

가압경수로 안전성 실증실험 연구

Experimental Research on Pressurized
Water Reactor (PWR) Safety

研 究 機 關
韓 國 原 子 力 研 究 所

科 學 技 術 處

제 출 문

과학기술처장관 귀하

본 보고서를 "가압경수로 안전성 실증실험 연구 (Experimental Research on Pressurized Water Reactor(PWR) Safety)" 사업의 연구 보고서로 제출합니다.

1991 년 12월

연구기관명 : 한국원자력연구소

연구책임자 : 김 동 수

연 구 원 :

채성기 장원표 정영종

이재훈 김인식 이성재

김의광 서욱환 이 준

손영석

책임감수위원 : 이 창 건

감수위원 : 유 건 중

목 차

제1장 서론	1
제1절 연구배경	1
제2절 연구의 목적 및 필요성.....	4
제2장 본론	7
제1절 연구내용 및 방법	7
1. BETHSY 실험장치 개요	7
가. 실험의 목적 및 범위	7
나. 실험장치의 제원	8
다. 실험수행상황	15
2. BETHSY 입수자료 분석	16
가. 단상자연대류.....	16
나. 이상자연대류.....	24
다. 증기발생기 재고량변화	30
라. 급수 완전상실	35
마. 6" 저온관 파손	42
바. 복수 증기발생기 튜브 파손	47
사. ISP-27 (지연된 최후절차와 고압안전주입 불능상태의 2" 저온관 파손)	49
3. CATHARE를 이용한 모의계산	56
가. CATHARE 전산코드 개요	56
나. 모의 계산의 목적	57
다. 실험조건 및 모의 방법	58
제2절 연구결과 및 고찰	59

1. 단상자연대류 모의 결과	59
가. 정상상태 모의	59
나. 실험과 비교 분석 결과	60
다. 민감도 분석	63
2. ISP-27 계산결과 및 분석	64
가. 계산 결과	64
나. 실험과 비교 분석 결과	64
제3장 결론 및 건의사항	68
제1절 결론	68
제2절 기대효과	70
참고문헌	71

그 림 목 차

그 림 1	BETHSY 실험장치의 개략적인 일차계통 단면도	73
그 림 2	BETHSY 실험장치의 일차냉각계통의 각부분 높이 ...	74
그 림 3	BETHSY 실험장치의 증기발생기 개략도	75
그 림 4	BETHSY 자료처리 계통도	76
그 림 5	단상자연대류 실험의 일차측 및 이차측 냉각재의 압력	77
그 림 6	단상자연대류 실험의 저온관1에서의 질량유량	78
그 림 7	단상자연대류 실험의 고온관1의 높이방향 압력차이	79
그 림 8	단상자연대류 실험의 증기발생기 일차측의 입.출구 온도차이	80
그 림 9	단상자연대류 실험의 증기발생기에 공급되는 급수유량	81
그 림 10	단상자연대류 실험의 증기발생기의 Collapsed Level	82
그 림 11	단상자연대류 실험의 안전주입 질량유량	83
그 림 12	단상자연대류 실험의 가압기의 Collapsed Level ...	84
그 림 13	이상자연대류 실험의 Upper Plenum과 저온관1에서의 압력변화	85
그 림 14	이상자연대류 실험의 노심입구 출구의 온도	86
그 림 15	이상자연대류 실험의 고온관1에서의 Void Fraction	87
그 림 16	이상자연대류 실험의 고온관 및 저온관에서의	

	질량유량	88
그 립 17	이상자연대류 실험의 Loop2의 SG Plena 사이의 압력차이	89
그 립 18	이상자연대류 실험의 Loop2의 전열관 Upflow와 Downflow의 압력차이	90
그 립 19	이상자연대류 실험의 저온관1에서의 Void Fraction	91
그 립 20	이상자연대류 실험의 노심에서 Two Phase Level과 Collapsed Level	92
그 립 21	증기발생기 재고량 변화를 모의하기위한 CATHARE Nodalization.....	93
그 립 22	증기발생기 재고량 변화시 Downcomer 유량.....	94
그 립 23	급수완전 상실사고의 1차측 냉각수 압력	95
그 립 24	급수완전 상실사고의 노심출력	96
그 립 25	급수완전 상실사고의 HPSI 유량	97
그 립 26	급수완전 상실사고의 가압기 수위	98
그 립 27	급수완전 상실사고의 증기발생기 압력	99
그 립 28	급수완전 상실사고의 증기발생기 Collapsed Level..	100
그 립 29	급수완전 상실사고의 1차측 압력 변화	101
그 립 30	급수완전 상실사고의 증기발생기 증기유량	102
그 립 31	급수완전 상실사고의 가압기 수위 변화	103
그 립 32	급수완전 상실사고의 Downcomer 유량	104
그 립 33	급수완전 상실사고의 노심에서 냉각재 온도 변화 ..	105
그 립 34	급수완전 상실사고의 노심에서 기포율 분포도	106
그 립 35	급수완전 상실사고의 노심의 Collapsed Level	107
그 립 36	급수완전 상실사고의 저온관에서 기포율	108

그림 37	급수완전 상실사고의 저온관에서 Collapsed Level..	109
그림 38	급수완전 상실사고의 Relief Valve에서 기포율	110
그림 39	6" 저온관 파손사고에 사용된 노즐 단면도	111
그림 40	6" 저온관 파손사고의 파단면을 통하여 방출된 유량	112
그림 41	6" 저온관 파손사고의 파단면을 통하여 방출된 유량 합계.....	113
그림 42	6" 저온관 파손사고의 Accumulator 유량	114
그림 43	6" 저온관 파손사고의 Accumulator 유량 합계	115
그림 44	6" 저온관 파손사고의 노심의 Collapsed Level	116
그림 45	6" 저온관 파손사고의 고온관1의 유체온도	117
그림 46	6" 저온관 파손사고의 고온관2의 유체온도	118
그림 47	6" 저온관 파손사고의 증기발생기1의 2차측 온도...	119
그림 48	SGTR사고의 노심출력 변화	120
그림 49	SGTR사고의 펌프속도(Phase I,II)	121
그림 50	SGTR사고의 펌프속도(Phase III,IV)	122
그림 51	SGTR사고의 SI와 Charging 유량	123
그림 52	SGTR사고의 SI와 Charging 온도	124
그림 53	SGTR사고의 일차계통 Letdown 유량	125
그림 54	SGTR사고의 SG1의 Blowdown 유량	126
그림 55	SGTR사고의 SG1의 증기유량	127
그림 56	SGTR사고의 SG2 및 SG3 증기유량	128
그림 57	SGTR사고의 밀림관의 Collapsed Level.....	129
그림 58	SGTR사고의 가압기의 온도변화	130
그림 59	SGTR사고의 SG1 전열관의 Collapsed Level	131
그림 60	SGTR사고의 Phase IV에서 SGTR 유량	132

그림 61	SGTR사고의 Phase IV에서 SG1 온도	133
그림 62	SGTR사고의 SG1의 Collapsed Level	134
그림 63	SGTR사고의 일차계통과 이차계통 압력	135
그림 64	ISP-27을 모의하기위한 CATHARE 1차계통 Nodalization.....	136
그림 65	ISP-27을 모의하기위한 CATHARE 2차계통 Nodalization.....	137
그림 66	ISP-27 모의를 위한 Intermediate Loop Nodalization	138
그림 67	ISP-27 모의를 위한 Break Nozzle Nodalization....	139
그림 68	단상자연대류 CATHARE 모의를 위한 1차계통 Nodalization.....	140
그림 69	단상자연대류 CATHARE 모의를 위한 2차계통 Nodalization.....	141
그림 70	단상자연대류의 노심 열출력	142
그림 71	단상자연대류의 가압기 압력	143
그림 72	단상자연대류의 증기발생기 압력	144
그림 73	단상자연대류의 노심 출구온도	145
그림 74	단상자연대류의 노심 입.출구 온도차이	146
그림 75	단상자연대류의 가압기 수위	147
그림 76	단상자연대류의 가압기의 증기부분 온도.....	148
그림 77	단상자연대류의 저온관의 온도변화	149
그림 78	단상자연대류의 고온관 온도(BC1C)	150
그림 79	단상자연대류의 고온관 온도(BC1G)	151
그림 80	단상자연대류의 고온관과 저온관의 온도차이	152
그림 81	단상자연대류의 Downcomer 체적유량	153

그림 82	단상자연대류의 고온관에서 액체속도	154
그림 83	단상자연대류의 저온관에서 질량유량	155
그림 84	단상자연대류의 고온관1의 높이방향 압력차이(BC1C)	156
그림 85	단상자연대류의 고온관1의 기포율(BC1C)	157
그림 86	단상자연대류의 고온관2의 기포율(BC1G)	158
그림 87	단상자연대류의 증기발생기 전열관의 입.출구 온도차이	159
그림 88	단상자연대류의 주급수량	160
그림 89	단상자연대류의 증기발생기 수위변화	161
그림 90	단상자연대류의 증기발생기의 증기유량	162
그림 91	단상자연대류의 SG1 전열관의 Collapsed 수위	163
그림 92	단상자연대류의 민감도 분석시 저온관1 온도	164
그림 93	단상자연대류의 민감도 분석시 고온관 유체속도 ...	165
그림 94	단상자연대류의 민감도 분석시 증기발생기 증기유량	166
그림 95	ISP-27의 고온관1에서 기포율	167
그림 96	ISP-27의 고온관2에서 기포율	168
그림 97	ISP-27의 저온관1에서 기포율	169
그림 98	ISP-27의 저온관2에서 기포율	170
그림 99	ISP-27의 노심의 압력강하	171
그림 100	ISP-27의 Upper Plenum 압력강하	172
그림 101	ISP-27의 Guid Tube에서의 압력강하	173
그림 102	ISP-27의 Downcomer와 Upper Head사이의 압력강하	174
그림 103	ISP-27의 고온관1과 저온관1 사이의 압력강하	175

그림 104	ISP-27의 RCP1의 수두	176
그림 105	ISP-27의 Cross-Over Leg1의 Downflow 방향 압력강하	177
그림 106	ISP-27의 Cross-Over Leg1의 Upflow 방향 압력강하	178
그림 107	ISP-27의 Cross-Over Leg2의 Downflow 방향 압력강하	179
그림 108	ISP-27의 Cross-Over Leg2의 Upflow 방향 압력강하	180
그림 109	ISP-27의 SG1의 Plena의 입.출구 압력차이	181
그림 110	ISP-27의 SG1의 Plenum의 입구에서 압력강하	182
그림 111	ISP-27의 SG2의 Plena의 입.출구 압력차이	183
그림 112	ISP-27의 SG2의 Plenum의 입구에서 압력강하	184
그림 113	ISP-27의 Break 유량의 합계	185
그림 114	ISP-27의 Break 유량	186
그림 115	ISP-27의 SG1에 공급된 주급수 유량	187
그림 116	ISP-27의 Accumulator2의 재고량	188
그림 117	ISP-27의 Accumulator2의 압력	189
그림 118	ISP-27의 SG1의 Steam Dome 압력	190
그림 119	ISP-27의 SG2의 Steam Dome 압력	191
그림 120	ISP-27의 SG1의 증기유량	192
그림 121	ISP-27의 SG2의 증기유량	193
그림 122	ISP-27의 가압기 압력	194
그림 123	ISP-27의 노심 입구온도	195
그림 124	ISP-27의 노심 출구온도	196
그림 125	ISP-27의 고온관1의 온도	197

그 립 126	ISP-27의 저온관1의 온도	198
그 립 127	ISP-27의 SG1 Downcomer 바닥에서 온도	199
그 립 128	ISP-27의 SG2 Downcomer 바닥에서 온도	200
그 립 129	ISP-27의 노심의 Collapsed Level	201
그 립 130	ISP-27의 노심 1.628m 위치에서의 피복재온도	202
그 립 131	ISP-27의 노심 2.648m 위치에서의 피복재온도	203
그 립 132	ISP-27의 노심 3.600m 위치에서의 피복재온도	204

표 목 차

표 1	설계기준사고 이해를 위한 대형 실험장치	205
표 2	BETHSY 실험장치의 실험 수행 상황.....	206
표 3	단상자연대류 실험의 종류	209
표 4	단상자연대류 실험의 초기조건	210
표 5	안전주입으로 공급된 질량의 분포도	212
표 6	단상자연대류 실험결과 요약	213
표 7	이상자연대류 실험시 일차계통에서 배출된 질량	214
표 8	증기발생기 재고량 변화의 자연대류 실험 주요결과 ...	215
표 9	증기발생기 재고량 변화의 강제대류 실험 주요결과 ...	216
표 10	증기발생기 재고량 변화의 자연대류 실험시 실험치와 계산치의 비교	217
표 11	증기발생기 재고량 변화의 강제대류 실험시 실험치와 계산치의 비교	218
표 12	증기발생기 재고량 변화의 자연대류 실험의 민감도 분석 결과	219
표 13	증기발생기 재고량 변화의 강제대류 실험의 민감도 분석 결과	220
표 14	증기발생기 재고량 변화의 실험치와 CATHARE 계산치의 민감도 비교 분석	221
표 15	급수완전 상실사고의 원자로 및 가압기의 정상상태 주요변수	222
표 16	급수완전 상실사고의 일차계통 LOOP의 정상상태 주요변수	223

표 17	급수완전 상실사고의 이차계통의 정상상태 주요변수 ..	224
표 18	급수완전 상실사고의 각 LOOP 및 펌프의 정상상태 유량	225
표 19	급수완전 상실사고의 사고진행 상황	226
표 20	급수완전 상실사고의 냉각재 펌프의 Cooldown 상황 ...	226
표 21	급수완전 상실사고 실험시 관측된 주요 물리적 현상 ..	227
표 22	6" 저온관 파손사고의 초기조건	230
표 23	6" 저온관 파손사고의 진행상황	232
표 24	단상 자연대류 실험의 정상상태 실험치와 계산값 비교	233
표 25	단상 자연대류 실험 계산시 CPU 시간과 실시간 비교 ..	236
표 26	ISP-27 수행결과 주요변수 요약	237
표 27	ISP-27 계산시 CPU 시간과 실시간 비교	238

요 약 문

I. 제목

가압경수로 안전성 실증실험 연구

II. 연구개발의 목적 및 중요성

본 연구의 목적은 현재 국내에서는 수행되고 있지 않지만, 장래에는 반드시 이루어야 할 대형실험 수행과 전산코드 검증체계 확립을 위한 기초단계로서 불란서 CEA의 BETHSY 실험장치에 관한 자료를 입수하여 분석하고, 장래 실험수행과 전산코드 검증체계 확립에 필요한 기본기술을 습득하는 것을 목표로 한다.

대형 실험에서의 물리적 거동 파악은 실제 원전 사고에 대비한 사고진행의 명확한 이해 뿐 아니라 비상 운전 절차서(EOP)의 신뢰성을 증대시키며, 또한 안전성분석 전산코드를 검증하여 그 불확실성을 개선시킬 수 있으므로, 궁극적인 원전 안전성 확보에 대한 정당성 입증에 이바지하는 효과를 얻는다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

당해 년도에는 불란서 CEA에서 입수한 BETHSY 실험장치와 실험결과를 먼저 분석하여, 실험 목적 및 사고시 예상되는 물리적 거동을 파악한 후 CEA에서 개발한 CATHARE 전산코드로 '자연대류(Test4.3a)' 와 '2" 저온관 파손사고'를 모의계산하여 그 결과를 분석하여, 물리적 현상의 이해와 CATHARE 전산코드의 예측능력 파악이 주 목적이었다. 그러나 다음 년도에는 저유량과 소형냉각재상실사고에 대해 당실에서 개발중인 KOSAC 전산코드의

검증을 목표로 연구가 진행될 것이다.

IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의사항

자료분석 연구 결과 불란서와 같은 원자력 선진국에서는 대형실험의 결과를 전산코드 검증용으로 주로 활용하던 단계를 지나, 실험연구를 통해 사고관리 체계도 검증하여 원전 안전성의 신뢰성을 확보해 나가고 있다는 결론을 얻었다.

‘자연대류(Test 4.3a)’ 실험에 대한 모의계산 결과를 살펴보면 CATHARE 전산코드가 격리 Loop의 1차계통 냉각재 유량 역류에는 문제점이 지적되었고 증기발생기의 증기량도 다소 과대 예측하고 있으나, 대체적으로 일차계통 냉각능력에 대한 계산결과는 실험치와 잘 일치하는 것으로 나타났다. ‘2" 저온관 파손사고’ 모의계산은 증기발생기 경계조건에서 보조급수의 온도가 높게 입력되어, 이의 영향이 전체 과도기를 통해 실험값과 차이를 보여주었다.

대형실험을 통해 관찰된 물리적 거동을 전산코드에 의해 분석하고 같은 사고를 실제 원전의 모의계산에도 적용하여야 실험결과에 대한 정당성을 확보할 수 있으므로, 다음 단계로 실제 원전의 사고해석이 필히 수반되어야 함을 건의한다. 그리고 ‘2" 저온관 파손사고’ 해석 결과의 정당성 입증에 위하여는 증기발생기의 경계조건 중 보조급수의 온도를 수정하여 재 계산할 필요성이 인식되었다.

SUMMARY

I. Title

Experimental Research on Pressurized Water Reactor(PWR) Safety

II. Objective and Importance of the Project

The objective of this research is to analyze the experimental results already performed in BETHSY facility of CEA France and to establish essential technologies for the future implementation of both such an experiment and computer code assessment, which are not undergoing in Korea so far.

Better understanding of physical phenomena anticipated in a nuclear power plant through a large scale experiment leads to the improvements of both Emergency Operating Procedures(EOP) and uncertainties involved in computer code prediction, so it essentially will contribute to a part of the final safety goal for a nuclear power plant.

III. Scope and Contents of the Project

The contents of the present study are divided into 2 categories; namely, analysis of the BETHSY experimental data received from CEA, and CATHARE computer code simulation for the selected experiments, i.e. 'Natural Circulation(Test 4.3a)' and '2" Cold Leg Break'. The later studies are performed under the aims of CATHARE assessment as well as qualification of KOSAC code developing at KAERI, which is

the subject in the next year and will concern an adequacy of KOSAC for the prediction of low flow natural circulation and a small break transients.

IV. Result and Proposal for Application

From analysis of BETHSY data it is understood that an advanced country in nuclear power technologies like France seems to perform a large scale experiment for accident management rather than computer code assessment these days.

On the other hand, the results of CATHARE simulation for the Natural Circulation (Test 4.3a) generally agrees well with the experiment in the primary cooldown, while discrepancies have been observed in the predictions of reversed flow in the isolated primary loop, and the steam flow from the steam generators. Unrealistic predictions in 2" cold leg break simulation are presumed due to the higher aux. feedwater temperature in the secondary side boundary conditions.

CATHARE could predict important physical behaviors preferably in the BETHSY experiments, however, it is proposed that CATHARE also should be applied to an actual reactor for the same transient, in order to qualify the adequacy of the experimental data themselves because of the scale effects in the BETHSY facility design. In 2" cold leg break simulation it is recognized that recalculation should be carried out with modified secondary boundary conditions in order to confirm the analysis.

제 1 장 서론

제 1 절 연구배경

미국에서 1970년대에 발생한 Three Mile원전의 노심 용융사고는 사전에 충분한 운전원 훈련 및 과도기 진행의 이해 부족, 규정된 운전수칙의 불이행, 작동부품의 신뢰성 결여 및 작동시험의 불충분, 주제어실의 계기 배치상의 문제, 그리고 인간오류가 복합적으로 작용하여 단순한 원전의 과도기으로써 조기에 충분히 사고 악화를 방지할수 있었음에도 불구하고 전 세계가 원전 안전성에 회의를 느끼고, 일부에서는 원전 건설이 중단되는가 하면 원전의 필요성까지 도전을 받게 될 정도로 심각한 후유증을 남긴 뼈아픈 사고였다. 이 사고 이후 그 전까지 중시해왔던 설계기준사고 중 대형 냉각재상실사고(Large LOCA) 보다는 비교적 덜 심각할 것으로 예상되었던 사고가 오히려 원전의 안전성에 더 큰 영향을 미칠 수도 있다는 교훈을 얻었다. 따라서 원자력 선진국에서는 설계기준 사고의 보다 명확한 이해와 이에 따른 비상운전절차서(EOP)의 신뢰성 확보를 위하여 표1에서와 같은 대형 실험장치를 건설하여 가능한 원전 계통에서 일어나는 현상을 현실적으로 모의하려는 노력을 기울여 왔다.

이러한 실험장치들 중의 하나인 불란서 CEA의 BETHSY 실험 장치[1]는 불란서형 3-Loop 가압경수로를 높이는 1:1, 그리고 출력과 체적은 1:100으로 모의하여 설치한 대형 실험장치로서 주요 설계기준 사고에 대한 모의 실험을 수행하여, 실제 원전내에서 예상되는 설계기준 사고 혹은 운전 과도기 동안의 물리적 거동 분석을 목적으로 하고 있다. 또한 이 장치는 CATHARE 전산코드[2]의 개발과 병행하여 원전 사고시에 예상되는 물리적 현상의 구명 뿐 아니라 처음부터 코드 검증 및 평가용으로도 활용되고

있다. 최근에는 원전 안전성 확보에 국제적인 공동보조를 취하기 위하여 BETHSY 실험에 관한 국제 협정을 맺어 실험결과를 교환 혹은 유상 분배하고, 실험자료를 입수한 나라들은 안전성 분석 및 평가를 목적으로 이들 자료를 활용하고 있다. 국내에서는 그 동안 1987년 제3차 한.불 원자력 공동상설 위원회 이후 매년 불란서측이 제안한 과제 중 가압경수로의 사고모의 실험인 BETHSY의 실험결과가 국내 원전 안전성 연구에 필수적인 자료 중의 하나로 판단하여 공동 연구방향을 협의하였다. 이 과정에서 BETHSY 실험관련 연구가 선정 즉시 국제 공동연구가 가능한 국책과제로 분류되어 1991년 3월 8일 한국원자력연구소에서 한국원자력연구소와 CEA간에 협약이 체결되기에 이르렀다. 이 공동연구의 내용으로는 KAERI측에서 필요할 경우 모의실험에 직접 참여가 가능하고, 실험결과를 입수하여 국내에서 개발 혹은 보유중인 전산코드의 검증에 사용할 수 있으며, 9개의 실험결과를 3년에 걸쳐 선택하고 1.5MFF를 CEA측에 지급하는 것이 주요 내용이다. 그리고 CEA측에서는 실험결과 보고서, 자료일체, 상세 제원 뿐 아니라 CEA가 개발한 전산코드를 사용할 수 있도록 필요 기술 및 정보를 제공하고, 기술전수를 위해 KAERI가 원할 경우 연구원을 장기간 CEA에 파견하여 공동연구를 수행하도록 지원하는 것이다.[3]

원전의 안전성 평가는 현실적으로는 모의 전산코드의 사용에 의하여 실행되는 것이 보통이므로, 이러한 목적의 사고해석용 전산코드의 예측 능력은 원전 안전성 평가에 대한 신뢰성과 직결된다. 대부분 소형실험에 의하여 각 종 독립된 물리적 현상의 검증을 거친 후, 이들 물리적 모델들의 상호작용 및 일관성을 종합적으로 평가하기 위하여 실제 원전 계통을 비교적 현실적으로 나타내도록 설계된 대형 실험장치를 이용하게 된다.

이런 일련의 검증 과정을 통해 원전 안전성 분석코드들의 원전 모의 계산에 대한 정당성을 확보하거나 혹은 신뢰성 확보를 위한 불확실성 분석을 수행한다. 국내에서는 원전 안전성 평가 분야에서 괄목할 만한 실험도 이루어지 지 못 했을 뿐 아니라 평가용으로 개발된 전산코드 역시 확보하고 있지 못한 상태이다. 따라서 새로이 개발되는 코드나 기존 입수된 코드를 개선 혹은 모델을 추가할 경우에는 타당성의 분석에 충분한 자료를 확보해야 할 필요성이 생긴다. 그리고 개발 혹은 개선된 전산코드를 실험결과와 비교하여 차이점을 분석하기 위해서 반복적인 실험을 수행하지 않을 경우, 코드내 물리적 모델의 한계성과 부적절한 수치적 해석방법의 규명에 상당한 어려움이 존재한다. 대개의 전산코드 개발에서는 코드의 타당성을 확보하기 위하여 실험전의 사전계산에 의하여 실험조건을 결정하고 실험후 다시 모의계산하여 필요한 경우 반복 실험을 수행하는 것이 보통이다. 그러나 국내의 경우에는 이러한 체계적인 전산코드의 검증이 수행되지 못한 관계로 자체에서 보유하고 있는 전산코드의 검증이나 불확실성 분석에 필요한 실험자료의 확보는 외국선진국의 시설을 이용하거나 실험결과를 도입할 수 밖에 없는 현실이다. 이런 점에서 CEA에서 개발되고 체계화된 검증과정을 거쳐 신뢰성을 확보했다고 간주되는 CATHARE 전산코드의 모의계산 결과와 국내 개발 혹은 보유 전산코드 계산결과를간접 비교하여 타당성을 분석할 수도 있기 때문에 본 과제에서 협약을 맺은 BETHSY 실험결과는 실험에 투입된 경비나 노력과 비교할 때 우리나라에 제안된 조건들이 매우 유리하다는 결론을 얻었다.

본 보고서는 다음 장에서 과제의 목적 및 필요성이 기술되고, 본론에서는 수집된 BETHSY 실험자료의 분석 그리고 CATHARE 모의계산결과와 실험결과와의 비교,분석이 주로 언급되며, 마지막 결론 부분에서 본 연구의

수행결과 얻은 결론과 장래의 연구 추진방향 및 건의사항을 제시한다.

제2절 연구의 목적 및 필요성

본 연구는 현재 국내에서는 수행하고 있지 않지만, 궁극적으로는 확립해야 할 대형실험 수행과 전산코드 검증에 대한 기술습득의 기초 단계로서, 실험 수행 주체인 불란서 CEA의 BETHSY 실험장치에 관한 자료와 실험결과를 입수하여 분석하므로써, 장래 실험수행 및 전산코드 검증체계 확립에 필요한 기본 기술 습득을 목표로 한다. 그리고 대부분 대형 실험장치는 실제 원전의 설계 및 건설에 요구되는 정도 이상의 측정 및 기술의 정확성이 필요하며 특정 재원에 대해서는 실제와 같은 값을 사용하므로, 그 설계에 있어서는 실제 현상을 모의할 수 있는 축적 그리고 안전성 및 보수 유지에 각별한 관심이 주어진다. 이러한 대형 실험장치에 관한 상세한 정보입수는 차후 자체 실험수행의 계획수립 과정에서 요구될 실험의 규모, 재원, 필요 장비 및 부지선정 결정, 그리고 계획의 정당성 입증에 참고자료로 활용된다.

설계요구 조건들은 주로 장시간의 축적된 경험이 필요한 경우가 대부분이다. 따라서 국내제작 및 설치의 경우 필요한 경험이 풍부하지 못한 관계로 실험자료의 입수과정에서는 CEA측의 기술경험을 습득하고, 필요한 측정장비의 설치 및 운용에 관한 정보 제공 뿐 아니라, 그 원리를 이해하므로써 부품의 조달방법 및 국내제작의 가능성에 대해 참고자료의 확보 기회로 도 이용할 수 있다. 대형실험은 실험수행의 목적에 따라 축적이 다르므로 설계단계에서 이러한 요구조건의 결정과정에 대한 파악이 필수적이다. 축적의 부적절한 선택은 원전에서 일어나는 실제의 물리적 현상을 대표하지 못하여 대형실험의 장점을 이용할 수 없으므로 그 의미를

상실할 가능성도 있다. 이의 정확한 선택과 물리적인 적합성 판단은 실험수행의 결정적 역할을 하게되므로 세심한 고려가 필요하다. 이런 기술 역시 오랜 경험과 물리적인 통찰력에서 야기되므로 첫단계에서 부터 국내에서 곧 바로 착수하기란 위험부담이 상당히 따른다. 이 점을 고려하여 연구원을 직접 실험에 참여시켜 실험연구에 대한 관련 기술을 습득하는것도 본 과제의 연구 목적상 필수적이라 판단된다.

자체 실험에 대한 기본기술을 습득하는것 외에도 입수된 실험결과를 이용하여 필요한 각종 전산코드 검증에도 활용이 가능하다. BETHSY실험자체가 원전 사고시의 과도기를 모의하는 실험이므로, 이미 독립적으로 개발된 물리적 모델들을 종합적인 물리적 거동을 통해 확인할 수 있기 때문에, 전산코드 자체의 예측능력 및 한계에 대한 평가 뿐 아니라 물리적 현상의 보다 명확한 이해도 가능하다. 따라서 대형실험은 전산코드의 신뢰성을 확보하고 실제 원전에서 일어날 물리적 거동에 대한 현실적인 과도기의 이해가 가능하지만, 소형실험에서는 원전에서 발생하는 실제 종합적인 물리적 거동을 묘사하기에는 정당성이 결여되므로, 전산코드의 타당성 검증에는 이러한 대형실험의 수행이 필수적임을 알 수 있다.

기본 기술의 확립외에도 BETHSY와 같은 대형 실험장치의 설계, 제작, 건설 및 운영에는 원전의 건설과 유사한 설계기술, 제어계통 관련 전자계측장비, 그리고 데이터 수집을 위한 전산체계 등이 동원되므로 주변의 유사 관련업계의 활성화도 기대될 수 있으며, 이는 또 다른 실험관련 부품의 제작에도 영향을 미치므로 결국 전반적인 실험관련 업체의 기술발전에 상승작용을 가져올 수 있다. 그리고 대형 실험장치의 제작 자체도 장시간이 소요되고 원전설비에 경험이 있는 제작사가 참여해야 함을

감안할때, 여기서 얻어진 기술은 원전 건설에도 적용될 수 있으므로 결국 원전 관련 주변산업의 기술개발과 활성화에도 이바지한다.

입수된 자료의 분석결과 얻어진 물리적 현상에 대한 현실적인 이해는 원전 안전성 확보에 대한 명확한 방향을 제시하면서 유사한 현상에 대한 모의계산 결과의 타당성 판단에도 주요한 참고 자료로 활용된다. 설계변경 및 운전조건의 변경에 대비한 타당성 검토를 위해 미리 개략적으로 결과를 추측할 수 있는 기본 지식을 제공하여, 원전 안전성 평가 및 설계개선의 측면에서 연구동기를 부여할 것으로 기대된다.

제 2 장 본 론

제1절 연구내용 및 방법

1. BETHSY 실험장치 개요

가. 실험의목적 및 범위

BETHSY 실험장치는 CEA, EDF 및 FRAMATOME사의 공동지원으로 3-Loop 가압경수형 원자로의 과도현상을 연구하기 위한 총체적 실험장치이다.[4] BETHSY 실험장치 및 실험결과는 개발하는 전산코드의 검증 뿐 아니라 사고시에 발생할수 있는 계통의 거동에 대한 물리적 현상을 이해하는데 도움이 된다. 또한 기존의 전산코드로 모의계산한 결과를 분석하므로써 전산코드의 물리적 모델링에 대한 타당성을 검토할 수도 있으며 실험장치 및 그 운용방법을 습득함으로써 장래의 자체실험 설계 및 수행에 대비한 개념착상의 참고로 사용 할 수 있다. 이 실험장치의 주 목적은 CATHARE 전산코드의 평가 및 3-Loop PWR 비상운전 절차서(EOP)의 가정들에 대한 물리적 타당성을 검토하는데 있다.[4]

BETHSY 실험장치는 원자로 냉각재계통(RCS)의 비대칭적인 냉각을 고려하기 위하여 실제 원전의 Loop과 같은 3-Loop을 모의 실험할 수 있는데 BETHSY 실험장치의 개략적인 일차계통 회로는 그림 1에 나타나 있다. BETHSY는 원전의 실제 압력을 모의할 수 있는 실험장치로 일차계통의 최고 작동압력은 17.2 MPa이고, 이차측은 8 MPa까지 유지할 수 있으며, 노심출력은 잔열 수준(Decay Heat Level)으로 제한되어 운전된다. 이것은 BETHSY의 주 목적과도 일치하는 것으로써 운전자가 사고진행에 대한 대응을 할 수 없는 사고를 가정하므로 이상유동이 포함되거나 정격출력에 관련된

모의는 요구되지 않는다. 따라서 ATWS(Anticipated Transient Without Scram)의 모의에는 적절치 못하다. BETHSY의 냉각재 펌프는 실제 원전의 냉각재 펌프를 축소하여 정격 유량을 공급할 수 있도록 설계되었다. 이것은 운전자가 RCP의 정지를 필요로 하지 않거나, 사고진행동안 3개의 RCP가 완전히 정지하지 않는 과도기에 대한 계통분석, 또는 RCP를 수정하여 사용할 경우 나타나는 잇점등을 연구할 때 유용하다. BETHSY의 체적은 1/100로 축척된 반면 높이는 1/1로 설계되었다. 높이를 축척하지 않고 실제값을 유지하는 이유는 많은 사고들이 사고초기에 RCP가 정지되어 높이와 관련하여 중력이 일차계통의 거동에 중요한 역할을 하기 때문이다. 그림 2는 일차계통의 개략적인 위치를 나타낸다. NSSS와 안전계통에 작동하는 모든 회로와 계통들이 BETHSY에 모의되어 있으며 주요한 것들은 다음과 같다.

- 가압기: 히터, 살수계통(Spray System), 감압밸브
- 체적제어계통
- 안전주입계통: 고압(HPSI) 및 저압안전주입(LPSI), Accumulator
- 이차측: 증기발생기 밸브, 대기 및 복수기 덤프밸브, 주 및 보조 급수계통, Blowdown Lines

나. 실험장치 제원

(1) 일차계통

주 냉각재계통은 전열기에 의하여 가열되는 노심을 가지고 있는 원자로 용기, 외부 하향통로(External Downcomer)와 3개의 Loop이 있으며, 각 Loop에는 동일한 증기발생기와 냉각재 펌프가 있고, 가압기는 1번 Loop에 달려있으며, 필요시 Surge Line을 다른 Loop에 이동하여 연결시킬

수도 있다.

(가) 원자로 용기

원자로 용기의 재질은 Stainless Steel이고 최고 작동압력과 온도는 17.2 MPa, 400 °C이며 용기가 허용할 수 있는 최대 온도는 10 MPa에서 600 °C 이다.

- 노심

BETHSY의 노심은 17x17의 PWR 연료다발과 동일한 배열로 전기봉 428개와 Guide Thimble 29개로 구성되어 있다. 이것은 전기적으로 3 Mw까지 공급할 수 있는데 BETHSY 정격출력의 10%보다 약간 큰 출력이다. 전기적 가열봉은 외경이 9.5 mm이며 축방향으로 출력분포가 Cosine곡선을 가진다. 노심의 주위에는 PWR의 Barrel과 Baffle에 해당하는 공간이 있으며 노심우회 유량(Core By-Pass Flow Rate)은 PWR의 정상상태 유량을 체적비로 축적하였다.

- Upper Head 와 Upper Plenum

Upper Head와 Upper Plenum의 체적과 높이는 일반적인 축적계수 즉 체적은 1/100, 높이는 1/1을 사용하였다. 제어봉 안내관(Control Rod Guide Tube)이 통과하는 이들 두 체적사이의 유로는 여러개의 관을 사용한다.

- 하향통로(Downcomer)

저온관과 Lower Plenum을 연결하는 하향통로는 2부분으로 나누어져 있다. 윗부분은 튜브로 구성되어 있는데 이는 하향통로의 수력학적 직경, 하향통로에서 노심으로의 열전달 및 구조물의 열전달로 인한 하향통로의 비블림을 방지하기 위하여 튜브로 하였으며, 아랫부분은 노심입구에서 균일한 유동분포를 얻게하기 위하여 환상형(Annular) 튜브를 사용하였다.

- 원자로에 연결된 회로

체적제어계통의 일부분으로 냉각재의 Letdown은 압력용기의 Lower Plenum에서 가능하게 제작되었으며, 112 kw의 히터를 사용하여 뜨겁거나 차거운 물을 안전주입 저장탱크에서 일차계통으로 공급할 수 있다. 그리고 수소, 헬륨등과 같은 비응축성 가스를 모의할 수 있게 하기위하여 Upper Plenum에 Tapping이 있다.

(나) 일차측 Loop

- 직 경

관의 직경은 항류흐름(Counter Current Flow), 천이영역, 수평관에서의 성층유동(Stratified Flow)등의 현상을 가능한한 잘 모의하기 위하여 Froude Number를 기준으로 축척하였다. BETHSY의 PWR과 내경비는 $d/D=f^{2/5}$ 로써 $f=1/100$, $D=737$ mm 이므로 $d=118$ mm가 된다. 여기서 f 는 체적의 축척비이다.

- 길 이

BETHSY와 PWR의 길이비는 $1/L=f^{1/5}$ 이된다. 그러나 실제길이는 다른 판단기준과 기술상의 문제점으로 Froude Number에 의한 축척과는 다르다. 즉 Intermediate Leg의 수평관은 Froude Number에 의하여 축척하였으나, 수직관은 $f^{1/5}$ 이 아닌 1/1로 하였다. 이로인하여 Intermediate Leg과 냉각재 펌프의 Suction측 체적은 20% 정도 증가하였다.

- 고온관, 저온관 노즐

체적축척이 1/1이 아니기 때문에 고온관 및 저온관 노즐의 위치선정에 어려움이 있는데, BETHSY에서는 하향통로와 Intermediate Leg에서 수두를 잘 모의하기 위하여 저온관 노즐은 노즐의 아랫부분의 높이를 일치시켰다. 고온관 노즐의 위치는 특별히 중요한 기준이 없기 때문에 PWR의 고온관

축과 같은 높이로 하였다.

(다) 냉각재 펌프

- 주요특성

3개의 냉각재 펌프는 Hydrostatic Bearing, Thermal Barrier와 2개의 Mechanical Seal을 가진 수직축의 펌프이다. 축적된 정격조건에서의 작동능력은 다음과 같다. 펌프의 최고회전수는 2970 rpm이며 f에 의하여 축적된 최대유량은 $0.063 \text{ m}^3/\text{sec}$ 이고 1/1로 축적된 Head는 78 m이다. 펌프는 직류전동기이기 때문에 속도를 0에서 최고 속도까지 전기적으로 용이하게 제어할 수 있다. 따라서 Coastdown 곡선이나 냉각재유량을 필요에 따라 임의로 제어할 수 있다.

펌프가 정지되지 않은 상태 또는 정지가 어느정도 지연된 경우 일차계통의 거동을 분석하기 위하여 이상(Two-Phase) 또는 증기상태의 유동에서도 작동이 가능하다. 또한 정방향이나 역방향으로의 회전을 정지시키기 위하여 Rotor의 정지(Locking) 기능이 있다.

- 펌프에 연결된 회로

펌프 Hydrostatic Bearing의 물 공급회로는 $10^{(-2)} \text{ l/sec}$ 에서 $2.5 \times 10^{(-2)} \text{ l/sec}$ 의 유량을 공급할 수 있으며 주입온도는 $90 - 120^\circ\text{C}$ 를 유지하여 Mechanical Seal이 90°C 이상을 초과하는 것을 방지하기 위하여 사용되며 폐쇄회로로써 일차계통의 냉각재와는 별개이다. 펌프에 연결된 모든 냉각 계통들은 일차 계통의 질량보존에는 영향을 미치지 않으나 열보존(Heat Balance)에는 고려해야 한다.

(라) 가 압 기

- 가압기 설계

가압기의 축적은 다른 부분과 동일한 방법으로 한다. 가압기의 내경은

210 mm로써 PWR에서 발생 가능한 이차원 유동현상의 특성들은 체크할 수 없다. 밀림관은 Broken Loop이나 Intact Loop 중 어느곳이나 연결이 가능하며 직경은 몇개의 판단기준들에 의하여 적당히 조정되었다. 즉, 수평관 부분은 온도 성층화기준 및 Froude Number 기준을 적용하고 수직관 부분은 CCFL(Counter Current Flow Limit)기준을 채택하였다. 밀림관의 길이는 수직부분은 1/1로 축척하고 수평부분은 체적비로 축척하였다.

- 가압기에 연결된 회로

- 히터

가압기에는 2.5 kw의 히터가 6개 있는데 3그룹으로 나누어져 있다. 하나는 On-Off 히터로 수위제어에 사용되고 나머지 둘은 On-Off와 비례 히터로 압력제어에 사용된다.

- 살수(Spray)회로

정상적인 살수회로는 저온관2에 연결되어 있다. 정상 살수노즐과 보조 살수노즐에 공급되는 유체의 온도를 제어하기 위한 히터가 장착되어 있다. 0.55 m**3의 저장탱크에서 공급되는 살수유량은 160 l/h이다.

- 방출회로(Relief Circuit)

가압기 방출밸브는 Reference PWR과 같은 높이에 위치하며 PWR의 방출밸브와 안전밸브를 모의한다. 일차계통의 압력제어가 이들 제어밸브를 통하여 용이하게 할 수 있으며, 방출되는 유량은 대기중이나 Blowdown 탱크로 방출 가능하다.

(2) 이차계통

이차 냉각계통은 3개의 증기발생기, 주 증기계통, 복수기, 주 급수 및 보조 급수계통으로 구성되며 작동 최대압력은 8 MPa이다.

(가) 증기발생기

증기발생기는 동일한 직경의 전열관 34개가 높이 9m 에서 10.5 m까지 6단계의 높이로 되어있다. 증기발생기 전열관은 이차측의 수력학적 직경(Hydraulic Diameter)이 보존되도록 배치되었으며, 유동분배판이 모의되어 있고 튜브지지판은 PWR과 같은 높이에 같은 모양으로 설치되었다.

그림 3은 BETHSY 증기발생기의 개략적인 형상을 나타낸다. 그림 3에서 보는 바와 같이 BETHSY와 PWR의 가장 큰 차이점은 Steam Dome과 증기발생기 Plena에 있다. Steam Dome의 높이는 1/1로 축척한 것이 아니라 1.5 m로 하였으며 체적축척을 맞추기 위하여 직경은 늘렸다. 그리고 BETHSY의 실험은 저출력이기 때문에 Dome에서 증기속도가 충분히 크지 않아 액체가 증기와 함께 올라가지 않으므로 습분분리기가 없고, 증기발생기 입구,출구 Plenum의 체적 일부는 고온관과 Intermediate Leg에 포함시켰다.

(나) 주 증기계통

주 증기관의 특성은 다음과 같다. Steam Dome 꼭대기에 있는 Nozzle의 크기는 PWR 증기발생기의 유량 제한기(Flow Limiter)의 속도를 보존한다. 각 Line에는 수력학적 저항계수의 균형을 위하여만 사용되는 밸브와 과도현상시 증기계통을 차단시키는 밸브가 있다. 증기헤드에는 복수기 차단밸브가 있고, 각 Line은 제어밸브를 통하여 대기와 연결되어 있으며, Safety 밸브 및 덤프밸브를 모의하기 위한 Stop Valve가 있다. 또한 복수기로의 덤프계통도 모의되어 있다.

(다) 주 급수계통 및 보조 급수계통

주 급수계통은 복잡한 회로로써 정격출력의 0%에서 10%출력까지의 정상상태를 유지할 수 있도록 설계되었다. 증기는 살수응축기(Spray Condenser)에서 응축되며 제어밸브에 의하여 증기발생기 수위가 조절된다. 급수는 급수링을 통하여 증기발생기에 들어오며 급수링은 J-튜브로

구성되어 있다. 보조 급수계통은 두개의 예열기를 통하여 최대 5 m³/h의 유량을 증기발생기에 공급할 수 있는 5개의 피스톤형 펌프가 있다.

(3) 안전주입계통

BETHSY의 안전주입 계통은 고압주입 계통(HPSI), Accumulator, 저압주입 계통(LPSI)으로 구성된다. HPSI의 물은 4개의 히터가 있는 25 m³의 탱크에 담겨있으며 피스톤형 펌프에 의하여 최대온도 120°C의 물을 3 m³/h의 유속으로 공급할 수 있다. 이 계통은 RCS의 압력을 17.2 MPa까지 높일 수 있다. HPSI가 공급되는 위치는 일반적으로 저온관이며 필요에 따라 고온관, 압력용기의 Upper or Lower Plenum에도 장착할 수 있도록 탭(Tap)이 마련되어 있다.

LPSI의 원리는 HPSI와 유사하며 LPSI펌프는 피스톤형 펌프로 20 m³/h의 유량을 공급할 수 있고 2.0 MPa까지 압력을 올릴 수 있다. 저장탱크는 HPSI와 같다. BETHSY의 Accumulator는 체적비로 축적되어 각 Loop에 하나씩 장착되며 8 MPa까지의 압력에서 작동하도록 설계되었다. 표준형은 저온관에 연결되어 있으나 압력용기의 Lower Plenum과 Upper Plenum에도 장착할 수 있다. Accumulator의 주입은 일차계통 압력에 의하여 결정되고 Accumulator의 저수위는 일차계통 설정압력에 의하여 정지된다.

(4) 자료처리 계통

BETHSY의 자료처리는 1000-1250 채널에서 일부는 최대 5Hz 나머지는 1Hz로 Sampling 할 수 있다. 그림 4는 자료처리 계통도를 나타낸다. 측정된 자료는 Magnetic으로 저장되며 이들중 일부는 칼라화면으로 나타낼 수 있다. 자료처리의 주 장비는 Hewlett-Packard사의 주기억용량 8 MB의 HP1000 - A900을 사용하고 5대의 자료처리 Station과 연결되어 있다.

주변장비로는 다음과 같은 것들이 사용된다.

- 실시간 자료처리를 위하여 132 MB의 Disk Drive
- Post Processing을 위하여 571 MB의 Disk Drive
- 흑백터미널
- 그래픽터미널
- Plotter
- 프린터기
- CEA Network과 연결하기 위한 모뎀(Modem)

다. 실험수행 상황

BETHSY 실험장치에서 지금까지 수행한 실험과 앞으로 수행할 실험내용은 표 2와 같다. 표 2에서 보는바와 같이 실험은 정상상태 실험, 중.소형 파단사고, 증기발생기 전열관 파손, 주급수 완전상실, Blackout and AFWS관련 사고, Loss of RHRS 및 대형 파단사고로 나누어 진다. 이들 과도기의 선택은 각 실험마다 초기조건 및 작동조건이 다르므로 물리적으로 폭 넓은 영역과 여러 조건하에서 전산코드의 종합적인 검증에 상당히 적합하도록 실행되고 있을 뿐 아니라 EOP에서 가정된 물리적 현상들에 대해 보다 현실적인 관찰이 가능하다는 점에서 대형실험의 장점을 상당히 효율적으로 이용하고 있다고 판단된다.

2. BETHSY 입수자료 분석

가. 단상 자연대류 실험[5]

(1) 실험개요

단상 자연대류(Single Phase Natural Circulation)실험은 BETHSY 실험장치에서 1988년도에 수행되었는데, 일차계통과 이차계통 사이에 파단이 발생하지 않고 냉각재 펌프(Reactor Coolant Pump)가 정지된 경우 비대칭적인 자연대류를 가지는 일차냉각계통의 현상들과 증기발생기에서 열전달 역류가 일어날때 발생하는 물리적 현상들을 파악하는데 그 목적이 있다. 이 실험에서 노심의 출력(Core Power)은 정격출력의 3%인 883KW를 실험기간 동안 계속 유지한다. 단상 자연대류 실험은 표 3에 나타난 바와같이 4종류로 나눈다. 2대의 증기발생기로부터 냉각이 이루어지는 단상(Single Phase)인 경우, 2대의 증기발생기로부터 냉각이 이루어지면서 이상(Two Phase)인 경우, 안전주입 공급으로 일차계통의 이상상태가 단상상태로 다시 변하는 경우 및 2대의 증기발생기 열전달이 차단되고 단지 1대에 의해서만 열전달이 일어날 경우로 나누어 수행되었으며, 각 단계마다 약 30분 정도의 안정화(Stabilization) 기간을 두었다.

(2) 실험의 초기조건

본 실험을 수행하기 위한 주요 변수들의 초기조건은 표 4와 같다. 표 4에 나타낸 값들은 500초 이상을 측정하여 평균한 값이다. 가압기수위는 가압기의 밑면에서부터의 높이를 나타내고, 증기발생기의 수위는 증기발생기 튜브시트(Tube Sheet) 윗면에서부터의 높이를 나타낸다. 증기발생기의 수위는 약 64%로써 Reference PWR보다 높은 수위를 유지하고 있으나 이는 재순환율(Recirculation Rate)이 실제 원전보다 크기

때문이며, 증기발생기간의 수위오차는 0.1 m이내로 조절되어 낮은 급수온도 (14 °C)에도 불구하고 좋은 안정성(Stability)를 유지하고 있다. 그리고 BETHSY 실험에서는 열손실에 대한 에너지 균형을 유지하기 위하여 일차측에 약 59 kW, 이차측에 약 41 kW로 총 100 kW의 Trace Heating을 공급하고 있는데, 종합 열전달 계수(Overall Heat Transfer Coefficient)는 참고문헌[5]에 있다.

(3) 실험결과

실험의 과도현상은 열적안정화기간(Thermal Stabilization Period)을 가진 4단계로 나누었다. 제1단계는 증기발생기1(SG1)의 급수와 증기가 차단된 상태에서 1차계통을 가압기 수위가 2.2m 될때까지 54 °C/h의 비율로 냉각(Cooldown)시켜서 35분간 안정화한 후, 같은 냉각비율로 증기발생기2 (SG2)와 증기발생기3(SG3)의 압력이 20 MPa이 될 때까지 수행한 후 25분간 안정화하고, 다시 Loop2와 Loop3에 100 °C의 물을 가압기 수위가 3.7 m될 때까지 공급하면서 수행한 후, 마지막으로 SG2 급수와 증기를 차단하여 단지 SG3에서만 에너지 전달이 일어나는 상태에서 SG3의 압력이 0.7 MPa이 될때까지 수행한 후 35분간 안정화 시킨다음 단상 자연대류 시험을 종료한다.

(가) 제 1 단계 실험결과 (0초 - 3100초)

제 1단계의 실험은 초기상태에서 얻은 조건으로부터 출발한다. 고립된 SG1은 압력이 70 bar 이상이 되면 Safety Valve를 통하여 증기를 대기로 방출하므로써 70 bar를 유지하고 일차측 냉각(Cooldown)은 SG2와 SG3를 매분당 1.2 bar씩 감압시키므로써 이루어진다. 그리고 일차측의 냉각은 가압기 수위가 2.2 m에 도달하면 정지한 후 약 35분간 안정화하여 제1단계 실험을 마친다.

- 총체적인 현상(Overall Behaviour)

약 1150초의 짧은 냉각기간에도 불구하고 54 °C/h의 냉각 목표치를 전 영역을 통하여 얻었으며, 가압기의 수위는 약 14 cm/min, RCS 압력은 1 bar/min씩 감소하였다. 또한 제1단계 실험에서는 약 43 °C의 아냉각 여유도(Subcooling Margin)를 유지하고 있으며 가압기의 수위는 1.4 m, RCS압력은 136 bar, 그리고 SG1의 압력은 69 bar, SG2 및 SG3의 압력은 49 bar를 유지한다.(그림 5)

- Loops

Loop1 증기발생기의 입,출구 Plenum에서의 온도는 노심출구의 온도로 고정되며 압력도 다른 두 증기발생기와 비교시 일정한 값인 69 bar로 안정하게 된다.(그림 5) SG1 Plena의 입구와 출구의 온도차이는 19 °C에서 3 °C로 감소하고 유량은 초기상태보다 약 55%가 감소하여 Downcomer에서의 유량은 초기상태의 약 6%로써 매우 적은편이다. 노심에서 발생하는 에너지는 883 kW로 일정하고 SG1을 통하여 방출되는 에너지가 감소했기 때문에 SG2의 입구와 출구온도차이는 19 °C에서 26 °C로 약 30%, SG3은 18 °C에서 25 °C로 약 38% 증가하였다. 이와 함께 Loop2 및 Loop3의 유량도 12%정도 증가하였다.(그림 6)

- 증기발생기

SG1은 급수와 증기의 배출이 차단되었기 때문에 Riser의 바닥부분에서 온도가 포화온도에 도달하게 되고, Collapsed Level은 0초에서 900초까지는 3.2 m/h의 비율로 급격히 감소하다가 그 이후는 0.7 m/h로 서서히 감소한다. SG2와 SG3에 공급되는 급수온도는 항상 14 °C로 일정한 온도를 유지하고, 급수유량은 수위가 13.3 m를 유지하도록 조절되면서 공급된다. 약 900초 부근에서 급수유량이 증가했기 때문에 SG2 및 SG3의 Riser

입구온도가 15 °C에서 10 °C로 감소했다. SG2와 SG3의 압력은 69 bar에서 49 bar로 감소한다.

- 원자로 용기의 Upper Head 및 Upper Plenum

원자로 용기의 Upper Head와 Upper Plenum의 고온관 보다 위쪽 부분은 노심 출구온도에 영향을 받지 않는다. 이 부분은 제1단계 실험기간동안 11 °C 감소한다. 그리고 Upper Head Bypass 유량은 200 cm³/sec에서 120 cm³/sec로 감소하였으나, 안정화 기간동안 다시 150cm³/sec로 증가하였다. Upper Head의 냉각율은 약 14 °C/h로 Loop의 냉각율 54 °C/h와는 무관하다.

(나) 제 2단계 실험결과 (3100초 - 8100초)

제 2단계 실험은 SG2 및 SG3의 압력이 20 bar가 될 때까지 일차측이 냉각된다. 이 실험에서 Cooldown시키는 방법은 제1단계에서와 같은 방법으로 하는데, 이차측의 압력감압 비율만 1.2 bar/60 sec에서 1.2 bar/100sec로 감소한다. 2단계 실험에서는 약 25분간의 안정화가 수행되었다.

- 총체적인 현상

제2단계 실험에서의 냉각율은 46.5 °C/h 이다. 일차측 압력은 136 bar에서 69 bar로 감소하고, 이차측 압력은 SG1의 경우 69 bar를 유지하나 SG2와 SG3는 49 bar에서 19 bar로 감소한다.(그림 5)

- Loops

Loop1에서의 유량은 유량계 Micro-Turbine으로 측정할 수 없을때까지 서서히 감소한다.(그림 6) 가압기가 비게되면 RCS의 압력은 보다 더 빠른 속도로 감압이 진행된다(제1단계 실험에서는 약 1 bar/min이었으나 여기서는 3 bar/min으로 증가하였다). 또한 밀림관(Surge Line)이 비게

되는 것은 Loop1의 고온관에 이상유체(Two Phase)가 나타나는 원인이되며, 약 3850초에서는 고온관에 약 1cm의 Collaped Level이 발생한다.(그림 7) Loop1이 더 이상 에너지 전달의 역할을 하지 못하기 때문에 Loop2와 Loop3의 유량은 약 4-6% 증가하게 된다. SG2와 SG3를 통하여 흡수되는 에너지도 초기상태의 출력보다 약 1.5배정도 증가하게 된다.

- 증기발생기

약 3700초 부근에 SG1은 약간의 열전달 역류가 발생하며 이때 자연대류에 의한 유량은 $1.3E-3 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 로써 Micro-Turbine의 측정한계인 10 cm/sec의 범위를 여전히 벗어난다. 그리고 SG1에서 열전달이 완전한 역류로 변화하는 것은 약 4100초부터 이다. 이때부터는 SG1은 열원(Source)로써 작용하여, 이 실험동안 증기발생기 입구와 출구의 온도차이는 3°C 정도를 유지한다.(그림 8) SG1에서의 물리적 현상은 다음과 같이 요약할 수 있다. SG1에서는 열전달의 역류가 일어나며, 원자로의 Loop2 및 Loop3로 공급되는 온도와 비슷한 온도에서 Loop1은 자연대류를 계속한다.

SG1의 2차측의 열전달 영역에서 냉각수 온도분포를 보면 1.93 m에서 9.98 m 사이에서는 열성층(Thermal Stratification)현상이 일어난 흔적이 전혀 없으며, 열전달 영역의 아랫부분인 0.1 m에서 1.37 m사이에서 약 5°C 의 제한적인 열성층이 발생한다. SG1에서는 열전달 역류로 인하여 압력이 약 3 bar정도 감소하고, 증기발생기 전열관 꼭대기에 증기가 발생하는 약 5500초까지는 정방향의 자연대류가 진행된다. 또한 RCS에 증기가 발생한다는 것은 RCS의 압력이 이 기간동안 일정압력을 유지하고 있음을 나타낸다(약 68 bar). Loop1의 열전달은 전열관에 증기가 생기면서 서서히 진행되며 증기발생기의 이차측은 전 영역이 포화상태가 된다.

SG2와 SG3에는 14 °C의 급수가 공급되며 유량은 평균 200 cm³/sec (0 - 400 cm³/sec)이다(그림 9). 이들 두 증기발생기 사이의 수위 차이는 0.75 m이며, 각각의 수위는 13.4 m에서 12.9 m로 떨어진다(그림 10)

- 원자로 용기의 Upper Head 및 Upper Plenum

Upper Plenum의 고온관 위쪽에서부터 Head 아래까지의 냉각율(Cooldown Rate)은 36 °C/h에서 15 °C/h로 변화하며, Head에서의 냉각율은 일차측의 냉각목표인 54 °C/h와는 무관한 15 °C/h의 일정한 값을 유지한다. 압력손실에 의하여 측정된 Upper Head로의 우회유량(Bypass Flow)은 150 cm³/sec(약 3 cm/sec)이다.

(3.3) 제 3단계 실험결과 (8100초 - 11900초)

이 단계의 실험은 이상(Two Phase)에서 단상(Single Phase)로 변화하는 과정으로써 다음과 같은 단계로 구성된다.

- 저온관(Cold Leg)2와 3에 안전주입계통을 작동시킨다.
- 가압기 수위가 2.1 m에 도달하면 가압기 히터(15 kw)를 작동시킨다.(약9400초)
- 가압기 수위가 3.7 m에 도달하면 SI 작동을 중지한다.(약 9700초)
- 가압기가 포화상태가 되면 Heater의 작동을 중지한다.(약 11400초)
- SI 작동을 중지한 후 약 40분간 안정화 시킨다.

- 총체적인 현상

RCS 계통은 유량이나 증기발생기의 열전달 분포의 수정없이 이상에서 단상상태(액체)로 되돌아 온다.

- Loops

안전주입 작동 이전에는 Loop2 및 Loop3의 저온관에서 열성층은 약 2 °C로 아주 작은 값이며, Loop1의 저온관은 유체가 정체된 상태이므로

상대적으로 더 높은 약 10°C의 성층현상이 나타난다. 그림 11의 안전주입 유량은 0.67 kg/sec로써 Loop유량 3 kg/sec와 비교하면 충분히 작은 값이고 안전주입 유체의 온도는 상당히 높은 100°C이기 때문에 Loop의 유량 및 물성치에 영향을 미치지 않는다. 그리고 안전주입이 끝나는 시점에서는 Loop1의 저온관 열성층은 약 18°C로 8°C가 증가하였으며, 냉각재 펌프를 지나서는 34°C로 증가하였다.

안전주입된 유량은 Loop1에도 공급되지만 Micro-Turbine으로 측정하기에는 너무 적다. 그러나 RCS의 총 질량은 차츰 증가하여 8570초에 밀림관(Surge Line)이 채워지고 8990초에는 증기발생기 전열관 및 가압기가 채워져서 가압기의 압력은 68 bar에서 92 bar로 증가하게 된다.(그림 5) 가압기의 수위는 4.1 m가 된다.(그림 12)

- 증기발생기

안전주입의 공급은 8100초에서 8810초 사이에 SG1의 열전달을 역방향에서 정방향으로 바뀌게 한다. SG1의 밸브작동 압력은 70 bar로써 69 bar의 압력을 유지하고 SG2와 SG3의 압력은 17 bar를 유지한다. SG2와 SG3의 수위는 12.75 m에서 시험종료시 13.25 m로 상승한다.(그림 10)

- 질량보존

평균 안전주입 유량은 69.2 g/sec와 65.3 g/sec로써 공급된 총 안전주입 질량은 210 kg이며, 이값은 직접 측정한 RCS계통의 총 질량변화 208 kg과도 일치하는 값이다. 208 kg의 질량이 RCS 계통에 분포된 상황은 표 5에 있다.

(3.4) 제4단계 실험결과 (11900초 - 1570초)

이 실험은 SG2에 공급되는 급수와 증기의 방출을 차단한 상태로 SG3만이 작동한다.(그림 9) 즉 SG1의 대기방출 압력은 70bar, SG2는

20bar이고 SG3의 감압율은 1.2bar/150sec로 냉각을 목표치는 54 °C/h이다. 제4단계의 실험은 SG3 압력이 7.5 bar에 도달하면 냉각을 중지하고 약 35분의 안정화 기간을 거친 후 단상 자연대류 전 실험을 종료한다.

- 총체적인 현상

이 실험에서는 가압기의 수위가 7 cm/min의 비율로 감소하고(그림 12) RCS 압력은 0.3 bar/min으로 감소하지만, RCS의 아냉각여유(Subcooling Margin)는 60 °C를 유지한다. RCS의 압력은 92 bar에서 86 bar로 감소하고 SG1은 68 bar SG2는 19 bar의 압력을 유지한다.

- Loops

Loop1의 열수력학적 물성치는 나머지 두 Loop과 다소 다르다. 제 3단계 실험의 결과로 인하여 Loop1의 고온관은 Loop2, Loop3보다 8 °C 더 차가운 냉각수가 존재한다. 포화상태의 가압기내 유체가 밀림관으로 보내지면 이 유체는 원자로 용기로 들어가서 Loop1의 고온관 입구온도를 약 20 °C 상승시키고 (12700초 부근), 30 °C의 열성층이 발생한다. 그러나 가압기의 Drain이 Loop1의 증기발생기 쪽에는 영향을 미치지 못한다.

노심의 출구온도는 고온관들의 입구온도에 도달하게되며, 노심출구온도 강하가 고온관1의 온도가 떨어지는 원인이 된다. 이를 통하여 Loop1에 Convection 유동이 존재하고 또한 노심쪽 온도가 높고 전열관쪽의 유체 온도가 낮기 때문에 역류 열전달이 일어나고 있음을 알 수 있다.(그림 73, 그림 78)

SG1의 Hot Plena와 Cold Plena 사이의 온도차이는 3 °C를 유지한다. (그림 8) Loop1의 저온관에서 열성층은 44 °C에서 18 °C로 줄어들고 아냉각 여유도는 약 50 °C 정도이다. SG2의 Plena의 온도는 노심출구 온도로 접근하고 2차측의 압력은 안정하게 된다. SG2의 Plena 입, 출구

온도차이는 28.6°C 에서 6°C 로 감소하게 되고 유량은 제 3단계 실험에서의 유량보다 42%가 감소한 약 1.35 kg/sec 가 되어 Loop2로 전달되는 에너지도 그 만큼 감소하게 된다. Loop2의 유량이 감소했기 때문에 Loop3의 유량은 22% 증가 하였고, SG3의 입.출구 온도차이는 28.6°C 에서 46.6°C 로 증가하였다. 따라서 SG3를 통한 에너지 방출은 2.9배정도 늘어났다.

- 증기발생기

SG1은 69 bar의 포화상태를 유지하고 있으며 SG2는 Riser의 바닥부분에서 포화상태가 발생한다. SG2의 수위는 13050초까지 8.3 m/h 율로 감소한다. SG3의 급수온도는 14°C 를 유지하고 SG2의 차단으로 인하여 SG3의 최대급수유량은 $380\text{ cm}^3/\text{sec}$ 까지 증가하며 평균급수유량은 $280\text{ cm}^3/\text{sec}$ 이고 수위는 13 m이다.

- 원자로 용기의 Upper Head 및 Upper Plenum

1, 2단계 실험에서 설명한 바와 같이 이 부분의 온도변화는 RCS의 냉각과는 관계가 없다. Upper Head 냉각은 1, 2단계의 실험보다는 빨리 진행되는 18°C/h 이며 우회회로 유량은 $215\text{ cm}^3/\text{sec}$ 이다. 끝으로 단상 자연대류 실험의 1단계부터 4단계의 각 Loop당 유량과 방출에너지를 요약하면 표 6과 같다.

나. 이상 자연대류 실험[6]

(1) 개요

BETHSY 실험장치에서 이상 자연대류(Two Phase Natural Circulation) 실험은 1988년 9월에 수행되었다. 이 실험은 일차계통의 자연대류 연구 및 LSTF 실험에서 수행된 결과와 비교하기 위한 것으로 주 목적은 단상(Single

Phase)과 이상(Two Phase) 자연대류, Reflux Condensation 뿐 아니라 과도현상시 일차계통의 제반 현상을 파악하는데 있다. 노심출력은 정격출력의 5%인 1430 kW로 고정하고 증기발생기는 68 bar에서 정상운전하며, RCS의 압력은 154 bar이다.

실험은 크게 두 부분으로 나누어 수행되었는데, 첫번째 부분은 15단계로써 일차측 냉각재량이 100%에서 38%로 감소하고 두번째 부분은 3단계로 증기발생기의 수위가 1 m가 되도록 한 후 일차측의 초기 냉각재량이 100%, 81%, 43%에서 수행되었다.

(2) 실험장치

자연대류 실험에서 요구되는 사항들을 만족시키기 위하여 실험장치를 다음과 같이 수정하였다. 일차계통에서 배출되는 질량을 보다 정확히 측정하기 위하여 냉각재 Letdown을 Accumulator3에 연결하여 배출되는 냉각수량을 Volume Meter로 측정하는 방법을 추가하여, 서로 다른 3가지 방법으로 일차측에서 유출되는 냉각수 질량을 측정하였다. 원자로 용기의 바닥에서 거의 포화상태의 물을 분사할 수 있게 하기 위하여 원자로 용기 바닥부분을 수정하였다. 또한 가압기가 비워졌을 때 가압기를 일차측으로부터 차단하기 위하여 밀림관의 고온관 가까운 부분에 Shut Off 밸브를 장착하였다.

(3) 실험진행 순서

(가) 진행순서

실험장치의 온도와 압력을 올린 후 초기조건(1.1단계)을 찾는다. 초기조건이 만족되면 미리 결정된 양의 물을 빼고 각 단계마다 안정화(Stabilizing) 과정(1.2에서 1.14단계)을 13번 반복한다. 이 기간동안 노심의 가열상태와 진동 상태를 관찰하여 노심의 출력을 변화

시킬것인지 결정한다. 모든 자료의 처리가 끝난후 2번째 실험을 하기 위해서 다시 일차계통에 물을 가득 채우고 1.1단계와 같은 초기조건을 맞춘다. 일차계통의 초기조건이 만족되면 증기발생기의 이차측 물을 수위가 1m가 될 때까지 배출한 후 계통을 안정화 시킨다.(2.1단계) 계통이 안정화되면 다시 일차계통의 물을 81% 및 43%수준으로 배출시킨다.(2.2단계, 2.3단계)

(나) 경계조건

실험기간동안 경계조건은 항상 일정하다. 노심출력은 1.15단계를 제외 하고 항상 1430 kW이고, 1.15단계의 노심출력은 1105 kW이다. 1차계통의 압력은 자유롭게 변화하며 실험초기인 1.1, 2.0, 2.1 단계에서의 압력은 155 bar이고 냉각펌프는 작동하지 않으며, Thermal Barrier에만 냉각계통이 작동한다. 그리고 1.1, 2.0, 2.1 단계를 제외한 모든 실험에서 가압기는 RCS에서 차단되어 있다.

3개 증기발생기는 대칭적으로 제어되며 주 급수는 항상 공급되고 응축기 회로도 정상적으로 작동한다. 이차측의 주요 현상은 다음과 같다.

- 증기발생기 압력 : 67.6 bar
- 주급수 온도 : 251 °C
- 하향통로의 수위 : 13.5 m (첫번째 실험인 경우)
: 1.1 m (두번째 실험인 경우)

(4) 일차계통 질량

• 일차계통 체적

일차계통의 전체 체적 계산은 88년 6월에 수행한 정격출력의 2%에서 이상 자연대류 실험에서 계산하였다. 참고문헌[6]에 의하여 이론적으로 계산한 값과 실제 측정한 값의 차이는 1%이내로 잘 일치하였다.

- 초기 상태

단상대류, 155 bar인 1.1단계에서 일차계통의 질량을 계산하였다. 밀림관과 가압기를 제외한 일차계통의 총 체적을 분류하면 다음과 같다.

- 고온부 체적 : 0.908 m³
- 저온부 체적 : 1.532 m³

이 값은 차가운 상태에서 계산된 값으로 실험온도에서의 열팽창을 고려하면 1.5%가 증가된 0.922 m³과 1.554 m³이 되며, 이때의 밀도 701 kg/m³과 758 kg/m³을 고려하면 총 질량은 1824 kg이 된다.

- 일차계통에서 배출된 질량

표 7에는 일차계통에서 배출된 유체의 량을 나타낸다. 각각 다른 3가지 방법인 압력차이에 의한 측정, 배출물의 유량에 의한 측정, Volumeter에 의한 측정값이 모두 잘 일치하고 있다.

(5) 실험결과

(가) 첫번째 실험 결과

실험결과는 가압기를 제외한 일차계통에 남아있는 냉각재 질량을 매개변수로 하여 기술한다. 초기의 냉각재 질량은 표 7에 나타난 바와 같이 $M_0=1824\text{kg}$ 이다. 초기조건 동안 일차계통 압력(그림 13)은 일차계통의 정상 압력을 유지한다. 이 압력은 일차계통이 배출(Drain)을 시작하자마자 감소하여 원자로 출구온도의 포화압력인 98 bar에서 안정화되는데(그림 14) 이 기간동안은 단상(Single Phase)상태로써 단지 Upper Head와 Upper Plenum의 윗쪽 부분에 증기가 모여 있는 상태이다.

일차계통의 냉각재량이 95%인 기간동안은 다른 매개변수들은 정상상태의 값에 영향을 미치지 않고 단순히 Upper Head의 유체가 Upper Plenum으로 빠져나간다. Vessel에서의 수위가 고온관의 위쪽부분에

도달하게 되면(초기 질량의 87%) 이상대류가 시작되어 증기가 고온관을 지나 증기발생기로 전파된다.(그림 15) 이와 함께 일차계통 압력은 이차계통의 압력과 거의 같게 되고 Loop에서의 유량은(그림 16) 최대 5.7 kg/sec까지 증가한다. 증기발생기 전열관 끝에서의 압력차이는 냉각재량이 78%까지는 양(Positive)의 값이며 최대유량은 Loop유량이 최대인 시간에 나타난다.(그림 17) 냉각재량 81% 단계에서 SG2의 전열관 일부에서는 역방향의 흐름이 나타나지만 SG2의 다른 전열관과 SG1과 SG3의 전열관에서는 그대로 정방향의 흐름을 유지한다.(그림 18)

증기발생기 Plenum의 입구와 출구의 압력차이는 냉각재량이 76%까지는 정(Positive)의 값이다.(그림 17) 이 압력차이가 부(Negative)의 값이 될 때 유동회로는 Upper Plenum, Upper Head와 Downcomer By-Pass로 형성되어 증기가 저온관에 도달하게 된다.(그림 19) 저온관에 유입된 증기는 저온관에서 에너지가 흡수되어 증기발생기 출구에서는 여전히 2-3 °C의 아냉각(Subcooling)된 상태를 유지한다.

