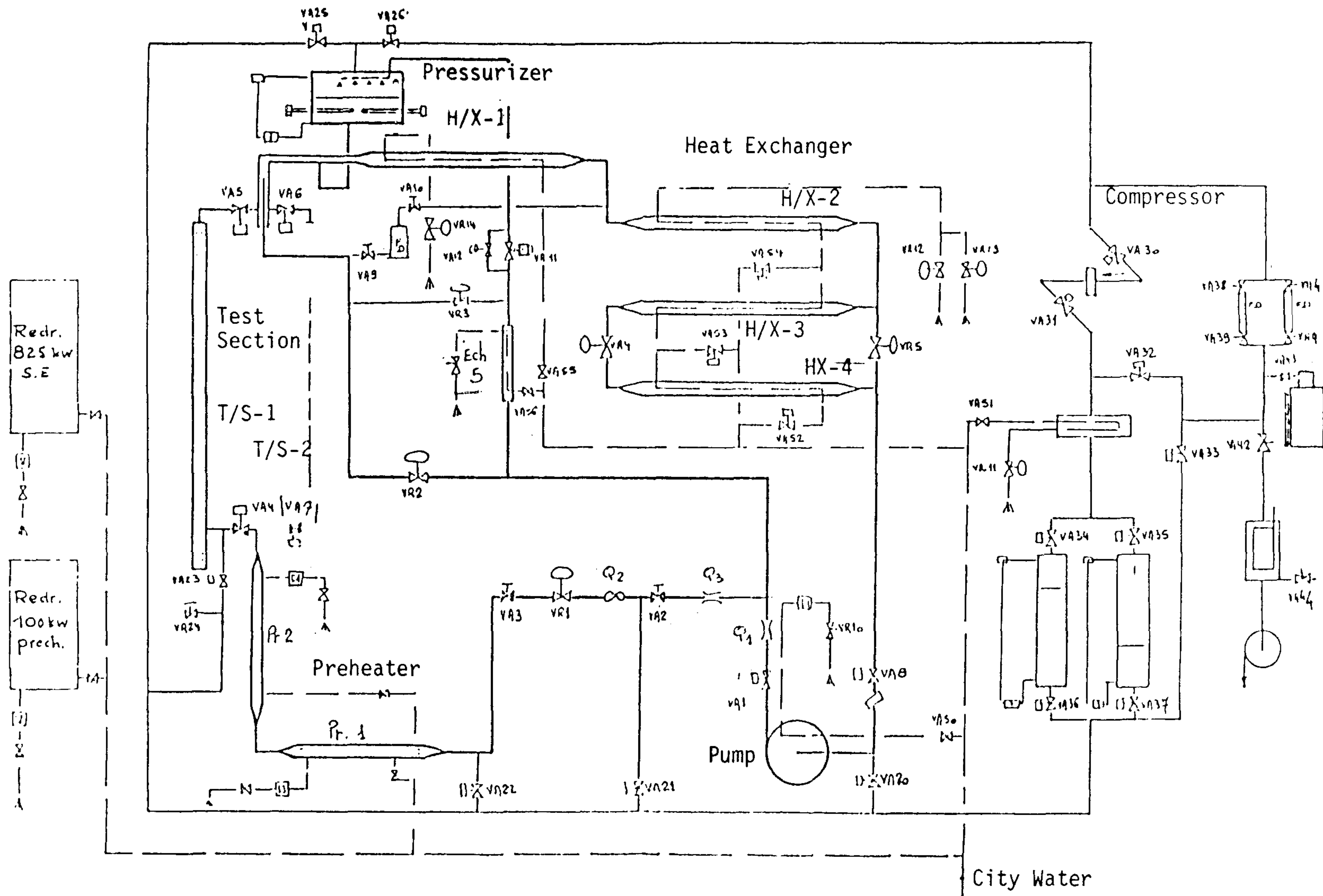
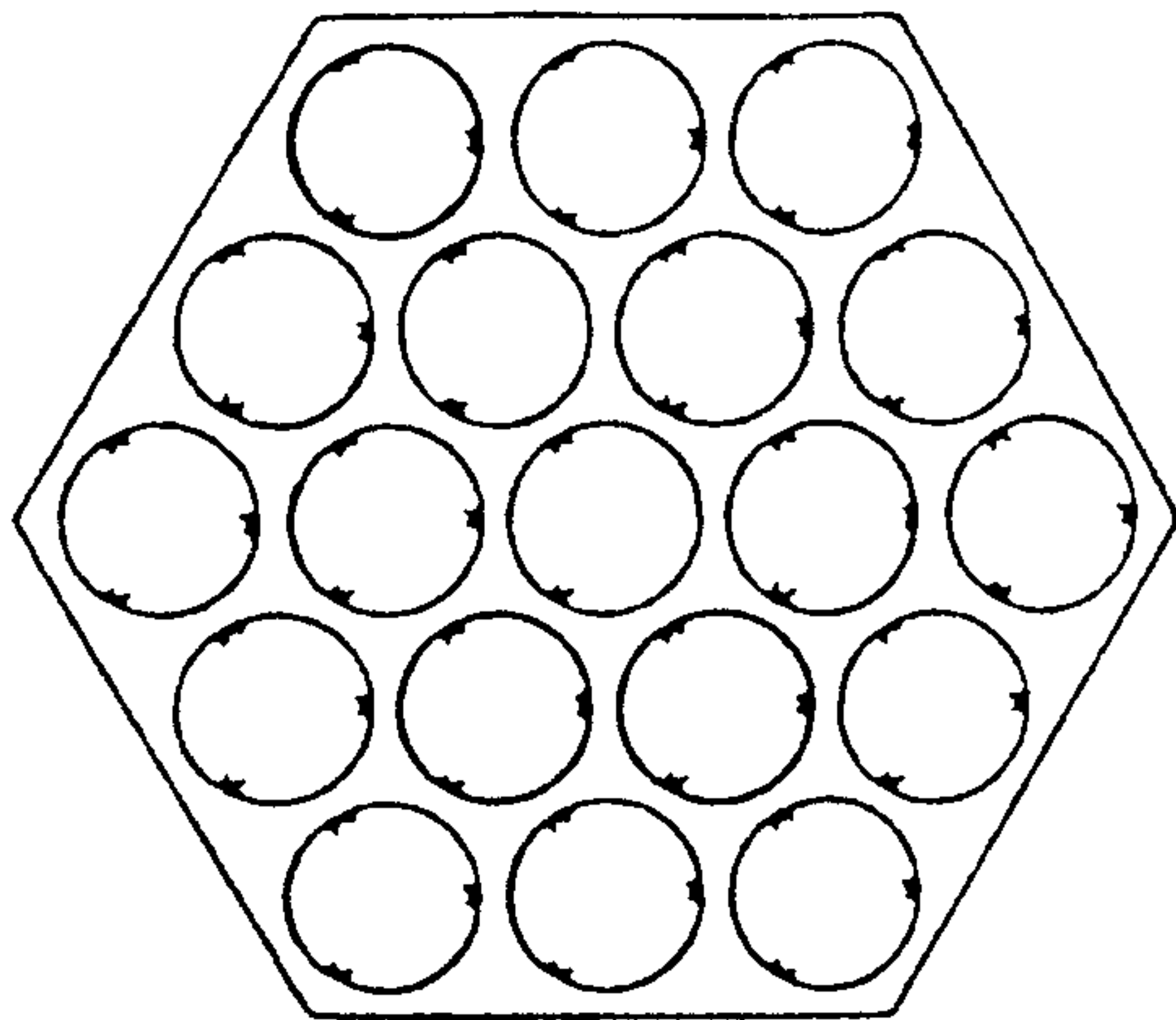
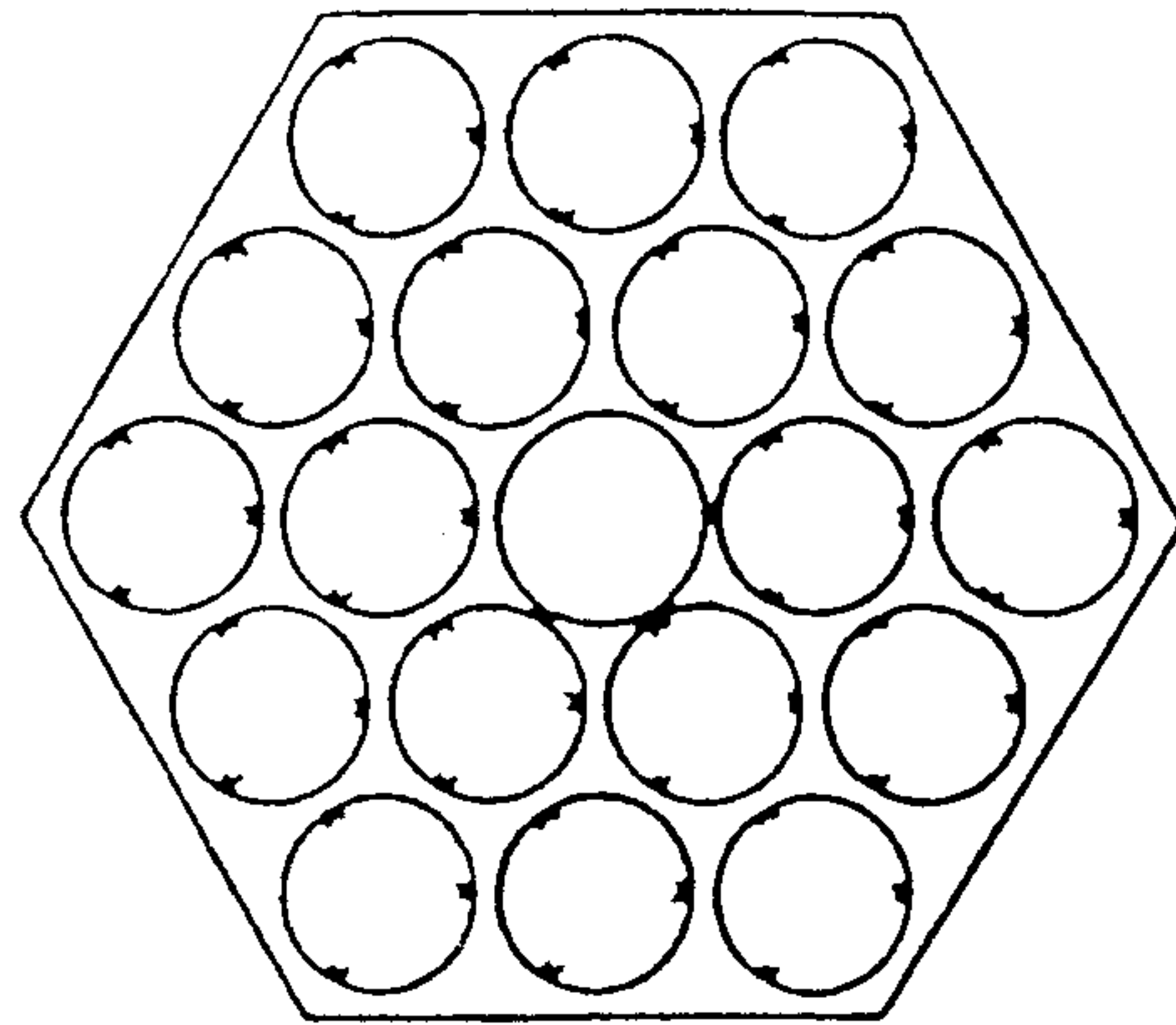


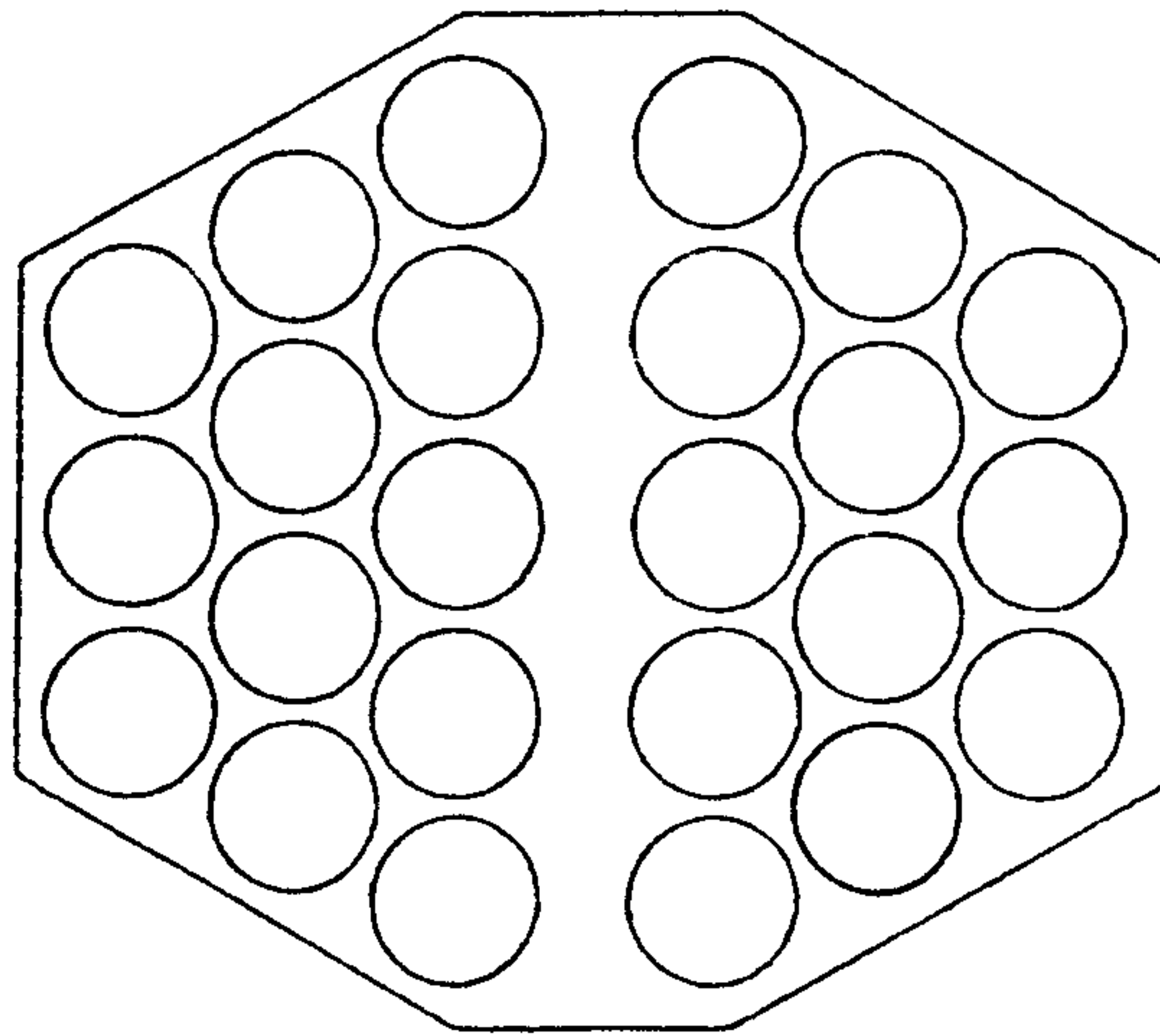
Fig. 4-10 Flow Diagram of the GRAZIELLA-2 Loop



(a) Typical cell
(19 Rods)



(b) Guide tube cell
(19 Rods)



(c) Interassembly cell
(24 Rods)

Fig. 4-11 Geometries of APWR Rod Bundle for CHF Test
(Tight & Triangular Lattice)

ϕ (W/cm²)

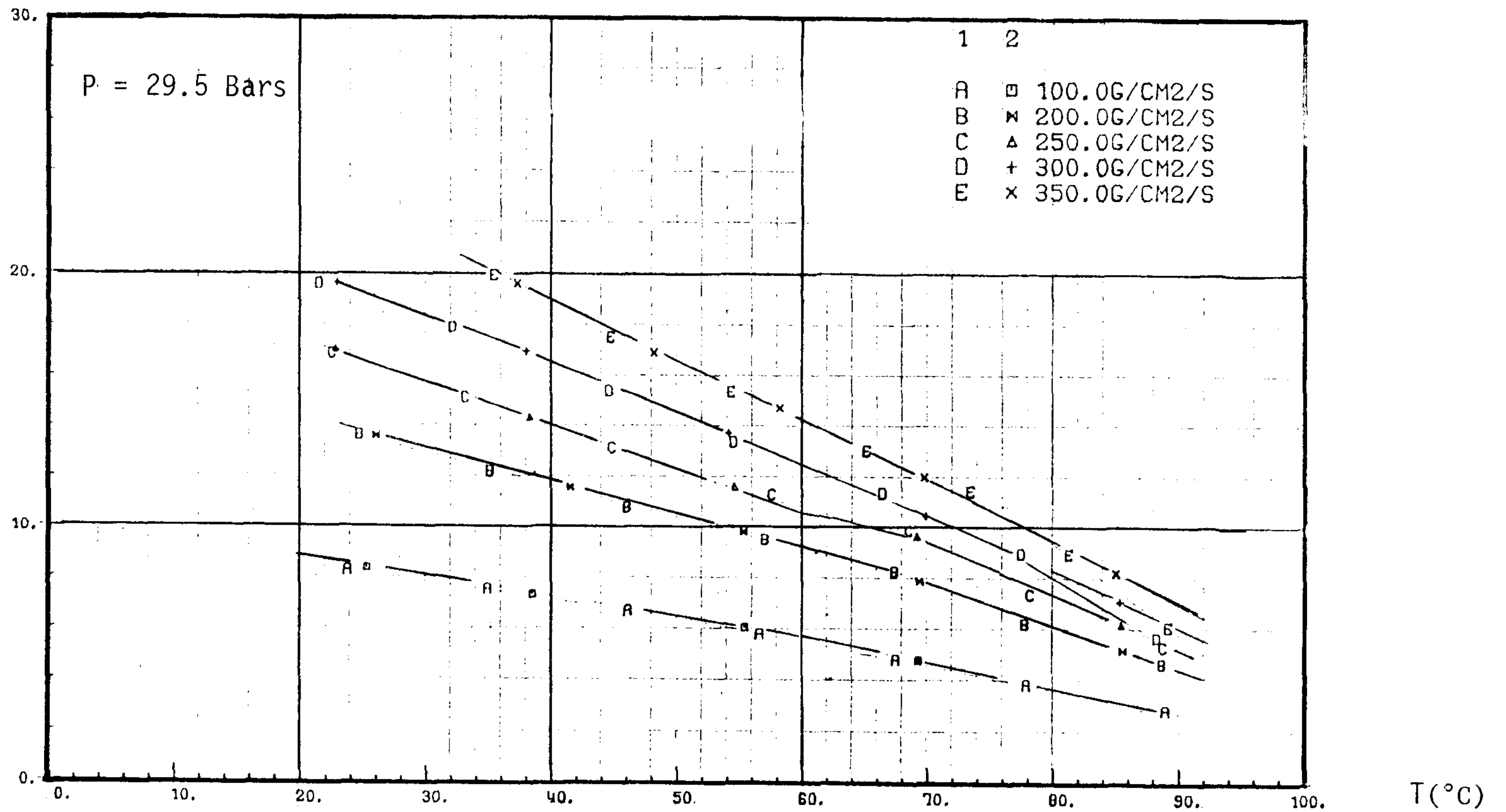


Fig. 4-12 Comparison of the Test Results for Normal(1) & Cut(2) Spacer Grids of Westinghouse Type (GRAZIELLA-1 ; Run 6300-6400)

ϕ (W/cm²)

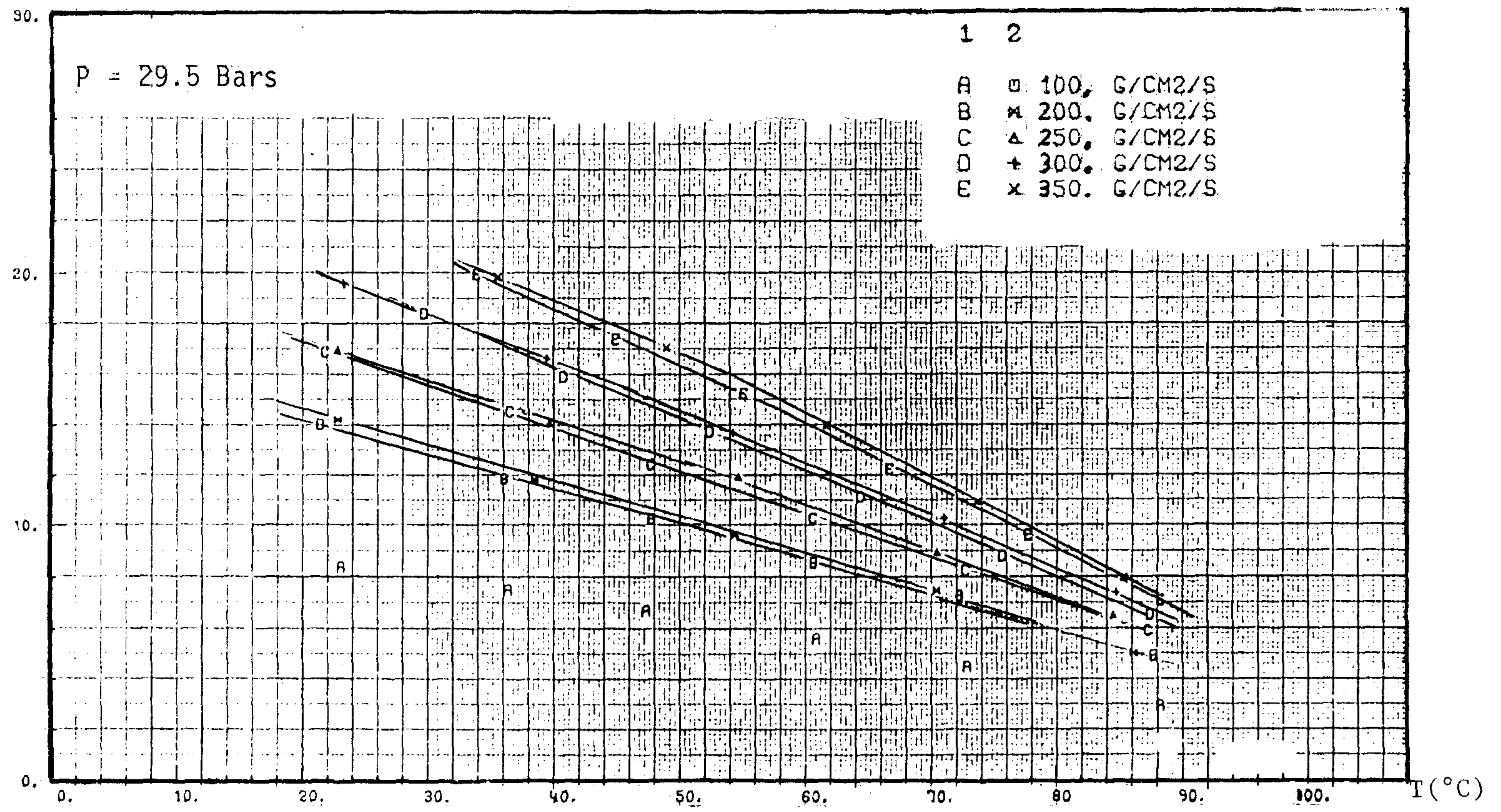


Fig. 4-13 Comparison of the Test Results for Normal(1) & Modified(2) Spacer Grids of AFA Type (GRAZIELLA-1 ; Run 6500-6600)

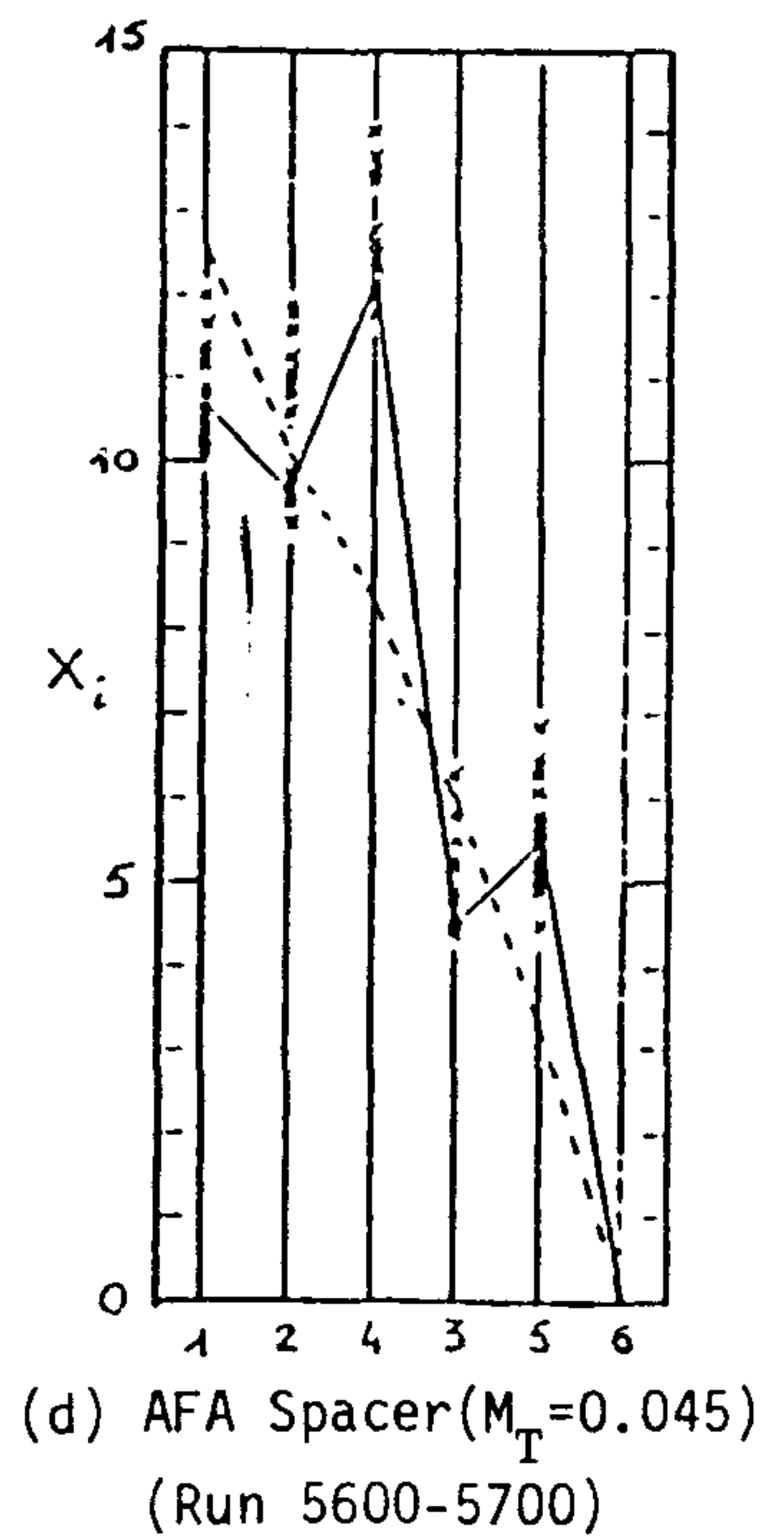
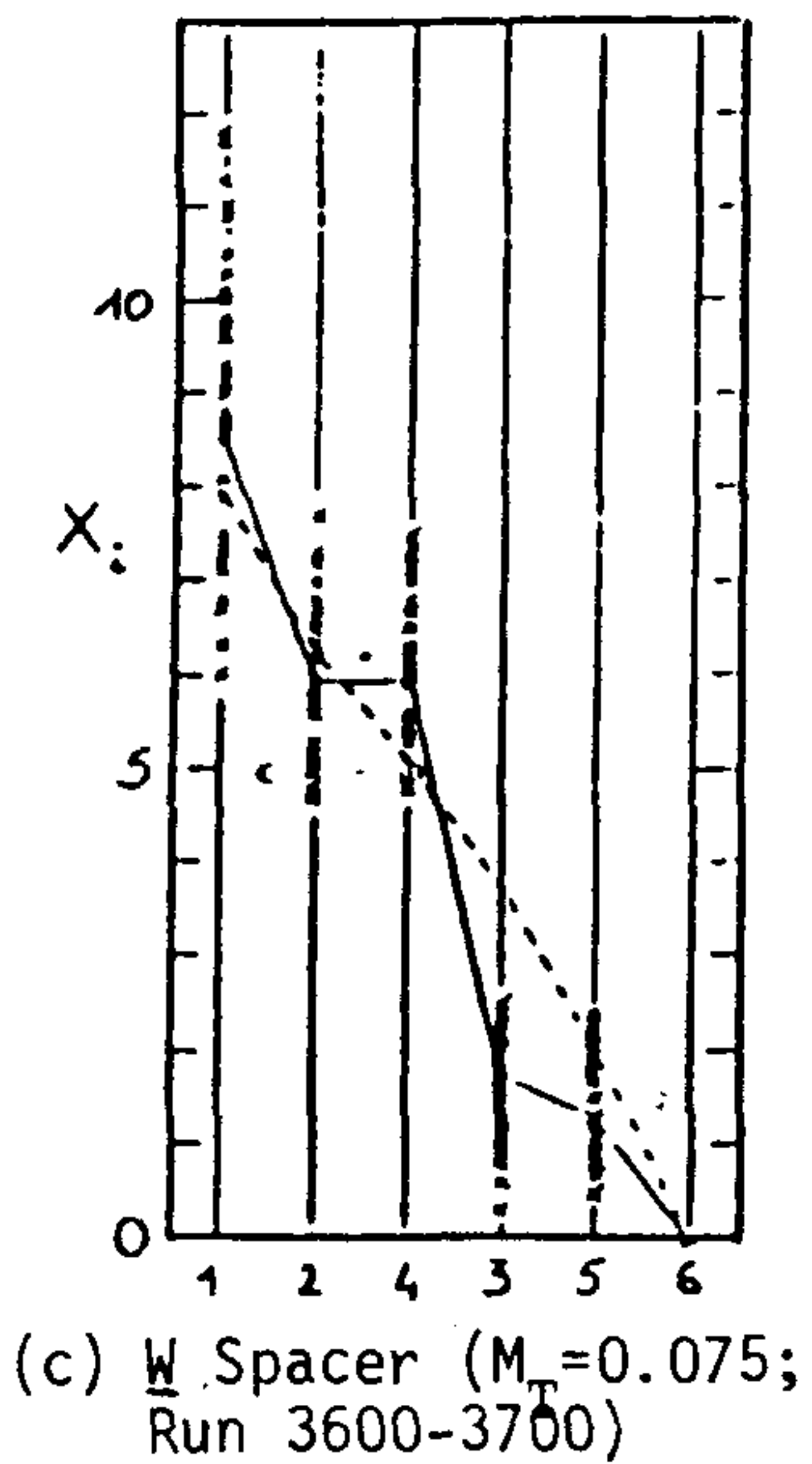
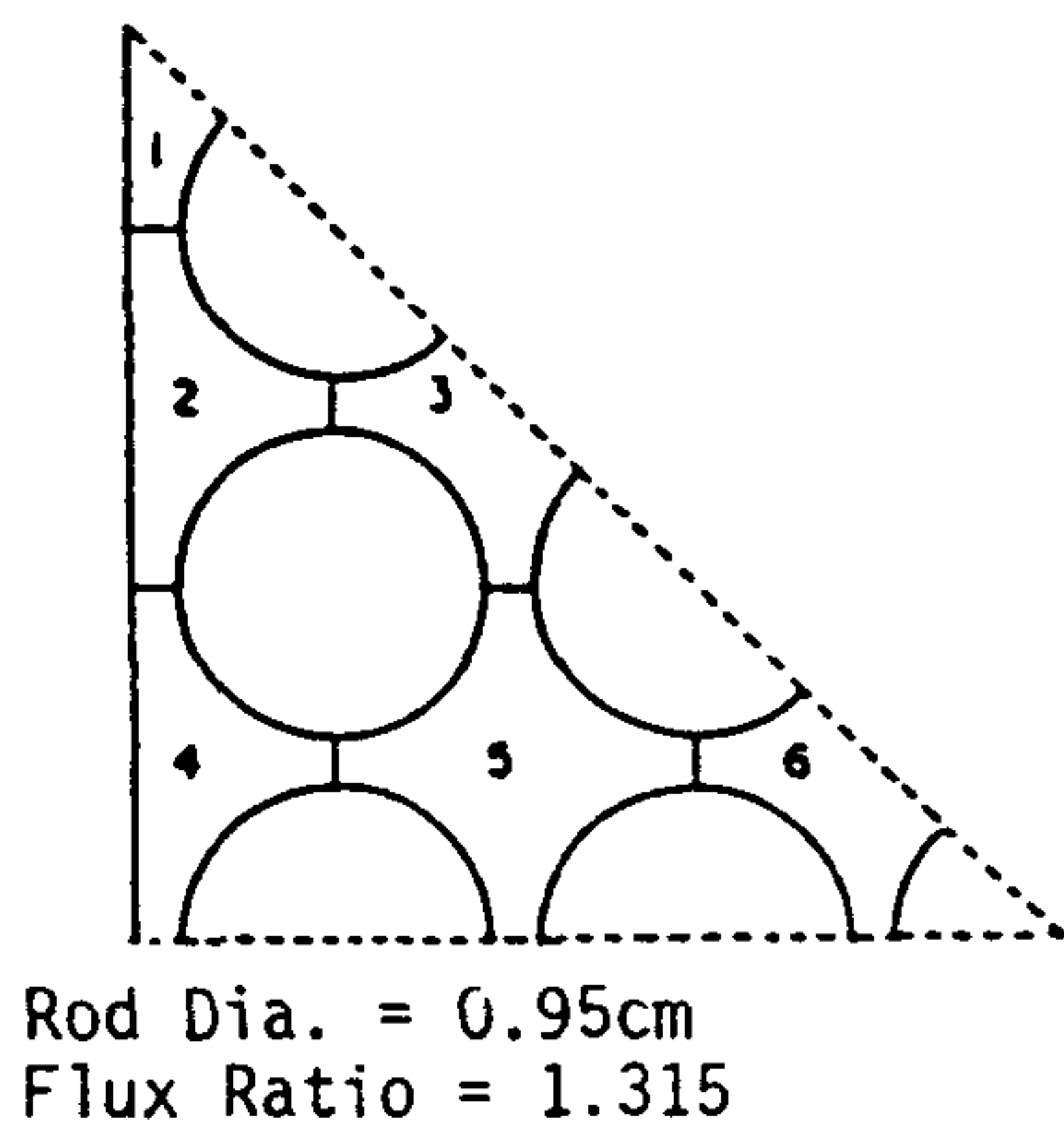
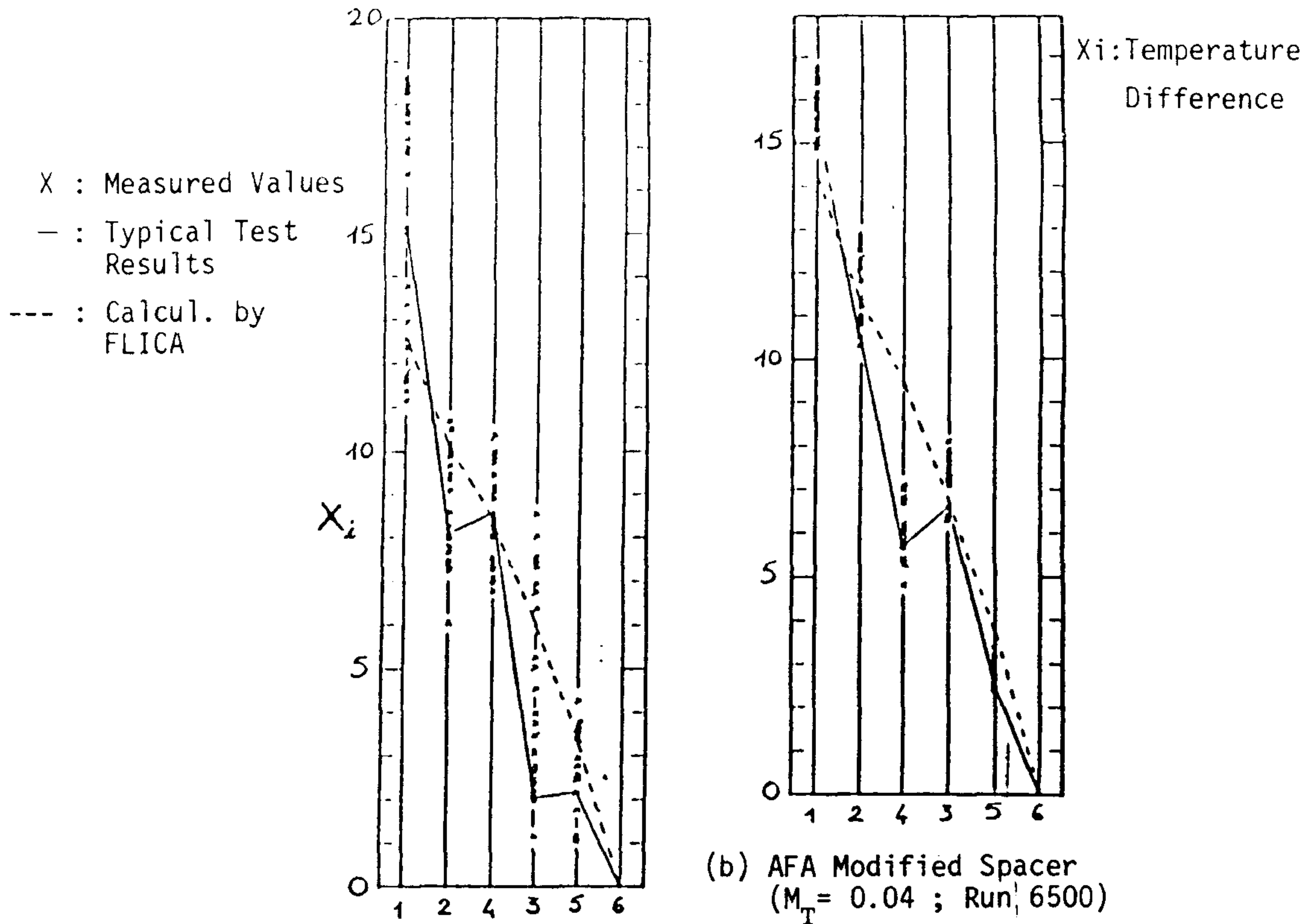


Fig. 4-14(a) Comparison of Results Measured in GRAZIELLA-1 & Calculated by FLICA Code for Typical Cell

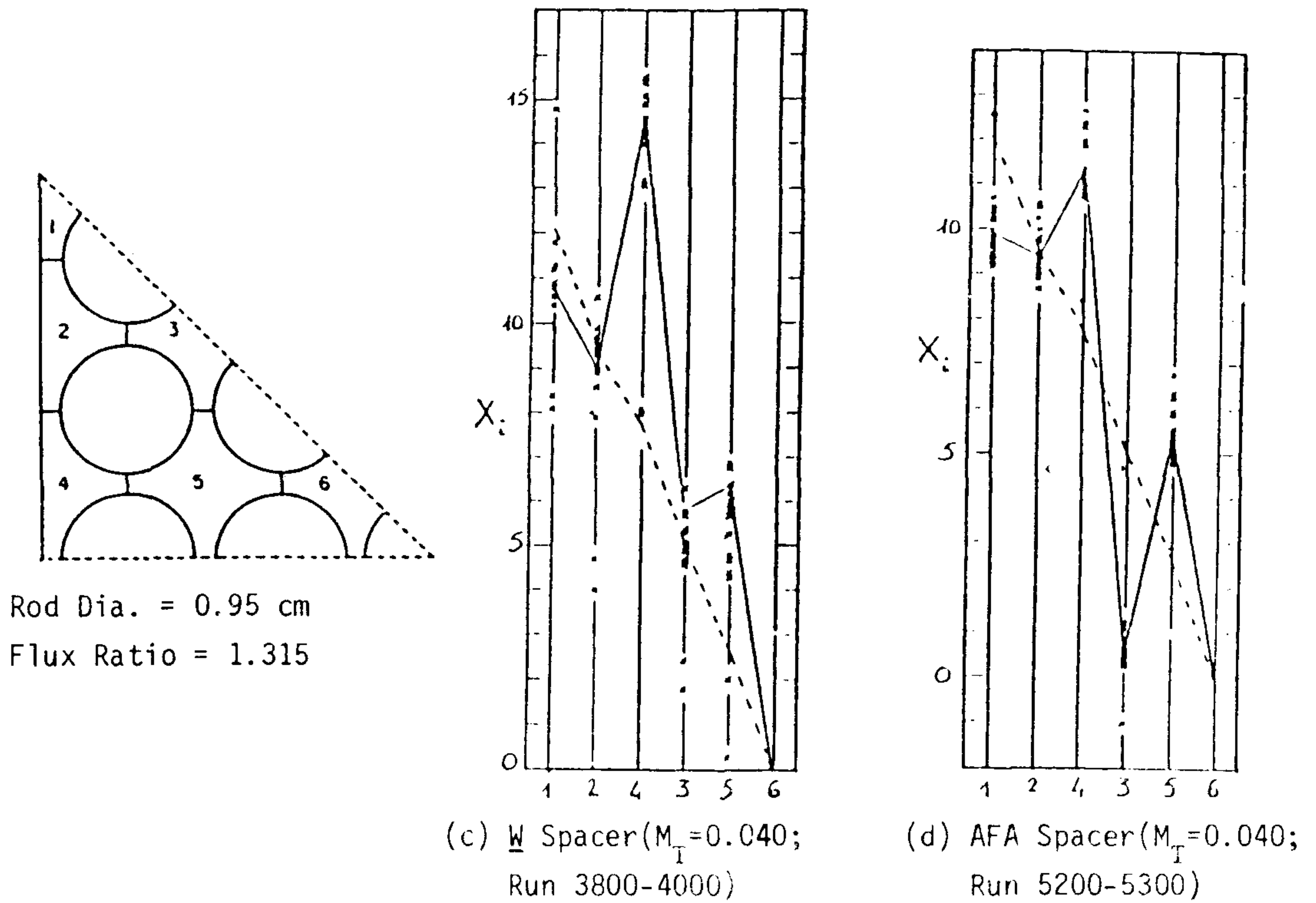
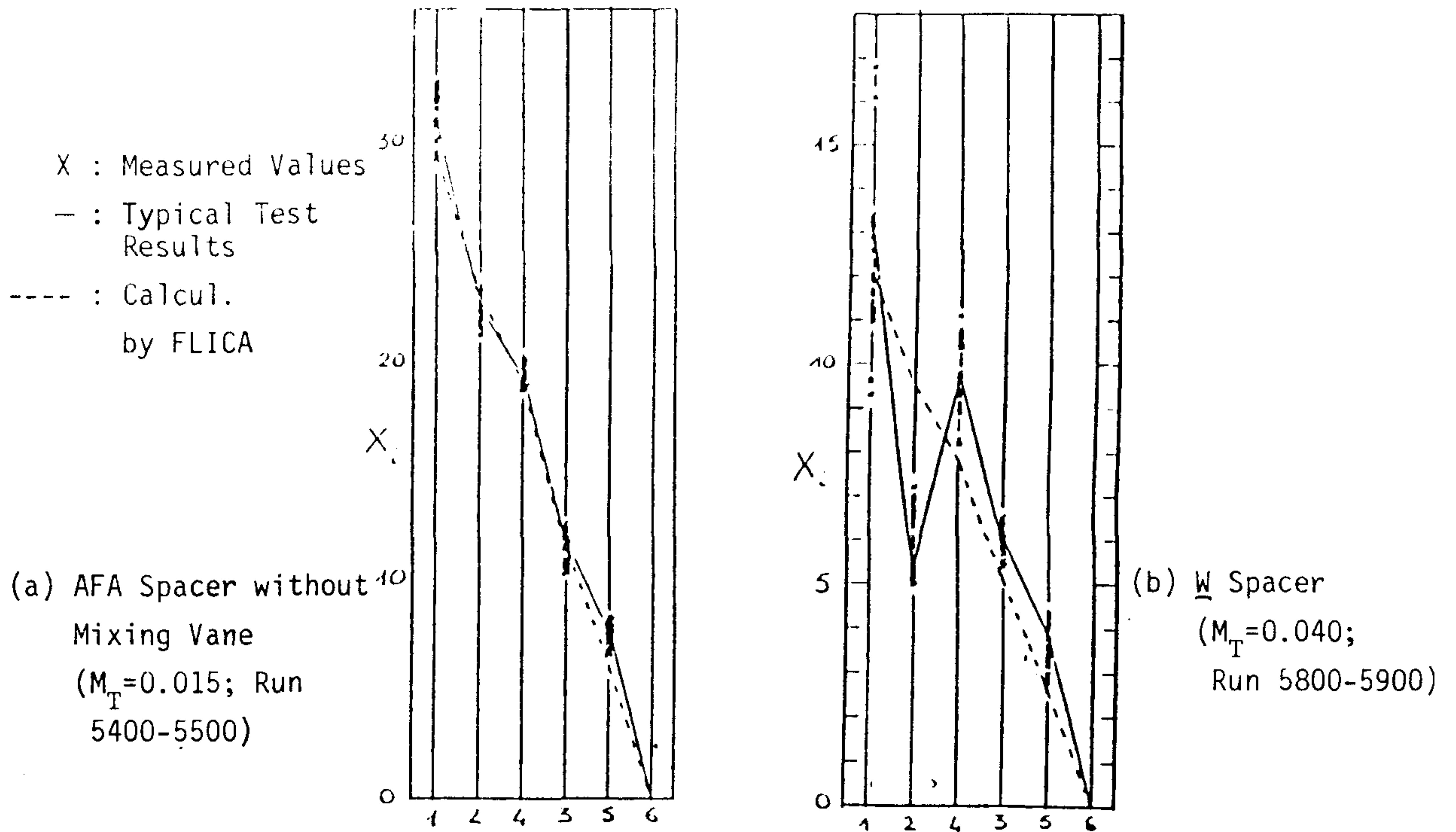