냉각재량 62%이하에서는 하향통로의 수위가 저온관 위치 아래로 내려가서 Loop에서의 유량은 작게되고 52%이하에서는 유량 측정이 불가능하게 된다. 52%까지 Loop의 거동은 전적으로 동일하다. 증기발생기의 Down Flow측은 Loop1이 냉각재량 48%일때, Loop2는 45%일때, Loop3는 40%일때 완전히 비게된다.

세개의 Loop간에 평형상태로 되는 마지막 천이과정은 Vessel과 Loop간에 질량전달이 이루어지면서 약 1500초의 오랜 기간동안 진행된다. 이 기간 동안은 증기발생기의 Upflow 부분과 Downflow 부분의 압력차이는 증가하게 되고, Vessel에서의 수위는 감소한다. 전열관에서 압력차이의 증가는 증기발생기 Plenum이 비워져 있으므로 입구에서 Flooding이

일어나기 때문이다. 이와 함께 노심의 질량감소는 노심의 Uncovery를 유발하여 증기유량이 감소하게 된다.(그림 16) 증기의 유량 감소는 전열관에서 고온관으로 역류의 유체가 흐르는 원인이 된다. 노심이 Uncover되어 피복재 온도가 500°C까지 상승하게 되면 실험수행 프로그램에서 계획한 대로 노심의 출력을 감소시킨다.

첫번째 실험의 마지막 단계인 1.15실험은 Reflux Condensation모드로써 Vessel로 되돌아 오는 액체유량을 측정하기 위하여 수행하였다. 노심출력은 1105 kw로 줄었고 일차계통의 총 질량은 초기질량의 34%이며 이상수위(Two Phase Level)는 노심바닥 에서부터 약 4.2 m이다.

(나) 두번째 실험의 결과

일차계통의 유체질량이 감소한 경우 일차계통의 전반적인 정성적(Qualitative) 거동을 다시 실험하였다. 실험결과 일차계통의 온도는 첫번째 실험보다 더 높게 측정되었을뿐 아니라 증기발생기 수위가 높을때는 나타나지 않는 증기발생기 열전달 계수와 관련있는 유동상태의 함수임이 관찰되었다. 일차계통의 유량은 더 많이 감소하였으며 중요 과도현상들을 일차측 냉각재량으로 나타내면 다음과 같다.

- 단상의 초기조건 : 96%
- 이상 대류 발생 : 95%
- Loop의 최대 유량 : 81%
- 저온관에 증기발생: 78%
- 하향통로에 다시물이 채워짐 : 62%
- 증기발생기 전열관의 draining : 47% Loop1
45% Loop2

3번째 증기발생기가 Drain되었을 때 첫번째 실험에서와 같은 Loop과

Vessel 사이의 질량전달 현상이 일어났다. 약 2000초후 노심에서 이상 수위(Two Phase Level)는 2.0 m이며 피복재의 온도가 500°C 에 도달하여 노심의 출력을 차단하였다. 증기발생기 Riser의 이상(Two Phase)수위 윗부분에 있는 열전달 영역이 끝나는 부분에서 증기온도는 일차계통 온도에 접근한다. 본 실험동안 증기의 최대 과열도는 약 30°C 이다. 그리고 열전달 영역의 바닥에 해당하는 증기발생기 하향통로 밑부분의 유체온도는 포화상태이다. 이것은 1.03에서 1.10의 Void Fraction을 유발하는 응축으로 인한 재순환이 있음을 의미한다.

2.1에서 2.3단계 동안 증기발생기 Riser의 Collapsed 수위는 압력차이에 의하여 측정하였다.(그림 20) 이 방법으로 측정한 수위는 평균 1.12 m로 최저 0.98 m에서 최대 1.32 m의 범위내에 있었다. Two Phase Level은 2개의 열전대로 온도를 측정하였는데 한쪽의 열전대 온도는 포화온도에 가깝고 다른 한쪽은 과포화 온도에 가까운 온도가 측정되어 온도가 급격히 변화하는 곳이 이상수위(Two Phase Level)의 위치가 된다. 이와 같은 방법으로 측정한 Two Phase Level은 항상 1.05 m에서 1.88 m사이이며 주로 1.37 m이다.

다. 증기발생기 재고량 변화[7]

이 실험은 2부분으로 나누어져 있으며 서로 다른 2차측 재고량에 대해 연속적인 정상상태로 이루어져있다. 첫번째 부분은 1차측의 노심출력이 580 kW로 단상 자연대류를 하면서 증기발생기 2차측 수위를 3 m, 2 m, 1 m, 0.5 m, 0.05 m 이하의 5가지 상태에 대해 실험을 수행하였다.

두번째 부분은 1차측의 노심출력이 1430 kW, 펌프가 2000 rpm으로 작동할때 10가지의 2차측 상태에 대해 실험을 수행하였다. 즉, 증기발생기

2차측 수위를 10 m, 3 m, 2 m, 1 m, 0.5 m, 0.3 m로 낮추면서 그리고 증기 발생기 2차측 수위를 0.50m, 1m, 2m 그리고 3m로 증가시키면서 수행하였다.

(1) 실험의 목적

- 증기발생기 재고량이 변할때 증기발생기 성능에 관한 향상된 지식 습득
- 1차측의 자연대류와 강제대류 조건에서 노심 열제거 능력 관찰
- 1차측으로 부터 2차측으로 열전달이 일어나지 않을때 현상파악

(2) 실험의 내용 및 결과

이실험의 첫번째 부분은 1차측을 노심출력 570 kW, 압력 15.5 MPa로 자연대류가 일어나며 2차측 증기발생기 수위를 3 m, 2 m, 1 m, 0.5 m 그리고 0.05 m이하의 5가지 경우에 대해 재고량을 감소시키면서 수행하였다. 두번째 부분은 1차측이 노심출력 1430 kW, 압력 15.5 MPa, 펌프속도 2000 rpm으로 강제대류가 일어나며 2차측은 증기발생기 수위를 10 m에서 0.27 m로 낮추어 2차측 재고량을 줄이면서 수행하고 다시 2차측 수위를 0.5 m에서 3 m로 증가시켜 2차측 재고량을 증가 시키면서 수행하였다.

실험을 진행하면서 1차측압력과 가압기 수위를 일정하게 유지하기 위해 살수계통(spray system)과 보충계통(charging system)을 사용하였다. 열손실을 보충하기 위해 1차계통은 53.6 kW의 Trace Heater를 사용하였고 2차계통은 56.4 kW Trace Heater를 사용하였다. 증기발생기 2차측 수위를 일정하게 유지하기 위해 증기발생기 수위가 높은 경우 수위를 낮추기 위해서는 주급수 유량을 줄이거나 응축기냉각 계통으로 부터 배수를 하였으며, 수위가 낮은 경우 수위를 높이기위해 비상 주급수계통을 사용하였다. 비상 주급수계통은 정상 주급수 계통과 평행하게 부착되어 있다. 위 두 경우 실험의 중요변수는 표 8과 표 9에 나타내었다.

(3) CATHARE 모의계산 수행

CATHARE2 Code를 이용하여 실험후 계산을 수행하였다. 2차측 수위감소를 정확하게 예측하기 위해 2차측의 아래 1/3은 Mesh를 조밀하게 나누어 계산하였으며, 1차측은 13개의 Pipe, 5개의 Volume 그리고 1개의 Tee로 구성된 226개의 Mesh로 나누었다. 또 2차측은 6개의 Pipe, 5개의 Volume, 2개의 Tee, 그리고 3개의 경계조건으로 구성된 92개의 Mesh로 나누었다. 자세한 사항은 그림 21에 나타내었다. 1차측 압력과 가압기 압력은 살수(Spray), Charging, Letdown, 노심출력 그리고 펌프 회전속도로 조정하였으며 2차측은 주급수 유량을 조절하여 2차측 수위를 조절하였다.

- 자연대류 결과

CATHARE 계산결과와 실험치를 비교하여 표 10에 나타내었다. 그림 22에 나타난 바와 같이 Downcomer 유량과 Upper Head Bypass 유량은 잘 계산하고 있으며, Upper Head Bypass 유량은 불확실성 20%를 고려하여 Upper Head Bypass의 압력차이를 측정하여 결정하였다. 일차측 온도는 2차측 Swelled Level과 밀접한 관련이있다. 표 10의 State 1,3에 나타난 바와 같이 일차측온도는 평균 2°C정도 작게 계산하고 있으며 Swelled Level은 약 22% 크게 계산하고 있다.

- 강제대류 결과

강제대류에 대한 계산치와 실험치를 비교하여 표 11에 나타내었다. 표 11에서 보는 바와 같이 일차측 온도는 State 2.4까지는 잘 계산하고 있으나 State 2.5이후에는 2차측 재순환율이 실험값과 차이를 나타내게 되는데, 이는 Downcomer에서 Mesh를 크게 잡아 Riser 입구에서부터 Void가 생겨 일차측에서 2차측으로 열전달이 증가 하였기 때문이다.

자연대류에서와 같이 전열관 출구에서 증기온도는 역시 낮게 예측하고

있다. 자연대류와 강제대류에서 2차측 재고량을 변화시키면서 발생하는 물리적 현상은 계산 결과와 비교적 잘 일치하고 있다. 중요계산 결과와 실험치의 비교 변수는 1차측 온도, 2차측 Swelled Level, 증기 발생기 전열관의 일차측과 2차측의 출력분포, Overall Heat Transfer Coefficient, Downcomer와 Upper Head Bypass 유량등이다. 실험치와 비교해서 계산결과의 중요한 차이는 다음의 2가지 경우로 나타낼 수 있다. 첫번째는 증기발생기 2차측 수위가 1 m이하로 떨어질 때 Riser 입구에서부터 Void Fraction이 나타나는것인데, 이것은 Downcomer쪽에 Mesh를 조밀하게 모델링 함으로써 개선될 수 있다. 두번째는 증기발생기 2차측의 전열관보다 위쪽의 과포화 온도에 대한 CATHARE의 계산결과는 비교적 낮게 예측하였다. Trace Heating과 2차측 열손실을 고려하면 전열면적에서 출력분포가 달라질것이며, 결과적으로 전열면적 출구에서 과포화 온도를 보다 정확하게 계산할수 있을 것으로 본다.

(4) 민감도 분석

위에서 언급한 두가지 문제점의 해결방안으로 2차측에 Heat Structure를 추가하여 전 Loop에 열손실이 있을 때와 Riser측에 열손실이 없을때의 두 경우에 대해 민감도 분석을 수행하였다. 그리고 Riser 입구에 Void Fraction이 생기는 것을 방지하기 위해 Downcomer에 Mesh를 증가시켜서 계산하였다.(6개의 Mesh 에서 14개의 Mesh로 증가) 2차측 열손실은 전열면적에 비례하여 고려하였으며, 열전달 계수는 $1.64 \text{ kW}/^\circ\text{C m}^{**2}$, 외부온도는 30°C 로 계산하였다. Trace Heating은 실험치를 기초로하여 선형적으로 변하는것으로 모의하여 총열량은 56.4 kW이다.

(5) 결론

-자연대류

2차측 재고량 감소로인하여 일차측과 이차측 사이의 열전달 분포가 변하였으며, 증기발생기 Rising Part가 담당하는 부분이 2차측 수위가 3 m일때 81%, 1 m일때 66%로 변하였다. 일차측과 이차측의 Overall Transfer Coefficient는 2차측 수위가 감소하면서 거의 변하지 않았다. Downcomer유량은 2차측 수위가 3 m와 1 m사이에서 3%정도 떨어졌으며 이는 밀도차이나 Upper Head Bypass 때문에 일어난 현상으로 분석된다.

- 강제대류

2차측 수위가 3 m - 0.5 m로 변하는 사이에서는 열전달 분포가 수위의 영향을 크게 받지 않으며 고온측으로 약54% 저온측으로 약 46%의 열전달이 일어난다. 일차측과 이차측의 Overall Transfer Coefficient는 2차측 수위가 1 m 이하일때 약 15% 증가하고 있다. 이는 일차측과 이차측의 온도차이가 다르고 열전달 분포가 변하기 때문이다.

라. 급수완전상실 [8]

(1) 개요

(가) 목적

증기발생기 2차측에 Total Loss of Feedwater의 사고 발생시 비상 운전 과정의 연구에 그 목적이 있다.[9] 특히 다음 사항들에 중점을 두었다

- 안전주입 장치와 가압기 Relief Valve를 이용한 1차측 냉각 장치의 냉각능력 ("Feed and Bleed" Mode)
- 1차측에서 2차측으로 열전달에 의한 증기발생기의 Dry-Out동안 증기발생기의 거동
- 잔열제거가 이루어 질때까지 "Feed and Bleed" Mode의 장기간 거동

실제 Transient는 100% Power의 정상운전으로 부터 시작되어야 하지만 BETHSY는 최고 10% 출력만 가능하기 때문에 실험은 과도기부터 행하여 졌으며, 초기 조건을 결정하기 위해 주요 변수(1차측압력, Core Power, 가압기 수위, 증기발생기 수위, 2차측압력)는 서서히 변화한다는 가정하에 100%출력에서 BETHSY Pre-Test Calculation이 행하여 졌다. 이 방법으로는 주급수 상실 후 100%에서 4% Power로 감소하는 약 100초의 과도기 동안에는 급속한 증기발생기의 Drain을 잘 나타낼 수 없으므로 3개 증기발생기의 2차측 냉각재량을 적당히 조절하였다.(초기 수위는 5.76 m)

(나) LOOP 의 상황

실제 원자로의 Control Rod Guide Tube는 Head와 Upper Plenum을 연결하는 한개의 Tube로 모의되었다. 또한 Vent Orifice(d=3 mm)는 Upper Head와 Upper Plenum사이에 직접 통과가 가능하도록 되어있다.

(다) 초기조건

• 주요 변수

과도기를 시작하기 전에 Loop은 초기조건에서 약 1시간동안 운전되었다. 주요 변수들은 1500초 동안의 평균치로 얻어졌다. (2200초-3700초) 1차측 냉각수의 온도는 Data Acquisition System과 Shift에서 발생하는 오차를 없애기 위해 교정되었으며, 이 시기가 실험의 초기 상태이다. 표 15는 Pressure Vessel, 표 16은 1차측 Loop, 표 17은 2차측에 대한 결과이다.

• Loop의 유량

Loop의 유량을 결정하는 방법은 다음의 3가지가 있다.

- Loop에서 측정된 속도와 Downcomer에서의 Volumetric Flowrate의 측정으로부터 직접 구한다.
- 증기발생기의 U-tube 양쪽의 압력차이로 부터 구하는 방법
- Pump의 특성[10]이용

표 18은 위의 방법들에 의해 구하여진 유량을 보여준다. 노심의 유량은 압력용기(표 16의 Enthalpic Balance)내의 온도의 선형 회귀에 의해 얻어지며 그 값은 147 kg/s이다.

(2) 실험절차

(가) 절차

시간 0초는 실험의 시작을 의미하며 과도기에 대한 거동은 표 19에 보여진다. 모든 측정은 똑같은 측정간격을 취했으며 안정화 기간(측정간격 30초 10초) 후 Feed and Spill(6220초) 동안에는 매 2초마다 그리고 급격한 과도기시기(9689초)에는 1초마다, 그리고 그 후는 매 5초마다 기록되었다.

(나) 경계조건

- 1차측 경계조건

- 1차측 냉각수 압력(그림 23)

1차측 냉각수 압력은 처음에는 145 bar 그 후는 RSPP Control (Relief Valve VRDP11으로 1차측 압력조절)의 설정치 163bar와 실험의 마지막 값 8.5bar 사이를 유지한다.

- 노심의 출력(그림 24)

초기값은 3.8%(1100 kW)로 맞추려 하였으며 급수상실 과도기가 시작될때 부터는 Decay Law SERMA \pm 10%를 따랐다.

- 안전주입(그림25)

HPSI의 유량은 QMSH11, QMSH12, QMSH13의 \pm 4 g/s(그림 24) 범위에서 측정함으로 결정된다. 그리고 온도는 TFSH21, TFSH22, TFSH23를 측정함으로 결정된다. 2개의 상이한 운전 mode가 행하여진다. 첫째는 수동으로 163 bar의 높은 압력이 유지되는 299-2599초 동안이다. 이 압력에서 계산된 유량의 값은 일정치를 유지한다. 둘째는 자동으로하는 것으로 실험이 끝날때 까지이다. 수동운전 동안 측정치와 운전하려고하는 유량의 차이는 \pm 15%이다.

- 1차측냉각 Pump

H2 Procedure(t=790초)에 진입하기 이전의 처음 단계에서는 정상운전속도 (2970 rpm)으로 운전되었다. 그리고는 전원 상실시에 Pump가 감속하는 것을 모의하기 위해 Pump Coastdown Law를 따라 운전되었다. 속도가 100 rpm에 이르렀을때 냉각 Pump는 완전히 정지되었다. 이것은 Local Heat Loss를 초래한다. 표 20에 1차측 Pump의 Cooldown 현상이 요약되어 있다. 물의 Bearing Injection과 Seal Cooldown은 Pump가 완전 정지되었을때(1420초) 끝난다. 반면에 온도 한계의 냉각 회로는 전체실험

동안 유지된다. Bearing Injection 회로는 펌프의 Upstream 냉각수로 부터 빼내오고 열교환기를 이용 냉각시키며 TFSC4i의 온도로 다시 펌프로 Injection 한다. 이와같이 함으로써 펌프당 21 kW의 열손실을 야기한다. Seal Cooldown Circuit에 의한 열손실은 Enthalpic Balance에 의해 바로 결정 할 수 없다. 그래서 특성 실험동안 예측 되었다.(약 4kW) 그러므로 펌프에서의 총 열손실은 25 kW/pump이다.

- 가압기

Procedure가 시작되기 이전 상태에서는 1차측압력을 정해진 값을 유지하도록 조절되었다. PPCON = 155 bar Fixed Power의 2개 그룹의 Heating Rod들은 2초에서 운전되기 시작 했으며(9.57kW), Proportional Power를 갖는 그룹이 있다. 3개의 Heater 모두는 SI Signal(788초)에 의하여 정상 Procedure에 따라 꺼졌다. 초기 Collapsed level은 4.4 m 이다.(그림 26) Charging과 Letdown 및 가압기의 Spray는 실험기간동안 작동하지 않았다.

• 2차측 경계조건

- 증기발생기 압력(그림 27)

처음에는 70.3 bar를 유지하고, 0초에 Turbine Bypass Mode(RPGVB)로 변환되며 1095초 까지 그대로 유지한다. 그리고는 Steam Line이 고립되고 대기중으로 Dump하는 Mode(SPGVi = 71.7bar i는 1,2,3)로 변한다.

- 증기발생기 주급수

Stabilization 기간동안 증기발생기의 주급수는 $Q \cdot AN3i (i=1,3)$ (표 17, 310 cm/s) 을 측정함으로 얻어진다. Stabilization 기간동안 주급수 온도는 2차측의 Subcool를 유지하기 위한 약 270 °C를 유지한다. 주급수는 0초에 상실되고 그후에는 증기발생기 Collapsed Level은 5.76 m로부터

감소된다.(그림 28)

(라) 질량의 보존

1차측으로 부터 빠져나가 질량을 구하는데는 3가지 방법이 있다.

1) 냉각 Pump가 정지 상태인 (1000초 - 10000초) 때의 계산

- . 1차측의 Mass Inventory (MCP)
- . 고압안전 주입유량의 적분 (MACCU)
- . Accumulator에서 주입된 질량 (MACCU)
- . 저압 안전 주입유량의 적분(MISBP)

마지막 시점에서의 빠져나간 양은 :

$$MCPO = 1972 \pm 40 \text{ Kg}$$

$$MIS = MISBP + MISHP = 5303 \pm 100\text{Kg}$$

$$MCP_{\text{final}} = 1588 \pm 40\text{kg}$$

$$MACCU = 618 \pm 8\text{kg}$$

$$MBRECHE = MCPO - MCP_{\text{final}} + MIS + MACCU = 6304 \pm 100\text{kg}$$

2) 처음에 Blowdown Tank의 물의 양을 측정한다. 그리고 실험완료후에 Tank에 있는 물의 양을 측정한다.

$$\text{초기에 물의 양} : 8250 \text{ kg}$$

$$\text{실험후 물의 양} : 14525 \text{ kg}$$

$$\text{Tank에 보충되어진 양} : 6275 \pm 50\text{kg}$$

3) 1차측으로 부터 빠져나간 양의 측정. 이 방법은 큰 Uncertainty를 가지고 있다.

(마) 실험결과

실험에서 관측된 주요 물리적 현상은 표 21에 시간별로 열거되어 있다.

• PART 1

1차측 압력의 변화는(그림 29) 여러 Phase로 나누어 질수 있다. 0초에 급수상실은 2차측의 빠른 Drain을 일으키고 Core Power의 Decay를 시작시킨다. Synchronizing Valve VAG3 and VAG4가 Turbine Bypass Mode (RPGVB)로 변했지만, 증기유량은 0으로 줄고(그림 30), 2차측 압력은 약 2 bar 정도 증가한다. (그림 27) 1차측 압력은 2차측 Level이 3 m(SI 신호)보다 낮아질때까지(788초) Heater의 영향으로 서서히 증가한다. 그러면 1차 냉각 Pump는 2차측에 가는 열을 제한하기 위해 서서히 정지(미리 계산된 Pump Coastdown법칙에 따라) 한다. 11초후에 고압 안전주입이 시작된다. 1차측 압력은 더 빠른 속도로 증가되며 가압기 Relief Valve의 Set Point (163 bar)에 1033초에 도달하게 된다. 그러면 "Feed and Spill" 의 운전이 시작된다. 이런 압력 조건에서 SI의 유량과 설정치의 차이가 30%를 초과하기 때문에 HPSI의 수동조절이 요구되어진다.

이 시기동안 가압기는 Surge Line을 통해 천천히 채워지고 가압기 수위는 올라간다.(그림 31) Vent Line은 초기에는 Steam을 내보낸다. 1420초에 냉각 Pump의 속도는 100 rpm이된다. 그리고는 정지된다. 이때 Downcomer의 유량은 5-6 kg/s 이된다.(그림 32) 1885초에 이상(Two Phase)의 물이 가압기 Vent Line Nozzle에 이르게 되어 빠져나가는 물의 양이 증가한다. 이시기동안 차가운 물의 주입이 Surge Line을 통해 가압기로 들어오기 때문에 가압기는 점점 Subcool이된다. 이 현상은 가압기 Relief Valve가 완전히 열리는 시점까지 계속된다. 증기발생기 Steam Line의 고립은 SI 신호후 300초에 발생(1095초)하여 2차측 압력은 70.3 bar에서 71.7 bar로 변화한다.

SI 신호후 1800초에는 가압기 Relief Valve가 완전히 열리는 조건에 이르며 원자로 출구온도는 2588초에 302 °C가된다.(그림 33) 2593초에

가압기 Relief Valve는 완전히 열리며, "Feed and Bleed" 에 접어든다. 1차측 압력의 급격한 감소가 관측되었다. 이 과도기동안은 Vent Line에서 몇번간의 Flowrate과 Void Fraction의 Oscillation을 동반한다. 그리고 2750초에 가압기의 Collapsed Level이 나타난다. 1차측 압력의 급격한 감소는 1차측 Upper Head부터 Flashing 된다. 80초후에는 Upper Head의 Level이 감소한다. 3030초에는 Upper Head의 Annular Space가 완전히 Drain된다. Downcomer에서의 유량(그림 32)은 이상의 자연대류로 변한다. (9kg/s 약 2460초) 이시기에 Downcomer의 Flow는 상당히 감소하고 노심에서 Boiling이 일어난다.(그림 34) 노심의 Collapsed Level(그림 35)은 감소하기 시작한다.

2680초에 고온관에 Stratification이 일어나고 그로인해 Surge Line Nozzle이 Uncover된다. 그리고 이후로 Surge Line과 가압기에 Void Fraction이 증가된다. 가압기의 물의양은 Stepwise로 감소한다. 고온관과 동시에 저온관에서도 증기가 발생된다.(그림 36, 그림 37) 증기발생기 U-tube도 Drain된다. Up-flow Part가 완전히 Drain되기 140초전에 Down-flow Part는 완전히 Drain된다. 이런 현상은 증기발생기 Inlet/outlet Plenum에서도 관측된다. 이후로는 Hot Leg의 Level이 감소한다. (3400초) 증기발생기1은 Drain되는 시간이 더 걸리므로 Hot Leg1의 Level감소는 억제된다. 3250초에서 3400초사이에 R.C.C. Guide Tube Port-hole이 열리면 윗쪽부분의 Drain은 끝난다. Down-flow Part가 비기 시작하고 동시에 Downcomer Flowrate의 Peak은 3350초에 일어난다. (그림 32)

3500초에 1차측 압력이 2차측 압력보다 낮아지며 (그림 27, 그림 29), 2차측 Level은 더이상 낮아지지 않는다.(0.7 m) 이 시점으로 부터

Depressurizing은 "Feed and Bleed"의 영향만으로 되며 점점 Accumulator의 Trip점에 가까워진다. 이 기간동안 고온관의 Level은 크게 감소하여 가압기의 Collapsed Level은 6.8 m가 된다.

• PART 2

Accumulator Valve는 P+P가 42 bar가 되는 4449초에 열린다.

- . 1차의 물의 양은 급격히 증가한다.
- . Cold Leg에서 Void가 없어진다.
- . 1차측 압력감소는 Slowing Down된다.

Accumulator가 꺼지기 직전에 RHRS조건에 도달한다(짧은 기간동안). P+P가 15 bar 되었을때 Accumulator는 고립되고 노심의 출구에서 Saturation의 소멸이 관측되면 빠른 Transient 기간은 이것으로 끝난다. 실험의 마지막에는 노심에서의 Subcool Margin이 천천히 증가하며 1차측의 압력 감소가 천천히 일어난다. LPSI가 Trip되기 이전에(8815초) RHRS 조건이 된다. 1차측을 채우는 것은 Surge Line에 물이 찰때까지 계속된다. 9975초에 가압기는 물로 가득 찬다.(그림 38) 실험 종료후 노심의 Power는

$$W*02 = 320 \text{ KW (1.1\% power)}$$

이다.

마. 6" 저온관 파손 [11]

(1) 개요

본 실험은 1989년 9월 28일에 수행되었다. 저온관의 파단위치는 Loop 1 저온관에 위치하고 긴노즐로 구성되어 있는데 노즐의 외경은 15.48 mm이고 길이와 직경의 비는 L/D=10이다. 그리고 정격 조건하에서 우회유량은 전체

Loop유량의 2% 정도이며 가압기는 Broken Loop인 Loop1에 연결되어 있으며 SI는 Intact Loop인 Loop2와 Loop3에만 공급된다. 또한 저온관1에 연결된 Accumulator는 작동하지 않는다.

(2) 목적

6" 저온관 파손사고의 실험 목적은 다음과 같다.

- 저온관 파단시 예상되는 물리적 현상 분석
- 증기발생기 전열관에 증기가 발생하는 원인이 되는 1차측 냉각재 감소 상황 분석
- 노심을 recorveer시키는데 사용되는 Accumulator Injection의 성능분석
- 이와 유사한 유형의 파단사고 연구를 위한 전산코드의 검증
- Post-Accident 과정의 분석
- 일차측 파단으로 인하여 일차냉각계통에 부분적인 증기발생후 자연대류 영역에 관한 연구.

(3) 초기조건

본 실험은 정격출력의 10%인 2860 kW에서 수행하였다. 실험을 수행하기 위한 초기조건은 표 22과 같다.

(4) 사고진행 순서

사고 진행순서는 $t=0$ 초에 저온관에서 파손사고가 발생한다. 저온관 파손으로 인하여 1차측 압력이 12.9MPa이하가 되면 원자로가 정지하고 17초의 Time Delay후 (SERMA+10%)의 곡선으로 출력은 감소하고 펌프 및 주급수가 차단된다. 일차측 압력 11.7 MPa이하가 되면 SI신호가 작동하고 SI신호 작동 30초후에 SI가 공급되고 69초후에 보조급수가 공급된다. 또한 일차측 압력이 4.0MPa이하가 되면 본 실험은 종료하게 된다. 이와같은

진행상황은 표 23에 기술되어 있다.

(5) 경제조건

본 실험의 수행동안 1차계통의 질량변화는 다음과 같다

- 실험 수행 전 1차계통 질량 : 1956 ± 50 kg

- 실험 완료후 1차계통 질량 : 753 ± 50 kg

- Accumulator에서 공급된 질량

Loop 2 : 248 ± 24 kg

Loop 3 : 252 ± 24 kg

- SI를 통하여 공급된 질량

Loop 2 : 492 ± 10 kg

Loop 3 : 503 ± 10 kg

- 파단면을 통하여 방출된 질량 : 2968 ± 168 kg

• 방출유량

그림 39는 6" LOCA에 사용된 노즐 및 그 구성도를 나타낸다. 그림 40과 그림 41은 파단면을 통하여 빠져나간 유량 및 유량의 합계를 나타낸다. 파단면을 통하여 방출된 총 질량은 Overall Breacc Tank 및 1차계통의 질량평형 두가지 방법에 의하여 구했는데 각각 2850 ± 235 kg, 2698 ± 68 kg이 계산 되었다.

• 일차 계통 경제조건

- 노심출력

노심출력은 원자로 정지 신호가 발생하면 신호발생 17초후에 (SERMA 곡선+10%)의 곡선을 유지하면서 감소한다.

- 가압기의 히터 및 분무(Spray)는 사용하지 않는다.

- 주 냉각재 펌프

초기조건에서 펌프는 150 rpm의속도로 작동하며 Thermal Barrier 와 Hydrostatic Bearing Injection의 냉각도 작동한다. 펌프와 관련된 열손실은 펌프 하나당 약 10-15kW 이며 펌프 정지 신호에 의하여 펌프는 정지되고 Thermal Barrier Cooling만 유지된다.

- HPSI

안전주입은 안전주입 신호발생 30초후에 작동한다. 안전주입 유량은 압력의 함수로써 다음과 같다.

$$P = -91.87Q^{**2} - 43.20Q + 121.82$$

P : bar

Q : m**3/h

- Accumulator

일차측 압력이 4.0 MPa이하일때 작동하여 Low Level Criterion에 의하여 작동이 정지된다. 그림 42과 그림 43은 Accumulator에서 공급되는 유량 및 총유량을 나타낸다.

• 2차계통 경계조건

- 압력

2차계통의 초기압력은 6.9 MPa을 유지하고 원자로가 트립되면 콘덴서는 차단된다.

- 주급수

증기발생기에 공급되는 주급수는 트립신호와 동시에 공급이 차단되며 주급수온도는 218 °C이다.

- 보조급수

40 °C의 보조급수는 SI 신호발생 69초후에 공급이 시작되며 최대유량은 150 cm**3/s 이다. 본실험에서는 613초에 공급되 시작하여 증기발생기 수위

13.6 m를 유지하기 위하여 보조급수 유량이 조절된다.

(6) 과도기

그림 44는 노심의 Collapsed Level을 나타내는데 정상상태인 3.6 m에서 부터 최저 1.4 m까지 내려갔다가 Accumulator의 Injection으로 인하여 약 2.2 m까지 다시 올라간다. 노심수위는 2번의 급격한 변화가 있는데 첫번째 급격한 수위감소는 LOCA가 일어난 Loop의 Cross Over Leg에서 Loop Seal Clearance에 의하여 중지되고 2번째 급격한 감소는 Accumulator의 작동 225초후에 나타난다. 그리고 2번째 Loop Seal Clearance는 2개의 Intact Loop에서 Accumulator 작동 60초후인 약420초에 동시에 일어났다.

이 실험에서 노심의 최고 온도는 $323 \pm 4^{\circ}\text{C}$ 로써 노심의 윗쪽 끝부분에서 나타나며 Upper Head는 약 90초후에 비게된다. 50°C 의 HPSI물과 대기온도의 Accumulator 물의 1차계통에 공급은 저온관에 수직방향의 Thermal Gradient의 원인이 된다.(그림 45,그림 46) 그림 44는 Broken Loop 증기발생기의 2차측 온도를 나타낸다. 실험은 1차계통 압력이 0.7 MPa에 도달 하면 종료한다.

(7) 결과분석

본 실험동안에 2번의 급격한 노심수위 감소가 있었다. Collapsed 수위의 최소값은 1.8 m와 1.4 m이며 두번째 수위감소는 노심의 온도 상승을 유발하여 최고온도가 323°C 까지 노심온도가 상승하였다. 노심의 첫번째 최저 수위는 Broken Loop에서만 일어나는 Loop Seal Clearance와 관계가 있으며 Intact Loop Cross Over Leg의 유체는 Accumulator가 작동한 후에만 비게된다. HPSI와 Accumulator의 복합된 효과가 실험의 마지막 단계에 노심이 더 이상 Uncover되는 것을 피할 수 있게한다.

바. 증기발생기 튜브 다량 파손[12]

(1) 실험의 목적

이 실험의 목적은 비상운전 절차(Emergency Operating Procedure)에 사용된 물리적 가정에 대하여 확인하는 것이다. 실제 관심을 가지는 현상은 파손 증기발생기의 거동과 1차계통의 거동을 분석하여 Cold Shutdown 상태에 도달할 때 까지의 파단 양측(1차계통 및 2차계통)에 압력이 같아져 1차계통의 냉각거동 분석중에는 안전주입, 냉각 및 가압과정을 관찰하고 정상 Loop과 파손 Loop 사이의 불균형에 대한 과정을 파악하는 것이다.

(2) 실험방법

초기조건을 맞춘후 안정화 과정을 거쳐서 약 300초 동안의 평균값을 취한후 6개의 튜브파손은 1번 증기발생기 출구 Plenum과 2차계통을 연결하여 밸브 개방으로 모의한다.

이 실험은 4단계로 나누어 수행하였는데 1단계에서는 0초에서 파손 모의밸브를 개방한 후 약 48초경에 S.I.신호가 발생하고 50초에는 노심의 출력감소가 시작하고 복수기(Condenser)가 격리되며, 51초에는 주급수가 차단된다. 62초에는 보조급수가 작동하고 156초경에는 고압 안전주입이 시작되며 351초에는 펌프속도를 줄인다. 2단계는 649초에 증기발생기를 격리시키고 냉각 및 감압을 시작하고 913초에는 펌프정지, Blowdown에 의한 증기발생기 수위제어, 가압기의 전열기 설정치 변경등의 순으로 실험을 수행하고 4702초에는 냉각비율을 변경하므로써 3단계 실험을 시작한다. 이것은 Trace Heating 출력을 감소시키고 1번 증기발생기 Blowdown을 최대로 개방하여 실행하고 14698초부터 4단계 실험으로 냉각절차를 중단하고 15173초에는 2번 펌프를 정지시키며,

15322초에는 파손 모의밸브를 폐쇄하여 실험을 끝낸다.

그림 48은 열 발생을 경계조건을 나타내고 그림 49와 그림 50은 펌프 회전속도의 변화를 보여주며, 그림 51, 그림 52 그리고 그림 53은 1차계통의 Charging과 Letdown을 보여준다. 그림54는 1번 증기 발생기의 Blowdown을, 그리고 그림 55와 그림 56에서는 증기발생기에서 대기로의 Letdown을 나타낸다.

(3) 실험결과

2단계 실험 기간에서 나타난 압력 요동(Pressure Oscillation)은 BETHSY의 Letdown Value의 조작에서 기인한 것으로 나타났으며, 1차계통과 2차계통의 압력 균형점에서 HPSI의 유동량은 Break Flow 보다 약간 크게 주입되지만 파단 튜브를 모의한 Value의 개방으로 이 차이는 줄어들며, 밸브를 닫으므로써 다시 HPSI 유량을 증가시켜 그림 57에 보여지는 바와 같이 Surge Line 수위를 증가시키고 이 냉각재는 비등을 일으키며 가압기 속으로 유입되면서 약 320°C 정도의 과포화 상태가 된다.(그림 58)

3단계 실험에서는 1차계통에서 2차계통으로의 누출은 거의 없게되고 1번 증기발생기를 감압시키므로써 RHRS 작동조건에 도달하려고 노력하였다. 이 동안 2차계통의 감압보다는 1차계통 감압이 더 잘 되었다. 또한 파손튜브를 통한 유동량은 몇번의 유동방향을 바꾸기도 하였지만, 파손 Loop에서는 거의 없었다. 그래서 10680초에서 전열관에 기포가 형성된 것으로 관측되었다.(그림 52) 그리고 2차계통의 Riser와 Downcomer는 파손튜브를 통해 1차계통의 찬물이 유입되었을 때 성층화가 확인되었으며, 유동이 역류 즉 2차계통에서 1차계통으로 유동이 일어날 경우 증기발생기는 수위의 감소에 의해 가열되고 Blowdown과 합쳐져 Downcomer와 Riser의 수위감소에 따른 냉각재 속도 저하가 생겼으며 재순환에 의한 가열의 가정은 배제된다.

4단계 실험에서는 1차계통 및 파손 증기발생기의 압력이 52.5 bar 정도이며 2번 Loop의 유동량은 2번 펌프의 작동에 의하여 노심 출구온도가 10 °C 정도 낮추어져 관측되었다. 1번 Loop에서 역류가 일어나 1번 증기발생기의 U-튜브에서 발생한 기포가 부분적으로 고온관으로 이동하였으며, 저온관은 노심에서 빠져나오는 냉각수에 의하여 냉각이 되면서 증기 발생기 튜브 파손 유동량이 증가하였다. (그림 60) 증기발생기 파손 유량으로 증기 발생기 내에는 온도의 상승화(그림 61)와 수위증가(그림 62)가 나타났다. 증기 응축(Vapor Condensation)에 의해 현저한 감압이 일어나 그림 63에 보여지듯이 약 200초경에는 30 bar 정도가 되었다.

(4) 결론

이 과도기 동안 파손 증기발생기를 통해서 1500초와 4000초 사이에 약 610kg의 액체가 1차계통으로 주입되었으나 사고 대처방안의 적용으로 누설을 막아서 1차계통 재고량의 확보는 약 4400초경에 이루어졌다. 감압단계에서 Blowdown과 1차계통이 자연순환으로 냉각될 때 파손 증기발생기에서 2차계통 사이의 열교환에 의하여 2차계통의 응축이 방해되어 감압비율은 약 3.5 bar/h가 되었다. 냉각수 펌프(RCP)의 재기동은 파손누출을 상쇄시켰으며 2차계통의 순환을 복원시켜 U-튜브에서 증기의 응축을 가능하게 하여 'Cold Shutdown' 조건에 도달하게 되었다.

사. ISP-27 [13]

ISP (International Standard Program)-27은 불란서 CENG 주관으로 국제적 열수력 전산코드의 검증을 위해 세계 약 20개국, 28개 기관이 참여한 국제공동 연구로서 BETHSY 실험중 '지연된 최종절차와 고압안전 주입 불능상태의 2" 저온관 파손(2" Cold-Leg Break without HPSI, delayed

Ultimate Procedure) 사고를 모든 참여자들이 각자의 선택한 전산코드를 사용하여 Blind Calculation을 수행하는 프로그램이다. 따라서 BETHSY 모의계산에 필요한 모든 자료를 CENG의 BETHSY팀이 먼저 참여자들에게 제공하고, 참여자들은 계산결과를 미리 CENG측에 제공하여 실험과 모의계산의 비교결과를 차후에 확인하는 방법으로 추진 되었다. 당 실에서는 불란서 CENG에서 도입한 CATHARE 전산코드를 사용하여 CENG 현지에 파견중인 연구원을 통하여 이 계산을 수행하였다.

(1) 2" Cold-Leg Break Without HPSI, Delayed Ultimate Procedure의 정의

이 모의실험은 다중고장 과도기 범주(Multiple Failure Transient Category) 에 속하며 사고관리 연구(Accident Management Study)에 포함된다. 이 사고는 2" 저온관 파손사고로 고압안전 주입(HPSI)은 불능인 것으로 가정하며, 노심이 노출되어 핵연료가 가열되어 최종수단(Ultimate Procedure)의 작동이 요구되는 과도기이다. 현 단계 연구에서는 이 최종수단이 지연되고 노심피복재의 최고 온도가 450°C에 도달했을 때 3개의 증기발생기 대기펌프를 완전 개방하도록 실험을 수행하고, 복수기(Condenser)는 작동불능으로 간주하였다. 이 과도기는 1차 계통의 감압으로 인하여 Accumulator 작동설정치와 저압안전주입 신호(LPIS) 설정치까지 진행되어 1차계통의 냉각회로가 복원되는 RHRS(Residual Heat Remoral System)의 작동조건을 만족하였을 때 종료된다.

(2) 과도기 진행 및 설정치

- 초기상태 : 정격출력의 10%노심출력
- $t = 0 \text{ s}$: Break Opening (Initiation of The Transient)
- 가압기 압력 = 13.1 MPa : Scram Signal, The Core Power Trip
(From 10% NP (Norminal Power) Starts 17s Later

- 가압기 압력 = 11.9 MPa : Safety Injection (SI) Signal, But No HPSI (Total Failure Assumed), Turbine Bypass and Main Feedwater Off (Completed 6s Later)
- 30s After SI Signal : Auxiliary Feedwater On
- 300s After SI Signal : Pump Coastdown (Over 600s)
- 노심 피복재 최고온도가 450 °C 에 도달할 경우 : 증기발생기 3개의 대기 덤프밸브 완전개방 (Ultimate Procedure)
- 가압기 압력 = 4.2 MPa : Accumulator Injection Starts, On The 2 Intact Loops Only
- 가압기 압력 = 1.5 MPa : Accumulator Isolation
- 가압기 압력 = 0.91 MPa : LPIS Injection Starts, On The 2 Intact Loops Only.
- RHRS 작동조건 만족 : 노심 출구 온도 < 177 °C , 가압기 압력 < 2.5MPa 포화여유도 > 20 °C 되면 과도기 종료

(3) 초기조건

(가) 1차계통

- 가압기 압력 : 15.5 ± 0.09 MPa
- 가압기 수위 : 4.08 ± 0.1 m
- 가압기 전열관 : 1.4 kW
- 가압기 연결회로 : 살수기 및 방출밸브 불능
- 노심출력 : 2857 ± 30 kW (정격출력 10%)
- Downcomer 유량 : 150 ± 5 kg/s (펌프속도 2940 ± 30 rpm)
- 평균 노심 입구온도 : 286.7 ± 0.5 °C

(나) 2차계통

- Steam Dome 압력 : 6.91 ± 0.04 MPa
- 증기발생기 수위: 13.45 ± 0.05 m
- 주급수 온도 : 218 ± 2 °C
- 주급수 유량 : 증기발생기 당 620 ± 40 cm³/s

(다) 외부열원

- Trace Heating : 총 107.5 ± 2 kW
- 펌프 냉각 계통을 통한 열손실 : 펌프당 25 kW

(4) 경계조건

(가) 파손의 위치 및 크기

파손 위치는 1번 저온관의 펌프 끝 하단 332 mm에 위치하며 증력에 대하여 수평방향으로 노즐의 길이는 70 mm이고 내부직경은 5.16 ± 0.01 mm의 크기를 가지므로 $L/D=13.6$ 이 된다. 파손의 시작은 순간적인 개방이 가능한 밸브에 의하여 모의되며 작동시간 1초이다.

(나) 1차계통 경계조건

가압기는 1번 고온관에 연결되어 있고 살수기와 방출밸브는 작동시키지 않았으며, 전열기는 과도기 시작과 동시에 꺼진다. HPSI의 작동은 불능인 것으로 가정되고, Accumulator의 주입은 건전한 Loop의 저온관을 통하여 주입 된다. 작동 설정치는 가압기 압력 4.16 ± 0.09 MPa이고 주입의 중단은 가압기 압력이 1.46 ± 0.09 MPa에 도달하였을 때 일어나며, Accumulator의 초기 부피는 액체가 0.286 m³/Accumulator이고 질소기체는 0.137 m³/Accumulator이다. 유체의 온도는 17 ± 1 °C 이며 단열된 상태로 주입이 된다. 저압 안전주입(LPSI)은 가압기 압력이 0.91 MPa 이하로 감압되었을 경우 작동되도록 설정되었으며, 주입유량은

$$\text{가압기 압력(P+P)} = -0.3E-6 * (Q*SB) + 0.91$$

에 따라 결정되는 특성을 가지고 있고, 그 유체온도는 $34 \pm 2^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지되며 2번, 3번 Loop에 연결되어 있다. 그외 노심 출력 정지후의 출력변화와 Pump Coast-Down, 그리고 Trace Heating에 관한 값들은 참고문헌[13]에 나타나 있다.

(다) 2차계통 경계조건

3개의 증기발생기는 복수기(Condenser)의 살수에 의하여 6.91 MPa로 일정하게 유지하고 있으며 Turbine Bypass가 일어날 경우 대기 덤프밸브(VRGVi)의 개방 설정치는 7.03 MPa이다. 만약 최종수단(Ultimate Procedure)이 실행될 경우는 VRGV3 (5초의 작동시간)를 통해 대기로 덤프시킨다. VRGV3를 통한 대기 방출은 각 VRGV1, VRGV2 및 VRGV3를 통해 방출되는 모든 양의 증기가 합쳐져 나가도록 실험하였으므로, 실제 VRGV1과 VRGV2의 밸브는 닫혀있는 셈이된다. 그러나 각 덤프밸브를 통한 방출량은

$$QMGVi(i=1,2,3) = 78.0 * PSGi \pm 20.0 \text{ g/s}$$

로 실험결과 관측되었기 때문에

$$QMGV3 = QMGV1 + 2 * QMGV2$$

로 표시된다. QMGV1과 QMGV2는 CATHARE 모의계산의 경우 양쪽의 비대칭을 감안한 것이다. 주급수는 증기발생기 당 약 $620 \text{ cm}^3/\text{s}$ 의 양이되며 SI신호가 발생하면 5초이내에 공급이 중단된다. 그리고 급수온도는 218°C 가 된다. 그리고 SI 신호 30초후에는 보조급수가 공급되며 그 온도는 $34 \pm 2^\circ\text{C}$ 이다. 그외 과도기 진행에 따른 보조급수 유량은 참고문헌[13]에 나타난 식을 따라 공급된다.

(라) 모의계산을 위한조건들

정상상태의 정격유량 결정을 위해서 펌프속도의 불확실성 범위인

30 rpm 값이내에 펌프속도 조절에 의하여 모의계산을 수행하는 것이 바람직하며 입력의 타당성 확인을 위해서는 1차계통 재고량 1960 ± 40 kg과 2차계통 재고량 증기발생기 1대당 820 ± 30 kg의 실험값이 유용하게 쓰일수 있다. 그외 조건들은 참고문헌 [13]에 있는 내용을 참고하면 된다.

(마) 참여자의 계산결과 제출방법

각 참여자가 모의계산을 수행한 후 그 결과는 BETHSY팀에서 요구하는 형태로 요구하는 값들이 제출되어야 한다. 이는 동일한 처리방식에 의하여 계산결과의 비교가 용이하도록 하기 위함이며, 이에 대한 자세한 내용은 참고문헌 [14]에 수록되어 있다.

(5) CATHARE 전산코드를 이용한 BETHSY 계통 모의

ISP-27 연구를 수행하기 위하여 당실에서는 CENG에 이미 파견된 연구원을 통하여 CATHARE 전산코드로 모의계산을 수행하였다. 그림 64와 그림 65는 BETHSY 계통의 CATHARE 입력 작성을 위하여 Nodalization을 한 것이다.

(가) 정상상태 입력

정상상태 계산을 위하여 1차계통은 Pipe요소의 Node 217개, Volume요소 6개 그리고 TEE 요소 2개로 이루어져 있다. 특히 Loop Seal Clearing에 대한 정확한 묘사를 위하여 그림 66과 같은 Nodalization을 사용하였으며, Break 부분도 그림 67에서 보는 바와 같이 TEE로 모델하고 Break가 일어났을 경우 유체의 속도가 클것을 감안하여 임계유동이 일어나는 노즐의 끝 부분은 Mesh의 크기를 mm단위로 작게 하였다. 이것은 CATHARE의 Break 모델을 개발한 CENG 연구원의 제안에 따른 것이며, 위치는 그림 64와 같이 저온관에 위치하였다. 그리고 SI 와 Accumulator의 주입위치에 있는 저온관 유체간의 온도차에 의한 열전달의 중요성을

감안하여 그림 64와 같이 위치시켰다.

2차계통의 모의에 있어서는 Steam Dome 지형을 정의하기 위하여 그림 65에 나타내었듯이 증기발생기 튜브 Sheet로부터 12.04m지점에 급수노즐 모델인 TEE요소의 끝을 위치시켜 Steam Dome의 부피와 높이에 따른 유동면적을 계산하였다. 그림 65에 나타난 주증기계통은 상당히 복잡한 형상을 하고 있으므로, 이를 단순화하여 같은 길이와 유동저항을 유지하는 단순한 모델로 하였다.

(나) 과도기 계산

정상상태의 계산을 수행한 후 20차례의 과도기 초기조건을 위해 시간을 진행시키지 않은 상태의 과도기(Stabilized Transient)를 거친후 Break를 열면서 실험조건에서 제시한 설정치에 따라 과도기를 시작한다. Turbine Bypass가 시작될 경우는 정상 증기유량에서 6초동안에 완전 폐쇄에 이르게 되고 Steam Dome압력이 7.03 MPa 도달하면 Steam Dome의 압력을 최종수단(Ultimate Procedure)이 실행될 때까지 일정한 값으로 유지하고 VAGV3가 작동하면 주어진 관계식에 따라 유량을 방출하도록 하여 계산을 수행한다.

3. CATHARE를 이용한 모의계산

가. CATHARE 전산코드의 개요

CATHARE는 최적계산용 열수력 전산코드로 불란서 CENG(Centre d'Etudes Nucleaires de Grenoble)에서 CEA(Commissariat a l'Energie Atomique), FRAMATOME(Franch Vendor) 그리고 EDF(Electricite de France)의 공동노력으로 1979년 이후부터 개발된 원자로 안전성 분석을 목적으로 한 최적계산용 열수력 전산코드이며, 대형 냉각재 상실사고 (Large LOCA), 소형냉각재 상실사고(Small LOCA), 그리고 운전과도기의 분석을 수행할 수 있도록 만들어져 있다.

CATHARE 전산코드는 일차원적 Two-Fluid 모델을 사용하며, Fully Implicit 방법과 공간에 대해 Staggered Mesh를 이용한 유한차분법을 사용하는 것으로 특징지어 진다. 6개의 비선형 미분방정식을 Newton-Rapson 방법으로 해를 구하며, 물리적 상관 관계식(Constitutive Relation or Enclosure Law)은 광범위하게 수행된 실험결과에 근거한다. 물리적 상관 관계식들은 분리효과(Separated Effect) 실험에[14] 의하여 입증되었으며, 코드의 검증은 최종적으로 총체적 실험(Integral Test)에 근거하여 이루어졌다.

1987년까지 PWR 대부분의 사고에 대하여 평가작업을 끝냈으며, 코드의 기능을 증가시키기 위하여 CATHARE2를 개발 하였다. CATHARE2는 이미 개발된 CATHARE1에서 사용된 물리적 모델외에도 비응축성 기체(Noncondensable Gas)의 취급, 증기발생기 2차측의 일반적인 접근 즉 일차측과 같은 방식의 Node 결정, 원자로노심 Downcomer에서 일어나는 2차원적 유동모델, 그리고 원자로 냉각수펌프에서의 이상유동 취급이 추가되었다. 현재 CATHARE는

CATHARE2 V1.2E를 해외 사용자들에게 보급하고 있다. CATHARE 전산코드는 CENG의 주도하에 여러가지 국제적인 평가작업을 행하며 TEE모델, CCFL, 압력강하와 같은 미세한 분야에서 모델의 개선과 UPTF(Upper Plenum Test Facility) 실험결과의 평가 및 3차원 모델 개발을 수행하고 있고 최근까지도 계속 20여명의 전문가들이 코드개발, 수치해석, 그리고 코드관리의 그룹으로 나뉘어져 코드사용자들에 대한 기술지원 및 코드의 성능향상을 위하여 노력하고 있다.

현재 KAERI는 CATHARE 사용자 클럽에 '89년이후 가입하고 있으며, 가입자는 무상으로 CATHARE의 새로운 Version을 계속 제공받을 수 있고, CATHARE관련 보고서는 제한없이 입수하도록 계약되어 있다. 반면 사용자는 CATHARE의 효율적인 이용을 위하여 실무자를 CENG에 장기파견이 가능하고, 사용자클럽 회합에 참가하여 CATHARE 사용결과와 문제점을 발표하도록 권장되고 있다. CATHARE결과의 국제회합 발표는 사전에 개발팀과 논의하도록 제의되지만, 이는 정보관리의 차원이 아니라 사용자의 잘못된 사용으로 인한 오해를 막기 위함이고, CATHARE관련 자문은 항상 문호가 개방되어 있다.

나. 모의계산의 목적

BETHSY 실험의 모의계산 목적은 전산코드의 사고에 대한 예측능력을 검증하고 장래에 필요한 설계용 전산코드의 보수성과 안전 여유도를 명확하게 파악하기 위한 자료를 확보하는 것이다. 또한 코드개발의 경험이 없는 국내의 실정에서는 현재 당 실에서 개발중인 KOSAC 코드를 이미 실험으로 검증된 최적 전산코드인 CATHARE의 계산 결과와 비교, 분석함으로써 KOSAC 코드 계산결과의 타당성 및 간접 검증용으로

활용할 계획이다.

본 연구에서 수행한 BETHSY의 자연대류실험에 대한 모의는 CATHARE 전산코드의 자연대류에 대한 예측능력을 검증할 뿐 아니라 Pump의 모의없이도 모의계산이 가능하므로 저유량에서의 KOSAC코드 계산 타당성 분석에 적합하다고 판단되었기 때문이다. 그리고 이 실험은 아직도 CENG측에서 검증되지 않았기 때문에 CATHARE 전산코드 자체의 평가에도 그 중요성이 있다.

다. 실험조건 모의방법

CATHARE 전산코드 입력을 위하여 지형은 크게 Pipe, Tee, Volume의 세가지 유형으로 나누고, 각 Module에 대하여 벽면을 통한 대기로의 열손실과 유체로 전달되는 열량을 고려하며, 특수 부품을 정확하게 모의할 필요가 있을 경우 Valve, Break, Sink, Source, Accumulator등을 사용하여 입력을 작성한다. 이와 아울러 실험 장치의 일차계통만 모의하거나, 전열관 파손사고 모의를 위해서는 Punctual 증기발생기와 SGTR Directive를 사용한다.

계통에 대한 일반 지형과 특수 부품에 관련된 Input을 작성한 후 모의계산을 수행하는데 모의계산은 크게 두 단계로 구분된다. 첫단계는 주어진 초기조건을 이용하여 정상상태를 모의하는 것이다. 초기조건에 맞는 정상상태가 계산되면 과도상태를 계산하기 위한 준비 작업으로 시간이 진행되지 않는 과도상태 즉 Stabilized Transient를 계산한다. 다음단계는 실험에서 실제 수행한 경계조건에 따라 실험의 과도상태를 모의한다.

제2절 연구결과 및 고찰

1. 단상 자연대류 모의 결과

가. 정상상태 모의

BETHSY 실험 3.4a인 비대칭 자연대류 실험을 모의하기 위해서는 실험수행 기간 동안 각 Loop이 대칭이 아니므로 3 개의 Loop 모두를 모의하였으며, 증기발생기의 증기관 고립을 위하여 첫번째 증기관과 두번째 증기관에 Valve를 장착하고 증기발생기1과 증기발생기2에 Safty Valve를 장착한다 Nodalization은 1차계통을 364개 2차계통을 137개로 나누어 총 501개의 Node로 나누었는데 여기에는 Volum 13개와 Tee module이 6개 포함되어 있다. 경계조건으로 2차계통의 압력(Steam Head)을 시간의 함수로 변화시키고 증기발생기1의 고립을 위하여 증기관1에 장착된 Valve의 K값을 $10^{**}50$ Order로 증가시킨다. 그림 68과 그림 69는 일차측과 이차측 모의를 위한 CATHARE코드의 Nodalization을 나타낸다.

초기조건은 정상 출력의 30%인 883kw의 노심출력에서 일차계통 pump가 정지된 상태이며 증기발생기의 수위는 약 64%를 유지하고 가압기 수위는 약 40%를 유지한다. 이와 같은 상태를 찾기 위하여 실험에서는 약 10300초 정도 소요되었으며 Solbourne workstation에서는 약 7200초의 CPU Time이 소요되었다. 표 24는 정상상태 값을 실험치와 비교한 것이다. 표 24에서 보는 바와 같이 정상상태인 경우 유속, 유량 및 압력의 계산값은 실험치와 비교시 만족할 만한 값이었으나 일차계통 냉각재 온도는 실험치보다 $3-1^{\circ}\text{C}$ 정도 Over Estimate 되었다. 또한 이차계통의 증기유량은 실험치의 범위가 너무 커서 실험치와 비교가 어려우며 증기발생기의 총 유체질량은 SG2와 SG3가 실험치보다 약 5% Under Estimate 되었다.

나. 실험과 비교분석 결과

제1절 3에서 설명한 모의 방법에 의하여 계산한 단상 자연대류의 모의 결과는 다음과 같다. 그림 70은 실험수행동안 노심의 Heat Rod에서 발생된 열 출력을 나타내는데 시간의 흐름에 관계없이 항상 일정한 량의 열을 생산하고 있음을 볼 수 있다.

그림71와 그림72는 가압기 압력과 증기발생기 압력을 나타낸다 그림73은 노심의 출구 온도이고 그림 74는 노심의 출구와 입구에서 냉각재 온도 차이를 나타낸다. PHASE-I의 경우 실험시 목표로 했던 $54^{\circ}\text{C}/\text{hour}$ 의 냉각율을 보이고 있으며 PHASE-II의 경우 실험값은 약 $46.5^{\circ}\text{C}/\text{hour}$ 의 냉각율을 보이고 있으나 계산값은 $60^{\circ}\text{C}/\text{hour}$ 의 냉각율을 나타내고 있는데 그 이유는 실험의 경우 4300초에서 5000초까지 증기발생기2와 증기발생기3의 압력이 일정한 압력을 유지하기 때문에 이차측의 압력이 설정압력에 도달하는 시간이 700초 정도 더 소요 되었다. 이로 인하여 실험값의 냉각율보다 계산값의 냉각율이 더 크게 나타났다. 4700초 부근에서 노심의 온도차가 급격히 상승한 이유는 Loop1에 역류가 일어나 Loop1의 유동방향이 순간적으로 바뀌고 증기발생기2와 증기발생기3에서 실험값보다 훨씬 많은 양의 증기가 빠져나므로 실험보다 과냉되었기 때문에 노심의 온도차이가 순간적으로 상승하였으나 전반적인 노심온도 차이 경향은 실험값보다 $2\text{-}5^{\circ}\text{C}$ 정도 높게 나타났다. 그림 75는 가압기의 수위를 가압기 밑면에서 부터 측정된 높이를 나타내고 그림 76은 가압기의 증기부분 온도를 나타낸다. 가압기 수위는 PHASE-II에서 계속 감소하여 약 3800초 정도가 되면 완전히 비게 되는것을 볼 수 있다. 가압기의 증기부분 온도는 실험값의 경우 외부와 열전달로 인하여 포화온도로 서서히 감소하는데 계산치의 경우 외부와 열전달을 고려 하지않고 단열되었다고 가정하였기 때문에 경계조건에

의하여 Cooldown이 끝날때의 온도를 일정하게 유지하는 경향을 보인다. 그림 77는 저온관의 온도변화를 나타내고 그림 78은 고온관의 밀림관 다음 위치에서의 실험값과 계산값의 온도변화이고 그림 79은 고온관의 노심쪽, 밀림관 다음 부분 및 증기발생기 입구 Plenum의 위치에서 계산한 온도변화를 나타내며 그림 80는 고온관과 저온관의 온도차이를 나타낸다. 그림 77의 저온관 온도변화를 보면 Loop2의 온도는 2차측 압력 변화에 따른 증기방출에 의해 서서히 냉각되고 있으며 실험값의 경우 Loop1도 Loop2의 저온관 온도에 서서히 접근하는데 비하여 계산의 경우 약 4700초 부근에 유체가 역 방향의 흐름으로 인하여 Loop1의 저온관 온도는 Loop2의 저온관 온도에 순간적으로 접근하게 되는데 실제로 Downcomer입구에서 Loop1과 Loop2의 냉각재가 함께 섞이기 위하여 시간이 필요하기 때문에 Loop간의 온도차이는 계산과 같이 갑자기 온도차이가 감소하지 않고 어느 정도의 시간을 가지고 서서히 감소한다. 고온관 온도는 실험의 경우 저온관과 마찬가지로 거의 같은 비율로 감소하는데 비하여 계산의 경우는 Loop2는 안정화된 최종온도가 실험치와 거의 같지만 SG가 고립된 Loop1의 경우는 실험치와 상이한 경향을 나타낸다. 계산의 경우 약 4700초 부근에 Loop1의 온도가 상승하는 것은 Loop1의 역류에 기인하는 것으로 생각되며 급격히 상승하였다가 다시 안떨어지는 이유는 고온관의 속도가 적은값 (10**⁻² Order)이지만 값을 유지하고 있기 때문에 높은 온도를 유지하는 것으로 생각된다.

그림 81은 Downcomer에서 체적유량을 나타내고 그림 82은 고온관에서 액체속도, 그림 83는 저온관에서 계산한 유체의 질량유량을 나타낸다. Downcomer와 고온관의 유체속도는 실험값과 일치하고 있으며 약 5000초후 Loop1에서의 유체속도 및 유량은 Loop2의 유속 및 유량에 비하여 무시할 수

있을 정도로 작은 값으로써 Loop1을 통한 에너지의 방출은 거의 없는 것을 알 수 있다. Downcomer의 유량은 Phase-I과 Phase-II에서 조금씩 감소하지만 Loop1에서의 유량이 거의 없기 때문에 Loop2의 유량은 증가하여 초기상태에서 보다 Phase-I은 15% Phase-II는 8% 정도 더 많은 유량이 흐르게 된다. 그림 84은 밀림관 앞쪽 고온관 1의 높이방향 압력차이를 나타내며 그림 85와 그림 86는 각각 밀림관 앞부분과 뒷부분에서 계산한 기포율 (Void Fraction)을 나타낸다. 실험의 경우 기포율을 직접 측정하지 못했기 때문에 고온관의 윗면과 밑면사이의 압력차이에 의하여 기포의 발생여부를 추측할 수 있으며 계산의 경우도 비슷한 시간에서 기포가 발생함을 볼 수 있다.

그림 87은 증기발생기 전열관의 입구,출구 온도 차이로써 Loop1의 전열관에서는 4100초 부근부터 열전달 역류 현상이 일어남을 볼 수 있는데 실험값보다 계산값의 온도차이가 더 적게 나타난 것은 4700초 이후 저온관1의 온도가 상승했기 때문에 온도차이가 더 적게 나타났다.

그림 88은 자연대류 실험에 사용된 경계조건으로써 실험 수행동안 일정한 증기발생기 수위를 유지하기 위하여 급수량을 조절하는데 계산의 경우 실험과 같이 민감하게 변화시킬 수 없기 때문에 급수량은 시간의 1차함수라고 가정하여 계산하였다. 그림 89은 증기발생기 수위 변화를 나타내고 그림 90는 증기발생기에서 방출되는 증기량이다. 그림 89에서 Loop1의 증기발생기 수위가 약 12 m로 일정한것은 모델링시 Steam Dome의 높이를 12 m에서 15 m까지로 했기때문에 수위가 Steam Dome의 최저 값인 12 m로 나타났으며 실제로는 시간이 경과함에 따라 서서히 감소하여 Steam Dome에서 Riser쪽으로 내려간다. 그림 90에서 보듯이 증기방출량을 실험값과 많은 차이를 나타내는데 여기에 대한 민감도 분석은 다음 절에서 설명한다.

그림 91은 Two-Phase가 발생하는 Phase-II 실험기간 동안 증기발생기 전열관의 수위 변화를 나타내는데 4700초 부근부터 전열관에 기포가 발생하여 수위가 서서히 감소하는 현상을 볼 수 있다. 끝으로 본 계산을 수행하기 위하여 사용한 전산기의 성능과 관련된 계산시간을 요약하면 표 25와 같다.

다. 민감도 분석

실험값과 일치하지 않는 증기유량과 증기유량의 실험값 보다 과다 방출로 인한 일차계통의 과냉현상을 해석하기 위하여 민감도 분석을 실시하였다. 표준의 경우는 급수온도를 14°C 로 일정하게 하고 급수유량은 그림 88과 같이 시간의 함수로 하여 선형적으로 변화하는 경우이며 Case1은 각 Loop의 증기관의 K값을 0에서 20으로 증가시켜서 K값의 변화가 증기량에 미치는 영향을 고려했으며 Case2는 주급수량을 시간의 함수로 공급하지 않고 정상상태에 얻은 값(약 0.11 kg/sec)로 일정하게 공급 하는 경우이고 Case 3은 주급수 온도를 14°C 에서 실험값의 최소치인 13.7°C 로 내렸을 경우이다.

그림 92는 저온관1과 저온관2의 각각의 경우에 온도변화를 나타내고 그림 93는 고온관의 노심과 밀림관 사이에서의 유체속도이며, 그림 94은 증기발생기1과 증기발생기2의 증기유량 변화이다. 그림 92에서 그림 94에서 보는 바와 같이 증기관의 K값, 주급수 유량및 온도의 변화가 1차냉각계통에는 거의 영향을 미치지 않으며 2차계통의 증기유량에는 약간씩 차이가 있으나 그 양은 별로 크지 않다. Case2의 경우 800초에서 1300초 부근에 다른 경우보다 증기유량이 많은 이유는 Case2는 항상 약 0.11kg/sec 의 주급수가 공급되는데 비하여 다른 경우는 위의 시간대에 최고 0.35kg/sec 인 많은 양의

차가운 주급수가 공급되기 때문이다. 다시 말하면 Case2는 800초에서 1300초까지 다른 경우보다 차가운 주급수가 적게 공급되므로써 증기량이 더 증가하였다.

2. ISP-27 계산결과 및 분석

가. 계산결과

제1절에서 기술된 ISP-27 실험의 모의계산을 수행한 결과 BETHSY팀에서 제공한 변수들의 비교 값은 표 26에 요약된다. 계산결과 정상상태 값들은 측정오차 범위 내에서 비교적 실험값과 잘 일치하도록 입력이 작성되었음을 알 수 있다. CRAY-XMP 전산기를 사용하는 과도기 계산결과 CPU Time과 실시간과의 비교한 결과는 표 26에 요약되어 나타나있다. 그리고 실험과정의 모의계산 결과는 그림 95에서부터 그림 132에 나타나있다.

나. 실험과 비교분석 결과

먼저 입력의 작성에 있어서 주급수가 차단되고 보조급수가 작동할 경우 급수온도는 218°C 에서 34°C 로 낮추어져 실험이 수행되었지만, 계산에서는 218°C 의 온도를 그대로 유지하는 것으로 경계조건이 모의되었기 때문에 이 값의 차이가 전체 과도기의 물리적 현상에 영향을 미치고 있다. 그리고 계산결과를 점검한 후 Accumulator의 Surge Line 유동면적도 약 30% 높게 입력되었음이 발견되었다.

그림 95와 그림 96의 고온관에서 Void Fraction은 Accumulator 주입이 시작하는 약 3200초까지 비교적 타당한 값을 나타내고 있으나, 이후는 보조급수 온도차이에서 발생하는 1차계통의 상태예측의 차이와 Accumulator

주입 유량차이 때문에 다소 낮게 계산결과를 나타내며 특히 7000초 이후 과도예측은 실험에서 작동된 LPSI가 작동하지 않았기 때문으로 풀이된다. 이는그림 116과 그림 117에서도 확인된다. 그림 97과 그림 98에 나타난 Void Fraction도 역시 같은 현상으로 설명된다. 초기의 계산결과가 Peak값을 나타내는 것은 보조급수 온도의 적절한 모의가 되지 않았기 때문으로 풀이된다. 이는 실제 실험은 34°C에서 진행되었지만, 계산시 218°C를 그대로 사용하였으므로 초기의 열전달량이 줄어들고 Void Fraction이 증가되었기 때문이며, 최종수단(Ultimate Procedure)이전까지는 계속 과도 예측한 결과가 이를 보여주기도 한다.(그림 99)

노심압력 강하는 저온관 및 고온관의 Void Fraction 결과와는 대조적인 양상을 보여주며, 그림 100의 Upper Plenum 압력강하 역시 현실적인 모의 계산이 되지 못한다. 그러나 Guide Tube 및 Downcomer에서의 압력강하 그림 101 및 그림 102의 계산결과는 비교적 일치함을 보여준다. 특히 Downcomer는 Void Fraction이 적고 잘 정의된 지형과 재원을 사용하였으므로 계산이 다소 정확했다는 의미를 가질 수 있다. 그러나 전반적인 이상유동(Two-Phase Flow)과 기학학적으로 복잡한 지형에서는 그 정확성이 보장될 수 없음을 알 수 있지만, 전체 물리적 거동에 결정적 역할을 주지는 않는 것으로 관측된다. 이것은 그림 103의 고온관과 저온관의 압력강하 예측과 그림 104의 펌프수두의 계산결과 비교로 부터 이해할 수 있다.

Loop Seal Clearing에 대한 압력강하는 그림 105와 그림 106에 나타나 있으나 개략적인 경향은 보여주지만 정량적인 값에 있어서는 다소 차이를 나타낸다. CATHARE의 계산결과는 800초경에 부분적 Loop Seal Clearing이 예측되지만 실제 실험에서는 약 1400초경에 시작하는 것으로 나타나지만,

실험에서 완전한 Loop seal Clearing이 나타나는 시간은 계산상에서도 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 건전한 Loop의 경우는 그림 107과 그림 108에서 보듯이 증기분포의 계산에 과예측을 하는 것으로 나타나 있는데, 이것은 Accumulator의 주입량과도 관계가 있는 것으로 판단된다.

그림 109와 그림 110에서 증기발생기 입구 plenum에서의 압력강하는 비교적 낮게 계산하며 전체 U-튜브에서의 그것은 급수온도의 차이에도 불구하고 실험과 잘 일치함을 보여준다. 이러한 경향은 그림 111과 그림 112에서도 나타나고, 가압기의 압력강하는 항상 낮게 예측되지만 재고량 및 냉각에 대한 현상과 연관되어 있어 이 결과로서 판단하기에는 적당하지 않다.

그림 113는 Break를 통해 빠져나간 냉각재의 총질량을 나타내는데, 약 3600초 근처에서 상당한 차이를 나타내는 것은 Accumulator 주입량의 부적절한 모의때문으로 풀이된다. 이는 Accumulator의 밀림관 유동면적에 대한 실제값과의 차이로 인하여 유동량 주입이 커져서 결과적으로 일차계통 압력은 증가하지만 전체적인 계통의 Void Fraction이 감소하므로 나타나는 현상으로 풀이된다. 그림 114에 나타난 Break Flow의 경우 Accumulator의 작동 이전에는 잘 일치하고 있으나, 이후는 낮은 온도의 과대 Accumulator 유량때문에 계산값이 실험 값 보다 높은 값을 보여준다.

2차계통에 있어서 앞에서 언급하였듯이 보조급수의 온도를 높게 입력한 관계로 주어진 체적 유동량에서 밀도의 차이로 급수량이 그림 115와 같이 나타나 1200초 이전에는 낮게 그리고 이후에는 높게 입력되어서, 주증기관의 증기량이 실험값 보다 높게 계산되었다. 그러나 Ultimate Procedure의 작동시기는 그림 118, 그림 119, 그림 120 그리고 그림 121에서

보듯이 잘 일치하는 것으로 보아 2차측의 급수온도에는 민감하지 않음을 시사한다. 그림 118에서 나타나듯이 증기발생기의 압력은 보조급수 온도가 높게 입력된 관계로 약 300초 후에는 높게 계산하고 있다. 결국 보조급수의 온도증가가 증기발생량도 역시 증가시켰기 때문으로 풀이된다.

그림 121은 일차계통의 감압과정을 보여주고 있는데 약 500초 근처의 실험값에서 나타나는 압력변화를 높게 예측하는 것은 역시 보조급수의 온도 때문으로 판단되며, 3000초 근처의 압력거동은 Accumulator의 주입량이 잘못 입력 되었기 때문으로 풀이된다. 이들경계조건들의 오차와 Break Flow에 대한 오차가 누적되어 결국은 압력변화에 대해 실험값과 계산값 사이에 상당한 차이를 보여준다. 3000초 근처의 거동은 그림 117에서도 보여지듯이 과도한 안전주입의 결과로 해석되는데, 이는 Accumulator의 압력에서도 일치되는 거동을 보여준다.

그림 123과 그림 124는 Ultimate Procedure후의 노심 입,출구 온도가 300초 후에 상당히 차이를 나타내며 이는 모두 부적절한 급수온도 및 Accumulator의 주입량 입력착오에 의한것이 가장 결정적인 요인으로 판단된다. 그림 125와 그림 126의 온도변화도 일차적으로 같은 이유로 설명된다. 특히 보조급수 온도가 현저하게 영향을 미치는 부분은 그림 127와 그림 128의 경우 증기발생기 Downcomer의 하단부 온도에서 결정적으로 나타난다.

Accumulator의 유량이 그림 129의 노심수위와 피복재 온도에 상당한 영향을 미치고 있음은 그림 130에서 부터 그림 132까지의 결과에서 CATHARE의 계산값이 훨씬 높게 표시되는 것으로 부터 인식할 수 있다.

제 3 장 결론 및 건의사항

제 1 절 결론

앞장에서 살펴 보았듯이 BETHSY 실험장치 및 도입된 실험관련 자료를 분석하고, 단상 자연대류 실험 모의 계산과 ISP-27 모의계산결과를 실험과 비교하여 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 선진국은 이미 전산코드의 검증용으로 대형실험의 수행단계를 지나 원전 비상운전절차서(EOP)에 사용된 물리적 가정들의 타당성을 실험을 통해 확인한 후 코드를 이용해 계통의 사고시 거동을 분석하므로써 그 신뢰성을 향상시키는 방향으로 원전 안전성 연구를 수행하고 있다.
2. 원전 사고시 관리체계를 실험을 통하여 수립하기 때문에 불란서의 경우 계통모의에 사용된 전산코드 계산 결과의 불확실성에 대한 의구심이 비교적 감소되며 각종 안전계통에 관련된 부품들의 성능에 대해 그 적합성을 현실적으로 판단할 수 있다.
3. 대형실험을 통해 관찰한 물리적 거동을 전산코드의 모의계산에 의해 확인하고 전산코드를 실제 원전계통을 모의하여 유사한 결과가 나타나는지를 확인할 필요가 있다. 이는 축적의 차이에서 나타날 지도 모르는 물리적 현상의 상이점에 대한 확인 과정이다. 물론 이들 작업은 연구기관 보다는 전력회사측에서 수행하여 이의를 제기하고, 필요시 전산코드 개발 및 실험수행 담당자들과 이에 대한 타당성 입증 방식을 택하는 것이 효과적이라 판단된다. 만약 BETHSY 실험에서 나타난 현상과 실제 원전의 모의 결과가 일치한다면 유사 관련 과도기의 이해에 신뢰성을 부여할 것이다.
4. 단상 자연대류 실험(Test 3.4a)의 경우 실험시 목표로 하였던

1차계통의 냉각율인 Phase-I은 54°C/h , Phase-II는 46.5°C/h 의 값을 얻을수 있었으며, 모의계산 결과도 이들 값에 대체로 일치하는 경향을 보여주었다. 그러나 일차계통의 격리 Loop에서 일어나는 역방향 유동량의 예측에는 비 현실적인 결과를 보여주었으며, 또 실험에서는 증기발생기의 격리를 위하여 순간적으로 SG1의 증기관을 차단하여 증기흐름을 중단시킬 수 있었으나, CATHARE 모의계산의 경우는 SG1의 증기관에 모의된 밸브의 K값(Form Loss Coeff.)을 증가시키므로써 증기관을 차단할 수 밖에 없었다. 그러나 K값의 증가에도 불구하고, 소량의 증기가 1번 증기관을 통해 방출되었고, 실험의 전 과정을 통하여 2번 및 3번 증기발생기에서도 실험값 보다 조금 많은 증기량이 방출되어 일차계통의 냉각이 다소 과대 계산되었다. 이를 개선하기 위해 각 증기발생기의 급수온도, 급수유량 및 증기관의 K값의 변화가 증기량에 미치는 영향을 살펴 보았으나, 이들 변수들이 증기량에는 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

5. ISP-27인 BETHSY의 'HPSI 불능상태에서 2" 저온관 파손사고'의 과도기 모의계산은 실험결과에 대한 예비지식 없이 계산(Blind Calculation)된 것으로 보조급수 온도와 Accumulator 주입량 등의 조건이 실험값과 차이가 있어 이 효과가 주로 500초 근처의 1차 냉각계통의 압력거동 및 3000 초 이후의 전체 계통의 거동에 영향을 주어서, 결국 실제 실험시간 동안에 LPSI 및 RHRS의 작동조건에는 도달할 수 없었다. Accumulator의 Surge Line 유동면적이 약 30%정도 높게 입력되어 안전주입이 실험값 보다 많은 것으로 계산되었는데, 이것이 1차계통의 감압에는 오히려 역효과를 보여 피복재온도 및 압력은 계산값이 실험치보다 큰것으로 나타났다. 그러나 과도기 진행중 Ultimate Procedure의 시작시간 및 안전주입 시점 등의 과도기 설정치 도달에 대한 예측은 비교적 실험값과 일치되는

것으로 나타났다.

따라서 이런 입력을 수정하여 재 계산할 경우, 실험값과 비교하여 보다 일치된 결과를 얻을 수 있을 것이라 예상된다. 그러나 이의 정당성을 확보하기 위해서는 적절한 보조급수 온도와 Accumulator 유동면적을 수정하여 확인계산을 반드시 수행한 후에야 비로소 CATHARE 전산코드의 소형 냉각재 상실사고에 대한 타당성 평가를 내릴 수 있을 것으로 결론지어진다.

제2절 기대효과

본 과제 수행을 통하여 도입된 BETHSY 실험자료는 KAERI가 개발 혹은 보유중인 전산코드들의 종합적인 검증을 통하여 코드들의 신뢰성을 평가할 수 있는 동기를 부여한다. 특히 기존의 보유중인 전산코드의 경우는 실험상황을 모의하므로써 모의예측 성능을 파악할 수 있고 전산코드에 대한 불확실성 분석도 가능할 것으로 기대된다. 이와 더불어 설계용 전산코드의 보수성 혹은 설계여유도를 평가 분석할 경우에도 이들 자료가 활용될 수 있어, 설계에 관련된 불확실성 분석도 보다 현실성이 부여된다. 실험자료를 전수 받은 상대기관의 풍부한 실험 경험을 토대로하여 국내의 자체 실험연구 수행의 계획단계 부터 설계, 제작, 운영에 대한 기본 기술을 습득할 수도 있고, 국내자체의 실험 기반 구축에 참고자료를 제공할 수도 있으며, 대형실험은 설계 뿐 아니라 건설 및 제작에 있어 실제 원전에서 필요한 정도의 기술의 정확성이 요구되므로, 원전관련 산업의 기술발전에도 이바지한다. 특히 실험결과의 부재로 인하여 한계성이 있었던 국내 원전의 안전성 연구에 기여할 뿐 아니라, 국내 유관기관과 실험자료를 공유하므로써 국내의 이론적 연구지원에 토대가 될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] P. Bazin, "BETHSY Data Base" SETH/LES/87-38, 1988
- [2] F. Barre and M. Bernard, "The CATHARE Code Strategy and Assesment", Nuclear Engineering and Design Vol.124, No.3, 1990
- [3] Z. Hozer and Won-Pyo Chang, "Qualification Report CATHARE V.1.2E. Revision 5. CREARE Downcomer Experiment", STR/LML/91-238
- [4] P. Gully and R.deruaz, "BETHSY Measurement System", SETH/LES/87-27
- [5] D. Dumont, "BETHSY(Test 3.4a), Natural Circulation with Unbalanced SG", SETH/LES/90-96
- [6] P. Bazin, "BETHSY(Test 4.1a), Two Phase Natural Circulation Quick Look Report", SETH/LES/88-55
- [7] B.Noel, " BETHSY(Test 5.1a), Secondary Mass Loss", SETH/LES/90-114, 1990
- [8] T.Chataing and P.Clement, " BETHSY(Test 5.2c.2), Total Loss of Feedwater", SETH/LES/90-102, 1990
- [9] T. Chataing and B. Faydie, "Perte Totale d'eau alimentaire(additif a la P.E.E)", SETH/LES/89-81
- [10] R.Deruaz, "BETHSY: General Description", Note SETH/LES/90-97
- [11] G. Briday and D.Juhel, "BETHSY(Test 6.2), 6" Cold Leg Side Break", SETH/LES/90-111 , 1990
- [12] A.Messie and B.Faydide, "BETHSY(Test 4.3b), Multiple S.G.T.R.", SETH/LES/90-101, 1990
- [13] T.Chataing and P. Clement, " 2" Cold Leg Break Without HPSI and

- with Delayed Ultimate Procedure", SETH/LES/90-104,1990
- [14] D. Bestion, "The Physical Closure Law in the CATHARE Code",
Nuclear Engineering and Design Vol.124, No.3, 1990

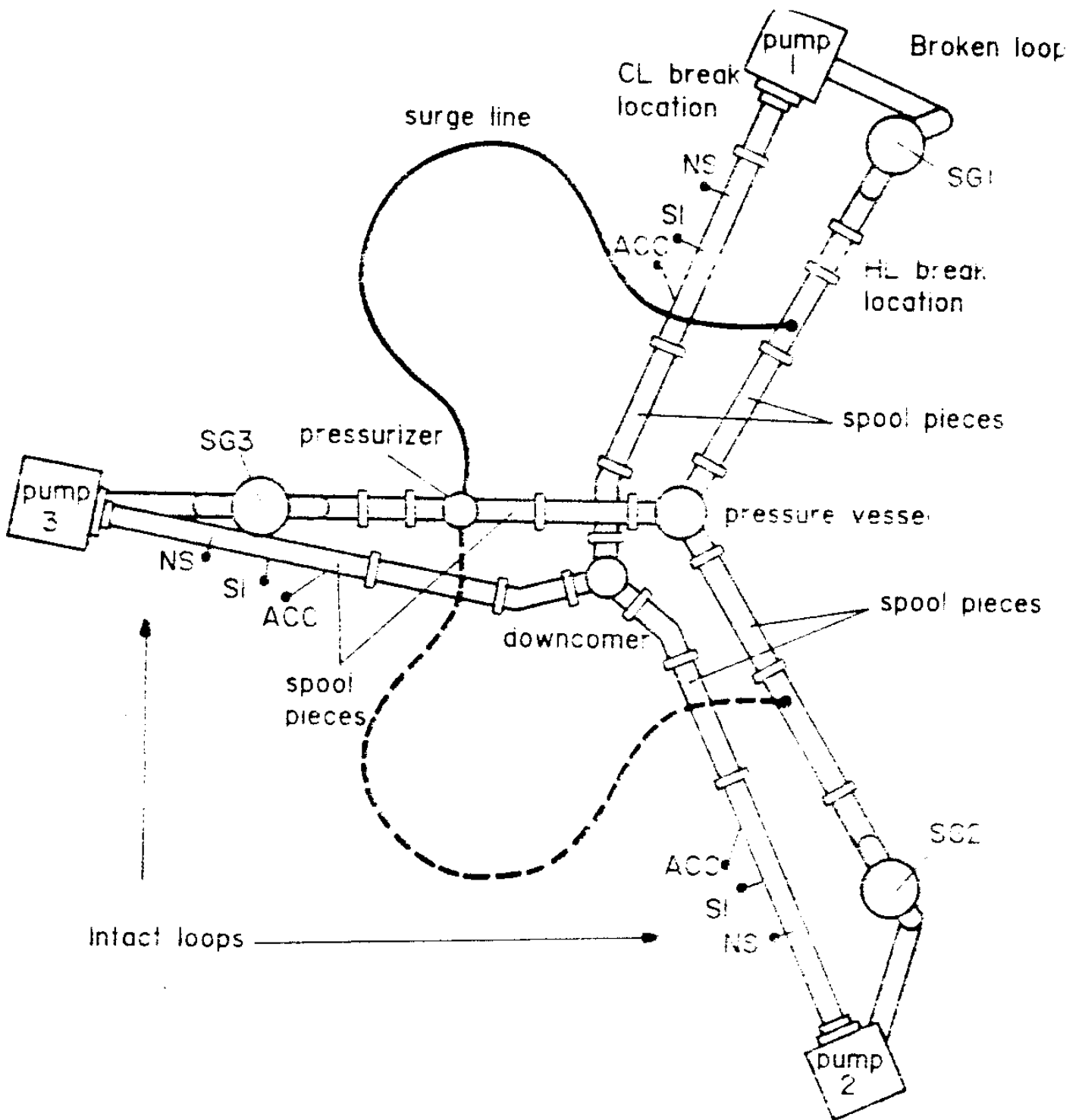


그림 1 BETHSY 실험장치의 개략적인 일차계통 단면도

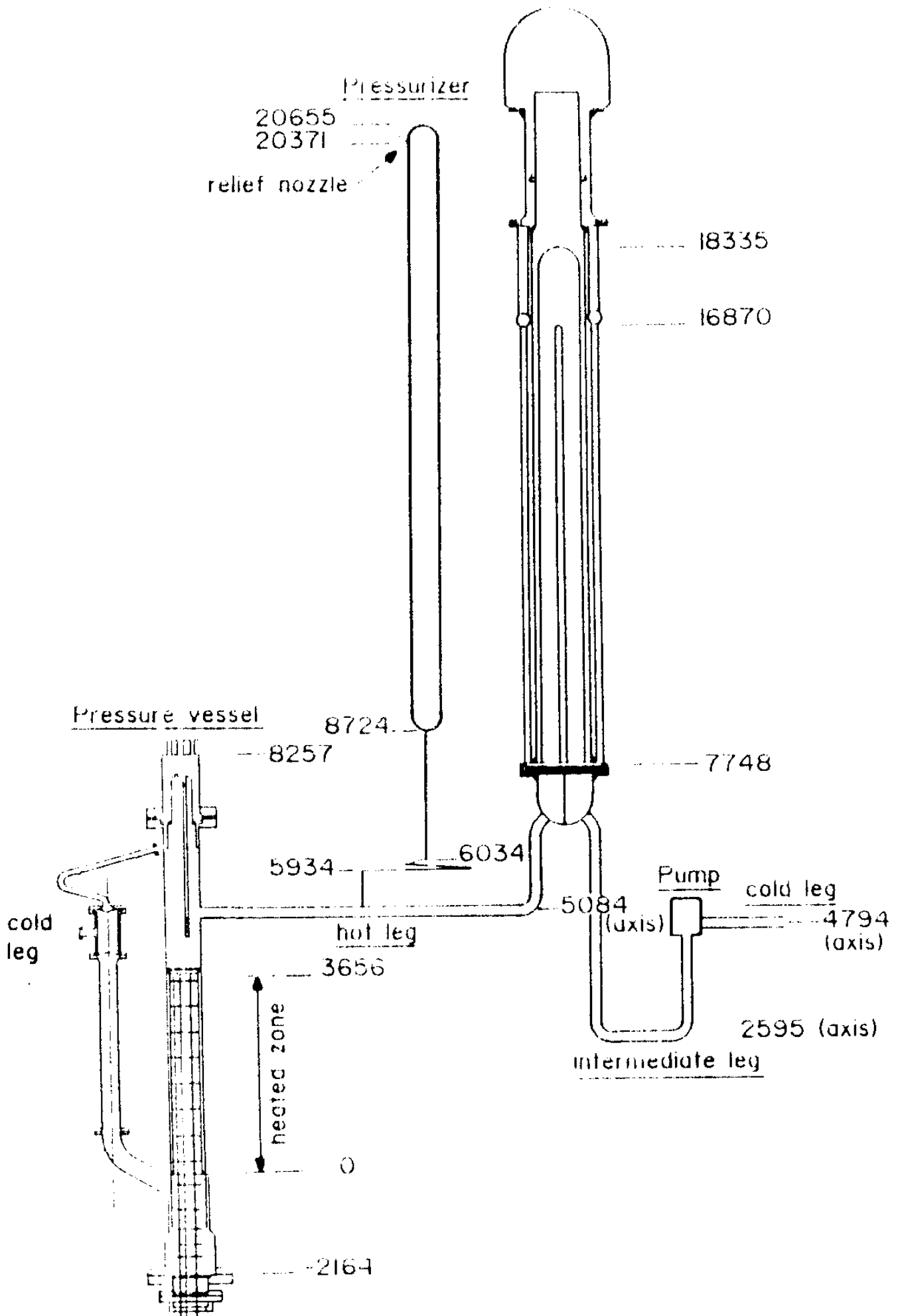


그림 2 BETHSY 실험장치의 일차냉각계통의 각부분 높이

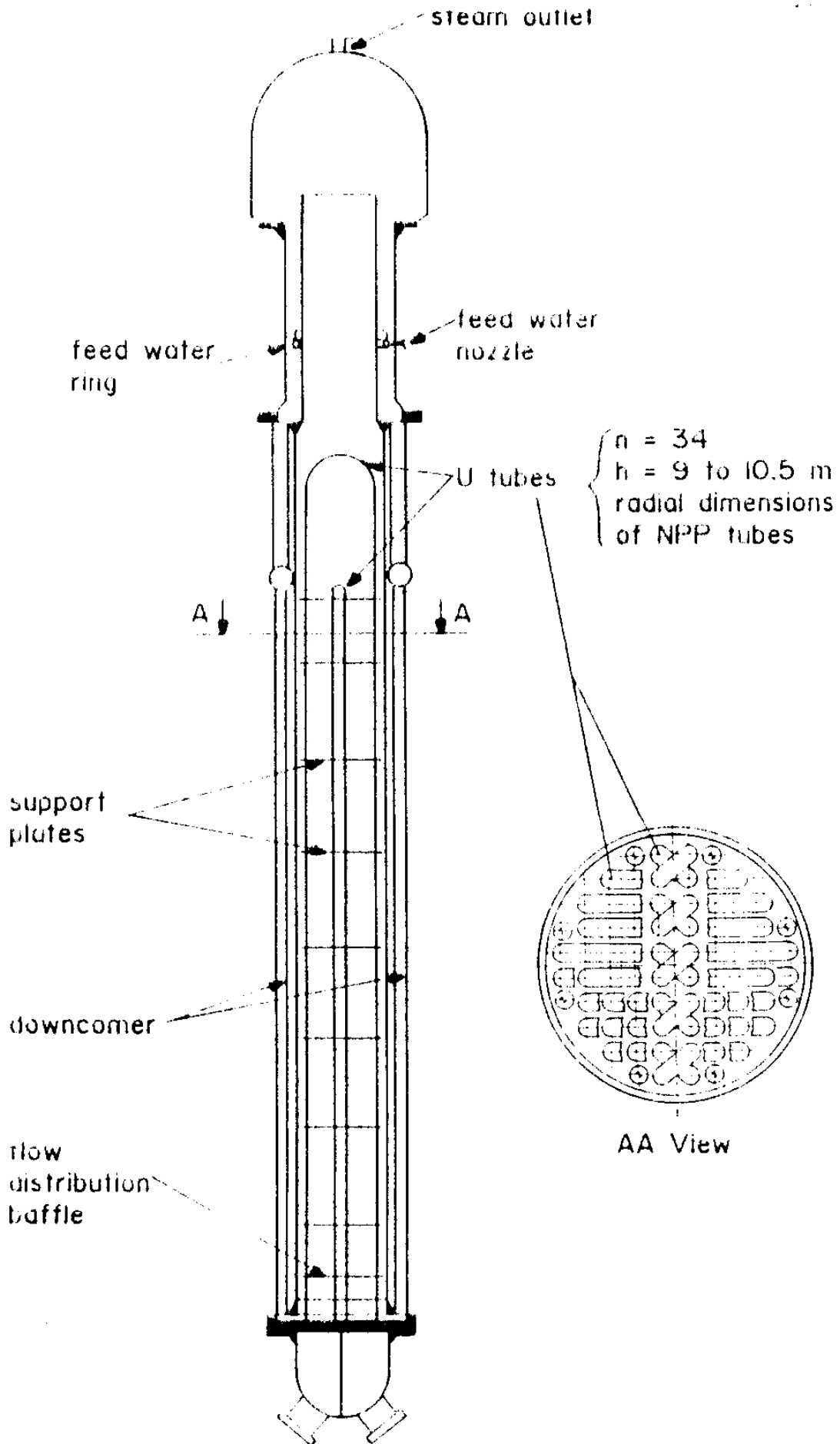


그림 3 BETHSY 실험장치의 증기발생기 개략도

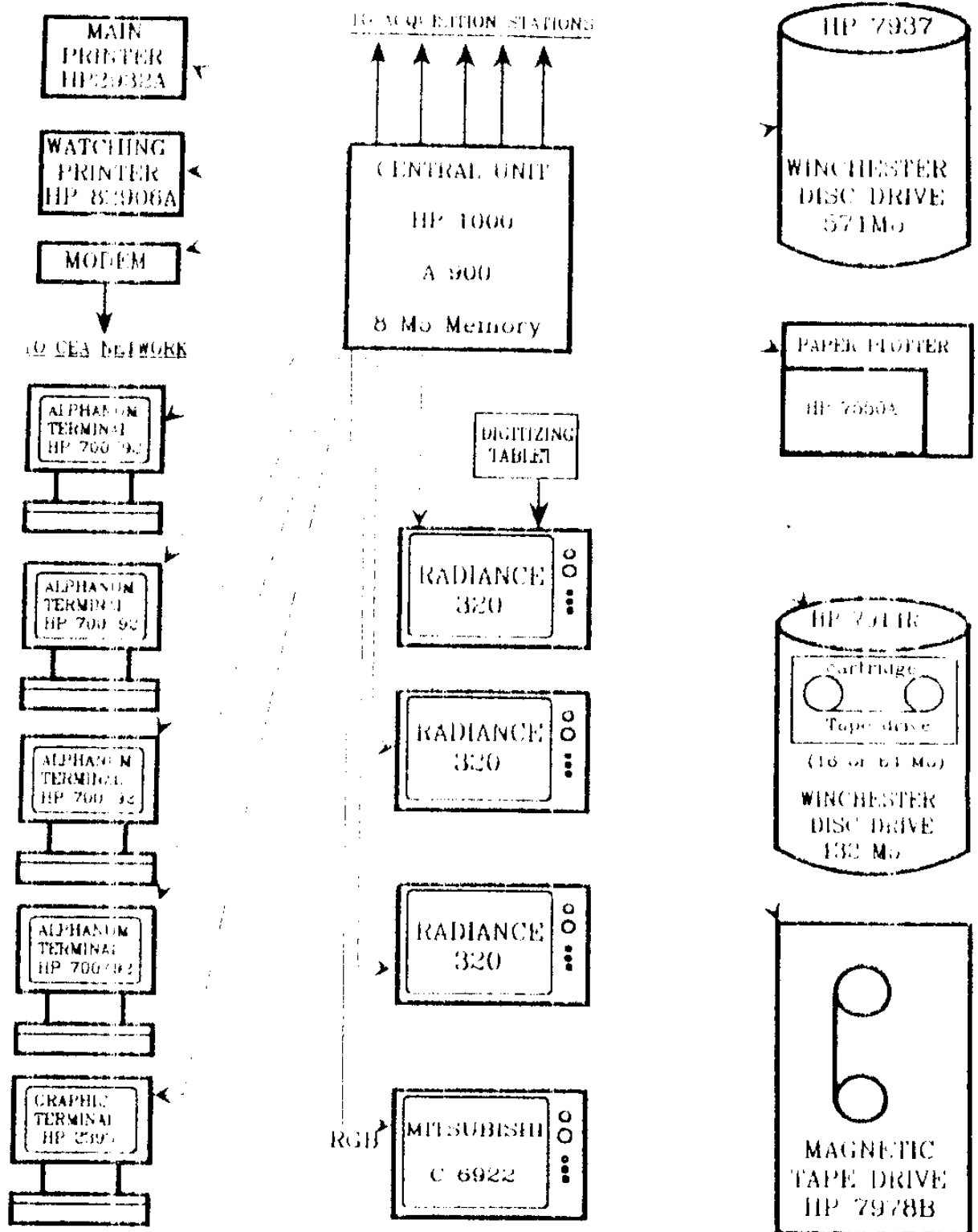


그림 4 BETHSY 자료처리 계통도

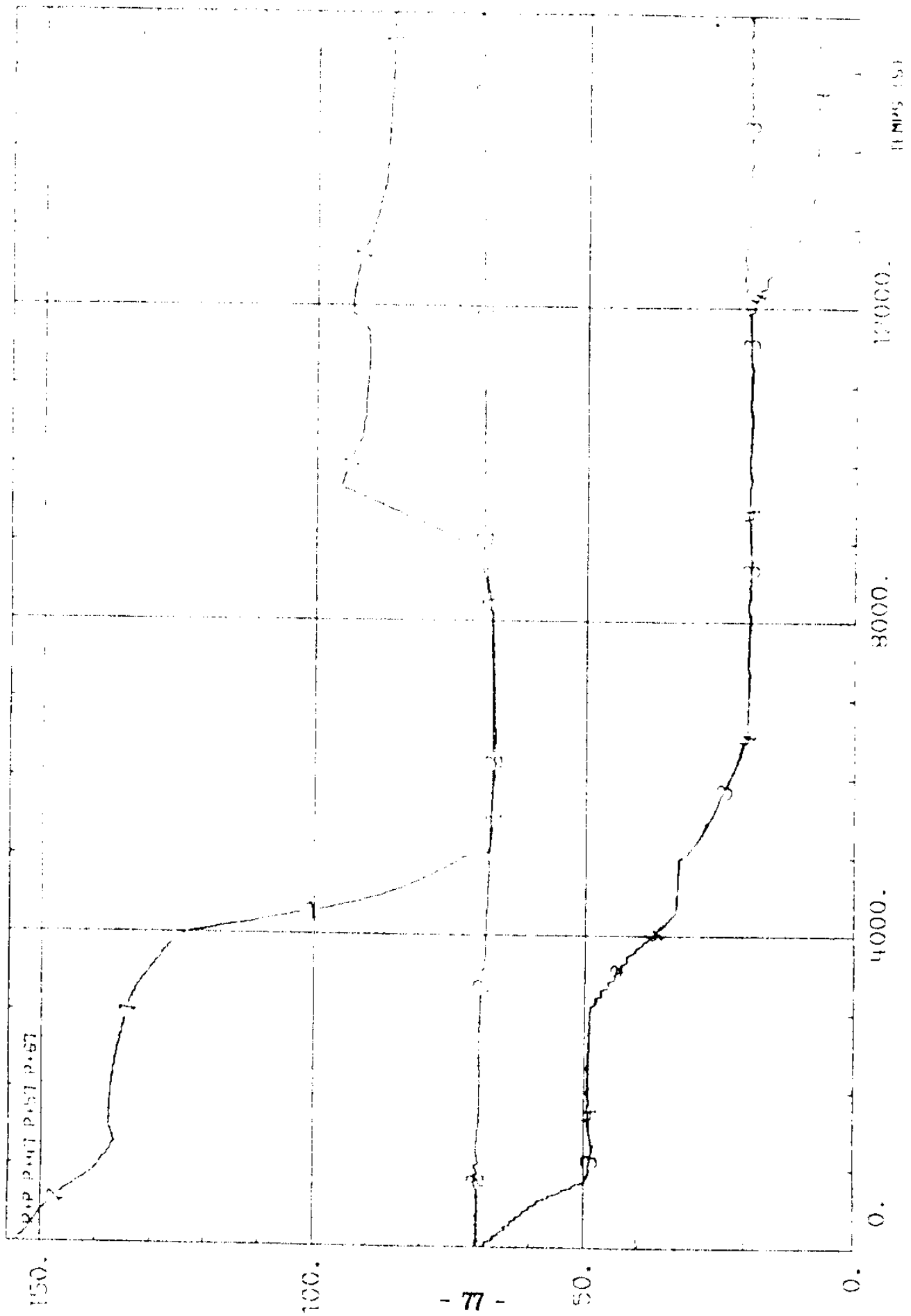


그림 5 단상자연대류 실험의 일차측 및 이차측 냉각재의 압력

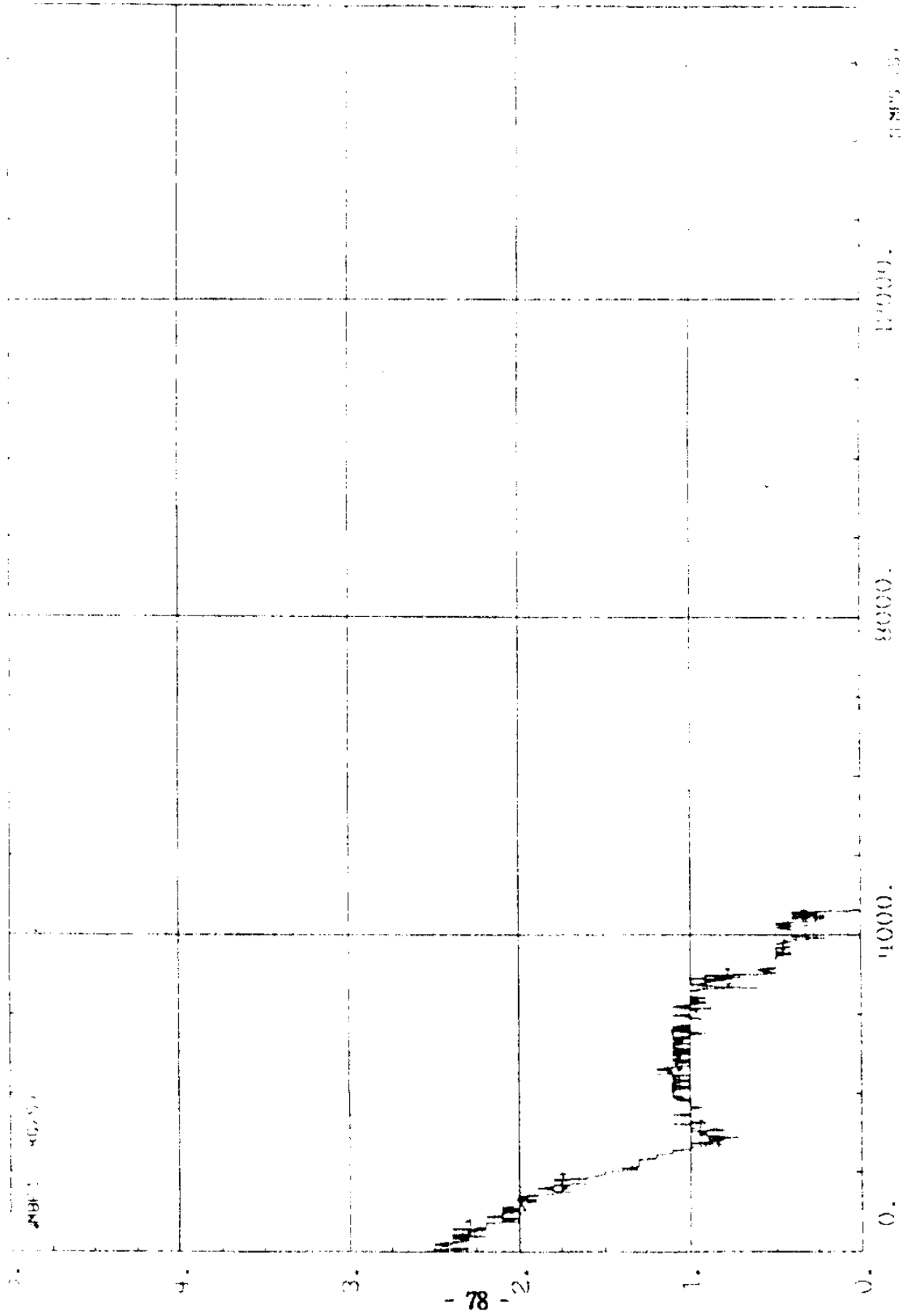


그림 6 단상자연대류 실험의 저온관1에서의 질량유량

BU POINT 7. 3,000m to 17,000m

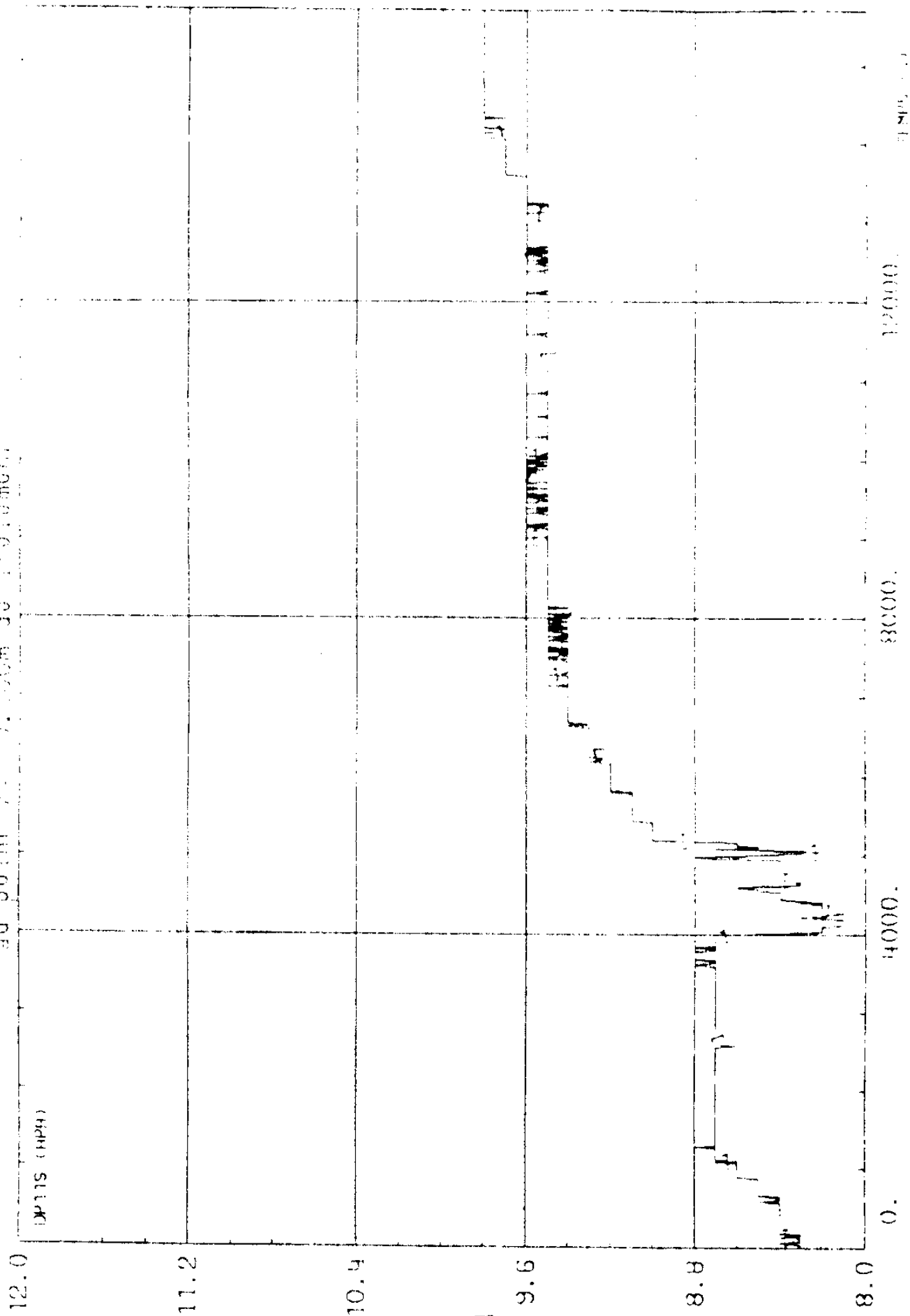


그림 7 단상자연대류 실험의 고온관1의 높이방향 압력차이

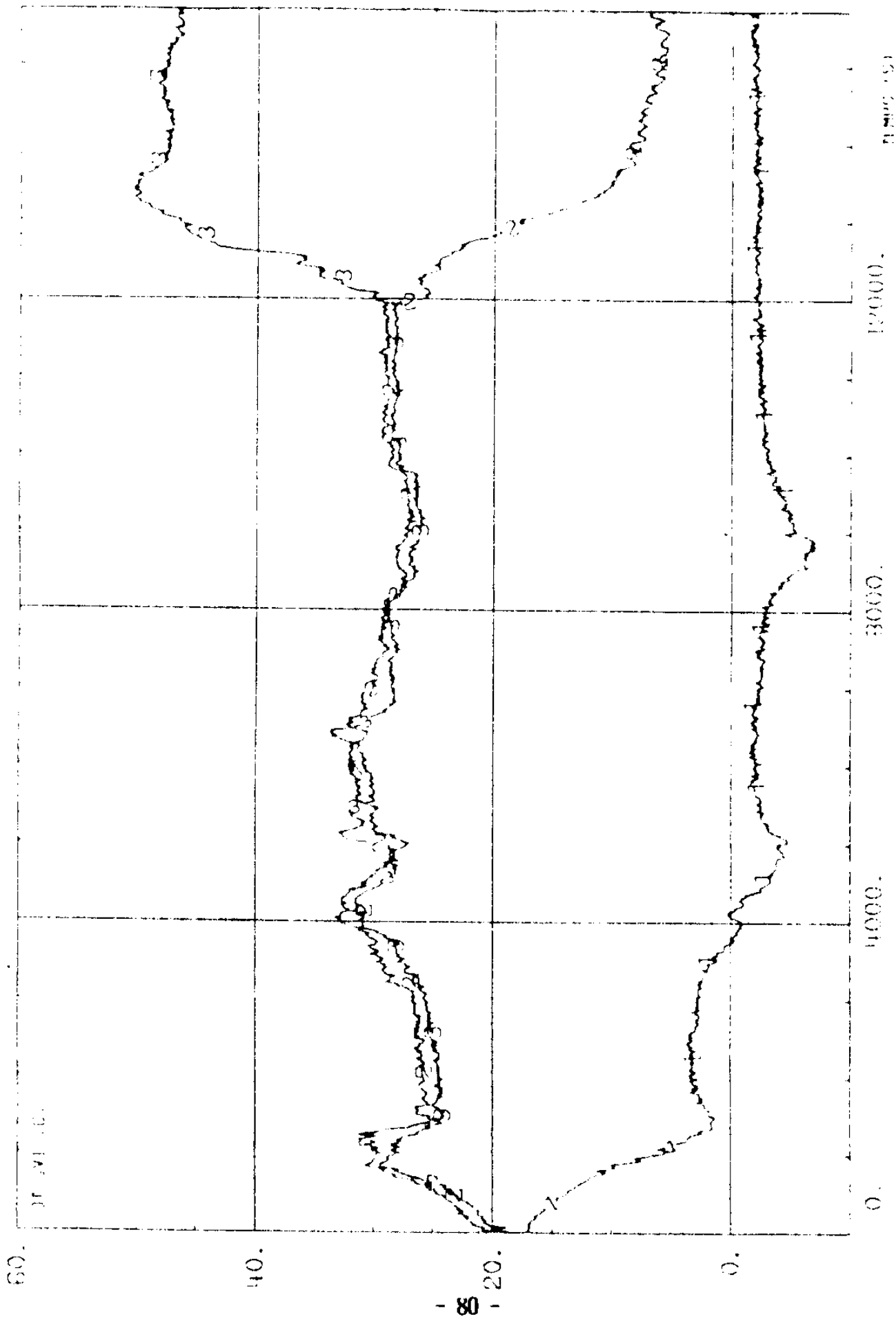


그림 8 단상자연대류 실험의 증기발생기 일차측의 입,출구 온도차이

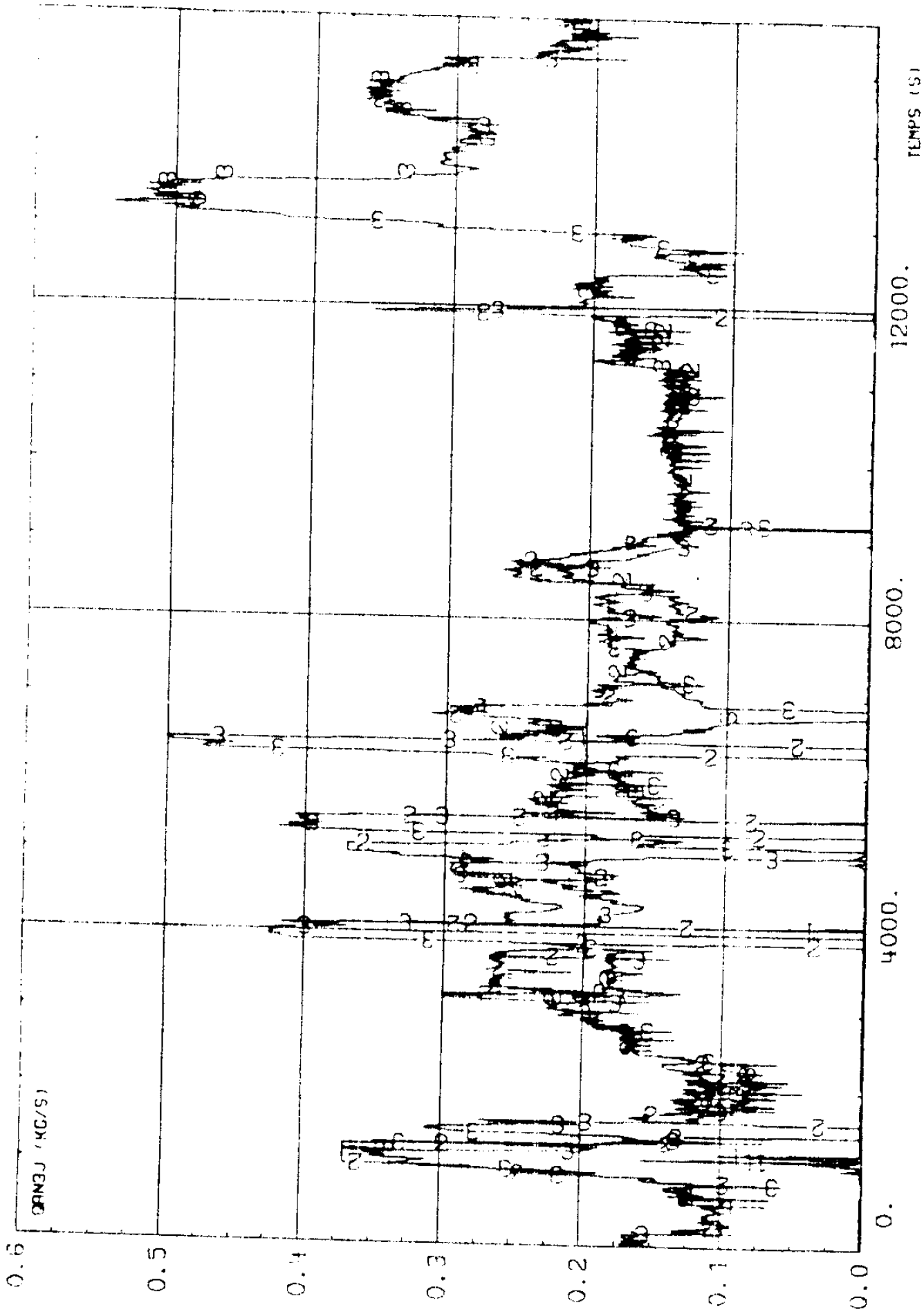
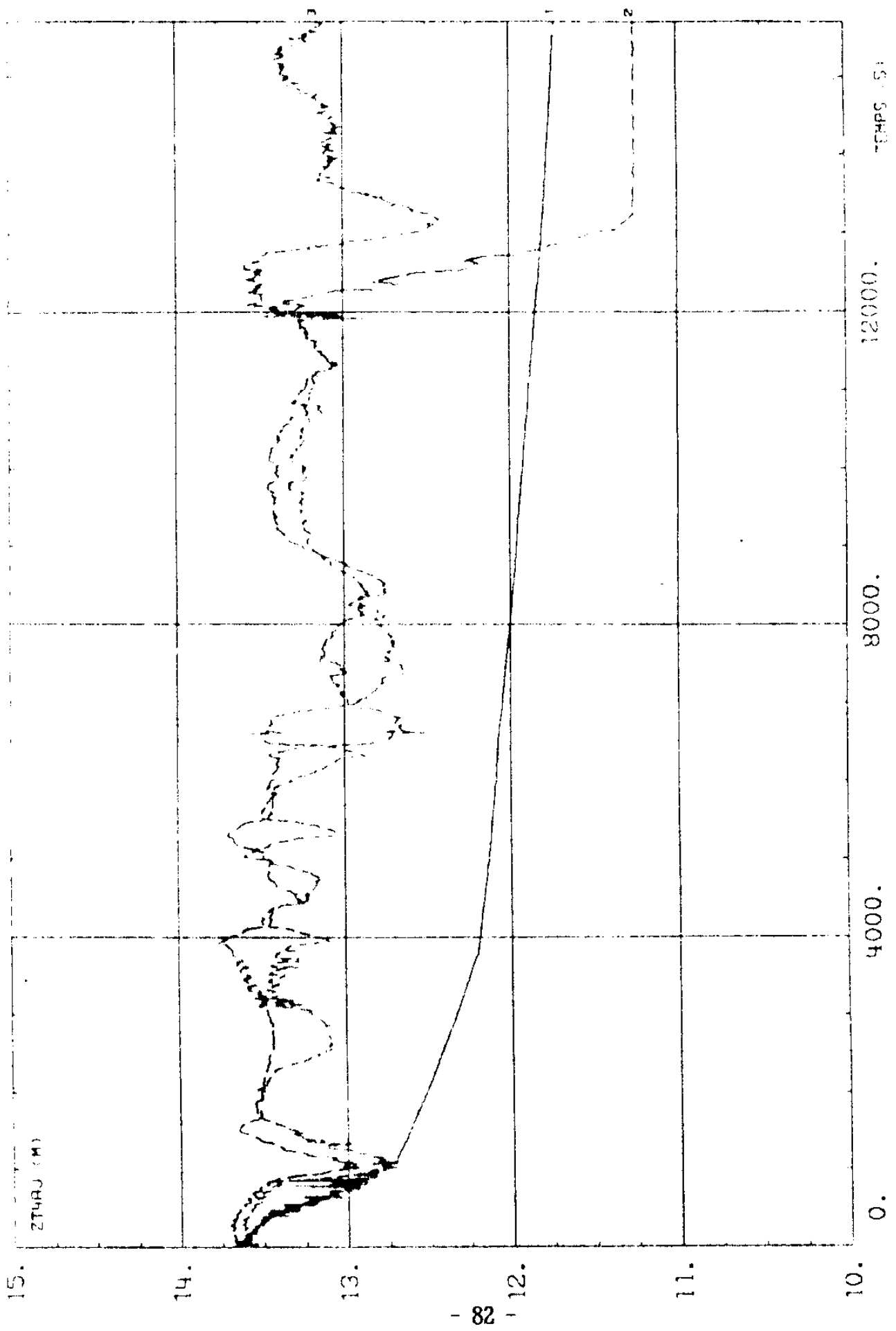