Fig. 4-14(b) Comparison of Results Measured in GRAZIELLA-1 & Calculated by FLICA Code for Guide Tube Cell

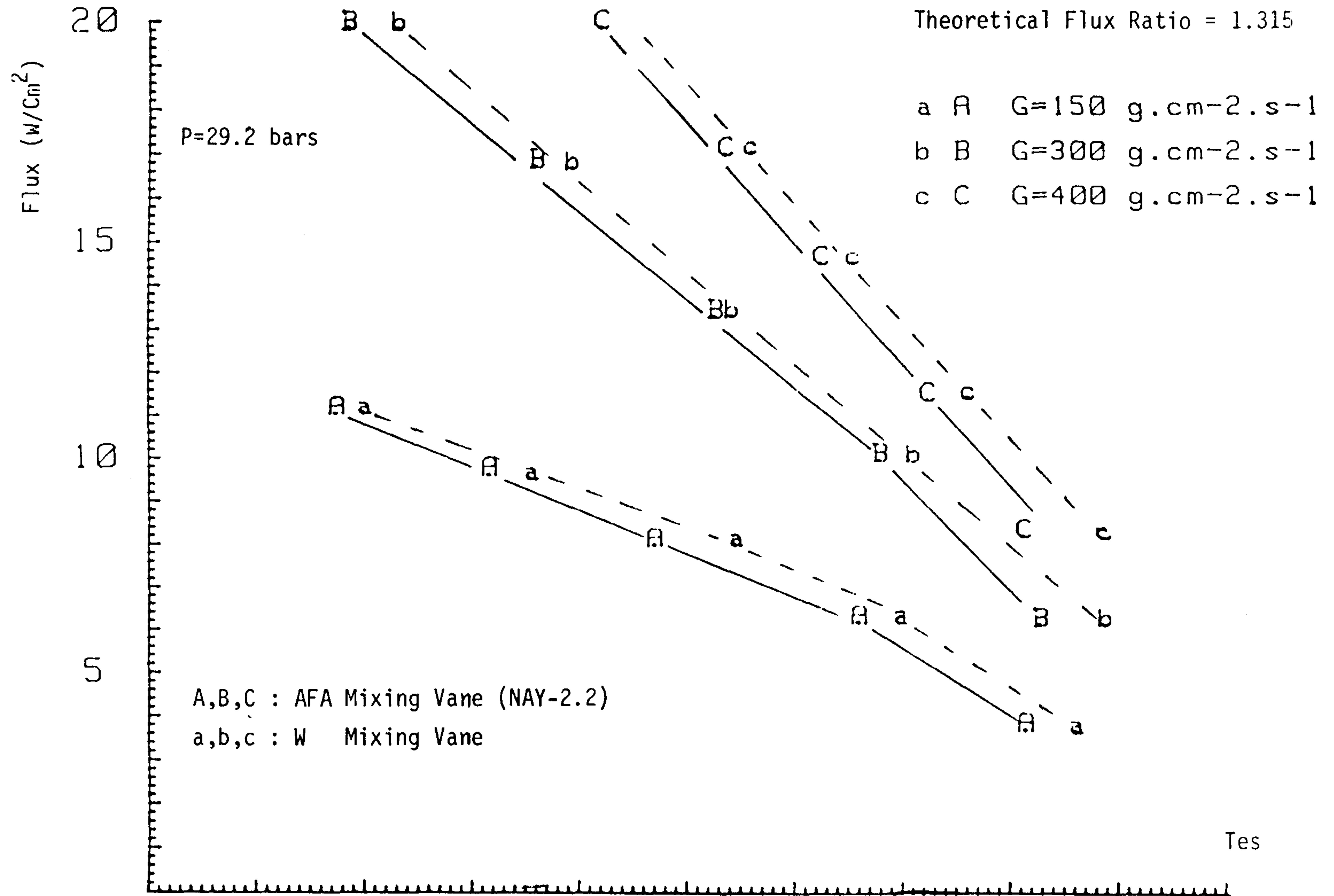
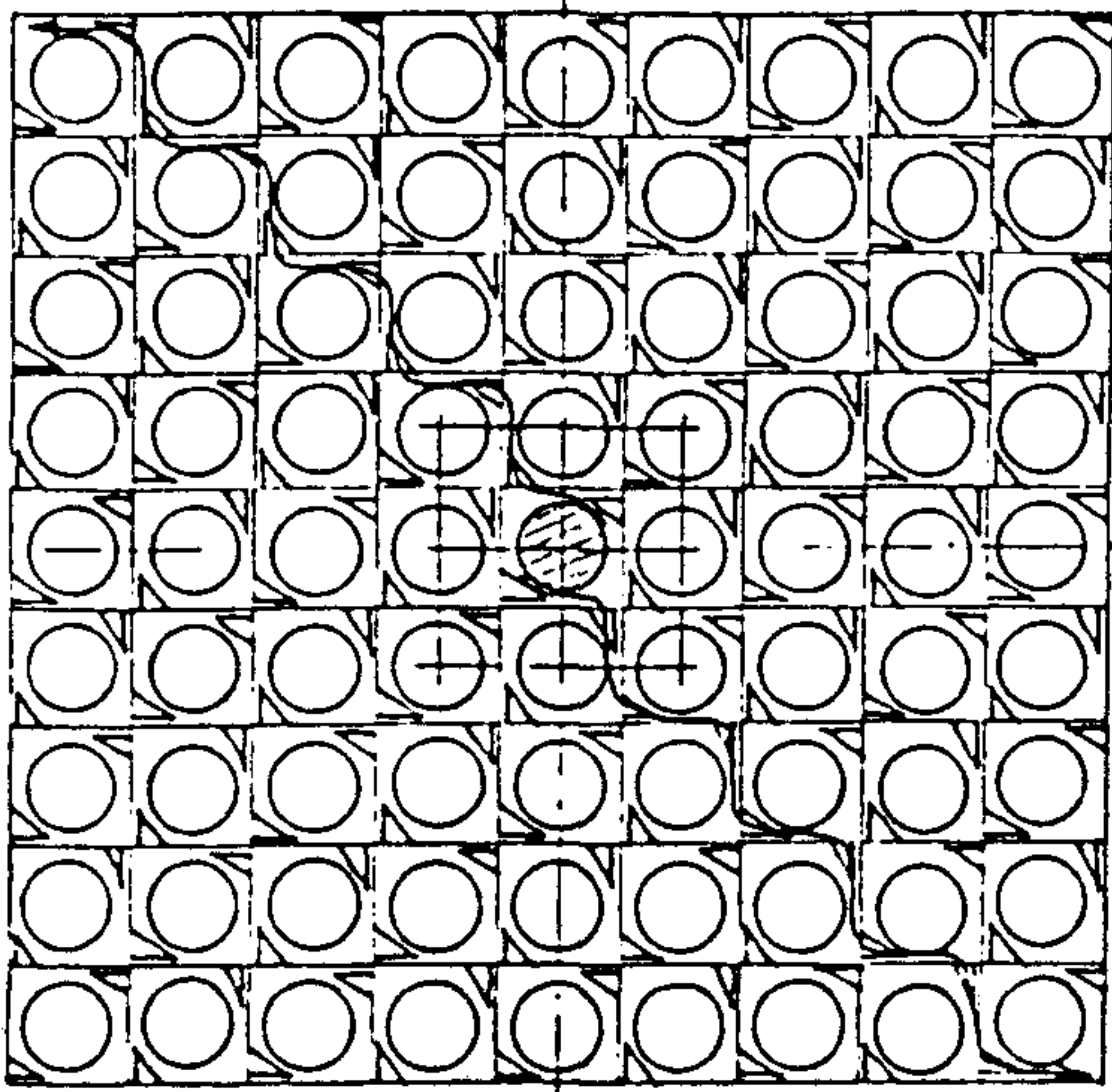
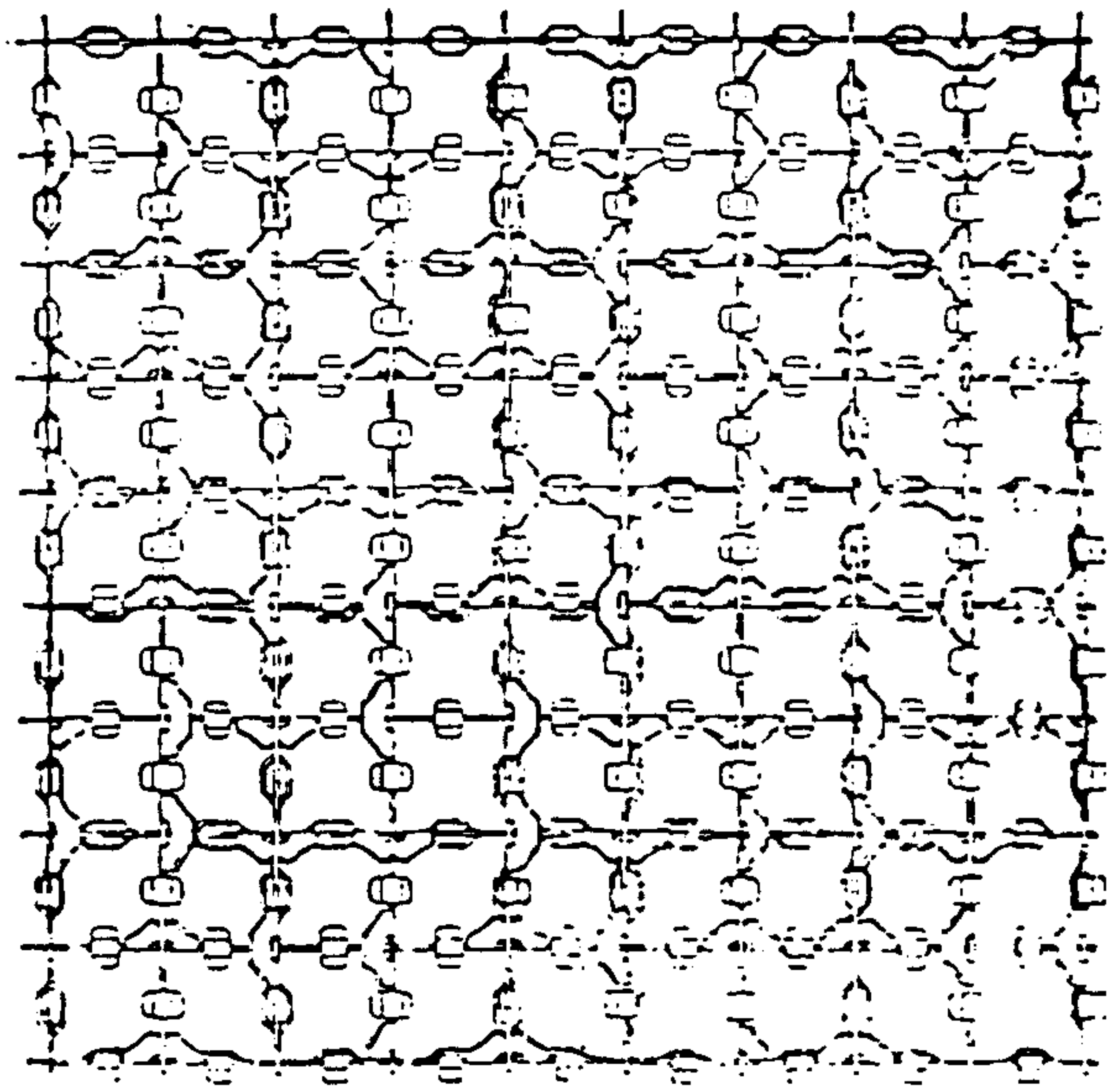


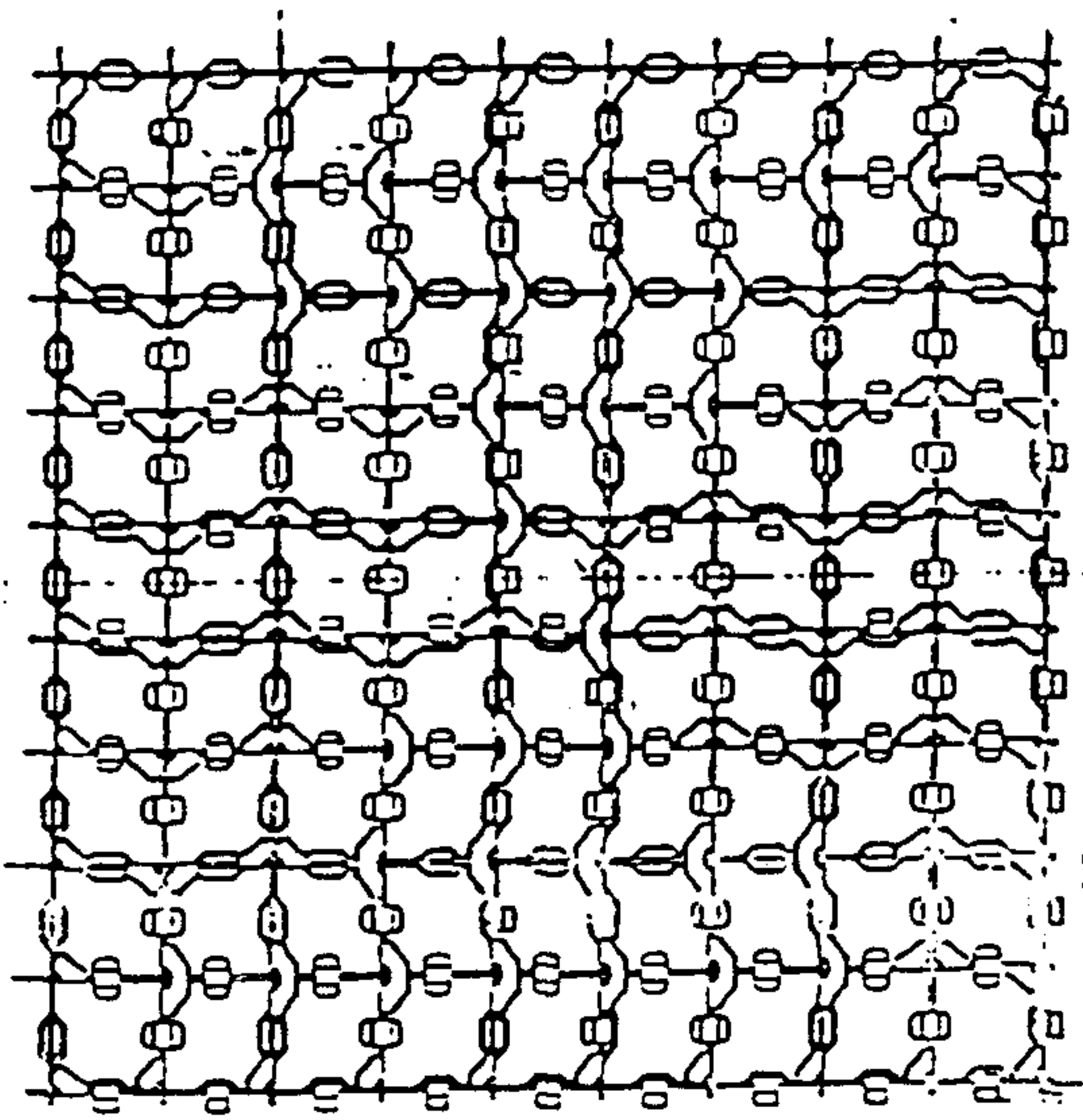
Fig. 4-15 DNB Test Results for AFA Spacer Grid with AFA- & Westinghouse-Type Mixing Vanes (GRAZIELLA-2 ; Run 6900)



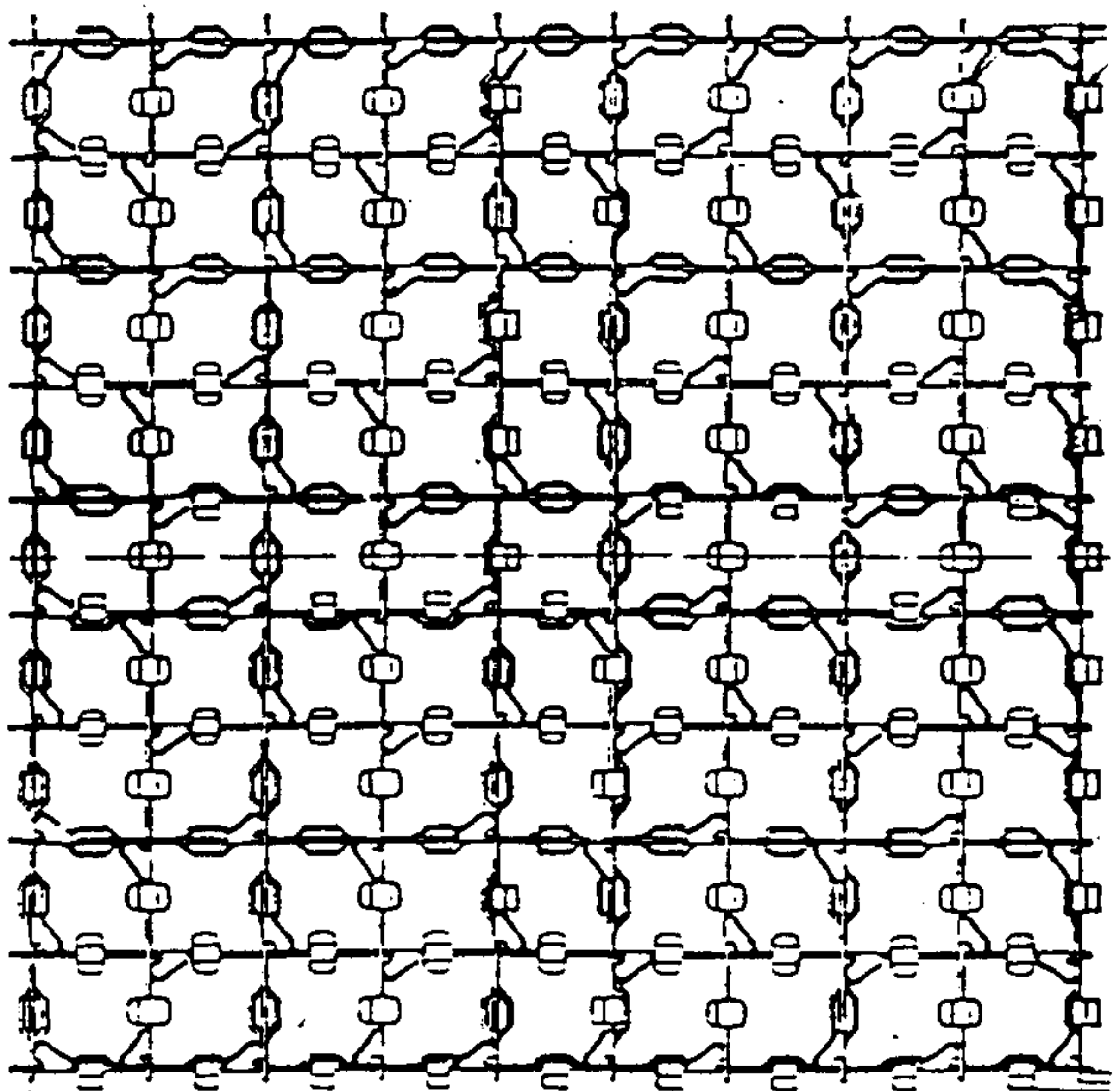
(a) Westinghouse Type



(b) AFA Type Standard



(c) AFA Type (SWEEP-1)



(d) AFA Type (NAY-1)

Fig. 4-16 Four Types of Spacer Grid for Mixing Test in HYDROMEL Loop

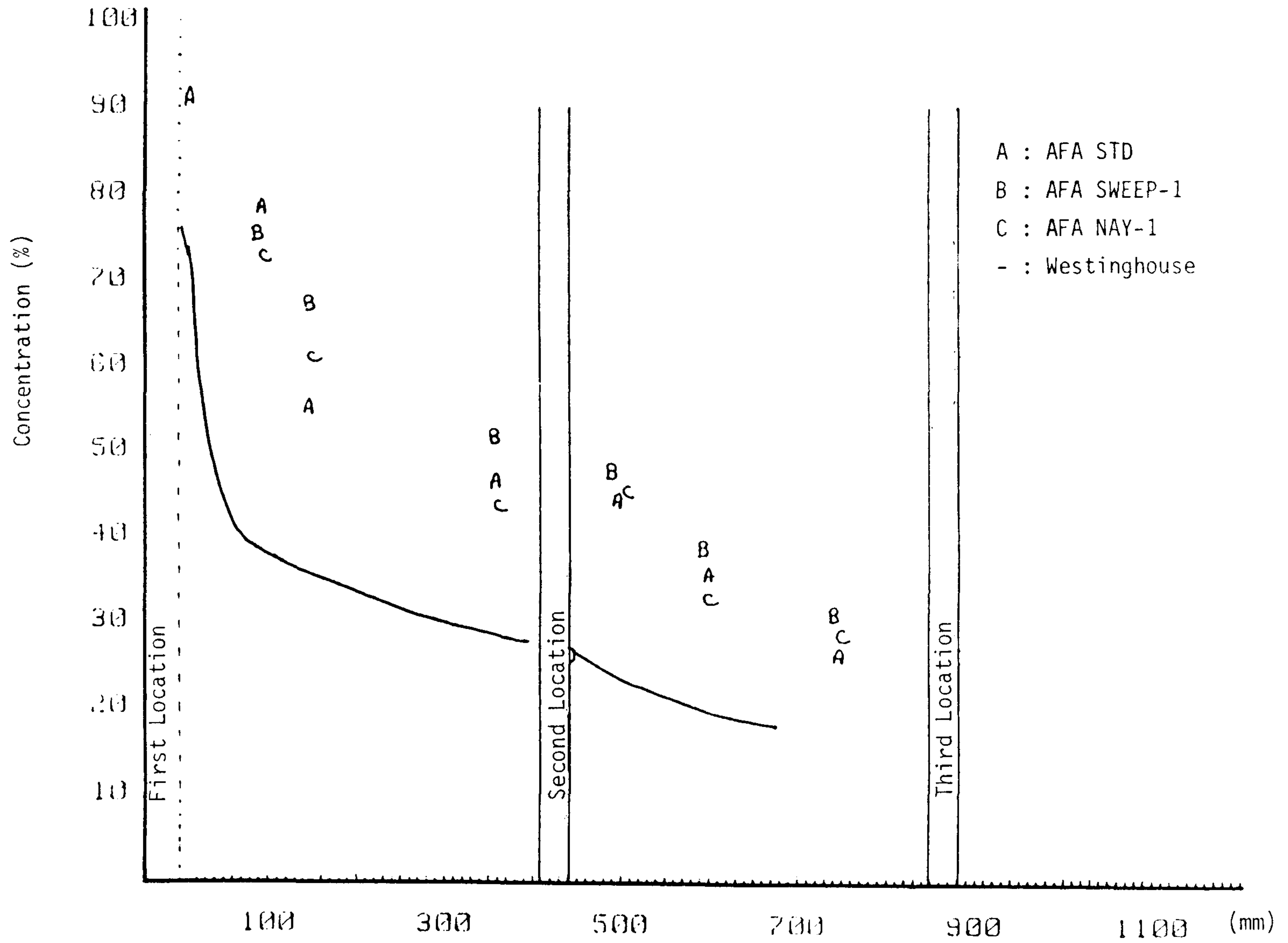
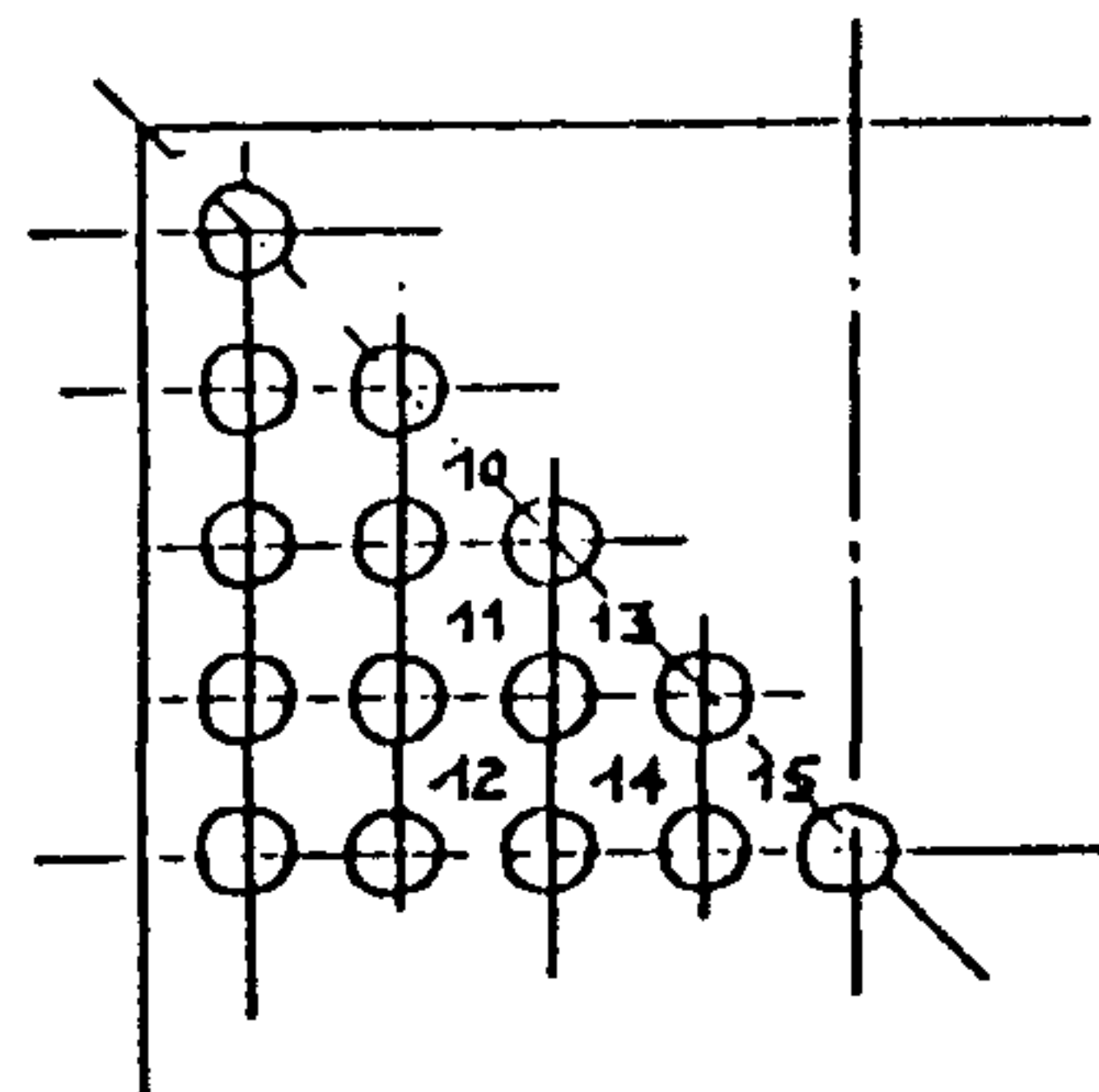


Fig. 4-17 Mixing Test Results for 4 Types of Spacer Grid in HYDROMEL



$K_T = K_1 \cdot \exp(-K_2(Z - Z_G))$
 Z_G : Location of Spacer Grid
 ---- : Case of $K_T = 0.075$
 ——— : Reconstruction by FLICA

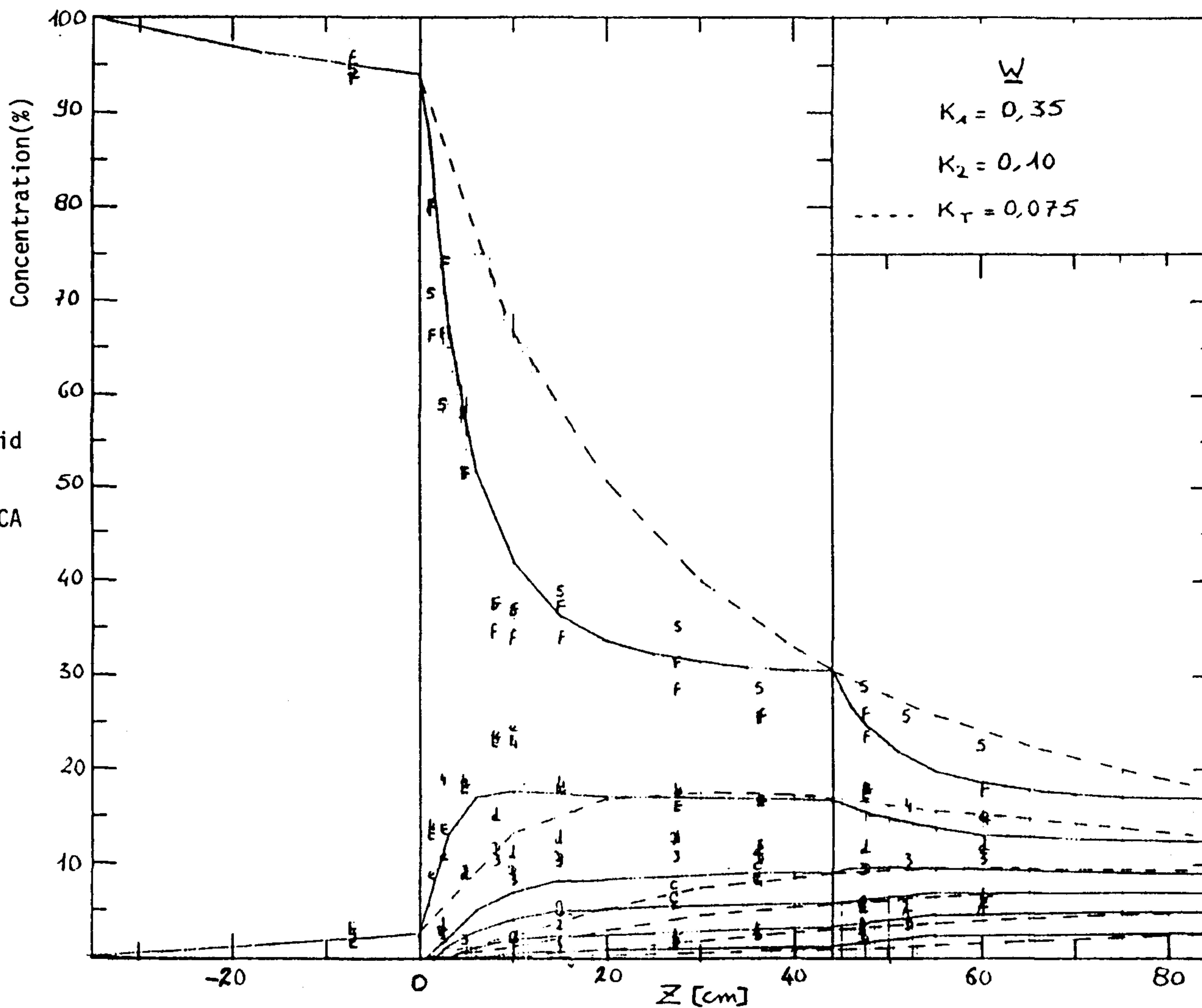
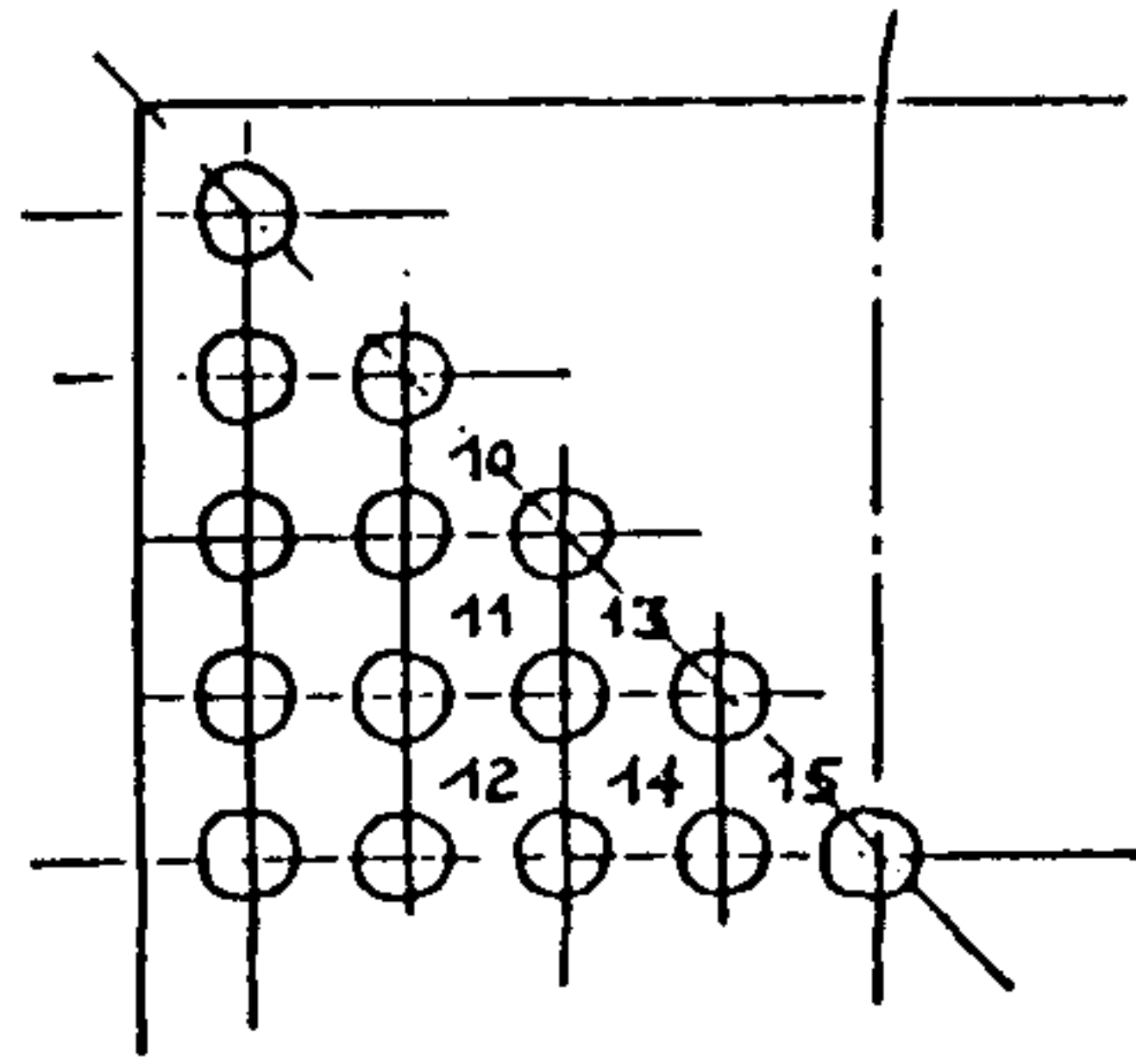


Fig. 4-18 Profile of Concentration Measured in HYDROMEL & its Reconstruction by FLICA Code for W-Type Standard Spacer Grid



--- : Case of $K_T=0.045$
 — : Reconstruction by FLICA

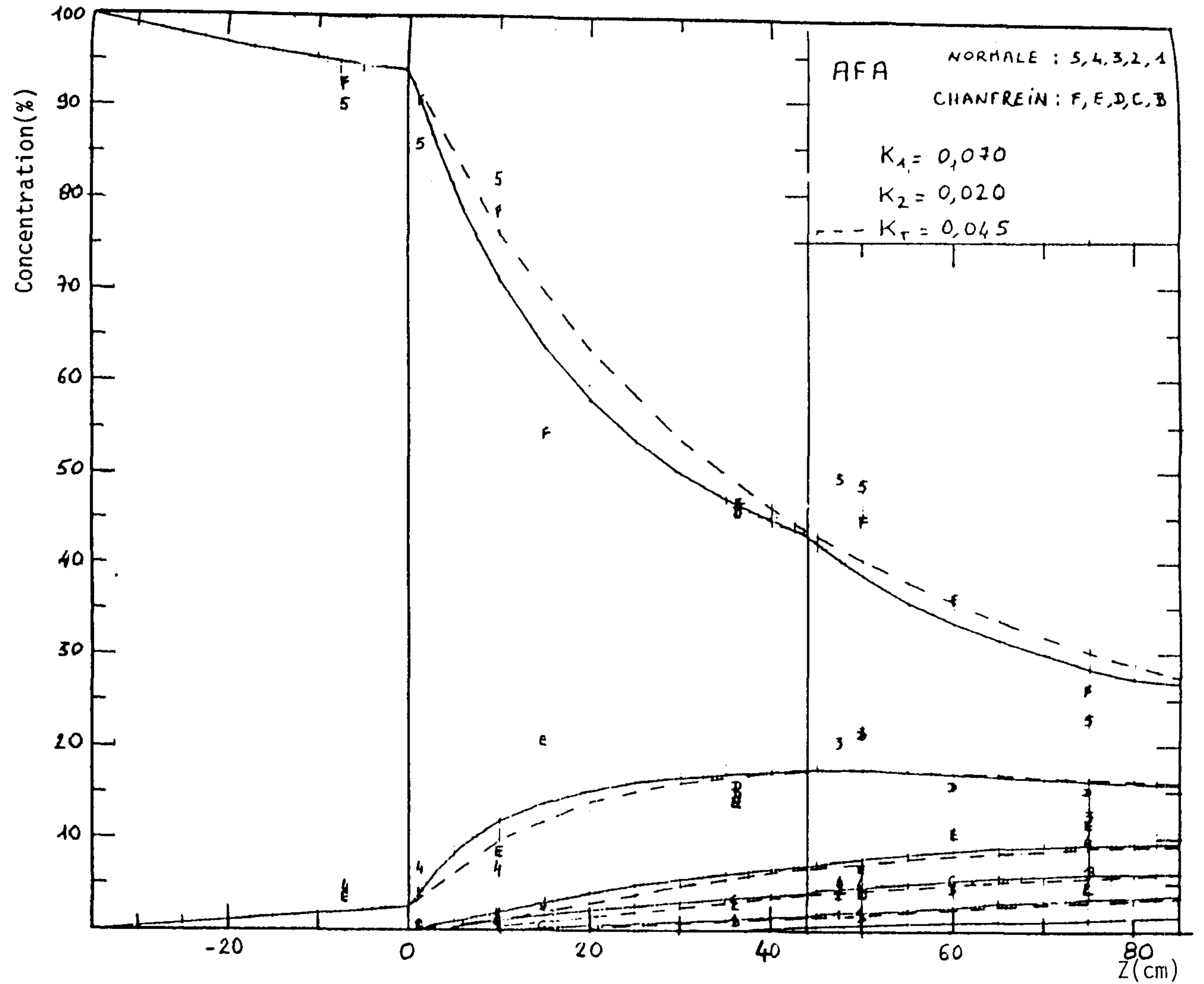


Fig. 4-19 Profile of Concentration Measured in HYDROMEL & its Reconstruction by FLICA Code for AFA Spacer Grid