그림 9 단상자연대류 실험의 증기발생기에 공급되는 급수유량



EXP : ZT4R2 EXP : ZT5R2 EXP : ZT6R2

그림 10 단상자연대류 실험의 증기발생기의 Collapsed Level

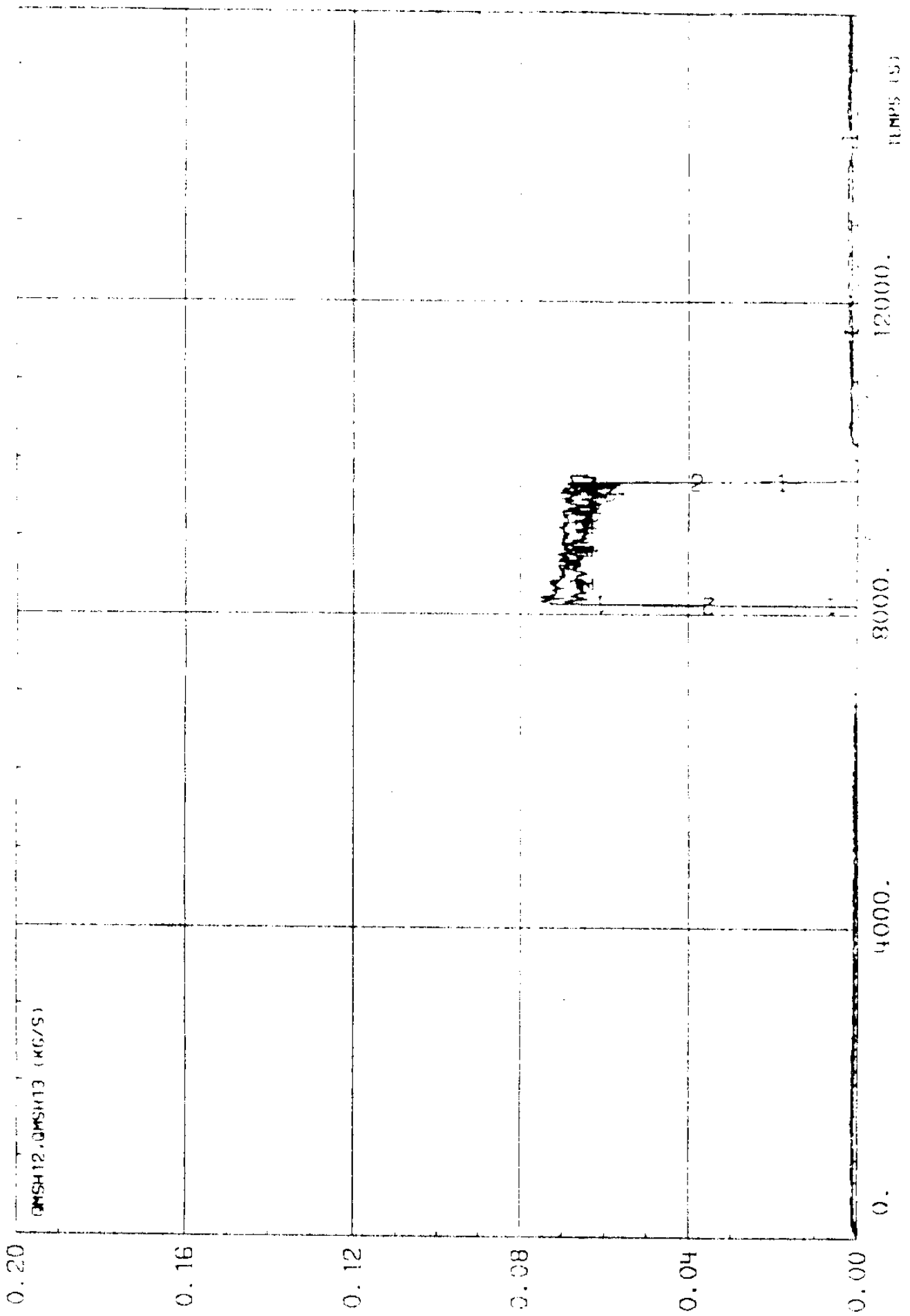


그림 11 단상자연대류 실험의 안전주입 질량유량

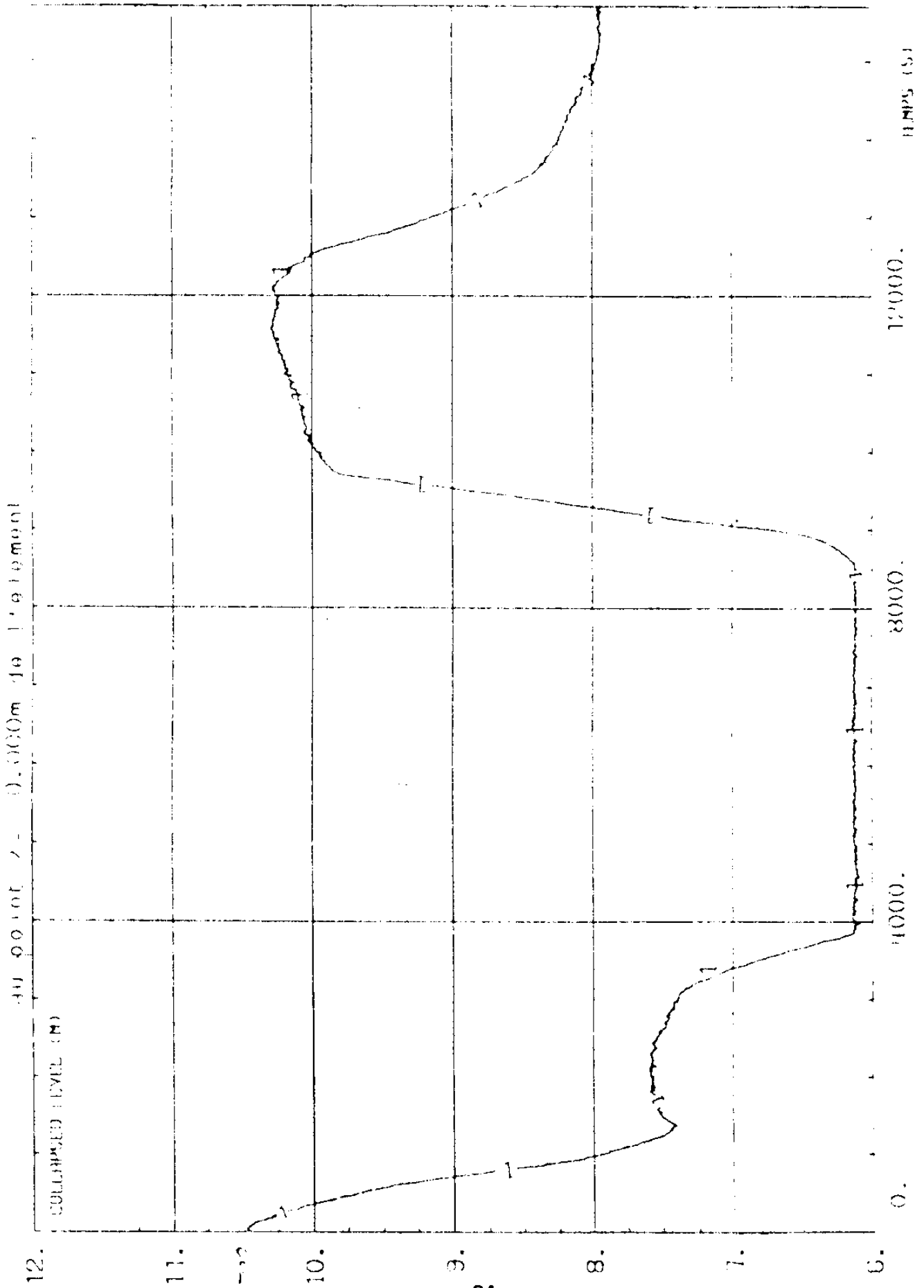


그림 12 단상자연대류 실험의 가압기의 Collapsed Level

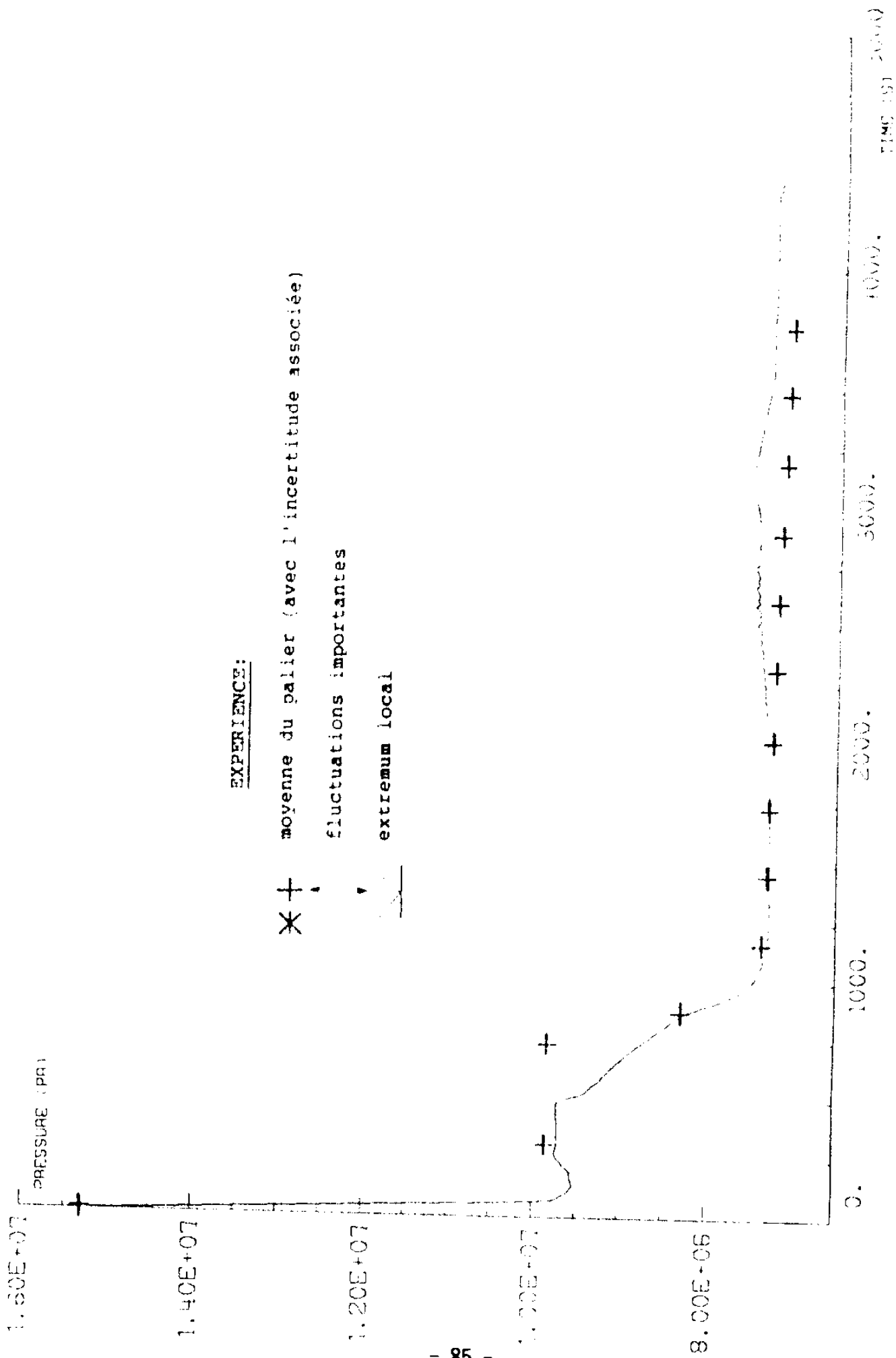


그림 13 이상자연대류 실험의 Upper Plenum과 저온관1에서의 압력변화

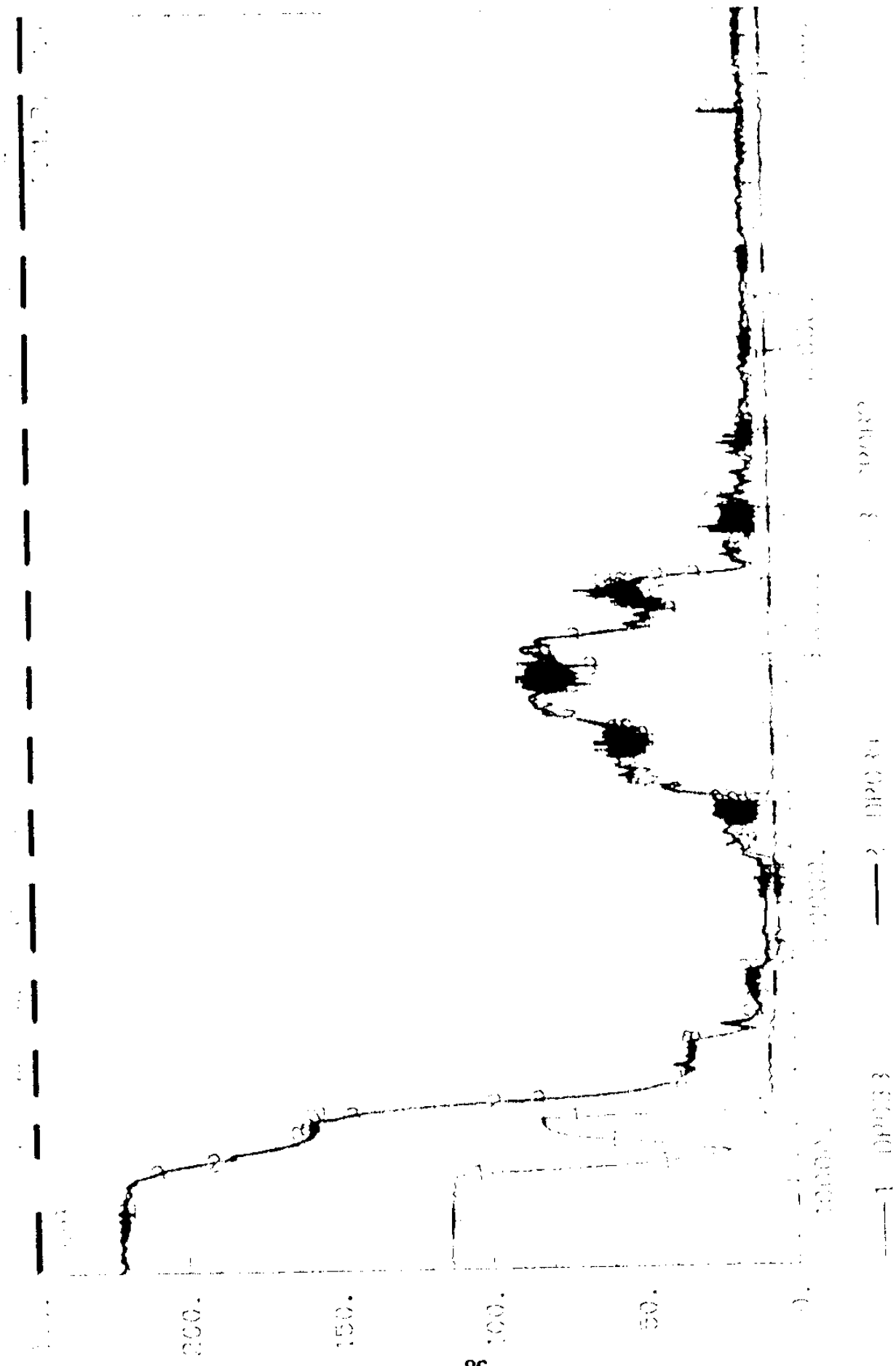


그림 14 이상자연데류 실험의 노심입구 출구의 온도

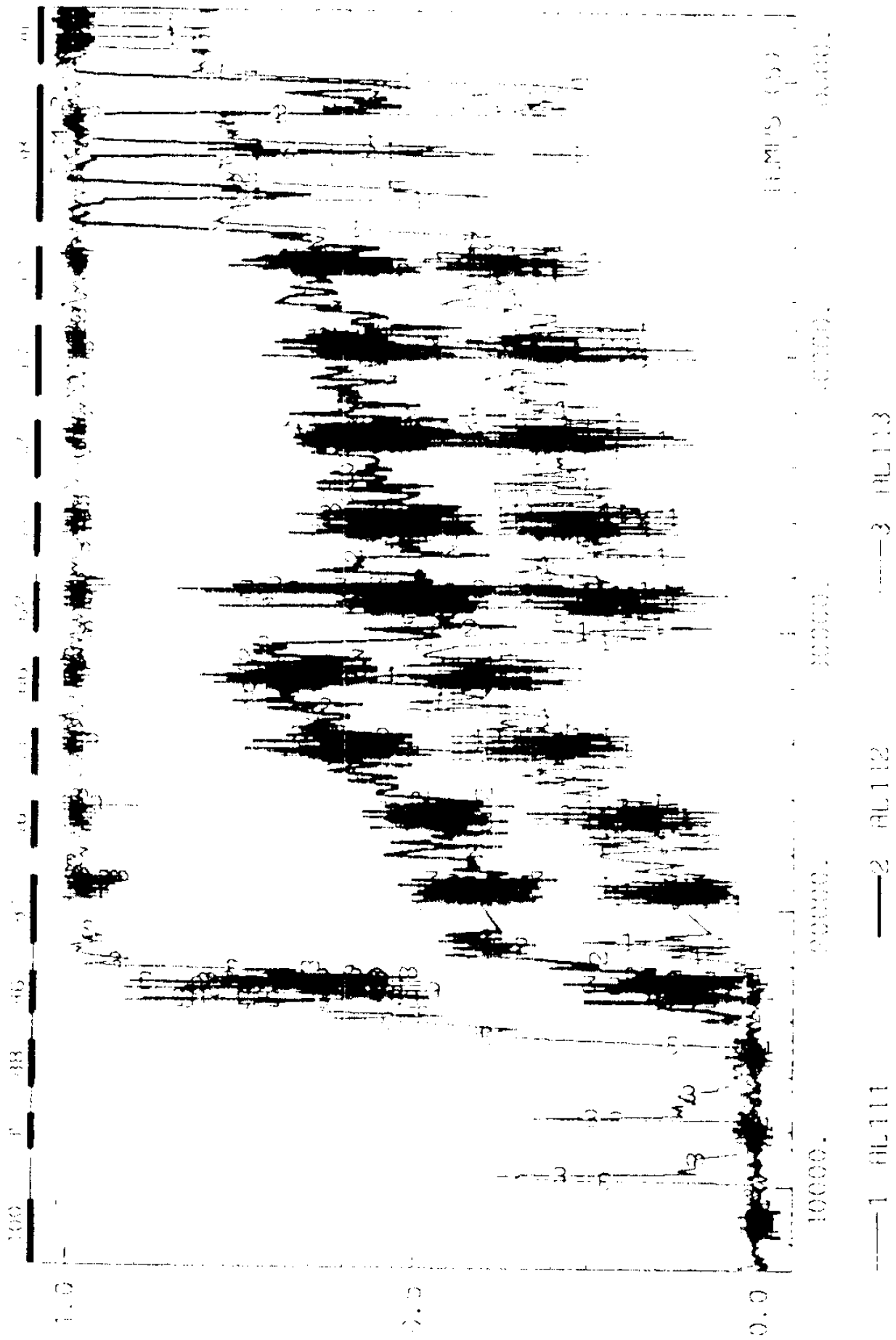


그림 15 이상자연대류 실험의 고온관1에서의 Void Fraction

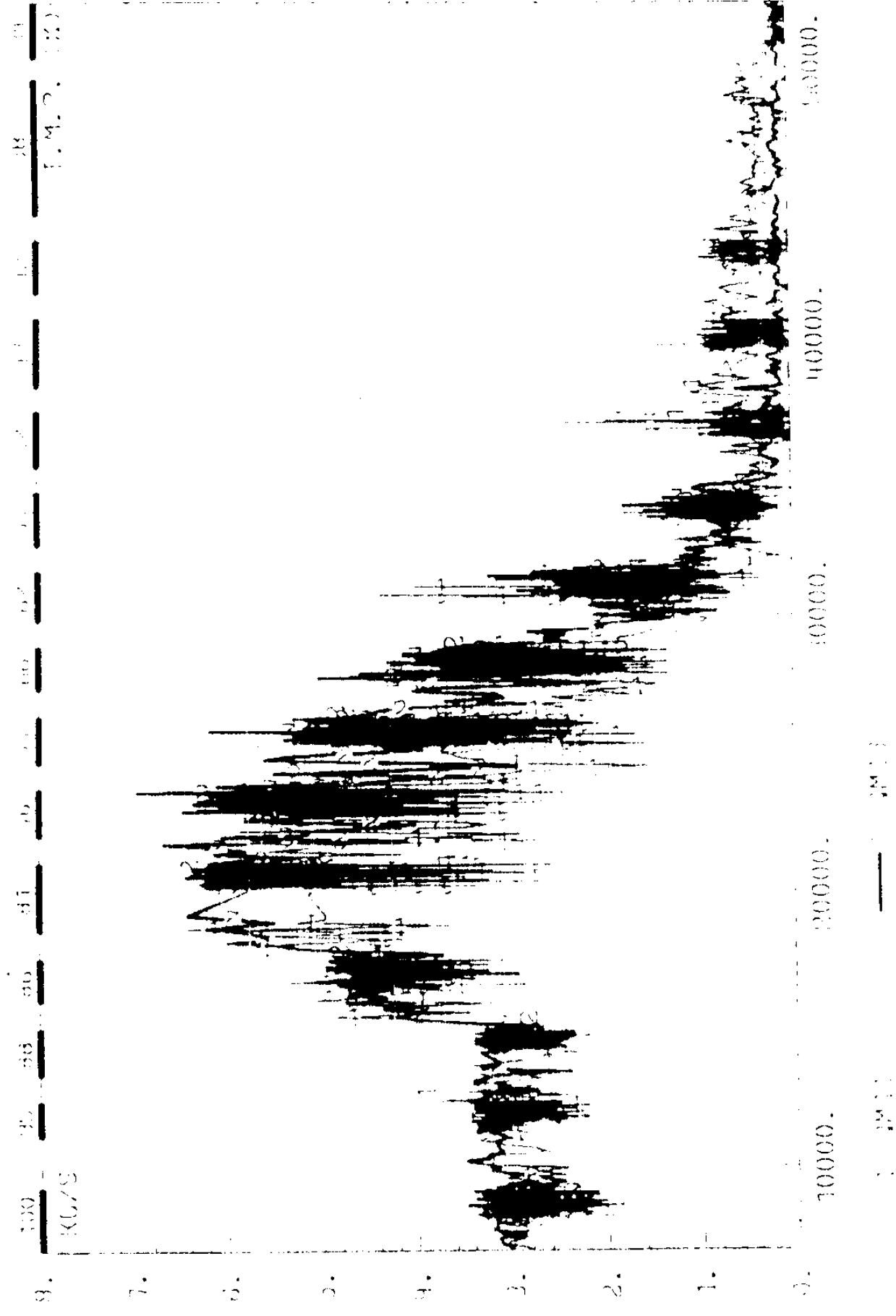


그림 16 이상자연대류 실험의 고온관 및 저온관에서의 질량유량

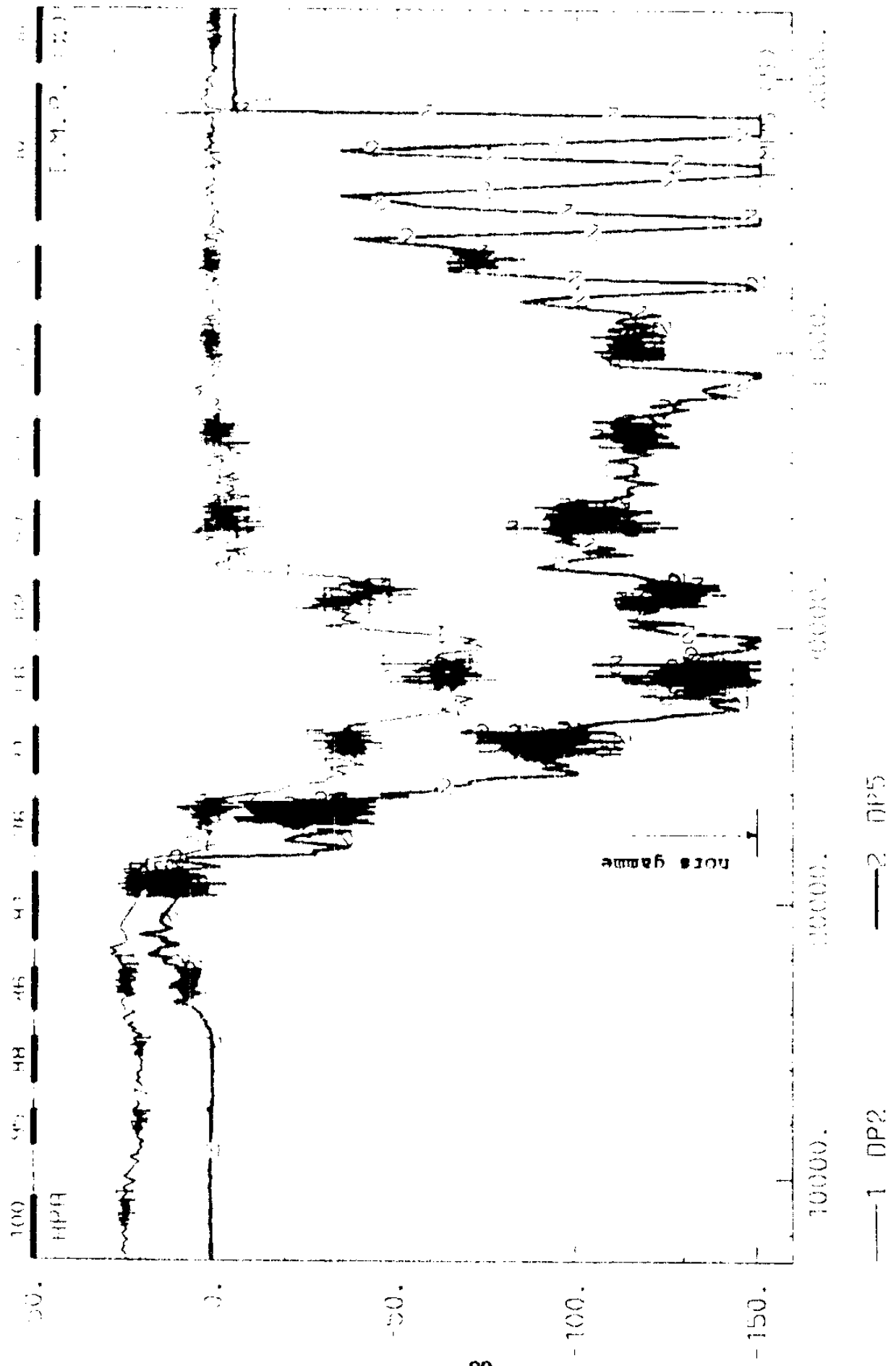


그림 17 이상자연대류 실험의 Loop2의 SC Plena 사이의 압력차이

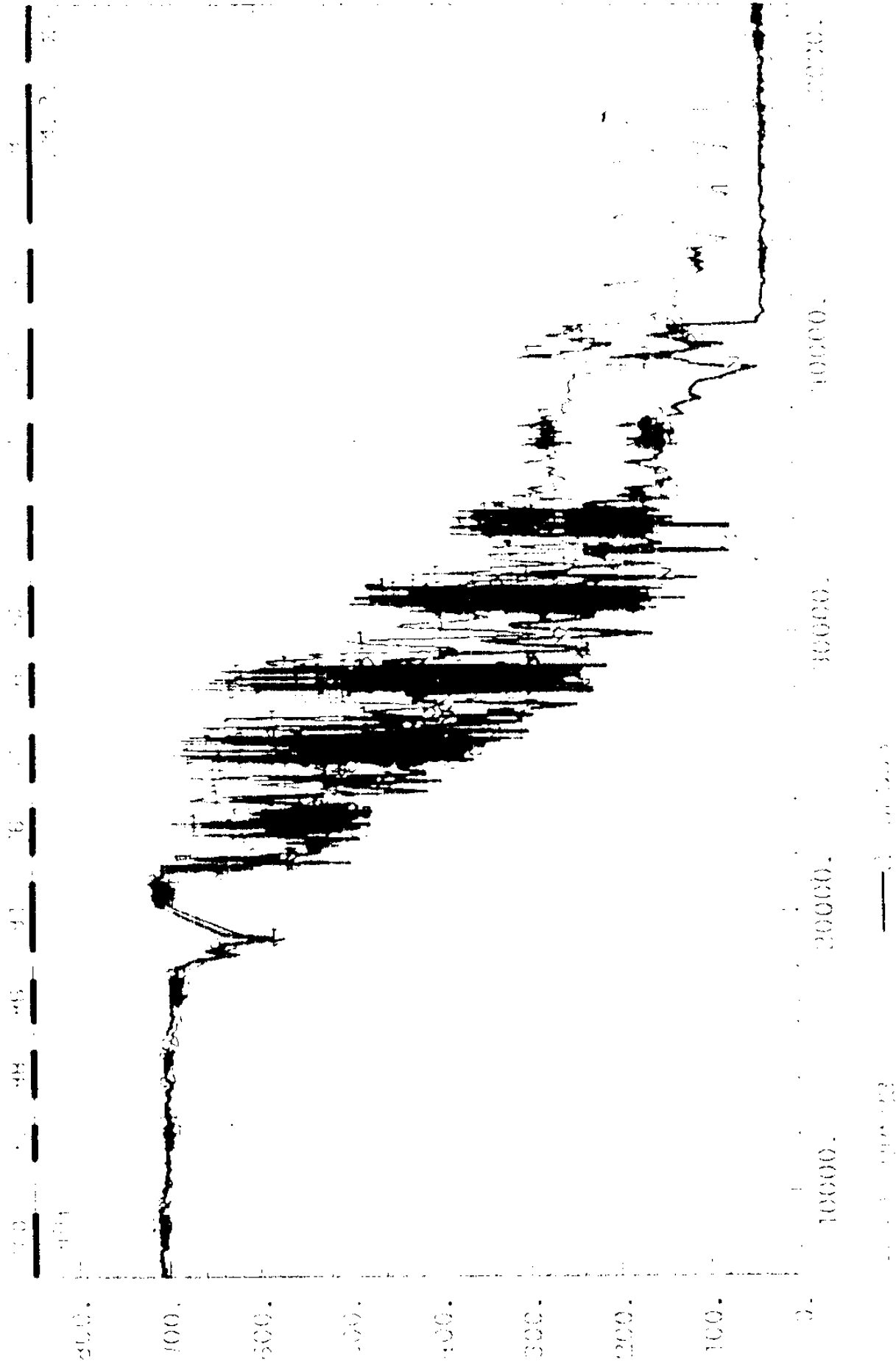


그림 18 이상자연대류 실험의 Loop2의 진열관 Upflow와 Downflow의 압력차이

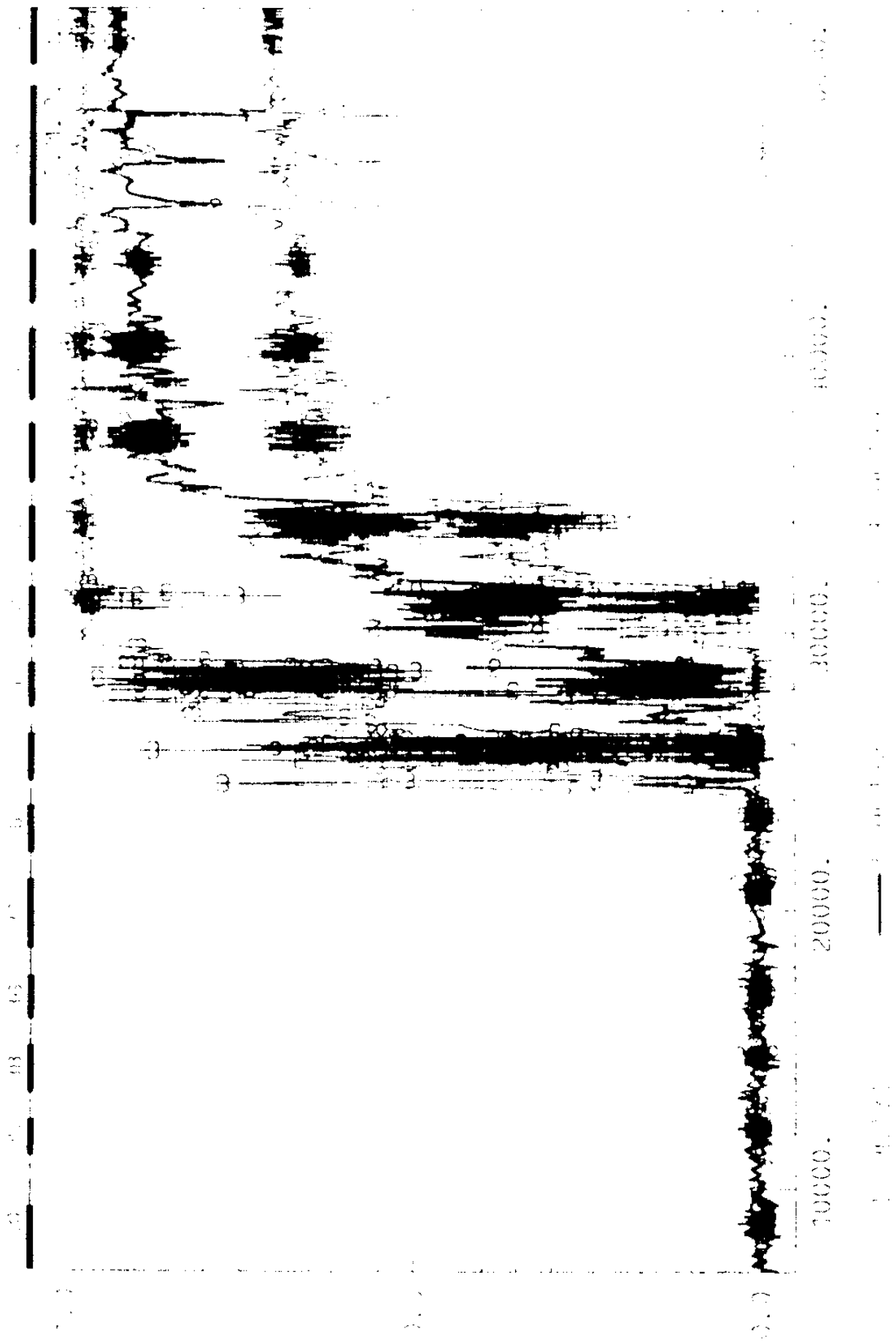


그림 19 이상자연대류 실험의 저온관1에서의 Void Fraction

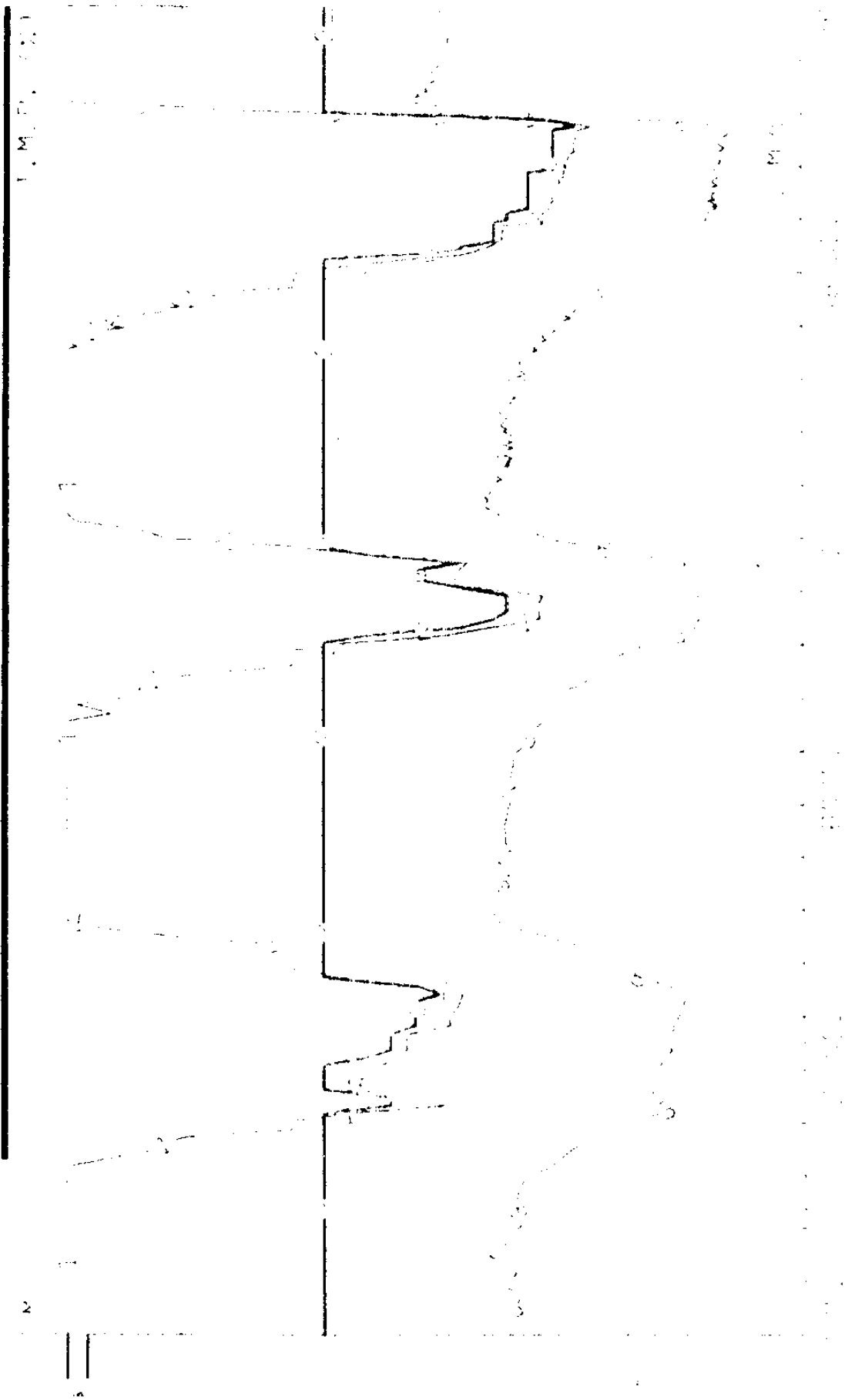


그림 20 이상자연대류 시험의 노심에서 Two Phase Level과 Collapsed Level

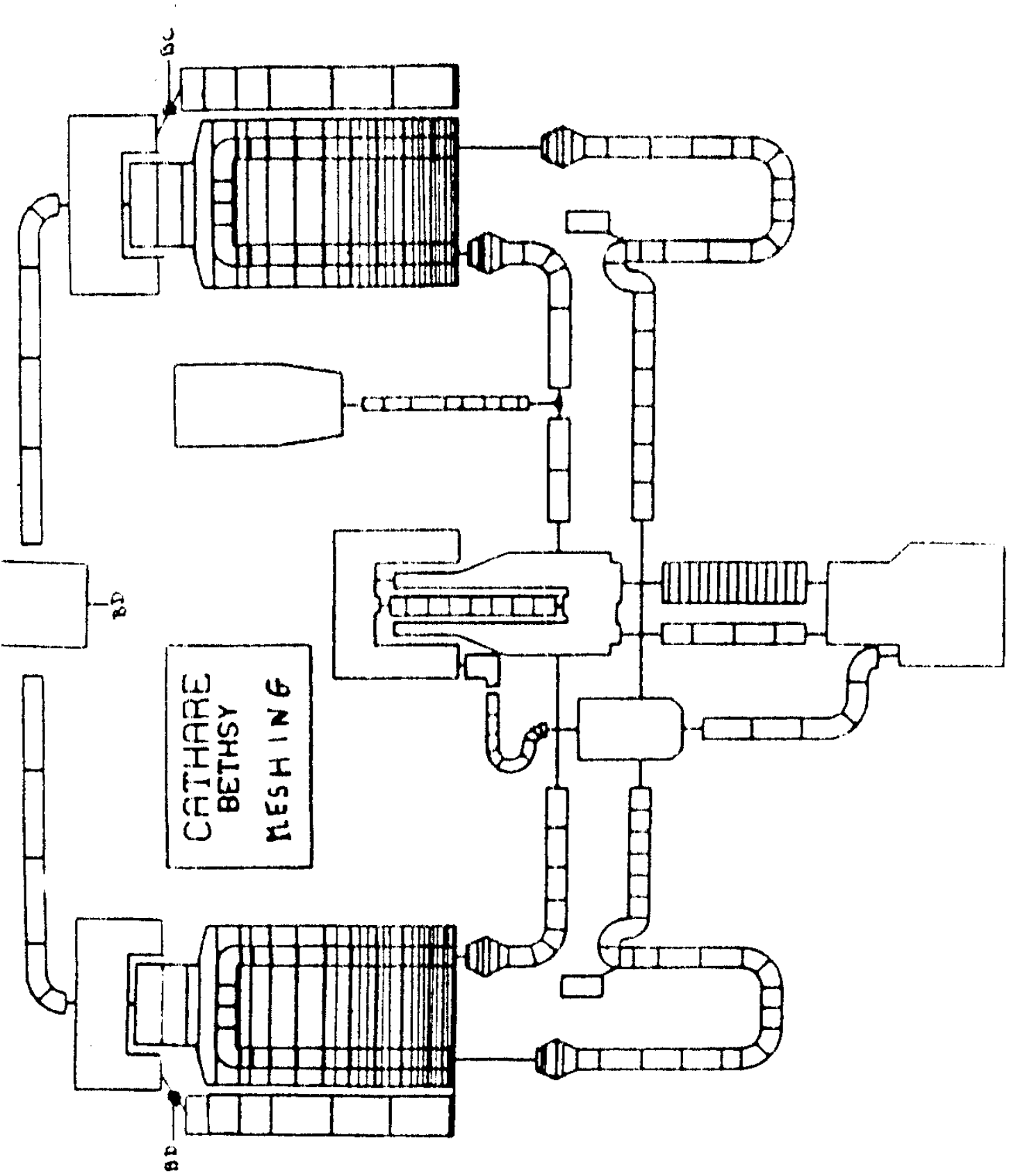
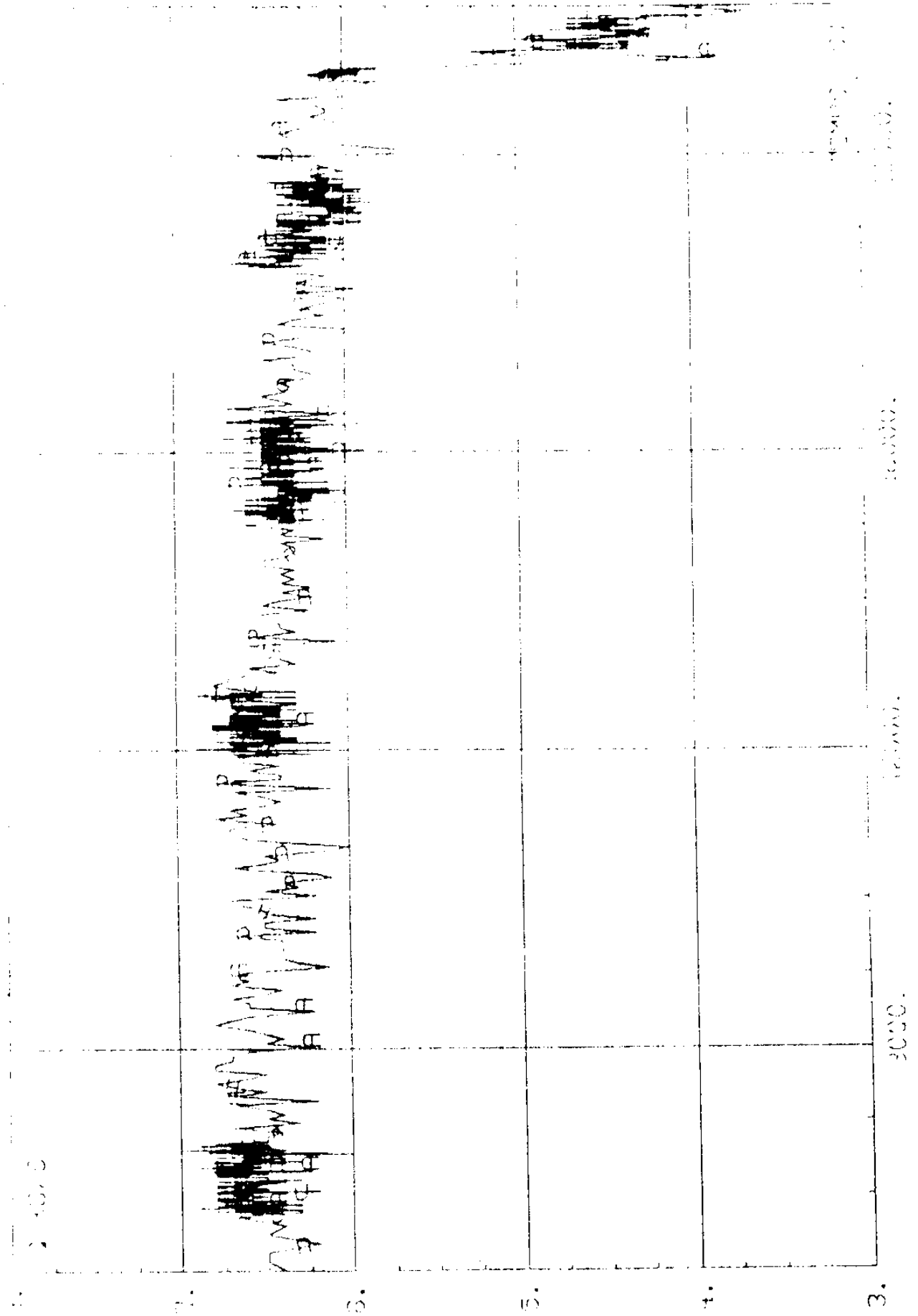
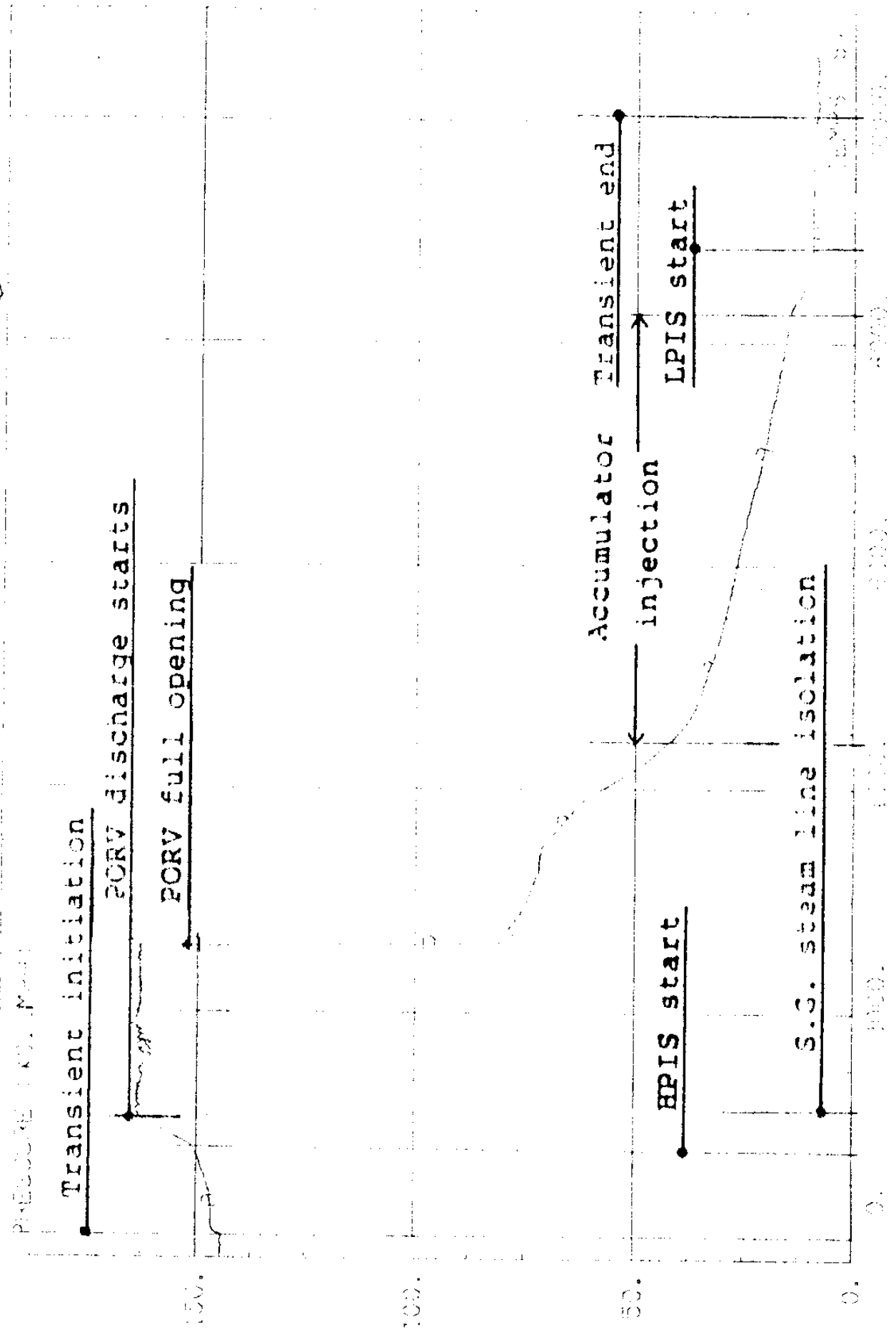


그림 21 증기발생기 제고량 변화를 모의하기위한 CATHARE Nodalization



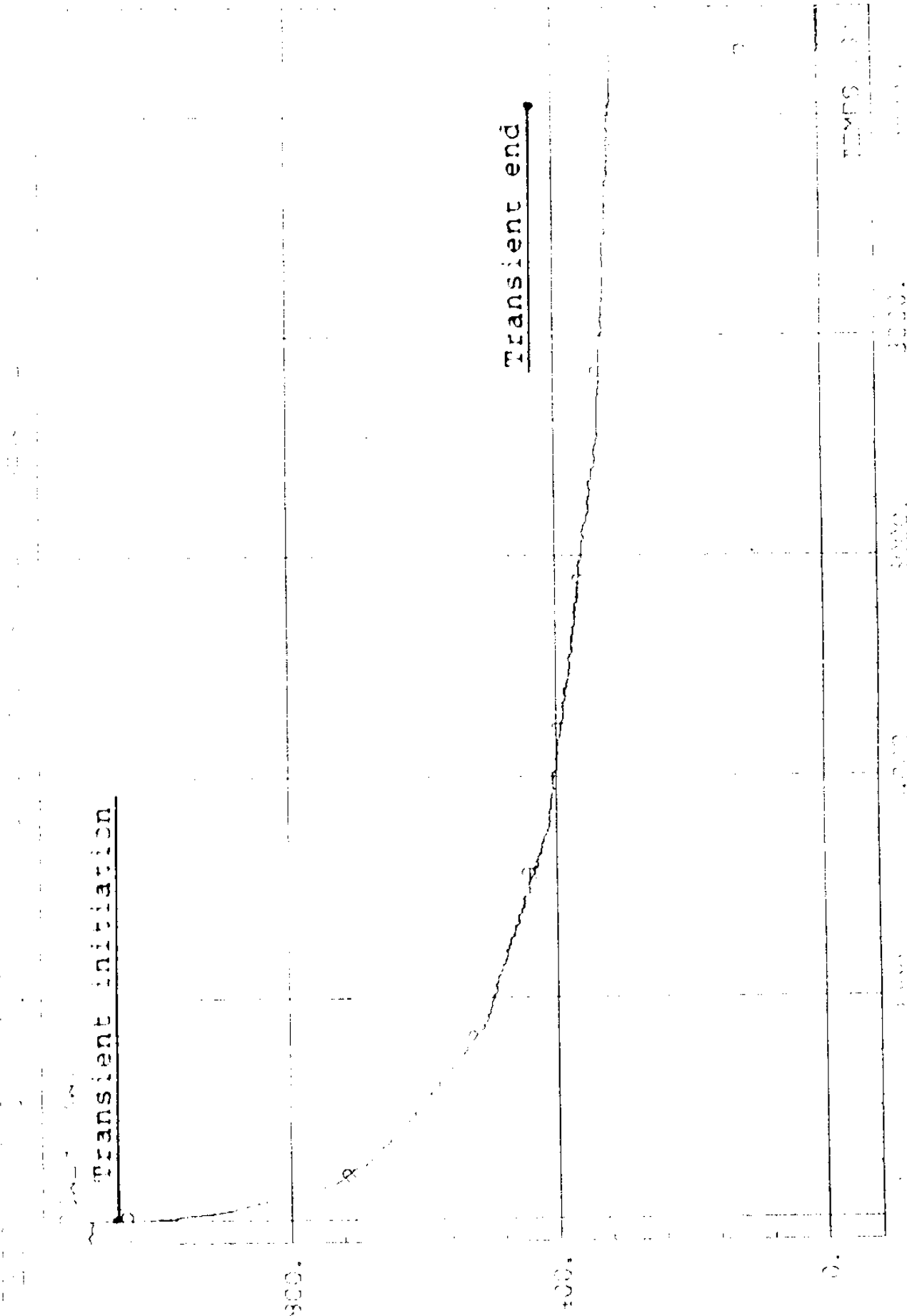


EXP : 2-P

그림 23 급수완전 상실사고의 1차측 냉각수 압력

TRANSIENT INITIATION

TRANSIENT END



EXP : H+02

그림 24 금수완전 상실사고의 노심출력

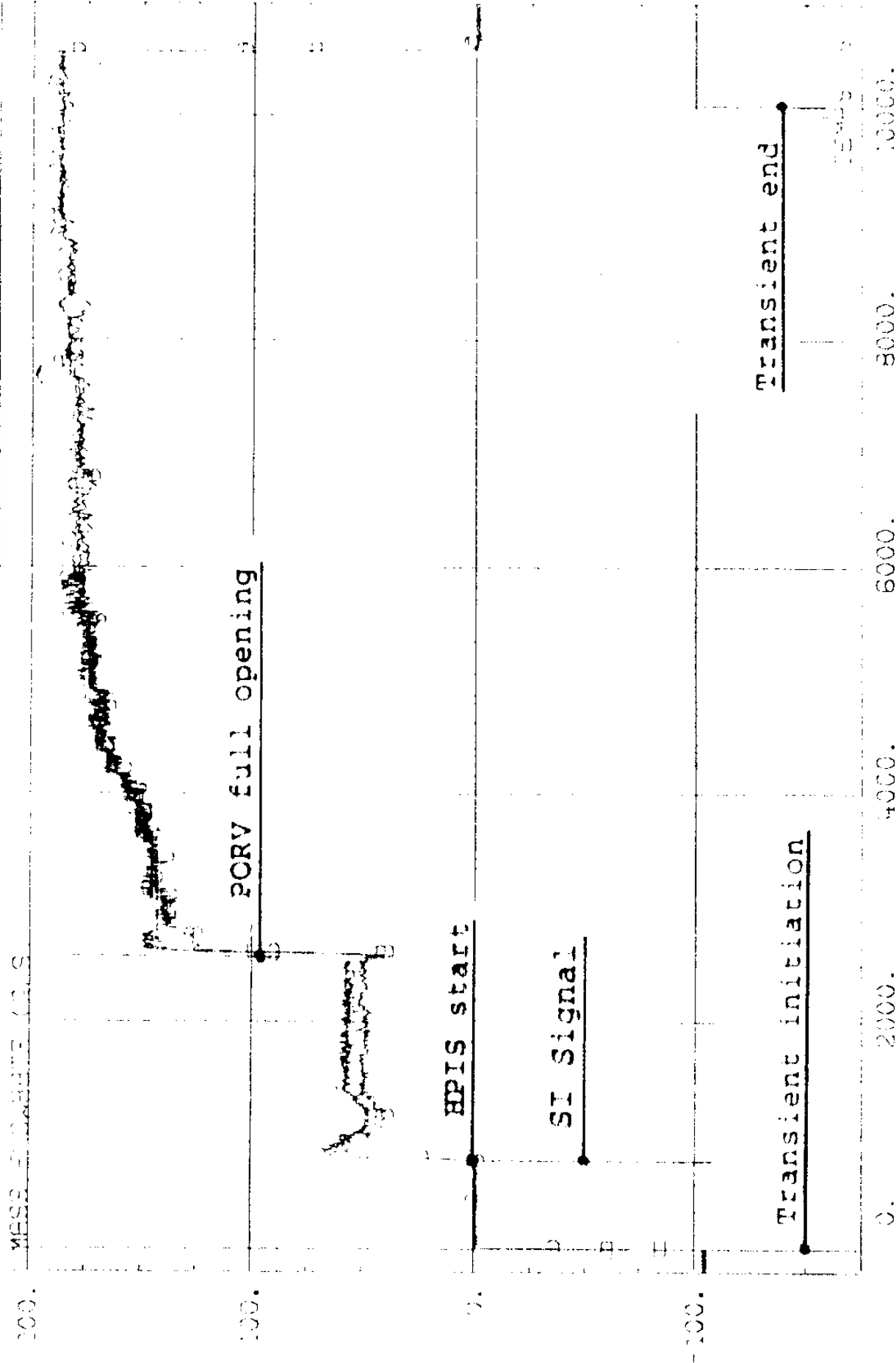
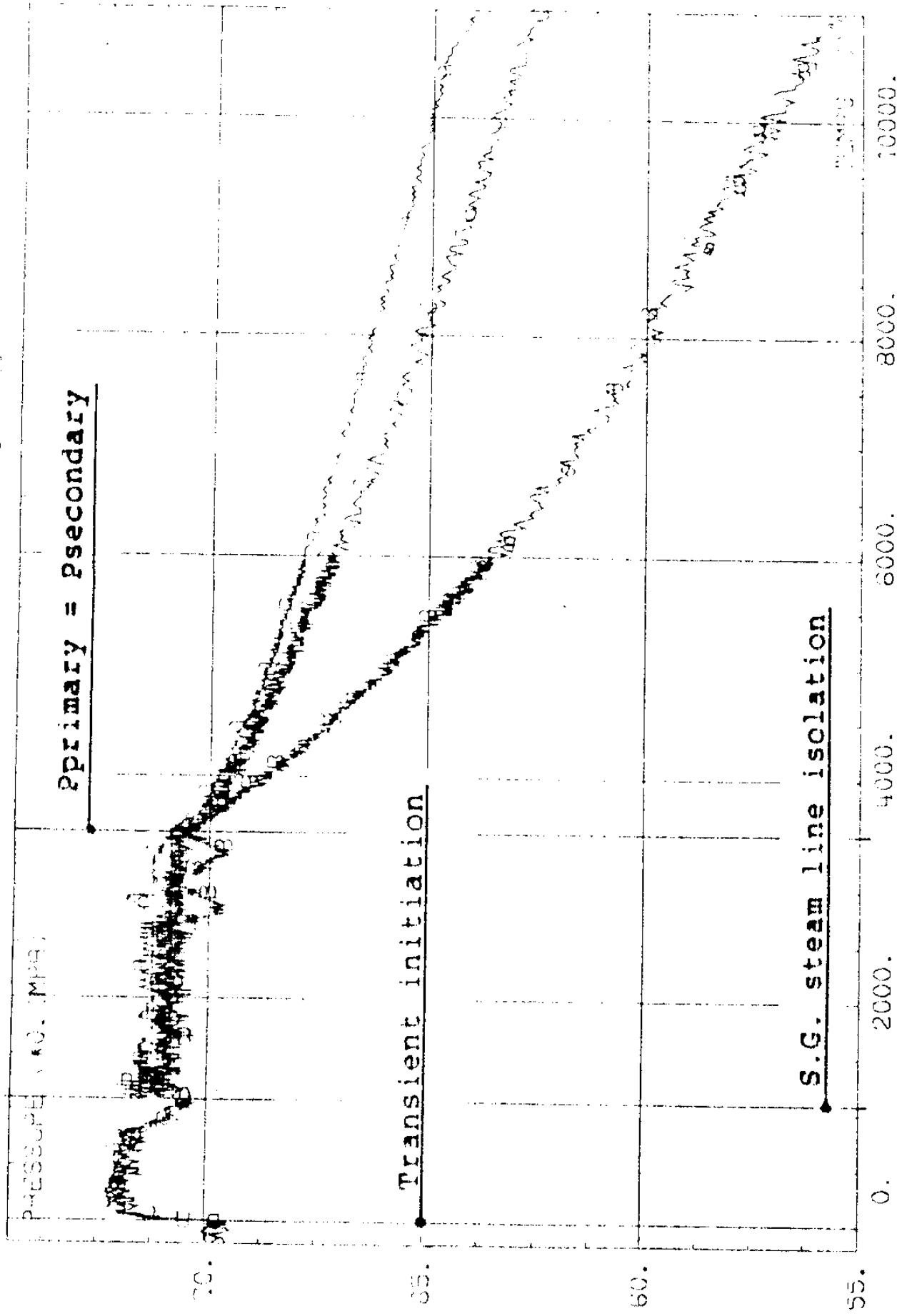


그림 25 급수완전 상실사고의 HPSI 유량



— P+47 — P+67 EXP : P+67

그림 27 급수완전 상실사고의 증기발생기 압력

FIGURE 28. COLLAPSED LEVEL (METER) VS. TIME (SECONDS) FOR EXPERIMENT 28

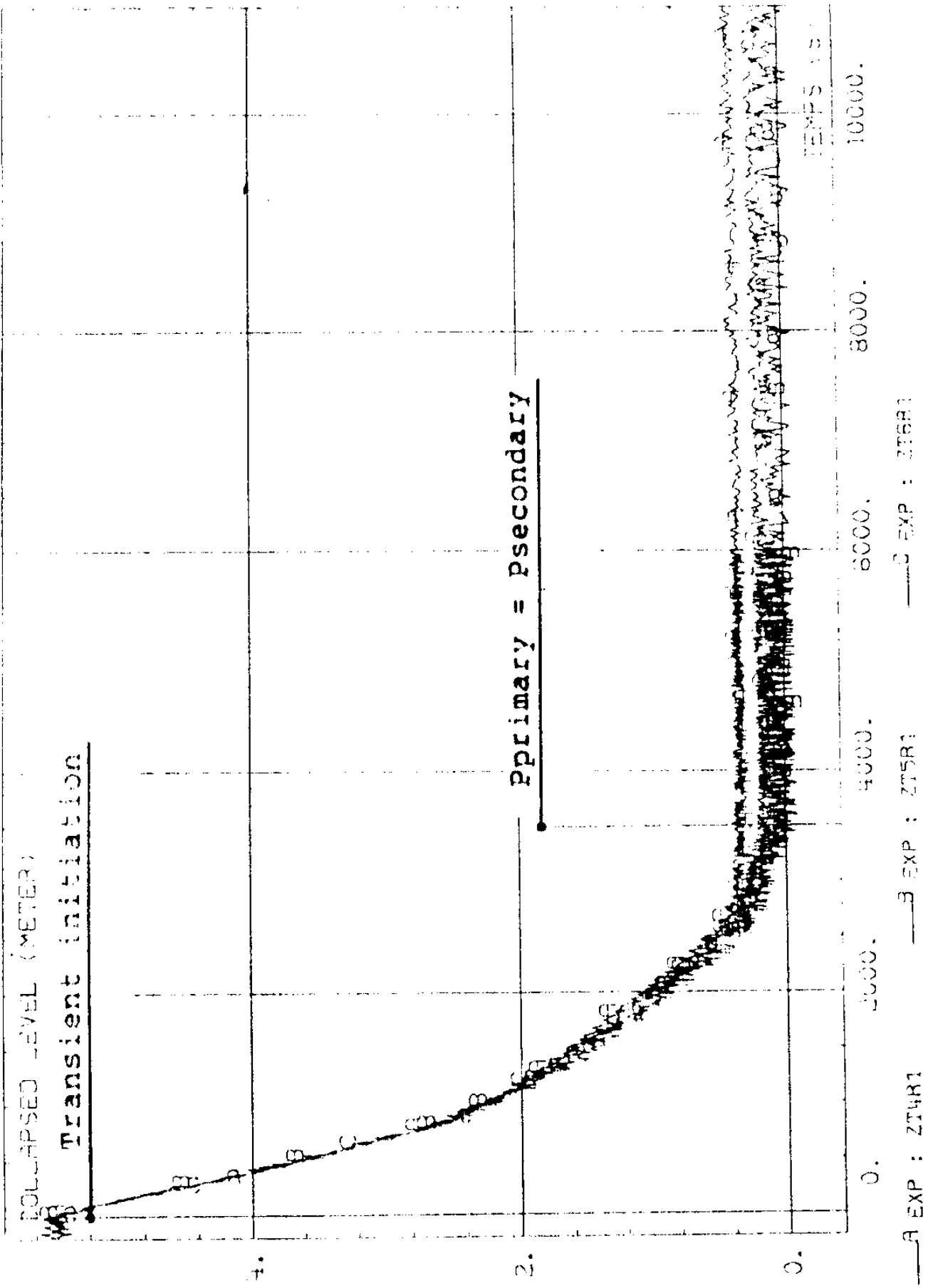
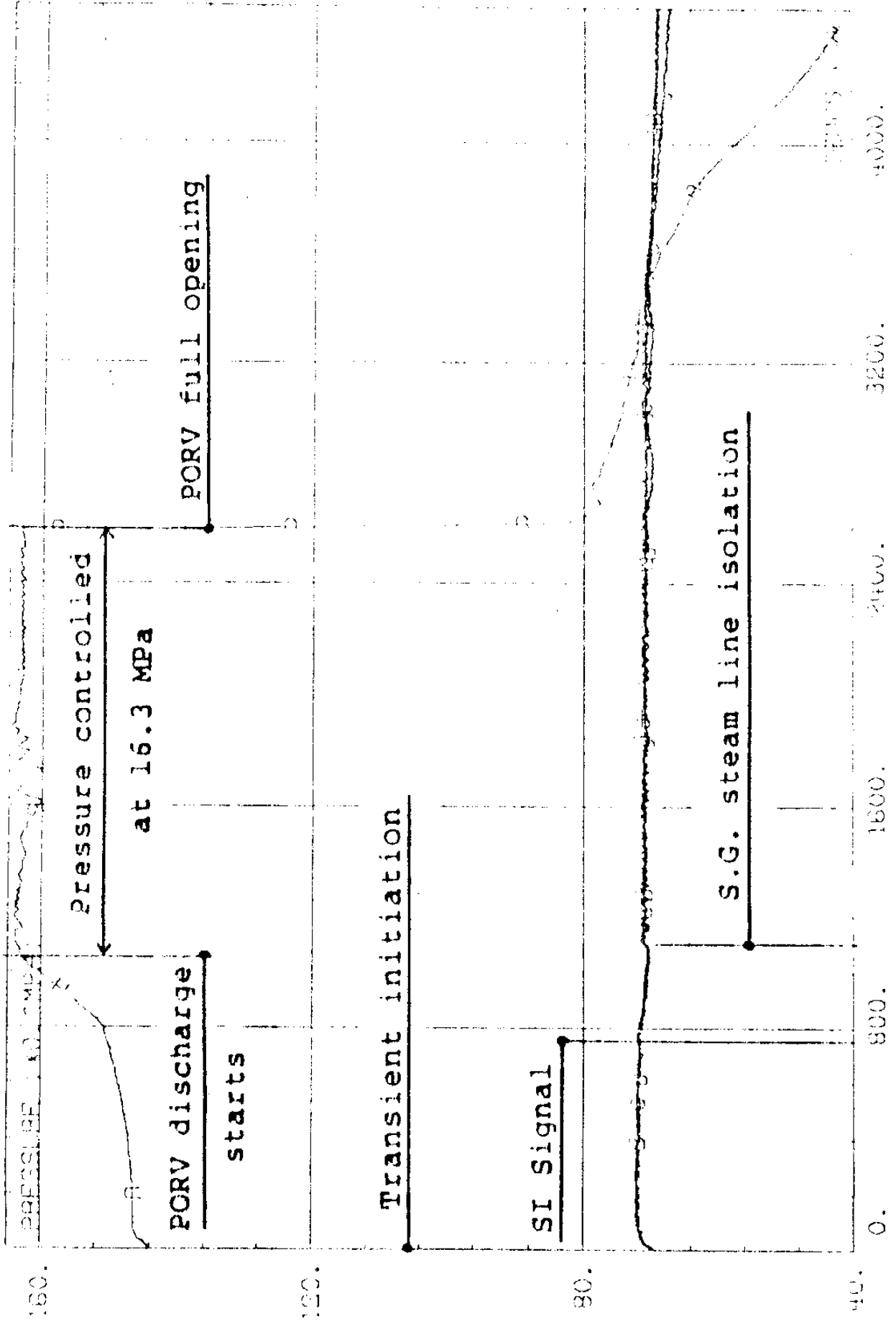


그림 28 급수완전 상실사고의 증기발생기 Collapsed Level

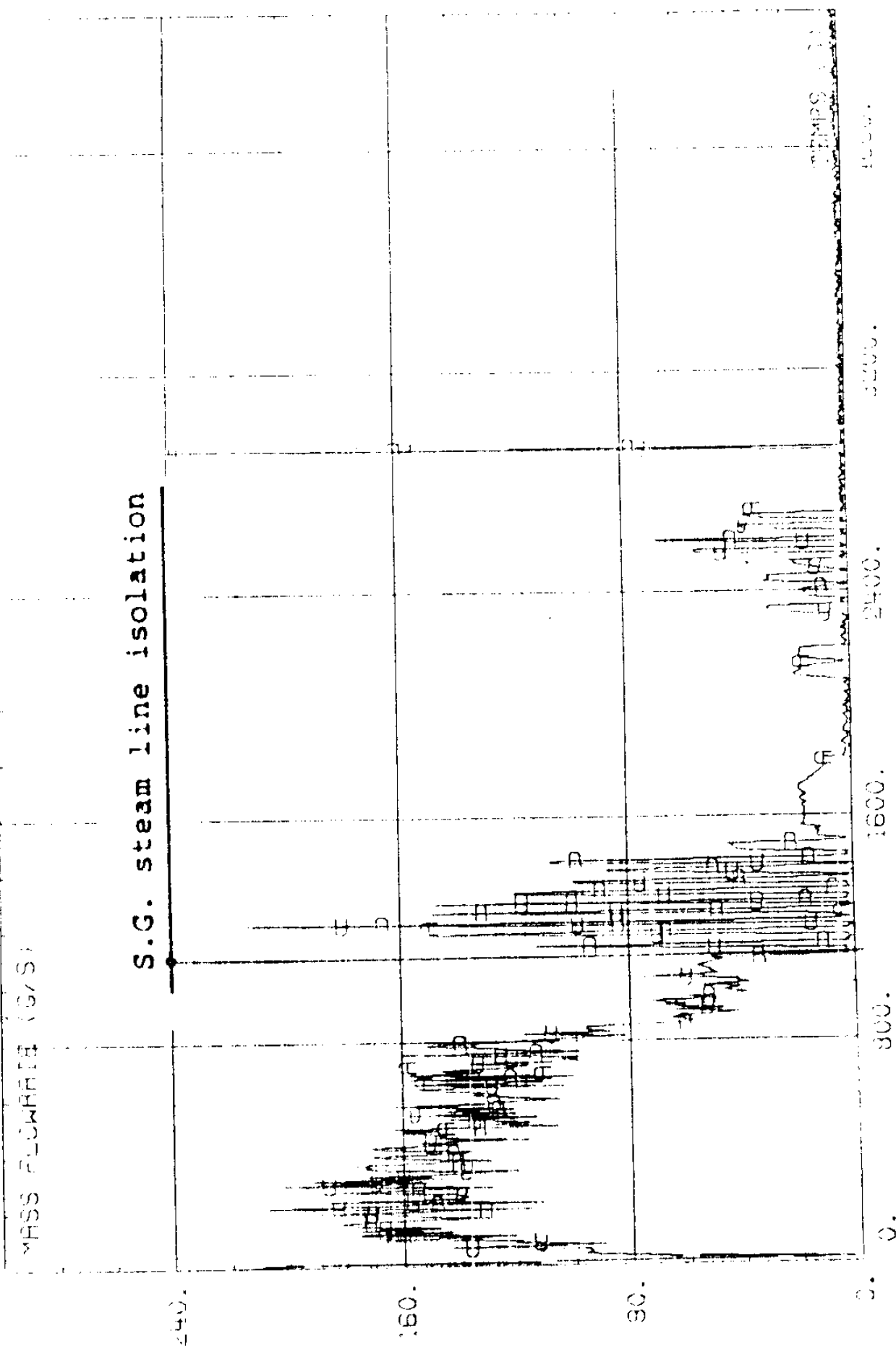
1200 0.5 0.1 0.05 0.02 0.01 0.005 0.002 0.001 0.0005 0.0002 0.0001



EXP : P-P EXP : P-P EXP : P-P EXP : P-P EXP : P-P EXP : P-P EXP : P-P EXP : P-P EXP : P-P EXP : P-P

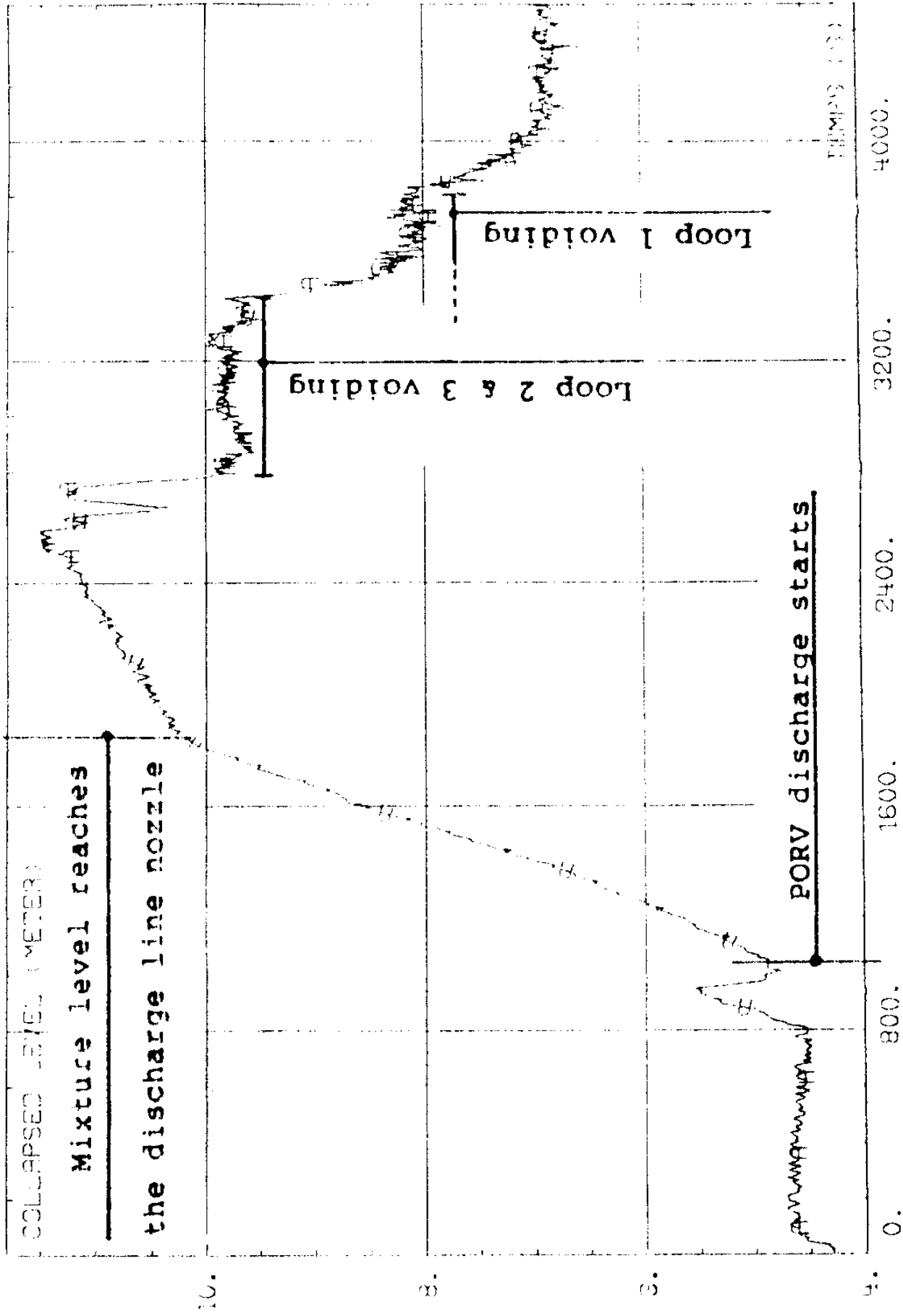
그림 29 급수완전 상실사고의 1차측 압력 변화

REACTOR SYSTEM ANALYSIS REPORT



EXP : JMCV11

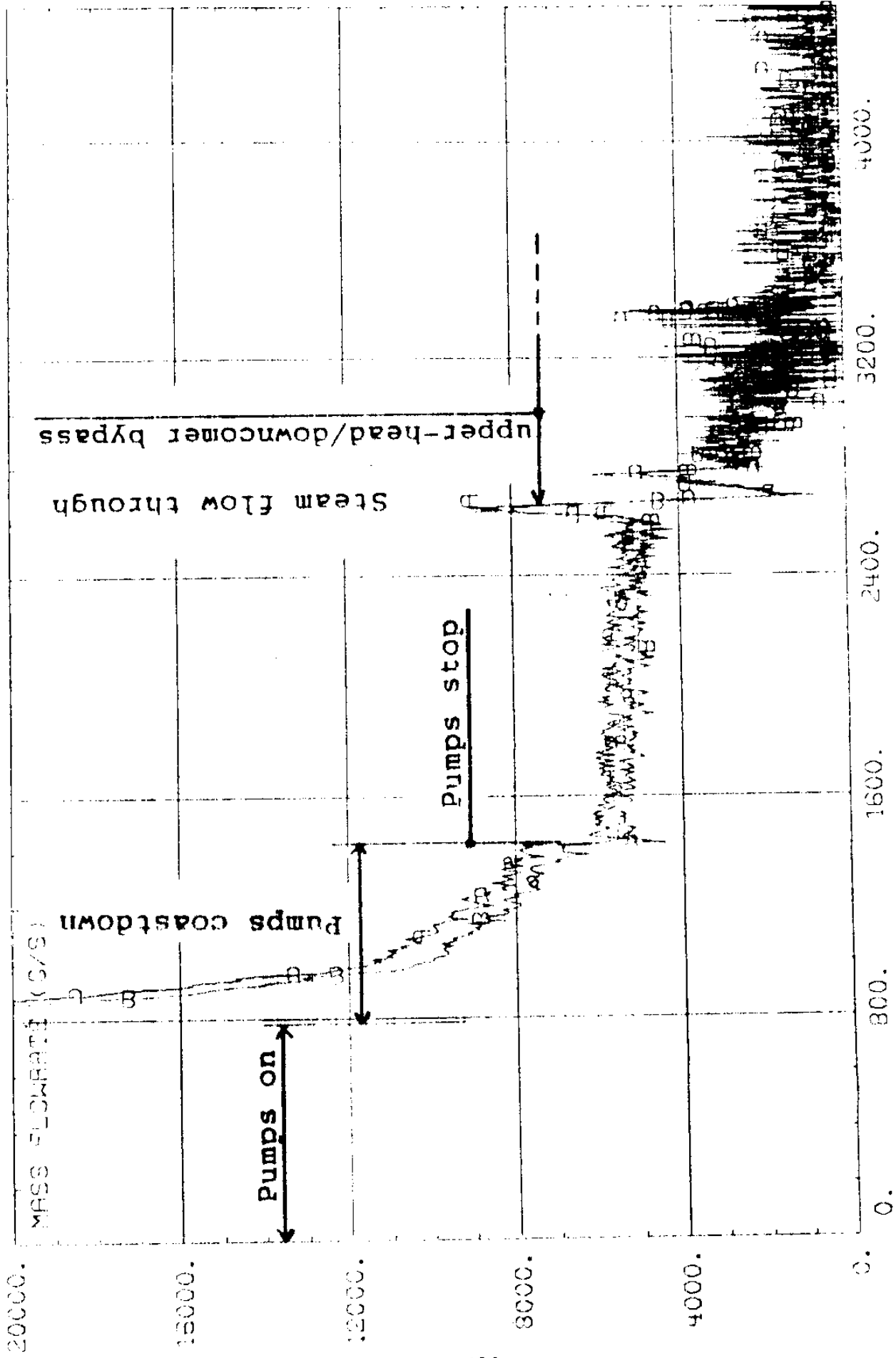
그림 30 급수완전 상실사고의 증기발생기 증기유량



EXP : 1071

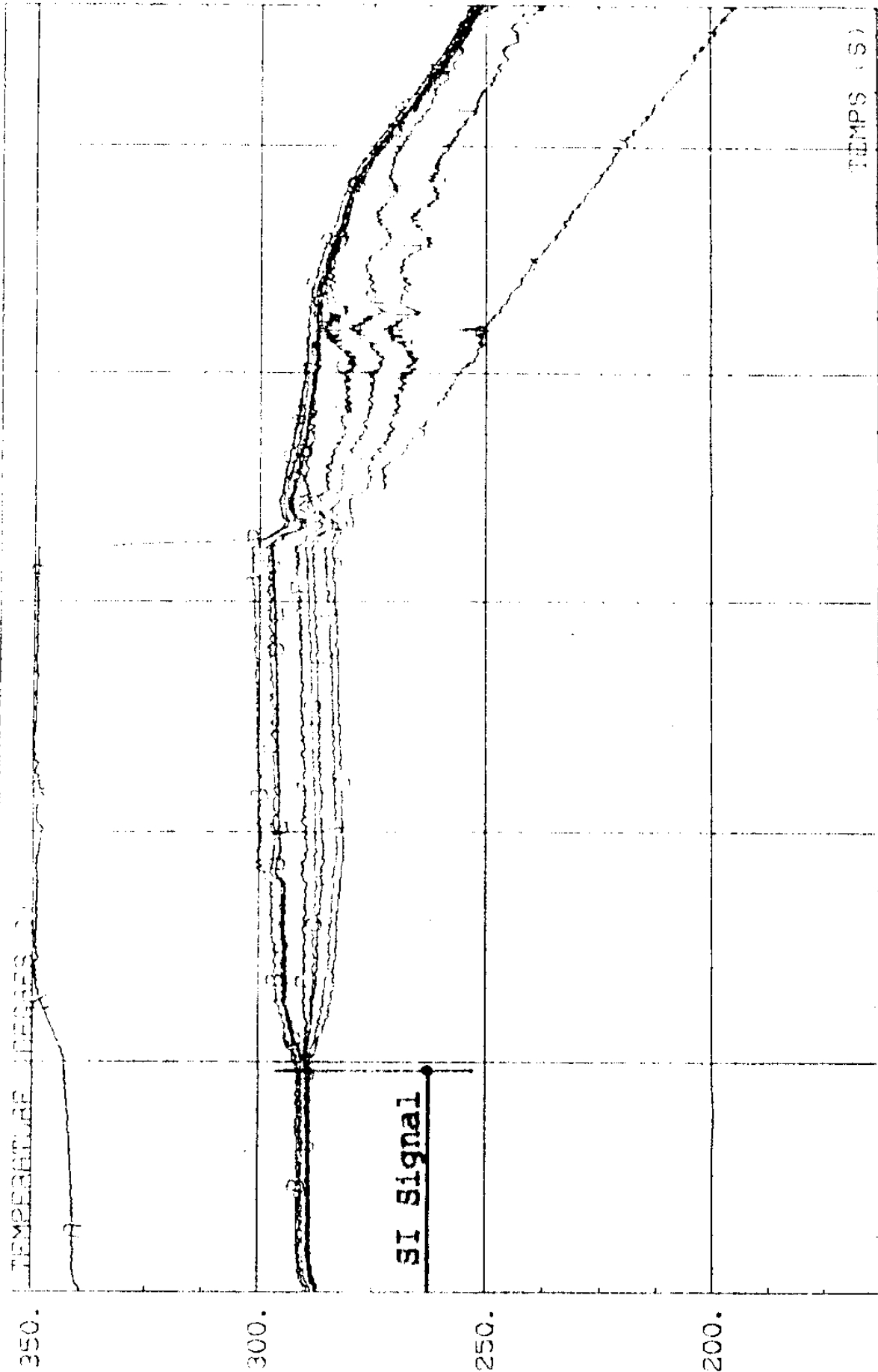
그림 31 급수완전 상실사고의 가압기 수위 변화

TEST 5.2.3.1.2.3 - 1000 OF FEEDWATER PUMP IN



—A EXP : 2M05N —B EXP : 2M05B

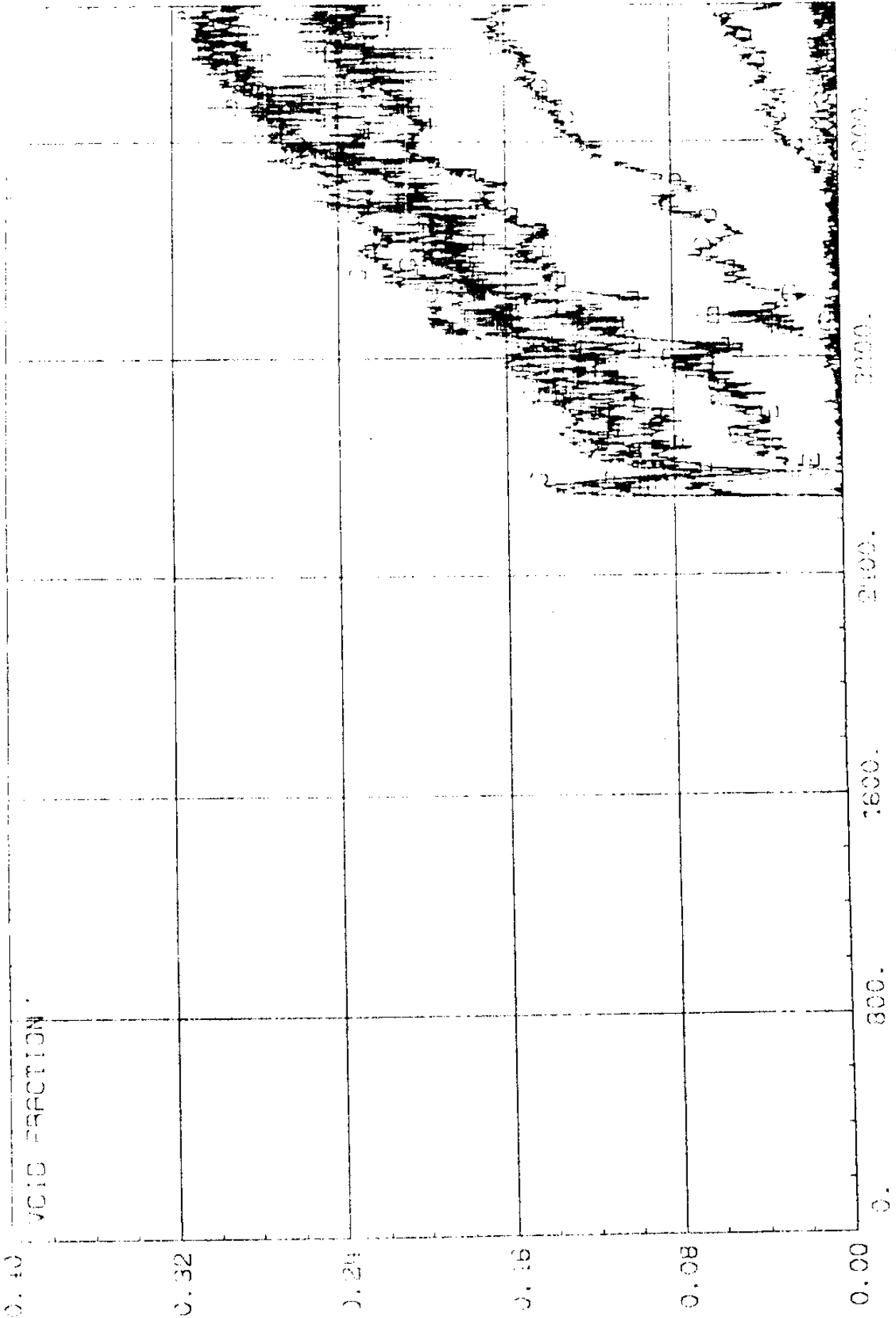
그림 32 급수완진 상실사고의 Downcomer 유량



- A EXP : TFSP+02 —B EXP : TF0304 —C EXP : TF0215B —D EXP : TF0213B
- E EXP : TF0211C —F EXP : TF0209A —G EXP : TF0207B —H EXP : TF0205C
- I EXP : TF0203A —J EXP : TF012A

그림 33 금수완전 상실사고의 노심에서 냉각재 온도 변화

TEST 5.2.0 : TOTAL LOSS OF RESUMBER NEW 42



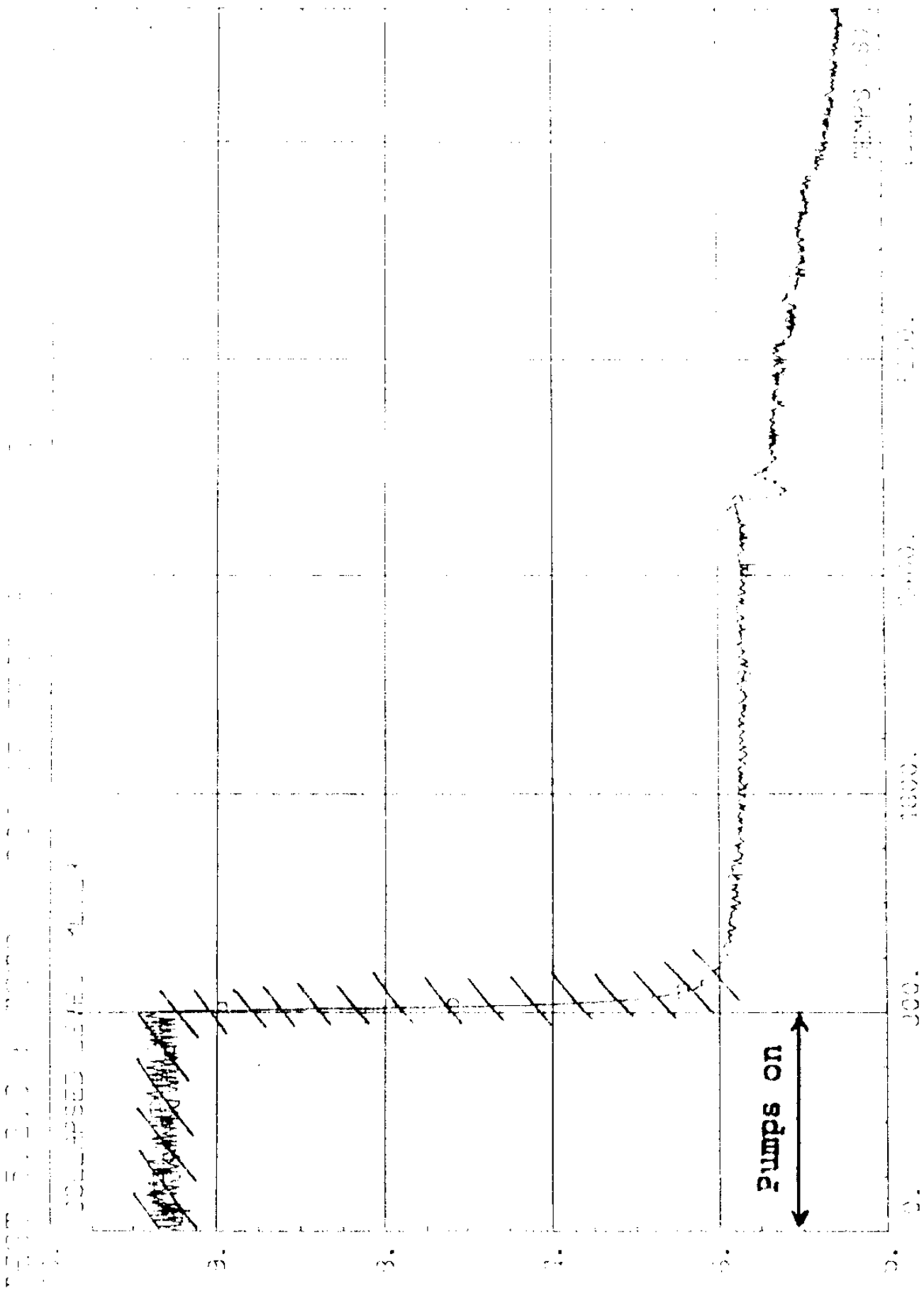
—A EXP : AL0201
 —E EXP : AL0209

—B EXP : AL0203
 —F EXP : AL0211

—G EXP : AL0213

—H EXP : AL0215

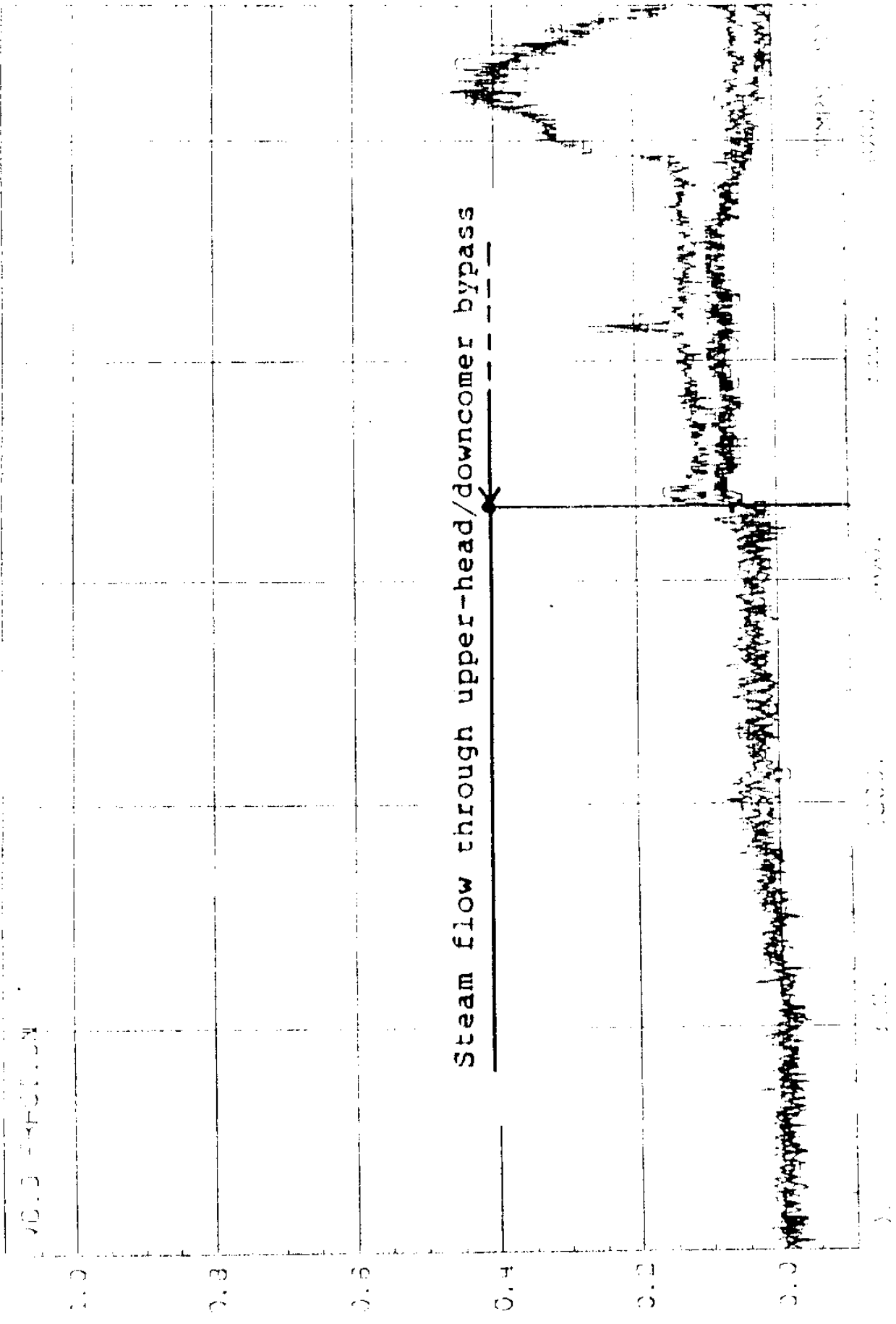
그림 34 급수완전 상설사고의 노심에서 기포율 분포도



EXP : ZT0200

그림 35 급수완전 상실사고의 노심의 Collapsed Level

Figure 36. Steam flow through upper-head/downcomer bypass



— MD.3 EXP. (TON) — MD.3 EXP. (TON)

그림 36 급수완전 상실사고의 저온관에서 기포율

TEST 3.2.0 : TOTAL LOSS OF FLOW (METER) VIEW - 2

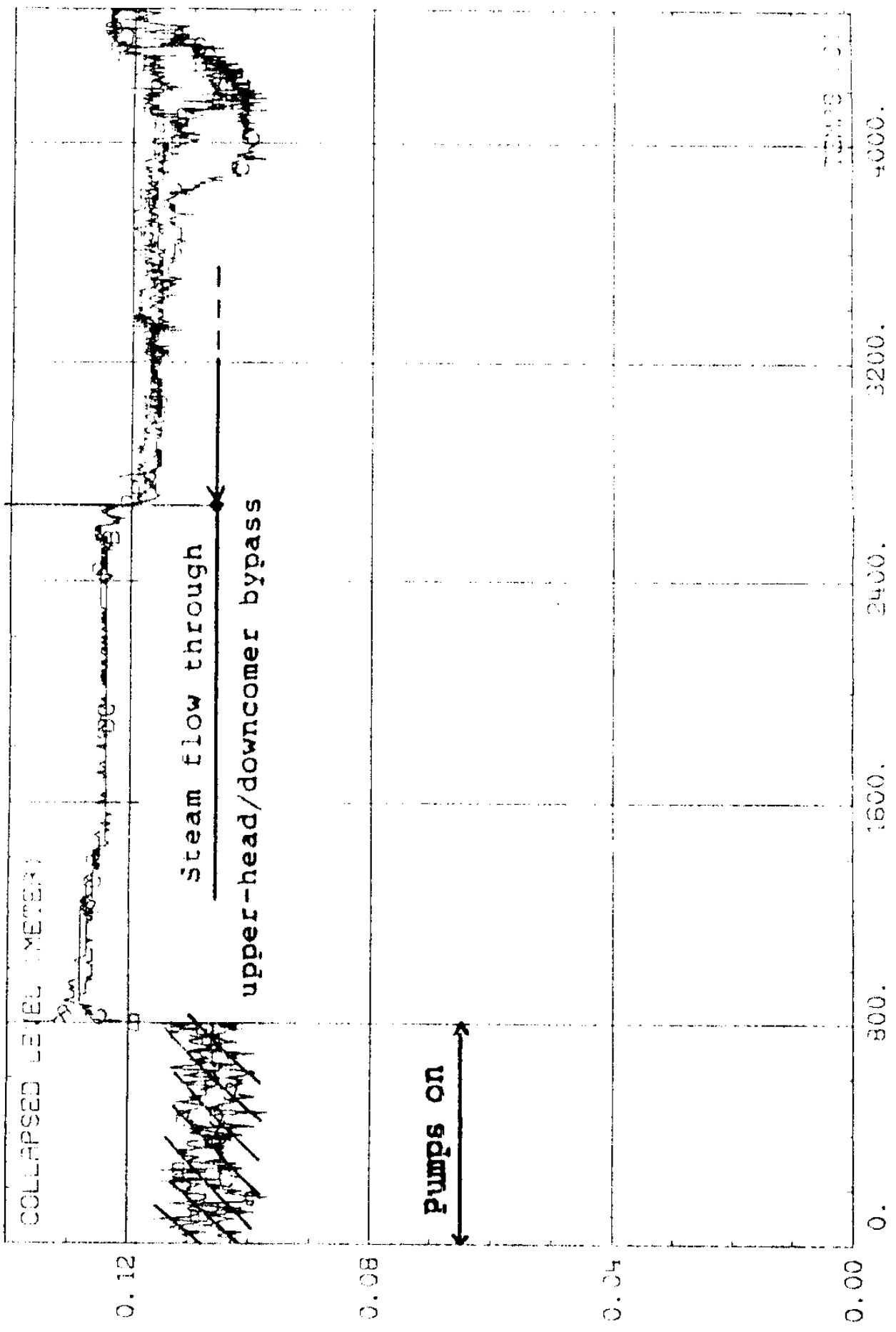
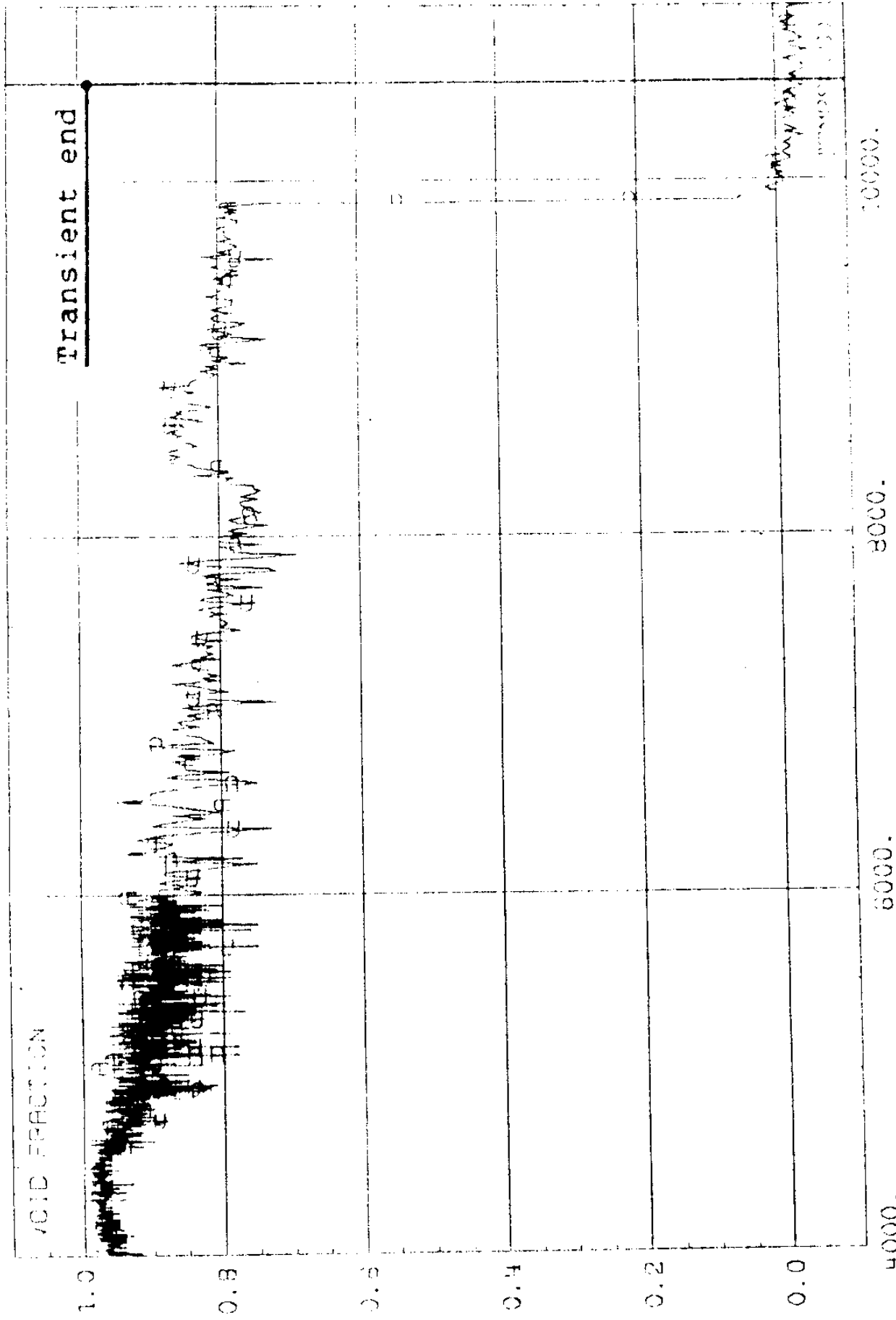


그림 37 급수완전 상실사고의 저온관에서 Collapsed Level

TEST 5.2.0 : TIME 000 BT RECORDING RUN 14



—R EXP : ALP

그림 38 급수완전 상실사고의 Relief Valve에서 기포율

MANCHETTE BRECHE BRECHE 6 POUCES

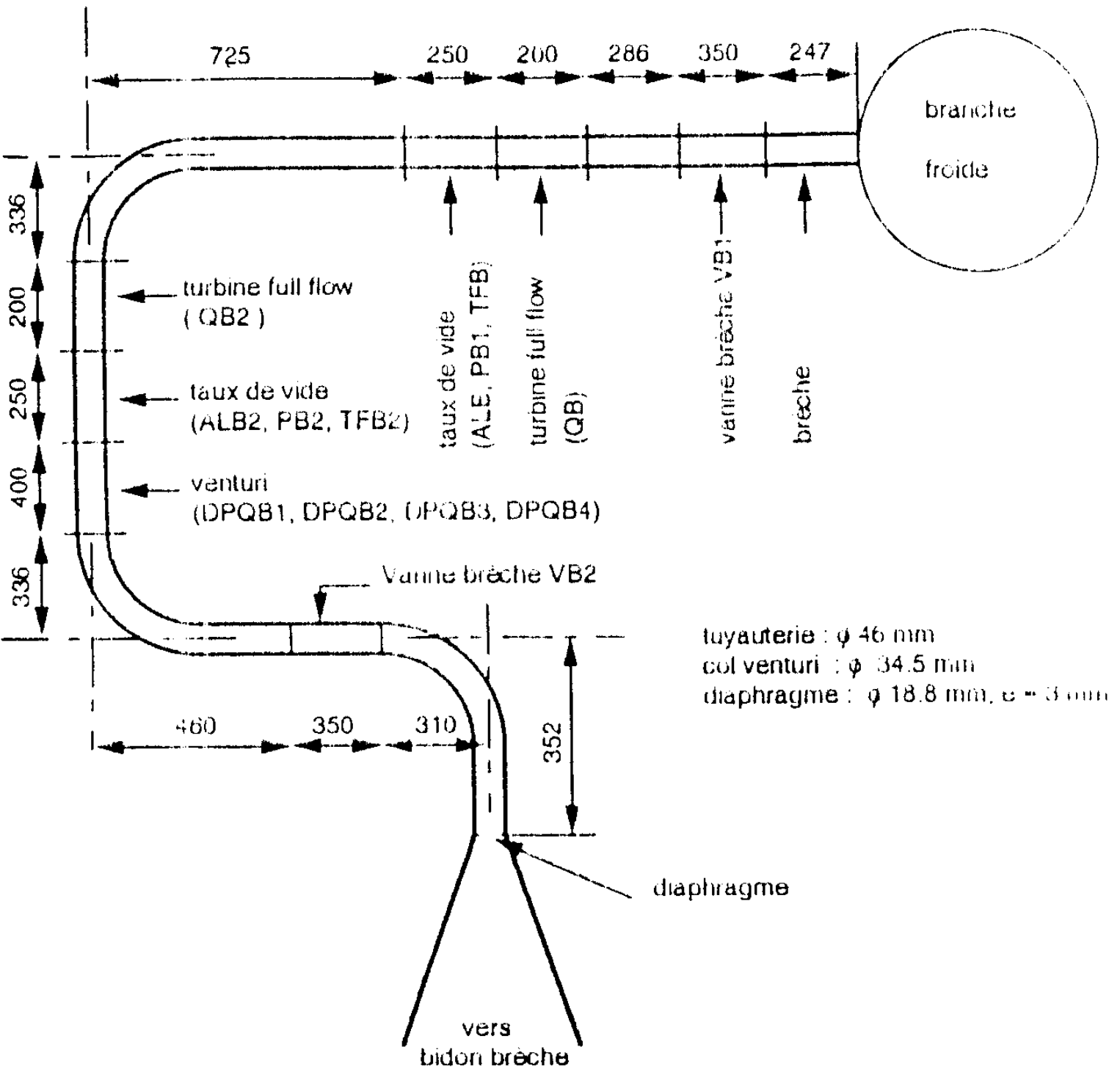


그림 39 6" 저온관 파손사고에 사용된 노즐 단면도

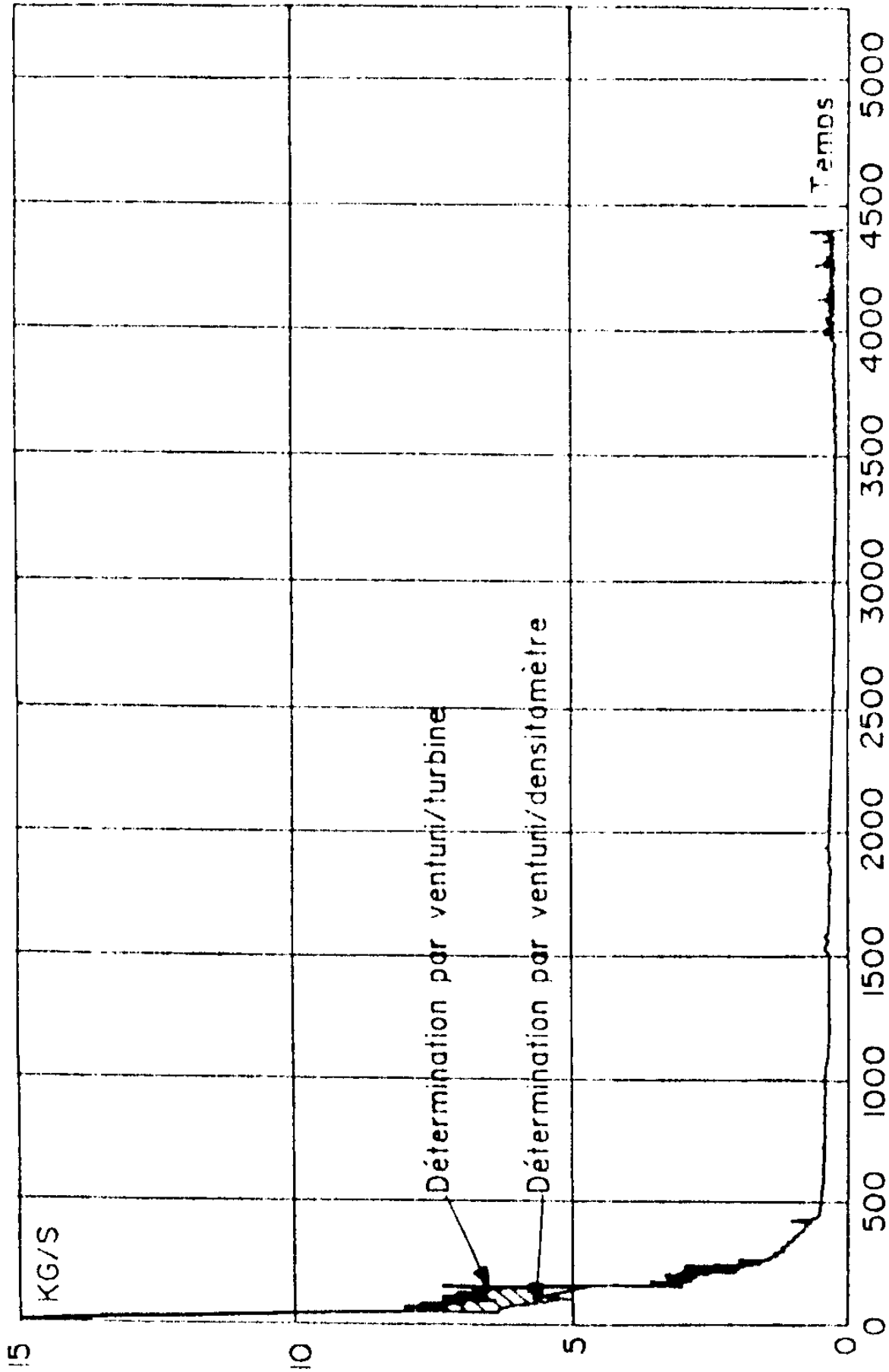


그림 40 6" 저온관 파손사고의 파단면을 통하여 방출된 유량

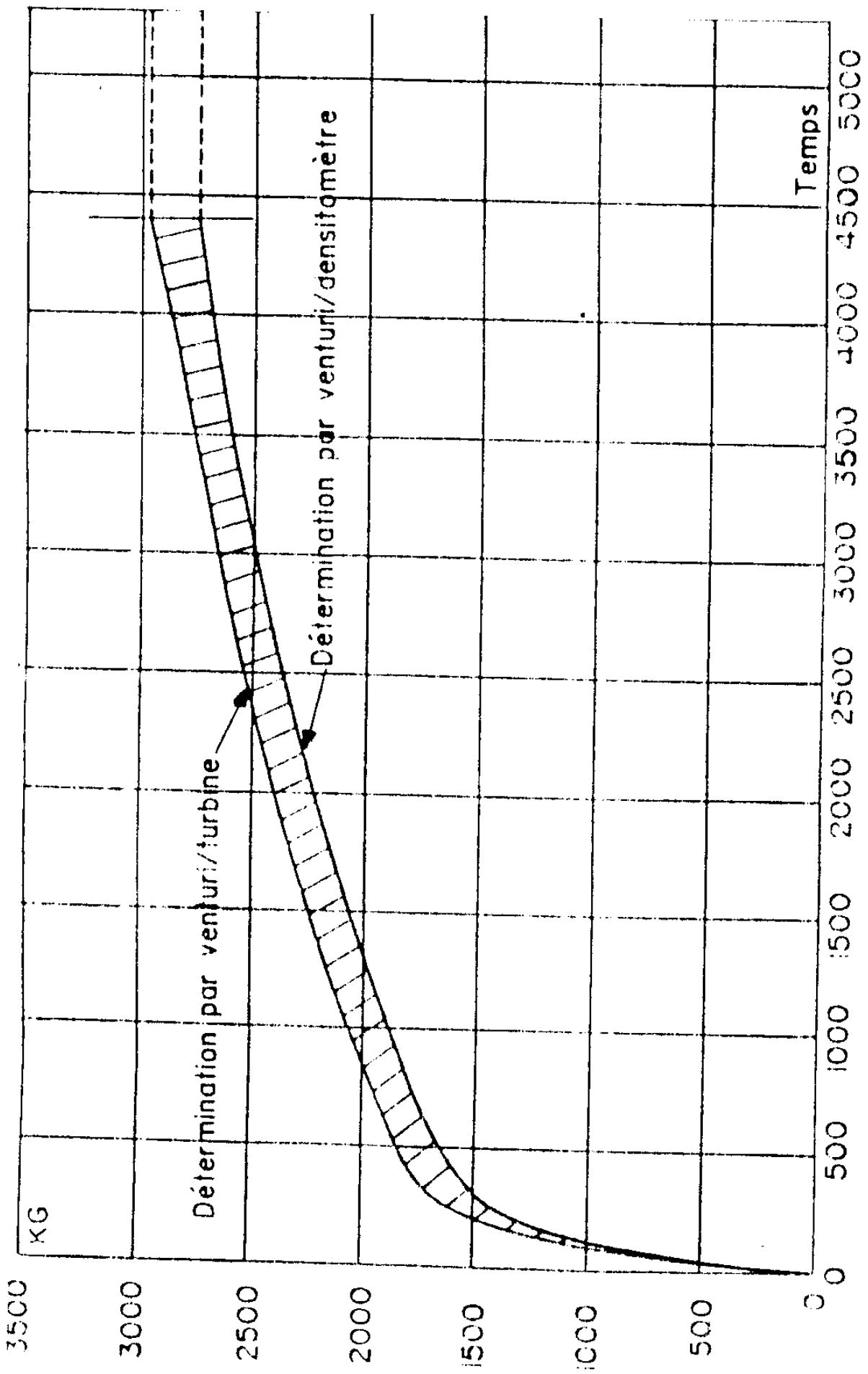


그림 41 6" 저온관 파손사고의 파단면을 통하여 방출된 유량 합계

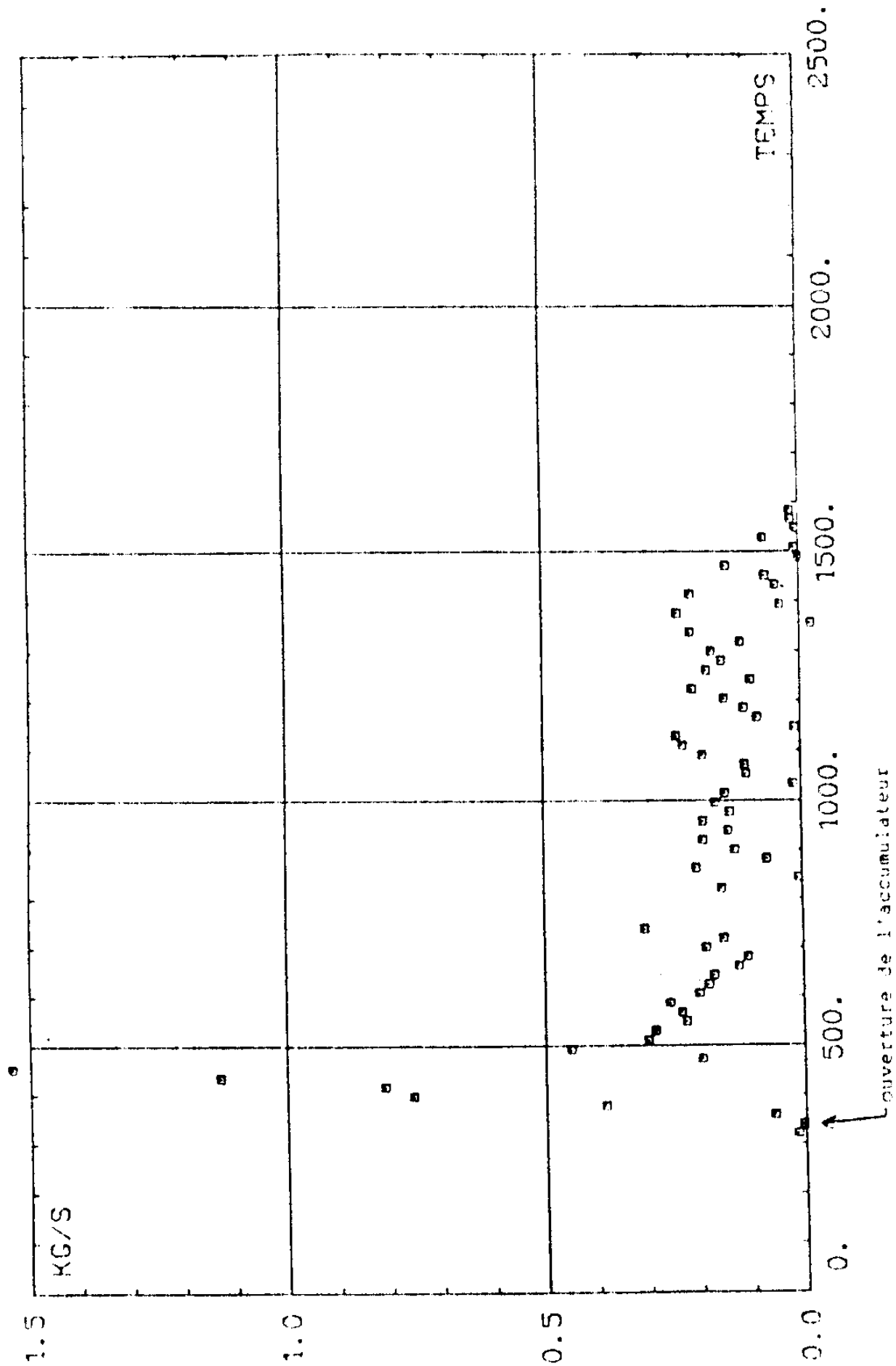
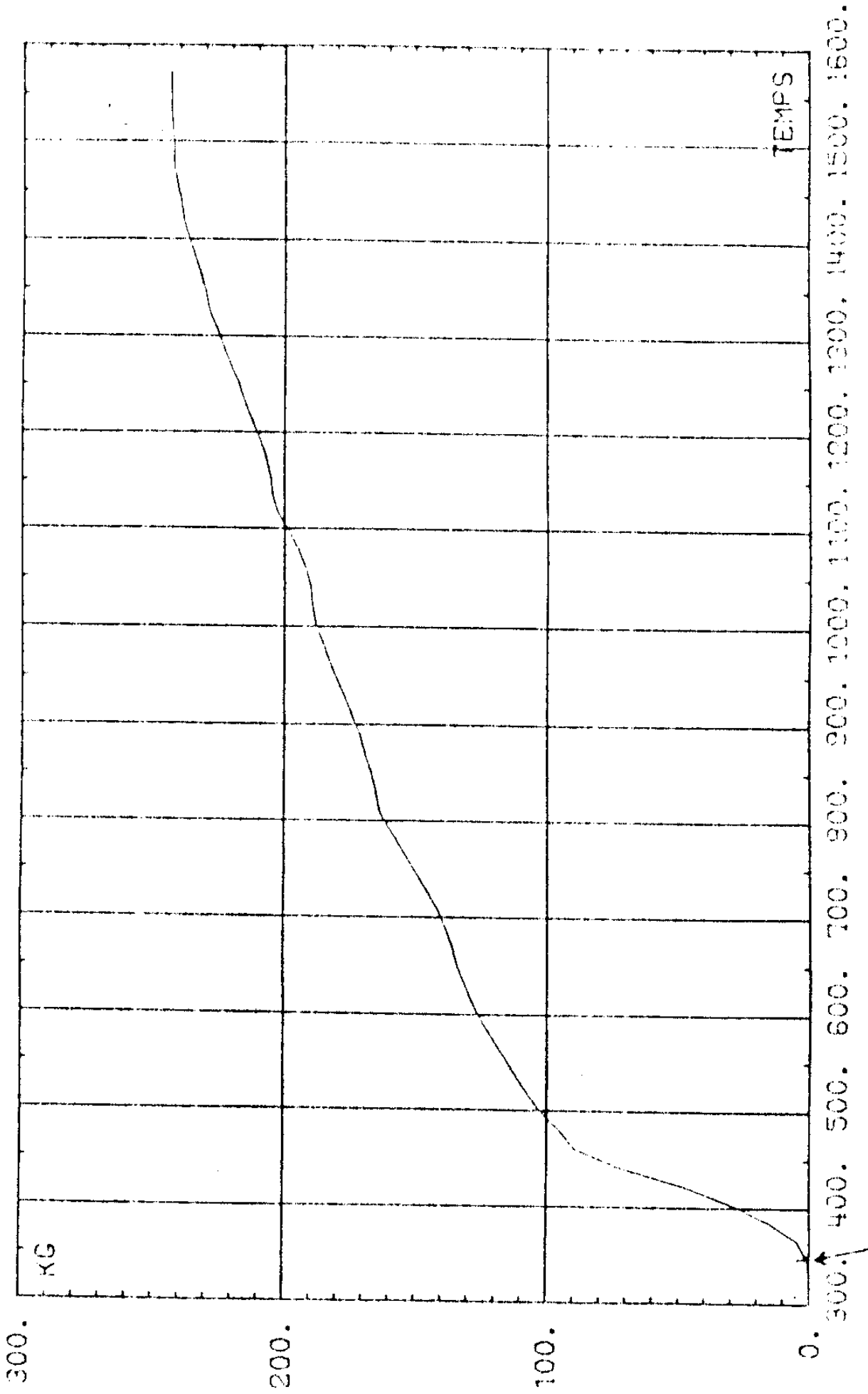


그림 42 6" 저온관 파손사고의 Accumulator 유량



ouverture de l'accumulateur

ECHELLE DILATEE

그림 43 6" 저온관 파손사고의 Accumulator 유량 합계

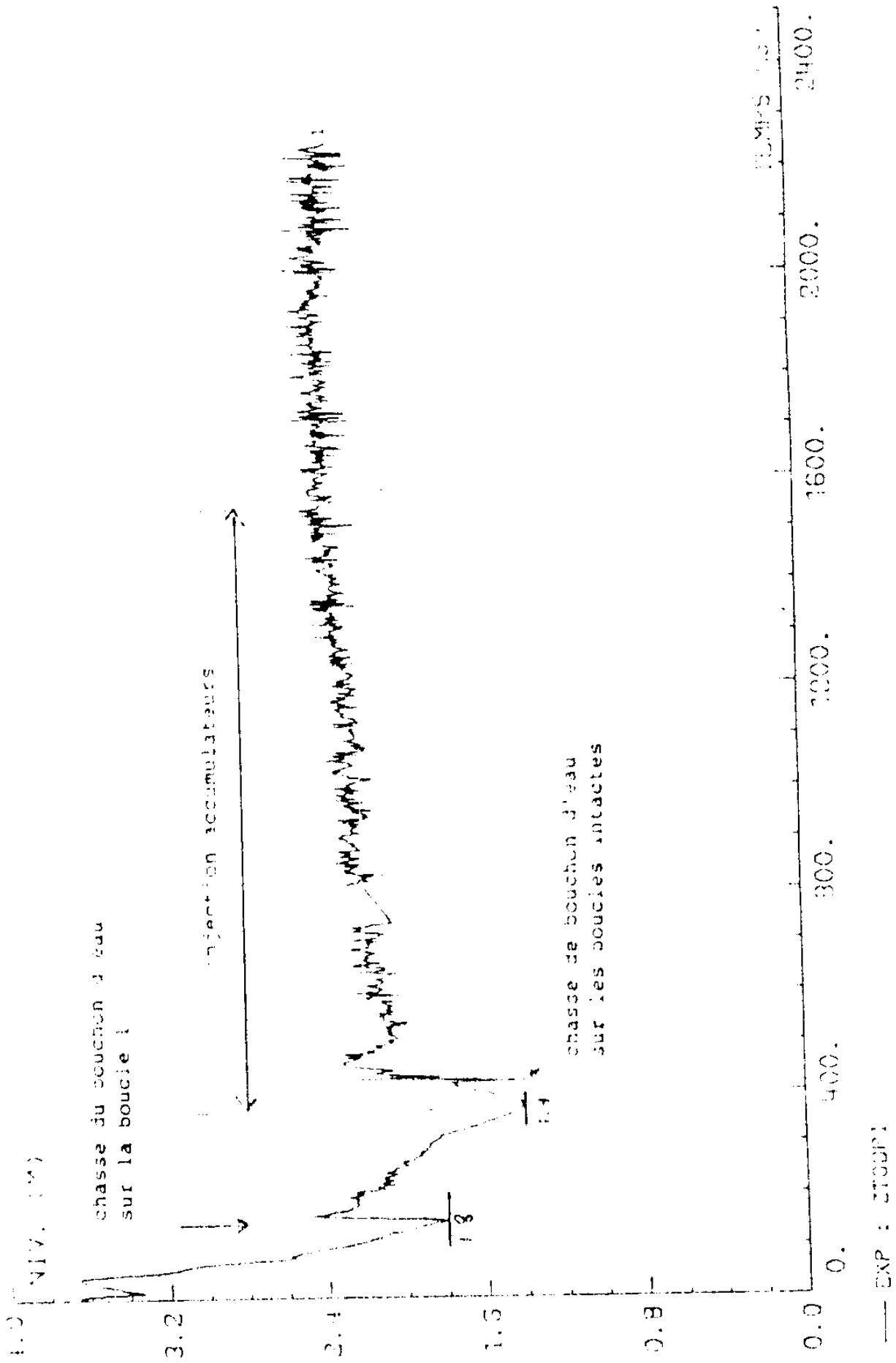
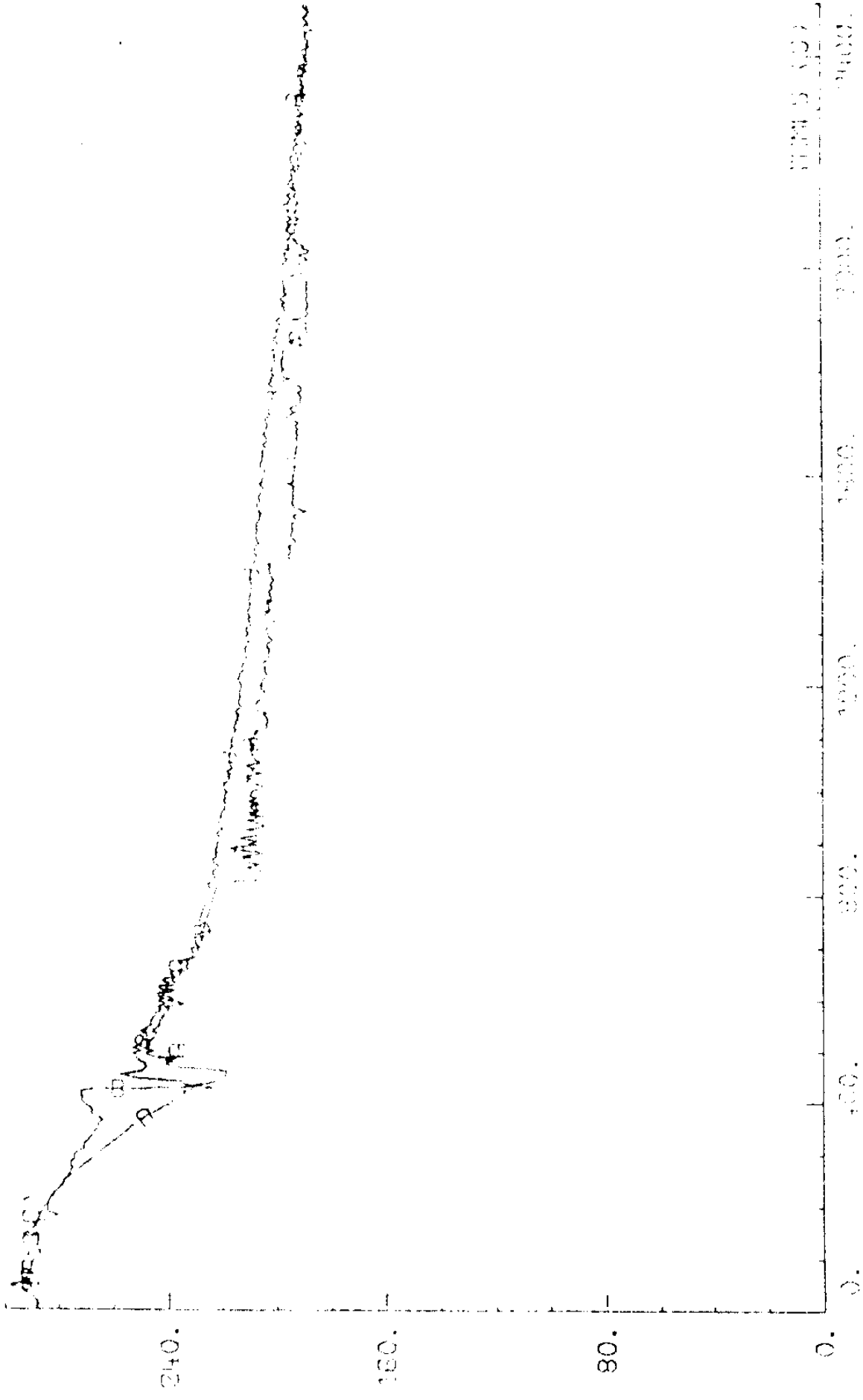


그림 44 6" 저온관 파손사고의 노심의 Collapsed Level



—A EXP : PF1341 —B EXP : PF1343

그림 45 6" 저온관 피손사고의 고온관1의 유체온도

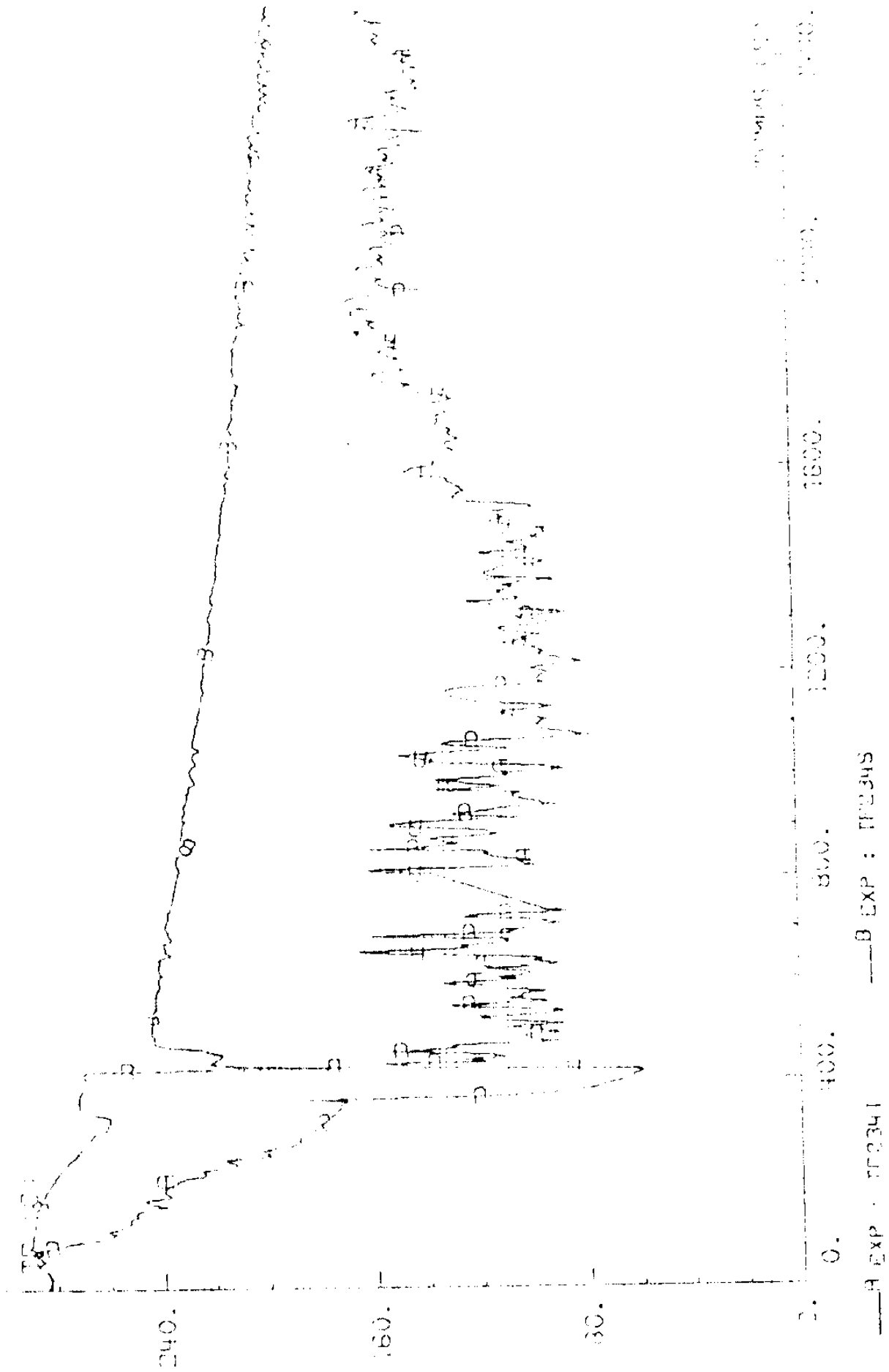


그림 46 6" 저온관 파손사고의 고온관2의 유체온도

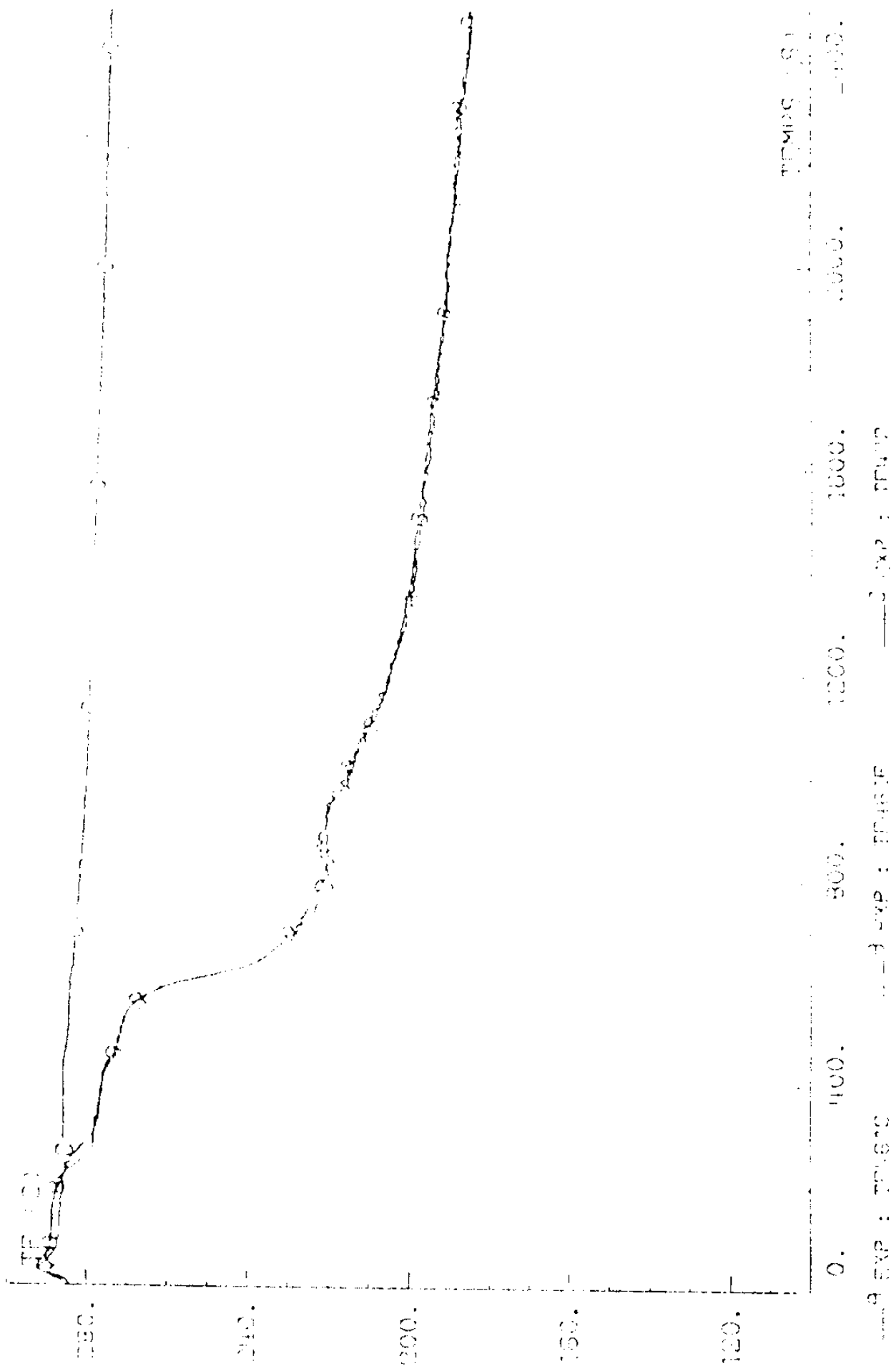


그림 47 6" 저온관 파손사고의 증기발생기1의 2차측 온도

FIGURE 4.38 : RICHTEUR MULTIPLE DE VAPEUR DE GENESEUR DE VAPEUR

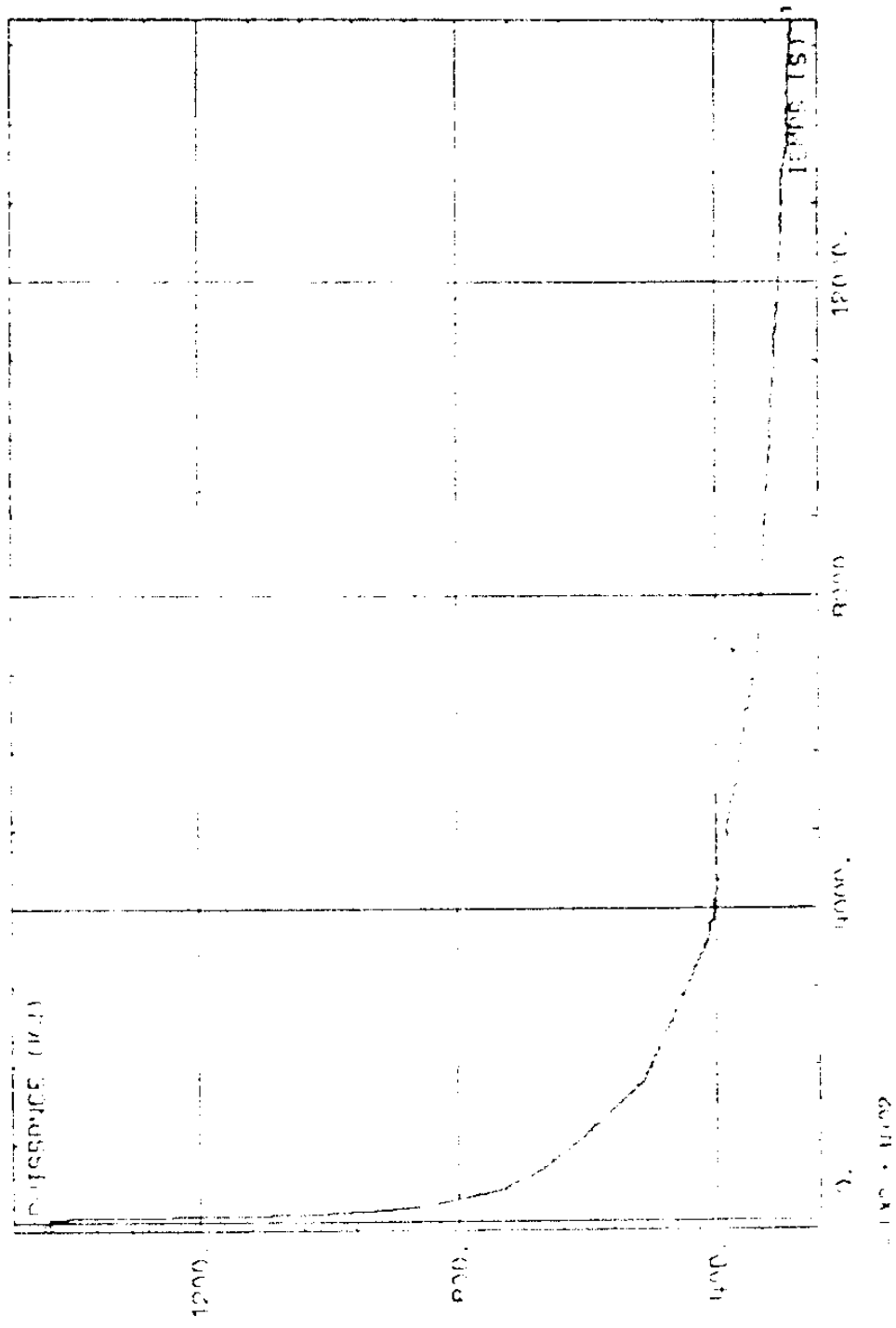


그림 48 SGTR사고의 노심출력 변화

FIGURE 4.38 : PARTURE MULTIPLE DE TUBES DE GENERATEUR DE VAPEUR

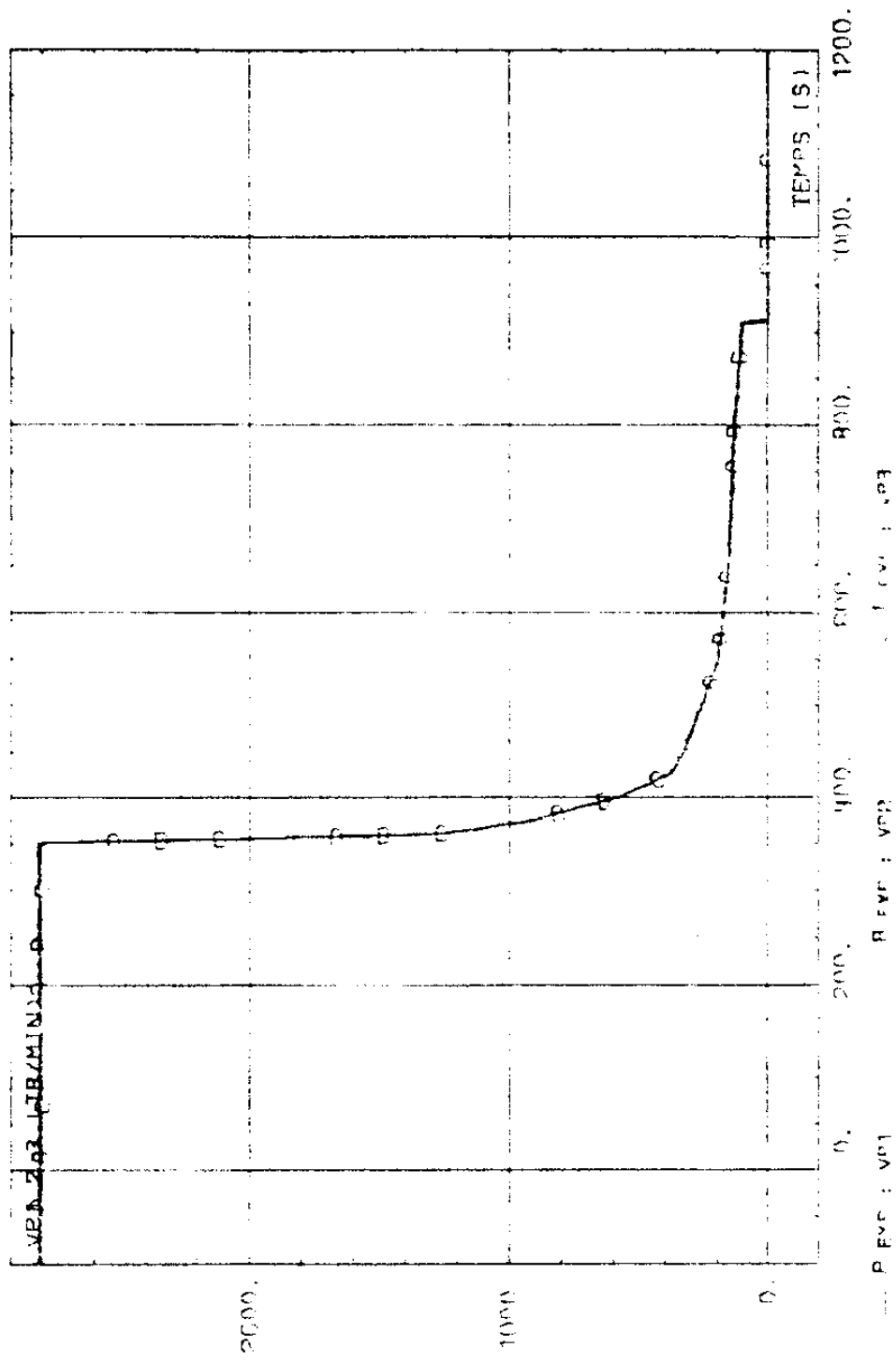


그림 49 SGTR사고의 펌프속도 (Phase I, II)

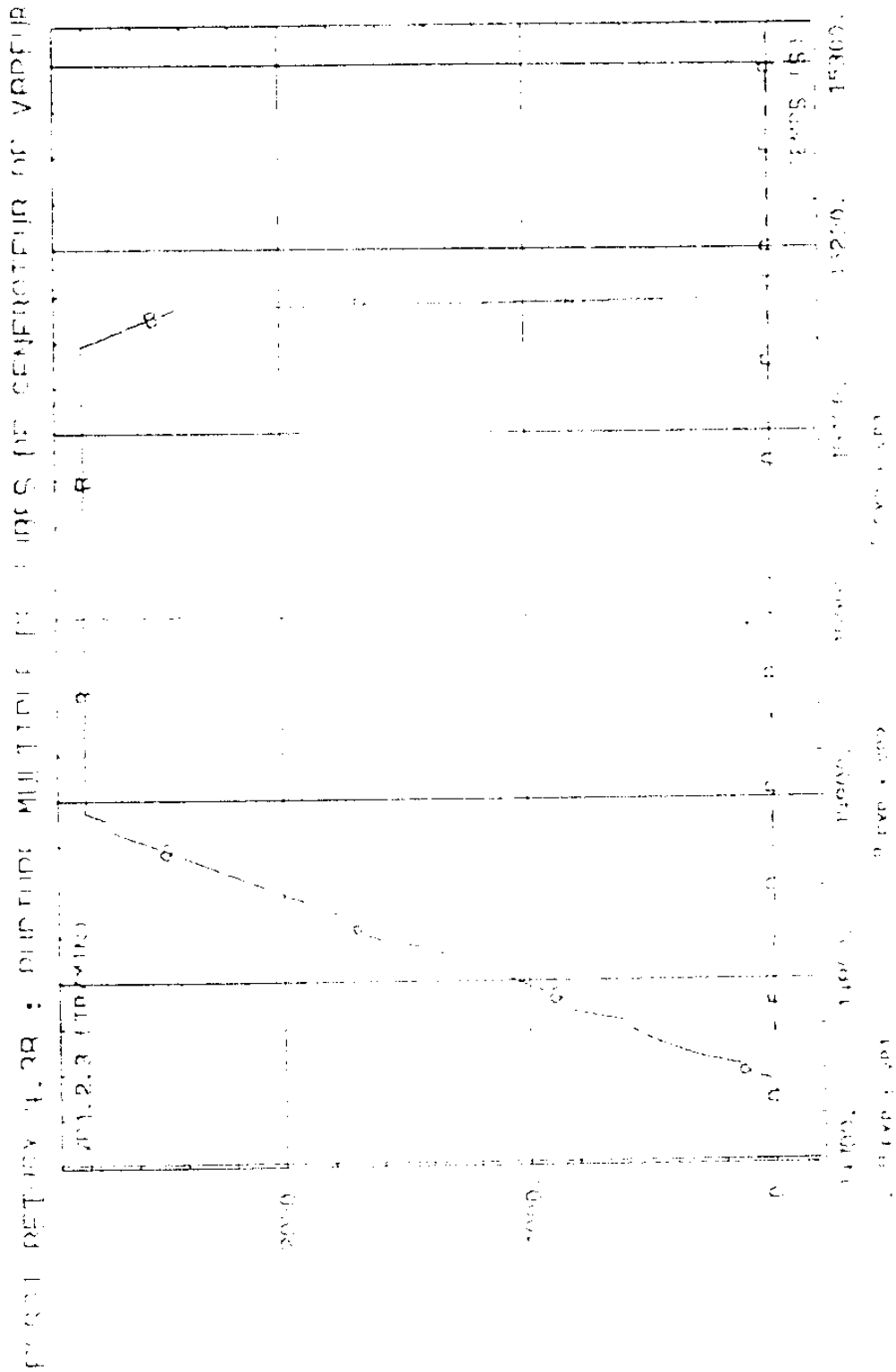
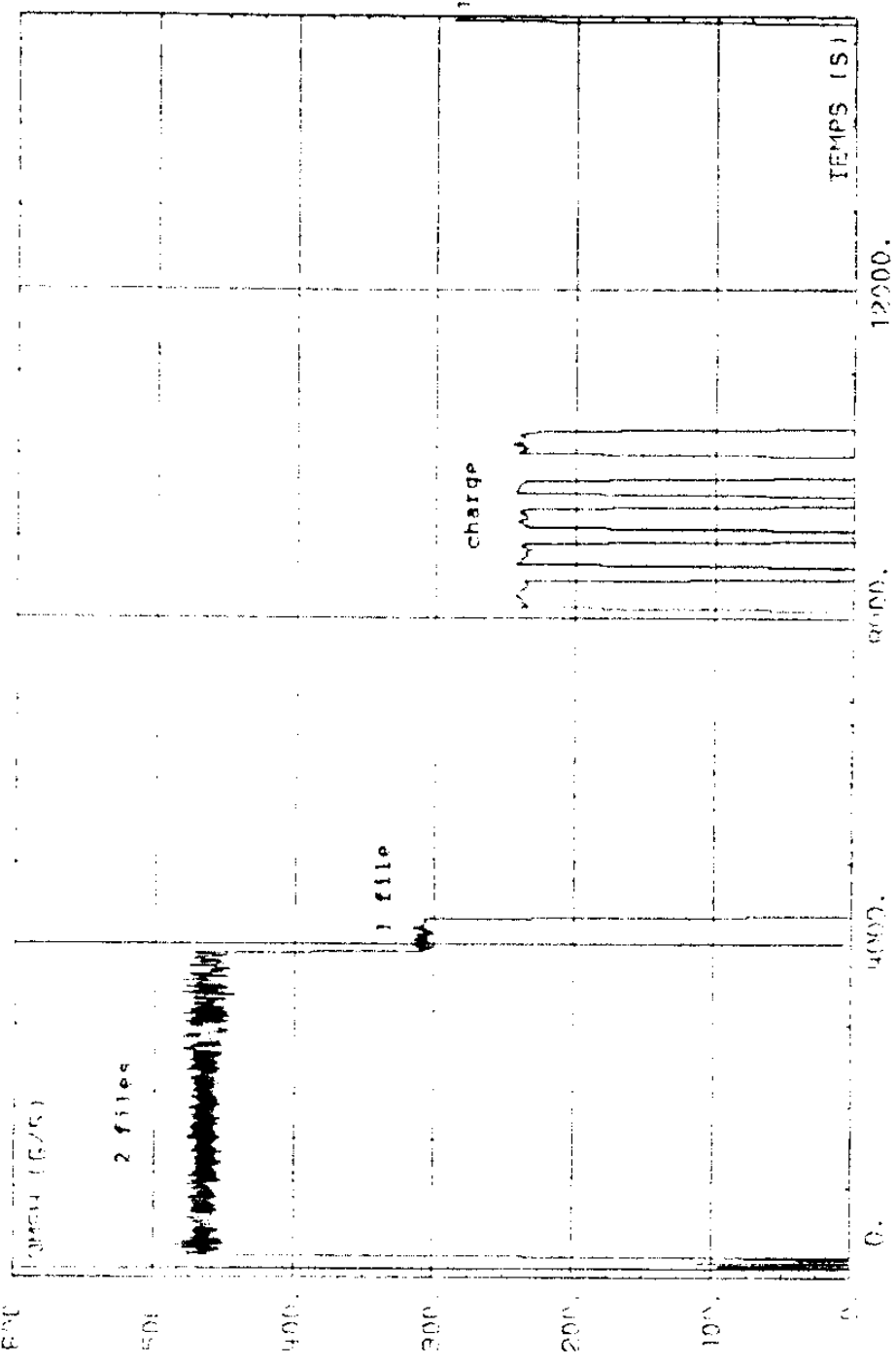


그림 50 SGTR사고의 펌프속도(Phase III, IV)

PLATELET PLATELET 4.3B : OUR CODE MULTIPLE FOR TUBES IN GENERAL (EXP. IN VAPOR)



EXP. : QMSH

그림 51 SGTR사고의 SI와 Charging 유량

FIGURE 4.38 : RUPTURE MULTIPLE DE TUBES DE GENERATEUR DE VAPEUR

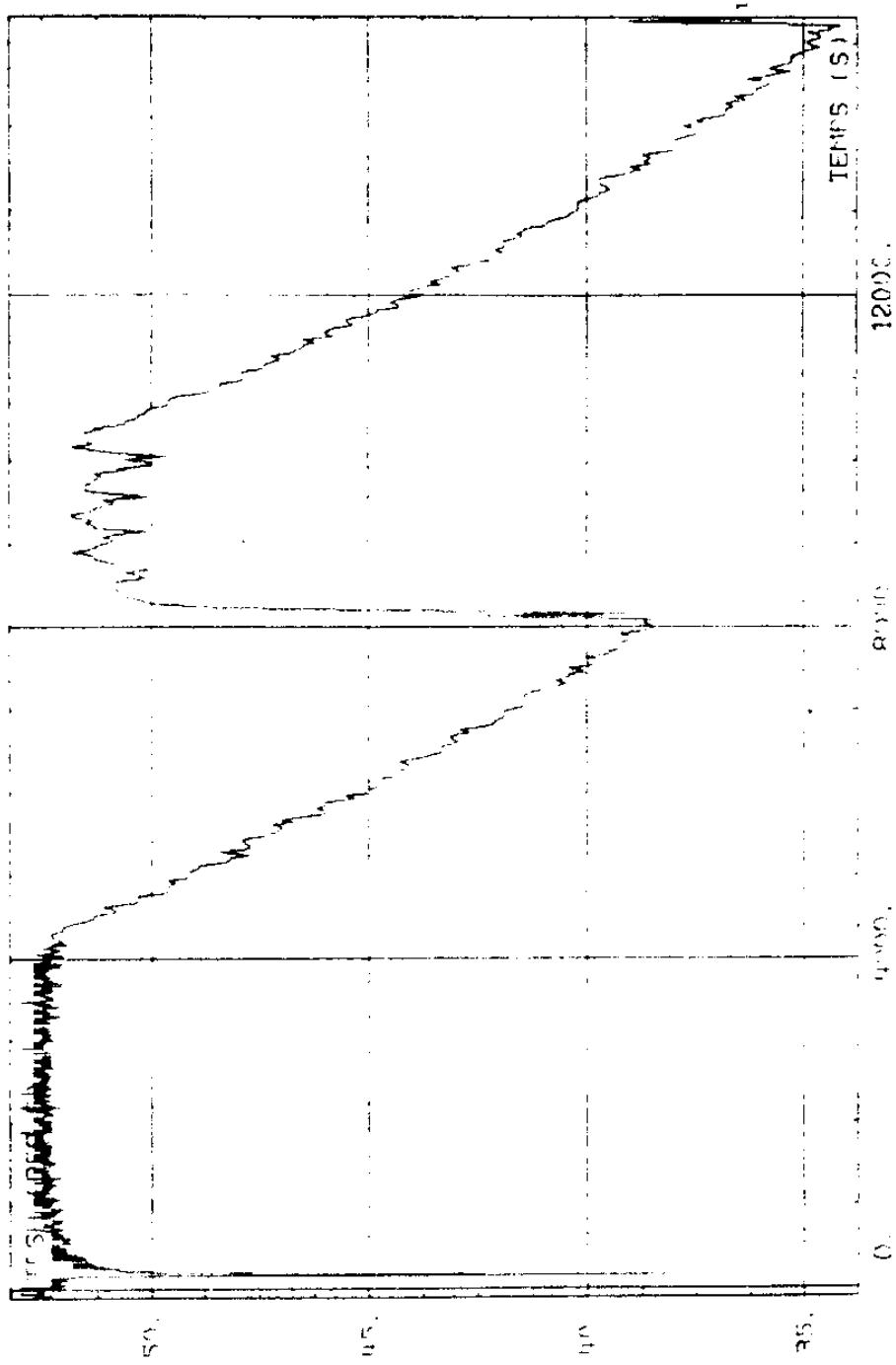
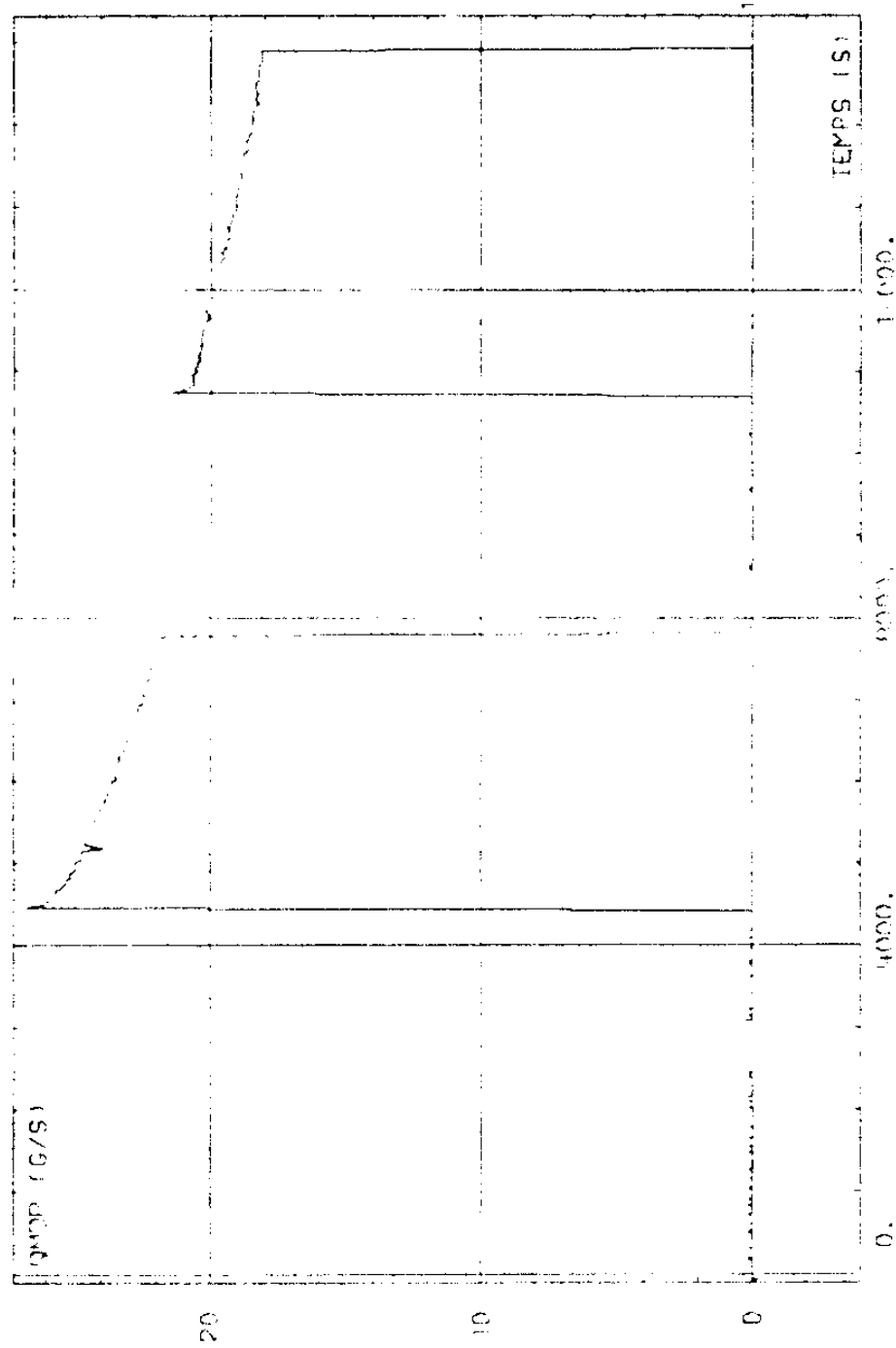