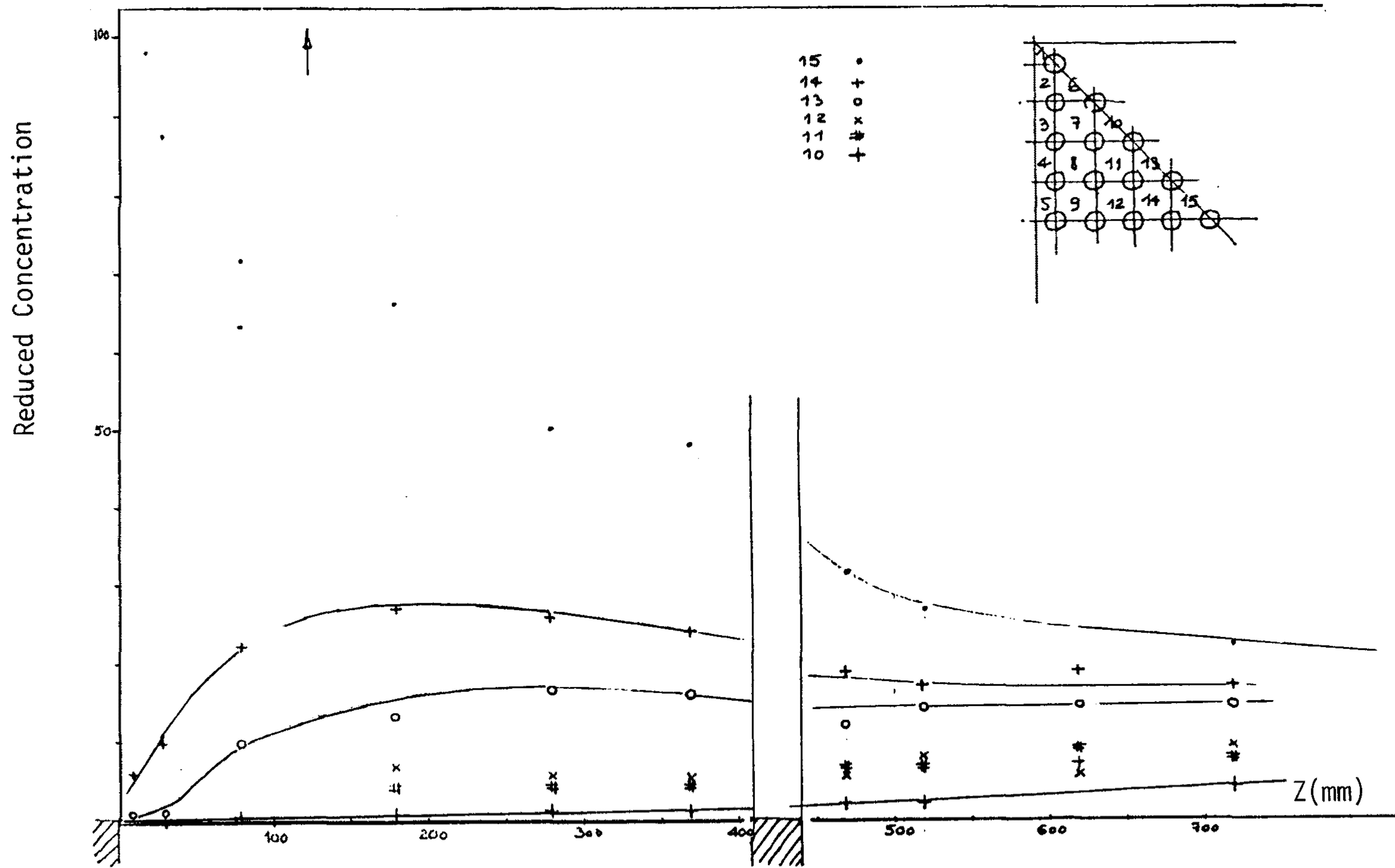


Fig. 4-20 Measured Concentration Distributions for Standard-Type Spacer Grid in HYDROMEL

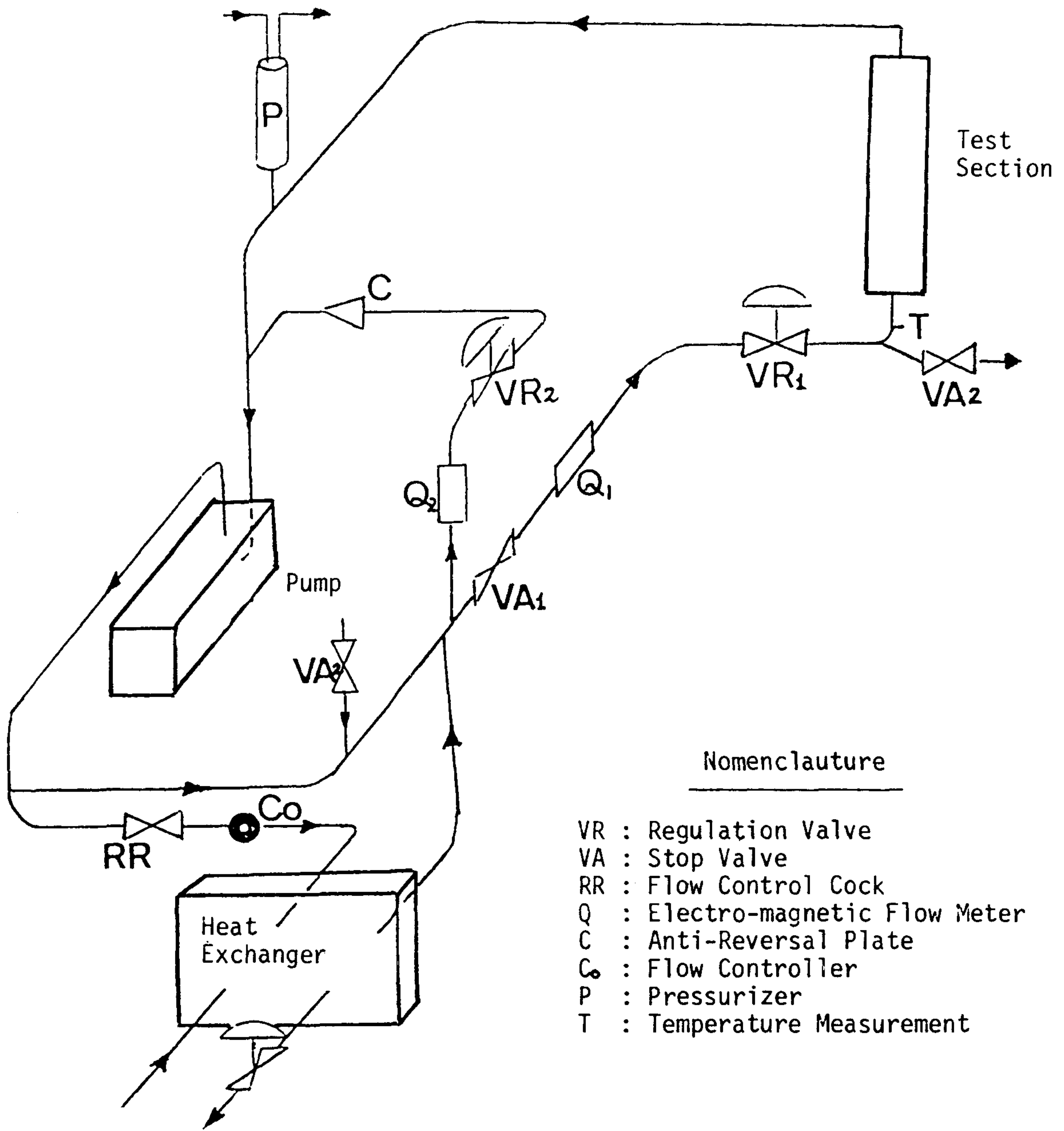


Fig. 4-21 Schematic Diagram of the HYDROMEL-Laser Loop

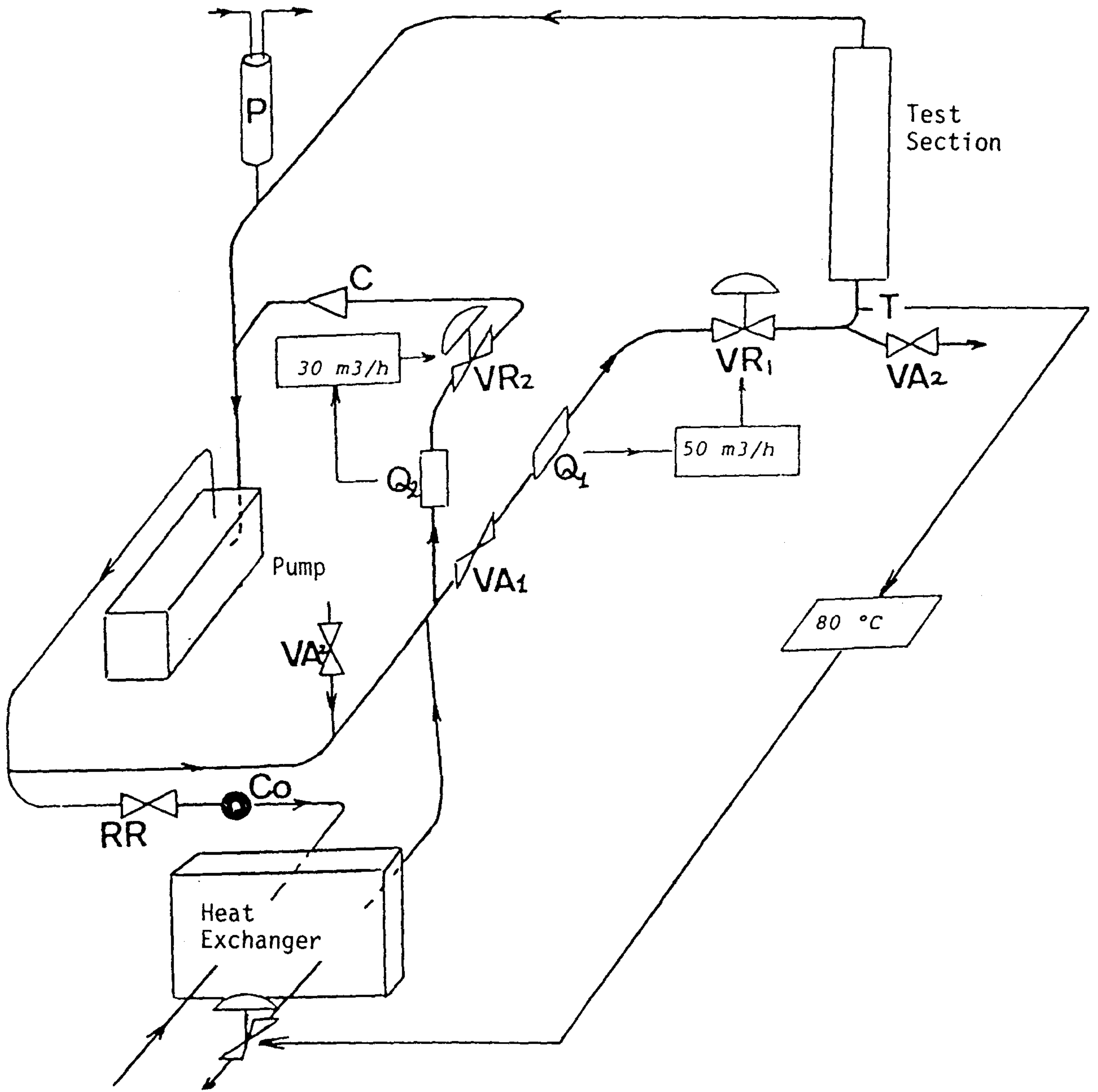


Fig. 4-22 Regulation of Flow Rate & Temperature in HYDROMEL-Laser Loop

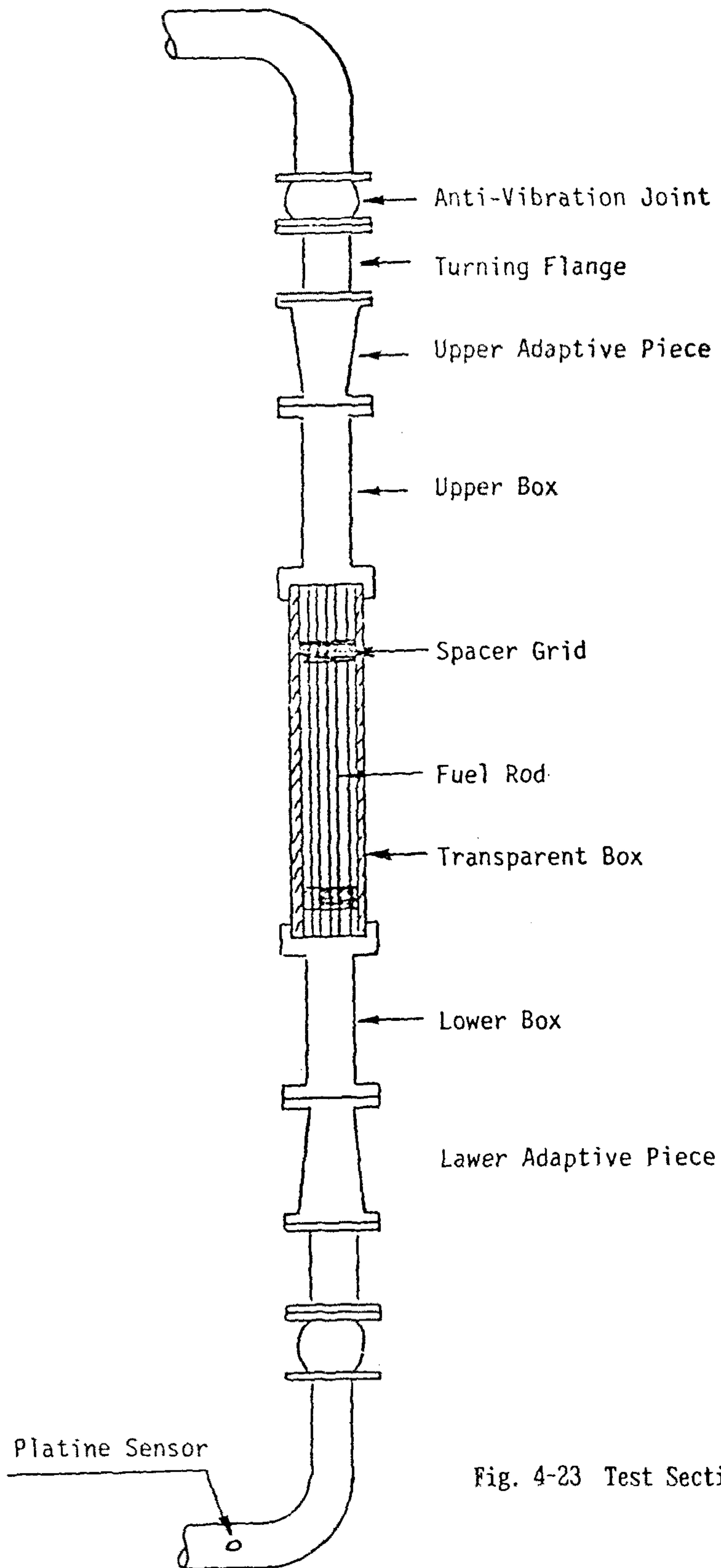


Fig. 4-23 Test Section in HYDROMEL-Laser Loop

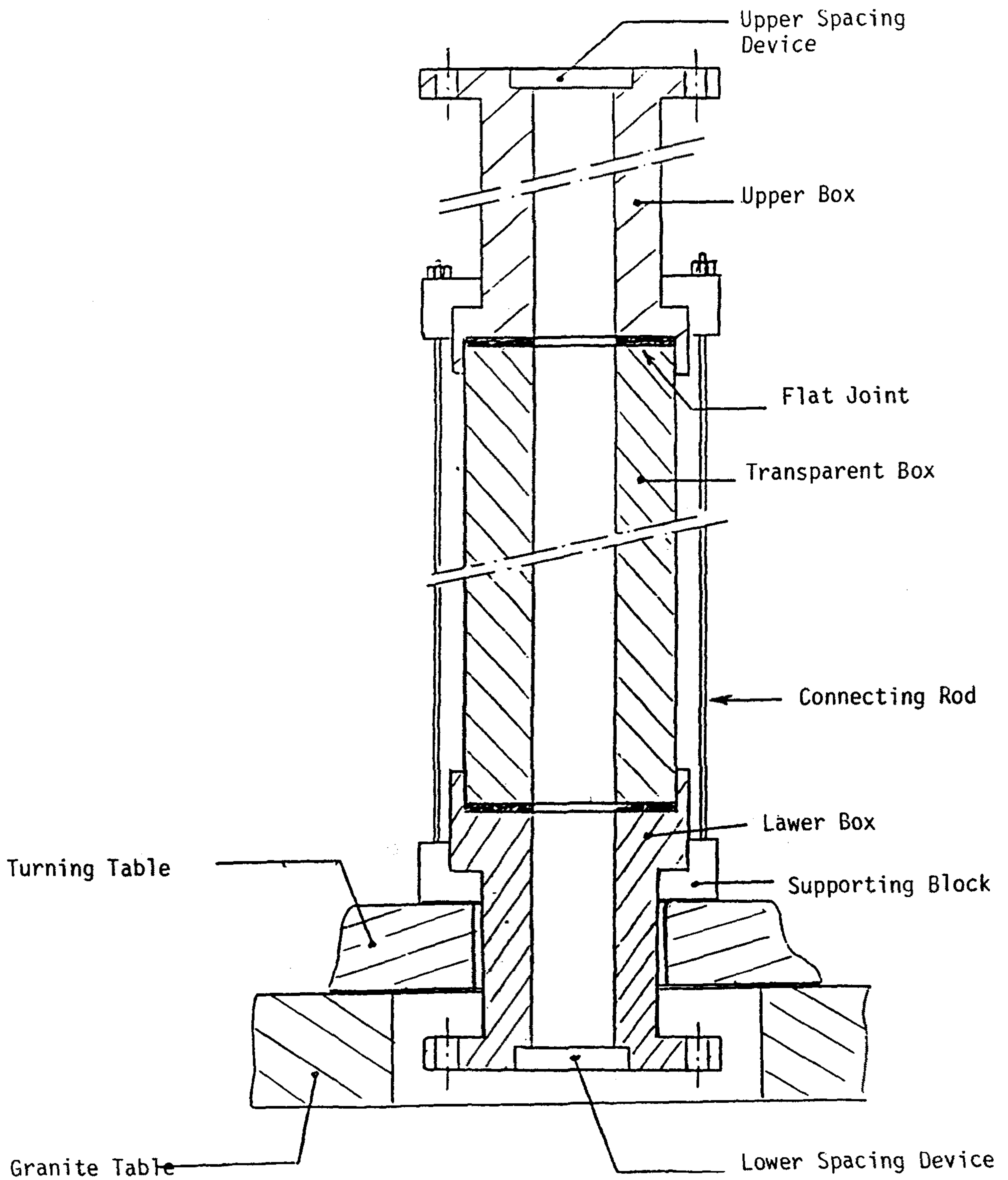


Fig. 4-24 Assembly of the Test Section (HYDROMEL-Laser)

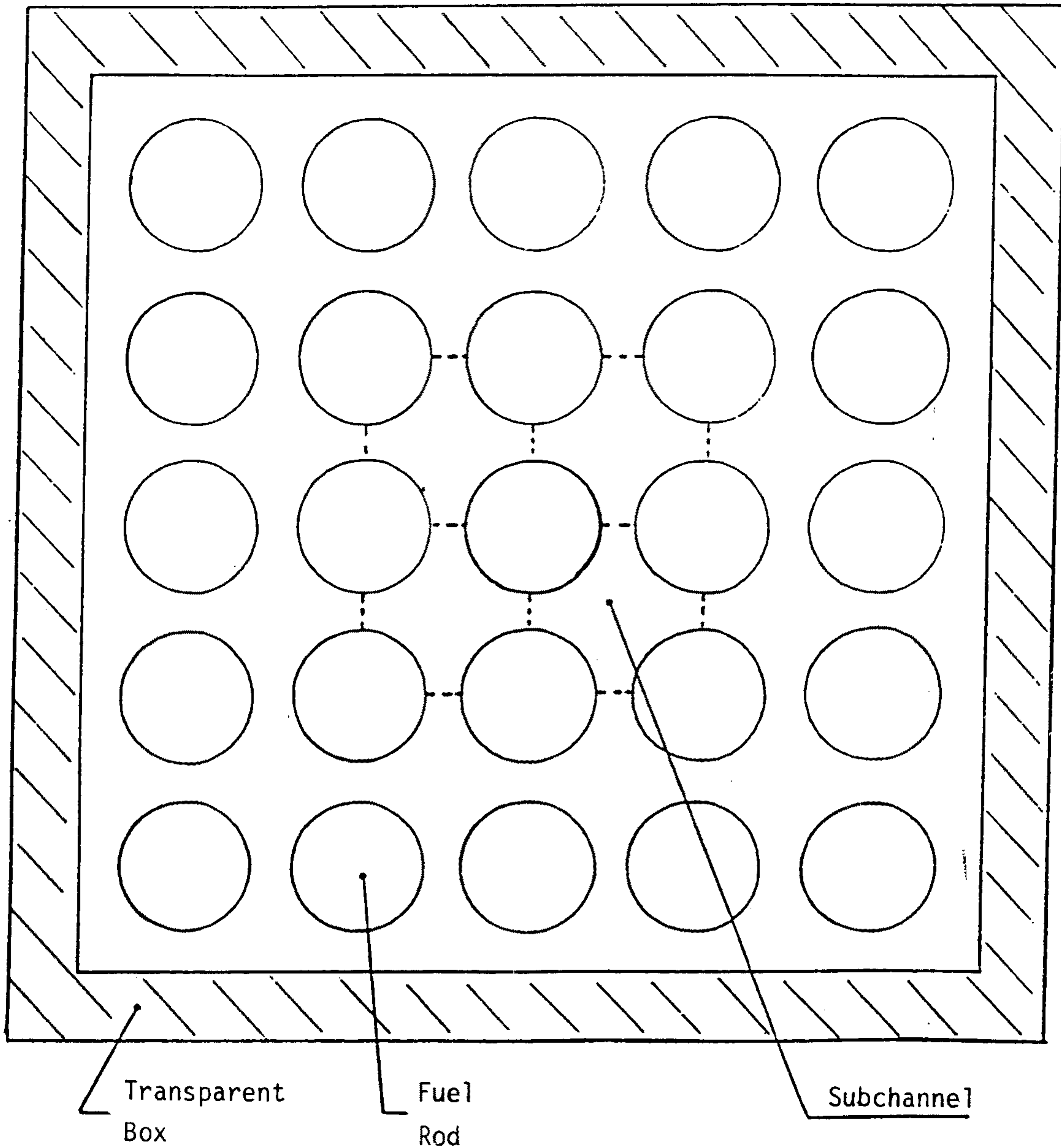


Fig. 4-25 5x5 Rod Array in Test Section (HYDROMEL-Laser)

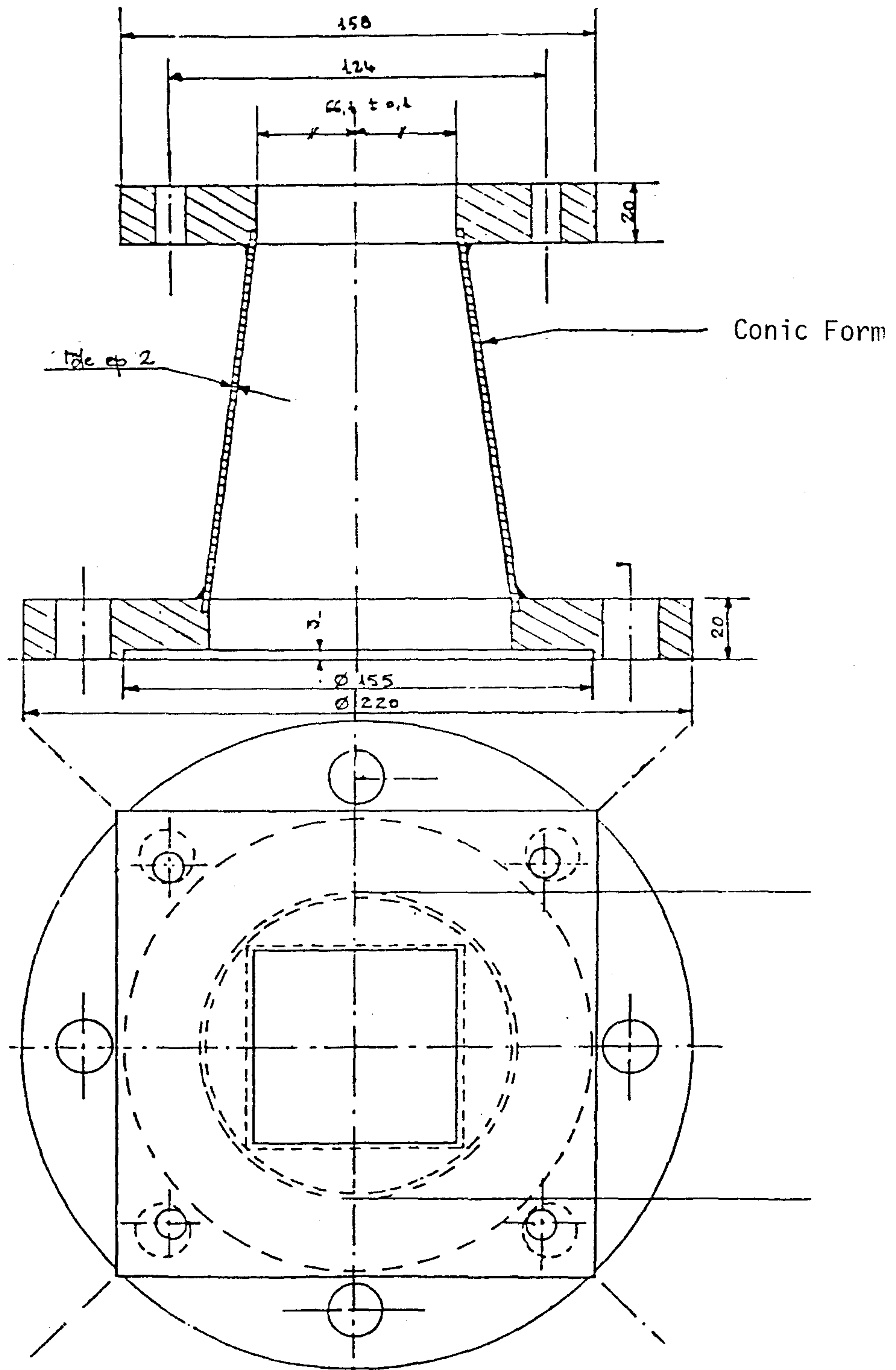


Fig. 4-26 Adaptive Piece in Test Section (HYDROMEL-Laser)

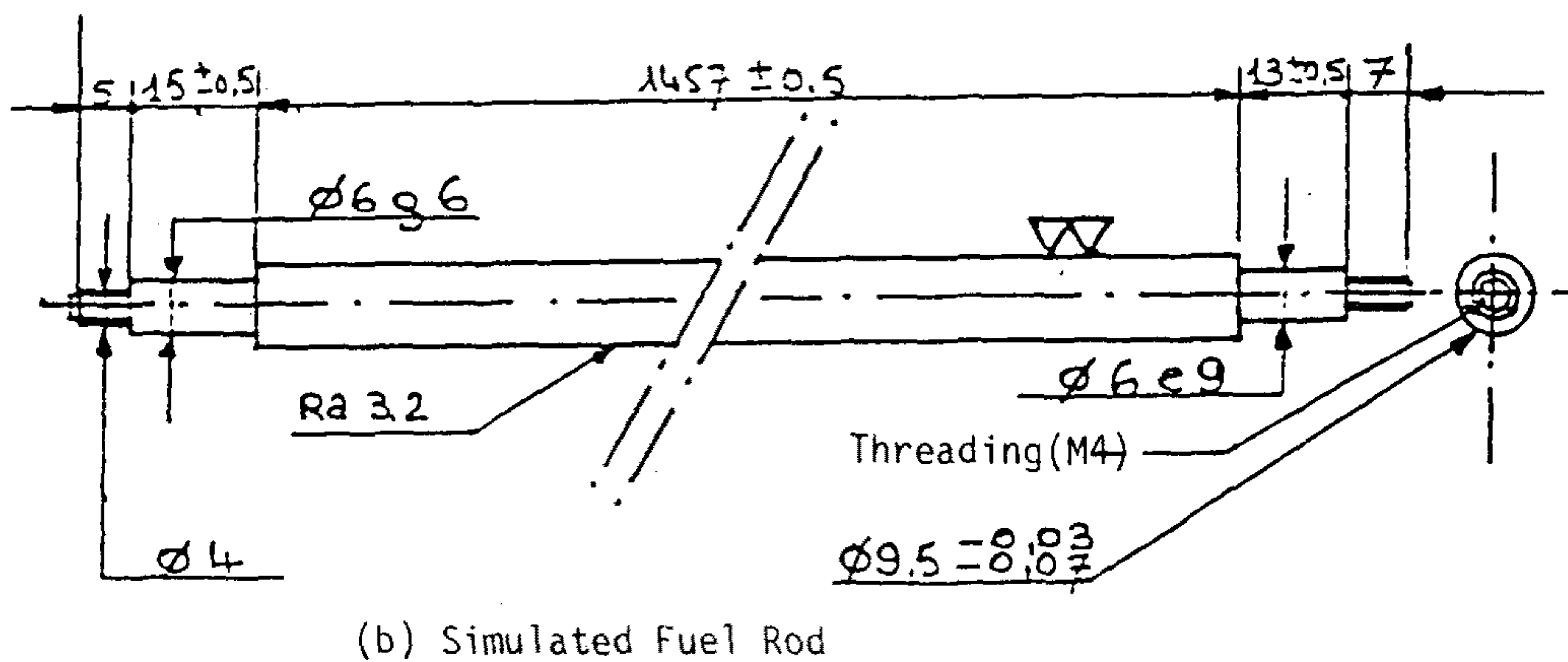
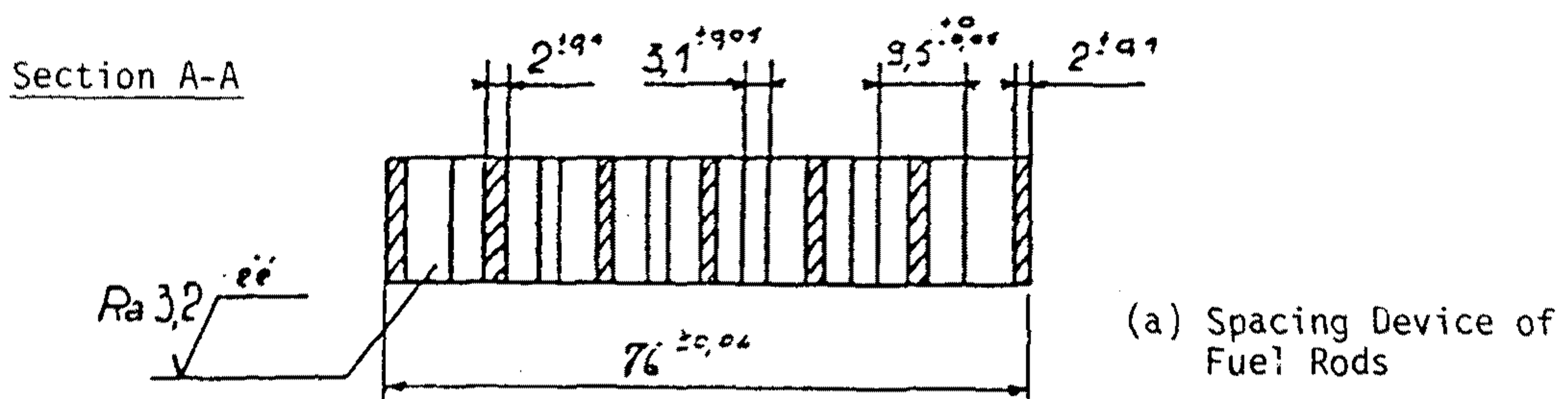
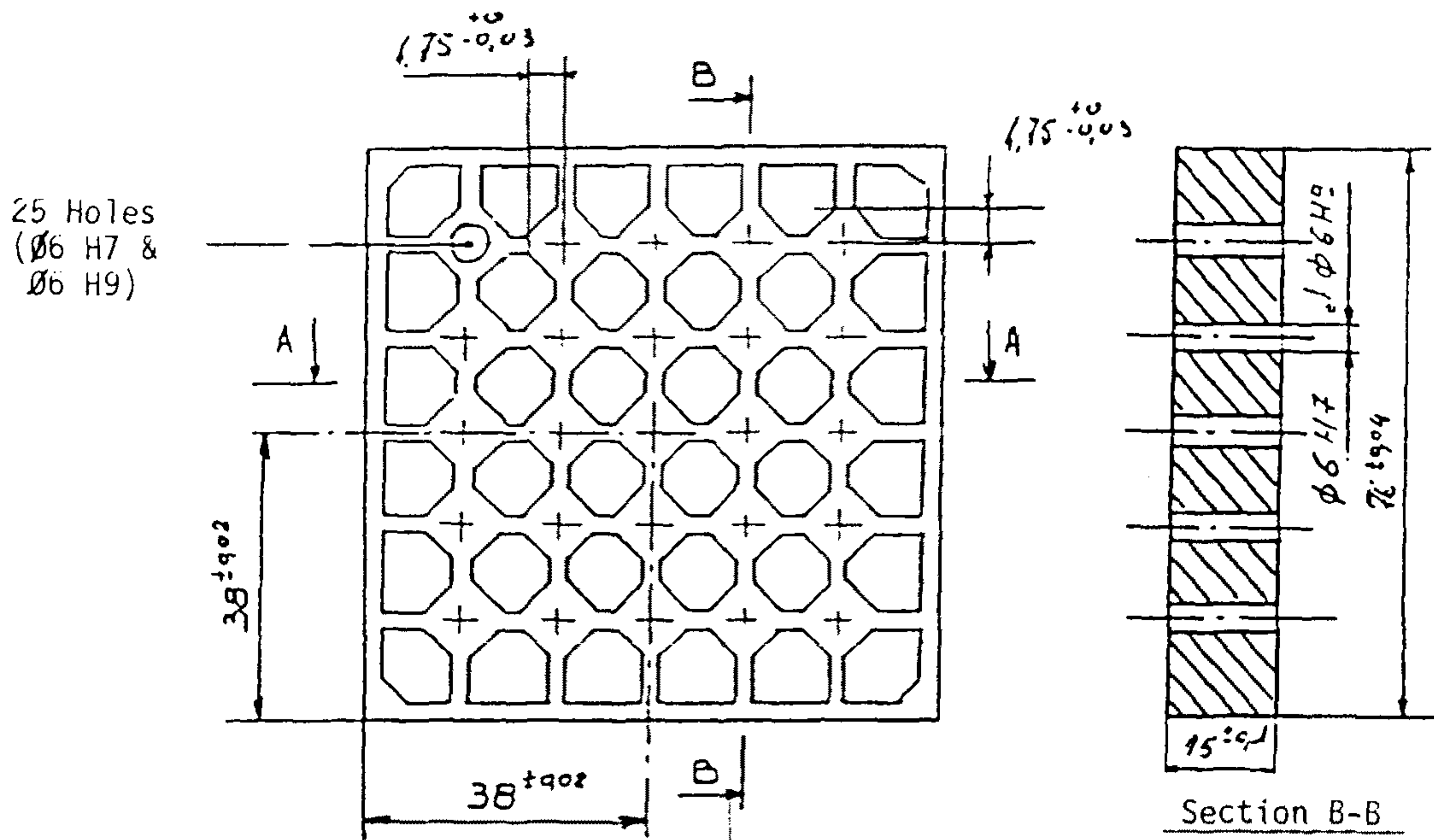


Fig. 4-27 Spacing Device of Fuel Rods & Geometry of Simulated Fuel Rod

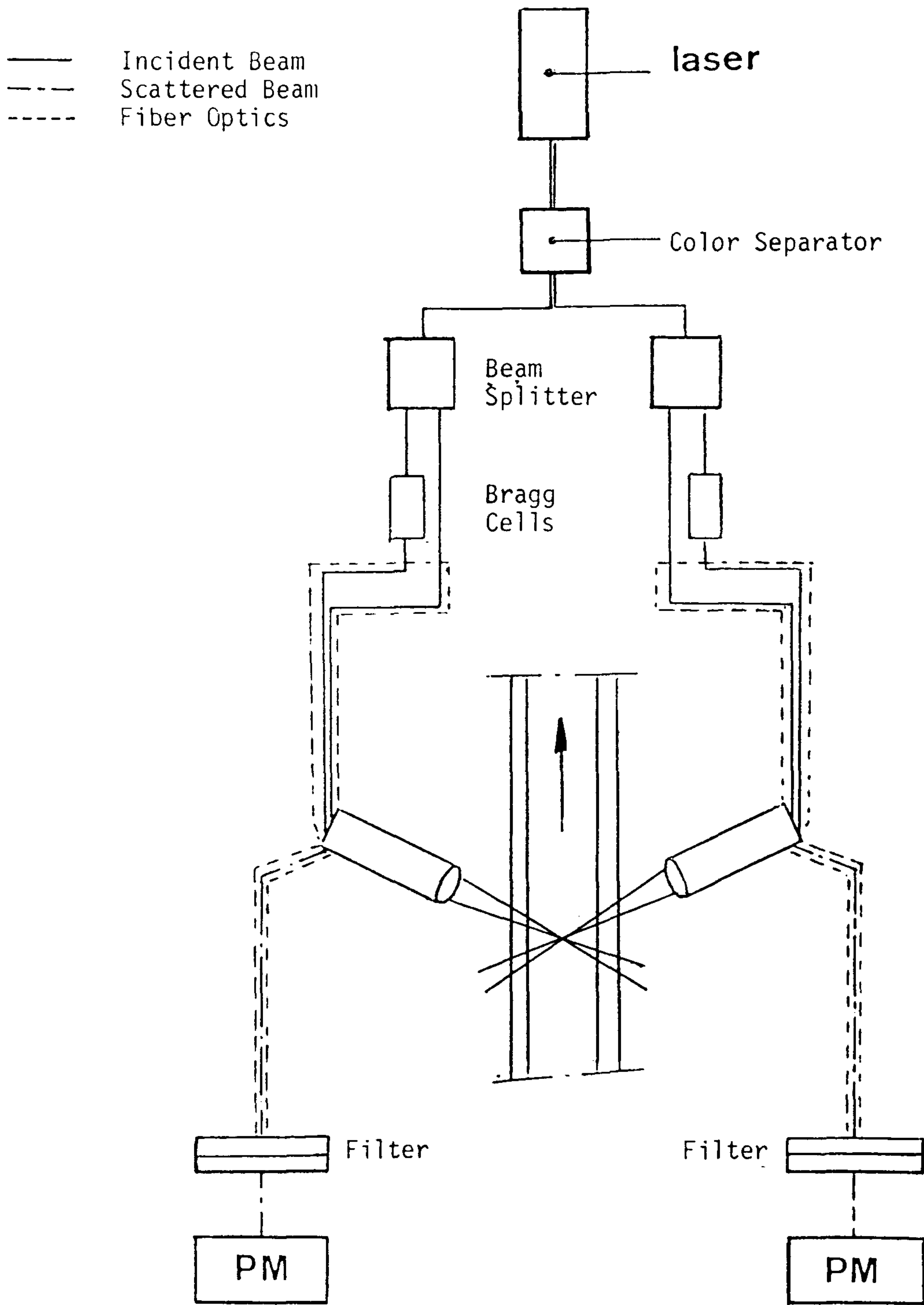


Fig. 4-28 Laser Beam Path in LDV System

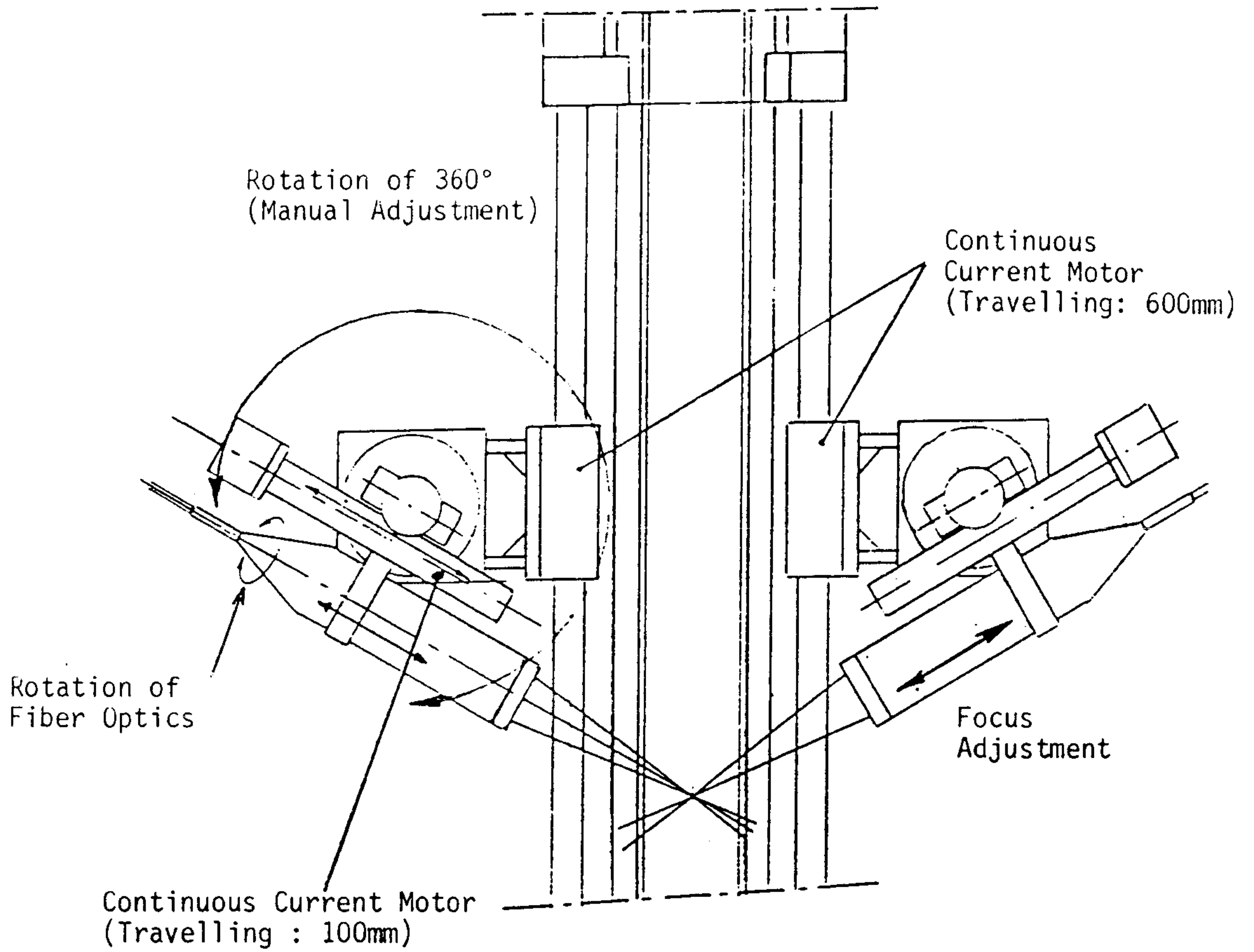


Fig. 4-29 Traversing System of Fiber Optics in LDV System

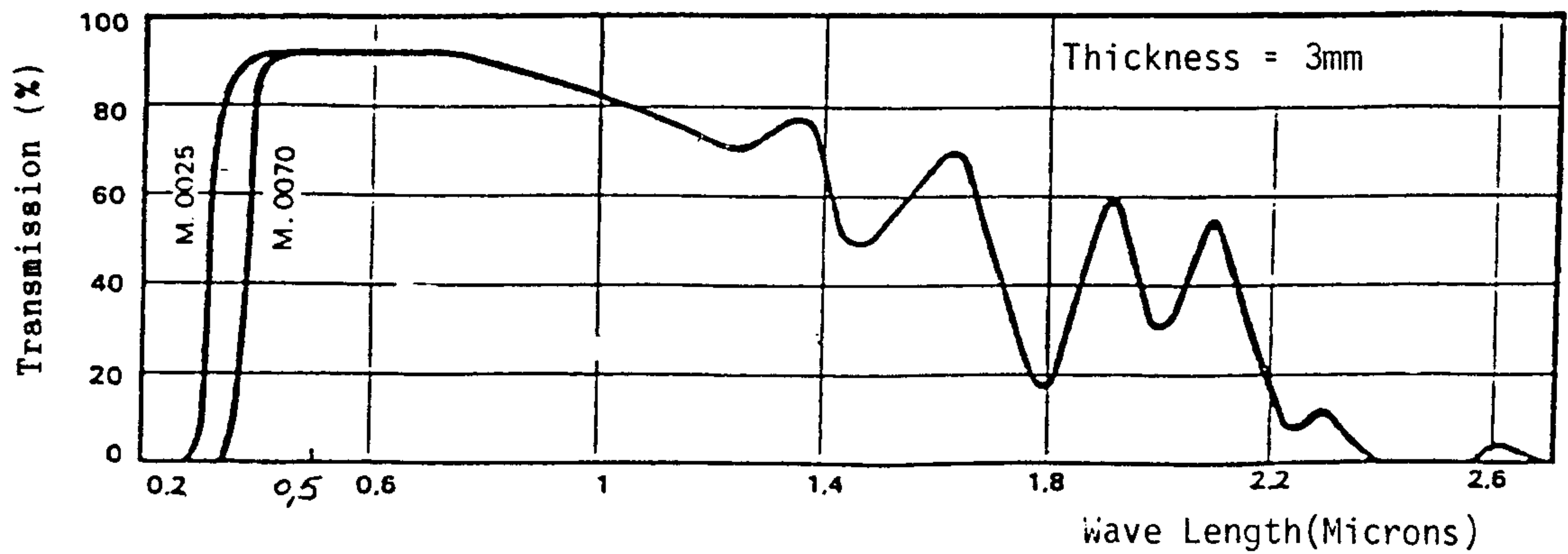


Fig. 4-30 Transmission Curve for Laser in Plexiglass

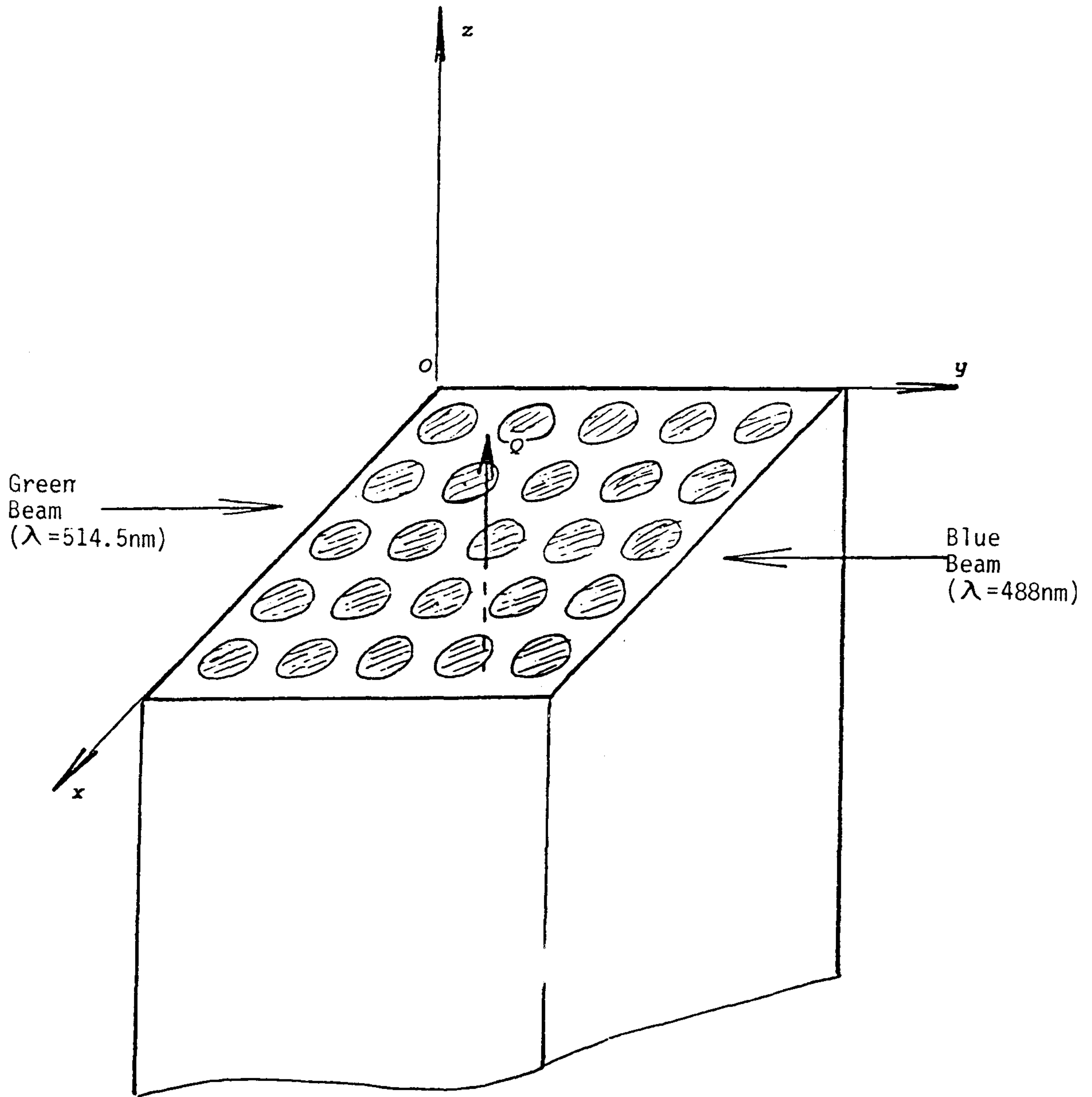
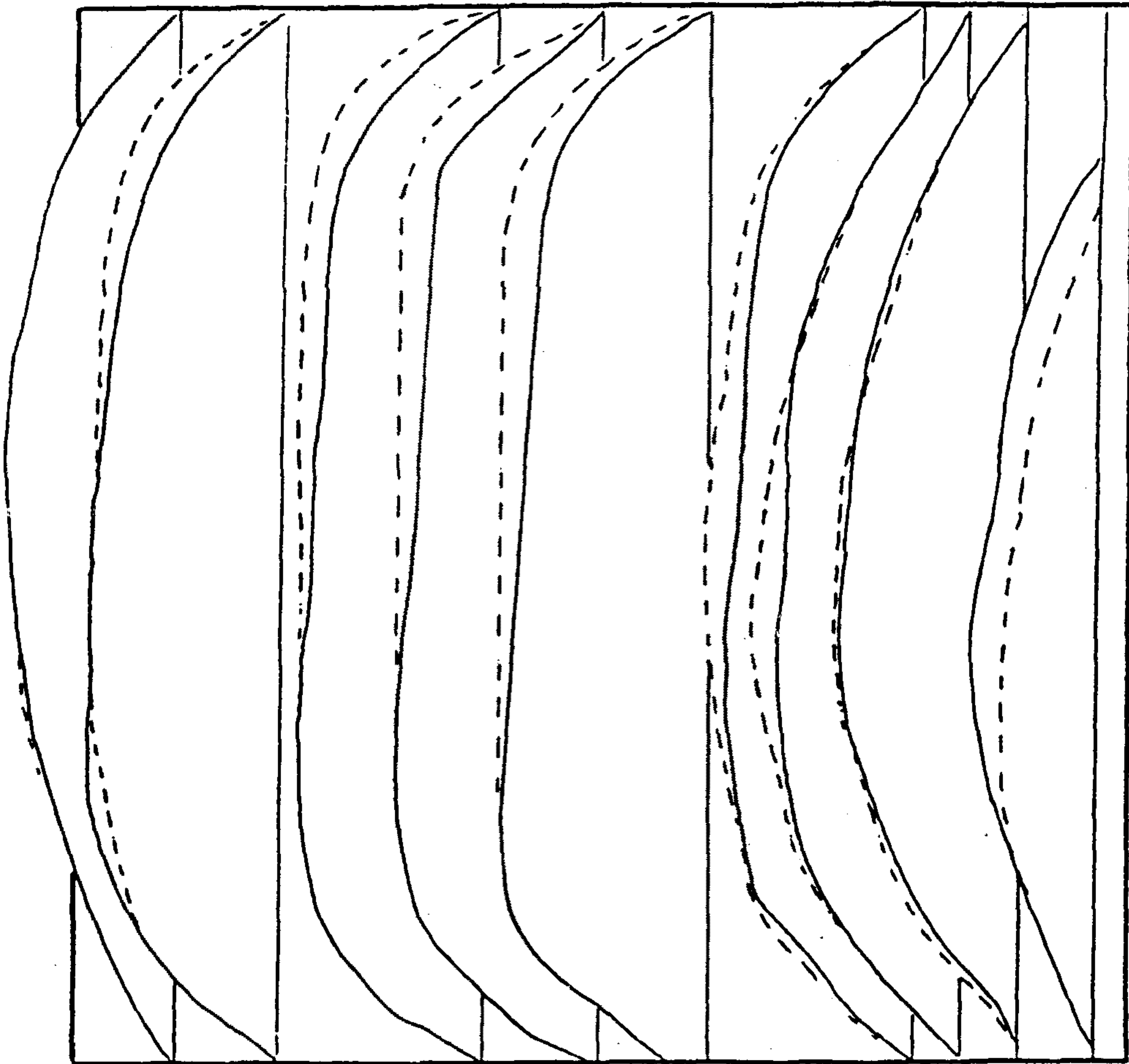
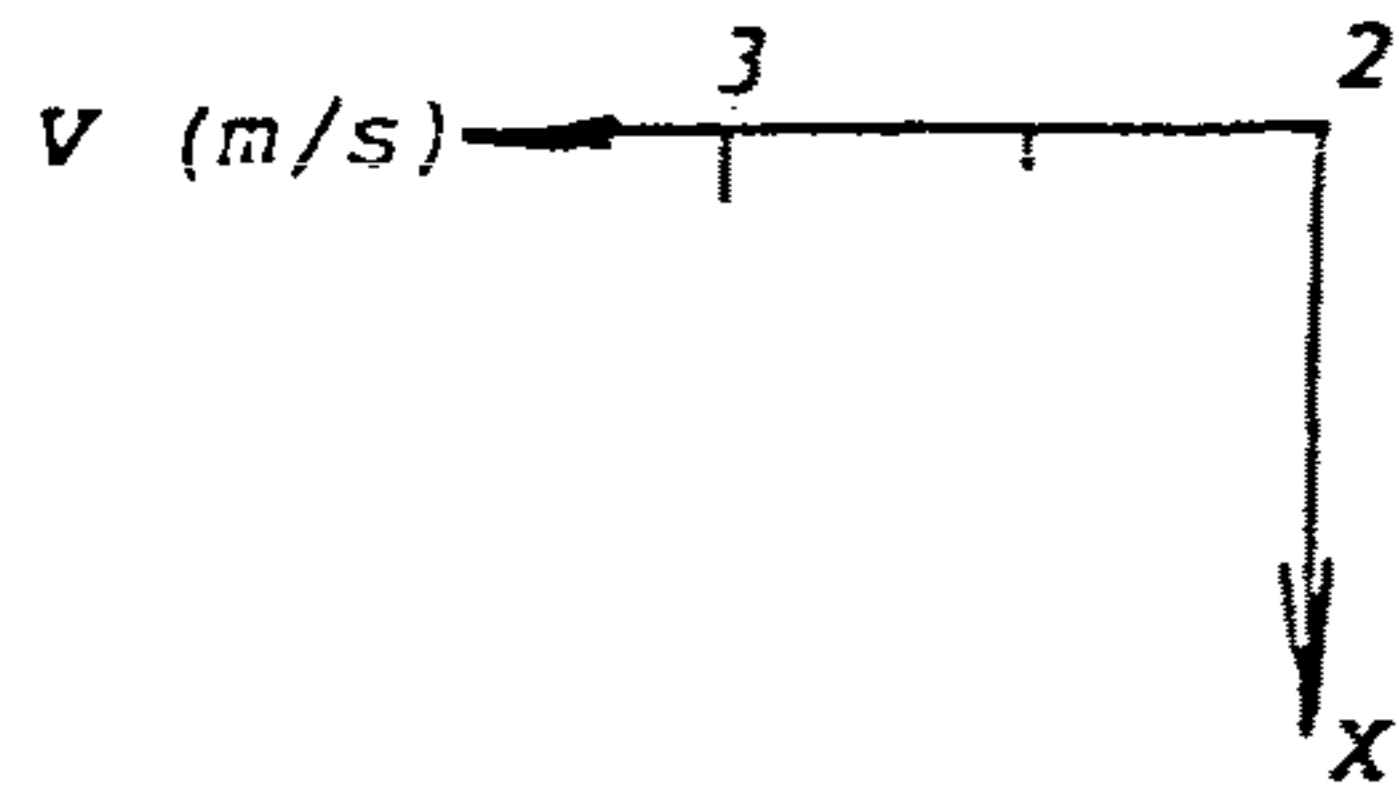
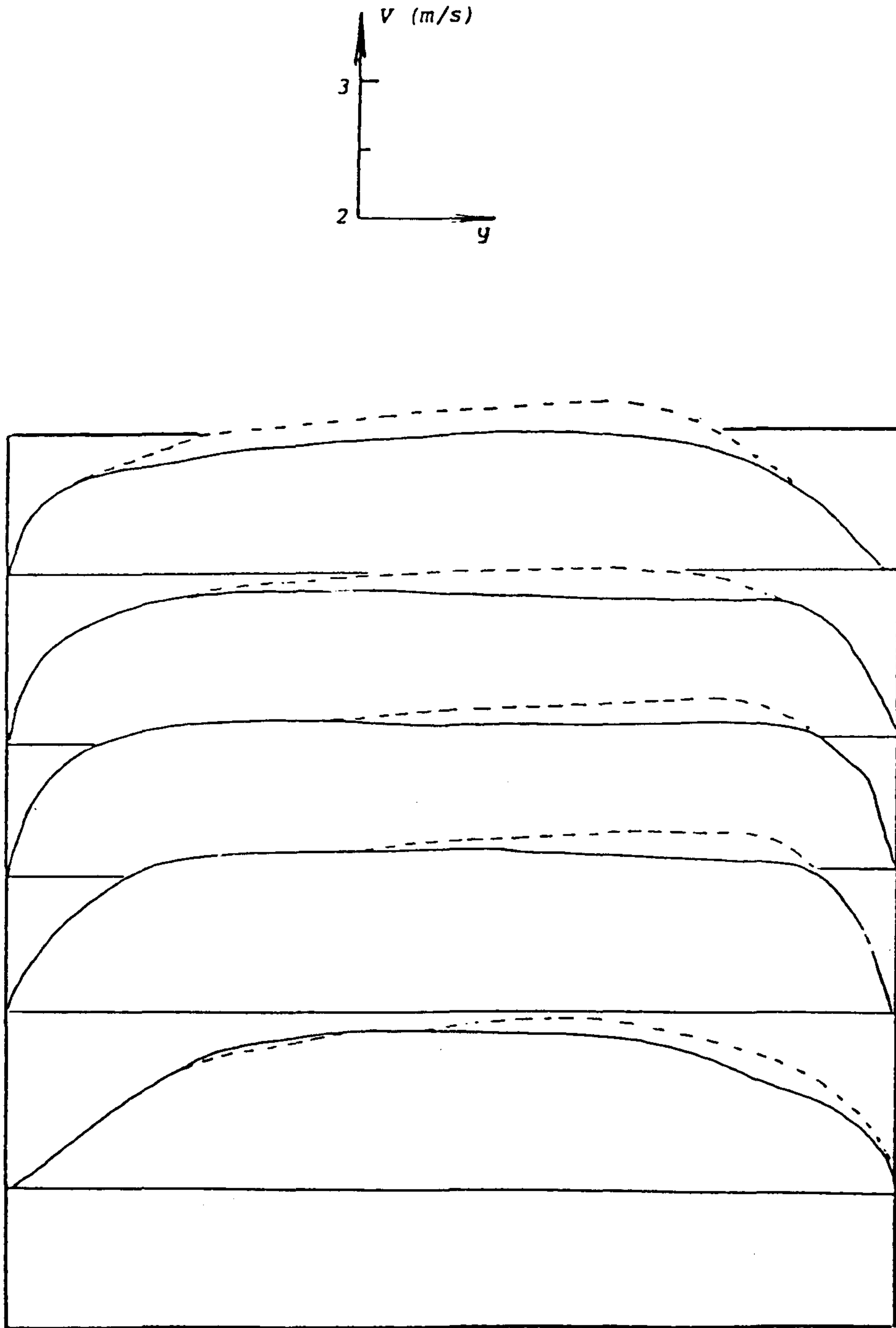


Fig. 4-31 Definition of the Coordinate System for Velocity Measurement



— : Measurements in Low Position
 - - - : Measurements in High Position

Fig. 4-32 Comparison of Velocity Profile in Different Sections Perdicular to the Beam Direction (Preliminary Test No. 1)



—— : Measurements in Low Position
 - - - - : Measurements in High Position

Fig. 4-33 Comparison of Velocity Profile in Different Sections of Beam Direction (Preliminary Test No. 1)

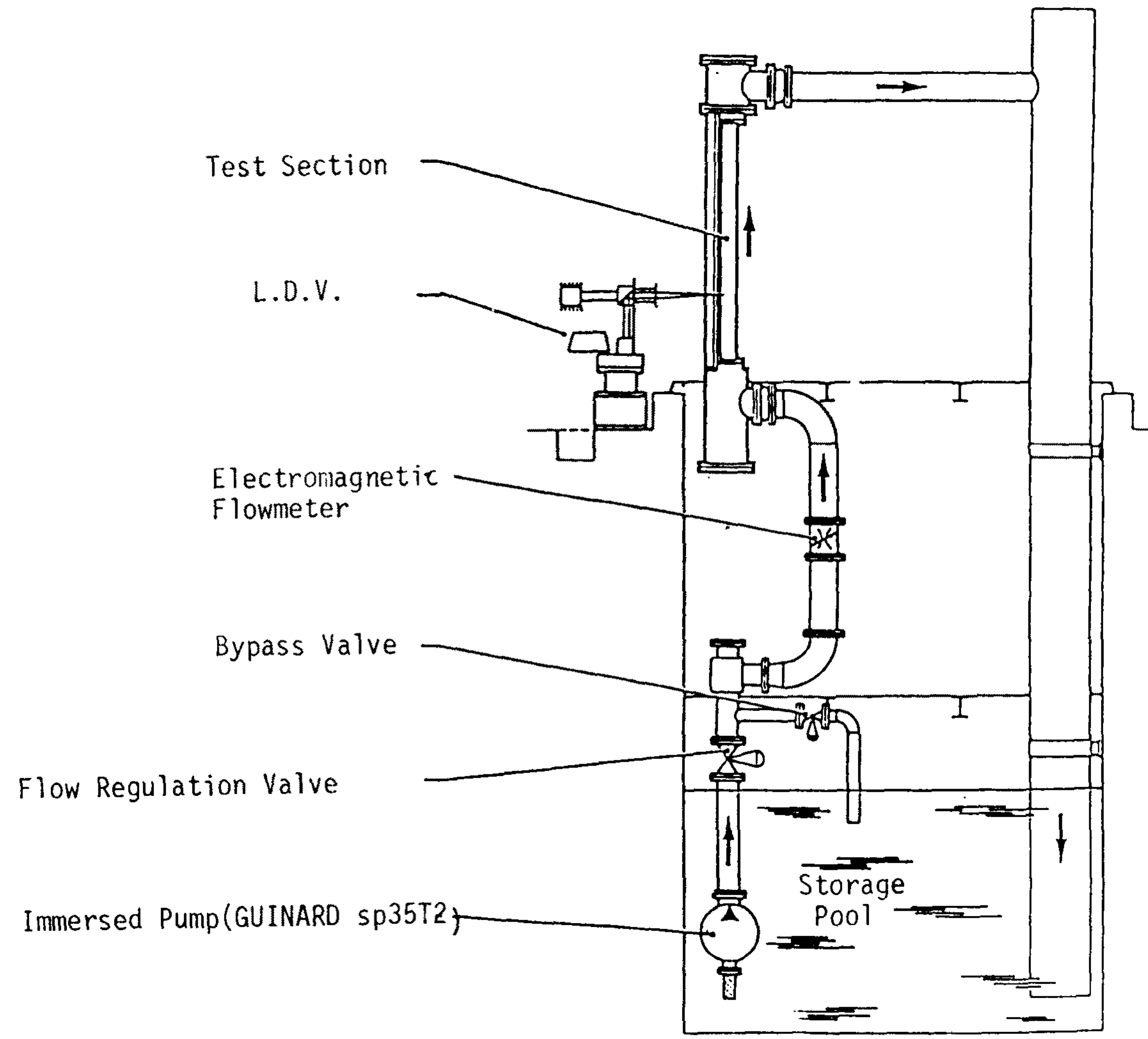


Fig. 4-34 Flow Diagram of the EDVIGE Loop

EDVIGE

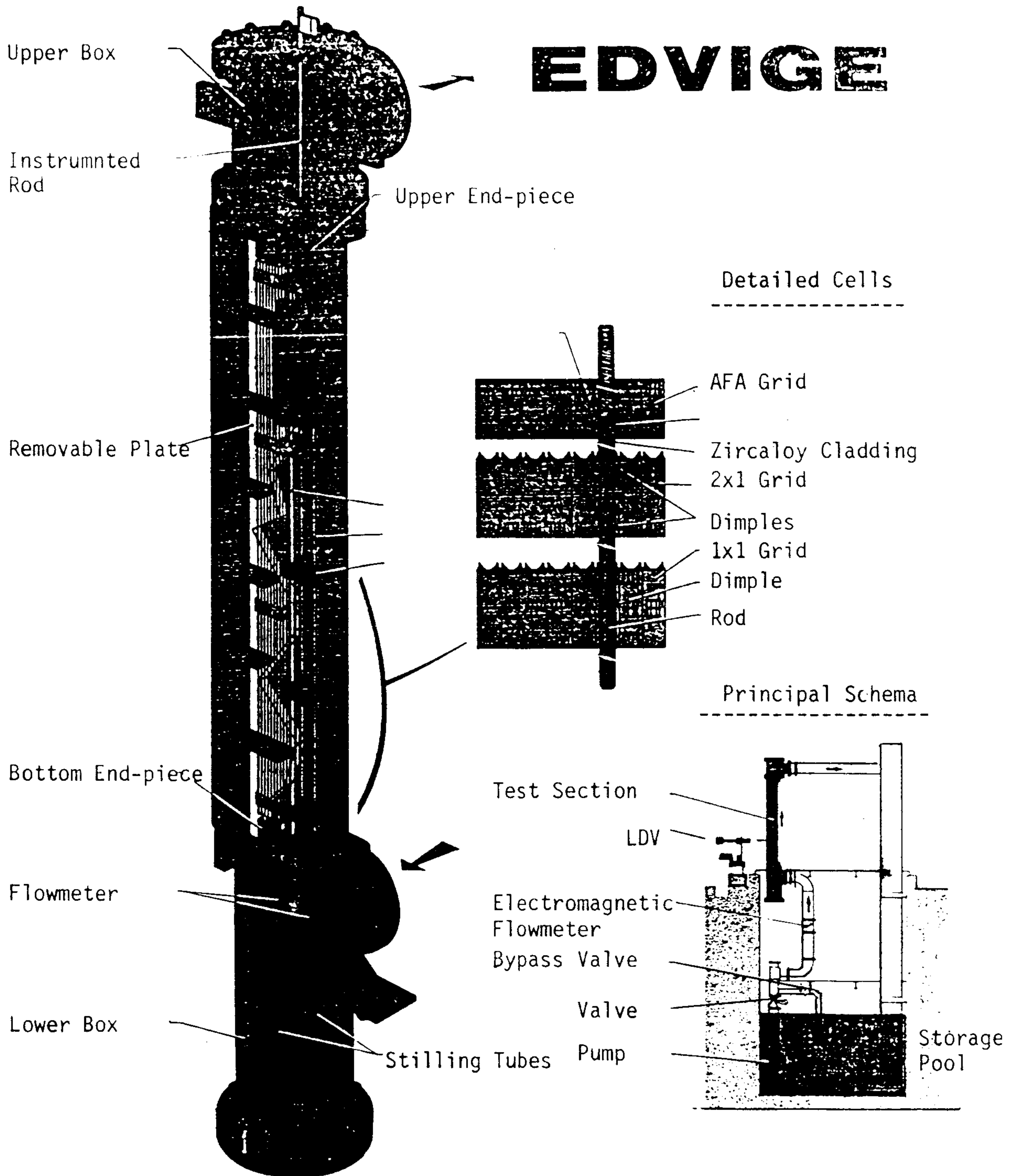


Fig. 4-35 Test Section of the EDVIGE Loop

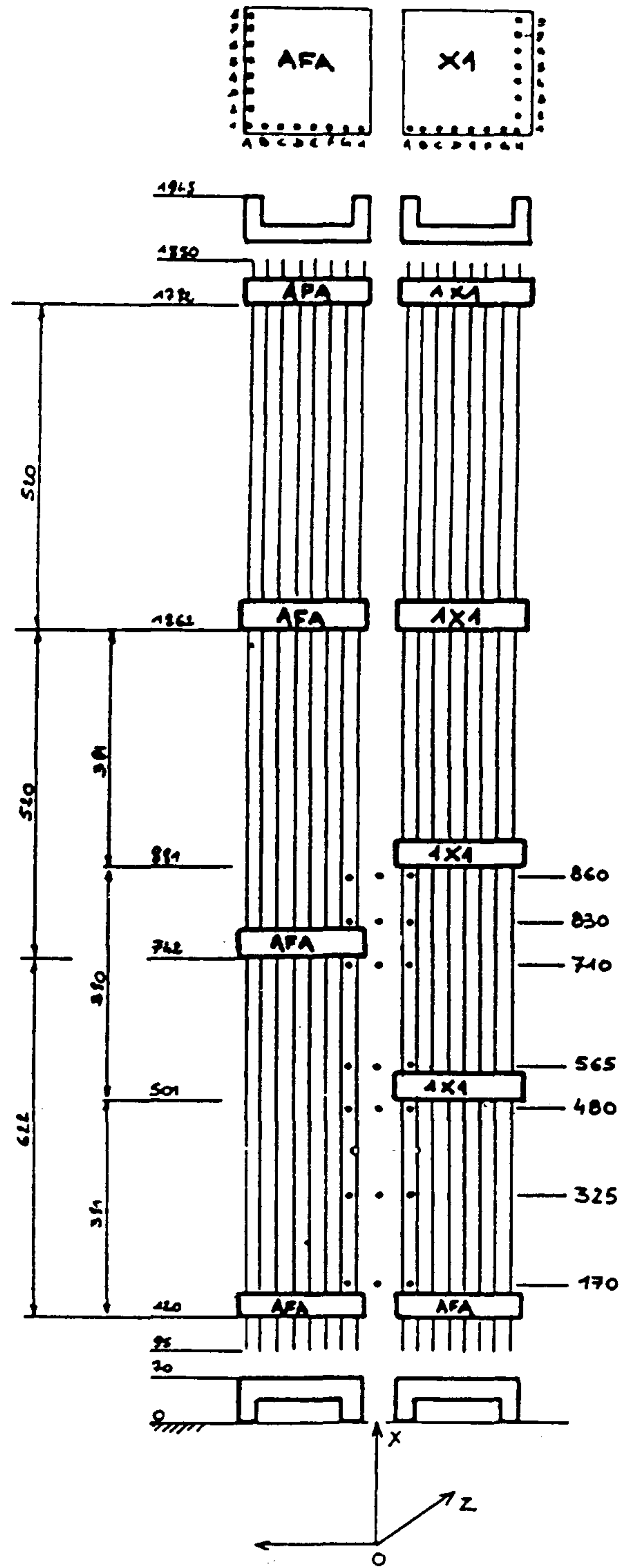
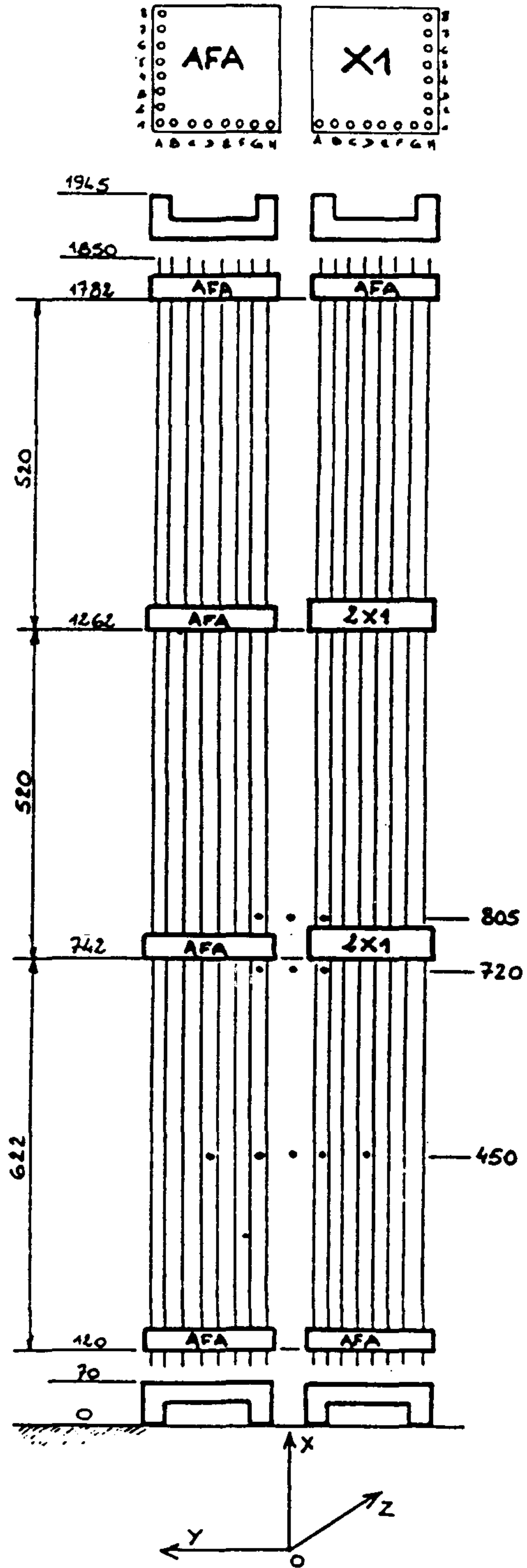
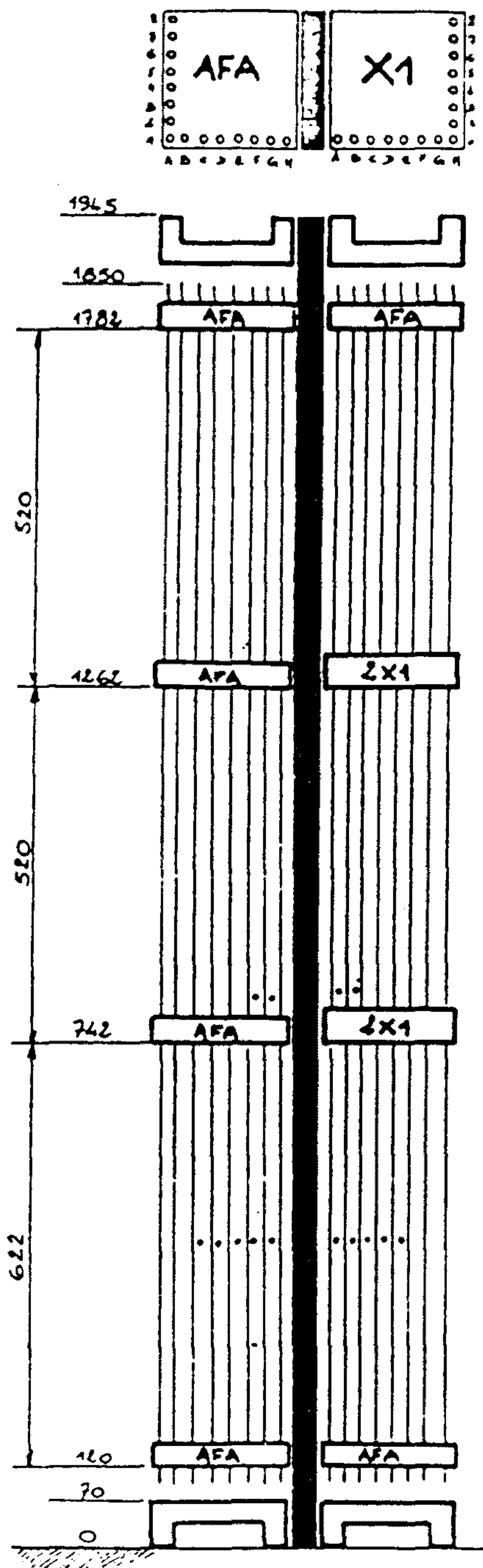


Fig. 4-36 1st Loading Configuration of Test Fuel Assemblies (EDVIGE)



Configuration 2

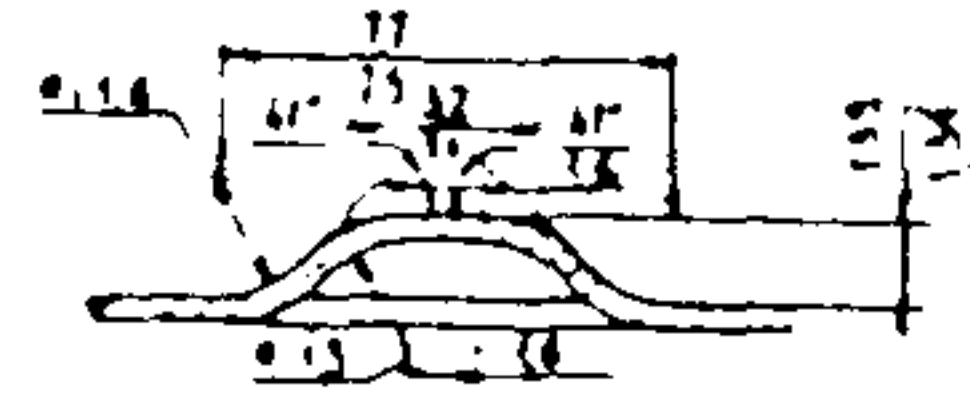
Fig. 4-37 2nd Loading Configuration of Test Fuel Assemblies (EDVIGE)



Configuration 3

Fig. 4-38 3rd Loading Configuration of Test Fuel Assemblies (EDVIGE)

Simple Dimple



Double Dimple



C-C

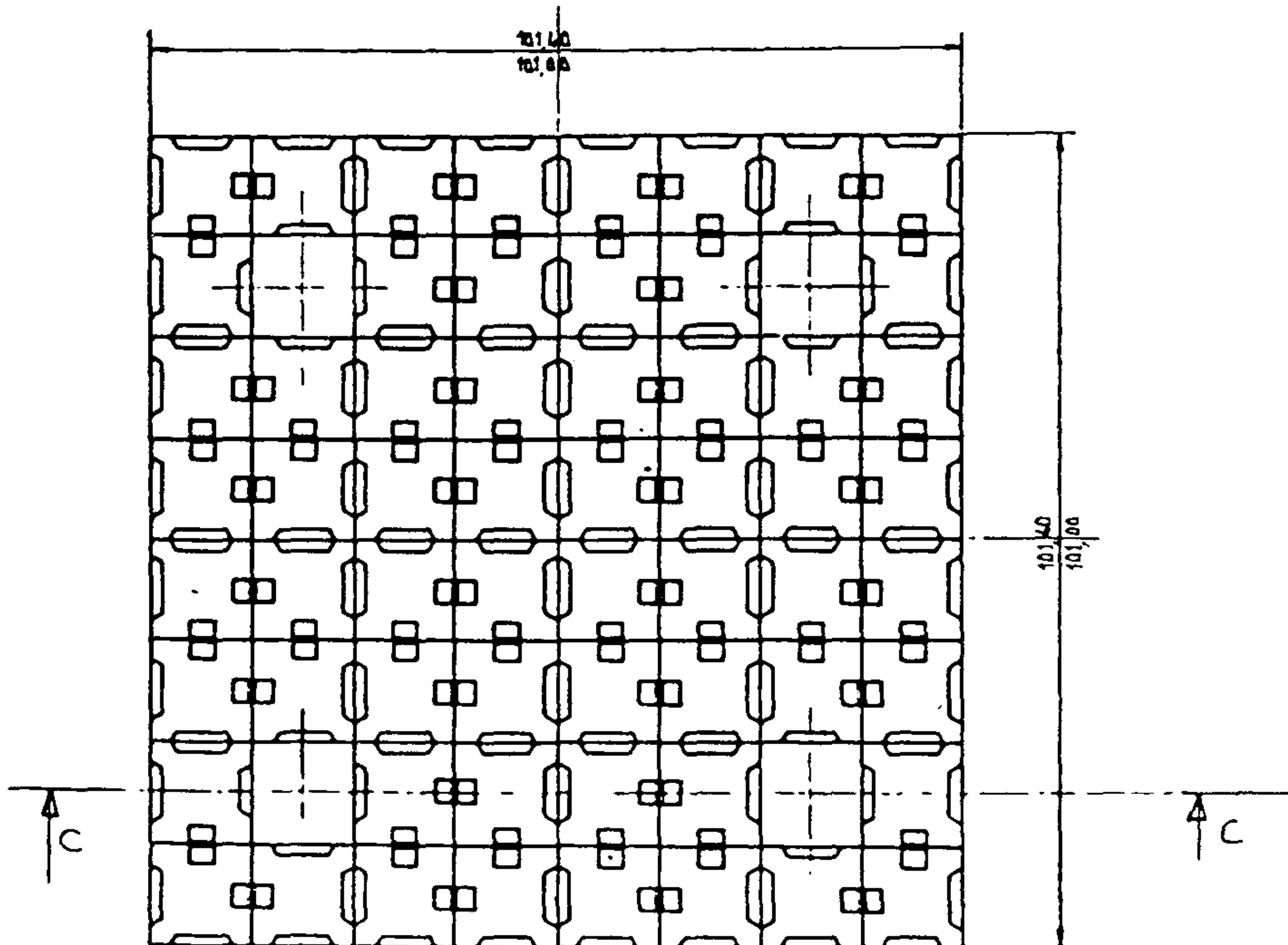
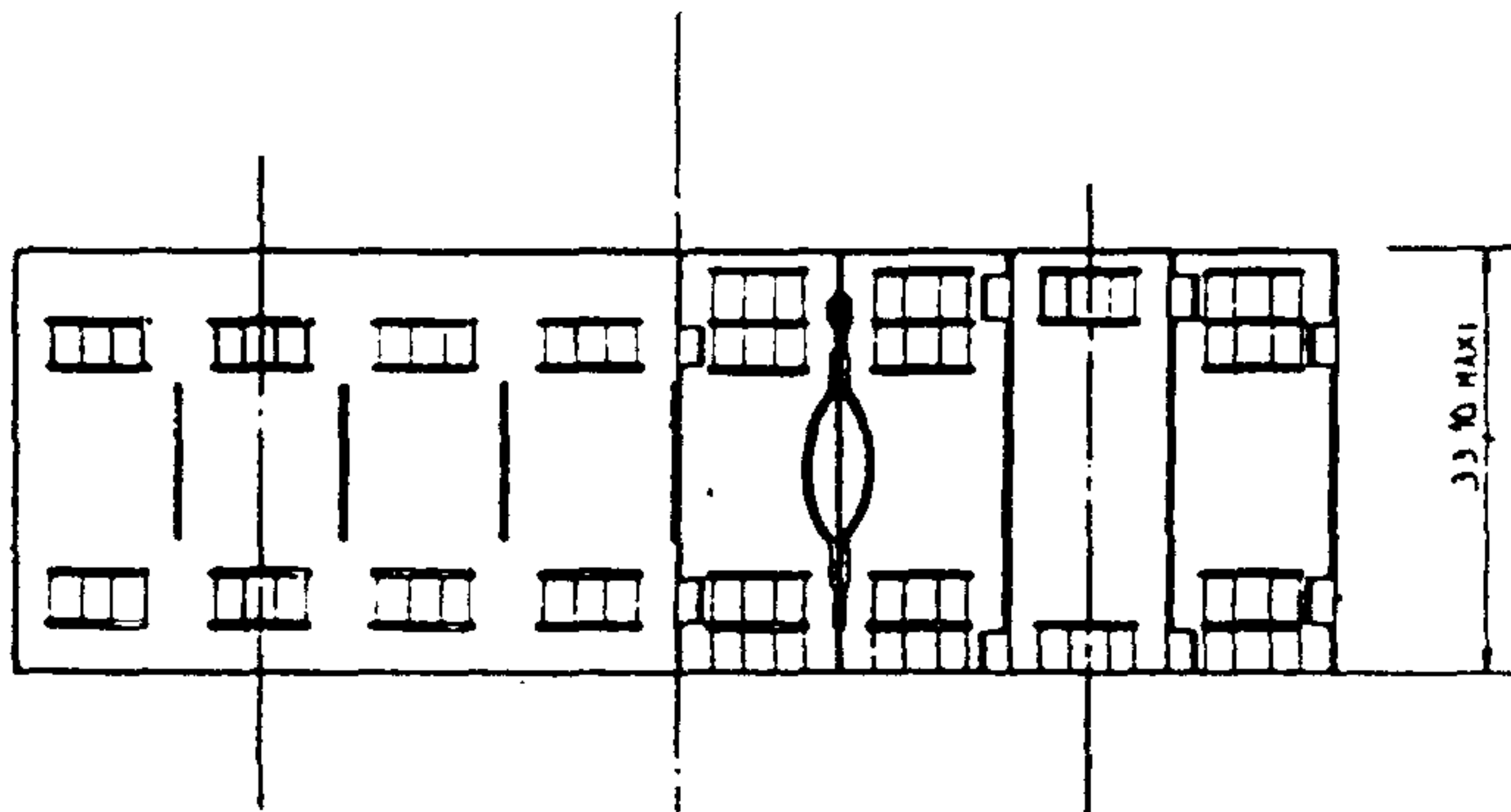