FIGURE 4.38

그림 52 SGTR사고의 SI와 Charging 온도

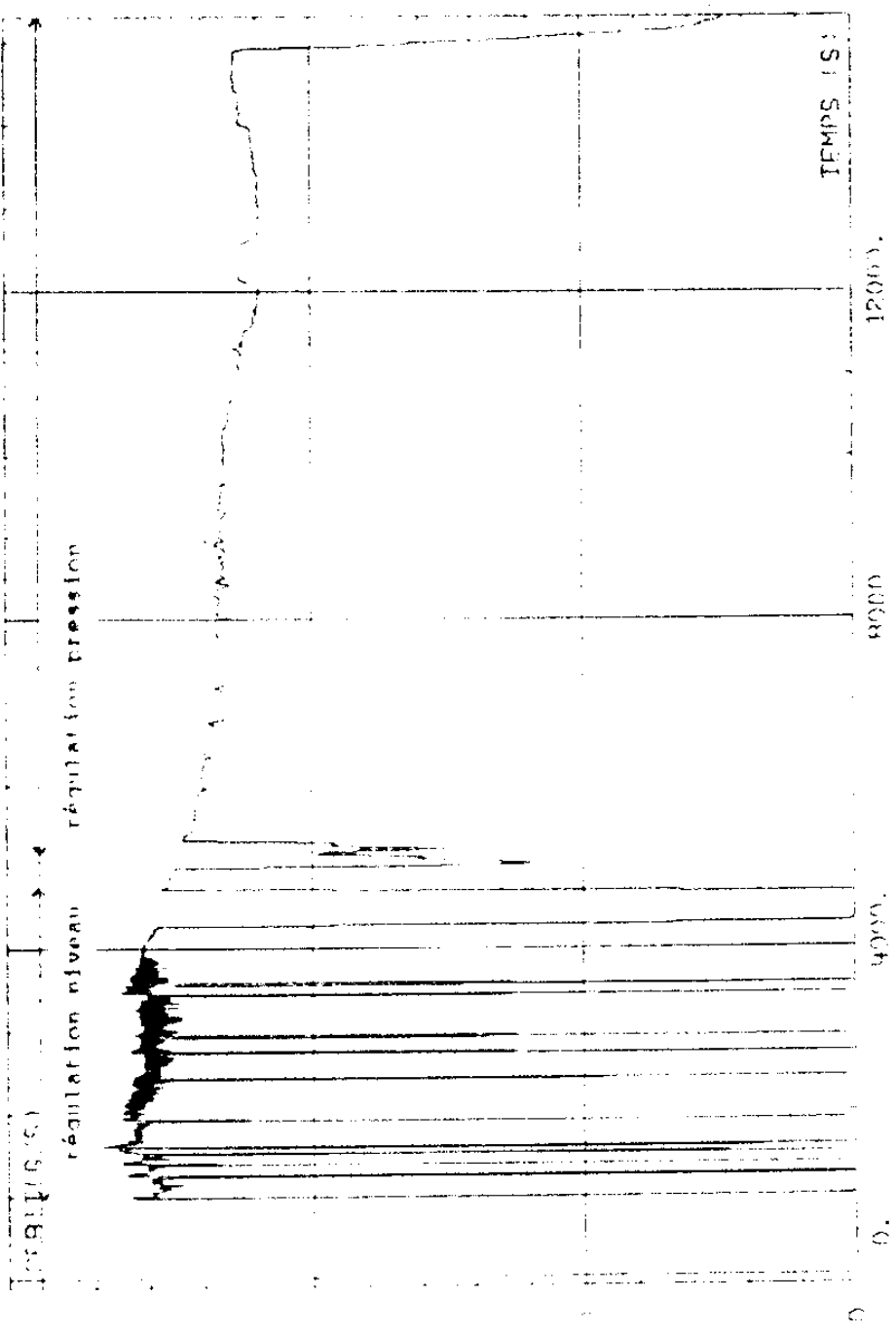
ESSRI REPUSY 4.3B : RUPTURE MULTIPLE DE TUBES DE GENEDECTEUR DE VAPEUR



-- G/S : GMP

그림 53 SGR사고의 일차계통 Letdown 유량

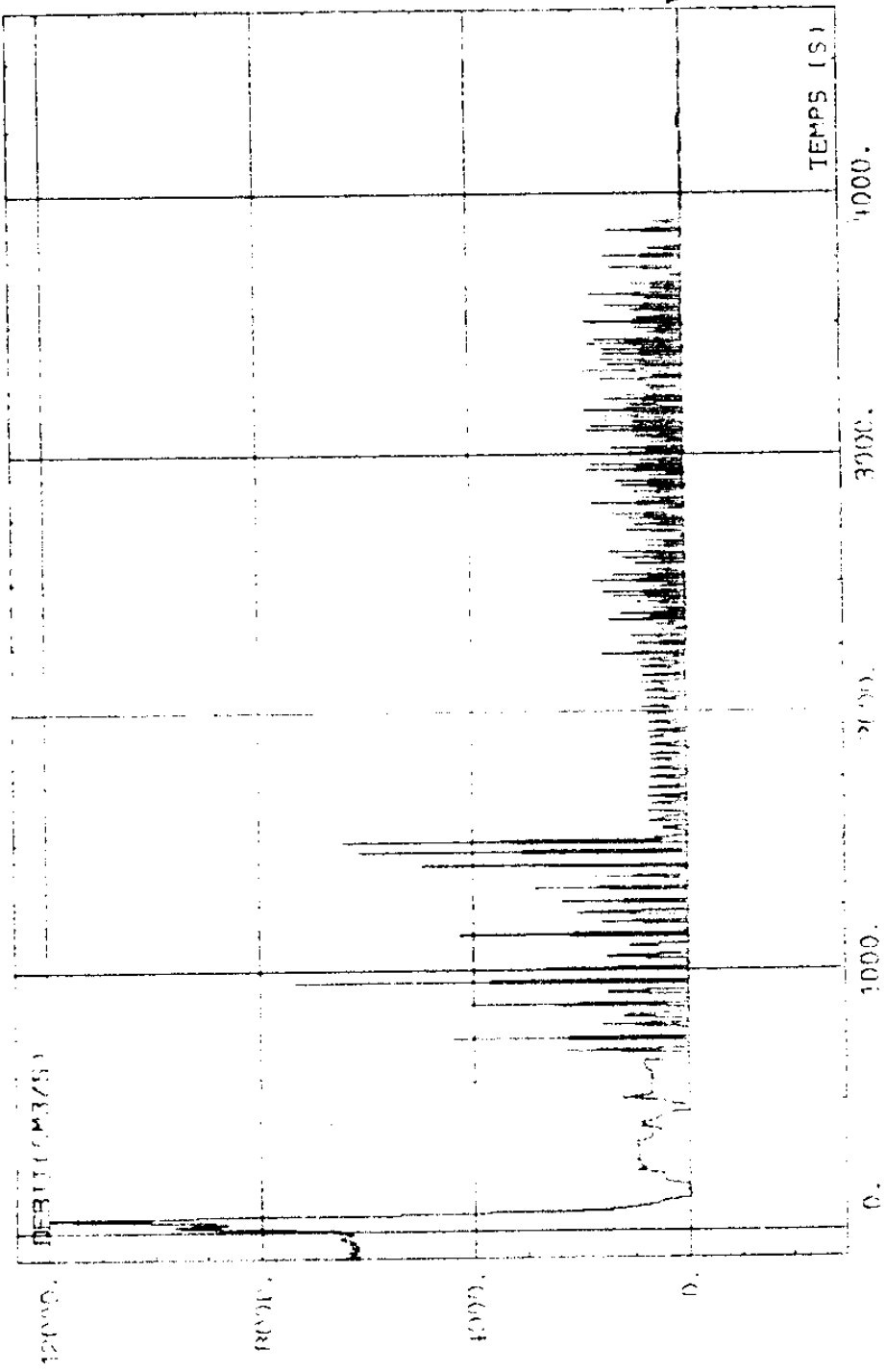
EXP. 2000.05.14. RR : RUPTURE MULTIPLE DE TUBES DE GENERATEUR DE VAPEUR



EXP : 2000.05.14

그림 54 SGTR사고의 SG1의 Blowdown 유량

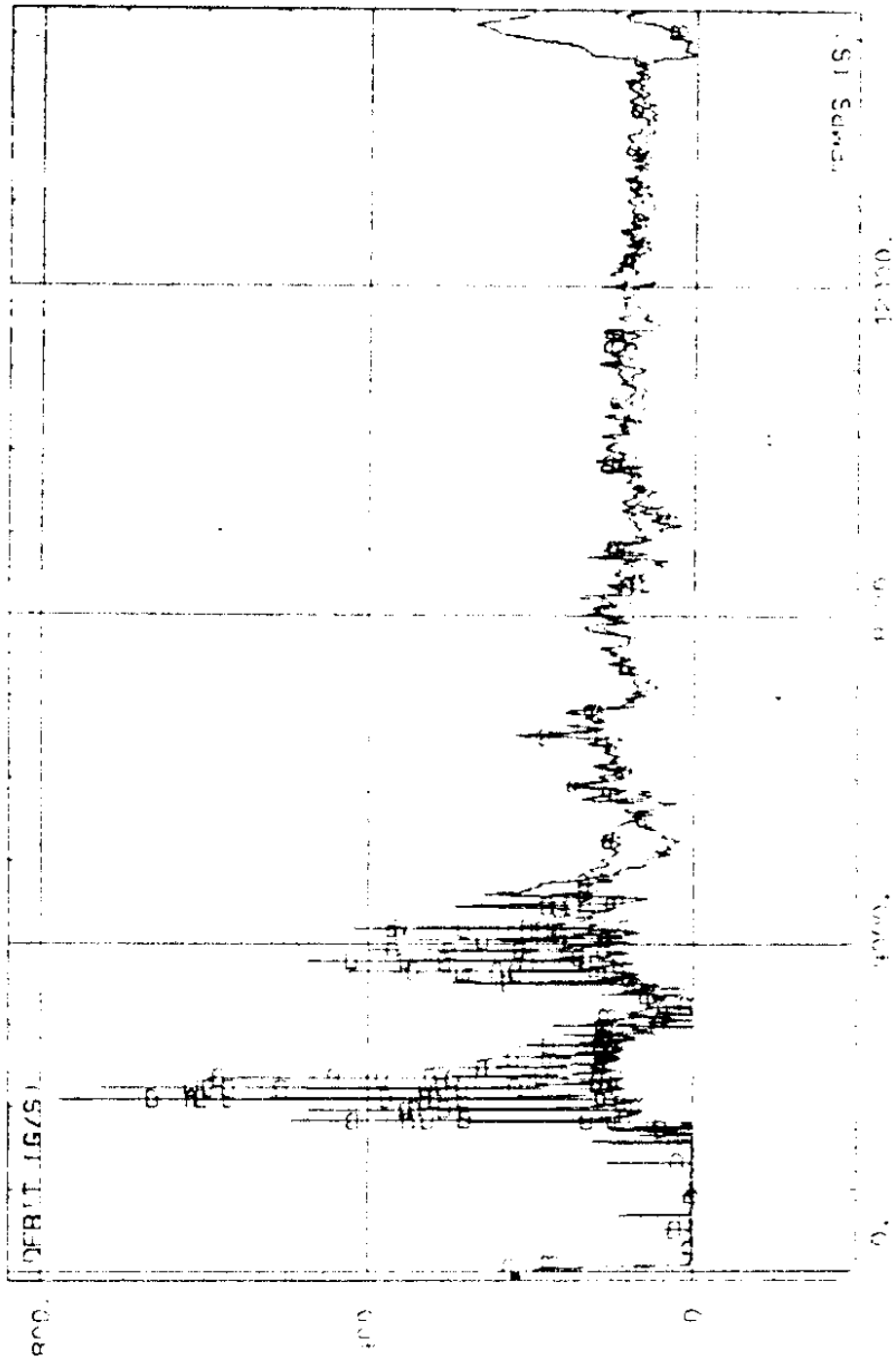
ESSAI BETHSY 4.0R : RUPTURE MULTIPLE DE TURBS DE GENERATEUR DE VAPEUR



EXP : 015211

그림 55 SGTR사고의 SG1의 증기유량

FIGURE 4.3B : RUPTURE MULTIPLE DE TUBES DE GENERATEUR DE VAPEUR



0. EXP. - 0.000000 0. EXP. - 0.000000

그림 56 SGTR사고의 SG2 및 SG3 증기유량

FIGURE 4.38 : RUPTURE MULTIPLE DE TUBES DE CONDENSATEUR DE VAPEUR

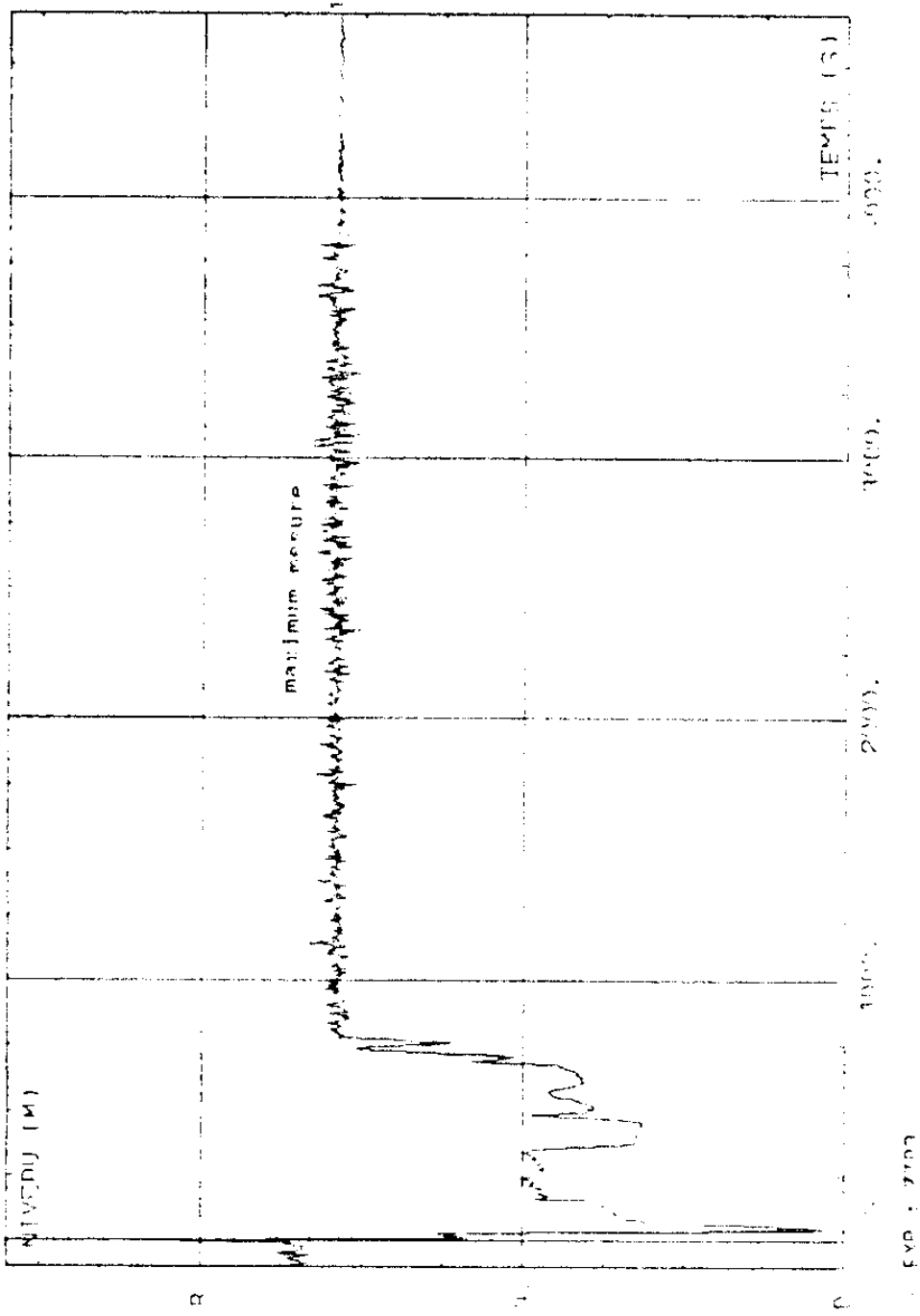


그림 57 SGTR사고의 밀림관의 Collapsed Level

ESSAI BETHSY 4.3B : RUPTURE MULTIPLE DE TUBES DE GENERATEUR DE VAPEUR

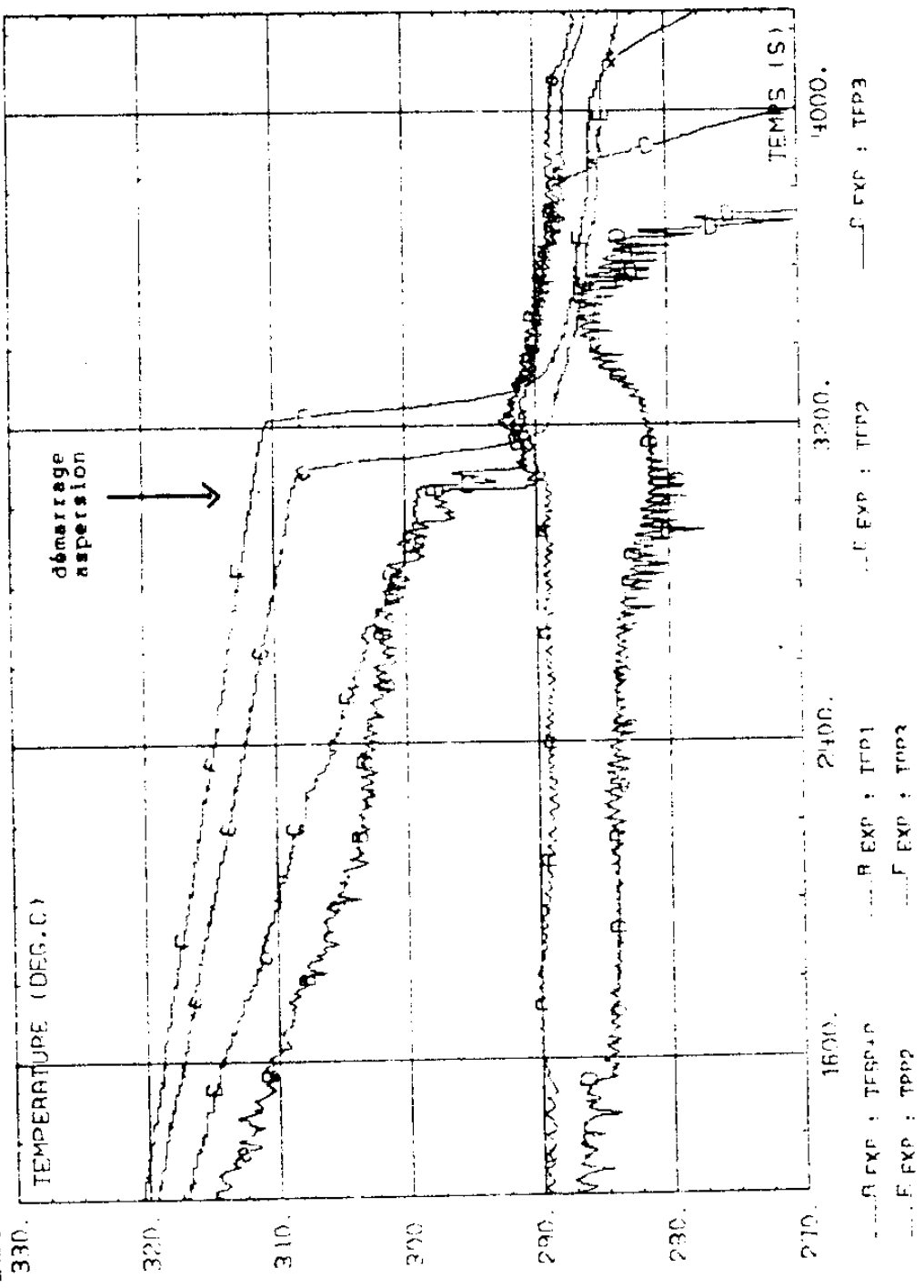


그림 58 SGTR사고의 가압기의 온도변화

SCHEMATIC 4.38 : RUPTURE MULTIPLE DE TUYAUX DE GENERATEUR DE VAPEUR

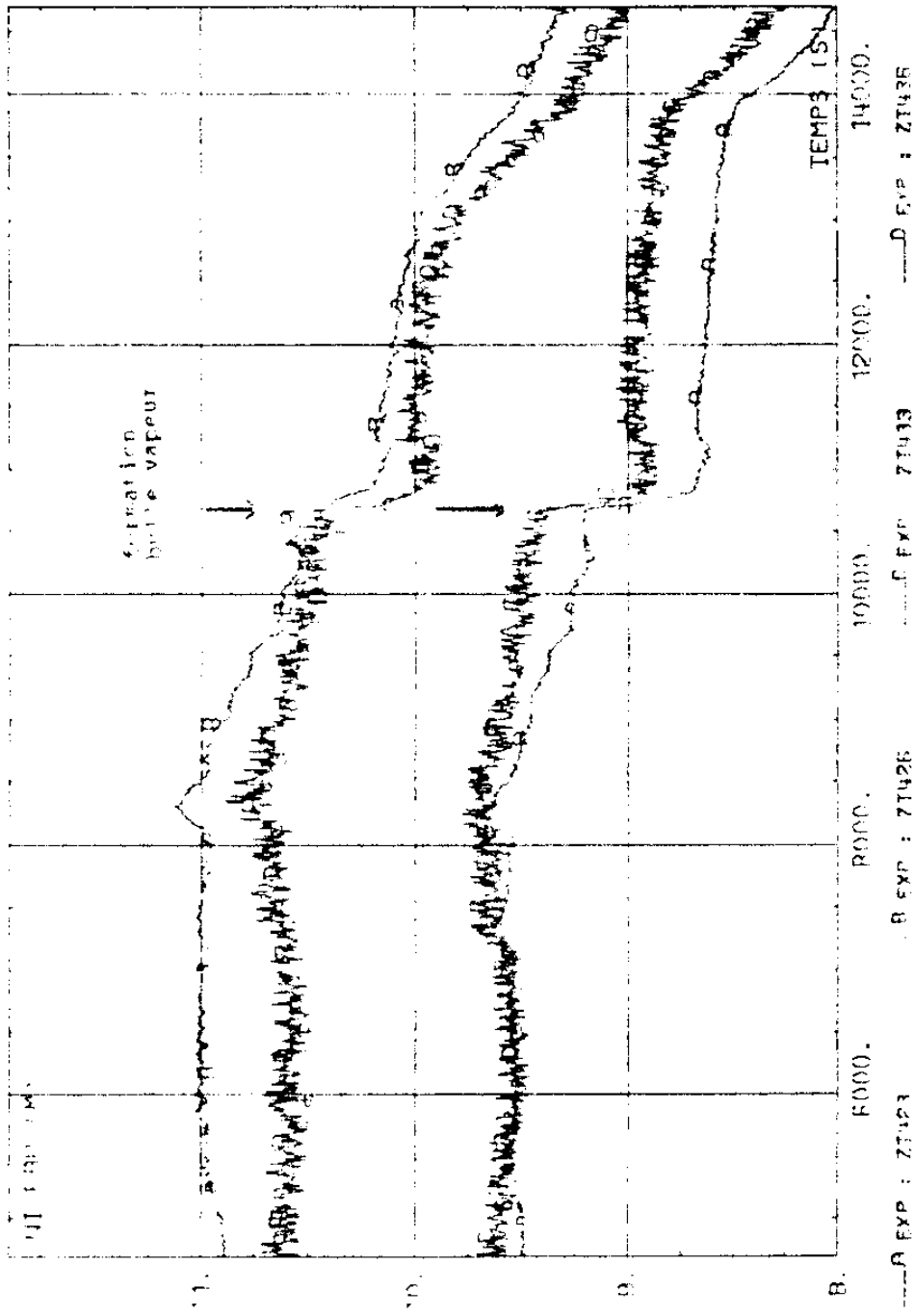


그림 59 SGTR사고의 SGI 전열관의 Collapsed Level

ESSAI BEHYS 4.3B : RUPTURE MULTIPLE DE TUBES DE GENEPIEUR DE VAPEUR

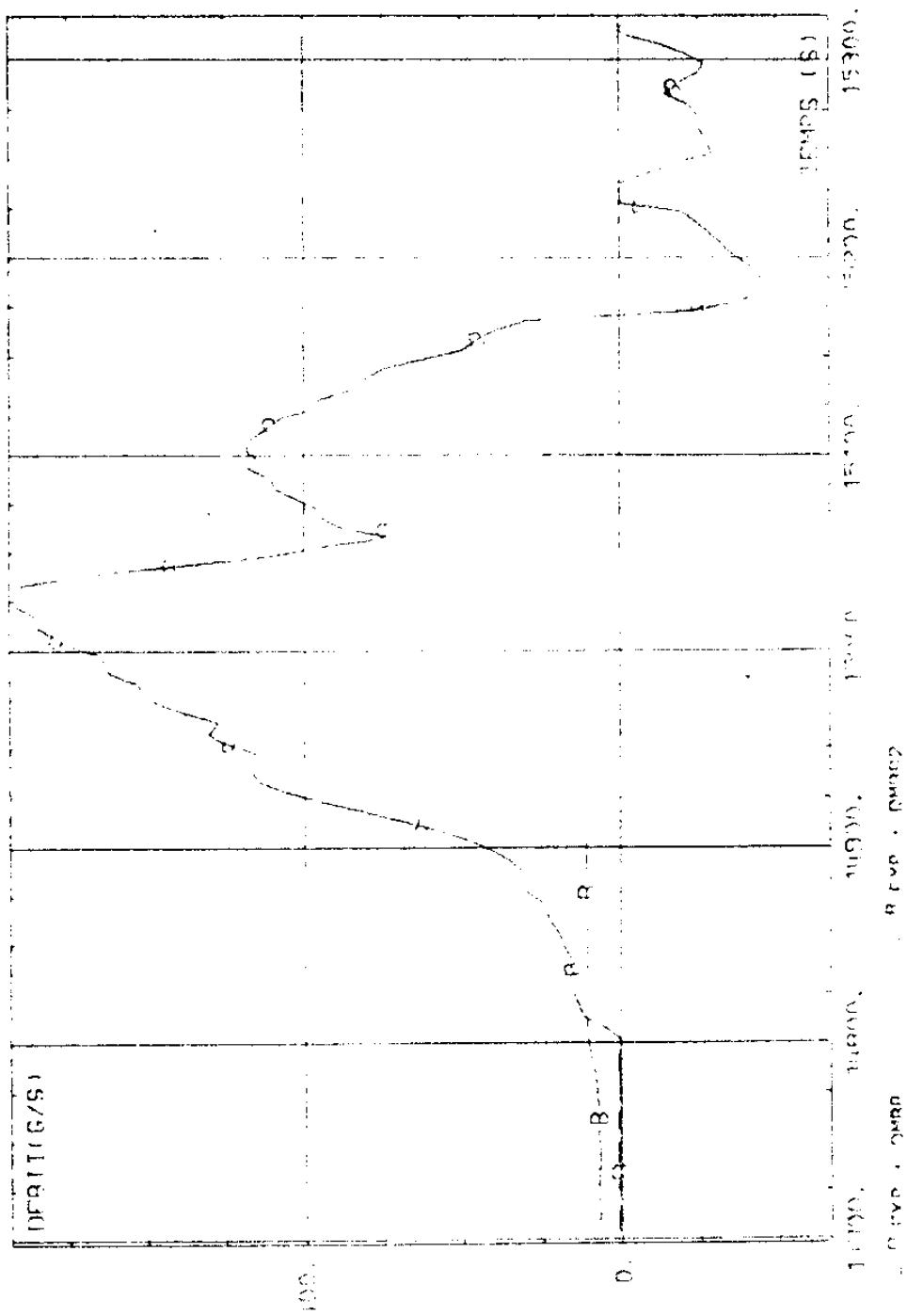


그림 60 SGTR사고의 Phase IV에서 SGTR 유량

FIGURE 4.3B : DISTURBANCE MULTIPLE OF TEMPS OF GENERATEUR DE VAPEUR

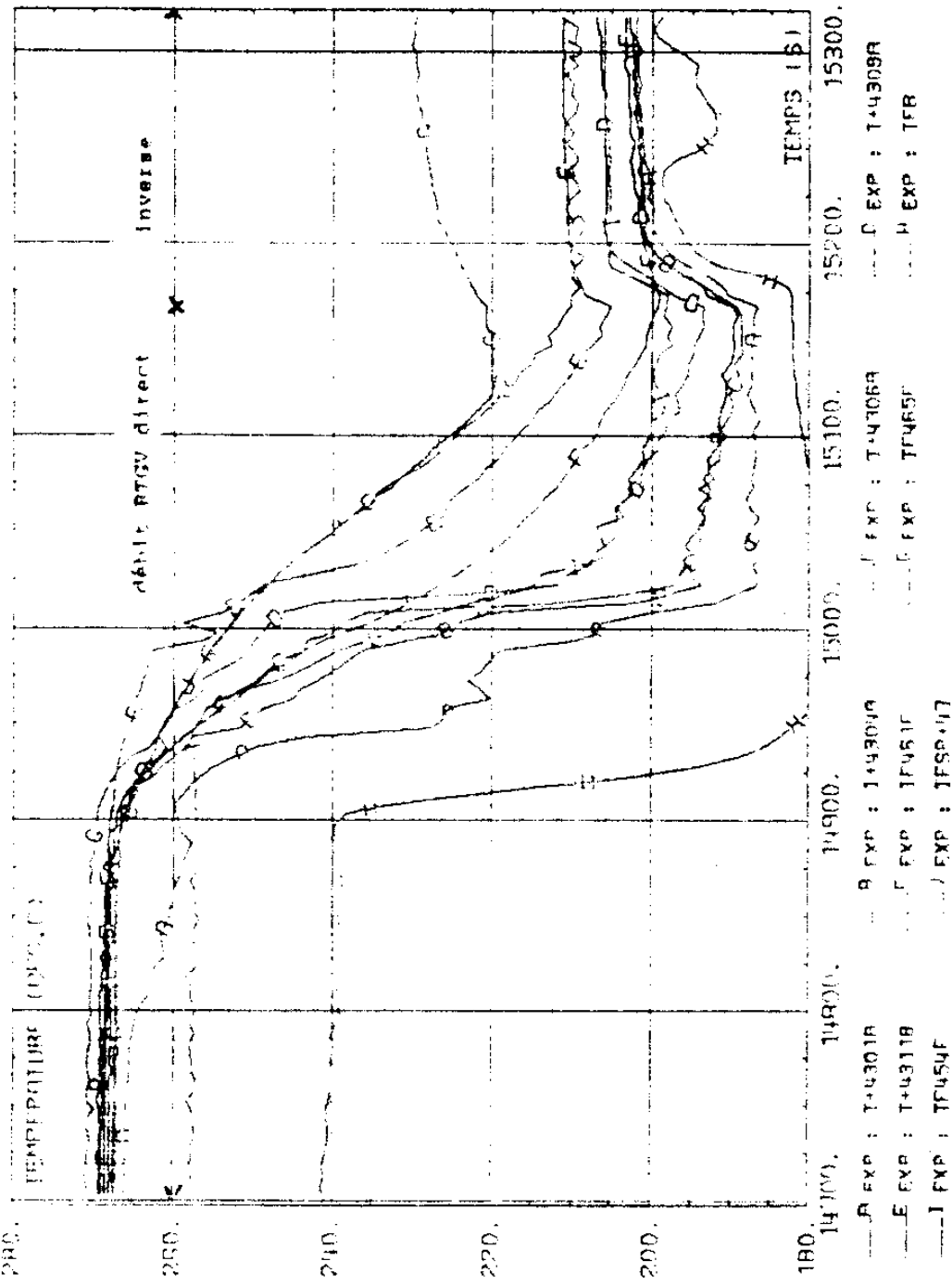


그림 61 SGTR사고의 Phase IV에서 SG1 온도

FIGURE 4.38 : RUPTURE MULTIPLE DE TUBES DE GENERATEUR DE VAPEUR

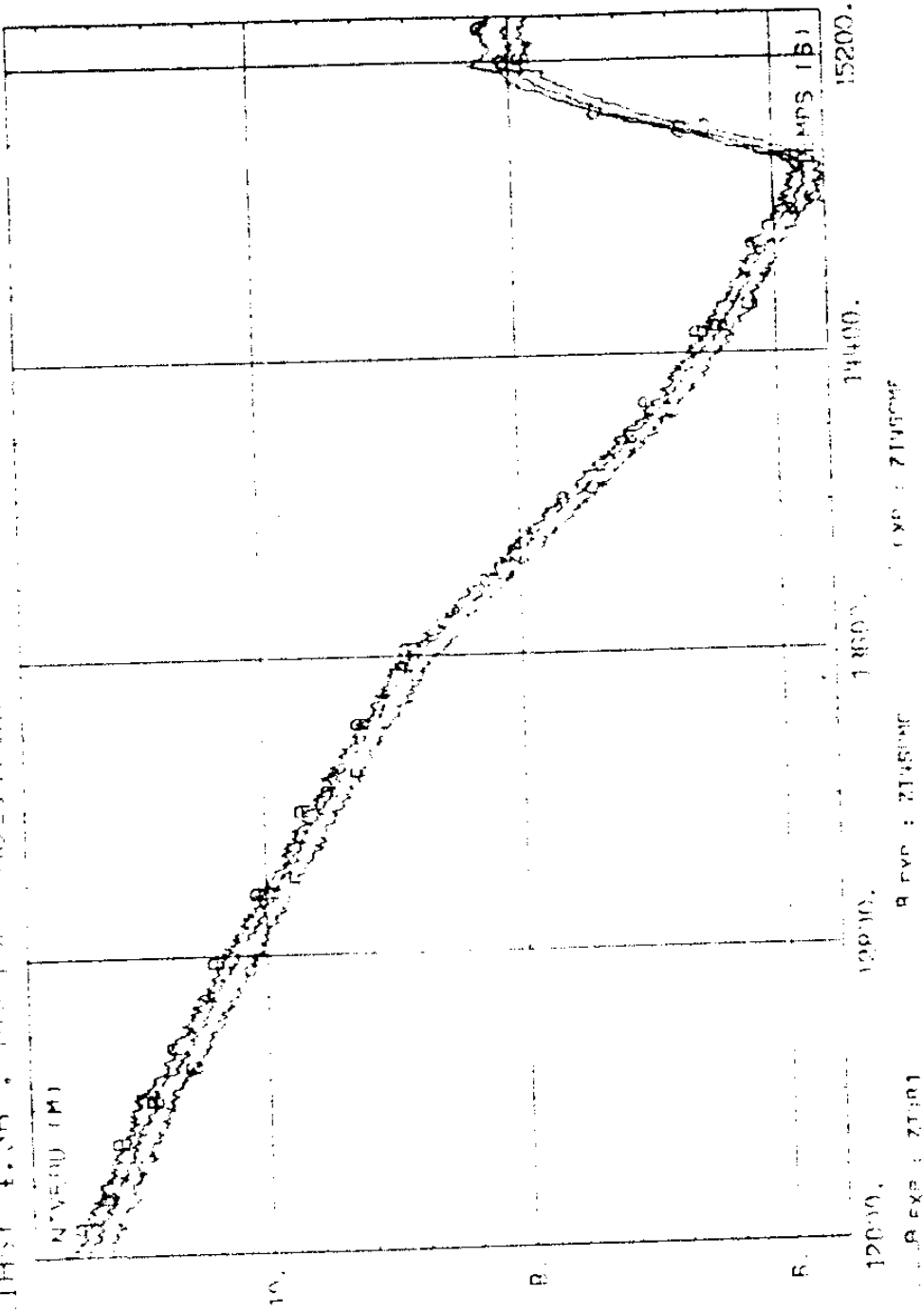


그림 62 SGTR사고의 SGI의 Collapsed Level

FIGURE 4.38 : MULTIPLE MULTIPLE DE TEMPS DE GENERATEUR DE VAPEUR

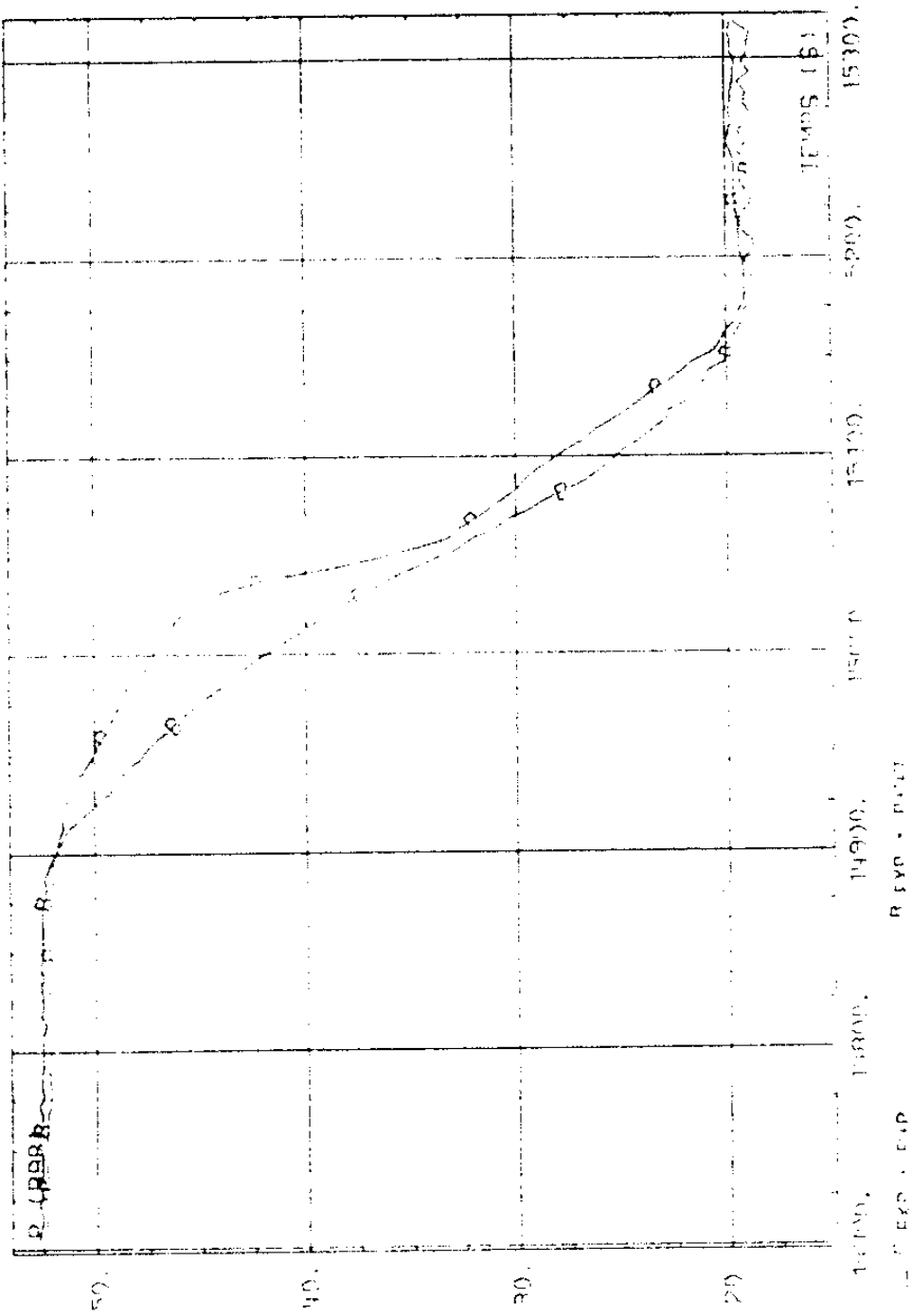


그림 63 SGTR사고의 일차계통과 이차계통 압력

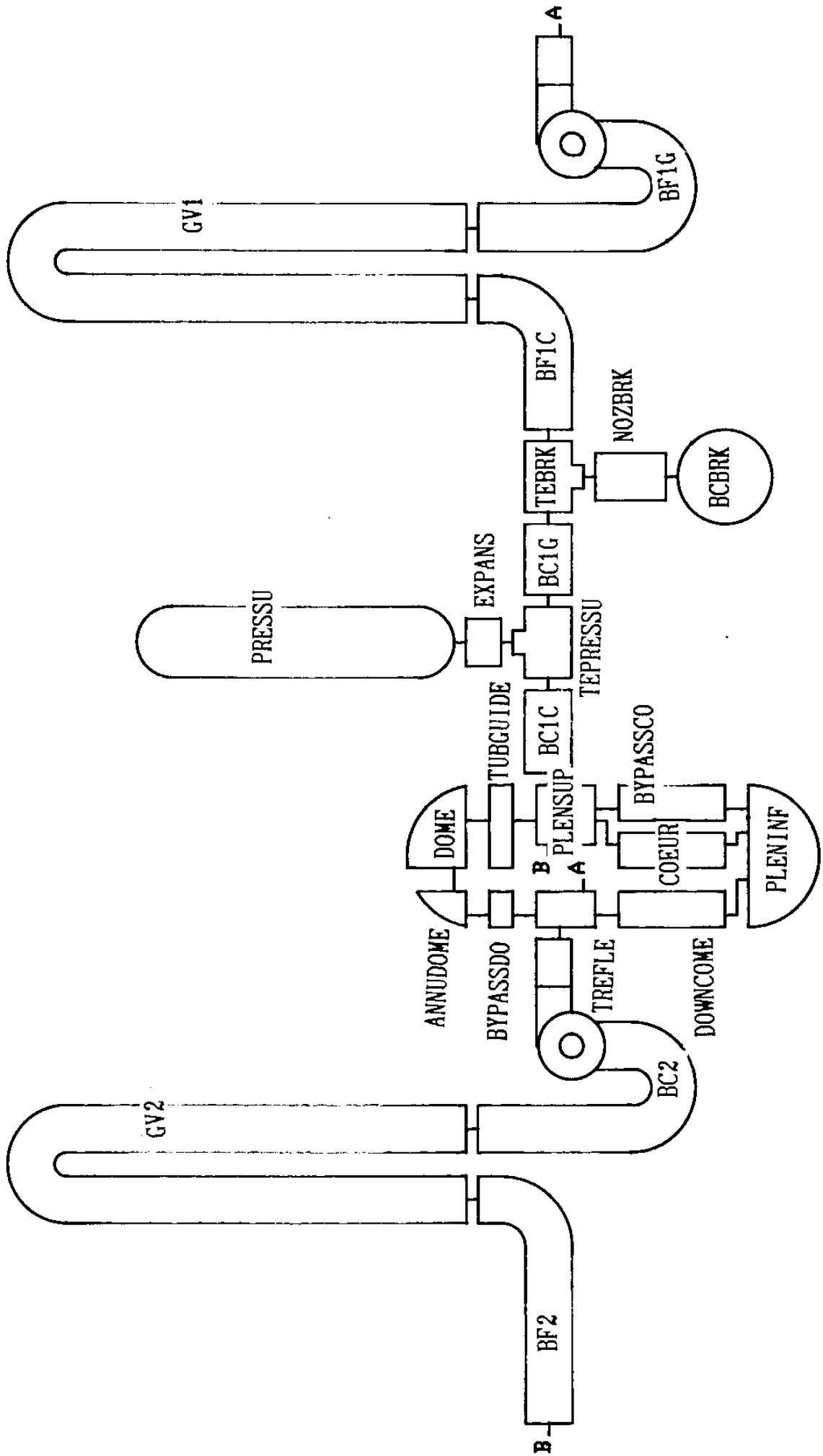


그림 64 ISP-27을 모의하기위한 CATHARE 1차계통 Nodalization

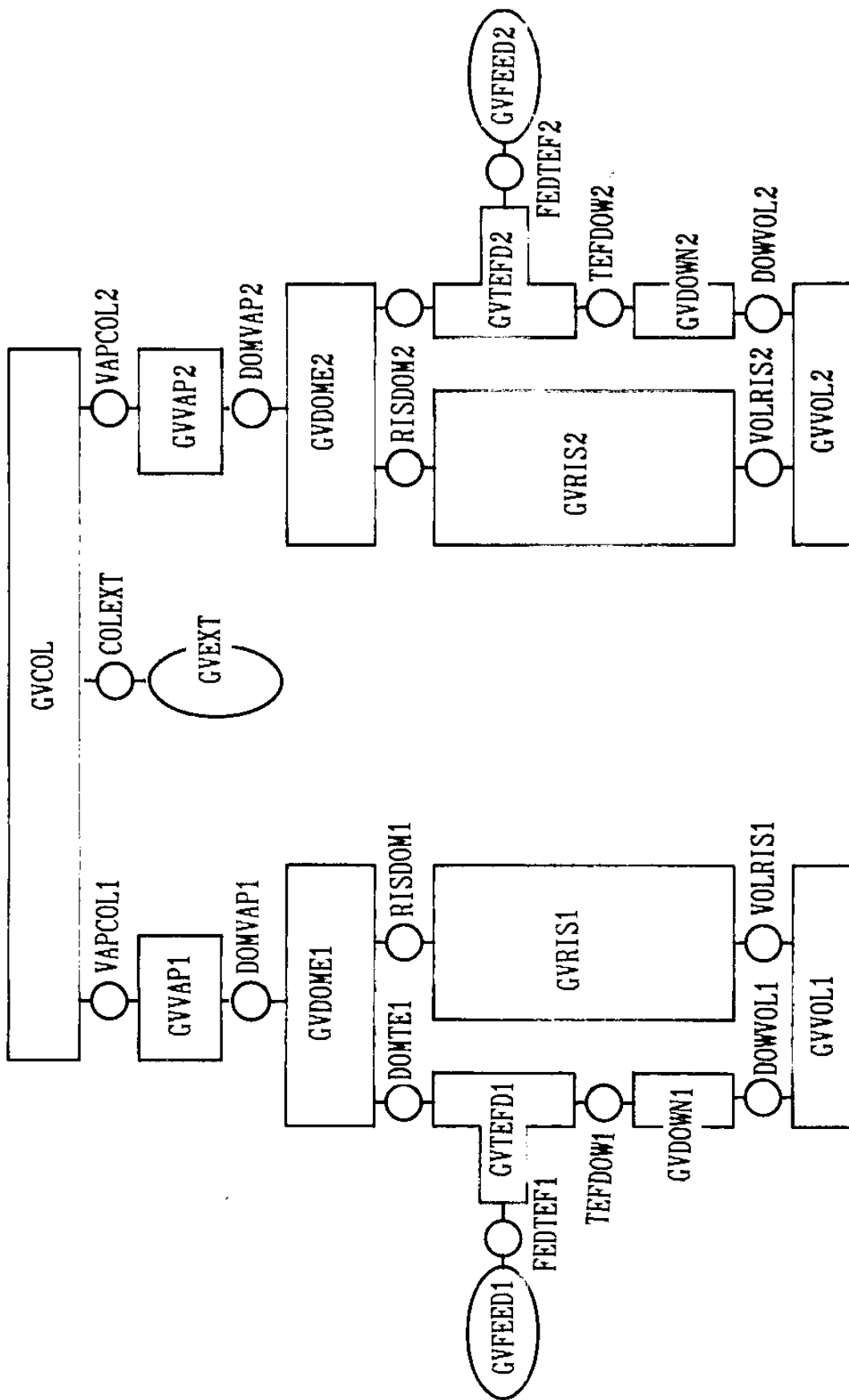


그림 65 ISP-27을 모의하기위한 CATHARE 2차계통 Nodalization

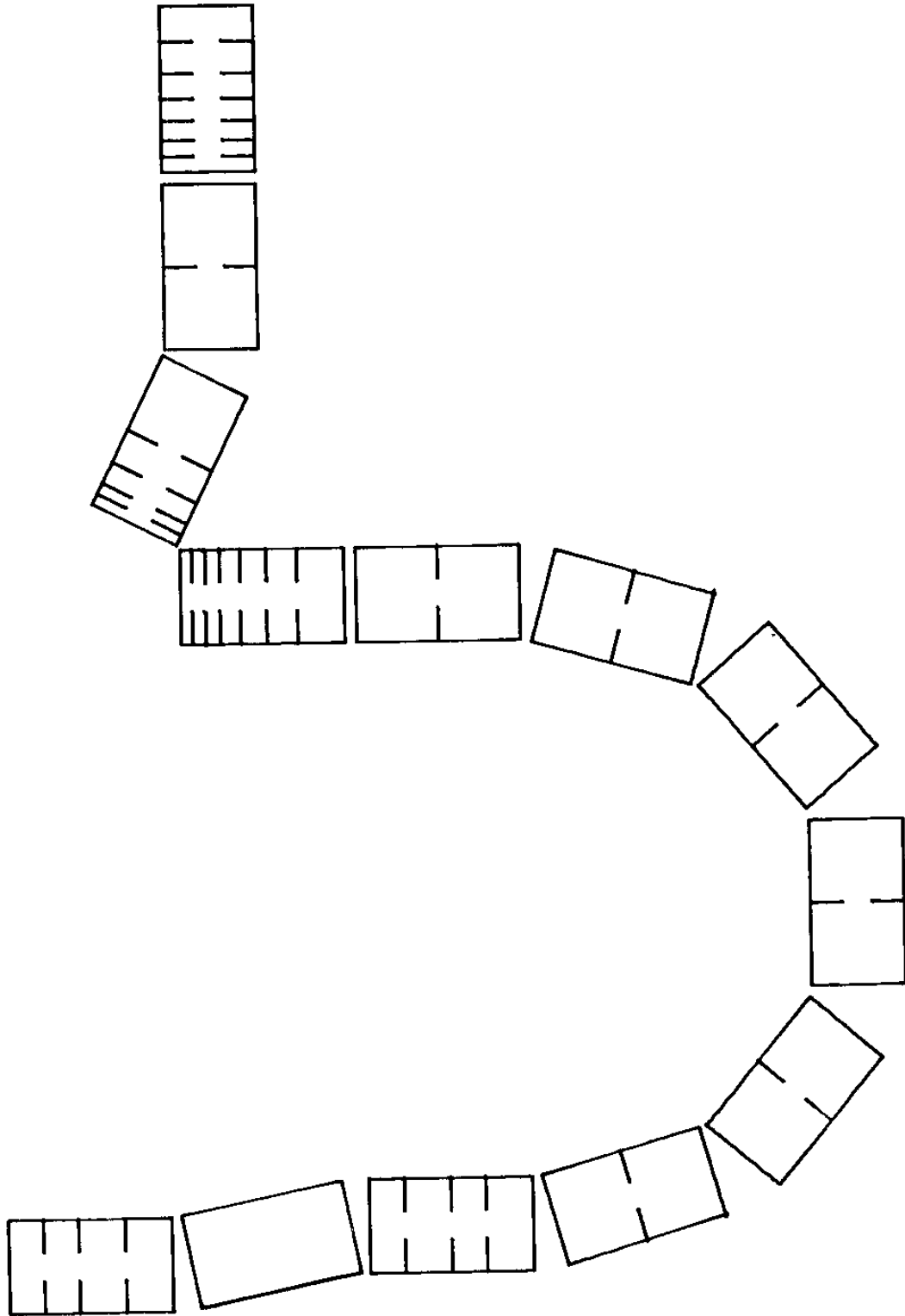


그림 66 ISP-27 모의틀 위한 Intermediate Loop Nodalization

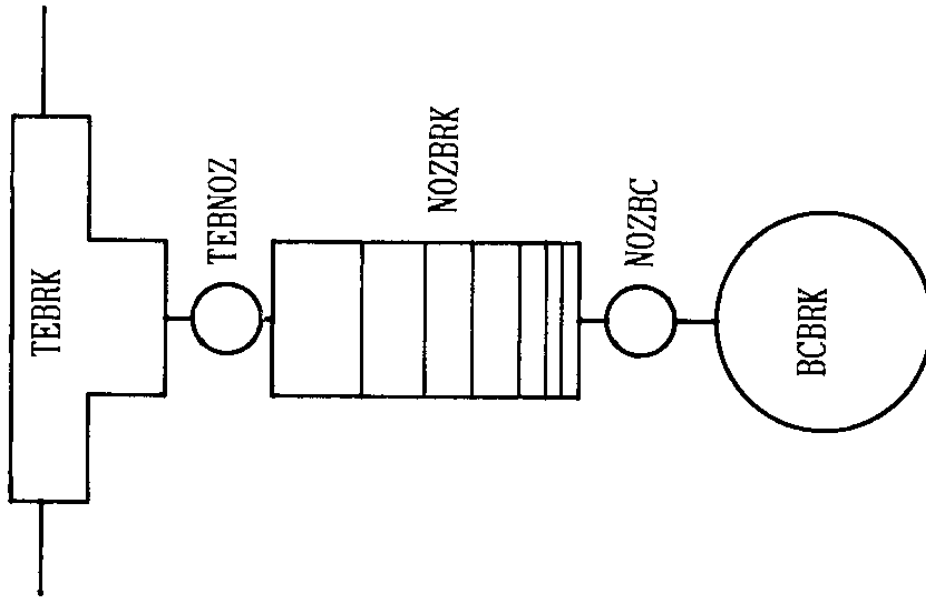


그림 67 ISP-27 모의틀 위한 Break Nozzle Nodalization

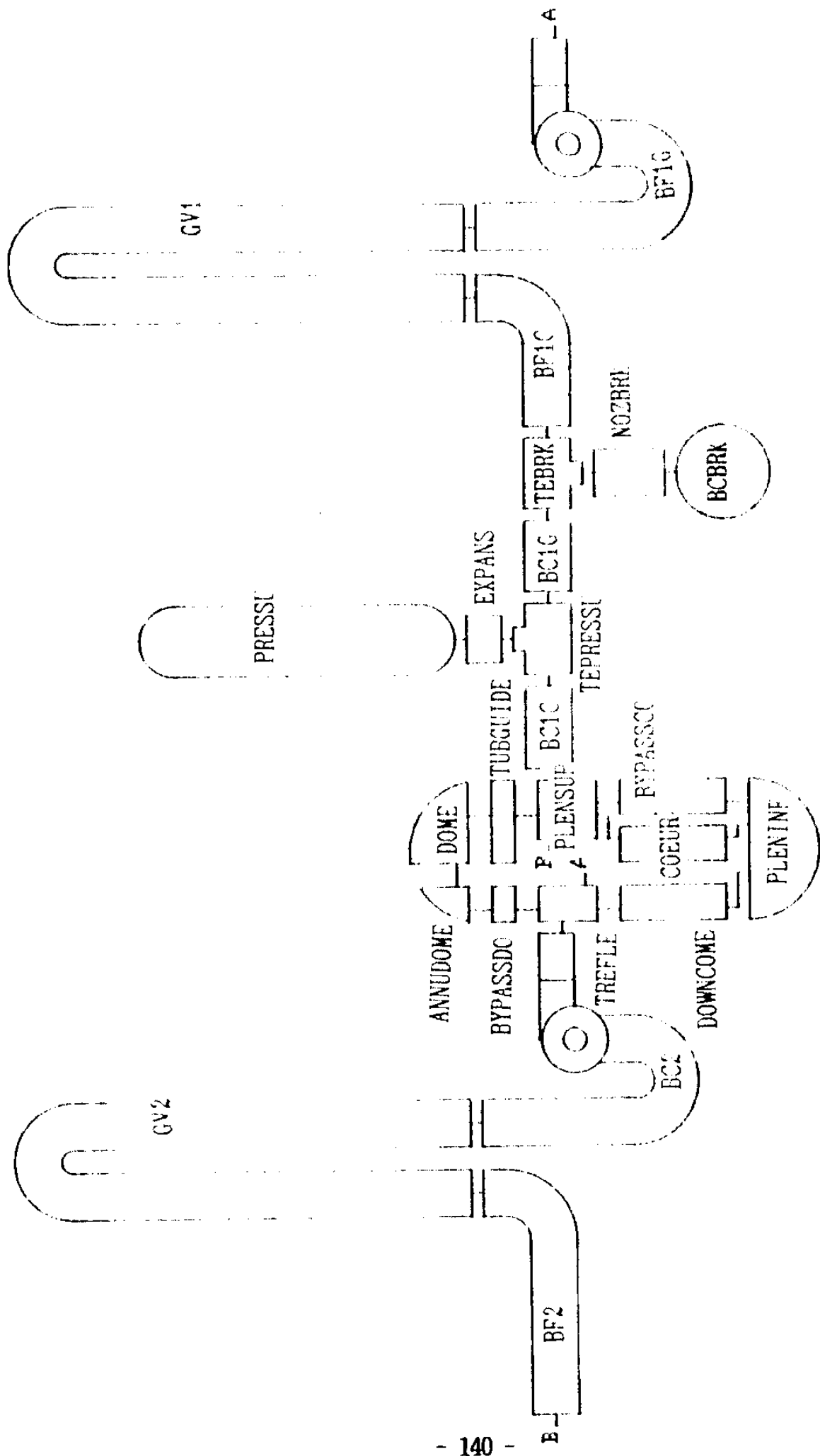


그림 68 단상자연대류 CATHARE 모의를 위한 1차계통 Nodalization

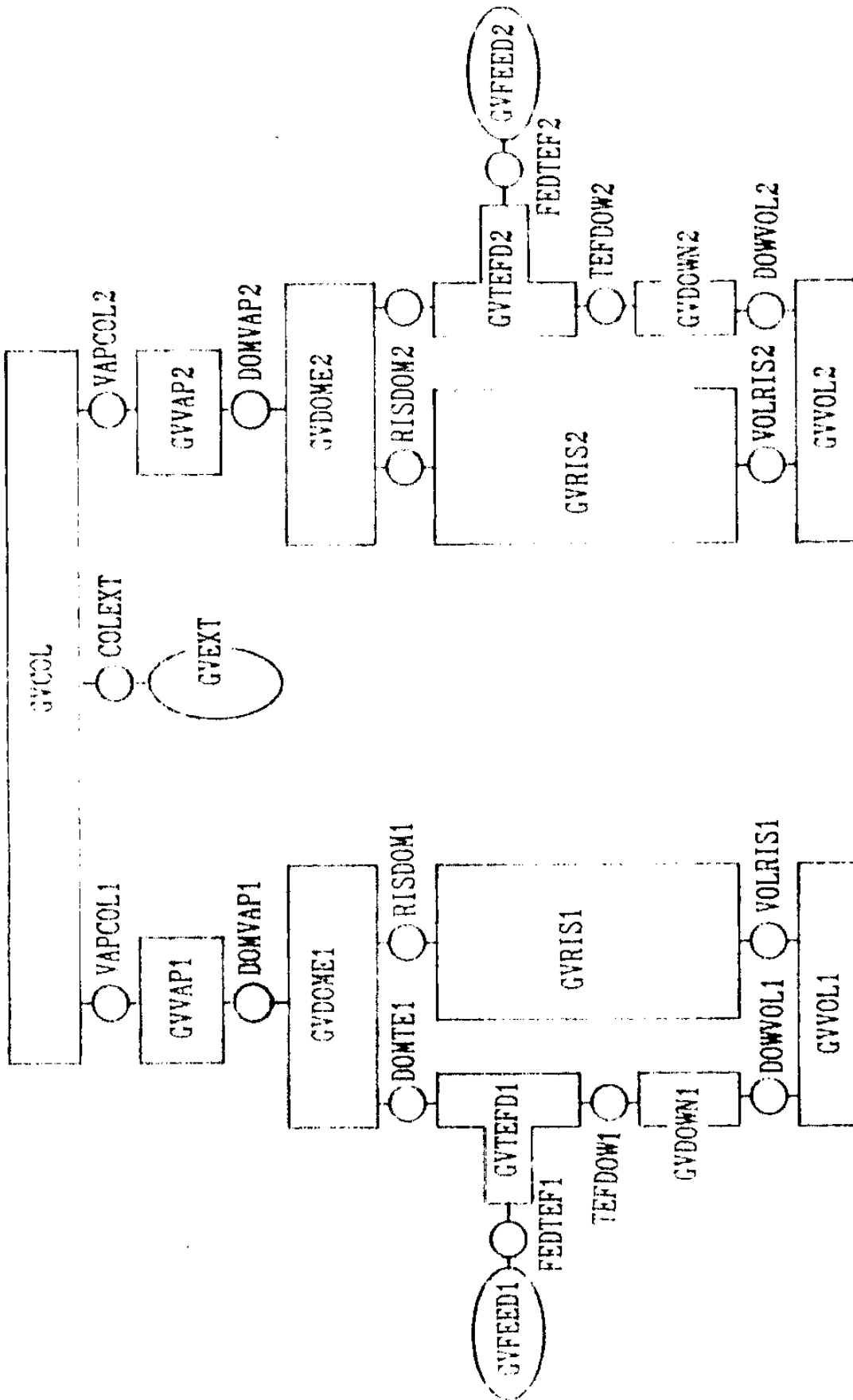
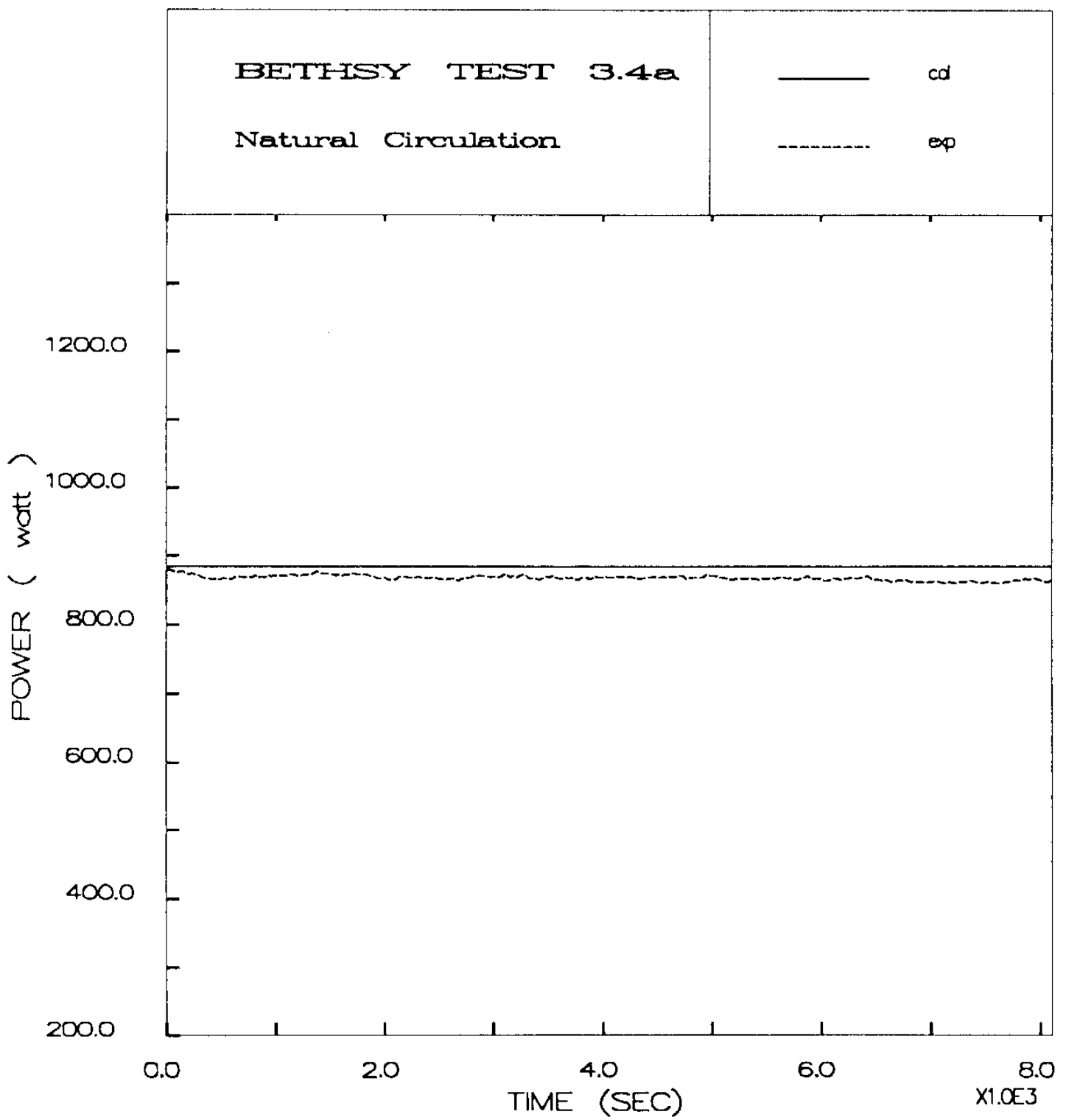
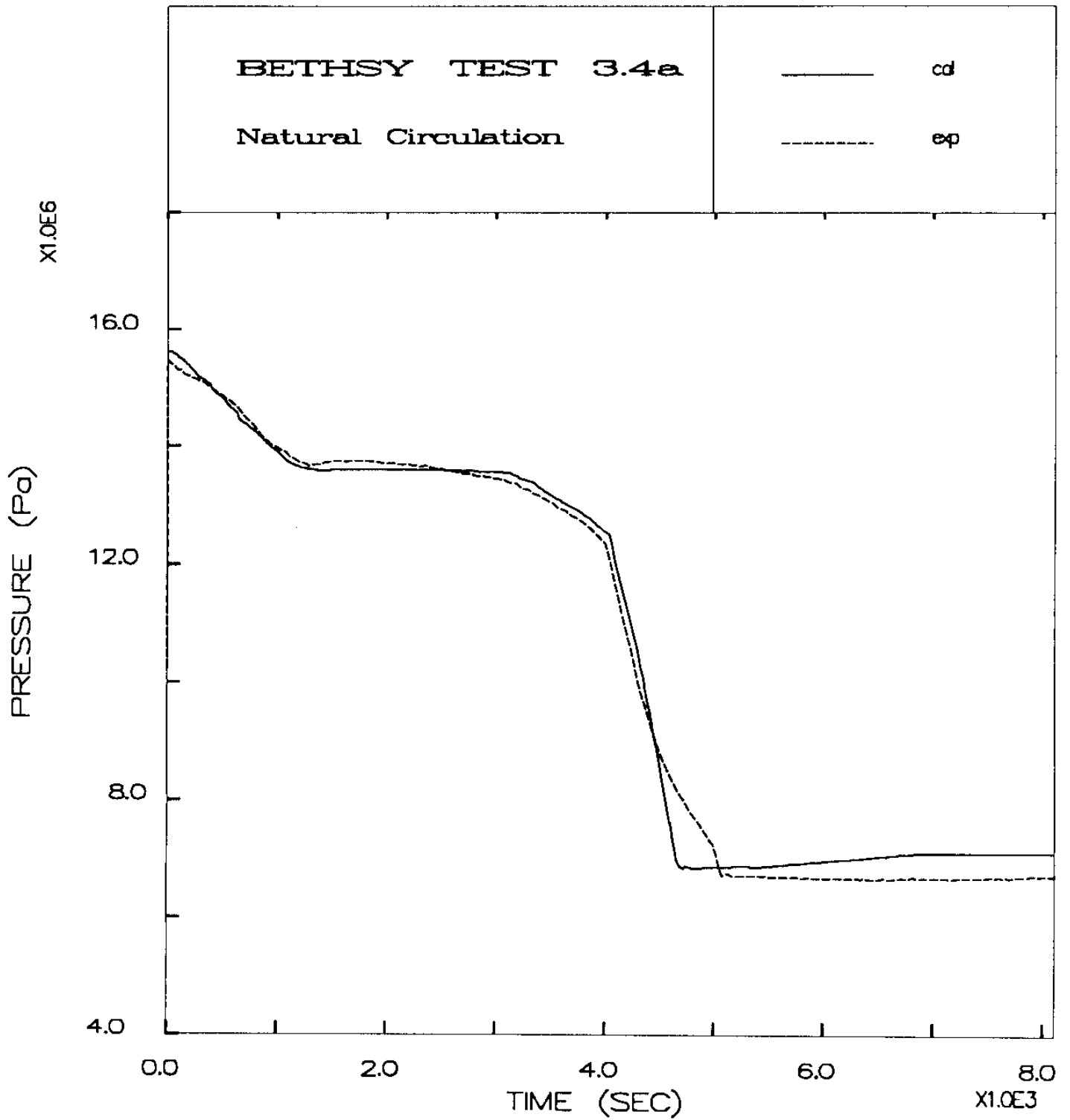