Fig. 4-39 AFA Type of Spacer Grid

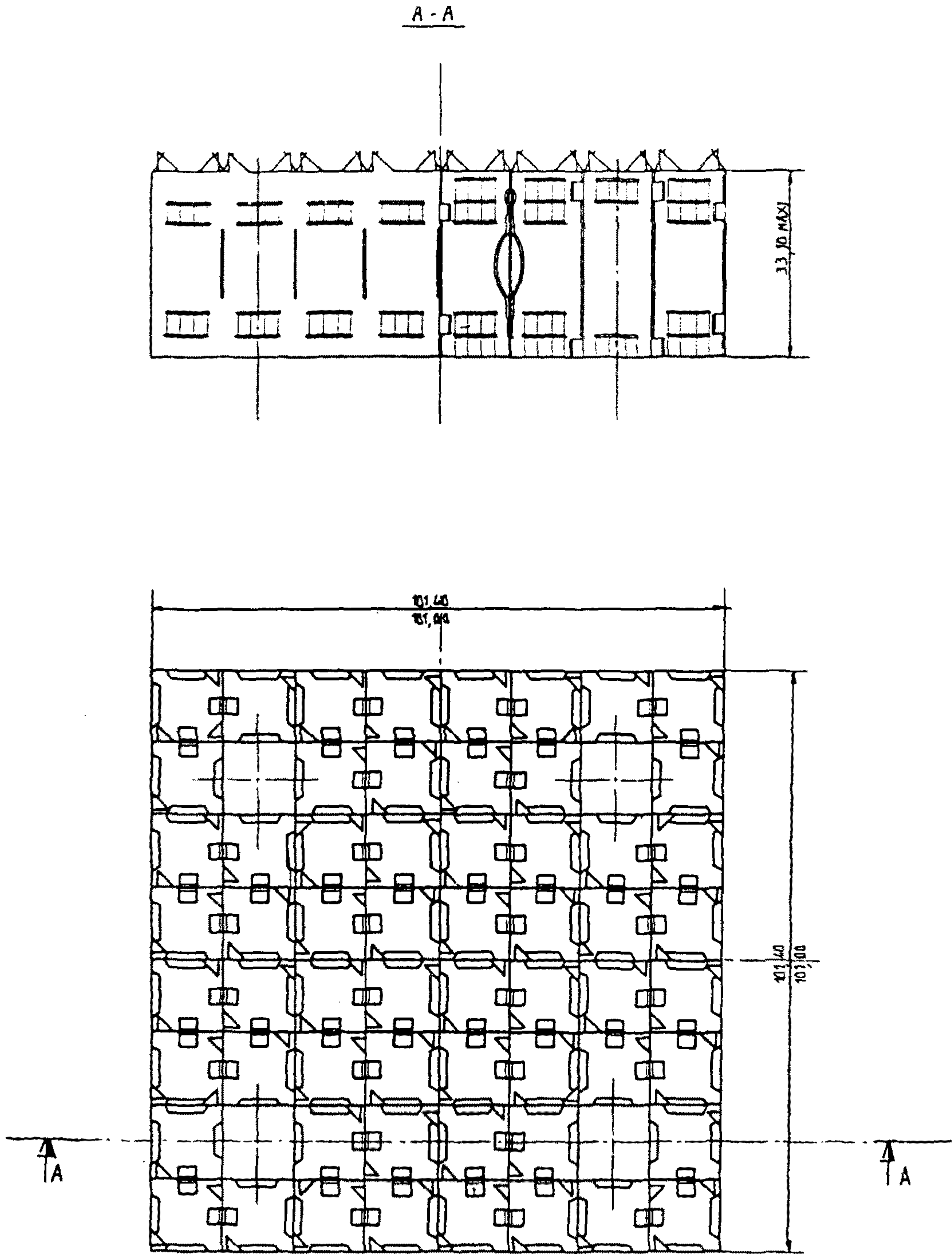


Fig. 4-40 AFA Type of Spacer Grid with Mixing Vane

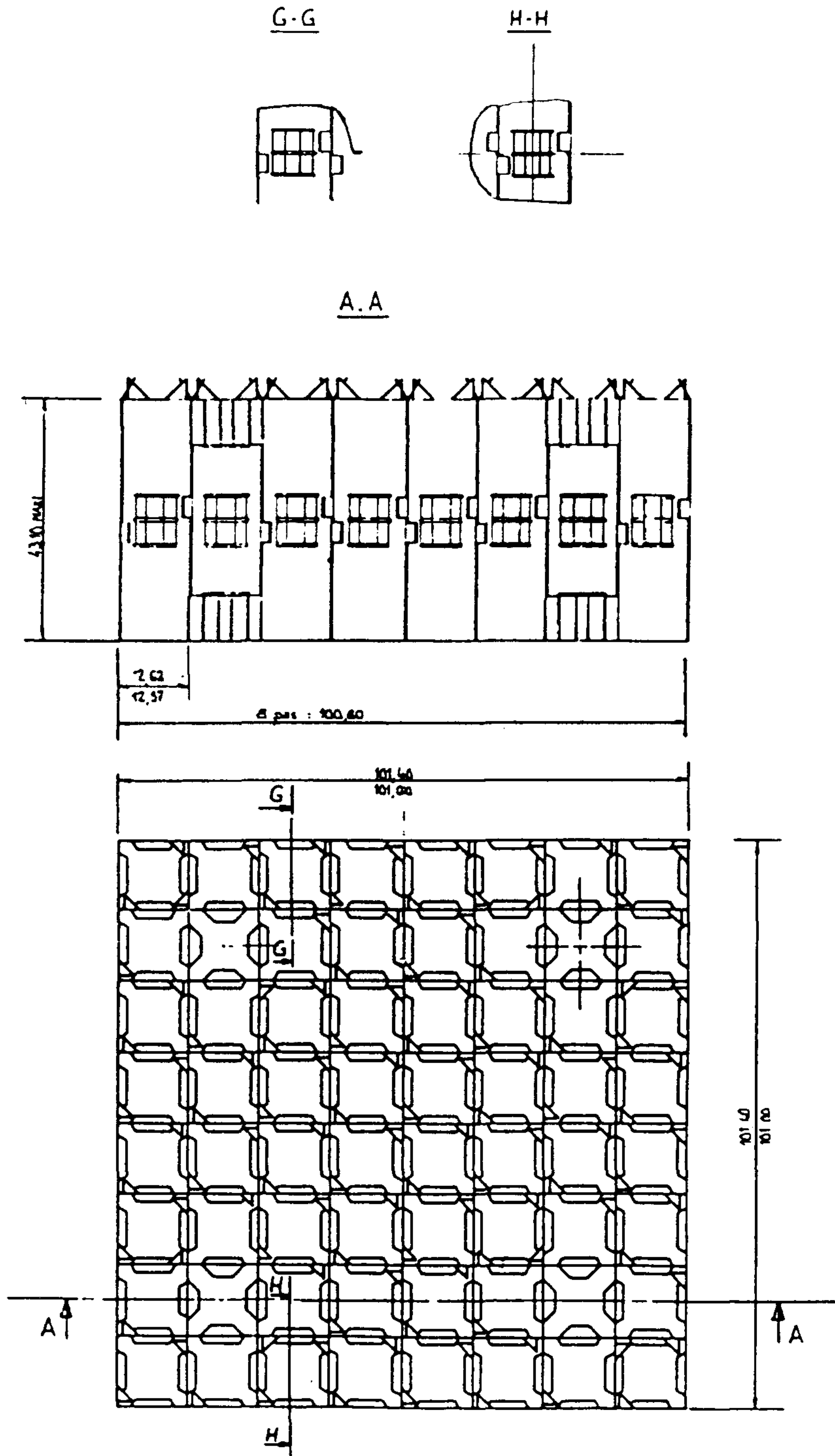
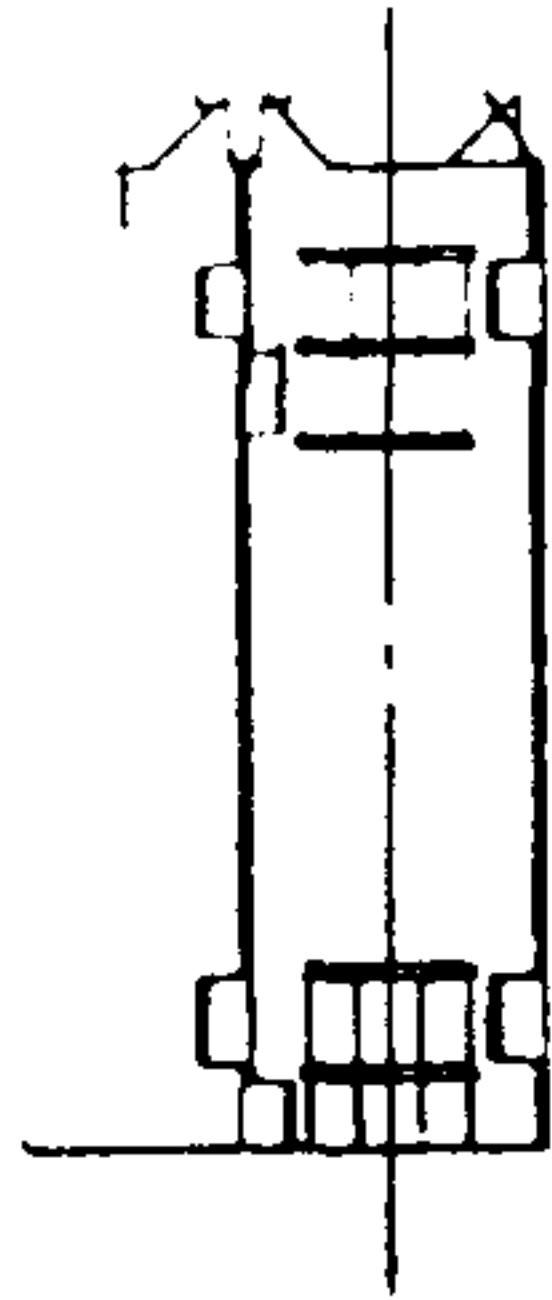
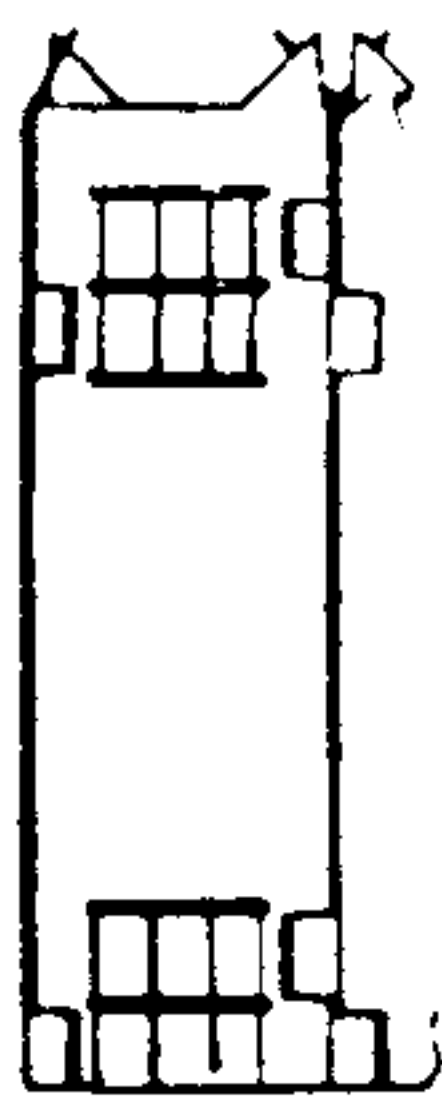


Fig. 4-41 1x1 Type of Spacer Grid for X1 Type of Fuel Assembly

B B

C C



A. A

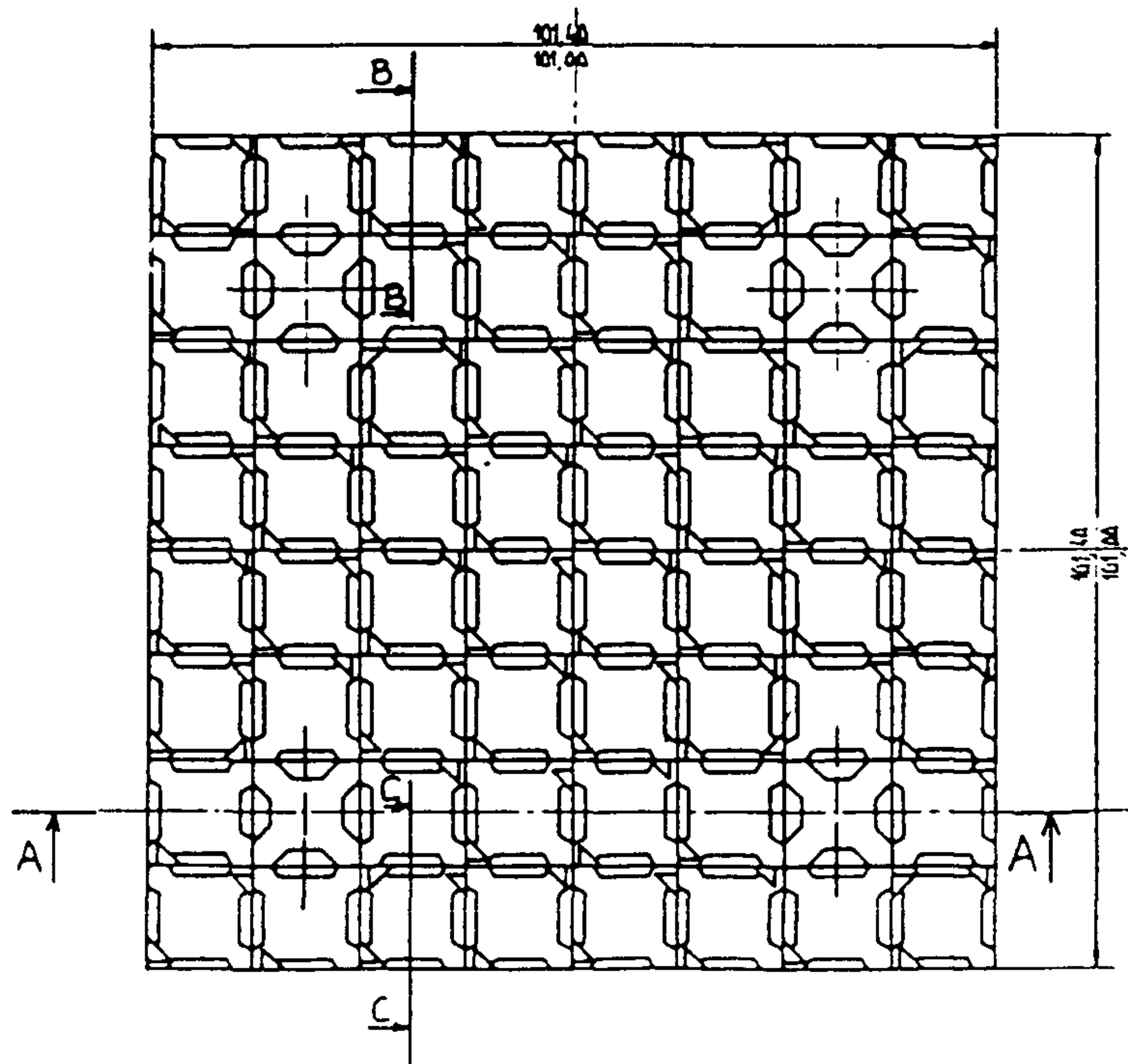
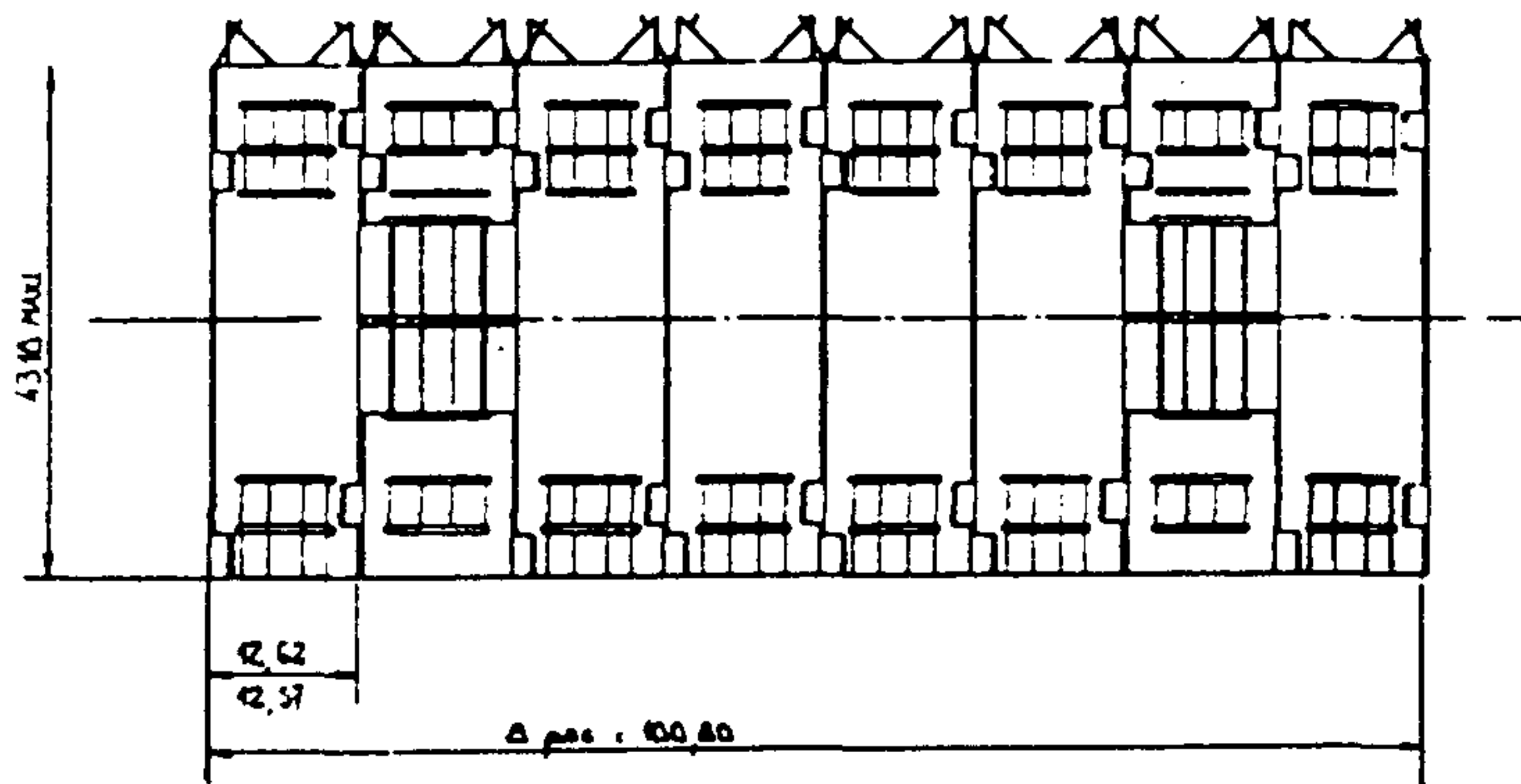
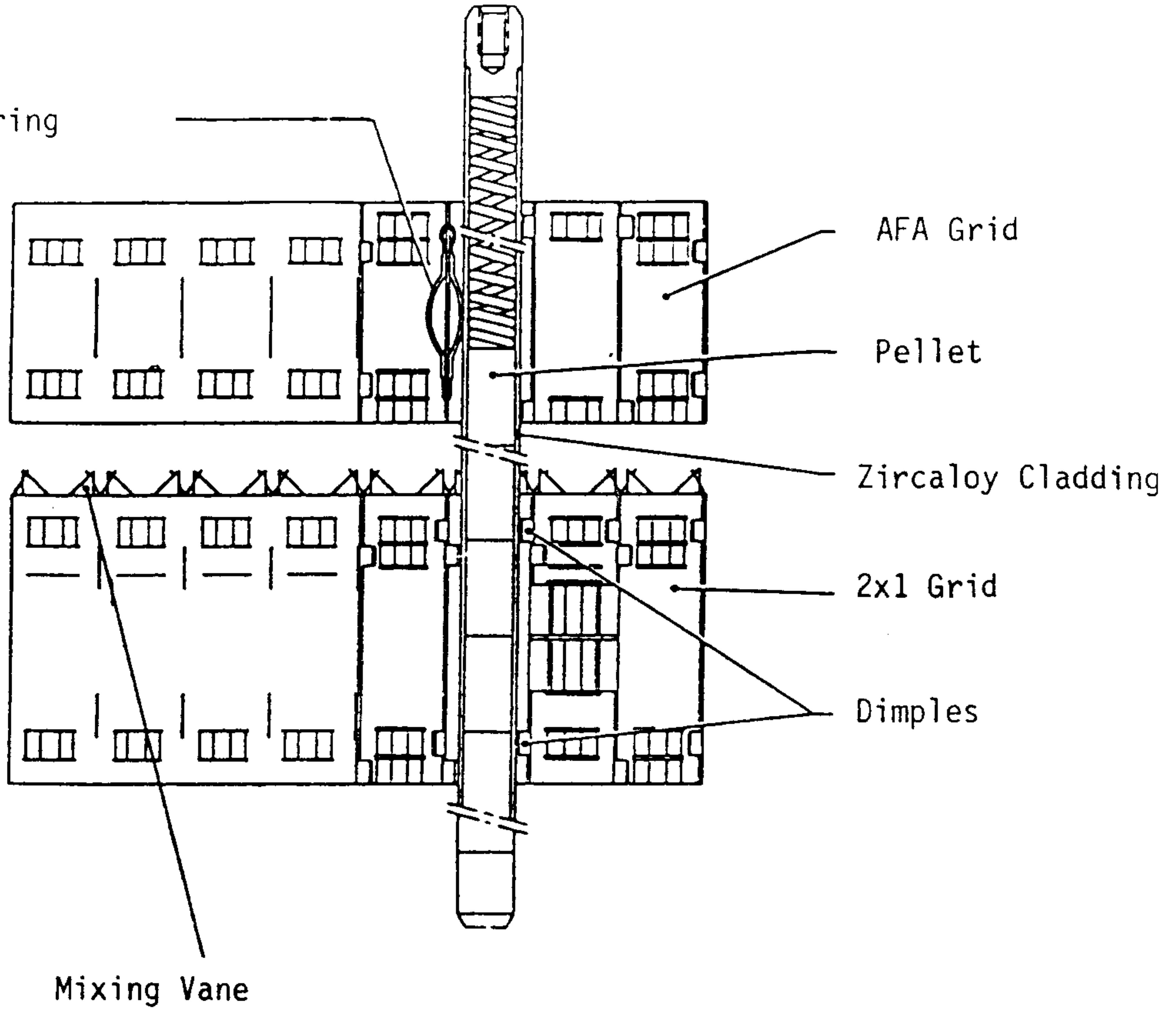


Fig. 4-42 2x1 Type of Spacer Grid for X1 Type of Fuel Assembly

Inconel Spring



Dimple Length : 3.5(10/1)

View of Vane

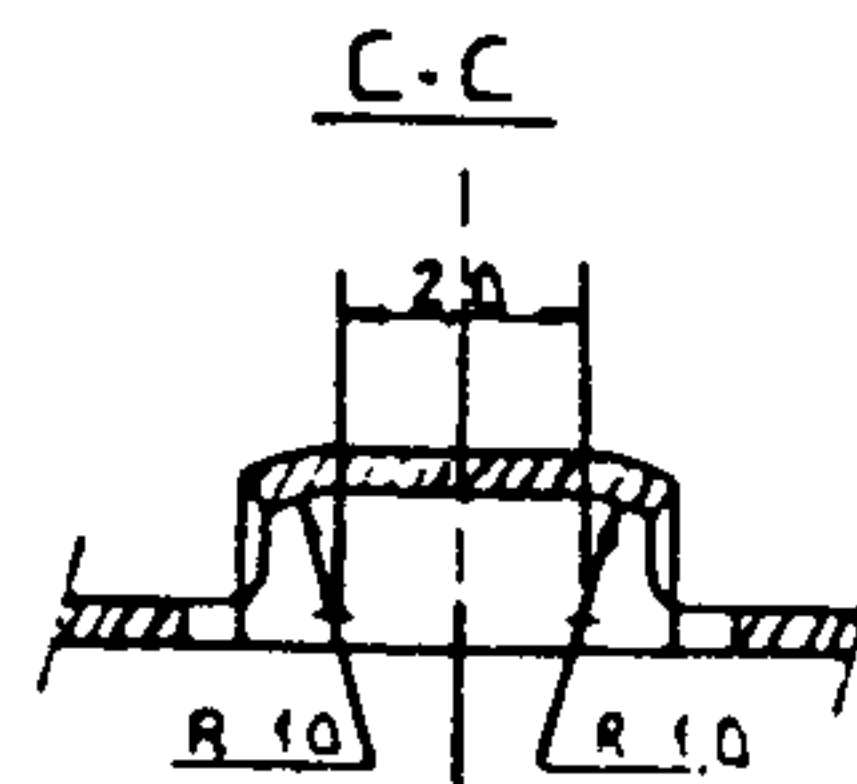
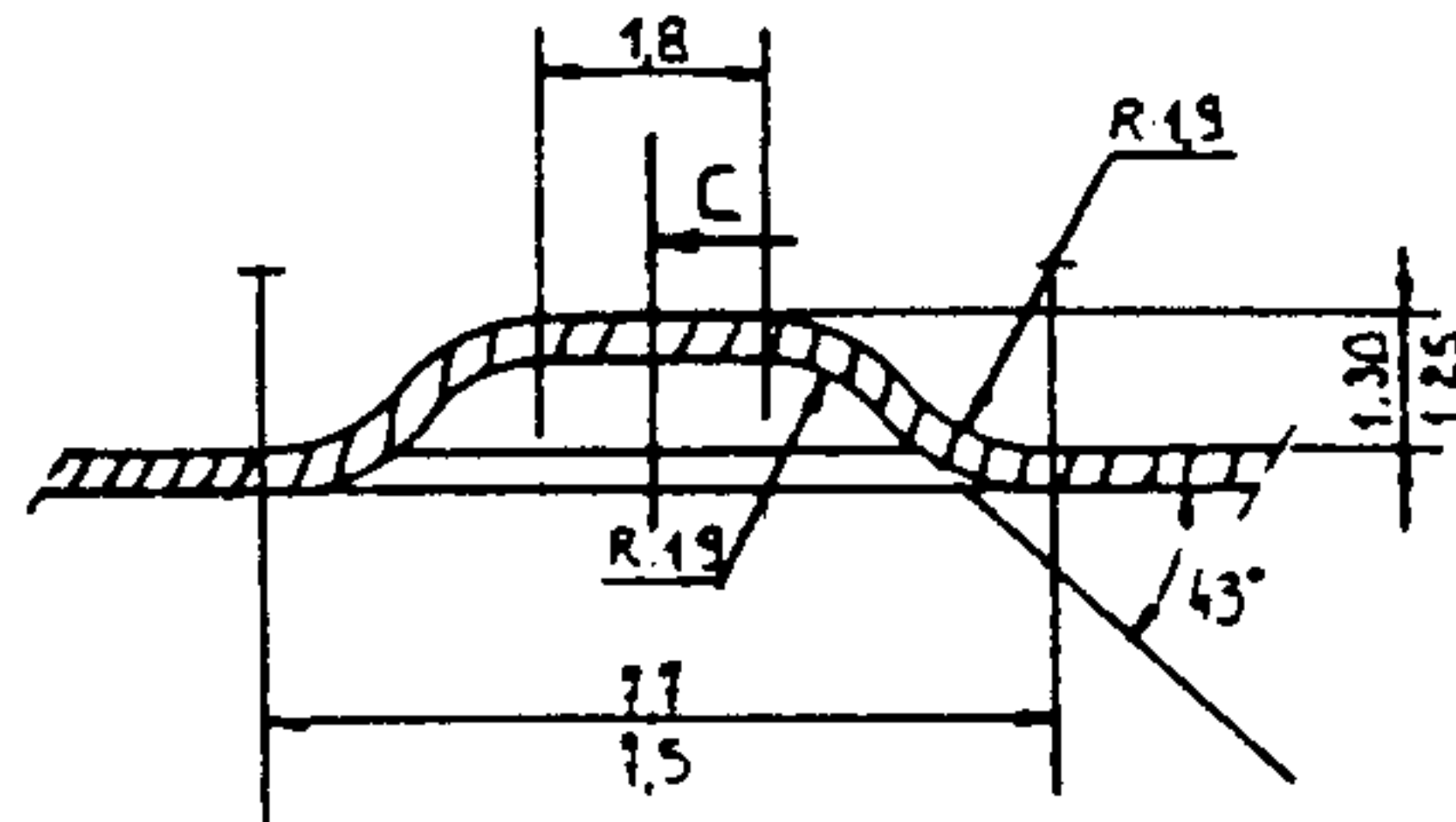
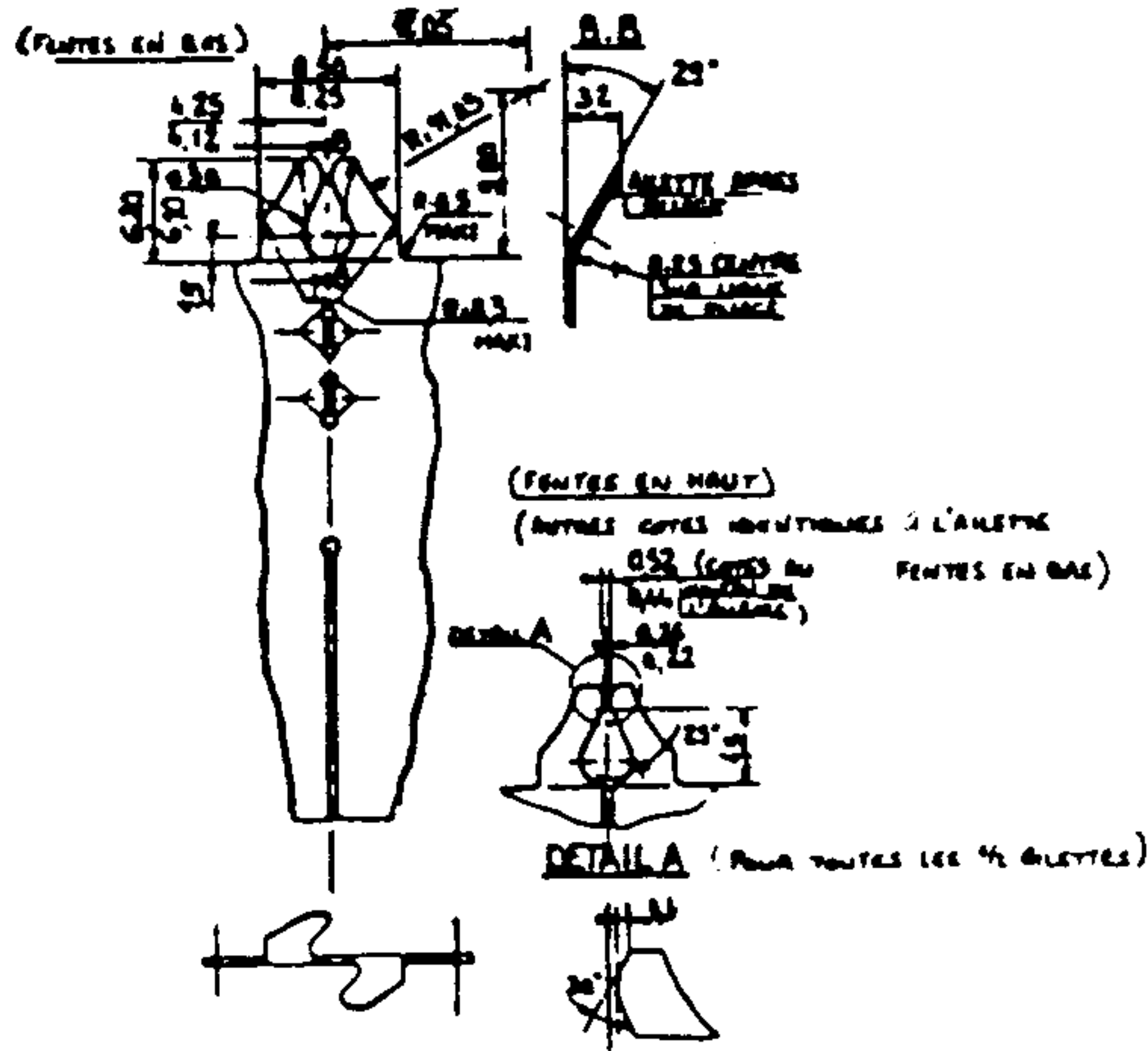