그림 69 단상자연대류 CATHARE 모의를 위한 2차계통 Nodalization



그 림 70 단상자연대류의 노심 열출력



그 립 71 단상자연대류의 가압기 압력

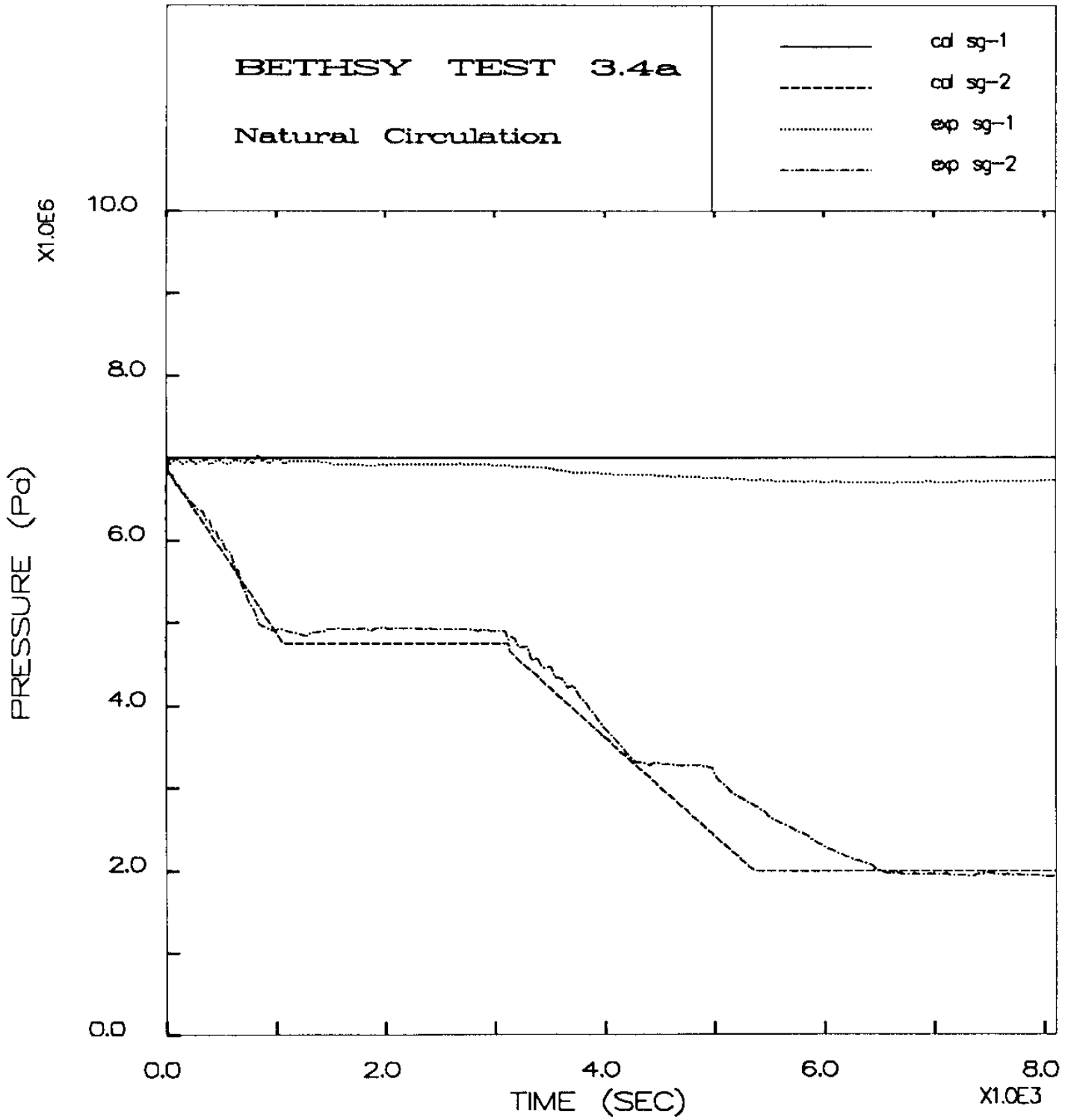


그림 72 단상자연대류의 증기발생기 압력

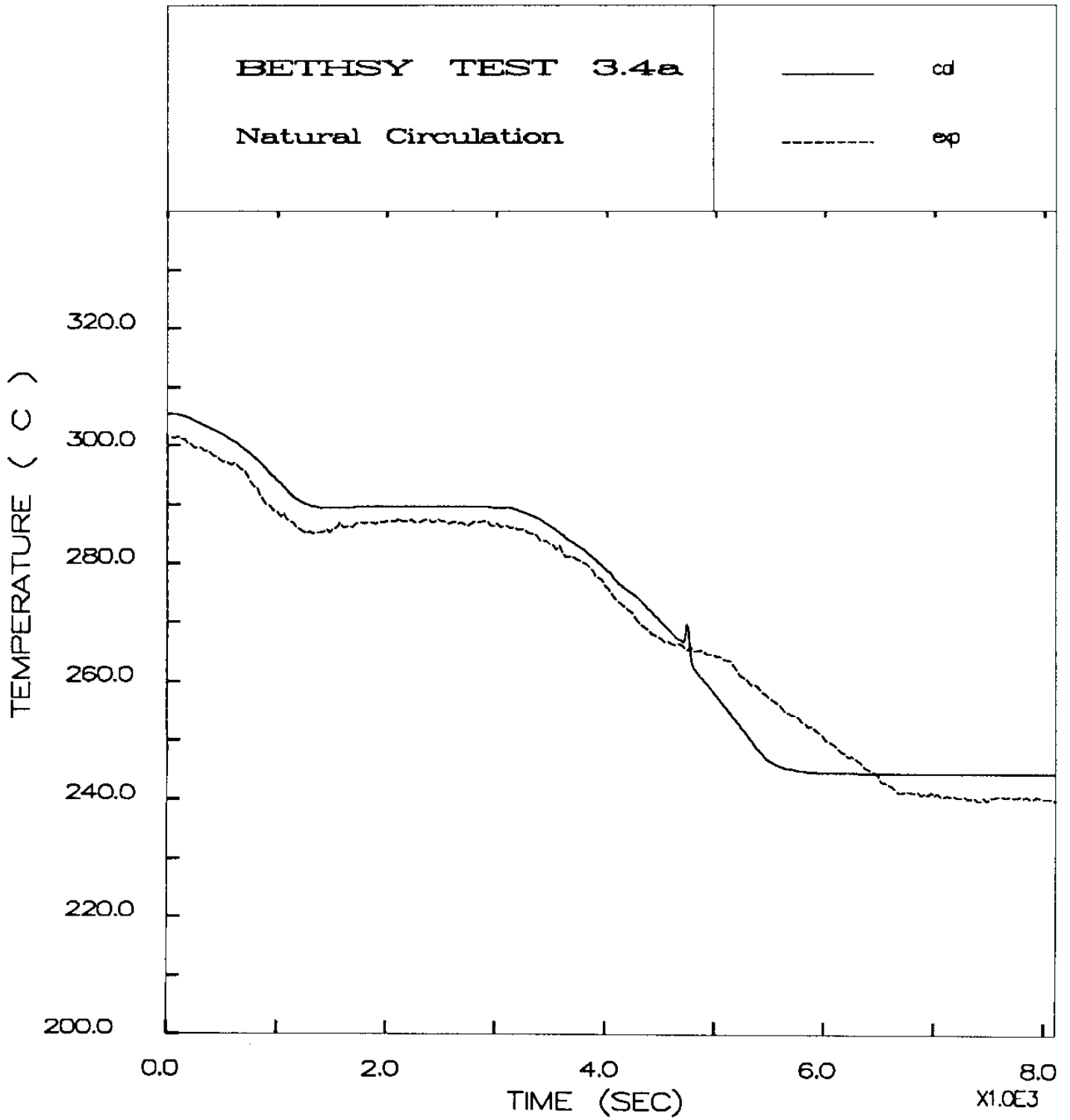
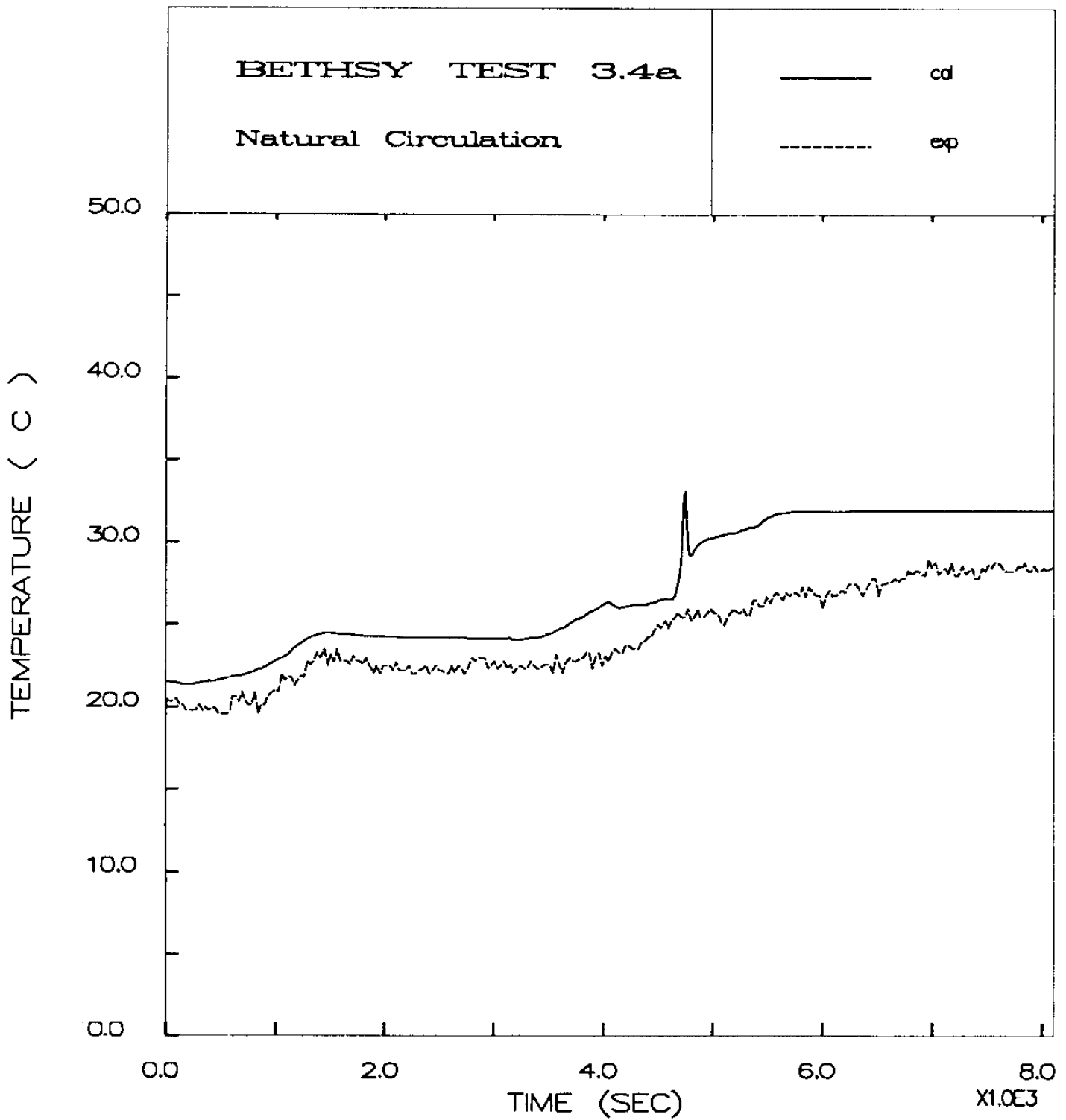


그림 73 단상자연대류의 노심 출구온도



그 림 74 단상자연대류의 노심 입.출구 온도차이

BETHSY TEST 3.4a

Natural Circulation

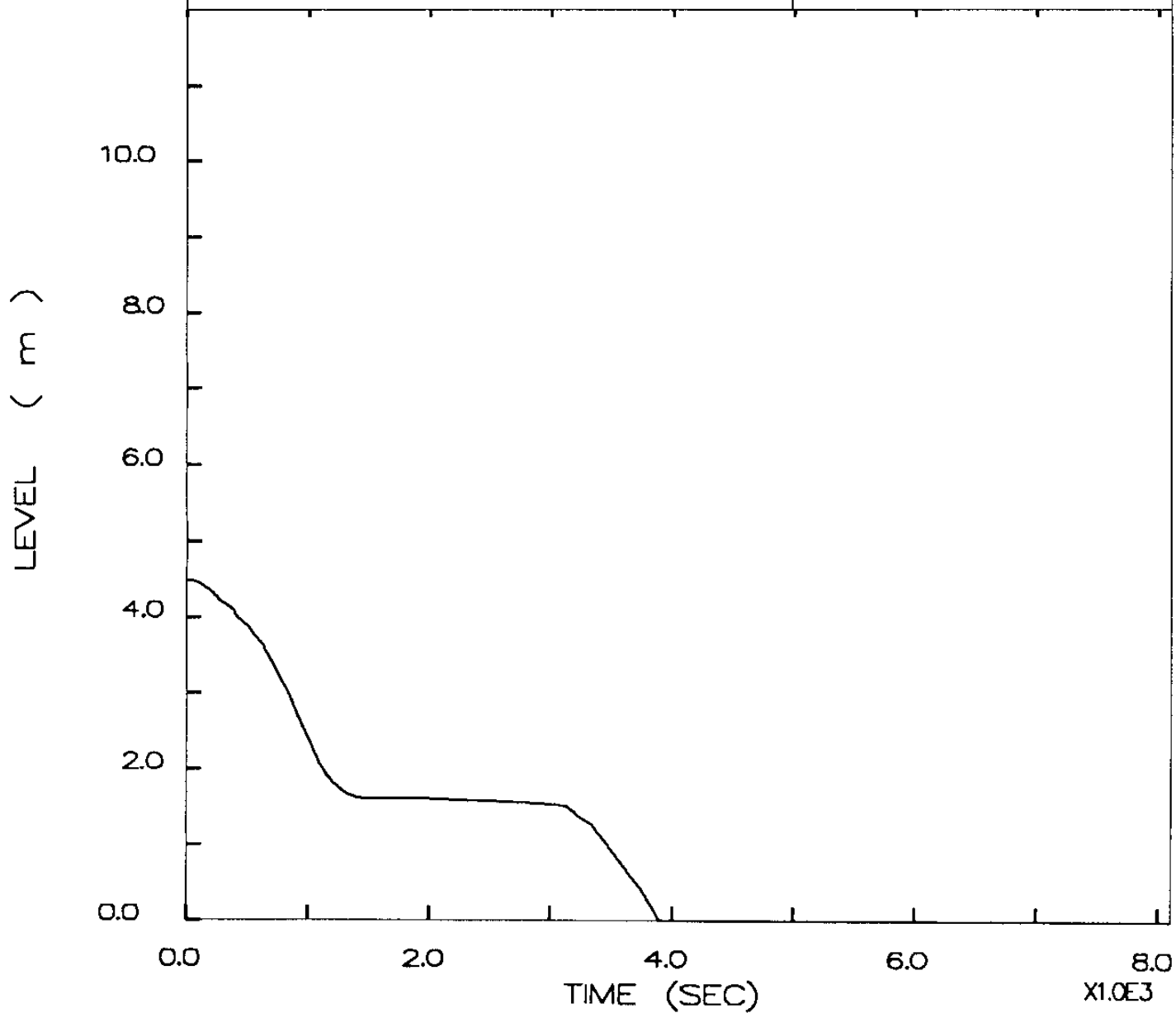


그림 75 단상자연대류의 가압기 수위

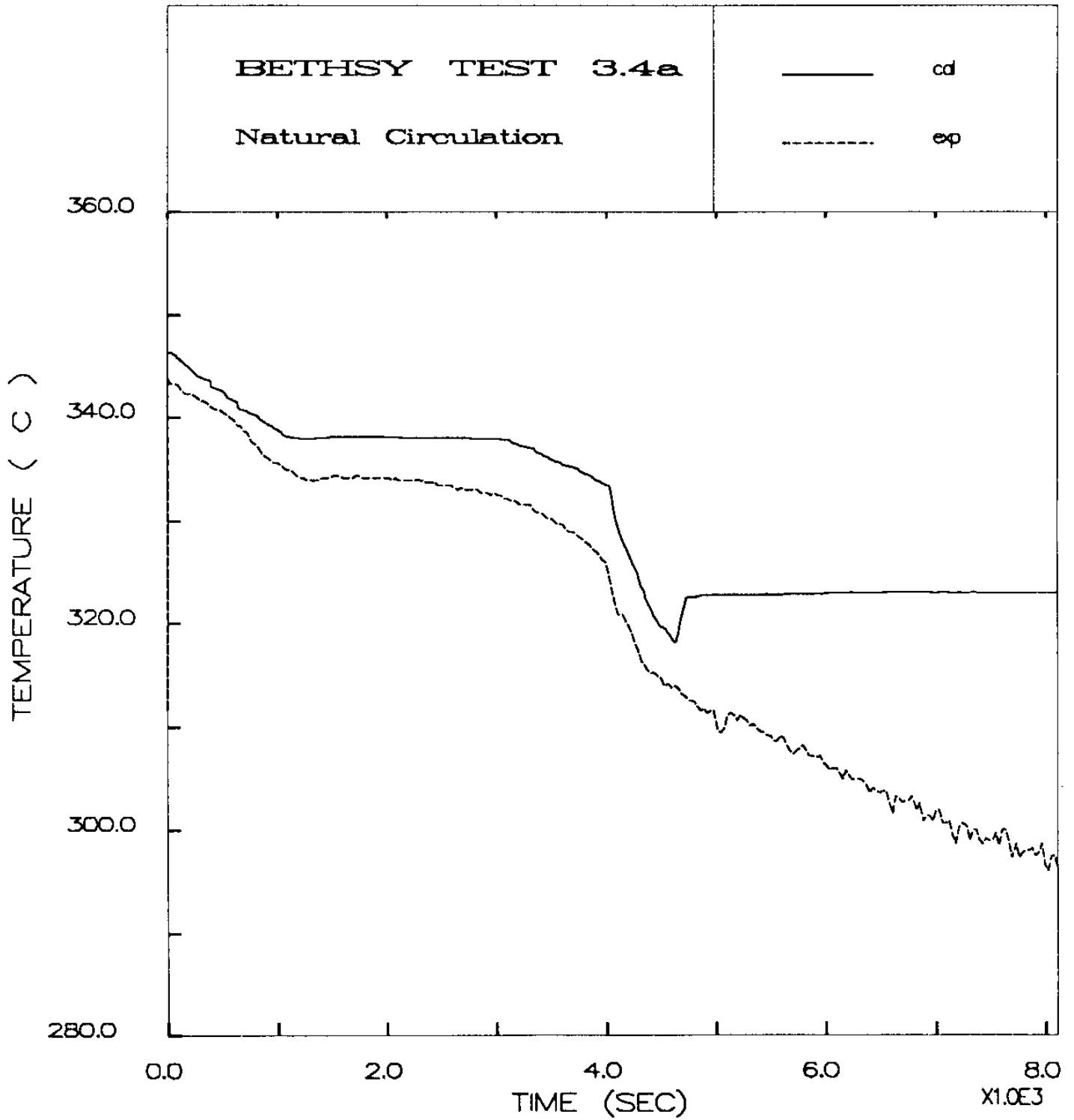


그림 76 단상자연대류의 가압기의 증기부분 온도

BETHSY TEST 3.4a

Natural Circulation

—	cal b-1
- - -	cal b-2
.....	exp b-1
- . - . -	exp b-2

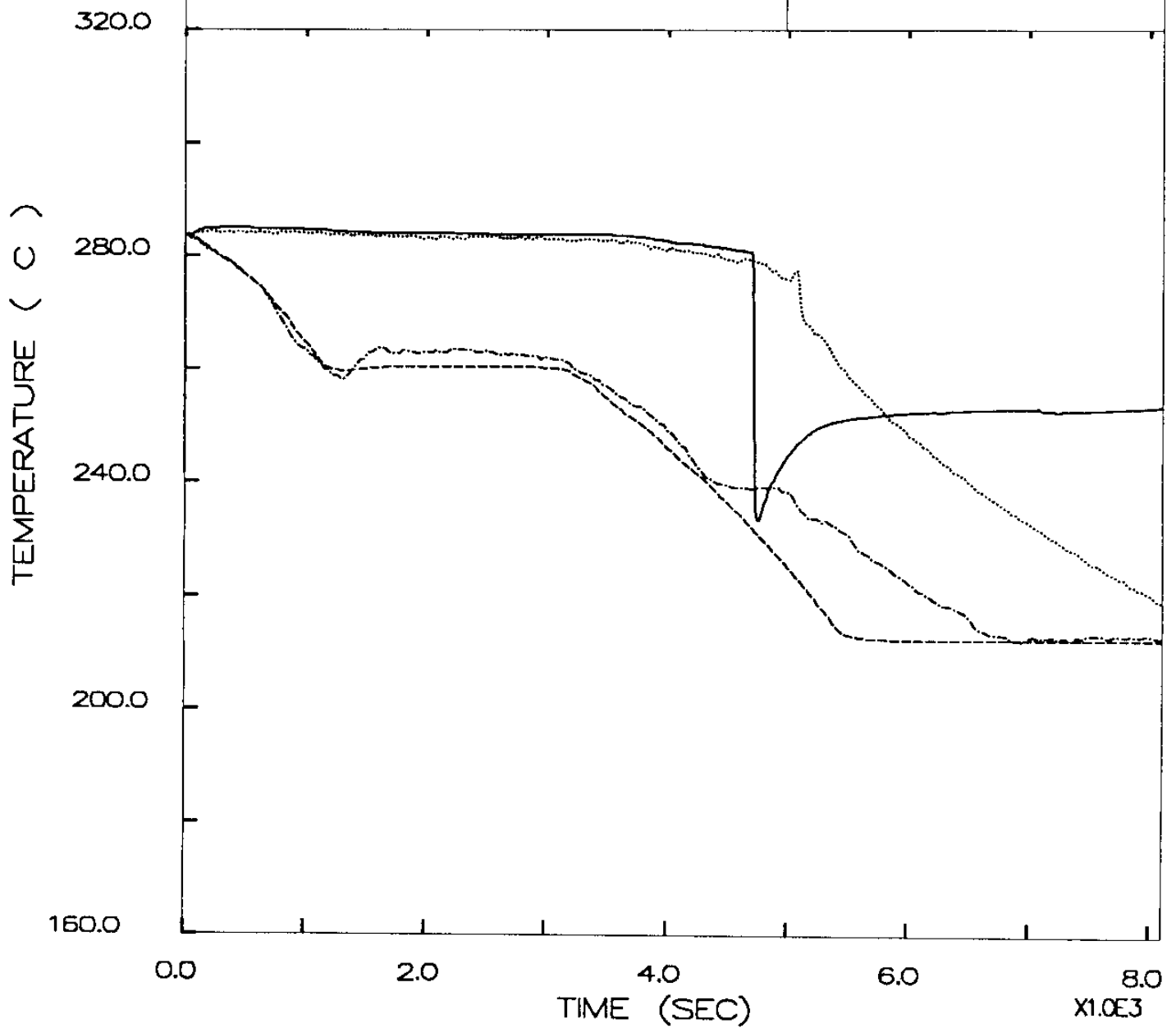
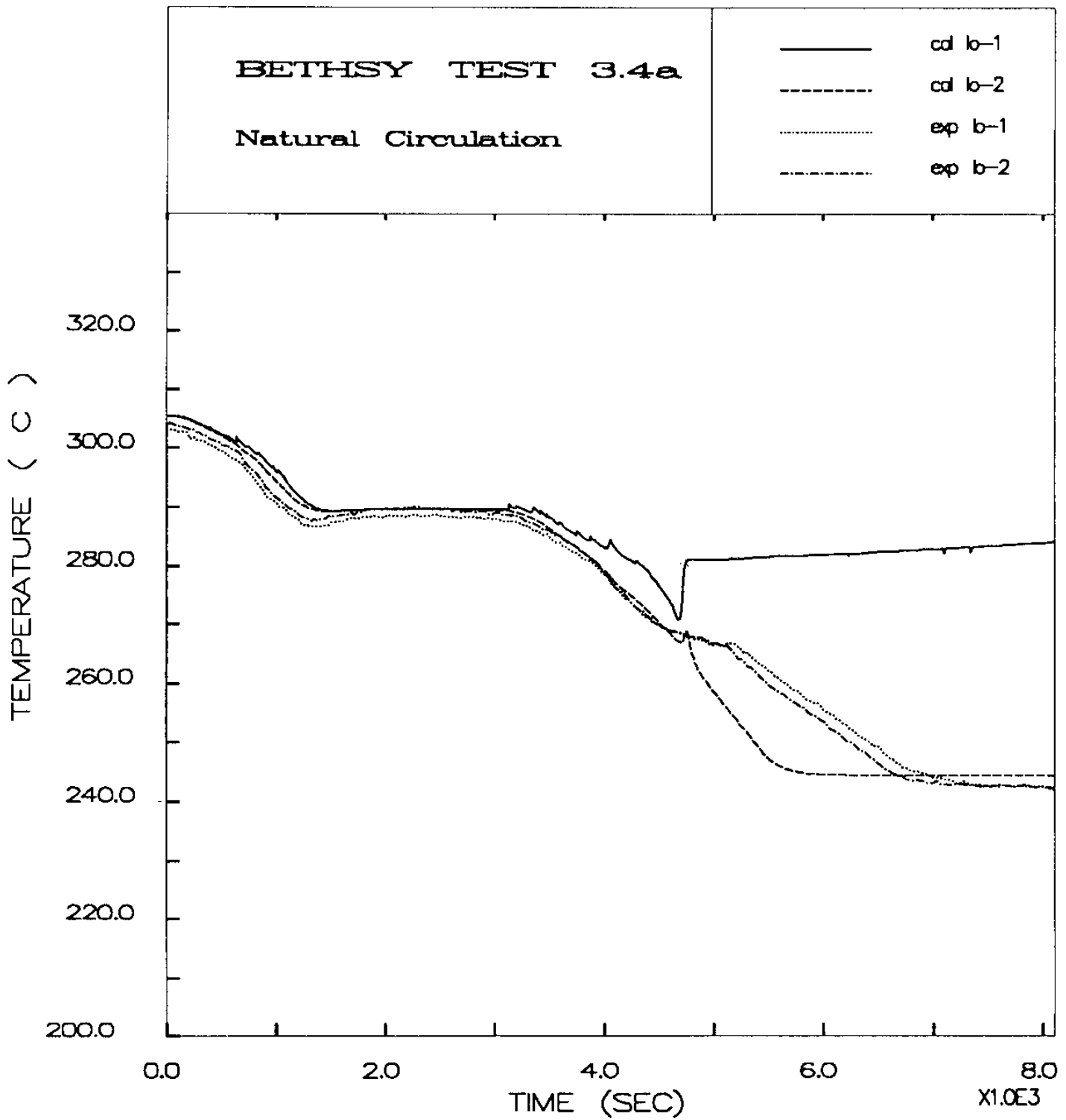


그림 77 단상자연대류의 저온관의 온도변화



그 립 78 단상자연대류의 고온관 온도(BC1C)

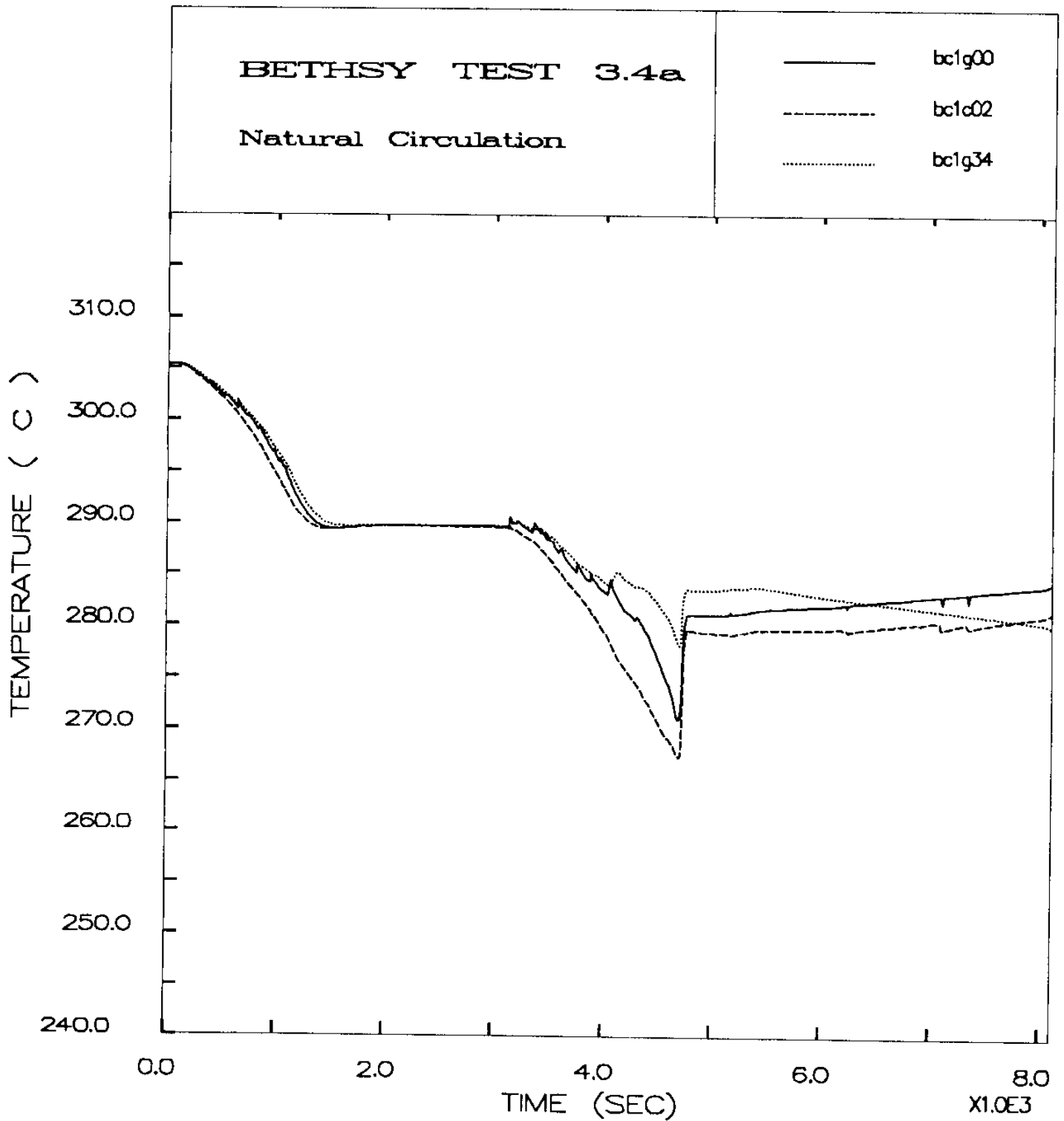
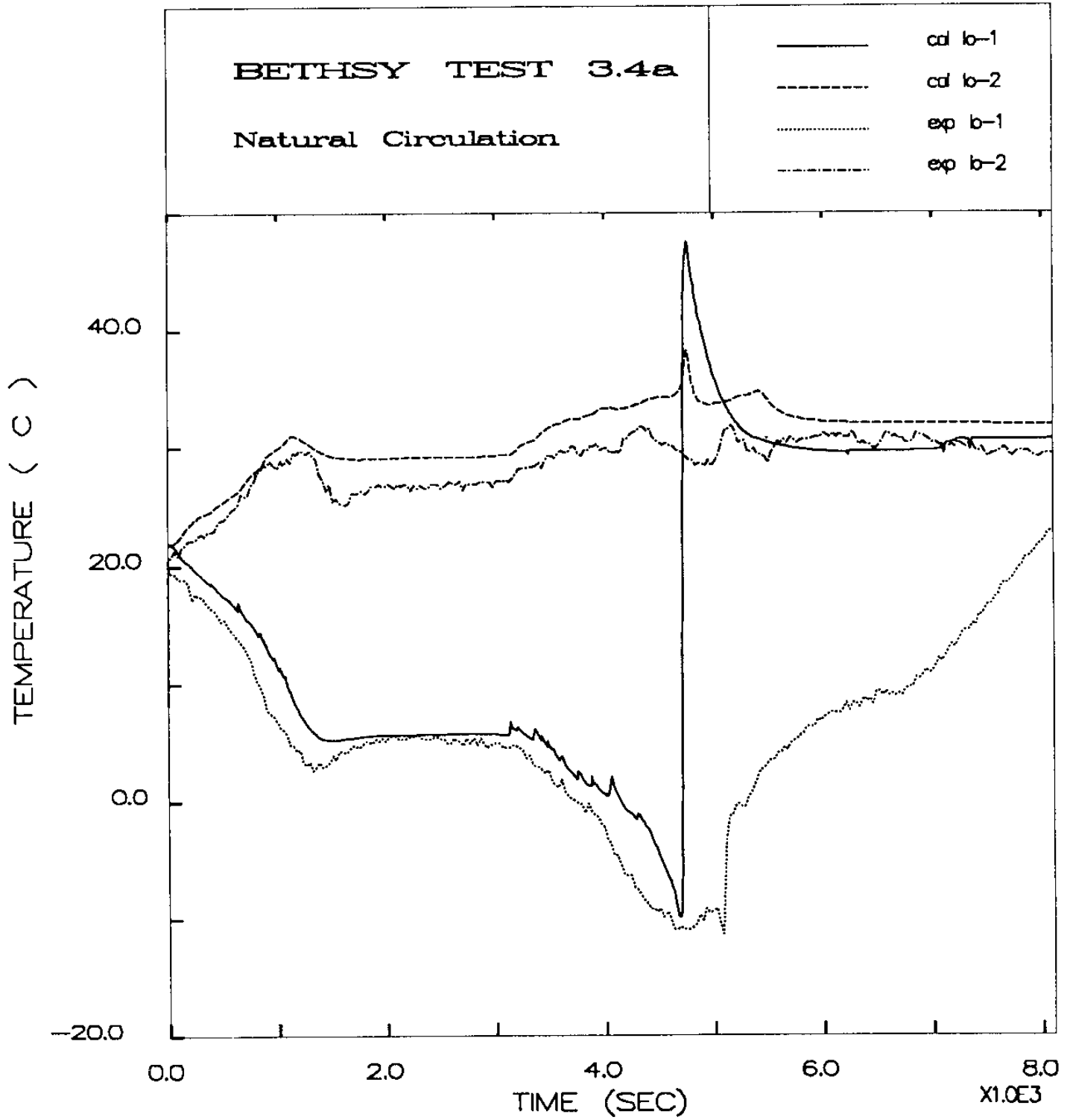


그림 79 단상자연대류의 고온관 온도(BC1G)



그 립 80 단상자연대류의 고온관과 저온관의 온도차이

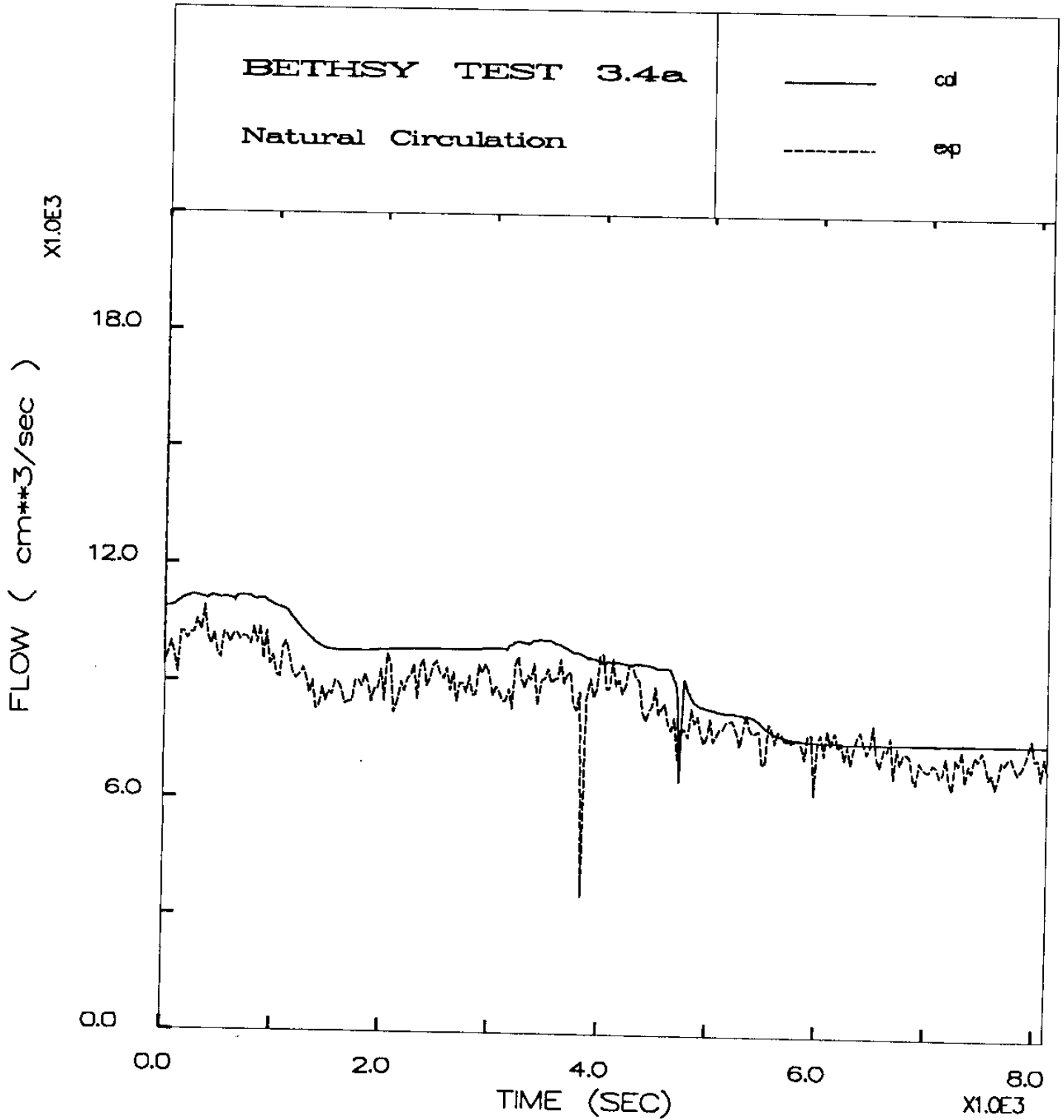


그림 81 단상자연대류의 Downcomer 체적유량

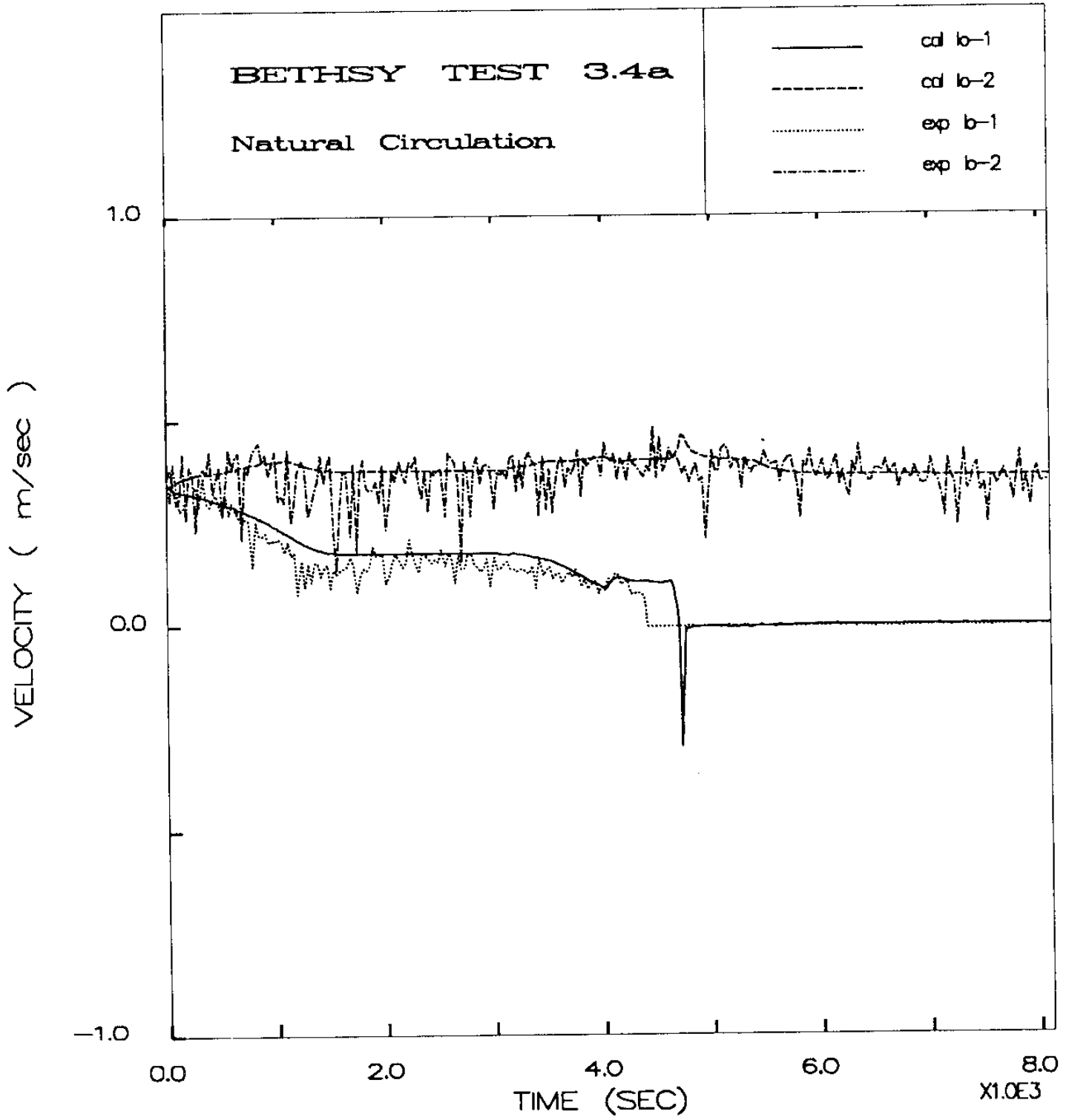


그림 82 단상자연대류의 고온관에서 액체속도

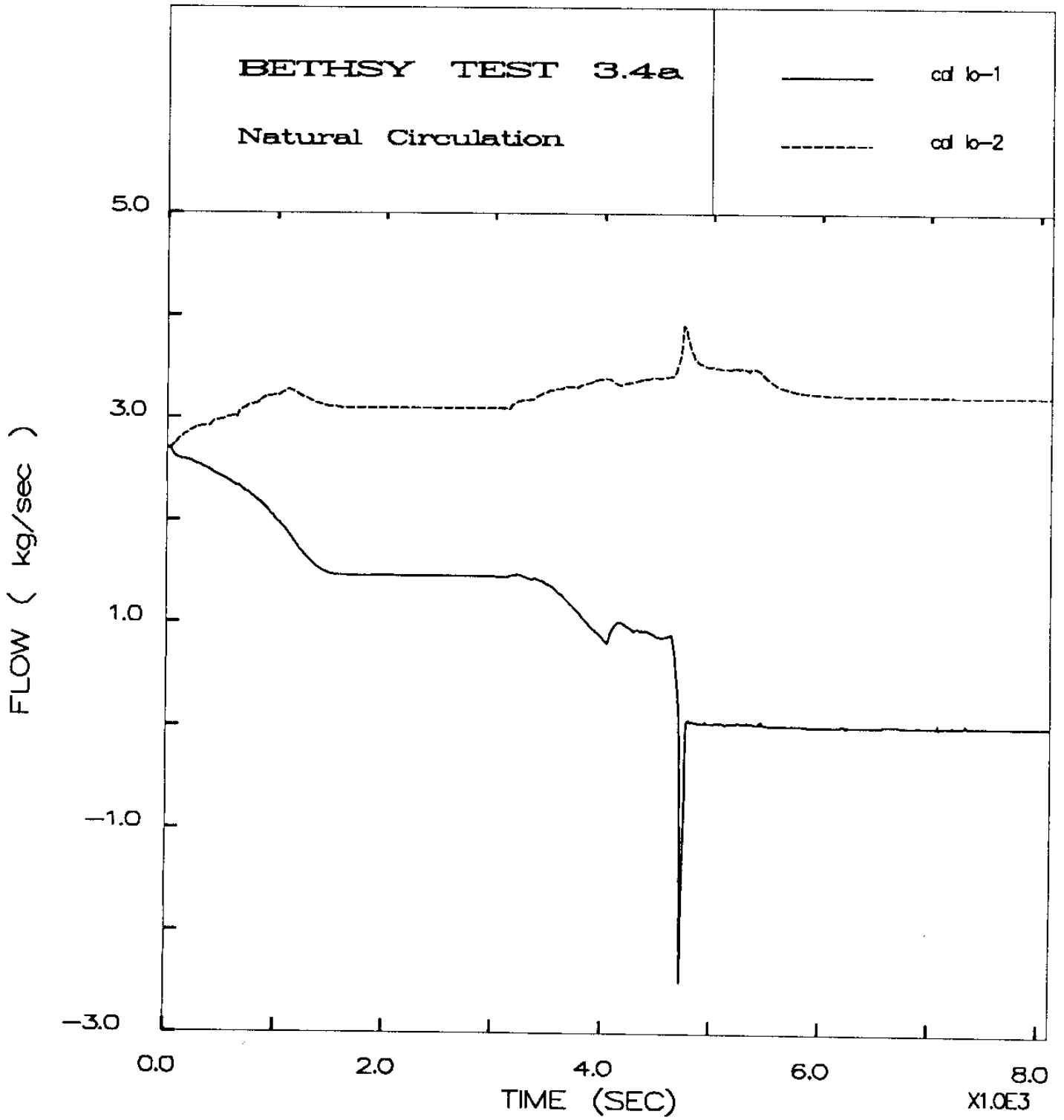


그림 83 단상자연대류의 저온관에서 질량유량

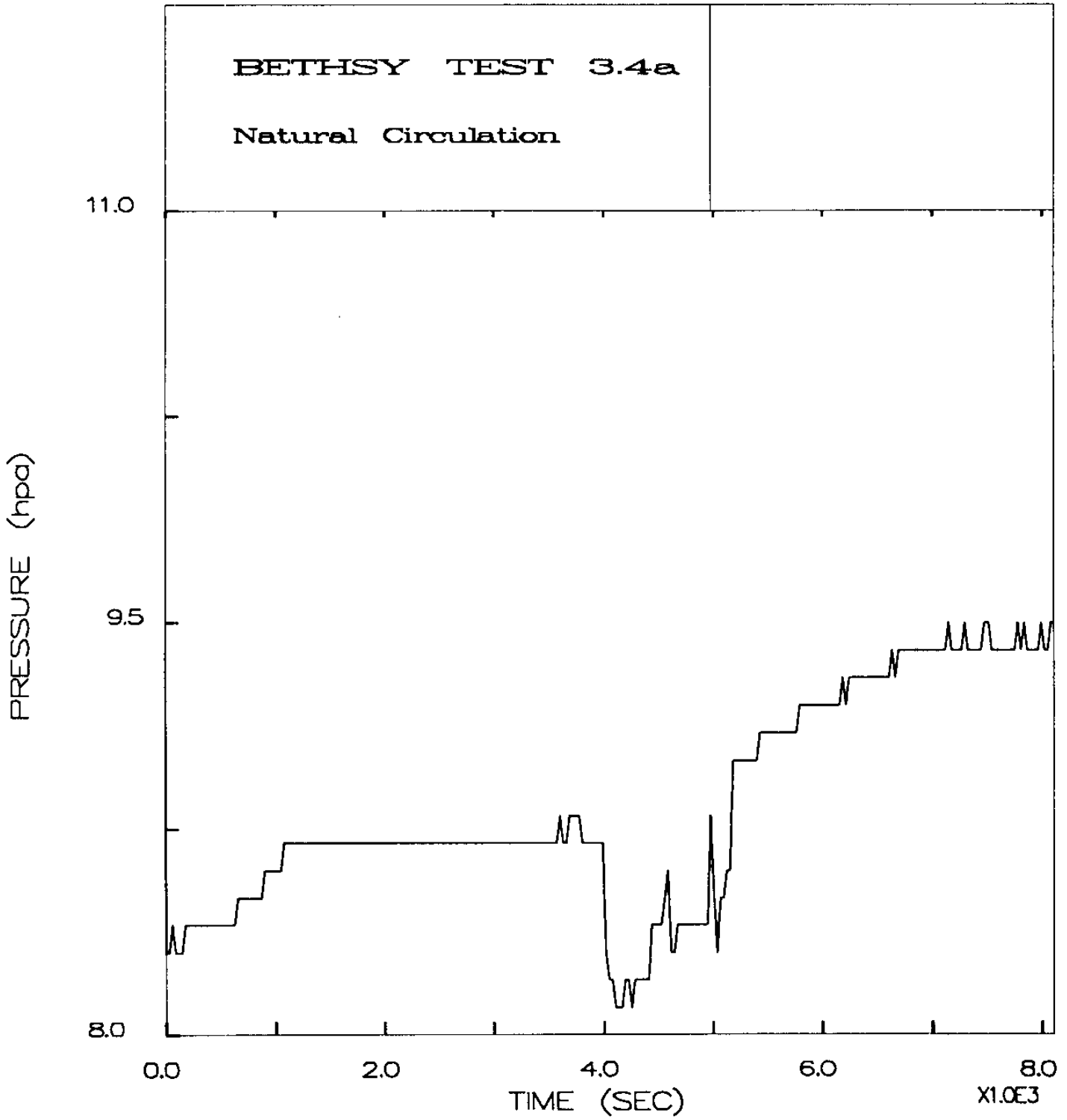
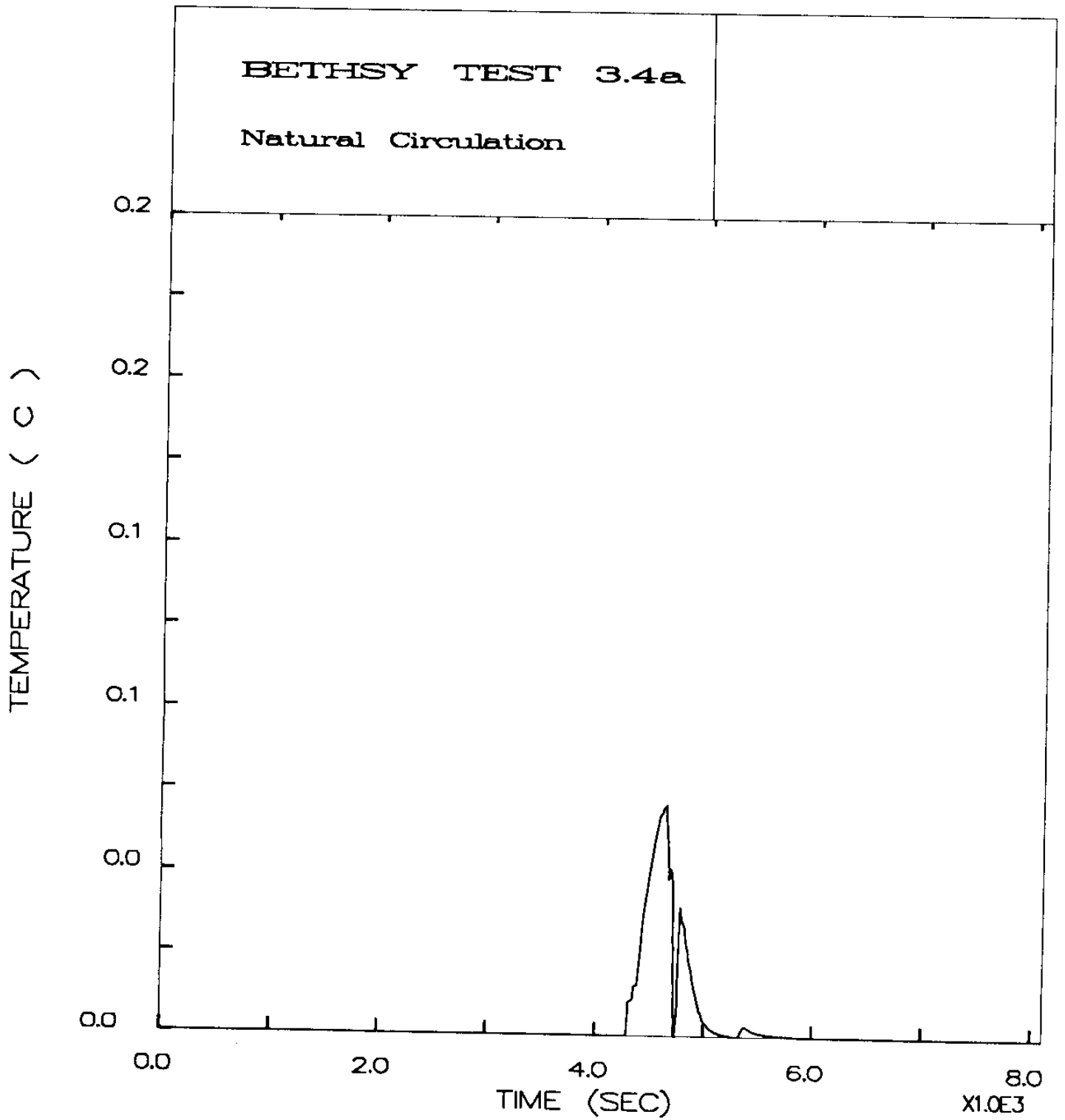
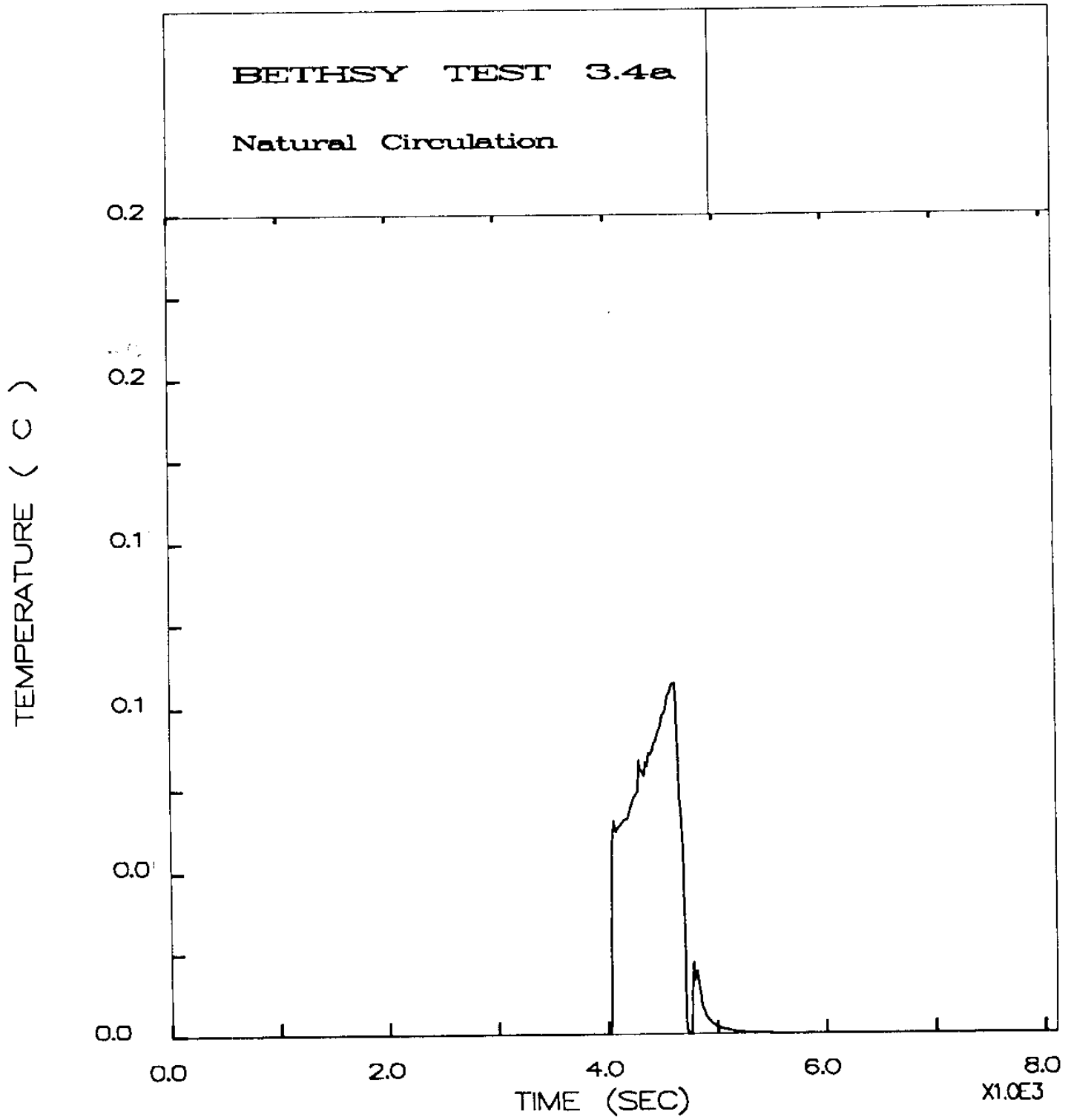


그림 84 단상자연대류의 고온관1의 높이방향 압력차이(BC1C)



그 립 85 단상자연대류의 고온관1의 기포율(BC1C)



그 림 86 단상자연대류의 고온관2의 기포율(BC1G)

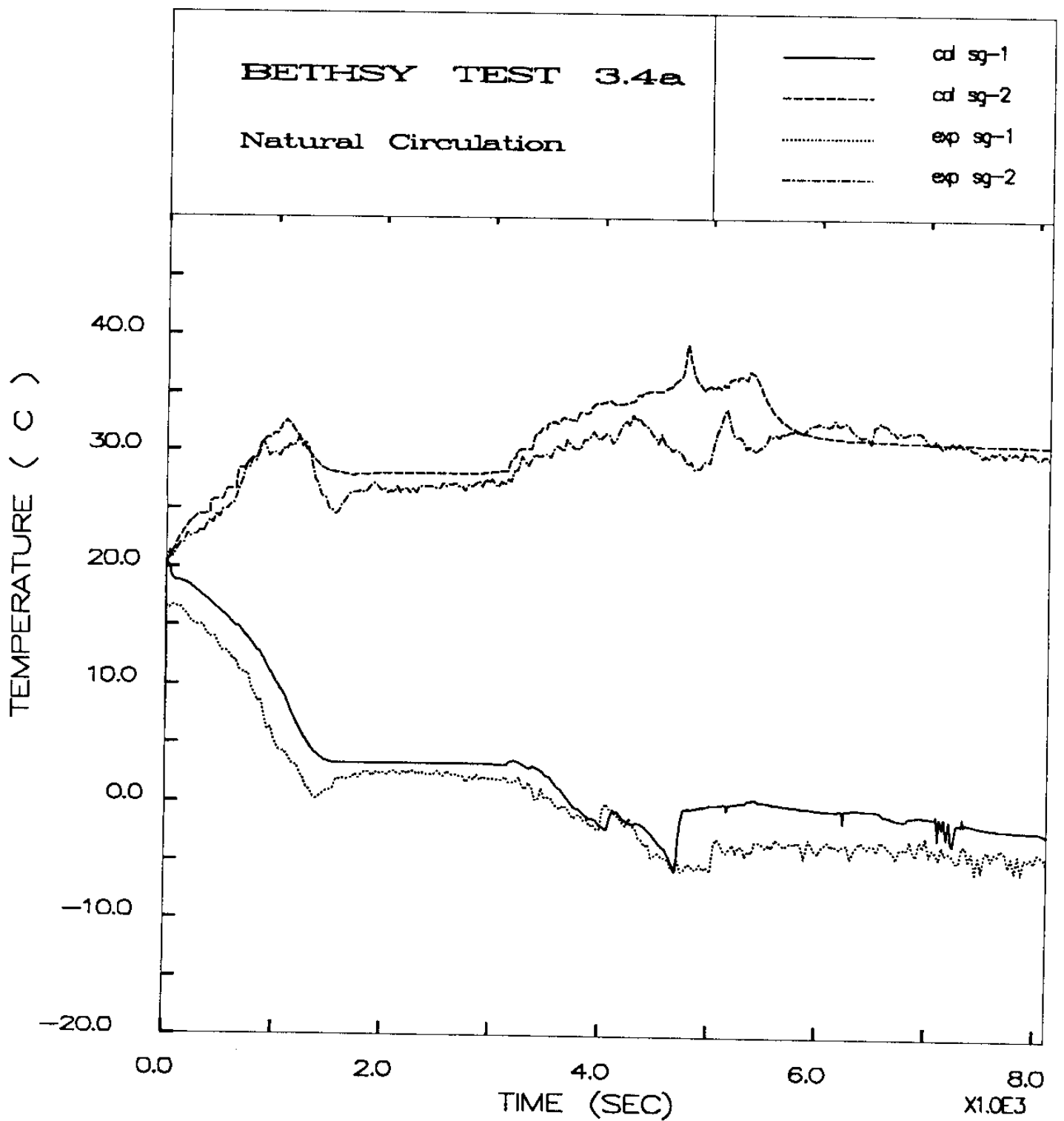
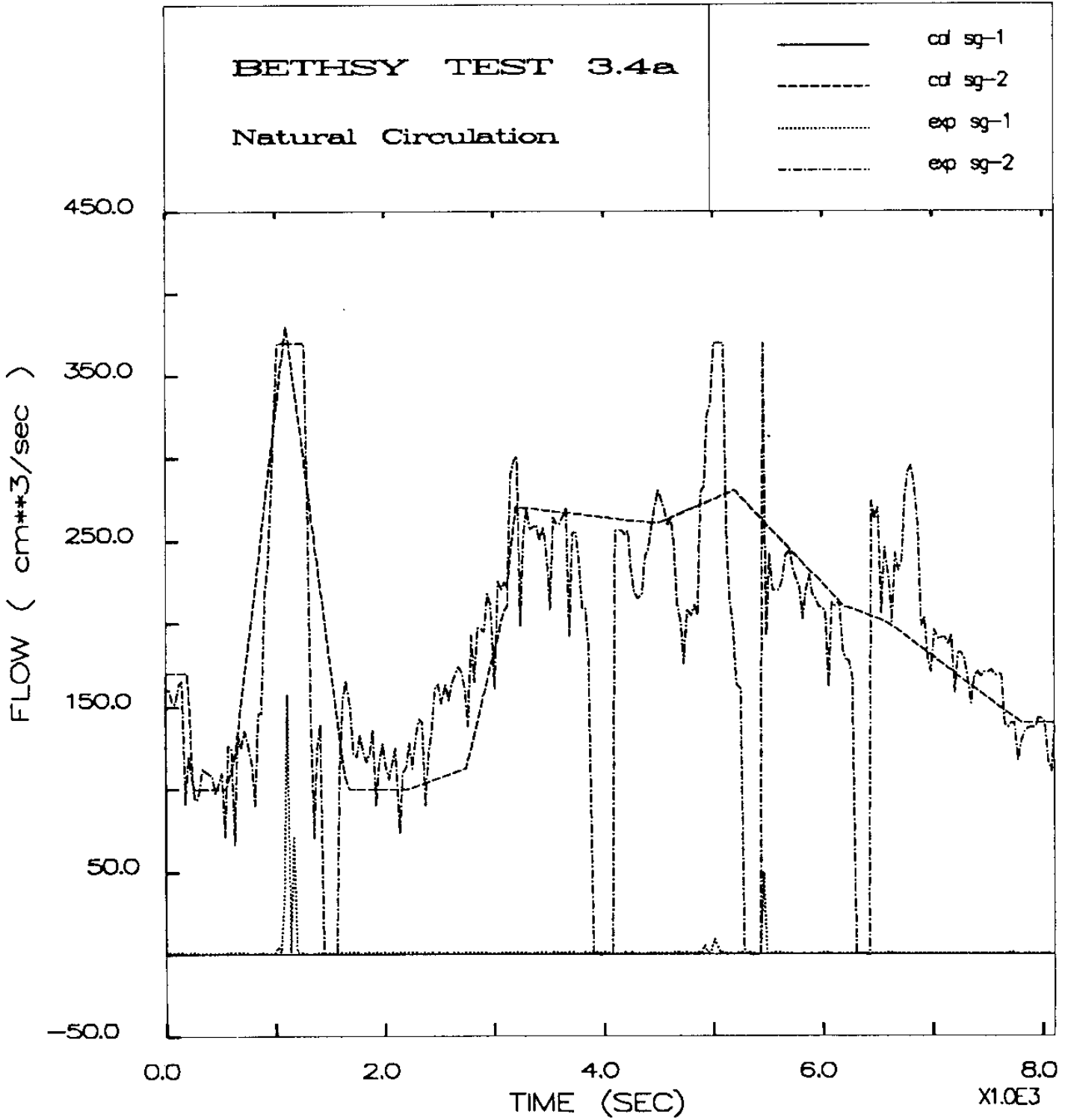
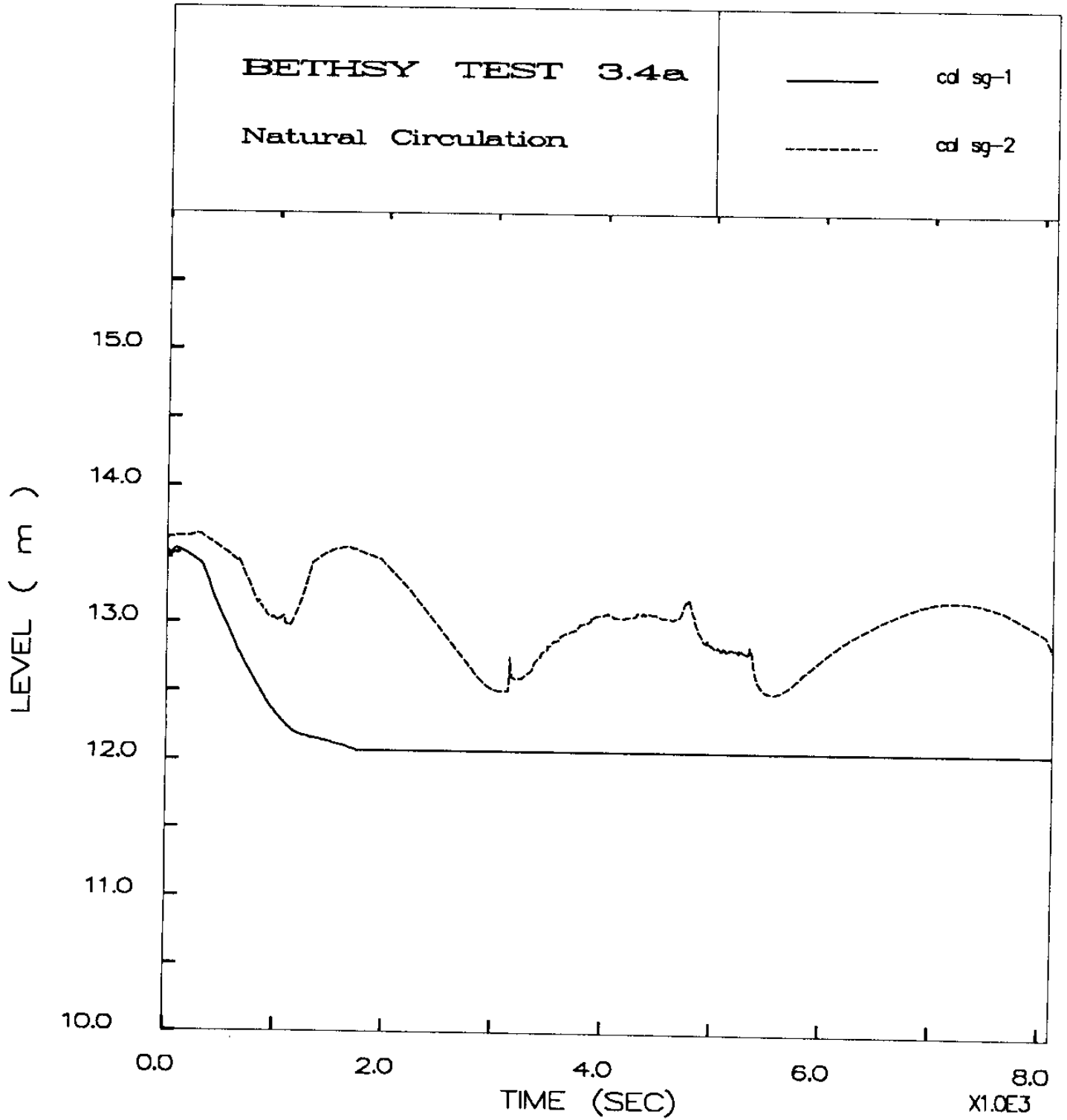