Fig. 4-43 Detailed View of Dimples, Mixing Vanes in Cells & a Fuel Rod

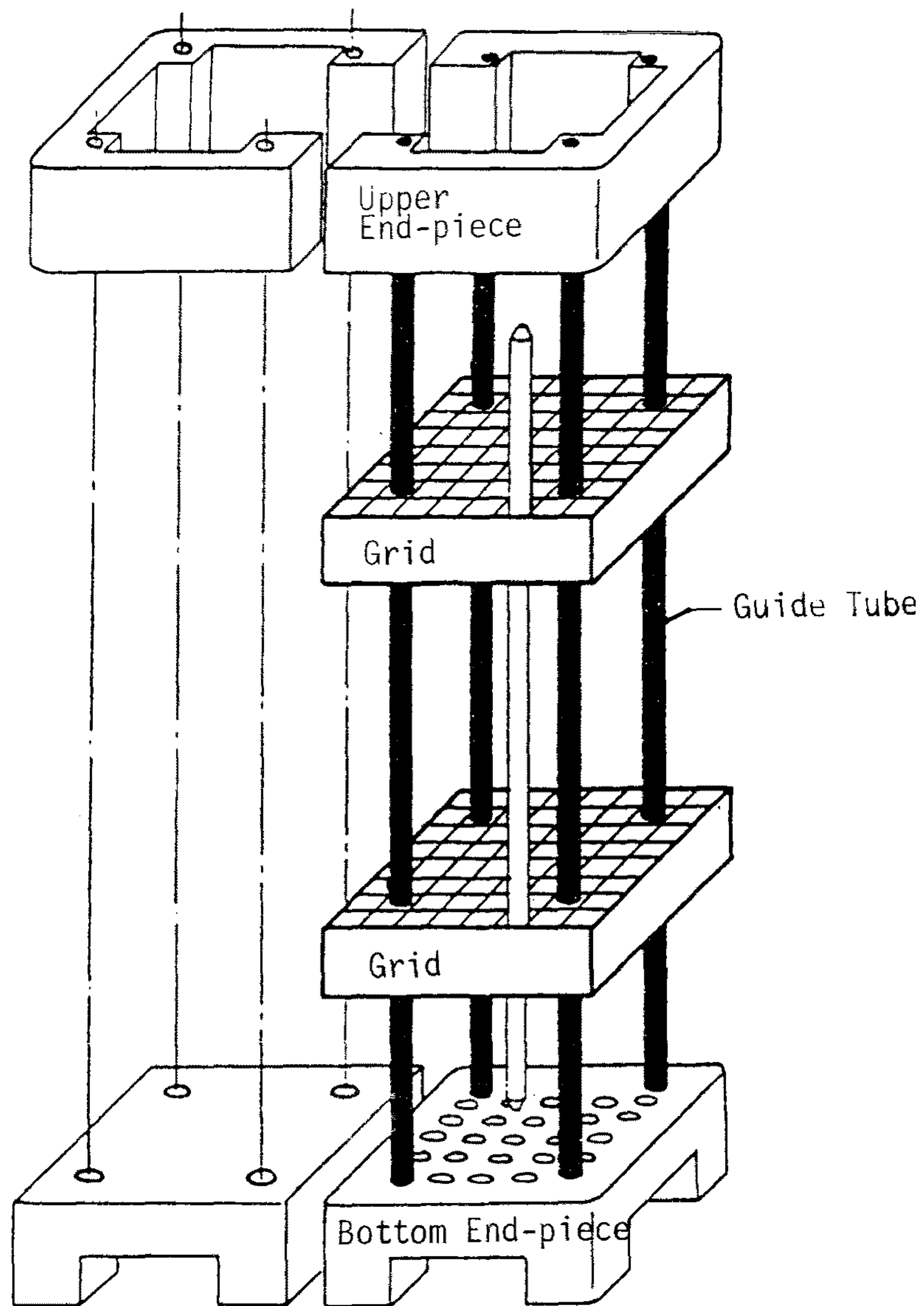


Fig. 4-44 Frame Work of Test Fuel Assembly

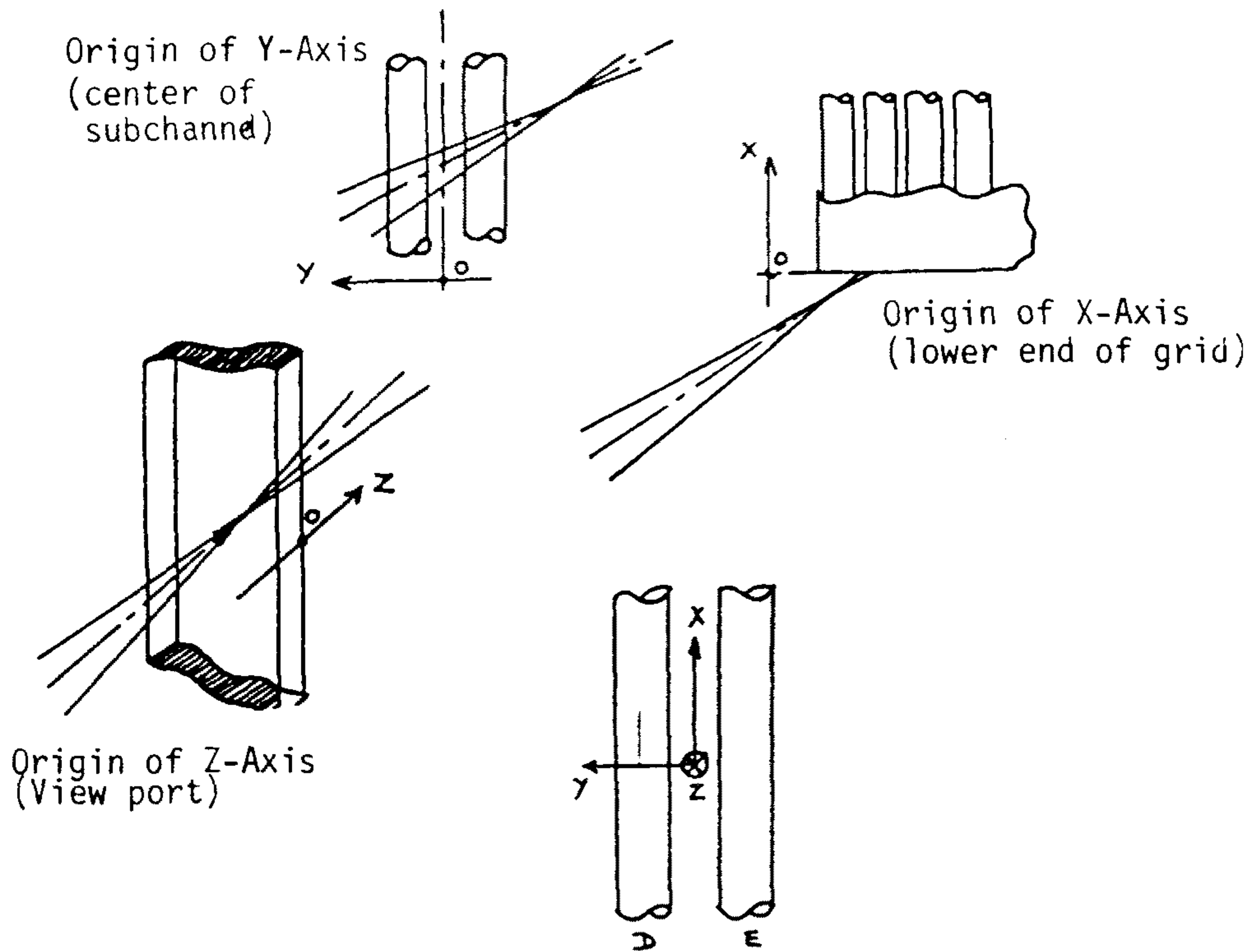


Fig. 4-45 Origin of the Velocity Measuring Fields

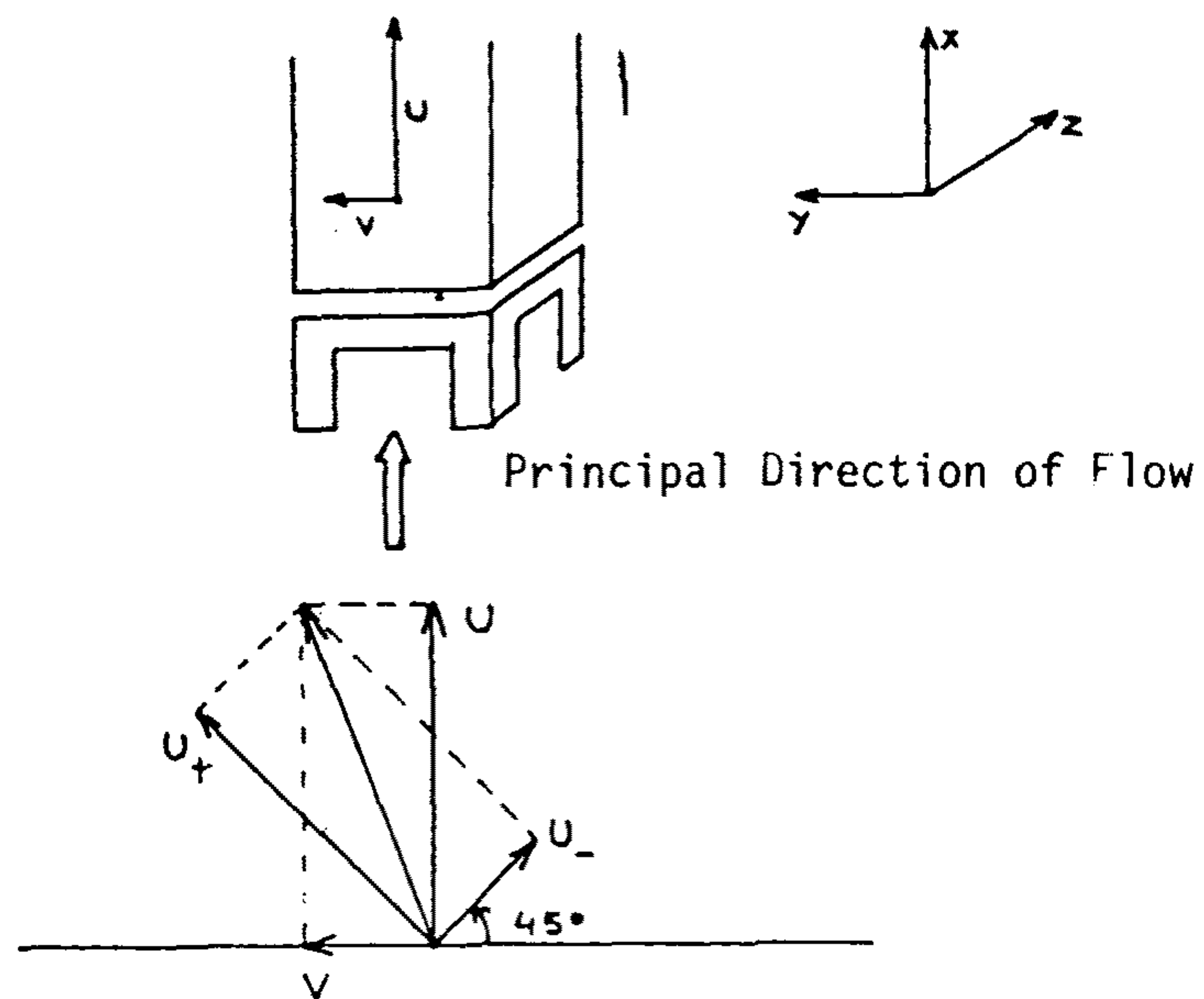


Fig. 4-46 Axial & Transverse Components of Velocity

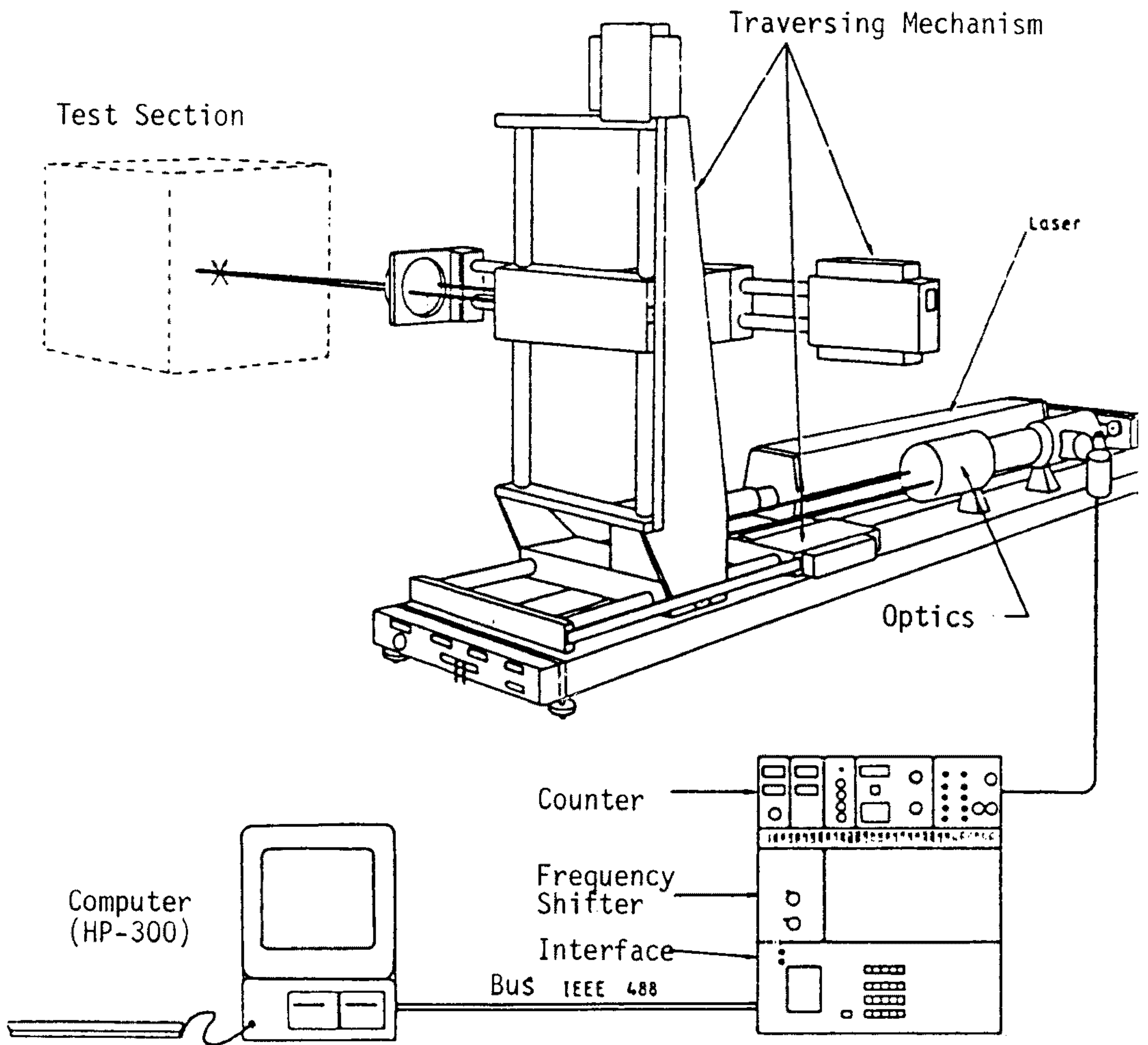
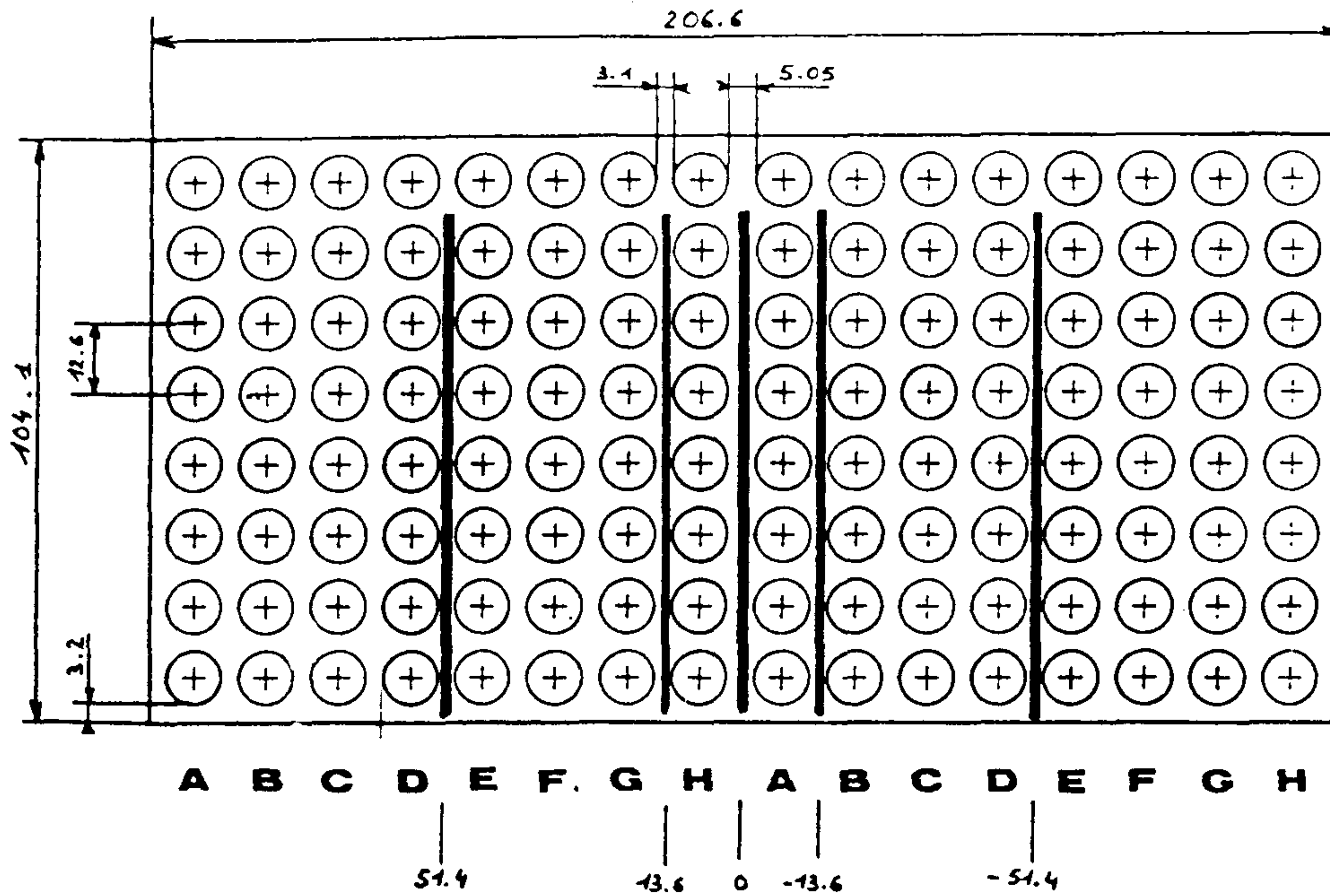


Fig. 4-47 Measuring & Data Acquisition System

a) Beam Paths in Configuration - 1, 2



b) Beam Paths in Configuration-3

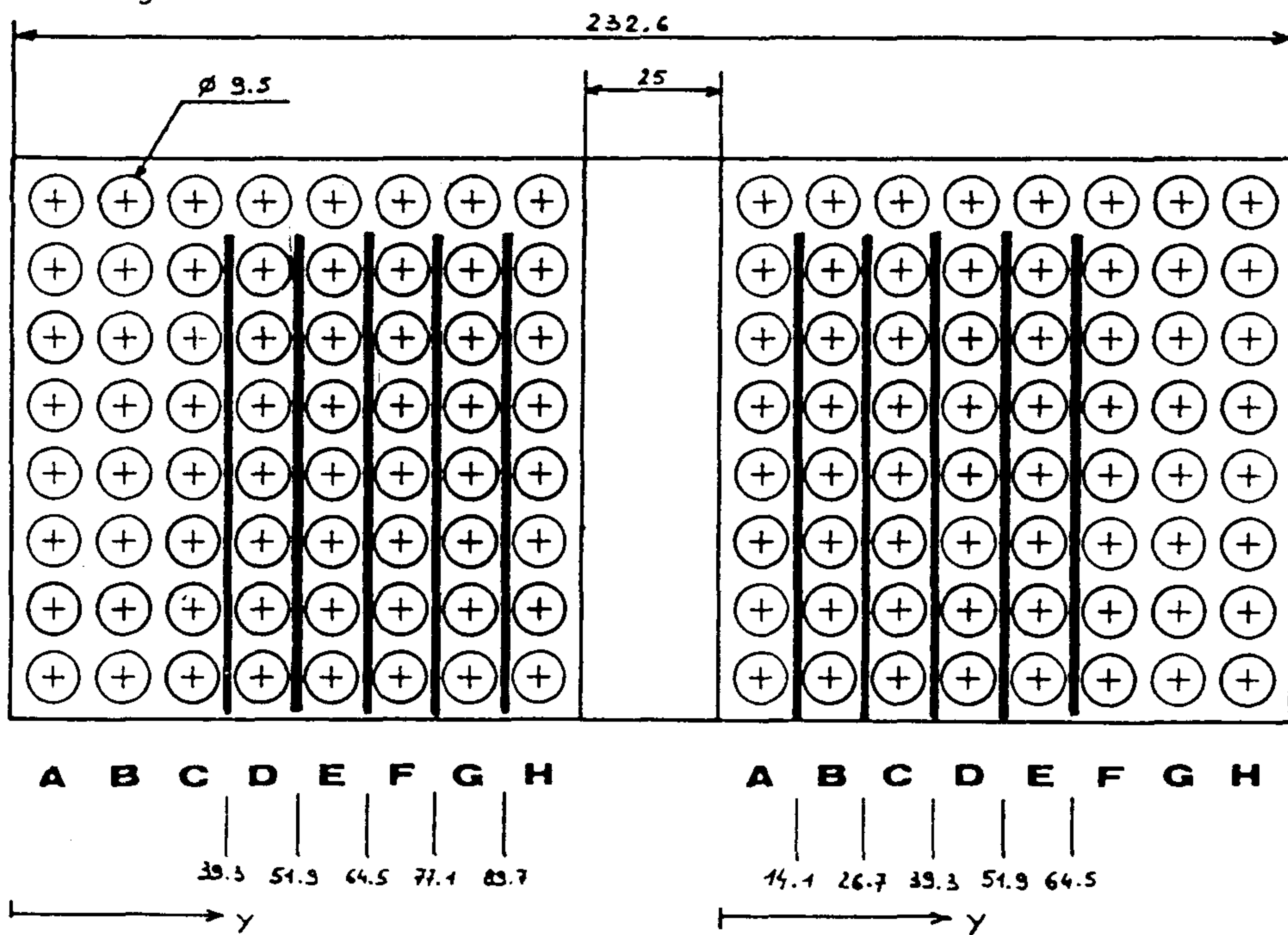


Fig. 4-48 Transversing Paths of the Laser Beam

EDVIGE

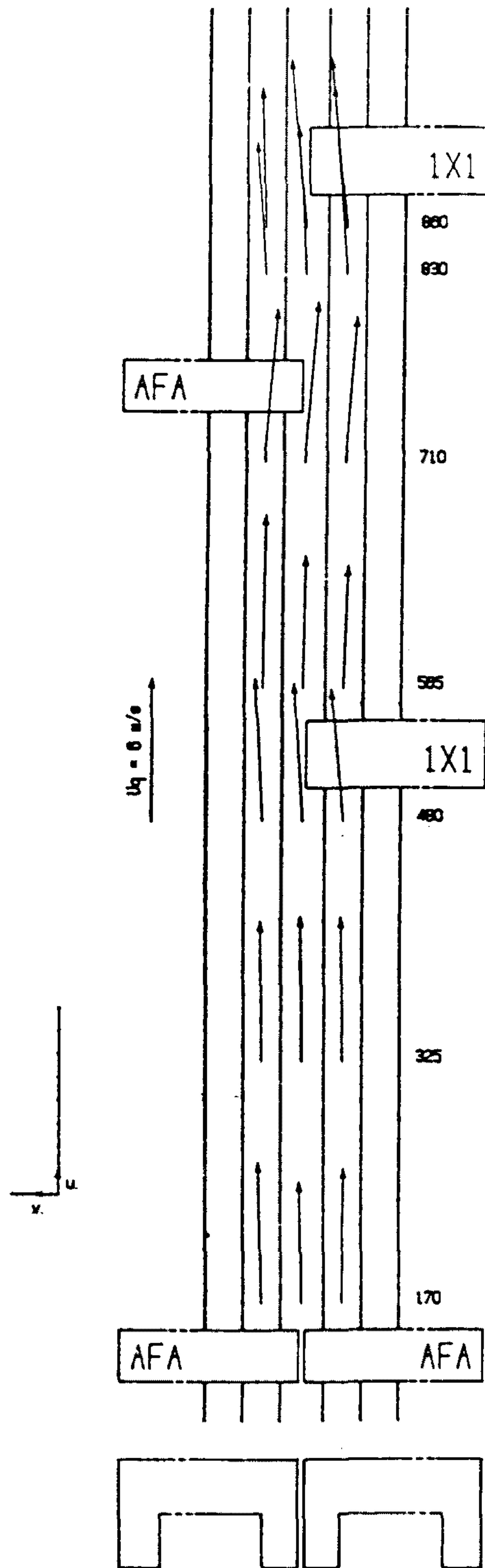


Fig. 4-49(a) Mean Values of Axial Velocity Component in Each Location of the Configuration-1 (EDVIGE)

EDVIGE

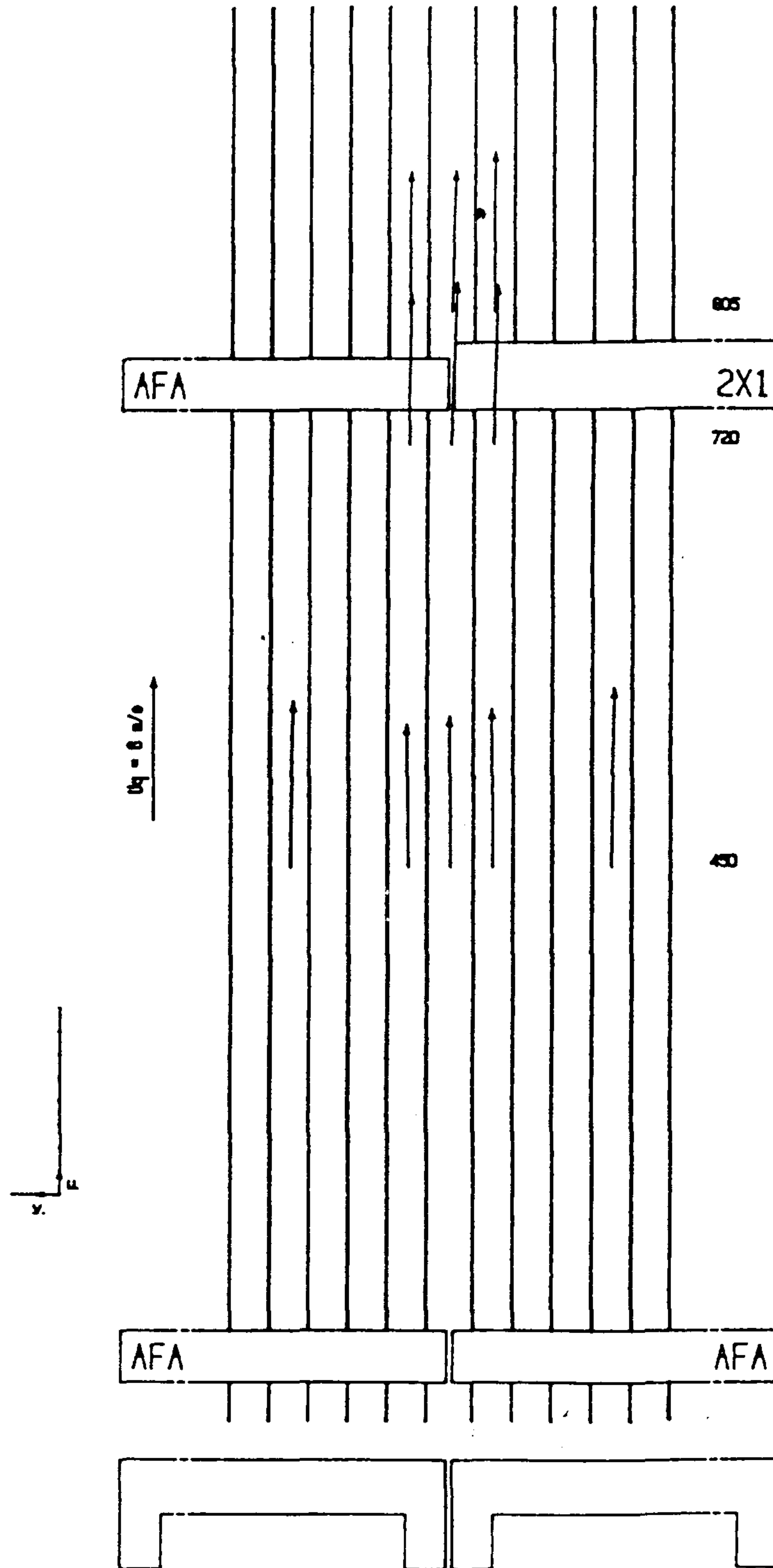


Fig. 4-49(b) Mean Values of Axial Velocity Component in Each Location of the Configuraion-2 (EDVIGE)

EDVIGE

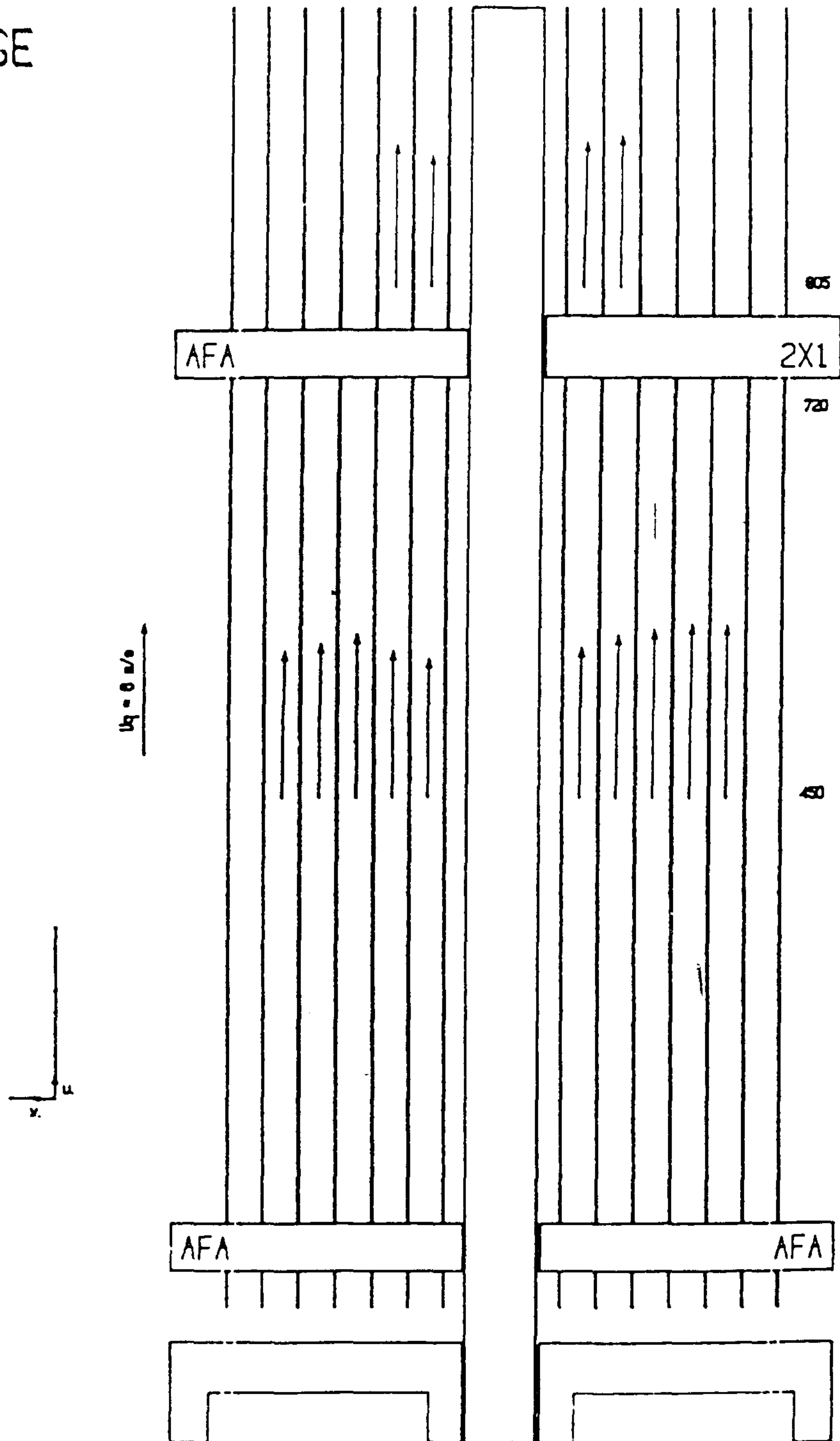


Fig. 4-49(c) Mean Values of Axial Velocity Component in Each Location of the Configuraion-3 (EDVIGE)

EDVIGE

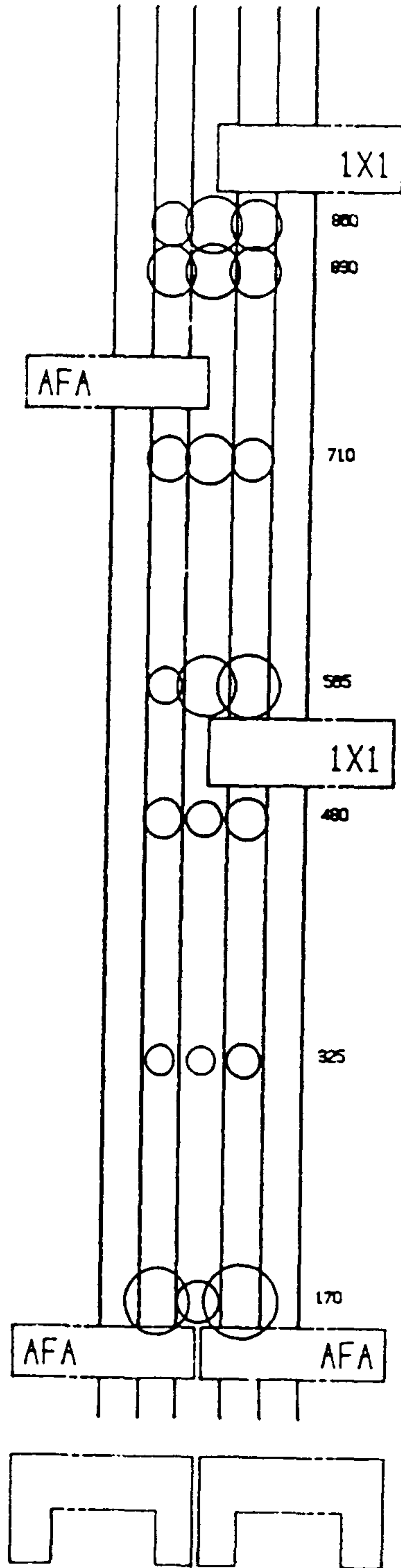


Fig. 4-50(a) Representative Amount of Turbulent Kinetic Energy in Each Location of the Configuration-1 (EDVIGE)

EDVIGE

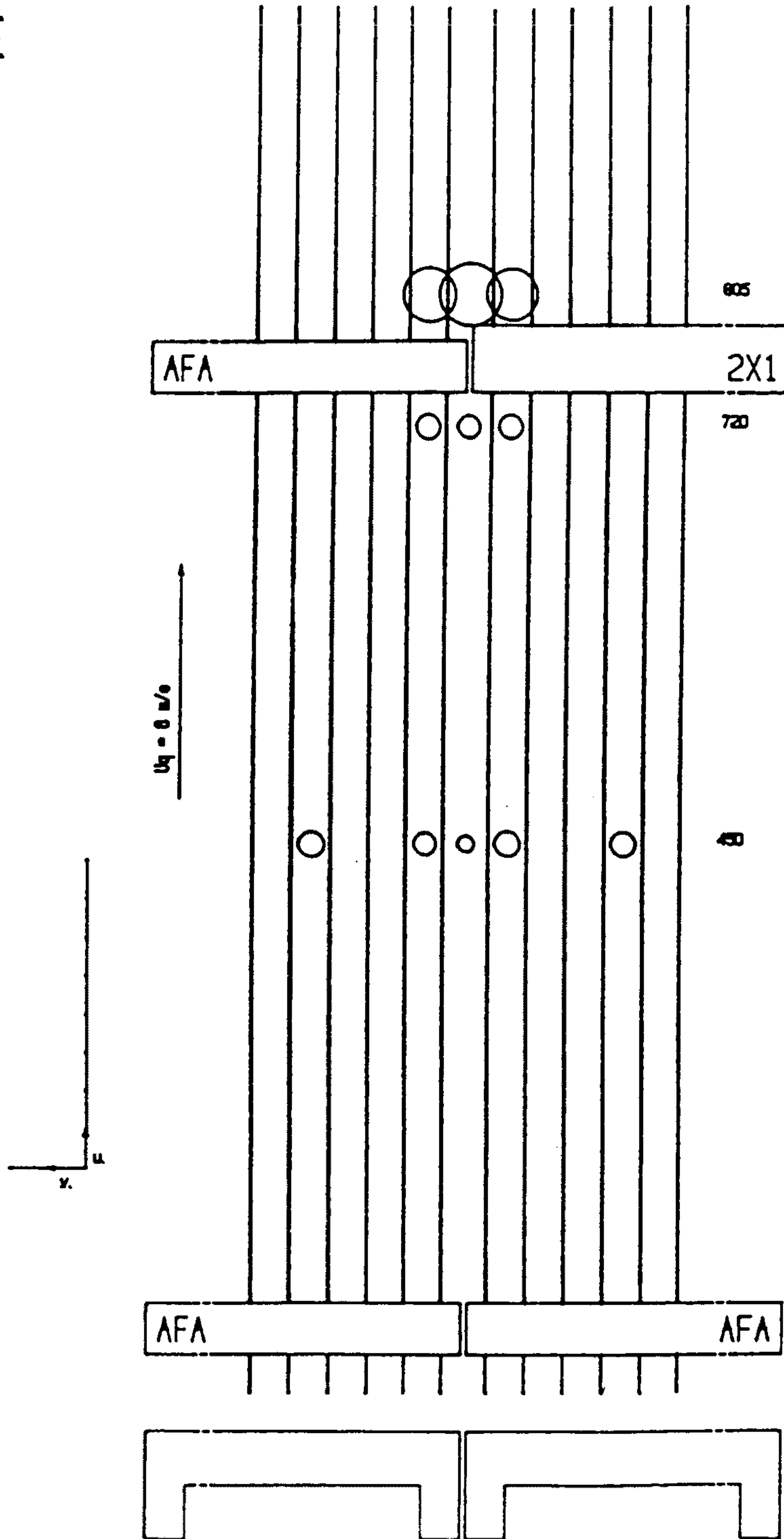


Fig. 4-50(b) Representative Amount of Turbulent Kinetic Energy in Each Location of the Configuraion-2 (EDVIGE)

EDVIGE

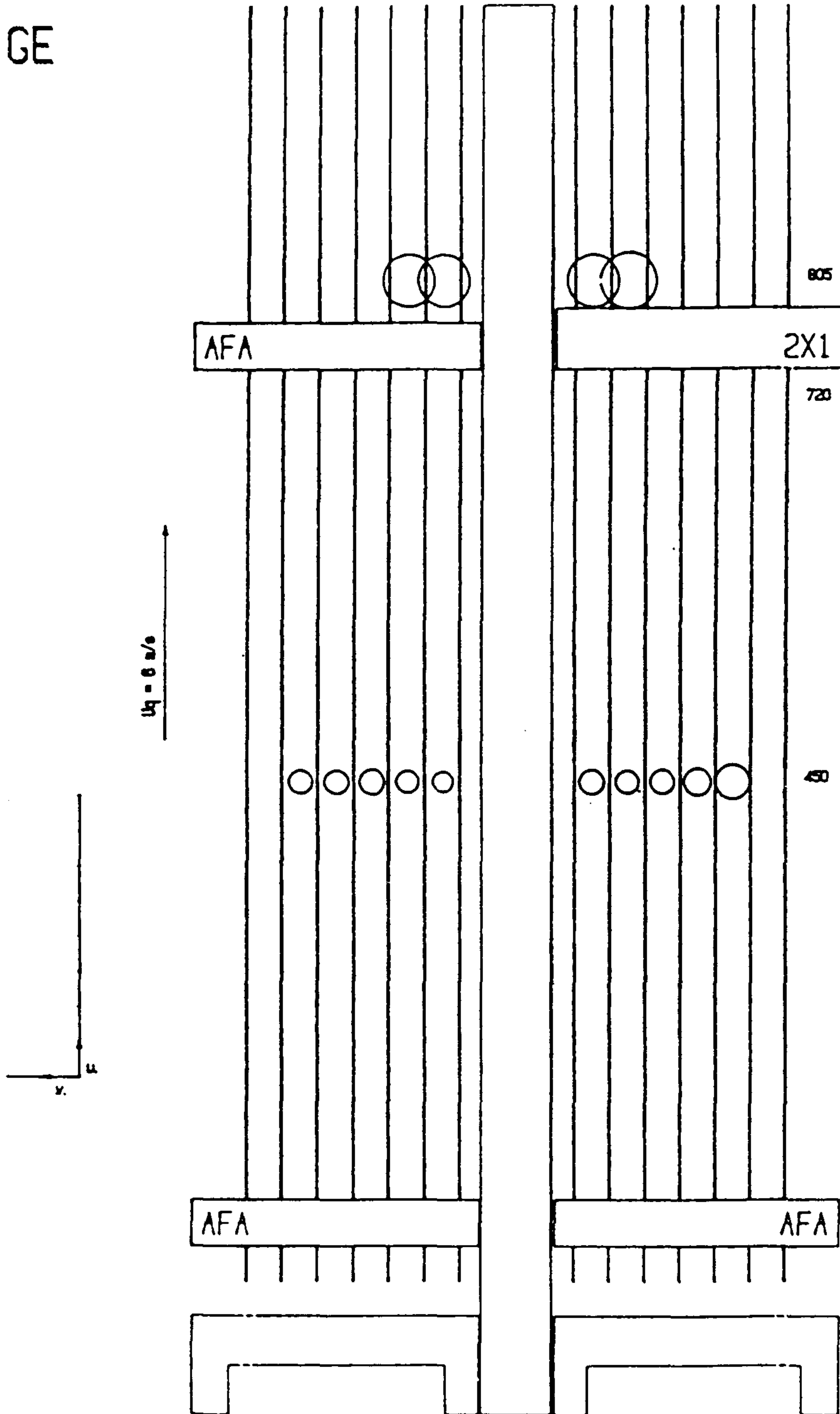
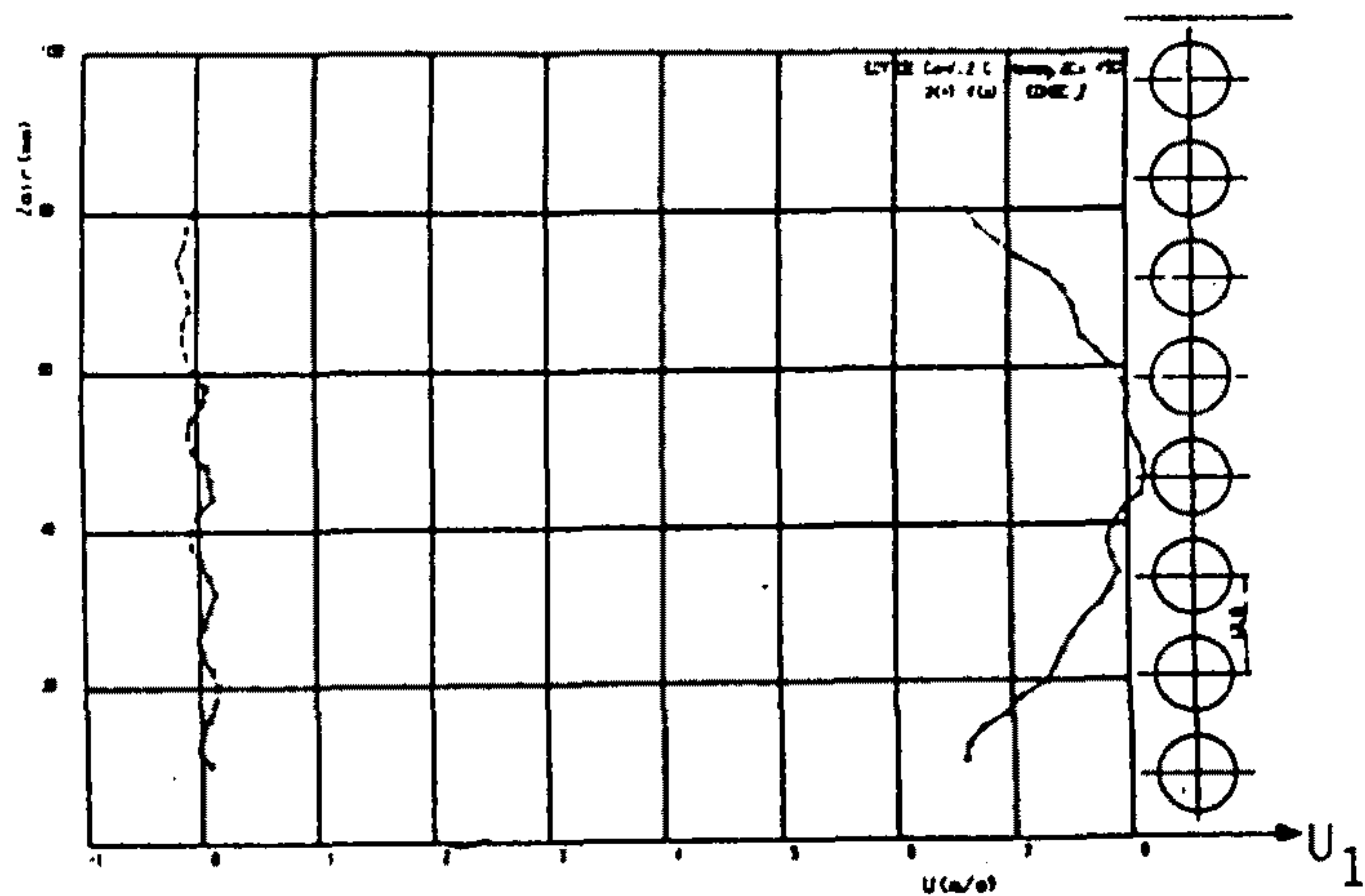
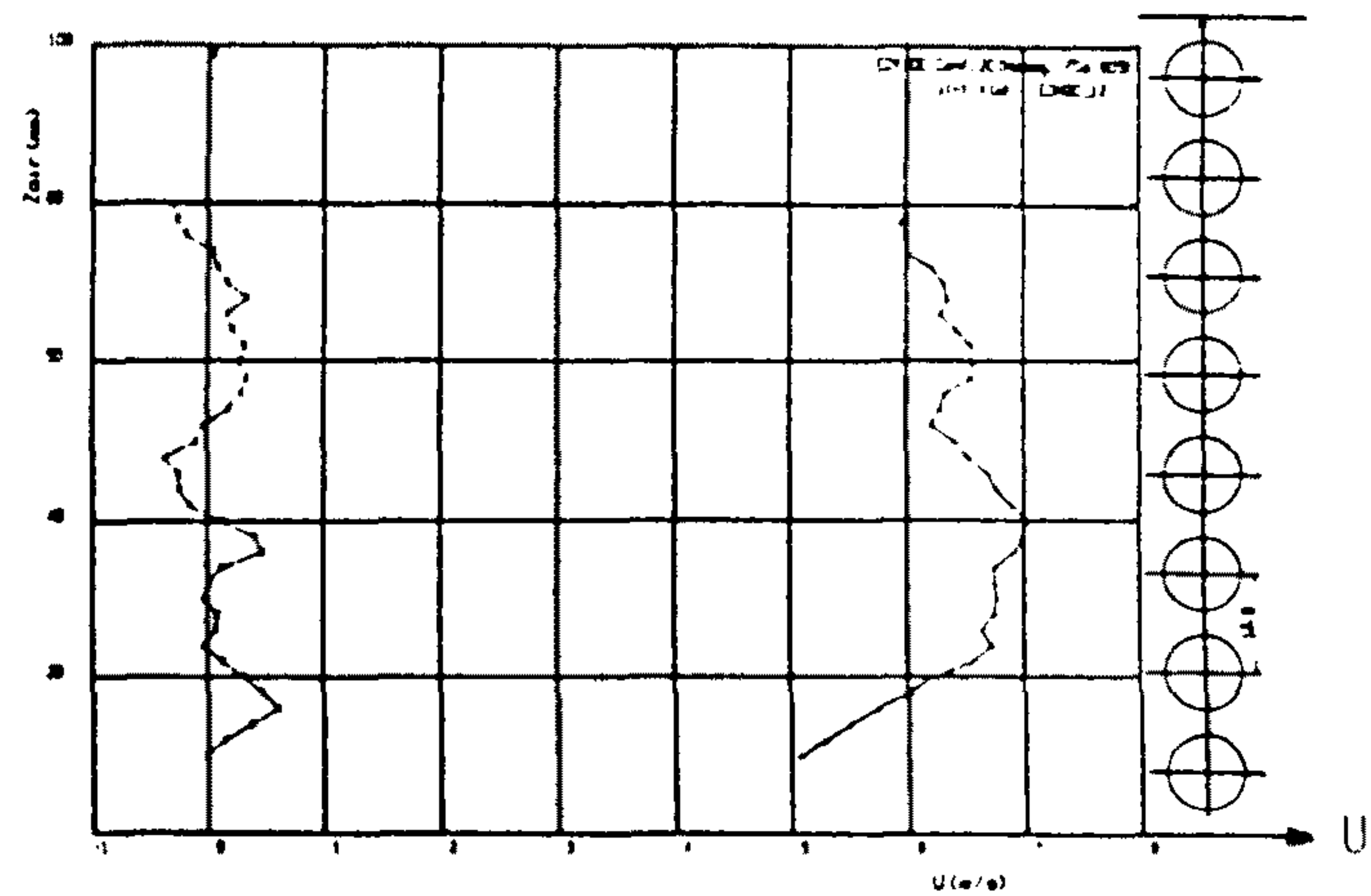


Fig. 4-50(c) Representative Amount of Turbulent Kinetic Energy in Each Location of the Configuraion-3 (EDVIGE)

a) $\bar{U}_1 = 7.241(\text{m/sec})$

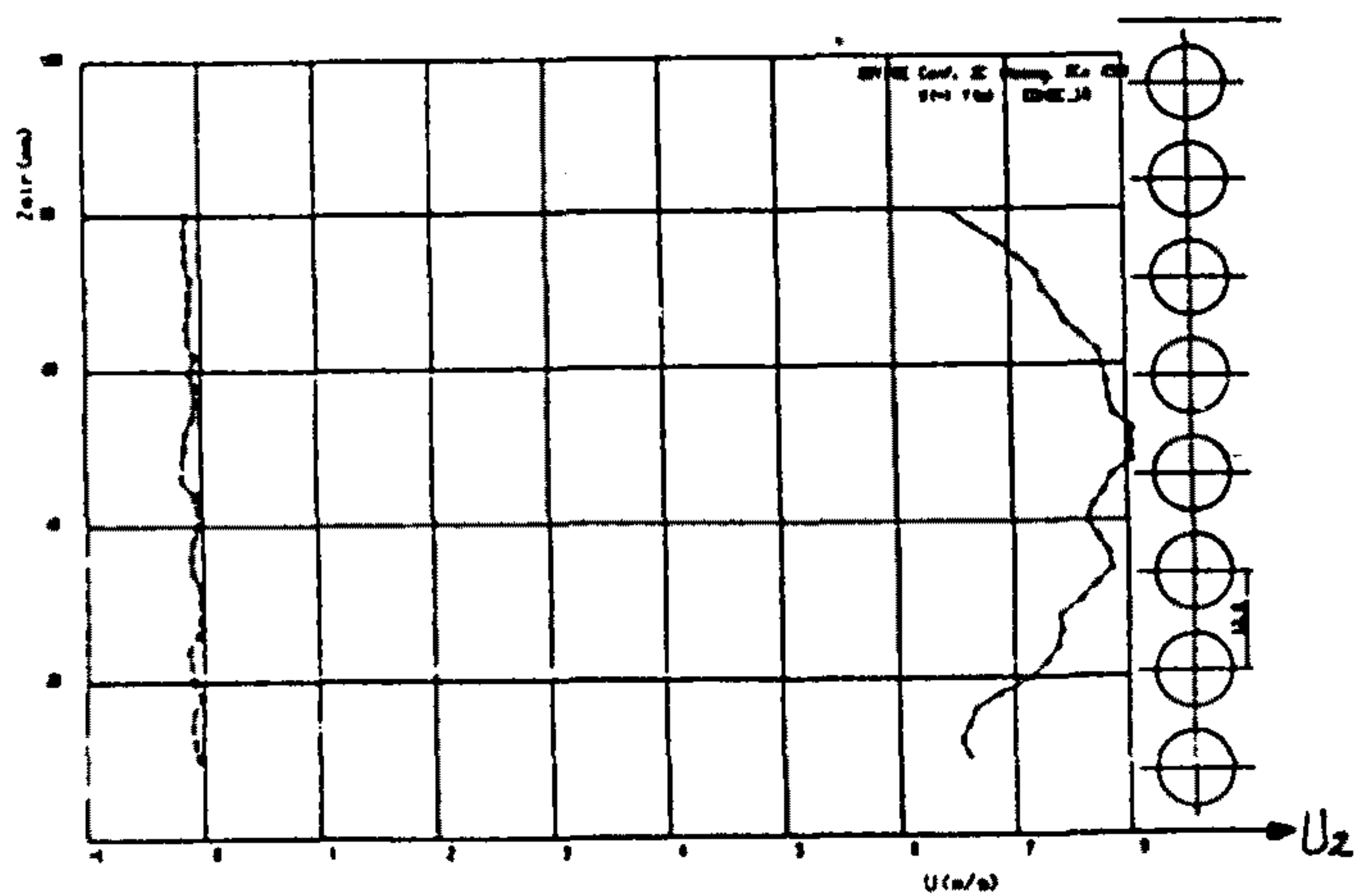


c) $\bar{U}_1 = 6.368(\text{m/sec})$



- 222 -

b) $\bar{U}_2 = 7.158(\text{m/sec})$



d) $\bar{U}_2 = 6.197(\text{m/sec})$

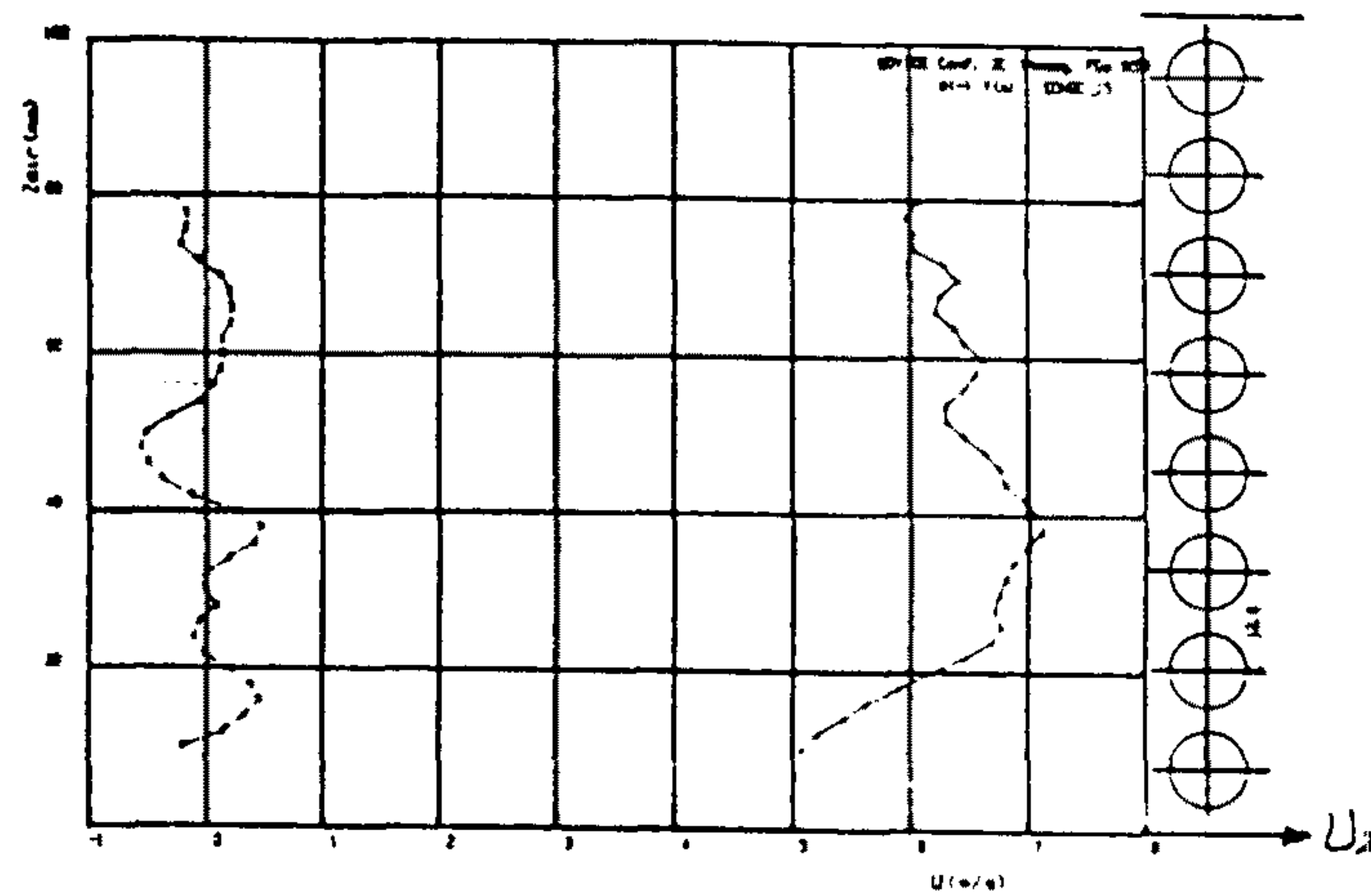


Fig. 4-51 Results for the Data Reproducibility Test for Configuration-2
($U_q = 6 \text{ m/sec}$)

第 3 章 結論 및 建議事項

原子爐에 장전되는 核燃料의 성능을 實證試驗을 통하여 보증하는 것은 핵연료 이용을 향상 뿐만 아니라 원자로의 安全性 확보를 위해서도 매우 중요하다. 이러한 핵연료 試驗技術開發을 위하여 본 연구사업의 2차년도인 당해년도에는 Fullsize PWR 핵연료집합체의 爐外實證試驗裝置를 미국 ANF사로 부터 도입, 당 연구소 핵연료개발계획 및 기존건물에 부합되도록 설계하여 설치공사를 진행하고 있다. 본 장치가 '89년 9월에 설치 완료되면 기존 핵연료와 앞으로 개량될 핵연료 집합체를 대상으로 水力學 實驗資料를 생산하게 될 것이다.

본 연구를 통하여 핵연료집합체 副水路에서의 流速을 첨단기술인 LDV로 측정하는 기술을 개발하였고, 이 기술을 5x5 연료봉에서의 流速分布 및 spacer grid의 流動特性 평가에 활용하였다.

서독 KWU와 불란스의 핵연료 관련 연구기관에서 수행하고 있는 熱水力 실험에 관한 기술정보를 수집.검토하여 앞으로 당 연구실에서 수행하게 될 핵연료爐外試驗에 참고가 되게 하였다.

PWR-Hot Test Loop 시설과 PWR-Cold Test Loop 시설을 이용한 PWR 핵연료 試驗技術 및 測定技術이 확보되면 국산핵연료의 熱水力學的 兩立性이나 健全성을 독자적으로 평가할 수 있게 된다.

여 백

參 考 文 獻

1. "경수로핵연료 노외실증시험 기술개발", KAERI/RR-691/87, 한국에너지연구소, 1988.
2. D. S. Rowe, B. M. Johnson and J. G. Knudsen, "Implications concerning Rod Bundle Crossflow Mixing Based on Measurements of Turbulent Flow Structure", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.17, pp 407-419, 1974.
3. J.O.Hinze, "Turbulence - An Introduction of its Mechanism and Theory", McGraw-Hill, 1959.
4. M. Kh. Ibragimov, I. A. Isupov, L. L. Kobzar and V. I. Subbotin, "Calculation of the Tangential Stresses at the Wall in a Channel and the Velocity Distribution in a Turbulent Flow of Liquid", Atomic Energy, Vol.21, pp 731-739, 1966.
5. V. Vonka, "Turbulent Transports by Secondary Flow Vortices in a Rod Bundle", Nuc. Eng. & Des., Vol.106, pp 209-220, 1988.
6. W. D. Bachalo, "Method for Measuring the Size and Velocity of Spheres by Dual-Beam Light-Scatter Interferometry", Applied Optics, Vol.19, No. 3, pp 363-370, 1980.
7. EdF, "1987 ; Compte Rendu d'Activités", France - EdF, Departement TTA, 1988.
8. M. Courtaud, "Les Etudes de Sureté hors Pile Effectuées pour les Réacteurs à Eau Légère", CEA-BIST, No. 209, Dec., 1975.
9. M. Courtaud et al., "The French Thermal-Hydraulic Program Adressing Requirements of Future Pressurized Reactors", Nuc. Tech., Vol.80, Jan., 1988.
10. G. F. Stevens et al., "A Quantitative Comparison between Burn-out Data

- for Water at 1000 psia and Freon-12 at 155 psia ; Uniformly Heated Round Tubes Vertical Upflow", AEEW-R-327, UK-AEA, 1964.
11. G. F. Stevens et al., "A Comparison between Burn-out Data for 19 Rod Cluster Test Sections Cooled by Freon-12 at 155 psia and by Water at 1000 psia in Vertical Upflow", AEEW-R-468, UK-AEA, 1966.
 12. R. Plas, "FLICA III-M Code de Calcul Thermohydraulique de Réacteurs ou de Boucles d'Essais", CEA-N-2418, CEA, Dec., 1984.
 13. T. Oulmann, "Mise en Place d'une Installation d'Anémométrie Laser Destinée à l'Etude Hydraulique des Grilles d'Espacement des Assemblages de Réacteurs Nucléaires à Eau Pressurisée", Memoire Présenté au CNAM, Dec., 1988.
 14. J. C. Maguin et al., "EDVIGE ; Vitesse d'Écoulement Axiales et Transverses (Configuration 1 et 2)", Note Technique DRE/SCOS/LHC 88/04, April, 1988.
 15. L. Prandtl, "Essentials of Fluid Dynamics with Application to Hydro-lics", Aeronautics, Methodology and Other Subjects, Backie & Son Ltd., London & Glasgow, 145, 1952.

부록 : THLF 운전절차

- I. 정상가동절차
- II. 고온재가동절차
- III. Standard Operation Practices
- IV. 정상정지절차
- V. 긴급정지절차
- VI. 청결도 사양과 화학물질 및 재질제한
- VII. 보수
- VIII. 운전원증명에 대한 요구조건

여 백

I. 정상가동절차

1. 일반사항

1.1 이하 내용은 시동작업 순서대로 기술되어 있으며 THLF의 정상적 시동에 대한 지침으로써 사용된다. Loop가 자동정지계통에 의해 정지된 경우, Loop 재가동은 "고온재가동절차"에 따른다.

1.2 운전일지에는 현재까지의 Loop 운전기록이 기록보관되어 있어야 하며 운전 점검표는 Loop가 운전에 들어가면 매일 기록해야 한다. 운전일지는 Loop 운전일시, 운전원 이름은 물론 운전/보수작업 및 관찰사항등 운전상황에 관한 완전한 기록을 남기기 위해 사용되어야 한다.

1.3 건물 Service의 이상유무를 확인한다.

1.3.1 2차냉각수: 냉각수 공급을 확인하기 위해 펌프 냉각수 밸브 PCV 1을 연다. 확인되면 밸브를 다시 닫는다.

1.3.2 Clean Air: 계장판넬 뒷면과 주입펌프에 위치한 공기공급 압력계를 점검한다. 공기공급에서의 오일 및 수분을 점검하기 위해 계장판넬 뒷면에 설치된 여과기를 Blow Down 한다.

1.4 전기회로를 초기조건 상태로 한다.

1.4.1 다음 차단기 및 스위치가 OFF 상태에 있는것을 확인한다.

- Loop 가열기 SCR 차단기 #2, 4, 6, 8, 10 및 12
- SCR Bias Pot #2, 4, 6, 8 및 10이 0 상태
- 가압기 가열기 SCR 차단기 #5
- 용수처리 펌프 차단기 #7
- 주입펌프 차단기 #9

1.4.2 주전원 차단기를 ON으로 한다.

1.5 Argon 가스탱크로 부터의 공급을 확인한다.

2. Loop 용수공급

Loop 용수는 용수저장탱크에서 저장, 공급된다.

2.1 용수저장탱크에의 용수공급

2.1.1 용수저장탱크내의 외부 이물질 진입 유무에 대해 검사하고 필요한 경우 청소 및 Flushing을 한다.

2.1.2 용수저장탱크에 탱크의 수위표시 지점까지 건물 Demi. 용수를 채운다. 용수처리시설을 가동한다. 필요한 경우 용수

처리시설 가동전에 탈-이온화 장치를 재생시킨다.

2.1.3 저장탱크에서 용수를 채취하고 용수 분석실로 보낸다.

Demineralizer 전기전도도 계로 전기전도도를 점검한다. 전기전도도가 1 micromhos/cm 이하가 될때까지 탱크의 용수를 용수처리 장치에서 재순환 시킨다.

2.1.4 시험계획에서 요구되는 용수화학 성분을 확인하고 Loop 용수를 화학성분 기준에 맞도록 화학첨가물을 첨가하다. 용수를 채취하고 용수 분석실에 보낸다.

2.2 용수보충

2.2.1 용수저장탱크의 외부물질 진입유무를 검사한다. 만약 저장탱크의 용수출구 스크리인을 막거나 Loop 용수를 오염시킬만큼의 외부물질이 존재하면 용수를 배수시켜 탱크를 청소하고 다시 상기의 절차에 따라 새로운 용수를 공급한다.

2.2.2 용수저장탱크에 용수를 보충할 때 건물 Demi. 용수공급 밸브를 열고 용수를 탱크에 채우기 전에 THLF 탈-이온화장치를 통과시킨다.

2.2.3 용수를 화학분석한다.

2.2.4 시험계획에서 요구되는 용수화학성분을 확인한다. 만약 화학성분 기준에 맞도록 용수를 조절할 필요가 있으면 Loop 책임자는 화학첨가물과 첨가절차를 검토, 허가하여야 한다.

2.3 Cover Gas

저장탱크에 Argon Cover 가스를 주입하고 탱크압력을 대기압보다 약간 높은압력 0.2~0.3cm H₂O로 유지한다.

3. Loop 용수충전

용수를 Loop에 충전하기 전에 배관계통에서 공기를 제거하기 위해 진공 펌프가 사용된다.

3.1 냉각 열교환기 밑부분의 계통 Bleed 밸브(SBV1) 근방에 위치한 연결부에 Welch 진공펌프를 설치한다. 펌프와 연결부 사이에 용수 Trap 용기를 설치한다.

3.2 다음 Loop 배기 밸브를 조작한다.

- 펌프 배출배관의 상부에 위치한 VV1을 닫는다.
- Loop 가열기의 상부에 위치한 VV2를 닫는다.
- 가압기의 상부에 위치한 VV3을 닫는다.
- 펌프 케이싱에서 가압기까지의 배관 및 펌프 케이싱에서 계측판넬 뒷면까지의 배관에서의 배기밸브를 연다.

- 3.3 Mechanical Seal 용기의 배기밸브를 닫는다. 배기밸브는 펌프 부근에 위치한 내측 및 외측 Seal 냉각계통의 출구측 배관의 상부에 설치되어 있다.
- 3.4 열교환기의 밸브 HXV 1,2,3,4,5 및 LSV1이 열려있는 것을 확인한다.
- 3.5 Pit 내의 배관계통에서 가장 밑부분에 위치한 Loop 배수밸브를 닫는다. 배관계통 Bleed 밸브 SBV1 및 SBV2를 닫는다.
- 3.6 계측판넬에서의 차압발신기 분기밸브(Manifold Valve)를 모두 연다. 계측판넬 뒷면의 Hi 및 Lo 분기(Manifold) 배기밸브를 닫는다. 3개의 균압밸브(Equalizing Valve) 및 12개의 전달밸브(Transfer Valve)를 연다. Heise 압력계 배관의 Bleed 밸브를 닫는다. Heise 압력계와 연결되어 있는 Orifice 및 가압기 연결밸브를 연다.
- 3.7 진공펌프를 가동시켜 Loop 배관계통에서 공기를 제거한다. 진공 펌프는 진공 Gauge 압력을 약 25" Hg(635mm Hg)로 유지한다. 누설이 최소인 것을 확인하고 약 2시간동안 이 압력을 유지한다.
- 3.8 Loop에서 공기가 제거되고 있는 사이, 주 Loop에 용수를 충전하기 전에 저장탱크의 용수가 O₂ 탈-이온화 장치를 거쳐서 저장탱크에 되돌아 흐르도록 용수 공급밸브를 조작한다. 용수처리펌프를 가동시킨다. 유량한계는 3 GPM(11ℓ /min)이다. 주입펌프에의 용수

공급밸브를 닫은상태로 유지한다.

- 3.9 Loop에서 최소한 2시간동안 공기를 제거하면 진공배관 밸브를 닫아 진공펌프를 연결부에서 분리하고 Argon 실린더를 연결한다. 밸브를 열어 Argon을 대기압으로 Loop에 충전한다. 이 Argon 주입작업은 펌프 Seal을 통하여 Loop 내에 들어오는 공기의 양을 최소화 시키기 위해 될 수 있도록 재빨리 수행해야 한다.
- 3.10 Loop가 Argon으로 채워지면 Argon 실린더 및 Argon 주입배관의 밸브를 닫고 Argon 주입배관 연결부를 Plugging한다. 밸브 WTV1이 닫혀있으면 열고 용수 처리펌프를 가동시켜 Loop를 가압한다. Loop내에 Trapping 되고 있는 가스를 제거하고 Heise 압력계의 배관과 같은 비어있는 배관에 용수를 채우기 위해 Loop의 모든 배기밸브(가열기 및 가압기의 배기배관이 열려있는 상태로 유지한다.)에서 소량의 용수를 배출시킨다. 완전히 공기를 배기한 후 계측판넬 뒷면의 Hi 및 Lo 분기 배기밸브를 닫는다. Heise 압력계 배기밸브 및 Orifice 연결밸브를 닫는다. 가압기와 Heise 압력계를 연결하는 배관에서의 밸브를 연상태로 한다.
- 3.11 수위계용 차압발신기의 Hi 및 Lo 배기밸브와 가압기 압력발신기의 배기밸브를 천천히 평등하게 연다. 이들 발신기들은 THLF의 3층 높이에 위치한다. 완전히 배기가 되면 모든 배기밸브를 천천히 평등하게 닫는다.

3.12 Loop가 용수로 채워지면 밸브 LSV1 및 WTV1을 닫고 용수처리펌프를 정지한다.

3.13 배기밸브 VV3을 열고 Heise 압력계를 Zero에 Set한다.

3.14 "Pressurizer Low Level" Annunciator등을 Reset 한다.

4. 윤활유

4.1 순환펌프의 베어링 오일저장 용기의 오일수위를 오일공급장치 용기 (Oil Feeder Bottle)를 관찰하는 방법으로 점검한다.

4.2 속도감속기 오일저장용기의 수위를 점검한다. 펌프 정지시에는 오일수위는 Borg-Warner 변속기의 관찰유리창의 상단에 위치해야 한다.

4.3 주입펌프 오일저장용기의 수위를 점검한다. 수위는 워엄톱니바퀴의 상단 밑으로 1/2" 정도의 위치어야 한다. 교정된 오일게이지 붓을 사용하여 정기적으로 점검한다.

4.4 지정된 윤활유를 사용하여 Gland Housing 선단의 Grease Fitting에서 주입펌프 Plunger Gland에 윤활유를 주입한다.

5. Loop 가동전 점검

5.1 THLF가 가동준비가 완료된 상태인 것을 확인하기 위해 모든 전기, 기계, 압력작동기기, 운전 및 안전절차를 재점검한다. Loop 구역을 점검하고 모든 공구, 부스러기, 플라스틱 및 가연성 물질을 제거한다. 기중기를 Pit의 서쪽에 이동시킨다.

5.2 운전판넬 좌측 상부에 위치한 계장전원을 ON으로 한다. 해당 Button을 누르고 판넬의 Annunciator를 침묵시키고 Reset한다. 자동정지계통을 "Bypass" 상태로 한다. Annunciator 밑에 4개의 가열기 Interlock(붉은등)를 Reset한다. "Ground Fault" 만이 Reset되어야 한다. 그 Name Plate 에서의 설명에 따라 Ground Fault 검출기를 점검한다. 모든 Annunciator의 등이 기능하는지 확인하기 위해 "Test" Button을 누른다.

6. Loop 누수 검사

THLF를 정상적인 유량 및 온도로 운전하기 전에 운전압력에서 누수검사가 수행되어야 한다.

6.1 Mon-0-Con 압력계에서 시험사양 압력보다 5% 높은 압력에 "Pre-ssurizer High Pressure" Annunciator 등을 Reset 한다.

- 6.2 용수가 Loop에 완전히 충전된 상태에서 주입펌프에 들어가는 배관에 위치한 밸브 WTV3를 연다.
- 6.3 수위제어기 Mode를 수동으로 하고 설정치를 Zero로 한다. 수동 Mode에서는 설정치 제어 Knob는 주입펌프에 의한 주입유량을 제어한다. 압력-유량 기록계에 기록지를 장착한다.
- 6.4 운전판넬에서 주입펌프를 가동시킨다. 이때 밸브 SBV1 및 SBV2에서의 Solenoid 밸브는 열린 상태가 되어야 한다.
- 6.5 주입펌프의 수동제어를 사용하여, 압력계의 압력상승을 관찰, 주위하면서 주입유량을 증가시킨다. Heise 압력계, Mon-O-Con 압력계 및 기록계의 원형기록지에서의 붉은 Pen이 모두 응답하는 것을 확인한다. 명백한 누수가 없으면 압력을 200psig(14 kgf/cm²)로 올리고, 주입펌프 행정을 Zero로 돌린다.
- 6.6 SBV1에서의 Solenoid 밸브가 열려 있는지를 밸브 SBV1를 열고 압력이 떨어지는 것을 관찰하므로써 점검한다. 같은 방법으로 SBV2에서의 Solenoid 밸브가 열려있는지 점검한다.
- 6.7 주입유량을 증가시켜 계통압력을 시험사양 압력의 1/3까지 올린다. 주입유량을 Zero로 줄이고 Loop에서의 누수를 검사한다. 이와 같은 방법으로 시험사양 압력의 2/3 및 사양 압력까지 높여 관찰을 반복한다. 누수가 있으면 밸브 SBV1를 열어 계통압력을 200

psig(14 kgf/cm²) 이하로 줄여 누수를 막아 이 절차를 되풀이한다.

6.8 시험압력까지 계통압력을 올리고 주입펌프를 정지시켜 Bleed Solenoid 밸브의 작동상태를 점검한다. 밸브는 닫혀져야 한다. 압력감소율을 관찰하고 SBV1를 연다. 압력감소율은 변하지 않아야 한다. 밸브 SBV1를 닫는다. 이 절차를 SBV2에 대해서도 되풀이한다. 압력감소율이 변하는 경우, 탱크에 되돌아 오는 Bleed 배관에서의 누수를 조사한다. 운전일지에 관찰결과를 기재한다.

6.9 주입펌프 주입률이 Zero의 조건에서, 주입펌프를 재가동시키고 계통압력을 400 psig(28 kgf/cm²)까지 줄이기 위해 SBV1를 연다.

6.10 수위계가 Full Scale 인것을 점검한다. 만약 의심한 경우 수위계 차압발신기의 Bleeding을 반복한다. Annunciator를 Reset 한다.

7. 가압기의 가동

가압기내의 물을 대기압보다 약간 높은 압력에서 비등이 발생하는 온도까지 올리는데 약 3시간의 가열이 필요하다.

7.1 가압기 가열기 제어기의 설정 다이얼을 제어기 편차계(Deviation Meter)가 중간지점을 지시하도록 돌린다. 다이얼의 지시x2.5는 Heise 압력계에서의 계통압력에 일치해야 한다. 다이얼의 지시를

20 Unit 줄인다. 편차계는 우측으로 1구획(Division) 이동해야 한다.

7.2 가압기 SCR 캐비닛의 문에 위치한 "Pressurizer Heating Mode" 선택 스위치를 OFF로 한다.

7.3 가열기 냉각용 선풍기를 가동시킨다. 스위치는 주판넬의 주입펌프 제어 스위치 아래부분에 위치한다.

7.4 "Pressurizer Low Level" Interlock를 확인한다. 이를 수행하기 전에 가압기 SCR 제어기를 Zero 전원(편차계에서 우측)으로 Set 한다.

7.4.1 가압기 SCR 차단기를 ON으로 한다. "Pressurizer Low Level" 또는 "Ground Fault" Interlock가 Trip 조건(붉은등이 켜진상태)이면 차단기는 ON으로 되지 않는다.

7.4.2 "가압기 저수위" Interlock(또는 "Ground Fault" Interlock)을 붉은등 아래부분에 설치된 Button을 눌러 Reset한다. 붉은등은 꺼진다.

7.4.3 7.4.1의 절차를 반복한다. 차단기는 ON으로 된다.

7.5 가압기 제어기의 편차계가 중간 또는 우측을 지시하고 있는것을 확인한다. 가압기 SCR 주 차단기를 ON으로 한다. 가압기 SCR 판넬에서의 SCR 스위치를 ON으로 한다. 가압기의 4 kW 및 8 kW 가열기의 스위치를 ON으로 한다.

7.6 가압기 SCR 판넬에서의 전류계를 보면서 가압기 가열기 제어기의 설정 다이얼을 천천히 올린다. 전류계는 약 27 Ampere까지 올라간다. 설정 다이얼을 300 Units(750 psig : 53 kgf/cm²)까지 올린다. 이 절차는 뒤이어 수행되는 Bleed 운전시의 압력진동에 의한 가열기 반복 부하를 최소화 할 것이다.

7.7 가압기 가열기가 가동된 시간을 운전일지에 기재한다.

8. 압력측정 배관계통의 배기

압력측정계통에서 모든 공기를 배기하기 위해서는 고압력에서 계통의 배기를 수행할 필요가 있다. Loop 압력을 Bleed 율에 맞게 주입률을 조절하므로써 200 psig(14 kgf/cm²)와 400 psig(28 kgf/cm²) 사이로 유지한다.

8.1 고압력측 분기배관 B에서 26개의 계측배관 밸브를 연다.

8.2 3개의 차압발신기의 균압밸브(Equalizing Valve)를 연다.

- 8.3 고압력측 분기배관 B에서 6개의 전달밸브 BTV1, BTV4, BTV5, BTV6, BTV7 및 BTV8을 연다.
- 8.4 저압측 분기배관 A에서 밸브 ATV1, ATV2, ATV4, ATV5, ATV7 및 ATV8을 연다. 판넬뒷면에 설치된 저압력측 분기배관에서 Bleed 밸브를 연다. (Bleed는 최소한 20분을 요한다.) 저압력측 분기배관에서 Bleed 밸브를 닫는다.
- 8.5 판넬뒤에 위치한 4개의 차압측정 발신기의 각각에 대해 차츰차츰, 평등하게 Hi 및 Lo 배기밸브를 연다. 공기를 포함되지 않는 용수를 최소한 1분동안 배출시키고 차츰차츰 평등하게 배기밸브를 닫는다.
- 8.6 전달밸브 BTV 1,4,5,6,7,8 및 ATV 1,2,4,5,7,8을 닫는다. 균압밸브가 열려있는 상태에서 W&T 압력계로 각 차압발신기의 Zero 치를 읽고 기록한다.
- 8.7 압력분기배관을 점검하기 위해 50" H₂O 차압발신기에 연결되어 있는 2개의 분기배관 전달밸브를 열고 균압밸브를 닫는다. 한개의 배관에 대한 고압력 및 저압력 분기배관밸브, 예를들어 PT-1A 및 1B를 제외한 모든 분기밸브를 닫는다. W&T 압력계를 읽고 기록하고 Zero 지시와 비교한다. 0.02 psi 이내의 차이가 요구된다. 이 범위내에 들어가지 않는 경우 다시 Bleed 시켜야 한다.

- 8.8 Orifice 측정배관을 점검하기 위해 2개의 분기전달 밸브를 닫고 50" H₂O 차압발신기에 연결되어 있는 2개의 Orifice 전달밸브를 연다. W&T 압력계를 읽고 기록하고 Zero 지시와 비교한다. 0.02 psi 이내의 차이로 일치하여야 하고 필요하면 다시 Bleed 시켜야 한다.
- 8.9 압력측정배관을 점검하기 위해 2개의 Orifice 전달밸브를 닫고 50" H₂O 차압발신기에 연결되어 있는 2개의 분기 전달밸브를 연다. 사용하는 모든 압력탭에 대한 즉 DP 1a-1b, 1a-2b, 1a-3b등에 대한 W&T 압력계의 지시를 읽고 기록한다. Zero 지시와 비교한다. 0.02 psi 이내의 차이로 일치하여야 하고 부족한 배관에 대해서 Bleed가 필요하다.
- 8.10 모든 차압분기 배관밸브와 모든 분기전달밸브를 닫는다. 250" H₂O 차압발신기에 대한 2개의 Orifire 분기전달 밸브를 연다. 균압밸브를 닫은 상태로 둔다.
- 8.11 포화 압력-온도 함수발생기의 저압력 한계 Trip 압력을 점검하고 Reset 한다.
- 8.11.1 포화 압력-온도 계측구역내의 "Low Pressure Trip Reset" Button을 누른다. 포화 압력-온도 Interlock을 Reset한다 만약 Loop 압력이 저압력 한계 이상이면 붉은 등은 꺼진다

8.11.2 붉은 등이 켜질때까지 SBV1을 사용해서 계통압력을 줄인다
계통압력을 읽는다.

8.11.3 "Low Pressure Trip Reset"와 Interlock Reset Button을
누르면서 계통압력을 올린다. 등이 꺼지는 압력을 읽는다
이 압력은 Loop 가열기를 운전하는데 요구되는 저압력
Trip Reset 압력이다.

8.11.4 분기배관 밸브의 누수점검

- (1) Loop 압력을 50 psig(10 kgf/cm²) 이하로 한다.
- (2) 모든 분기배관 밸브를 닫는다.
- (3) 50" H₂O 차압발신기에서 밸브 ATV1 및 BTV6을 연다.
- (4) 분기배관 밸브중에서 한쌍(5a-5b, 15a-15b 등) 을
연후,
- (5) 닫는다.
- (6) W&T 압력계를 관찰한다.

압력계 바늘이 움직이면 밸브누수의 가능성이 있다. 바늘이 높은 압력
쪽으로 움직이면 저압력 분기배관 밸브에서 누수가 있을 것이고 바늘이 낮은
압력쪽으로 움직이면 고압력 분기밸브에서 누수가 있을 것이다.

판넬 뒤에 설치된 저압력 분기배관에서 Manifold Bleed Return에서 배관
(또는 Cap)을 제거한다. 상기 (4) 및 (5)의 절차를 반복하고 분기배관의
Bleed를 연다. Fitting의 열려있는 부분에서 용수가 새어나오는지 확인하고
새어나오는 경우 누수밸브를 찾아 #10 Plunger 및 O링 Seal 2개를 교환한다.
모든 누수를 막을때까지 (4),(5),(6)의 절차를 되풀이 한다.

만약 필요하다면 고압력 분기배관의 누수를 검사하고 수리한다.

9. 가압기의 Flashing

가압기를 약 3시간 가열한 후에는 대기압 보다 수 psi 높은압력에서의 비등이 발생하는 온도가 된다.

9.1 수위제어기 Mode를 자동으로 한다. 제어기의 수위 설정치를 50%로 높인다.

9.2 계통압력을 낮추기 위해 SBV1 및 SBV2를 연다. SBV1 배관에서 Orifice를 우회하는 Bypass 배관을 연다.

9.3 압력이 Zero에 접근하면서 압력은 안정된다. 이것은 가압기의 물이 Flashing 하기 시작할 때 일어난다. 압력이 안정되지 않고 압력이 Zero로 떨어지면 용수 저장탱크에서 2개의 Bleed 배관으로부터 용수가 유출되고 있는지 점검한다. 만약 2개의 배관중 어느 한쪽 배관이 Bleed 되어있지 않으면 Loop내에 공기가 들어오는 것을 막기위해 SBV1를 닫는다.

9.4 Loop에서 Bleed 용수가 없는 상태가 계속 지속되면 가압기내 물은 수위가 제어기 설정치로 떨어질 때까지 수증기로 변한다. 이 설정치에서 주입펌프에 의한 용수주입 유량은 수위를 유지하기 위해 증가한다.

- 9.5 "Pressurizer High Level" Annunciator등을 Reset 한다.
- 9.6 SBV2를 닫고 SBV1을 연다. 주입펌프 제어공기가 5 psi로 작용하도록 Bleed를 조절한다. 이것은 Loop 압력이 높아짐에 따라 주입 물이 증가하도록 작용한다.
- 9.7 "Saturation Pressure-Temperature" Interlock는 계통압력이 200 °F(93 °C) 이하의 Loop 온도에서 70 psig(12 kgf/cm²)에 도달할 때까지 Loop 가열기가 계속 ON 상태가 되는것을 방지한다. 압력이 올라가는 사이 Loop가 시동되면 가압기 가열기의 제어기 설정치를 130 Units로 Set한다. 이 절차는 Reset 압력까지 가압기의 최대 가열을 보장한다. 가압기가 장시간(Overnight) 압력증가 상태 일 때 80 psig(12.6 kgf/cm²)에서 일정하게 유지하도록 설정치를 Set한다. 이것은 가압기와 주 Loop의 온도차이가 Interlock를 Reset 하는데 필요한 온도차이를 넘는것을 방지한다.

10. 순환펌프의 가동

순환펌프는 Loop 압력이 20 psig(1.4 kgf/cm²) 이상인 상태에서 가동 시켜야 한다. 한계 유량과 이에따른 Orifice 차압을 결정하기 위해 시험 계획서를 확인한다. Loop 압력이 500 psig(45 kgf/cm²) 이상일때는 12.4.항을 참조한다.

10.1 펌프 2차냉각수

순환펌프의 기초판에 위치한 냉각계통들, Cool Down 열교환기 및 계측배관 냉각탱크에 2차냉각수를 공급한다.

10.1.1 2차냉각수 배관밸브 PCV1를 연다.

10.1.2 PCV2, PCV4 및 PCV5가 열려있는지 확인한다. 이 밸브들은 2개의 소형 Graham 열교환기, 베어링 오일냉각계통, Pedestal 냉각계통, Packing Gland 냉각계통 및 변속기의 열교환기에 공급되는 냉각수 유량을 제어한다.

10.1.3 밸브 PCV3가 2회전 열린상태인 것을 확인한다. 이것은 대형 Graham 열교환기에 공급되는 냉각수 유량을 제어한다.

10.1.4 유량계 FI 1,2,3,4에서 유량을 관찰한다. 이때 Flashlight를 사용한다.

10.1.5 "Pump Seal Cooling Water Low-Flow" Annunciator의등을 Reset한다.

10.1.6 Cool Down 열교환기의 2차냉각수 밸브를 1회전 연다.

10.1.7 계측배관 냉각탱크 밸브 ICV1를 연다.

10.1.8 Bleed 열교환기의 냉각수가 ON 상태인것을 확인한다.

10.1.9 펌프 Seal 가압회로에서 밸브 1,2,3,4 및 5를 열고 밸브 7

10.1.10 1/4 회전연다. 밸브 6,8 및 9는 닫는다.

10.2 펌프가동

10.2.1 250" H₂O 차압발신기 및 3 pen 기록계의 푸른 Pen에 유량 Orifice 압력탭을 밸브를 열어 연결한다. 최대 유량을 운전계획에 따라 결정한다. 시험부 집합체 전체의 압력 강하를 측정하는 압력탭을 1000" H₂O 차압발신기 및 기록계의 녹색 Pen에 밸브를 열어 연결한다.

10.2.2 판넬의 스위치판에 위치한 200 HP 순환펌프 차단기를 ON 으로 한다.

10.2.3 펌프 스위치 캐비닛의 문에 있는 모터시동 Button을 누른다. 만약 어떤 운전이상 감지되면 펌프는 순간적으로 정지한다.

10.2.4 상온 Loop 조건에 대한 최대 허용 유량의 1/3을 얻기 위해 펌프속도를 점점 올린다.

- 10.2.5 펌프 베어링 오일 저장용기 및 변속기 오일 저장용기의 오일수위가 적정한지 확인한다.
- 10.2.6 "Vari-Drive Lew Speed" Annunciator 등을 Reset한다. 이때 "Low Speed" Interlock의 붉은등을 Reset하면 안된다.
- 10.2.7 3개의 경고 Bypass 스위치가 정상으로 되는것을 확인한다 모든 Annunciator 등이 꺼진것을 확인한다. 자동정지 계통 선택 스위치를 "Normal"로 설정한다.
- 10.2.8 허용유량의 2/3에 유량을 증가시키고 시험용기에서의 비 정상적인 잡음의 발생여부를 확인하기 위해 Sounding Rod를 사용하여 시험용기내의 소리를 듣는다.
- 10.2.9 허용유량까지 유량을 올리고 전항의 절차를 반복한다.
- 10.2.10 용수의 흐름이 열교환기 배관회로에 남아있던 공기를 제거한 후 밸브 LSV1 및 HXV3을 닫는다.
- 10.2.11 주 Loop에서 재생 열교환기 및 Cool Down 열교환기로 Bypass되는 유량은 밸브 HXV2로 조절한다. 열충격을 최소화 시키고 펌프의 가열을 최대화 하기 위해 HXV2는 ~ 1/16 회전정도 열어야 한다.

10.2.13 유량, 펌프전류(Ampere), 펌프 Hours, Loop 압력 및 온도를 운전일지에 기재한다. 일시를 기록계의 기록지에 표시한다.

10.2.14 모든 Grayloc Flange의 단열 Flange 커버를 설치한다.

10.2.15 HXV4 및 HXV5가 열린상태에서 서로 사슬을 걸어 고정되어 있는지 확인한다. 이 밸브는 THLF의 안전밸브 회로를 형성하고 있다.

11. Loop 가열기의 운전

Loop 가열기 용기에는 4개의 가열기가 마련되어 있다. 3개의 가열기는 SCR 전원으로 제어되고 각각 ON-OFF 차단기를 가지고 있다. 차단기는 제어판넬에 설치되어 있다. 4번째 가열기는 수동 차단기가 마련되어 있으나 Honeywell 온도 제어기로 부터 제어신호를 받는 SCR 회로에 의해 제어된다. 이 방법에서 원하는 가열률이 얻어진다.

Loop 가열기는 다음과 같은 기준을 만족할 때만 운전할 수 있다.

- 순환펌프는 "Vari-Drive Low Speed" Annunciator가 Reset 상태이어야 한다. "Low Speed" Interlock는 가열기의 가동을 방지한다.
- 계통압력은 Loop 온도에 따른 포화압력 보다 충분히 높아야 한다.

가열기는 70 psig(5 kgf/cm²) 또는 Loop 온도에 대한 포화 압력 이상의 충분한 여유를 가진 계통압력으로 운전하도록 가열기 차단기는 "Saturation Pressure-Temperature" 함수발생기와 Interlock 되어있다. Trip

- 한계는 Loop 압력과 온도의 함수로써 표시되고 운전대에서 이용한다.
- Loop의 높은 위치에서의 Bleed 밸브 SBV1는 열려있고 가열기 용기내의 가스의 축적을 막기위해 Bleed 되고 있어야 한다.

11.1 "Saturation Pressure-Temperature" Interlock를 확인한다.

11.1.1 수동가열기 Bank에 대한 2개의 차단기를 ON으로 한다.
"Low-Speed" 또는 "Saturation Pressure-Temperature" Interlock의 어느 한쪽이 Trip 조건(붉은등이 켜짐)이면 차단기는 ON이 되지않는다.

11.1.2 "Low-Speed" Interlock를 Reset하고 11.1.1.의 절차를 되풀이 한다.

11.1.3 만약 계통압력이 저압력한계(~70 psig) 이상이면 "Saturation Pressure-Temperature" 계측부의 안쪽에 있는 "Low Pressure Trip" Button을 Reset 한다. 패널의 붉은등을 Reset 한다.

11.1.4 11.1.1.의 절차를 반복한다. 차단기는 ON이 된다.

11.2 가열기 Bank의 시동

- 11.2.1 Loop 온도제어기/기록계의 Mode 선택 스위치를 "Manual"으로 한다.
- 11.2.2 수동조절 Knob를 Zero로 이동시킨다(Full CCW).
- 11.2.3 "Loop Heater SCR" 차단기를 ON으로 한다.
- 11.2.4 Loop 가열기 SCR 캐비닛문에 설치된 SCR 스위치를 ON으로 한다.
- 11.2.5 SCR 캐비닛의 전류계를 보면서 Loop 온도 제어기의 수동조절 Knob를 천천히 돌린다. Full CW 위치까지 Knob를 돌린다.
- 11.2.6 Loop 온도제어기/기록계의 설정치(녹색 지시바늘)를 포화압력-온도 Trip 한계도의 운전영역내 온도에 Set한다.
- 11.2.7 온도제어기/기록계의 Mode 스위치를 "Automatic"으로 한다.
- 11.2.8 가열기 #4, #6, #8에서의 Bias Pots를 Zero로 한다. 차단기 #4, #6, #8을 ON으로 한다. Loop의 가열률을 제어하기 위해 Bias Pot로 가열기 부하를 조절한다.

11.3 Loop가 가열됨에 따라 Loop 용수가 팽창하는 것을 보상하기 위해 SBV1 및 SBV2를 조절한다.

11.4 가열률을 관찰한다. $100\text{ }^{\circ}\text{F/hr}$ ($56\text{ }^{\circ}\text{C/hr}$)를 넘으면 안된다.

12. Loop의 가열 및 가압

Loop 온도 및 압력을 상승시키는데는 다음과 같은 지침을 고려하여야 한다.

- 계통압력은 Loop 온도에 따른 포화압력 보다 항상 충분히 높아야 한다. 이것은 포화 압력-온도 함수발생기의 Trip 한계곡선 이상의 계통압력을 유지하므로써 지켜진다.
- Loop의 가열은 열응력을 최소화 하기위해 $100\text{ }^{\circ}\text{F/hr}$ ($56\text{ }^{\circ}/\text{hr}$)를 넘으면 안된다. Loop 가압률의 증가는 Loop 가열률을 저하하게 작용한다.
- 갑작스러운 가압기의 수위변화에 의한 열충격을 최소화 하기위해 가압기 내의 용수와 주 Loop 용수의 온도차이는 통상 $200\text{ }^{\circ}\text{F}$ ($110\text{ }^{\circ}\text{C}$) 이하로 유지되어야 한다. 가압기 용수와 Loop 용수의 온도차이는 저압력 Inter-lock를 Reset 하는데 요구되는 압력(가압기 온도) 때문에 초기 시동시에는 크게된다. 가압기의 수위변동은 이온도 차이가 $200\text{ }^{\circ}\text{F}$ ($110\text{ }^{\circ}\text{C}$) 보다 클때는 피해야 한다.

12.1 가압기 용수와 주 Loop 용수의 온도차이가 $200\text{ }^{\circ}\text{F}$ ($110\text{ }^{\circ}\text{C}$) 이하일 때, 다이얼을 최대가압(가열)률이 되도록 돌린다. 이것은 가압기의 가열률이 주 Loop의 허용 가열률 보다 같거나 낮다고 가정하

고 있는 것을 의미한다.

12.2 Loop 온도 및 가열률을 관찰하고 계통압력과 가압률을 비교한다.

가열시 Loop 온도와 계통압력에 따른 포화압력-온도 Trip 한계 온도의 차이가 20 °F(11 °C) 이상의 여유를 유지해야 한다. 가열 입력 효율을 높이기 위해 열교환기 유량제어 밸브 HXV2를 사용하여 Cool Down 열교환기의 냉각률을 조절한다.

12.3 계통압력이 증가함에 따라 Bleed 률을 조절할 필요가 있다. SBV1 Bleed 배관이 약 90 °F(32 °C)를 넘지 않는 온도가 되도록 유량을 제한한다. SBV1의 조절을 용이하게 하기위해 계통 Bleed Orifice Bypass를 닫는다. 주입펌프에의 5 psi 신호압력을 유지하기 위해 SBV2를 조절한다.

12.4 펌프 Seal의 가압

500 psig(35 kgf/cm²) 이상의 계통압력에서 Seal의 가압은 양펌프 Seal에 계통압력을 나누는 방법을 사용한다.

12.4.1 펌프 Seal 가스충전 계통을 작동시킨다. 질소통의 가스 압력조절 밸브를 Loop 압력의 50% ± 10%에 Set한다

12.4.2 펌프의 북쪽에 위치한 압력계로 Seal의 Interstage 압력을 관찰한다. 압력조절밸브의 압력계와 비슷한 압력을 지시하지 않으면 밸브 6을 열고 Interstage 압력계가

Loop 압력의 약 50%를 지시할 때까지 밸브 1, 2를 닫는다
밸브 6을 닫고 밸브 1, 2를 연다.

- 12.4.3 자동적으로 압력이 상승시킬때 양 Seal에의 적절한 압력
분배를 유지하기 위해 필요한 경우 Interstage 압력이 계
획된 Loop 압력의 25% 이상이 되도록 Seal의 부하를 80%
정도로 Set 할 수 있다. 수동시에는 Loop 압력의 50% ±
10%로 유지해야 한다.

12.5 Loop 가열

Loop의 가열은 다음과 같은 절차에 따른다.

- 12.5.1 가압기 가열기의 제어기 설정치 다이얼을 목적으로 하는
압력에 Set한다. 다이얼의 눈금은 다이얼 Unit에 변환된
목표압력에 맞춘다. Offset 값은 가압기온도 400 °F
(204 °C)에서 45 Units로 부터 650 °F(343 °C)에서 85
Units 까지 범위로 되어있다.

- 12.5.2 Loop 온도제어기/기록계를 "Manual"에 Set하고 Elec-
trovolt 계의 출력을 맞추기 위해 Knob를 조절한다.
Mode 스위치를 "Manual"로 하고 SCR 제어 가열을 수동
Knob를 사용하여 Zero로 감소시킨다. 다른 가열기 Bank
는 ON 상태로 둔다.

12.5.3 Loop의 가열이 Zero 또는 약한 냉각상태가 되도록 열교환기 밸브 HXV2(필요하면 열교환기 2차 냉각수 밸브)를 조절한다. 5-8 psig의 주입펌프 신호공기압을 얻기위해 SBV2를 조절한다.

12.5.4 온도경향을 점검하면서 고온도 Trip를 Set한다 (13.1참조).

12.5.5 열교환기의 냉각이 고정된 가열기 입력에 대해 평형상태가 된후 최대로 SCR 제어가열을 올리고 Loop 온도제어를 자동에 돌린다.

12.5.6 Loop 온도제어기의 설정치를 목표온도에 Set한다. Loop 온도와 가열률을 관찰하고 계통압력 및 가압률을 비교한다. 가압률은 고압력 조건에서는 감소하는 것을 유의한다. Unattended 가열시 가열률은 계획된 계통압력에 따른 포화 압력-온도 Trip 한계온도와 계획된 Loop 온도와의 차이가 50 °F(28 °C) 이상의 여유를 유지하도록 조절해야 한다. 이 온도여유를 유지하기 위해 필요하면 HXV2를 열어 가열률을 줄인다.

13. 자동정지 Trip의 설정 - Process Variable

고온도 및 저압력 Trip은 포화수에 대한 값을 기초로 결정되는 값에 Set 되어야 한다.

13.1 고온도 Trip

- 13.1.1 Loop 온도 제어기를 "Manual"으로 돌리고 SCR 가열기 전원을 Zero로 낮춘다.
- 13.1.2 자동정지 계통 Mode 스위치를 "Bypass"로 한다.
- 13.1.3 기록계 전원을 끈다.
- 13.1.4 요구하는 고온도 Trip에 지시바늘을 Set 하기위해 온도지시바늘 구동 Drum을 이동시킨다.
- 13.1.5 가장 가까운 전방의 Trip 기능캠에서 Shaft Clamp 나사를 푼다. Annunciator의 경보음을 발생시키기 위해 캠을 적당한 위치에 놓는다. 나사를 죄이고 정확한 온도에 대한 Trip 을 점검한다.
- 13.1.6 기록계의 전원을 킨다. Annunciator를 Reset 한다.
- 13.1.7 자동정지계통을 "Normal"로 돌린다.
- 13.1.8 SCR 전원을 ON 으로하고 수동으로 최대로 올리고 제어기를 "Automatic"으로 돌린다.

13.2 계통압력 Trip

13.2.1 자동정지 계통을 "Bypass"로 한다. Mon-o-con 압력계에서 유리창을 제거한다.

13.2.2 Trip 기능 및 교정상태를 확인하기 위해 고압력 설정치 Slider를 천천히 압력계 지시바늘을 지나가도록 이동시킨다.

13.2.3 원하는 고압력 Trip 설정치까지 Slider를 뒤로 이동시킨다. "Pressurizer High Pressure" Annunciator를 Reset 한다.

13.2.4 저압력 설정에 대해서는 13.2.2. 및 13.2.3.의 과정을 반복한다.

13.2.5 자동정지 계통을 Normal로 하고 압력계의 커버를 설치한다.

14. 열충격의 최소화 - Procedure Revision

이 절차는 Out-of-limit Loop Trip이 발생하거나 연속적으로 고온상태에서 재가동이 필요할 때 THLF 배관에 대한 열충격을 최소화 하는 방법에 대한 개요이다.

현재까지의 정상운전시에는 LSV1 및 HXV3를 닫고 HXV5, HXV2 및 HXV1은

열고 열교환기에서의 과도한 Loop 열손실을 막기위해 HXV4는 약 1/16-1/8 회전시켜 운전하였다.

Loop Trip이 발생후 Loop 용수가 수축하기 시작할 때나 과잉한 Makeup 용수가 고온상태에서의 재가동에 대해 요구될 때, 주입펌프의 배출 유로에서는 밸브 HXV4의 저항이 크기 때문에 Cool Down 열교환기와 재생열교환기의 1차 Leg를 통과하는 흐름에서 역류현상이 일어난다. 따라서 Loop에 차가운 용수가 되돌아 간다.

변경한 절차는 다음과 같다.

- (1) LSV1 및 HXV3를 닫는다.
- (2) HXV4, HXV5, HXV1을 크게 연다.
- (3) 열손실을 제어하기 위해 HXV2를 1/16~1/8 회전연다.
- (4) 이에따라 형성되는 새 유로를 사용하면 온도계 T1은 혼합용기에 들어가는 용수의 온도를 감시하는 적당한 위치에 있다.
- (5) THLF 고온 재가동 절차 3.8.2.항의 경우 가압기에 50% 용수를 충전하는데 약 20 Gallons(76ℓ)의 용수가 필요하기 때문에 Loop를 냉각하고 재가동할 필요가 있다.

II. 고온 재가동 절차

1. 일반개요

운전시 THLF는 Out-of-limit 조건에 대한 Loop 변수들을 감시하는 자동정지 계통에 의해 보호된다. 자동정지 계통에 의한 Loop Trip이 발생할 경우, Loop의 재가동에 대한 결정은 Trip에 대한 원인이 밝혀질 때까지 보류된다. Loop 책임자는 Loop 상태에 따라 적절한 조치를 결정해야 한다. 아래에 기술한 절차는 자동정지계통에 의해 Loop가 Trip된 후에 취해야할 지침으로 이용된다. 따라서 모든 고온 재가동에 공동한 절차만이 기술되어 있다. 일반적으로 Loop 책임자에 의한 추가 조치가 필요하다. 즉 Loop의 열수력 동특성에 대한 Loop 책임자에 의한 충분한 이해 및 판단이 조치를 취하기 전에 필요하다.

2. 준비

2.1. 개인의 안전이 연속적인 Loop 출입에 대해 문제가 되는지 결정하기 위해 Loop 근처에서 주의깊게 Loop의 소리나 상태를 관찰한다. 만약 위험하다고 생각되면 Loop 구역에서 대피하고 적절한 긴급 조치를 취한다(THLF 긴급정지절차 참조). Loop 근방의 제한적 접근에 대해 안전하다고 생각되면 다음과 같은 절차를 취한다.

2.2. 우측의 Annunciator 판넬에 있는 "Horn" Button과 좌측 Annunciator 판넬에 있는 "Acknowledge" Button은 눌러 경적을 끈다. 우측 Annunciator 판넬의 "Reset" Button을 누르면 안된다.

2.3. 불이 켜진 Annunciator의 표시를 기록한다. Loop 압력, 온도, 정지 발생시간 및 이상이 있는 부품의 상태등을 기록한다.

2.4. Loop 책임자는 정지의 원인, 그 원인을 교정할 수 있는지, 재가동이 부품에 위험한지 등을 결정하기 위해 운전상황 자료를 조사해야 한다. 즉 예를들어 Loop를 재가동 시켜 정상운전으로 돌리거나 Loop의 냉각을 돕기위해 재가동 시키든가 또한 개인, 부품등이 위험하기 때문에 Loop를 재가동 시키지 않는것 등을 결정해야 한다.

3. 재가동

만약 Loop를 재가동 시킬 경우는 다음과 같은 절차에 따른다.

3.1. 우측의 Annunciator 판넬의 "Reset" Button을 누른다.

3.2. 모든 수동 Loop 가열기의 차단기를 OFF로 한다. Loop 가열기 SCR 차단기 및 가압기 가열기 SCR 차단기를 OFF로 한다. SCR의 Bias Pot 4, 6 및 8을 Zero로 한다.

3.3. Loop 온도제어기 Mode 스위치를 "Manual"으로 하고 "Manual" Knob를 Zero에 이동시킨다.

3.4. 가압기 제어기의 설정치 다이얼을 편차계가 Positive Deflection이 되도록 줄인다.

3.5. 펌프 속도제어 설정치 Knob를 Zero로 옮긴다.

3.6. Cool Down 열교환기에서의 Bleed 밸브 SBV2를 OFF로 한다.

SBV1을 ON 상태로 한다. 이는 SBV1에서의 Solenoid 밸브가 열었을 때 높은 위치에 가스가 축적하는 것을 고려한 처치이다.

3.7. HXV2를 1/16 회전 연다.

3.8. Loop 압력과 온도가 포화상태를 나타내고 가압기의 용수가 충전된 상태이면 다음 3.8.1의 Case I의 절차에 따른다. Loop 압력이 포화상태 이상이나 가압기의 수위가 낮은 경우는 3.8.2의 Case II에 따른다. Loop 냉각이 3.8.1의 (3)항을 포함한 Case I의 절차를 필요로 하면 펌프를 ON 상태로 두고 정상적 냉각절차를 계속한다.

3.8.1. Case I---- 용수가 충전된 가압기

(1) 수위제어기의 Mode를 수동으로 하여 설정치를 Zero에 맞추고 주입펌프를 가동시킨다. 압력상승에 주의하면서 용수 주입률을 눈금에서 20으로 높인다. 열교환기에서 온도계 T1 및 T2를 감시한다. T1 및 T2에 의해 나타나는 냉각률을 최소화 하기위해 용수 주입률을 조절한다. Loop 압력이 최소한 포화압력 보다 100 psi(7 kgf/cm²) 높아질 때까지 주입펌프 펌핑을 지속시킨다.

(2) Sample Station에서 SBV1로 부터의 Bleed 비율을 Plastic

배관을 통과하는 흐름을 관찰하므로써 점검한다. 가스 흐름의 양은 용수흐름량의 1/2 이하이어야 한다.

- (3) 순환펌프 차단기를 Reset 한다. 펌프를 가동시켜 차가운 주입용수와 고온의 Loop 용수를 혼합하기 위해 저유량으로 Loop 용수를 순환시킨다. 이때 약간의 계통압력 및 수위의 감소가 일어난다. Loop 용수 온도가 안전된 후 온도를 일정하게 유지하기 위해 펌프를 정지시킨다.
- (4) 가압제어기의 편차계를 재점검하고 Positive Reflection 가 되도록 조절한다. "Pressurizer Low Level" Interlock를 Reset 한다. 가압기 SCR 차단기를 ON으로 하고 가압기 가열기에 최대 전류를 공급하기 위해 가압기 제어기의 설정치 다이얼을 천천히 높인다.
- (5) 수위제어기를 50% 설정치에서 자동으로 Set하고 1/2시가 이상 가열후 SBV1 가압기를 Flashing 한다. Loop 포화 압력보다 10% 또는 20 psi(1.4 kgf/cm²) 높은압력에서 Flashing이 일어나지 않으면 Bleed를 정지하고 가열을 계속한다. Flashing후 3.9.의 절차로 옮긴다.

3.8.2. Case II ---- 가압기 저수위

- (1) 주입펌프를 가동시키고 수위 제어기가 자동상태로 가압기 수위를 50% 수위까지 올린다.
- (2) 상기 3.8.1.의 (2), (3), (4) 의 절차를 수행한다.

- 3.9. 가압기 가열기로 계통압력을 올린다. 압력이 포화 압력-온도 Trip 한계 압력보다 100 psi(7 kgf/cm²) 높을때 순환펌프를 재가동시키고 Loop 냉각 및 열교환기의 열충격을 최소화 하기위해 허용유량의 약 40% 까지 천천히 유량을 증가시킨다.
- 3.10. Annunciator 판넬을 Reset하고 모든 Annunciator 등이 꺼진것을 확인한다. "Pressurizer Low Pressure" Trip의 설정은 낮출 필요가 있다. 자동정지계통을 "Normal"로 한다.
- 3.11. Loop 가열기 운전으로 시작하는 정상시동 절차, 즉 "THLF 정상시동절차"의 11.절을 다시 수행한다. 규정수위가 확보되면 유량을 올린다.

여 백

III. Standard Operation Practices

1. 서론

THLF의 만족한 운전을 위해서는 Loop 및 관련 기기에 대한 점검을 매일 수행하는 것이 중요하다. Loop는 고온, 고압으로 운전되기 때문에 개인의 안전성이 가장 중요시 되어야 한다. 이러한 조건을 만족하기 위해서 발생이 가능한 고장을 검출하기 위한 Loop의 정확한 감시가 요구된다.

2. Daily Operationg Check List

2.1. 오일수위

2.1.1. Borg-Warner 가변속기

운전시 오일은 점검계에서의 표시에 일치해야 한다. 필요하면 오일을 놓는다. 오일은 Dexron Automatic Transmission 유체만을 사용한다.

오일저장용기 용량 : 10 Gallons(37.85ℓ)-최대운전온도 140
°F(60 °C)

2.1.2. 순환펌프

베어링 Housing에서의 적당한 오일수위는 일정 수위오일 감시 Oiler에 의해 유지된다. 100 °F(38 °C)에서 100~200 SSV의 경터빈 오일, ARHCO Stores #12-1550-040로 유리제

용기를 채운다.

2.1.3. 주입펌프

2개의 Milton 주입펌프는 오일용기를 포함한 밀봉 크랭크케이스를 가지고 있다. 모든 주유는 펌프 내부에서 이루어진다. 크랭크 케이스의 오일누출을 점검하고 팩킹에 윤활유를 친다. 매월, 볼트로 고정된 크랭크케이스의 커버판을 제거하고 오일 수위를 점검한다. 저장용기에 오일을 추가할 필요가 있으면 Conoc Milgear L136, SAE 140EP를 사용한다.

2.2. 2차냉각수

2차냉각수의 흐름관찰 유리창은 3개의 Graham Heliflow 열교환기로부터의 배수배관과 Stuffing Box 냉각배관에 설치되어 있다. 흐름관찰 유리창은 흐름이 있는지 없는지만을 확인할 수 있다.

2.3. Seal 에서의 누수

순환펌프에서의 Mechanical Seal로 부터의 누수는 매일 점검하고 일지에 기재해야 한다. 내측 Seal에서의 누수는 밸브 #7 근처의 Open Tee에서 나타난다. 외측 Seal에서의 누수는 Gland 판의 배기부 및 Overflow 배관에서 일어난다. 누수 유량을 측정하기전에 Gland Quench Flow를 차단한다. 만약 한 Seal에서 많은 누수(1 pint/min; 0.47ℓ/min)가 확인되면 누수는 Seal 부하계통을 이용하여 다른 Seal에 누수량의 적당한 양을 돌림으로써 줄일수 있다. 고압력가스가 외측 Seal에 부하된다. Loop 선임자의 허가없이

75% / 25% Split를 초과하면 안된다.

2.4. 매일 또한 시험사양 절차에 따라 용수를 채취한다. pH 및 전기전도도는 배관계통에서 직접 감시된다. 염화물의 분석에 대해서는 증류수로 세척된 깨끗한 용기를 사용한다. Chem-Metrics 시험 Kit가 O_2 , 과잉 히드라진 및 NH_3 의 분석에 이용된다. 시험 Kit 결과의 확인분석이나 Cl^- , F^- , Mg 의 분석을 위해 채취 시료를 화학 분석실로 보낸다.

2.5. 원형 기록계 기록지 및 잉크 Pen을 매일 교환한다.

2.6. 운전일지는 일시, 작업, 운전등 모든 Loop 관련 사항을 기록하기 위해 사용한다.

- Loop 유량
- Loop 온도
- Loop 압력
- 용수수질 분석결과
- 비정상적인 운전사항
- 보수작업

3. 다음과 같은 양식의 점검표 및 Outage 보고서를 작성한다.

Daily Maintenance Check List and Data Sheet during Operation

Operator:	Bundle	Date					
		Time					
System Operation	Pressure (psi)						
	Flow (gpm)						
	Temperature (F)						
Recirculating Pump	Hourmeter						
	Drive Oil Level						
	Amperes						
	Seal Pressure						
	Thrust Bearing Temperature						
	Pump Oil Level						
	Pump Seal Leakage						
Cooling Water Flow	Pump Bearings						
	Drive Heat Exchanger						
	Inboard Circuit						
	Outboard Circuit						
	Pressurization						
Heat Exchanger Temperature F	T1, Regenerative HX, Out						
	T2, Cooldown HX, In						
	T3, Cooldown HX, Out						
	T4, Cooling Water, Out						
Change Recorder Charts and Ink							
Loop Shutdown Switches Normal							
Water Quality Sample Number							
Nitrogen Seal Pressure, psi							
Argon Cover Gas Pressure, psi							

PWR - Hot Test Loop Outage Record

Operator:	Bundle	Date						
		Time						
Pump Down Time	Off							
	On							
	Total							
Loop Down Time Off to Full Operational	Date							
	Time Off							
	Date							
	Time On							
	Total							
Type of Outage	Scheduled							
	Unscheduled							

Operator:	Bundle	Date						
		Time						
Pump Down Time	Off							
	On							
	Total							
Loop Down Time Off to Full Operational	Date							
	Time Off							
	Date							
	Time On							
	Total							
Type of Outage	Scheduled							
	Unscheduled							

여 백

IV. 정상 정지 절차

1. 정지 스위치를 "Bypass"로 한다.
2. 다음과 같이 Loop 냉각절차를 시작한다.
 - 2.1. Bias Pot를 돌려 SCR 가열기를 수동으로 Zero로 OFF하고 가열기 차단기 #4, 6 및 8을 OFF로 한다.
 - 2.2. Honeywell Loop 온도제어기를 수동제어에 놓고 제어 Knob를 천천히 돌려 SCR 전원을 Zero로 줄인다.
 - 2.3. SCR 스위치를 OFF로 하고 SCR 차단기 #12를 끈다.
3. 가압기 가열기의 제어기 다이얼을 Positive Deflection이 얻어질 때까지 줄인다. 가압기 SCR 가열기 스위치 및 차단기 #5를 끈다.
4. 주입펌프는 Loop가 냉각되면서 체적이 줄어가는 것을 보상하여 Loop 수위를 일정하게 유지하기 위해 계속 작동시킨다.
5. 최대 Loop 냉각률은 $100\text{ }^{\circ}\text{F/hr}$ ($56\text{ }^{\circ}\text{C/hr}$)를 넘으면 안된다. 이 조건을 지키기 위해 초기에는 밸브 HXV2를 1/4 회전열고, 그후 HXV3을 약간 열어 이 냉각률을 유지한다. 열교환기의 출구 용수온도는 $150\text{ }^{\circ}\text{F}$ ($66\text{ }^{\circ}\text{C}$) 이하로 유지해야 한다.

6. 가압기 온도가 주 Loop 온도보다 200 °F(112 °C) 이상 넘지 않도록 가압기의 냉각을 가속화 하여야 한다. 가압기는 뜨거운 용수의 일부를 배출하고 차가운 용수와 교환하므로써 냉각된다.

6.1. 주입펌프를 자동제어 상태로 한다.

6.2. 지시바늘을 약 10%에 설정한다. 가압기의 수위가 10%에 도달하는 위치에서 주입펌프는 정지하고 수위는 일정하게 된다. 이 수위상태를 약 10분동안 유지한다.

6.3. 지시바늘을 ~60%까지 올린다. 가압기에 용수가 충전되는 동안 Loop 압력을 감시한다. 가압기 용수가 Full로된 상태에서 약 10분 동안 기다리고 6.2 의 절차를 반복한다. 가압기가 원하는 온도가 될때까지 6.2 , 6.3 의 절차를 반복한다.

7. 시험부의 P를 최대 허용치 이하로 하기위해 펌프속도를 줄인다.

8. 계통온도가 원하는 수준에 도달하면 다음과 같은 절차를 수행한다.

8.1. 순환펌프를 정지한다.

8.2. 열교환기로 가는 2차냉각수의 공급을 정지한다.

- 8.3. 순환펌프 변속기의 열교환기, Mechanical Seal의 열교환기, 가압기의 열교환기 및 Pedestal의 냉각에 공급되는 2차 냉각수를 정지하기 위해 PCV1을 닫는다.
9. Loop 용수 Uranium 분석 및 최종 수질분석을 위해 용수를 채취한다.
10. Uranium 분석은 Loop 용수의 분석처리 이전에 수행하여야 한다.
11. 주 차단기를 끈다. 계측계통의 전원을 끈다.
12. 일지를 작성하고 Loop를 보수한다.

여 백

V. 긴급 정지 절차

1. 일반사항

THLF 안전계통은 Out-of-limit 상황이 발생할 때 Loop를 정지시킨다. Loop의 Trip 회로는 운전원이 이상을 감지하기 전에 이상상태를 감지할 수 있다. 따라서 운전원이 Trip이 발생하기전에 Loop의 이상이나 고장을 발견하거나 정지 스위치를 Bypass로 하여 Trip 회로를 회피하지 않는한 긴급 정지는 자주 일어나지 않는다.

1.1. 긴급정지는 시험 아니면 비정상 상태시에만 작동시킨다.

1.2. 운전원의 안전이 가장 중요하며 이 점에서 필요하면 대피구역을 둔다.

1.3. 다음과 같은 기기의 주 차단기를 끈다.

- 가열기 3
- SCR 가열기 및 SCR
- 가압기 가열기 및 SCR
- 순환펌프 모터
- 주입펌프

1.4. 만약 Loop의 상황이 허용되면 Loop 구역에서 떠난다. 운전원이 떠나지 않아도 될 경우에는 다음기기에 대한 차단기를 끈다.

- 가열기

- 가압기 가열기 및 SCR 제어기
- SCR 가열기 및 제어기

1.5. Borg-Warner 변속기 제어 전위계를 Zero로 한다.

1.6. 만약 대피할 필요가 없고 급속한 Loop의 압력감소를 막을 수 있으면 주 차단기를 다시켜 압력감소를 늦추기 위해 충분히 큰 주입률로 수동제어에 의해 주입펌프를 가동시킨다. THLF 정상적인 정지 절차에 따른다. 만약 Loop의 감압을 유지할 수 없으면 2.절의 절차에 따른다.

1.7. Loop의 감압이 안전되면 주펌프 차단기를 키고 순환펌프를 재가동시킨다. Loop를 냉각하는데 충분한 유량을 순환시킨다.

1.8. 유효한 냉각률을 유지하기 위해 열교환기의 2차냉각수를 조절한다. 가능하면 냉각률을 100 °F/hr(56 °C/hr)로 한다.

1.9. 주입펌프로 포화압력 이상의 적절한 Loop 압력을 유지한다.

1.10. Loop 압력이 80 psig(5.6 kgf/cm²) 이하로 떨어지고 온도도 200 °F(93 °C) 이하가 되면 다음 기기를 정지시킨다.

- 주입펌프
- 순환펌프
- 열교환기 2차 냉각수

2. Potential Incidents

2.1. 고압 수증기의 방출

관찰 : 수증기가 새어나올 때의 소리, 압력저하, 수증기 목격

(주의 : 고온수증기는 보이지 않는 경우가 많다.)

처지 : (1) 주 차단기를 끈다.

(2) 운전원이 위험할 때 — 펌프 차단기를 끈다.

Loop 구역으로 부터 대피하면서 화재 경보를 보낸다.

Loop 책임자에 보고한다.

(3) 수증기 누수가 미세한 경우 (예를들어 1/8" 배관) — 만약 가능하면 밸브로 누수배관을 격리한다. Loop 운전이 가능하면 지속적인 정상운전 여부에 관해 Loop 책임자와 상의한다.

- 순환펌프를 ON 상태로 두고 가열기 및 2개의 SCR 차단기를 OFF로 한다
주입펌프의 재가동하기 위해 주 차단기를 ON으로 한다.
- 순환펌프의 속도를 30%로 줄인다.
- 접근이 가능하면 Cool Down 열교환기의 냉각수를 증가시킨다.
- 접근이 가능하면 Bleed 밸브를 닫는다. Loop 압력을 포화압력 이상으로 유지하기 위해 주입펌프를 사용한다.
- Loop 온도가 100 °F (38 °C)에 도달하면 펌프를 정지하고 압력을 Zero로 감소 시킨다.

2.2. 유량손실

관찰 : 잡음의 변화, 기록계에서의 유량변화

처치 : (1) 조속히 주차단기를 끈다(Loop 가열기를 OFF하기 위해)

(2) 각 가열기 차단기를 OFF로 한다. — 3개의 수동 가열기 및 1개의 SCR Loop 가열기. 용수의 과잉한 손실이 없는 한 SCR 가압기 가열기를 ON 상태로 둔다.

(3) 가압기를 사용하여 Loop 압력을 제어하기 위해 주 차단기를 ON으로 한다.

2.3. 지진

관찰 : 건물전체의 진동

처치 : (1) 주 차단기 및 펌프 차단기를 끈다.

(2) Loop 구역에서 대피한다.

VI. 청결도 사양과 화학물질 및 재질제한

1. 청결도

1.1. 오일 및 그리이스는 단열재와 접촉하는 것을 금한다.

1.2. Loop에서 열려있는 모든 부분은 이물질이 Loop에 진입하는 것을 막기 위해 커버하여야 한다.

1.3. 기중기를 사용하지 않을때는 Loop 배관계통 위에 기중기를 두면 안된다.

1.4. Loop Setup 전에 청결도에 대한 모든 사항을 검사하고 필요하면 깨끗이 한다.

2. 화학물질의 제한

2.1. Loop에 첨가하는 물질은 다음과 같은 화학물질에 한한다.

- 탈이온화 용수
- 하이드라진 - N_2H_4
- Boron - B
- Lithium Hydroxide LiOH

2.2. Loop를 청소 및 Flushing 하는데 쓰이는 화학물질은 다음과 같은 물질에 한한다.

- Acetone
- Ethyl Alcohol
- Basic "H" Solution

2.3. 위에 기술된 물질 이외의 화학물질의 사용은 제한물질 제외에 대한 서면 요구서를 필요로 한다. 요구서는 사용목적이 기술되어 있어야 하고 Loop 책임자에 의한 허가를 필요로 한다.

3. 재질의 제한

3.1. Loop 용수와 접촉하는 시험기기, 부품 및 기타 재료는 다음 재질만이 허용된다.

- 스테인레스강
- Zirconium 및 그 합금

3.2. 상기 이외의 재질의 사용은 제한재질 제외에 대한 서면요구서를 필요로 한다. 요구서는 사용목적이 기술되어 있어야 하고 Loop 책임자에 의한 허가를 필요로 한다.

VII. 보수

1. 기기의 보수

1.1. 주입펌프

- | | | |
|---------|---|-----------------------------|
| (1) 윤활유 | Conoco Milgear L136
SAE 140EP AGMA #8
Compound gear oil
(Texaco 650T Texaco
Compound) | 운전 2500시간마다 또는
6개월 마다 교환 |
| (2) 검사 | Housing내 오일수위를
점검 | 매일 |
| (3) 교정 | 필요없음. | |
| (4) 교환 | Plunger Packing
제조회사의 보수. 설명
서 참조 | 정기적으로 |

1.2. 순환펌프

- | | | |
|---------|---|------------------------|
| (1) 윤활유 | 배수 및 100 °F(38 °C)
에서 100~200 SSU의
새로운 터빈오일로
Flushing 및 충전 | 3개월마다 |
| (2) 검사 | 오일 Ring | Ring이 자유롭게
돌아가는지 확인 |

	Stuffing Box 및 베어링 온도	정기적으로
(3) 교정	없음.	
(4) 교환	베어링(필요하면 교환) 펌프분해, 모든마모부분 을 점검 및 모든 불량 부분교환	6개월마다 매년

1.4. Borg-Warner 변속기

(1) 윤활유	배수 및 충전	초기 200시간 운전후 및 1년에 2번
	Dexron Automatic Transmission Fluid만 사용	
(2) 검사	만약 구동속도가 제어기 설정치와 맞지 않으면 제조회사 Instruction Manual, Section 3.3 참조	
(3) 교정	없음.	
(4) 교환	제조회사 Instruction Manual, Section 4 참조	

1.5. Borg-Warner 변속기의 열교환기

- (1) 윤활유 없음.
- (2) 검사 수지손실
처리능력 손실 재생시
유로 및 Packing 부분
- (3) 교정 전기전도도계 사용전
- (4) 교환 전기전도도 Cell 청소해도 복원되지
않을때 교환

1.6. 용수처리 장치

- (1) 윤활유 없음.
- (2) 교정 없음.
- (3) 검사 Zinc Plug를 점검 매월
- (4) 교환 Zinc Plug이 파손되면 2차 냉각수의 조건에
교환 의존

1.7. 용수처리펌프

- (1) 윤활유 없음.
- (2) 검사 Mechanical Seal Wear 매 사용전
Ring, Cooling Collar
Seal, 모든 O Ring 및
Gasket를 점검
- (3) 교정 없음.
- (4) 교환 필요에 따라

2. 계측기기 교정절차

제조회사 보수 Manual 참조

3. Grayloc Fitting

3.1. 조립

완전한 Grayloc 부는 2개의 Grayloc Hub, 1개의 Grayloc Seal Ring, Stud 및 Nut를 갖춘 Grayloc Clamp의 1 Set로 구성된다.

3.1.1. 모든 방해 피복물질 및 이물질은 설치전에 Hub Sealing 표면 및 Seal Ring에서 제거되어야 한다. Seal Ring은 건조되어 있어야 한다. KORR-KOTE가 Stud 및 Hub Clamp 표면에 사용 되어야 한다.

3.1.2. 요구되는 위치에 Grayloc 연결부를 조립한다. 조립전에 Hub를 Clamp가 Ring Rib에 마주보는 Hub를 균일하게 당기는 정도로 일렬로 정렬 시킨다.

3.1.3. Grayloc 연결부를 적절히 죄기위해 아래표와 같은 Torque Stress를 주기위한 Torque를 나타낸다. Grayloc 연결부는 단단히 죄어져야 하고 권장 Torque치를 넘는 적당한 Torque치로 Bolt를 죄도 연결부에 손상을 주지 않는다. Clamp를 죄는동안 Clamp 사이의 간격은 같아야 한다.

3.2. 보수

적절히 조립된 Grayloc 연결부에 대해 정상운전시에는 특별한 보수는 요구되지 않는다. Sealing 표면에서의 불규칙은 누수의 원인이 된다. 조립전에 Hub Seat 및 Seal Ring을 깨끗히 하고 연결부의 손상을 방지하므로써 Grayloc 이음쇠의 신뢰성을 확보해야 한다. Scale이나 녹이 Hub의 Sealing 표면에 형성되면 Fine Steel Wool로 가볍게 Polishing 하여 제거한다. Grayloc 연결부는 압력 또는 큰 기계적 부하가 걸려있을때 죄면 안된다.

3.3. Grayloc Seat의 수리

Grayloc의 부품의 제조는 Grayloc Tool Comany 또는 그 Authorized License를 가진 회사에 의해 행해진다. 그러나 어떤 원인으로 손상 또는 파손되어 사용 불가능한 Grayloc Seat는 공기압 작동식 Portable Grayloc Seat Refinishing Tool을 쓰고 수리할 수 있다.

Suggested Bolting Torque for Grayloc Clamp

Bolt Size	Grayloc Clamp Two Piece Four Bolt(a)			
	Minimum		Maximum	
	ft-lbf	N-m	ft-lbf	N-m
3/8-16UNC-2(b)	6	8	8	11
5/8-11UNC-2	30	41	40	54
3/4-10UNC-2	50	68	65	88
7/8- 9UNC-2	80	108	105	142
1 - 8UNC-2	120	163	165	224
1 1/8- 8N -2	180	244	235	319
1 1/4- 8N -2	250	339	335	454
1 3/8- 8N -2	340	461	450	610
1 1/2- 8N -2	400	542	525	712
1 5/8- 8N -2	550	745	725	983
1 3/4- 8N -2	750	1017	1000	1356
1 7/8- 8N -2	1000	1356	1350	1830
2 - 8N -2	1100	1491	1500	2034
2 1/4- 8N -2	1600	2169	2150	2915
2 1/2- 8N -2	2200	2983	2950	4000
2 3/4- 8N -2	3000	4067	4000	5423

(a) Double above values for two-piece two-bolt clamps.

(b) 1/2 and 3/4 two-piece two-bolt clamp.

VIII. 운전원 증명에 대한 요구조건

1. 일반

증명된 THLF 운전원은 여러 관련분야에 대한 기본적 및 균형있는 넓은 지식을 가지고 있어야 한다.

2. 훈련

2.1. Processes 계산 및 해석 작업을 이해하는데 충분한 학술적인 기초 지식이 있어야 한다.

2.2. 기술자 및 과학자와 같이 일을 한 경험이 있고 최소한의 지도로 그들의 지시를 이해, 수행할 수 있어야 한다.

3. Thermal Hydraulics

3.1. 운전원은 원심 및 완복펌프, 기기 및 제어에 관한 지식과 경험을 가지고 있어야 한다.

3.2. 운전원은 유체 및 유량측정 즉, Venturi, Orifice, Flow Tube 등의 기계적 유량계와 이에 관련된 기기의 기초원리에 관한 지식을 가지고 있어야 한다.

3.3. 운전원은 온도측정 즉 열전대, RTD 및 이와 관련된 기기에 대한 기초지식을 가지고 있어야 한다.

3.4. 운전원은 Standard Steam Table을 이해할 수 있어야 한다.

4. 용수처리

운전원은 용수처리 장치의 재생작업, pH, 전기전도도 및 O₂ 등을 허용치로 유지하는 작업을 수행하고 관련되는 용수처리 계측기기를 교정 및 운전할 수 있어야 한다.

5. 계측

5.1. 운전원은 각종 Loop 계측기기에 의해 표시된 정보를 읽고 해석하고 계측기기가 정확한 정보를 보내고 있는지를 판단할 수 있어야 한다.

5.2. 운전원은 기록계의 기록지를 교환할 수 있어야 한다.

5.3. 운전원은 교정.점검을 할 수 있어야 한다.

5.4. 운전원은 Standards Lab.에서의 교정 수속을 할 수 있어야 한다.

5.5. 운전원은 요구되는 계측기 보수를 수행할 수 있어야 한다.

6. 작업보조원의 감독

운전원은 Loop 보수나 개조작업 수행시 작업보조원을 지도할 수 있도록 작업 보조원의 업무를 충분히 파악하여야 한다.

7. 증명허가

Loop 운전원의 증명은 담당 책임자에 의해 행해진다.

8. 훈련 이수증명

Loop에 관한 지식에 대한 구두시험과 안전규칙 및 긴급시 처치절차에 관한 필기시험을 치른다.

輕水爐核燃料 爐外實證試驗 技術開發

1989年 5月 20日 印刷

1989年 5月 25日 發行

發行人 韓 弼 淳

發行處 韓國 에너지 연구소

大田市 西區 德津洞 150

印刷所 新 友 社

믿는마음 지킨약속 다져지는 신뢰사회