그림 87 단상자연대류의 증기발생기 전열관의 입.출구 온도차이



그 립 88 단상자연대류의 주급수량



그 립 89 단상자연대류의 증기발생기 수위변화

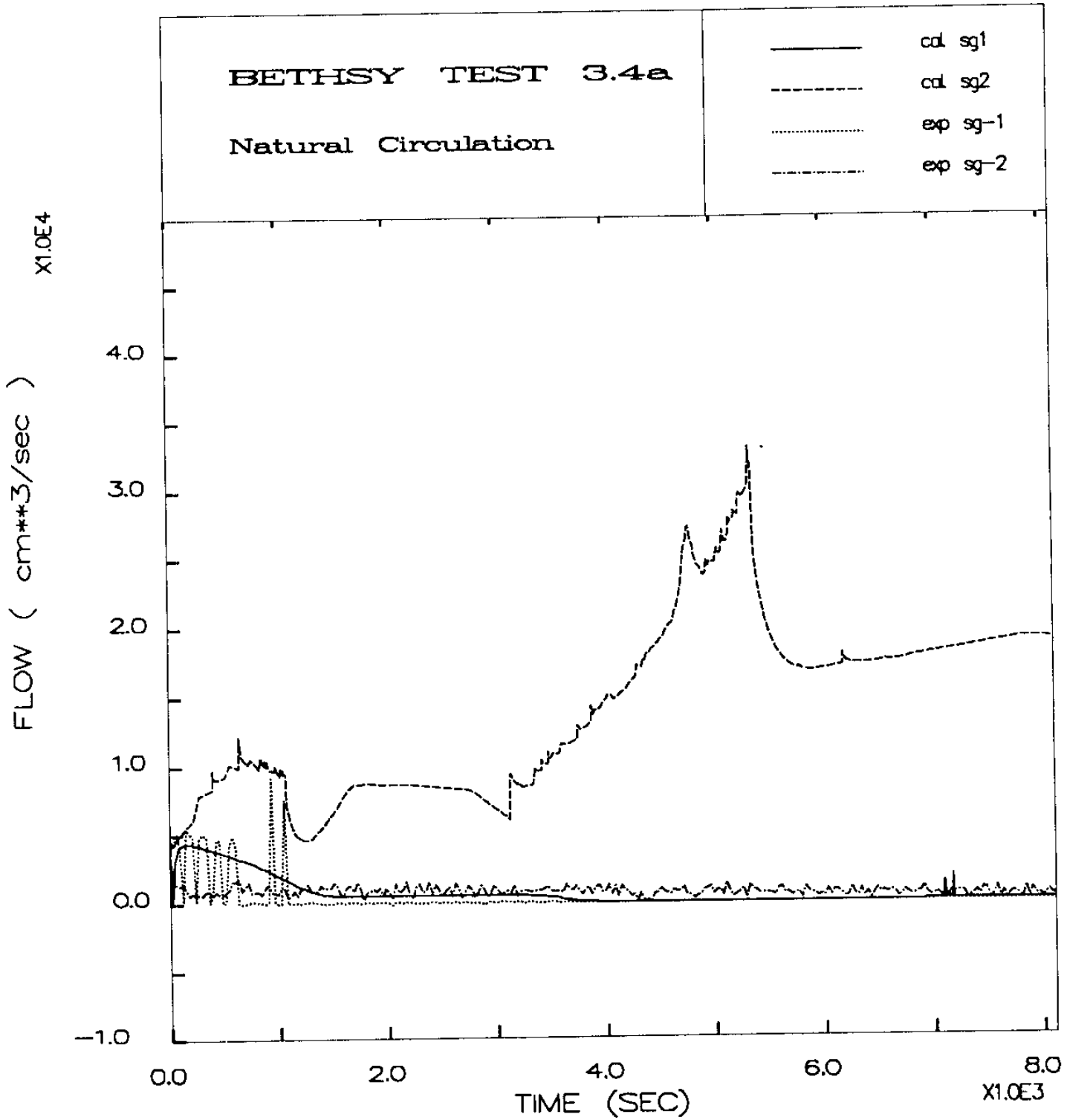


그림 90 단상자연대류의 증기발생기의 증기유량

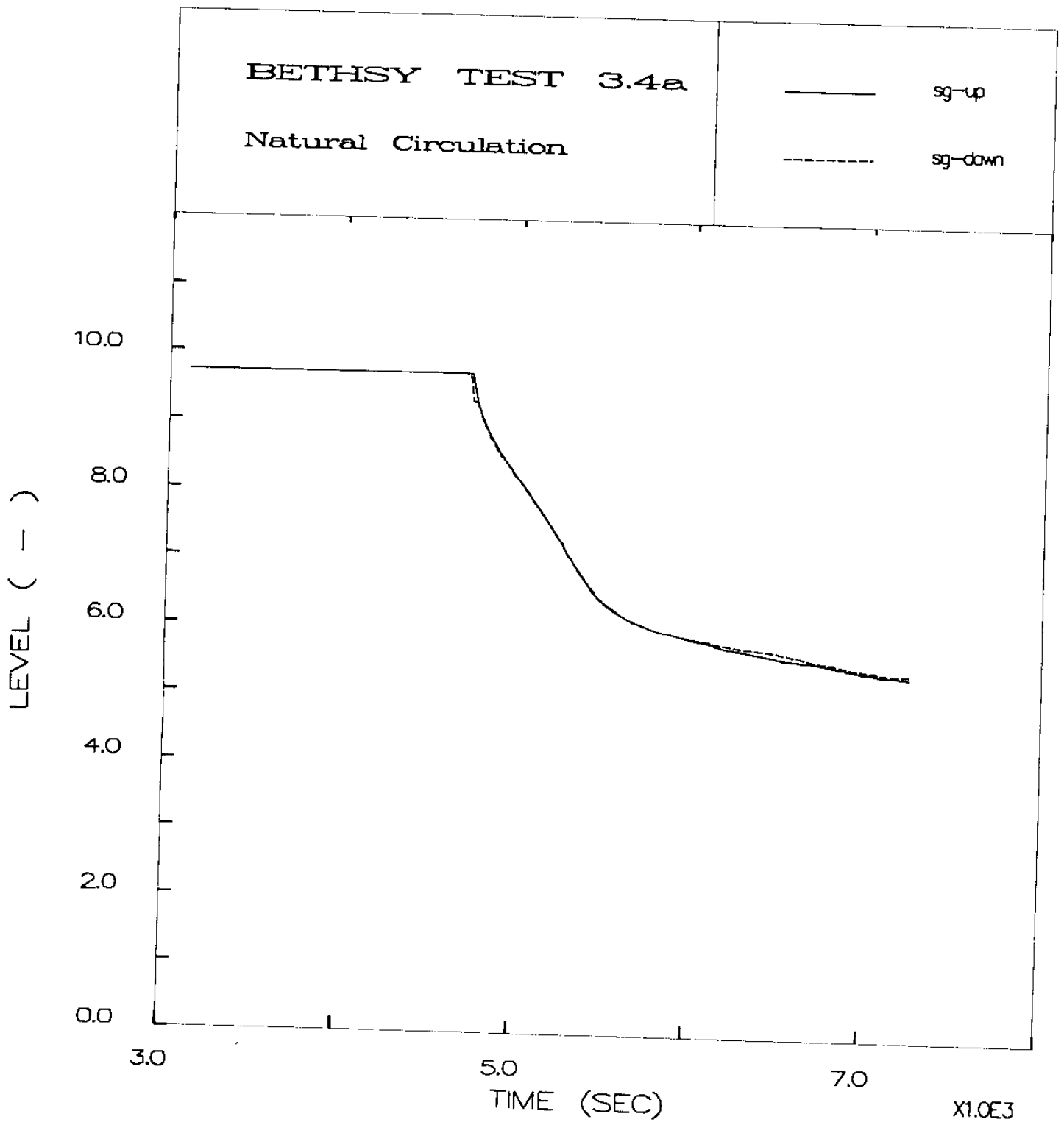


그림 91 단상자연대류의 SG1 전열관의 Collapsed 수위

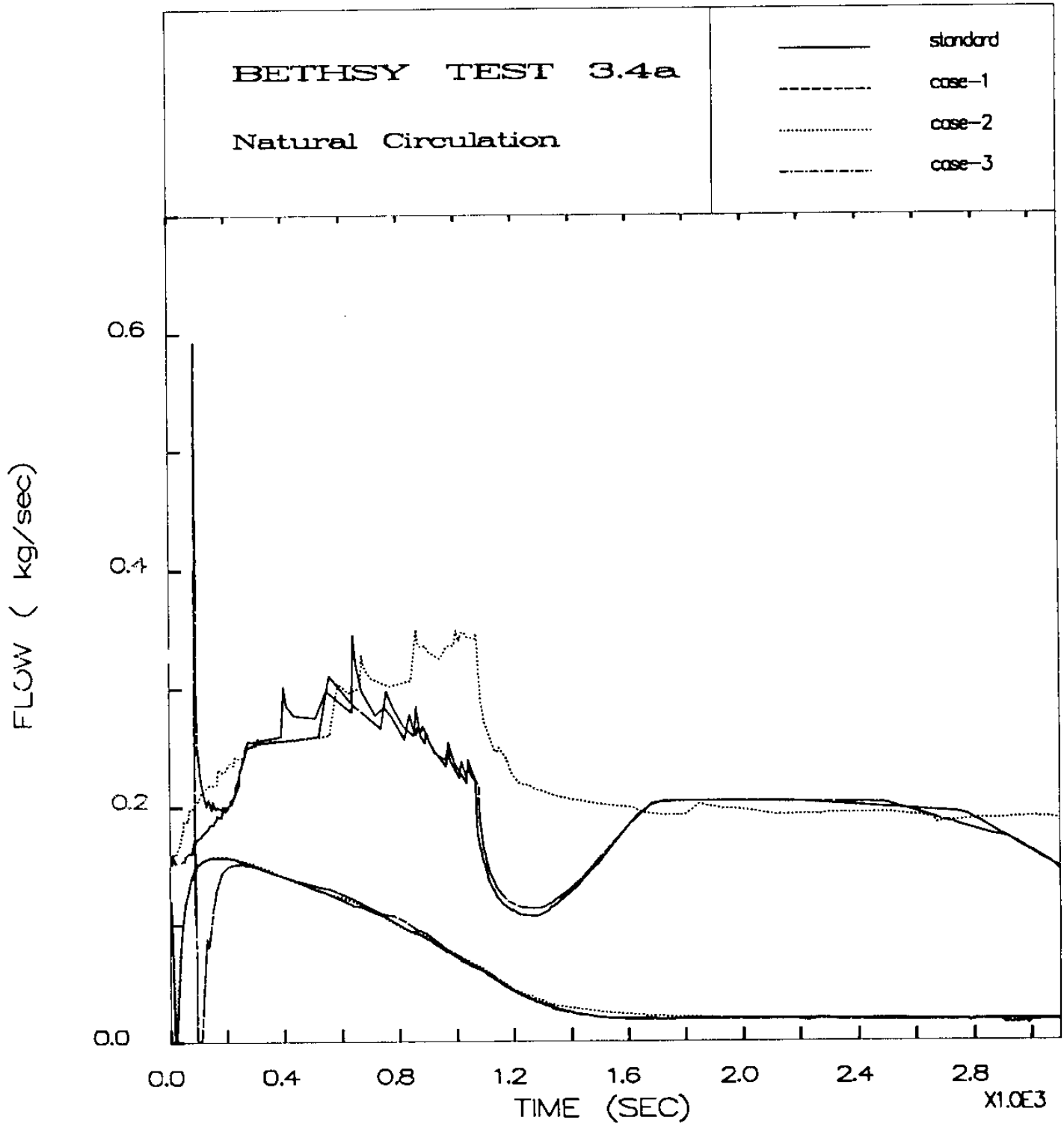


그림 92 단상자연대류의 민감도 분석시 저온관1 온도

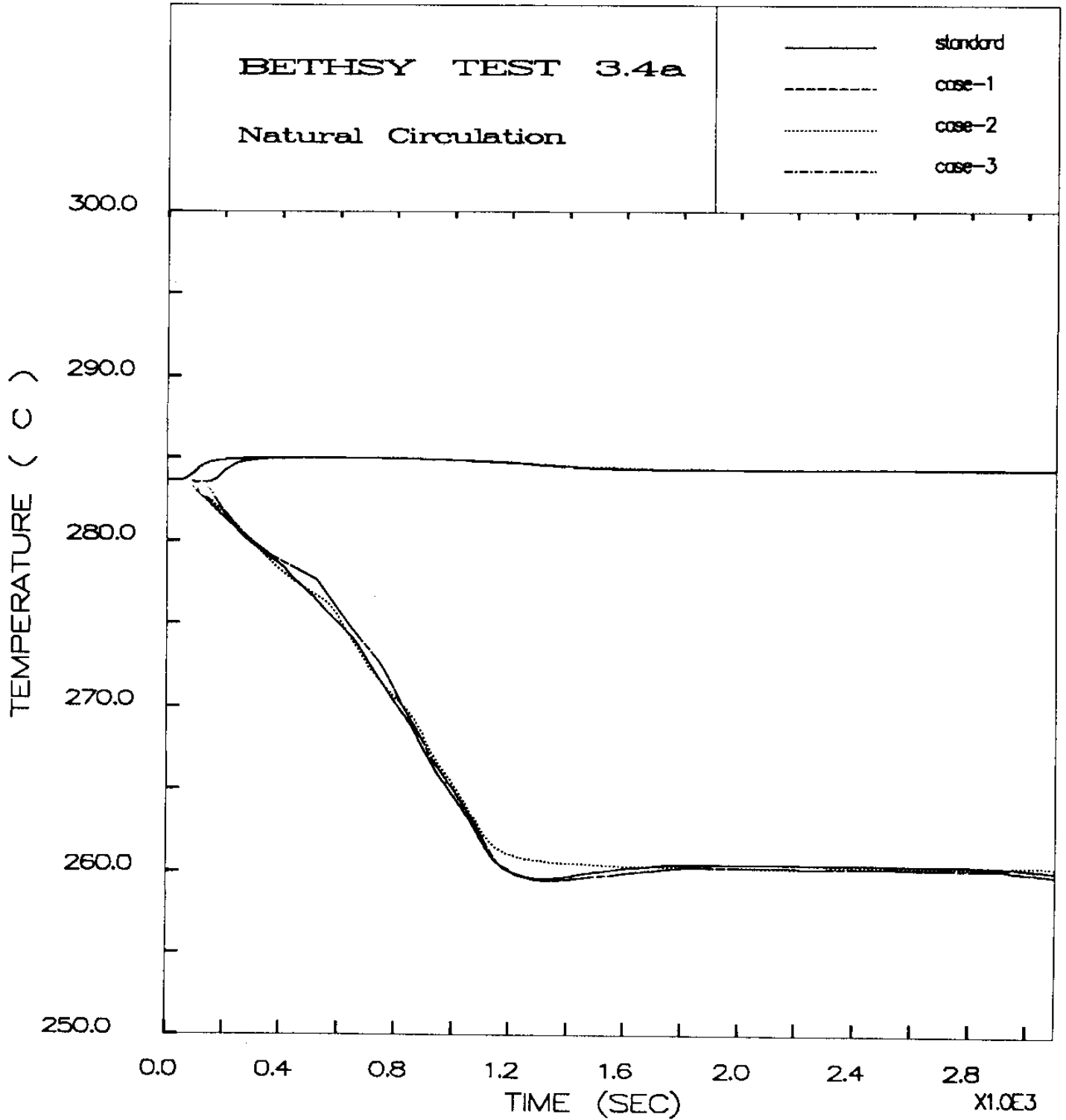


그림 93 단상자연대류의 민감도 분석시 고온관 유체속도

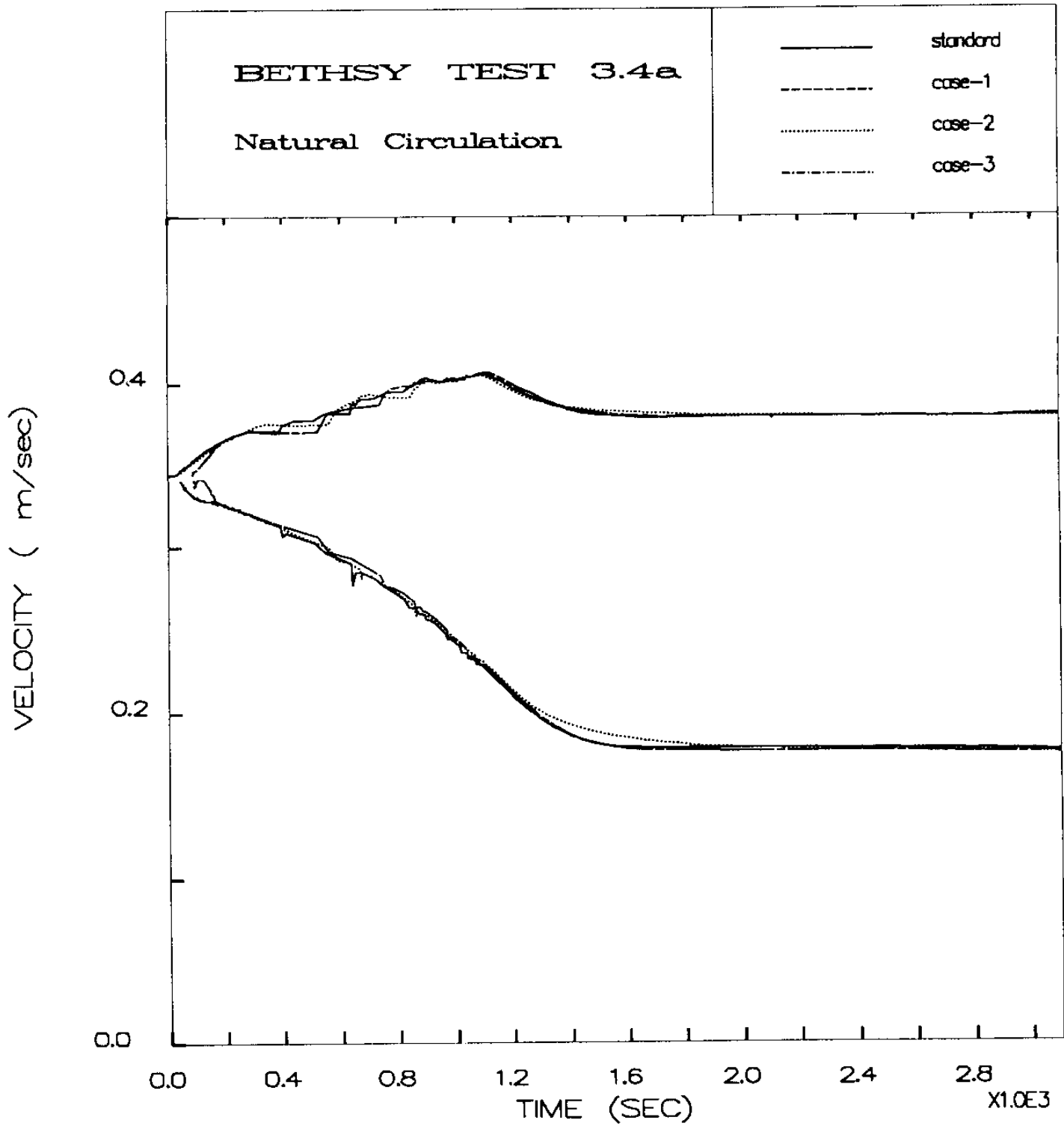


그림 94 단상자연대류의 민감도 분석시 증기발생기 증기유량

ISP27 : EXPR/CALC COMPARISON
 KOREA KAERI CATHARE 2 (2 loop)

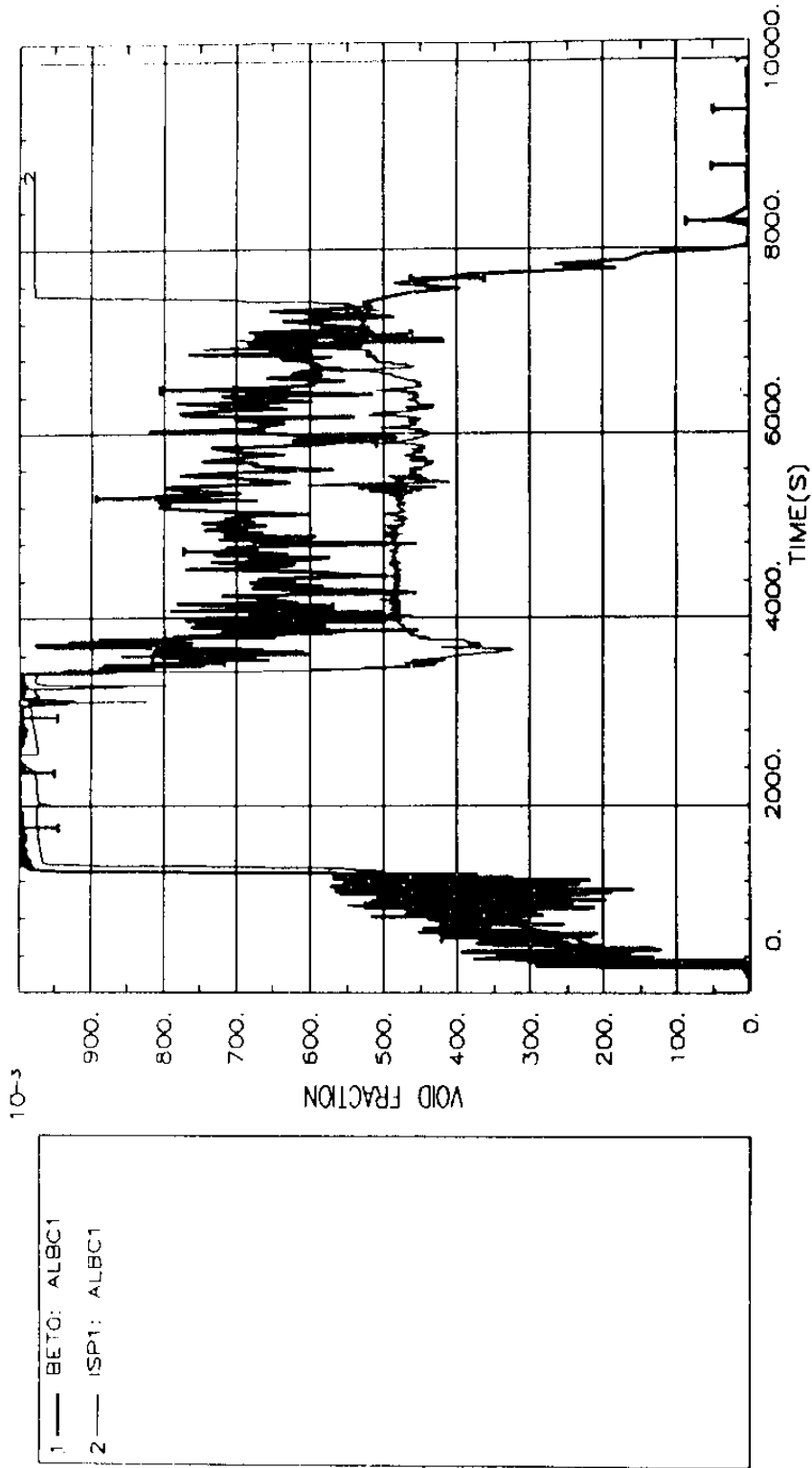


그림 95 ISP-27의 고온관1에서 기포율

ISP27 : EXPER/CALC COMPARISON
 KOREA KAERI CATHARE 2 (2 loop)

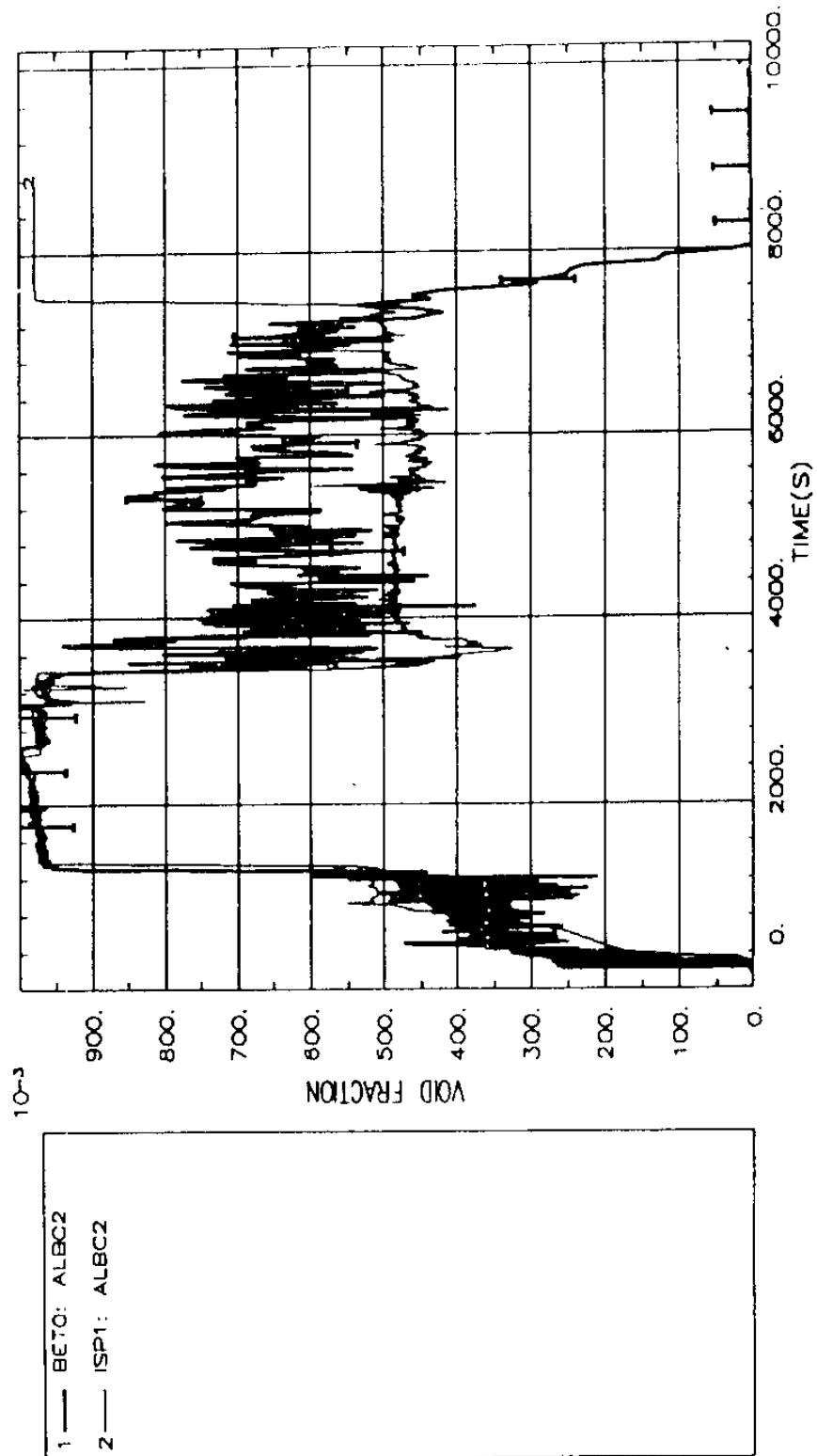


그림 96 ISP-27의 고온관2에서 기포율

ISP27 : EXPER/CALC COMPARISON
 KOREA KAERI CATHARE 2 (2 100P)

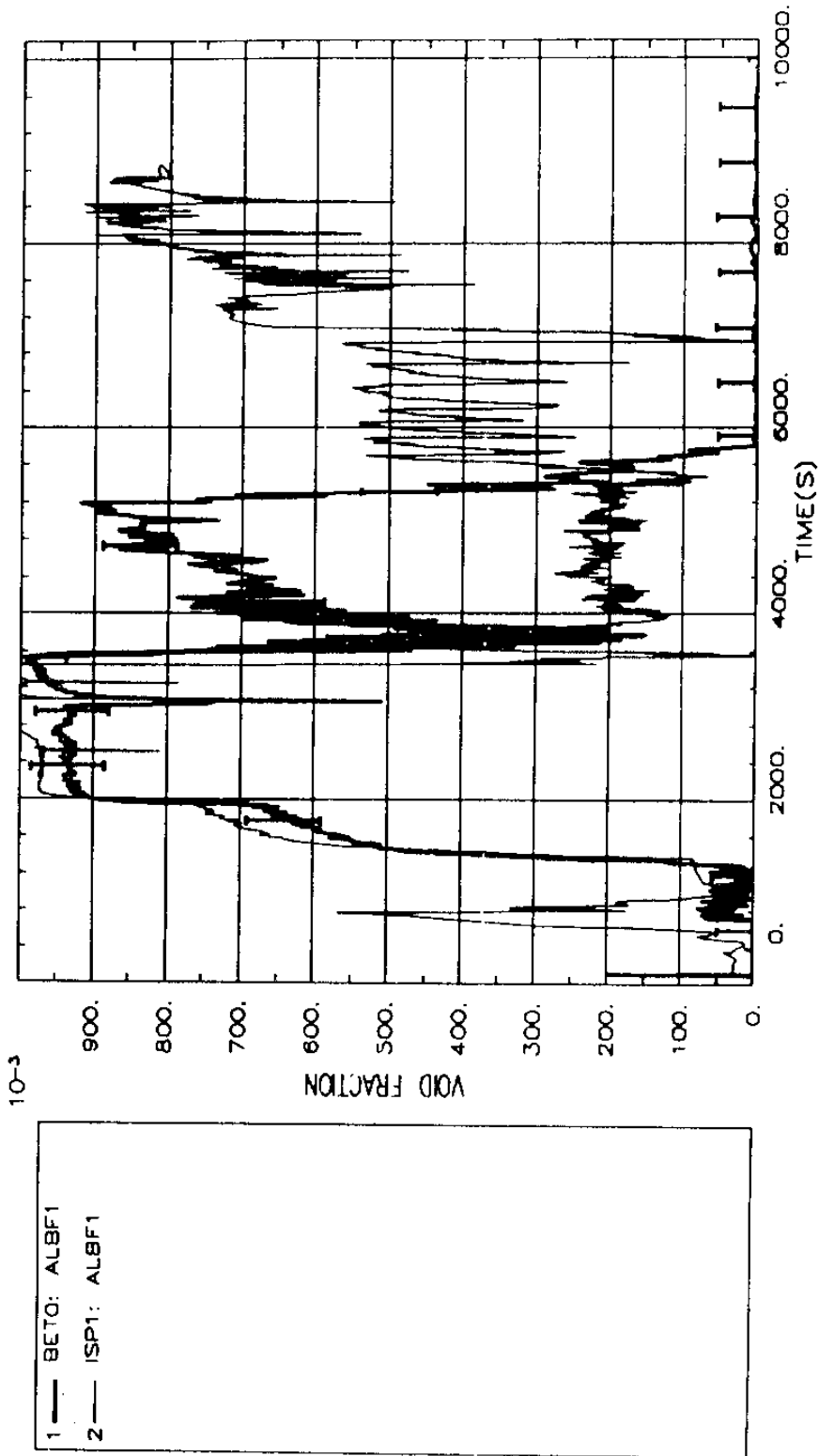


그림 97 ISP-27의 저온관1에서 기포율

ISP27 : EXPER/CALC COMPARISON
 KOREA KAERI CATHARE 2 (2 loop)

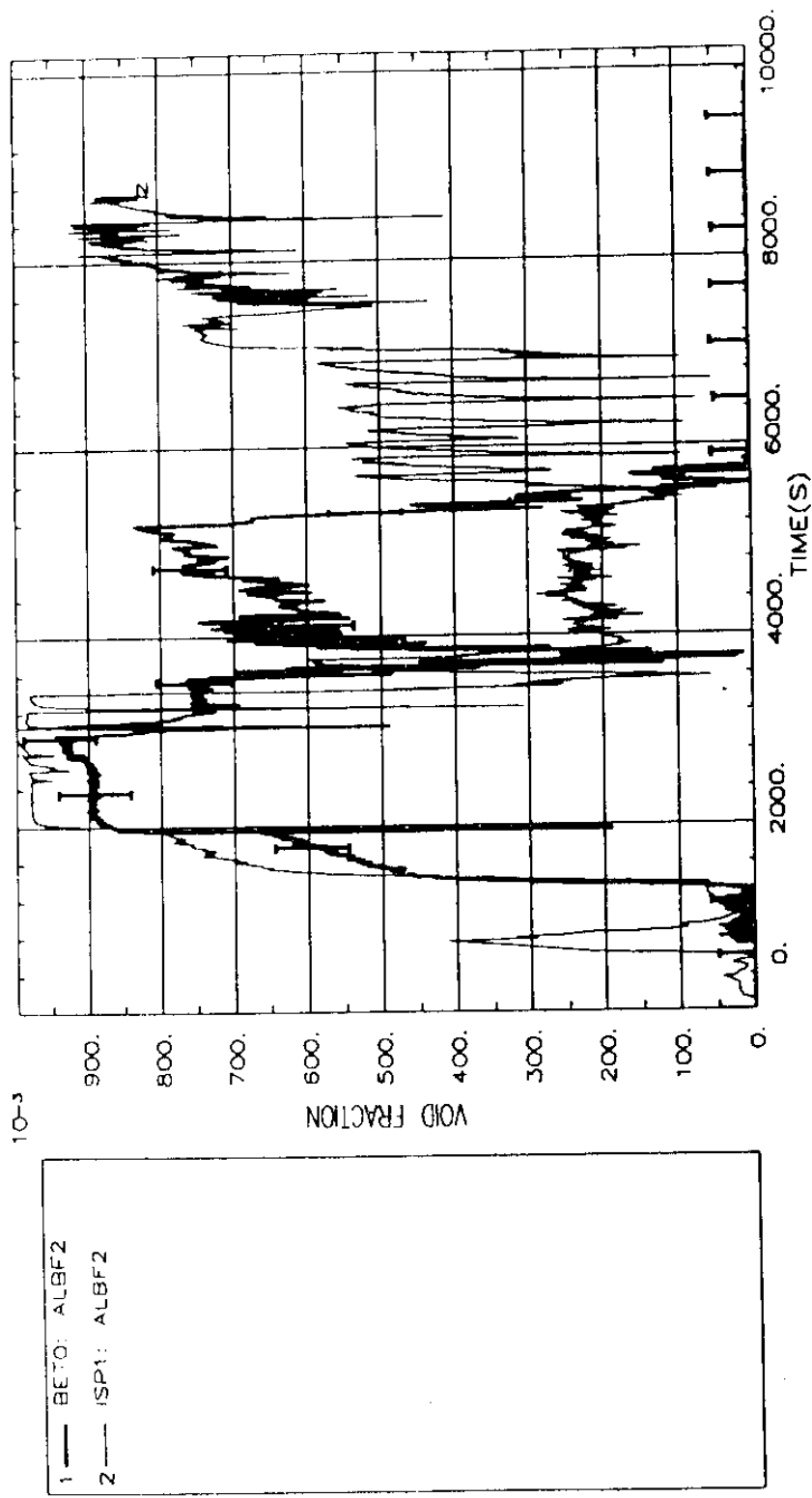


그림 98 ISP-27의 저은관2에서 기포율

ISP27 : EXPR/CALC COMPARISON
 KOREA KAERI CATHARE 2 (2 loop)

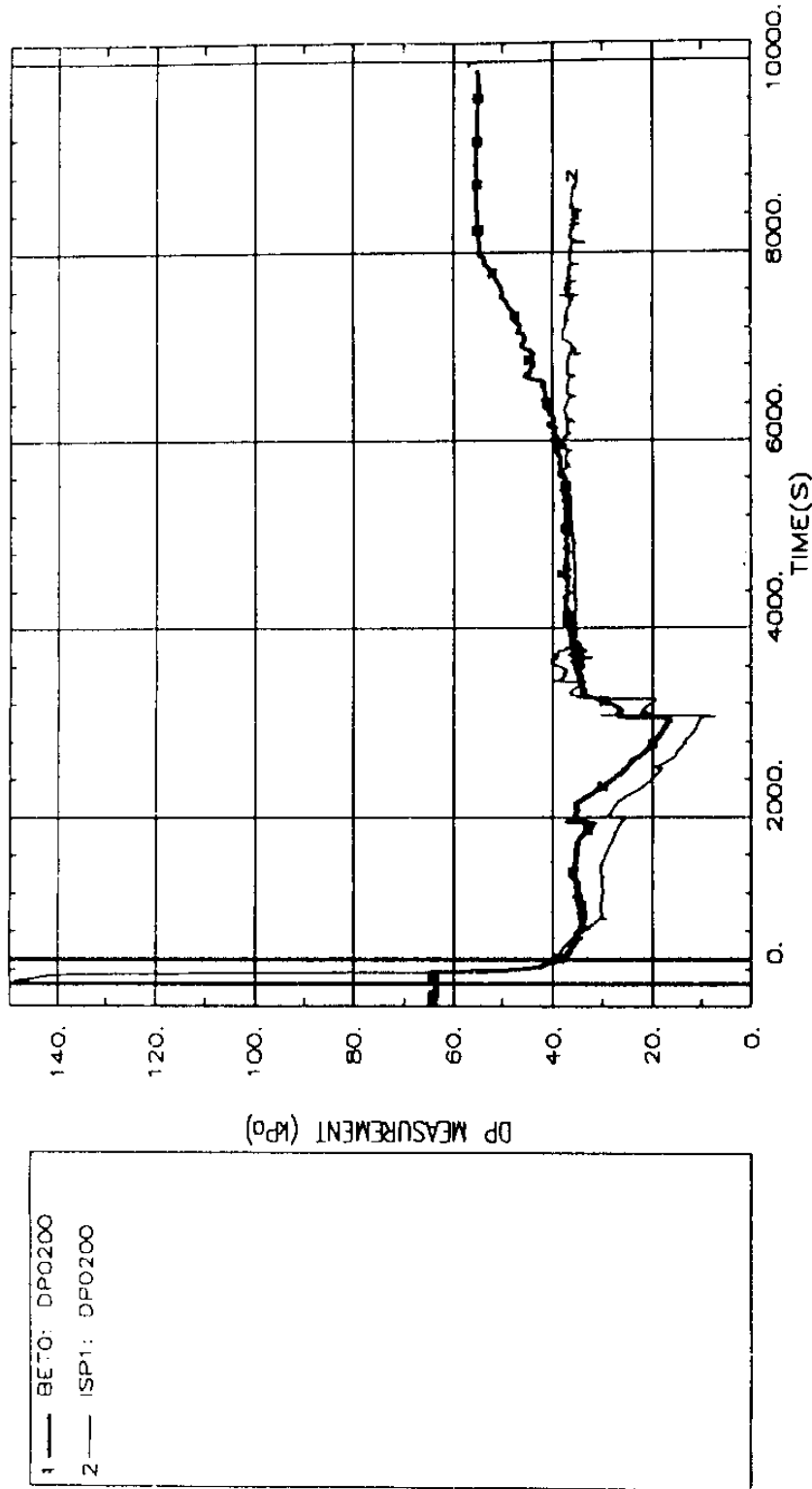


그림 99 ISP-27의 노심의 압력강하

ISP27 : EXPER/CALC COMPARISON
 KOREA KAERI CATHARE 2 (2 loop)

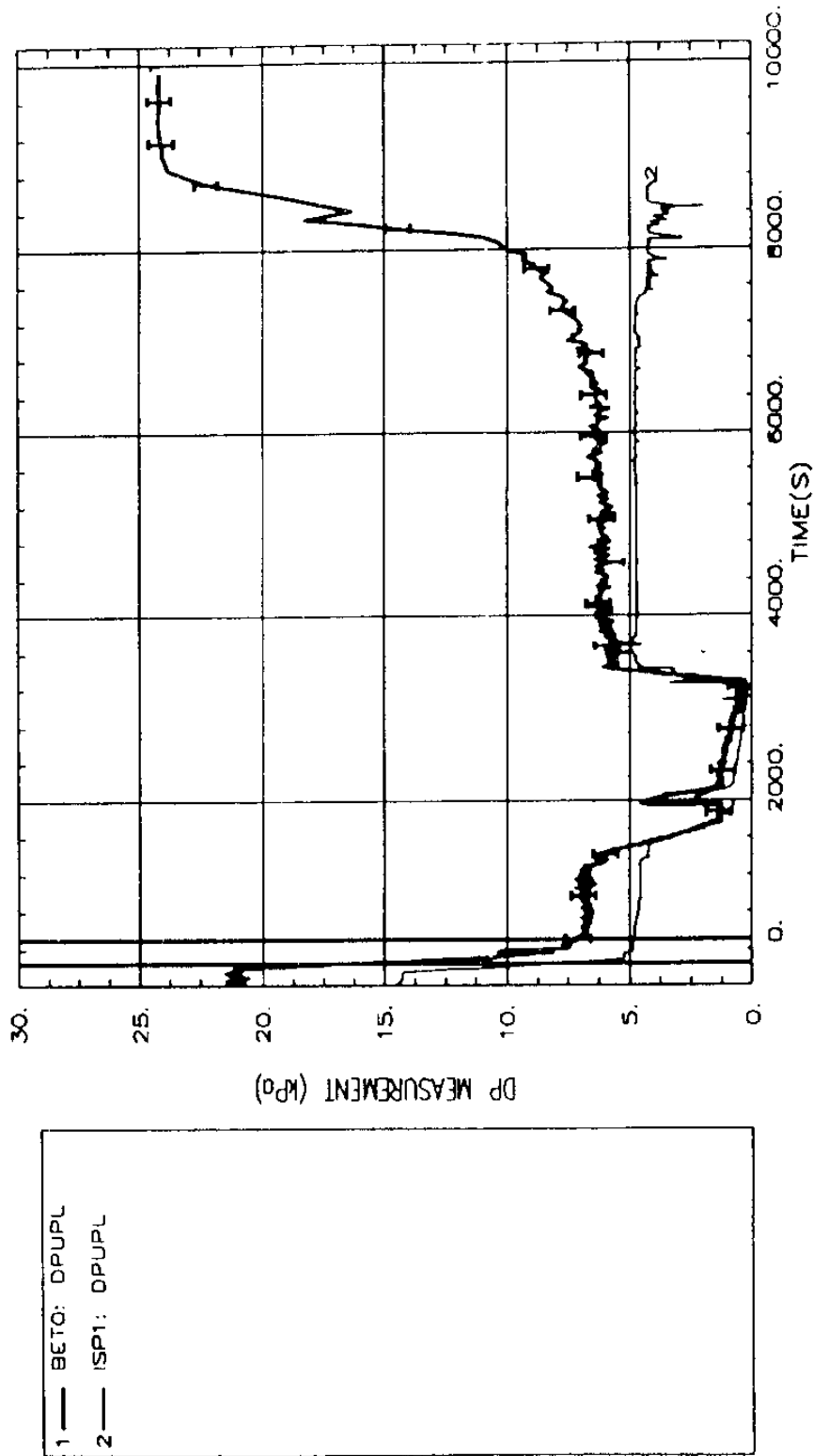


그림 100 ISP-27의 Upper Plenum 압력강하

ISP27 : EXPER/CALC COMPARISON
 KOREA KAERI CATHARE 2 (2 loop)

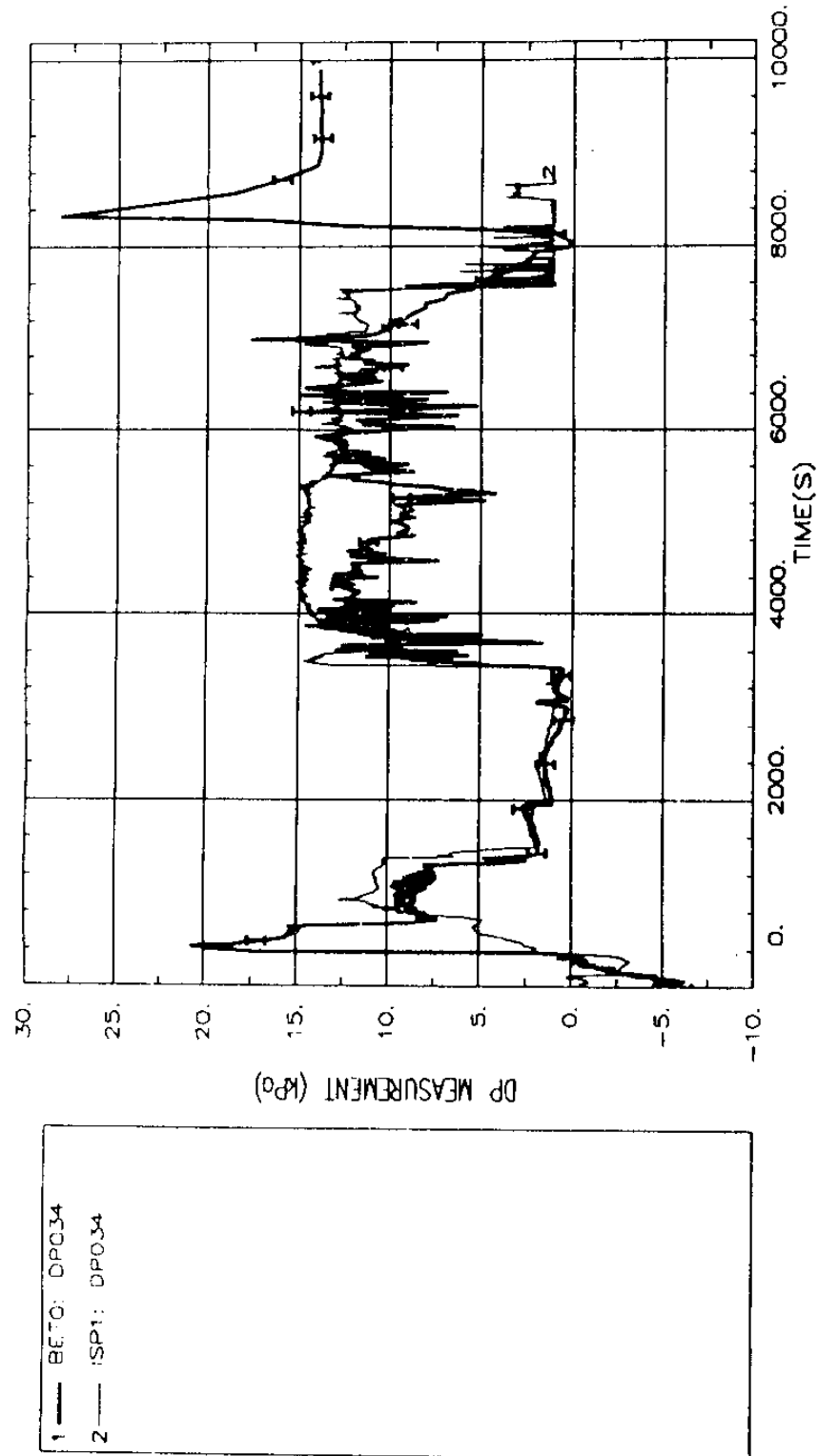


그림 101 ISP-27의 Guid Tube에서의 압력강하

ISP27 : EXPER/CALC COMPARISON
 KOREA KAERI CATHARE 2 (2 loop)

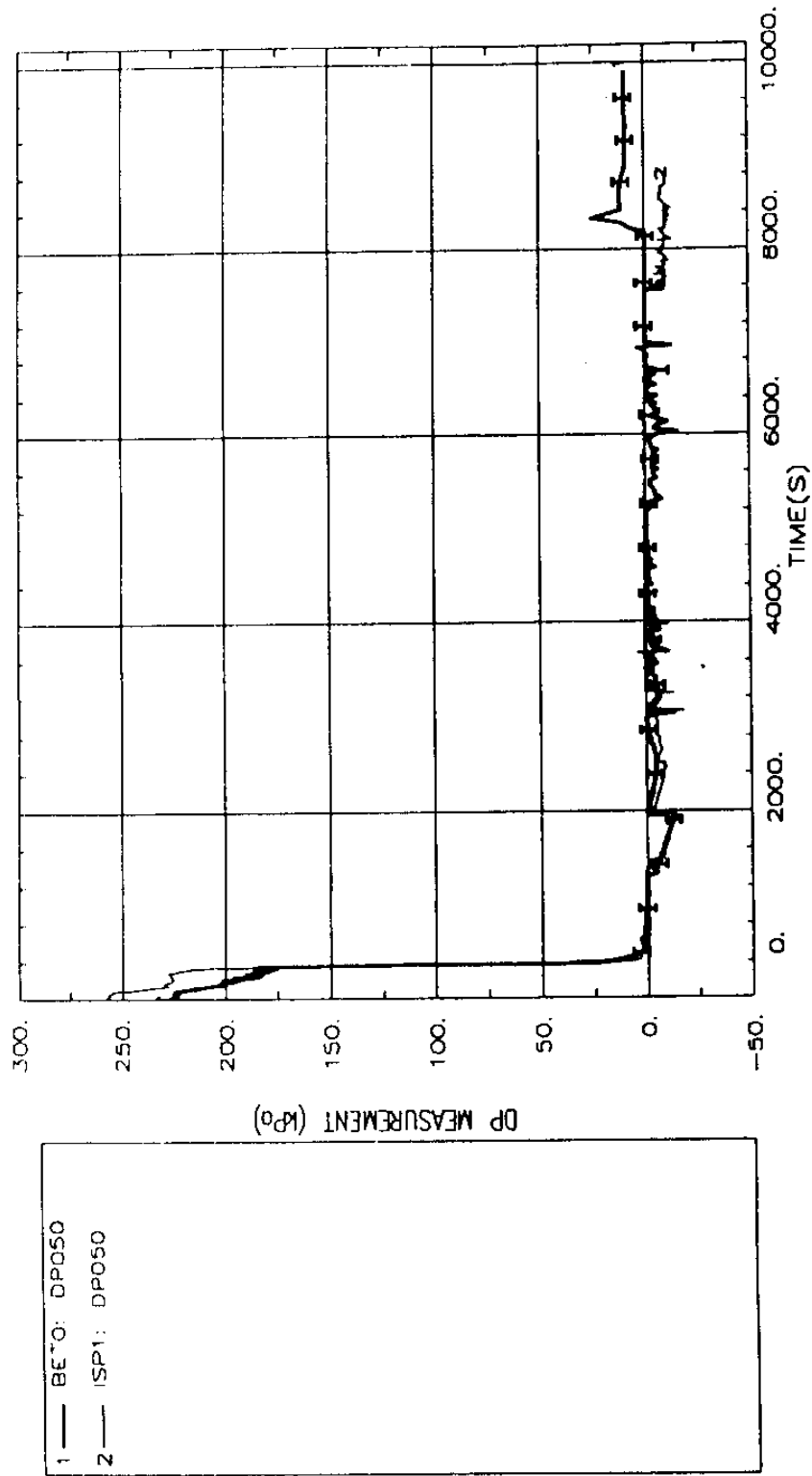


그림 102 ISP-27의 Downcomer와 Upper Head사이의 압력강하

ISP27 : EXPR/CALC COMPARISON
 KOREA KAERI CATHARE 2 (2 loop)

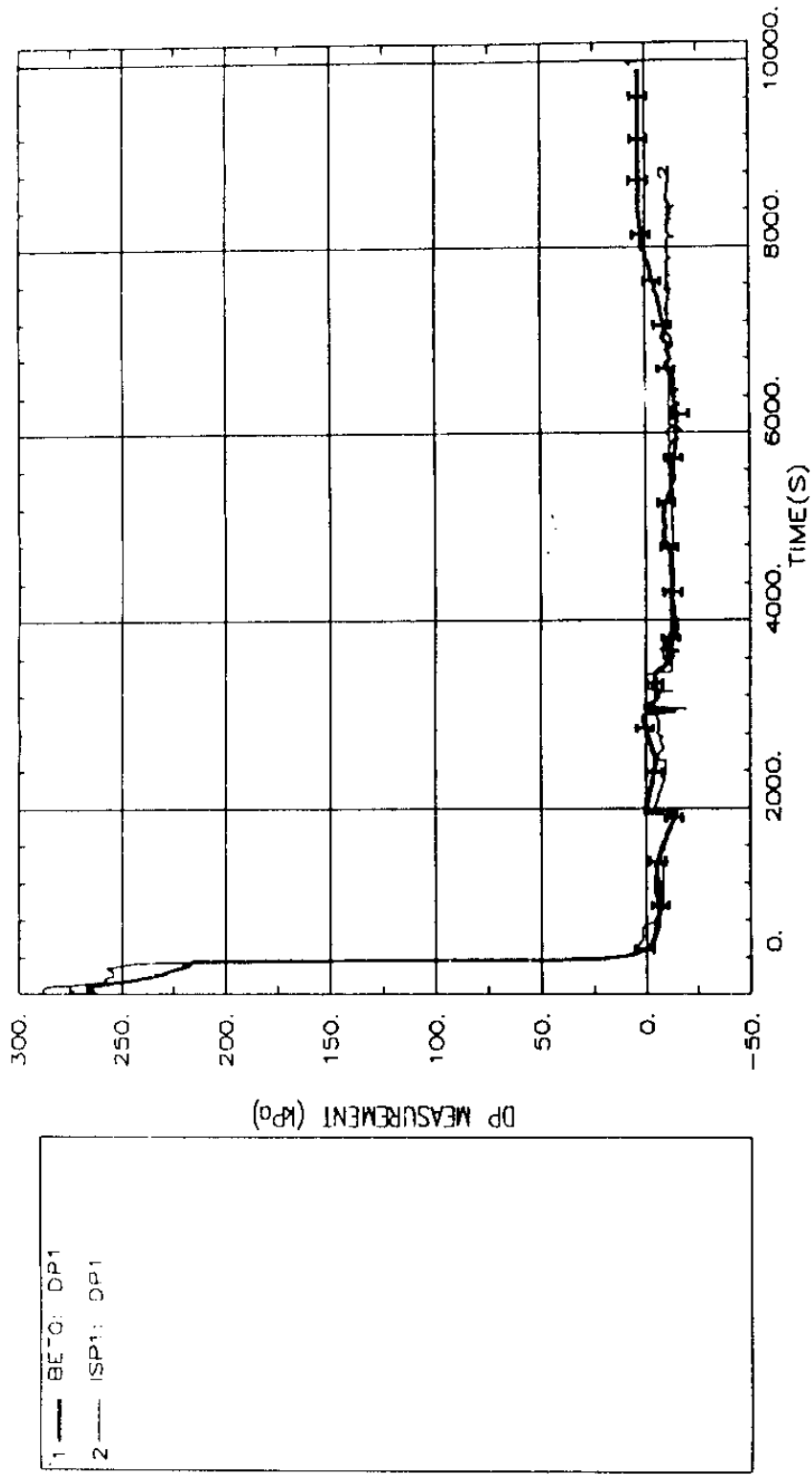


그림 103 ISP-27의 고온관1과 저온관1 사이의 압력강하

ISP27 : EXPER/CALC COMPARISON
 KOREA KAERI CATHARE 2 (2 loop)

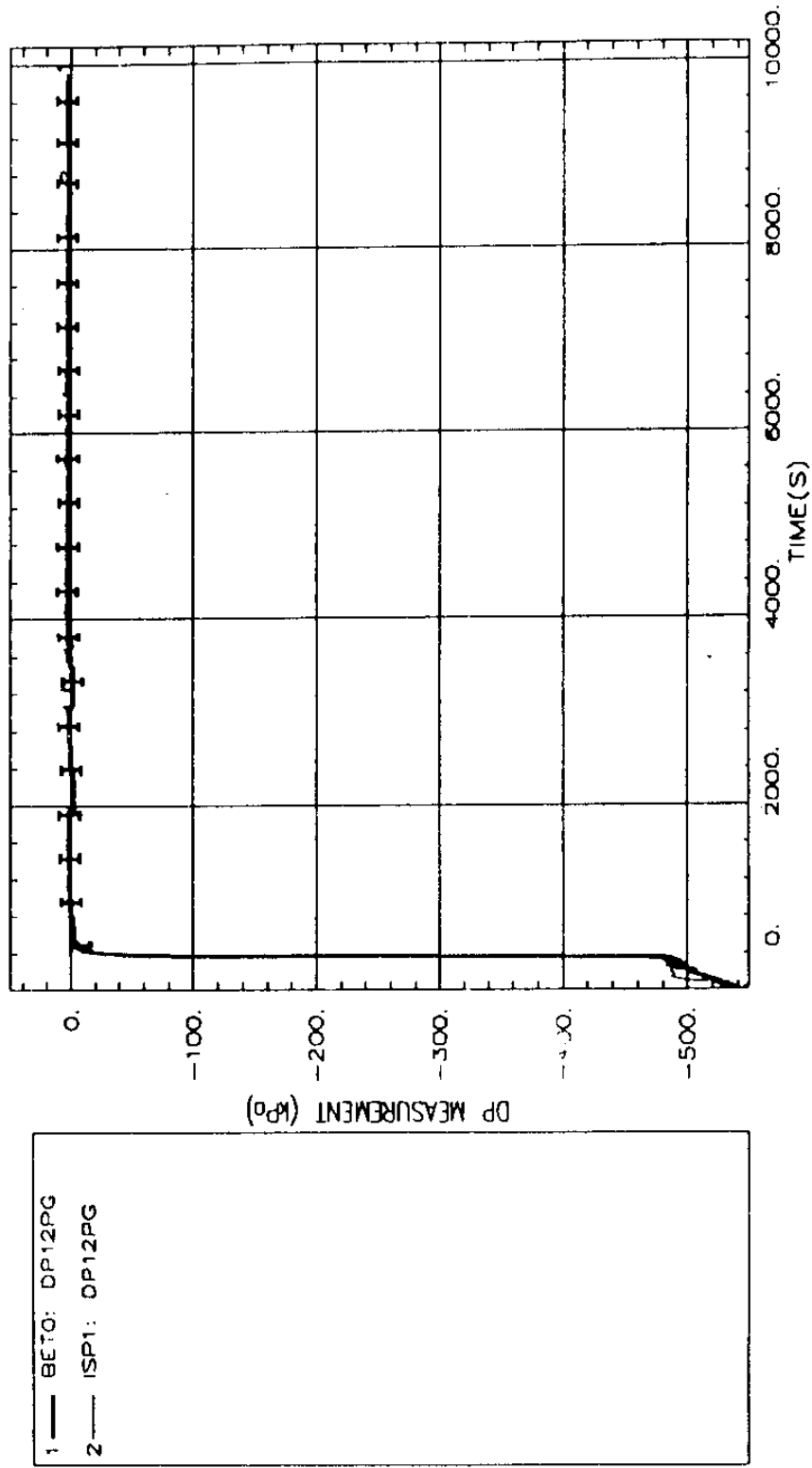


그림 104 ISP-27의 RCP1의 수두

ISP27 : EXPR/CALC COMPARISON
 KOREA KAERI CATHARE 2 (2 loop)

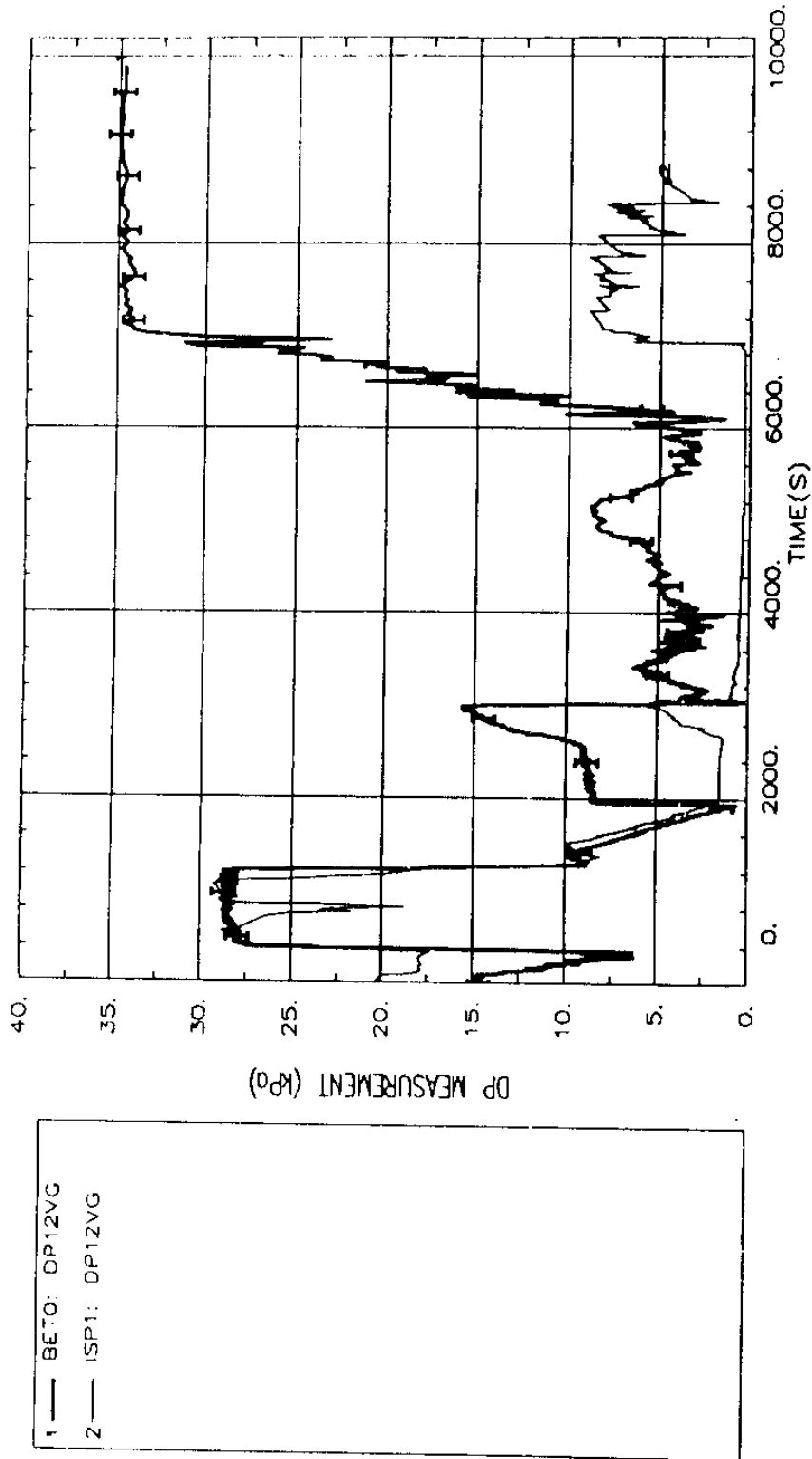


그림 105 ISP-27의 Cross-Over Leg1의 Downflow 방향 압력강하

ISP27 : EXPER/CALC COMPARISON
 KOREA KAERI CATHARE 2 (2 loop)

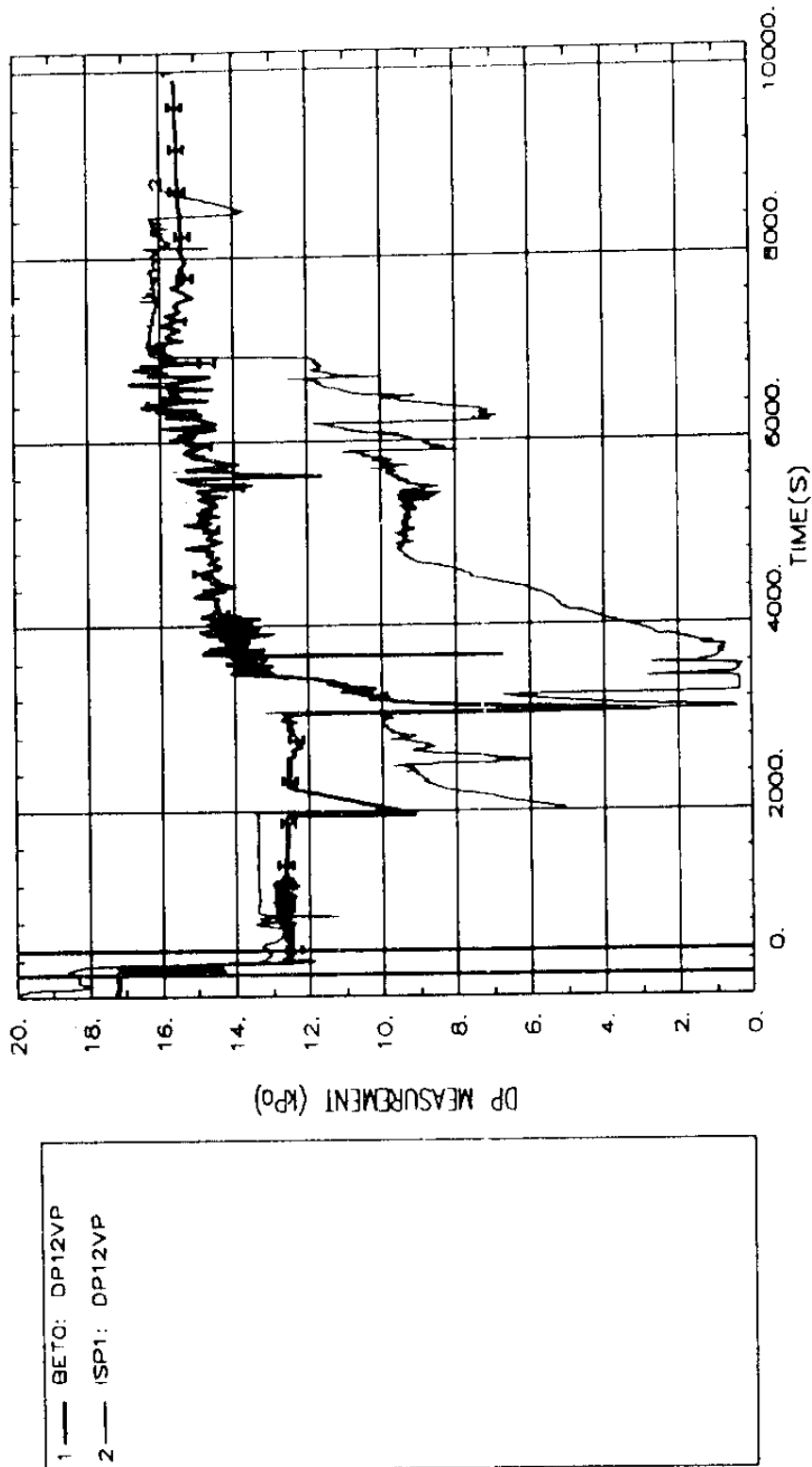


그림 106 ISP-27의 Cross-Over Leg1의 Upflow 방향 압력강하

ISP27 : EXPR/CALC COMPARISON
 KOREA KAERI CATHARE 2 (2 loop)

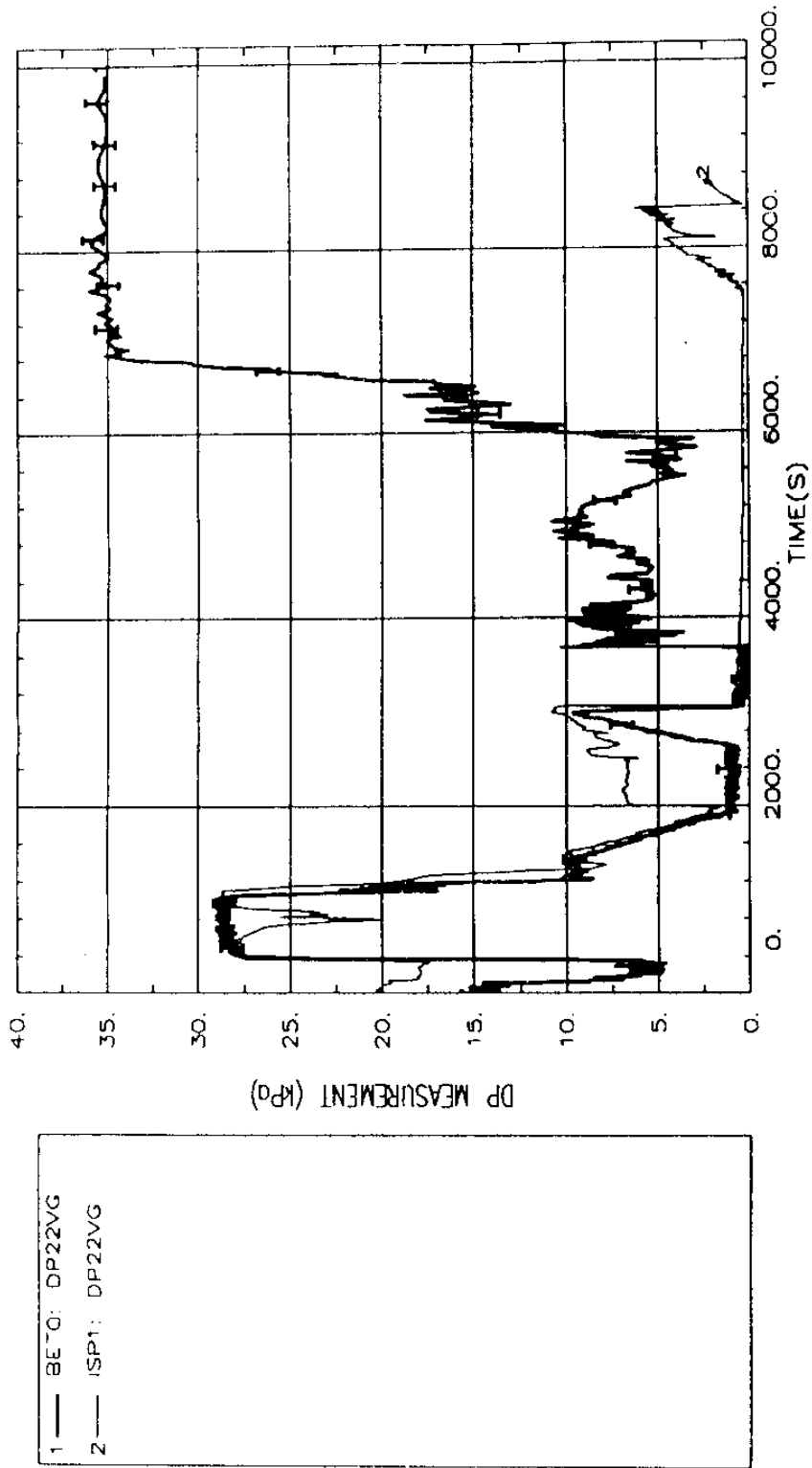


그림 107 ISP-27의 Cross-Over Leg2의 Downflow 방향 압력강하

ISP27 : EXPER/CALC COMPARISON
 KOREA KAERI CATHARE 2 (2 loop)

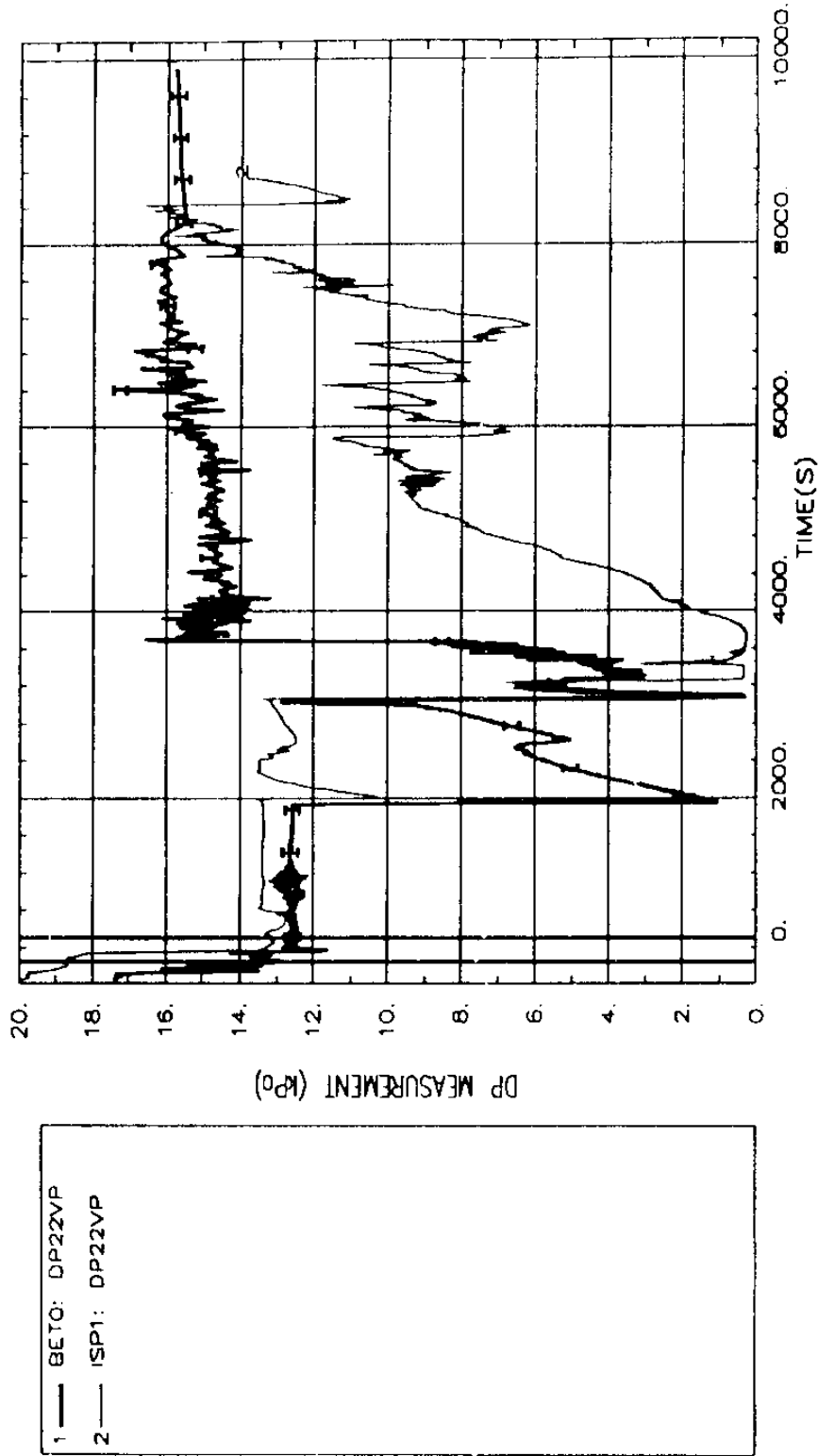


그림 108 ISP-27의 Cross-Over Leg2의 Upflow 방향 압력강하

ISP27 : EXPER/CALC COMPARISON
 KOREA KAERI CATHARE 2 (2 loop)

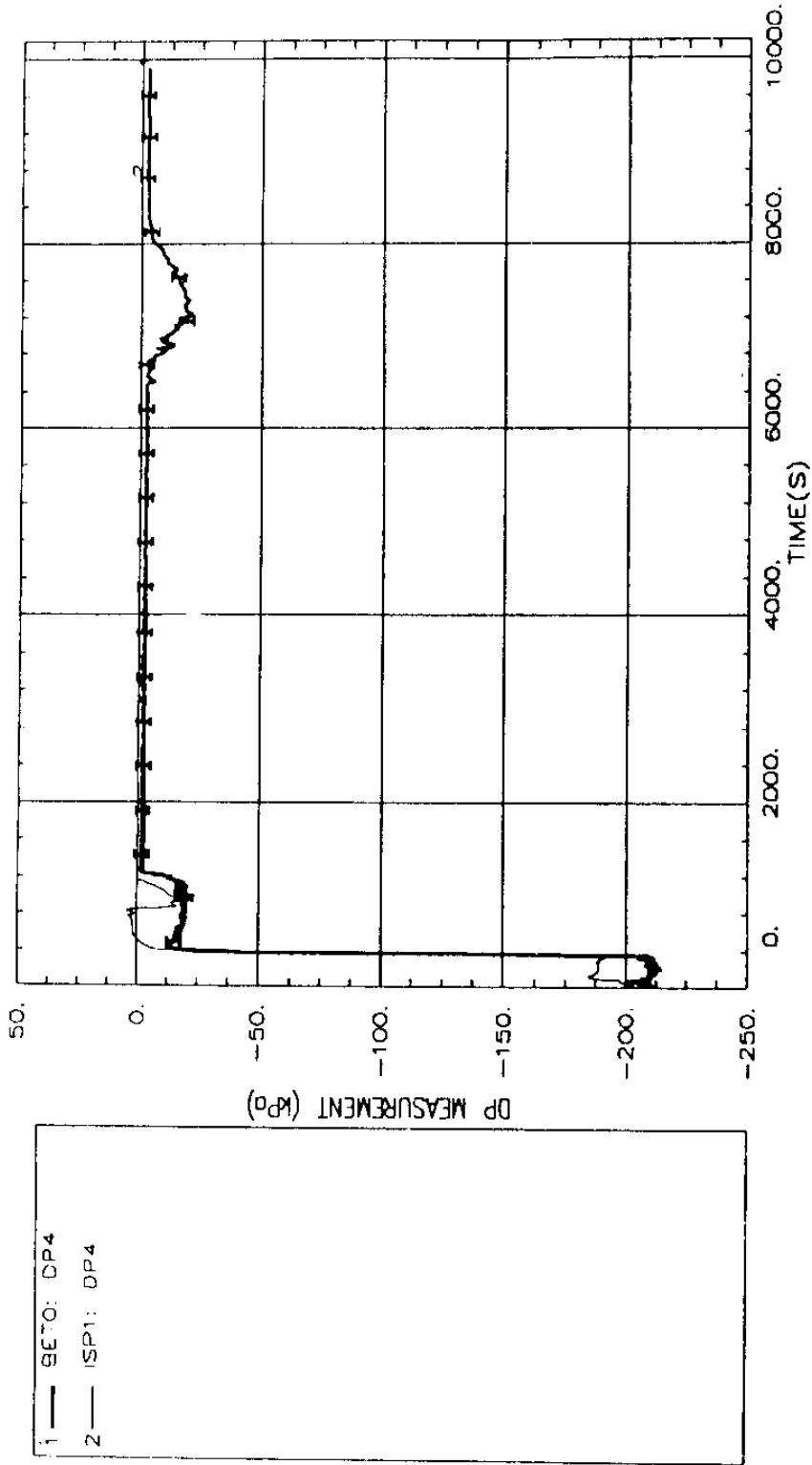


그림 109 ISP-27의 SG1의 Plena의 입,출구 압력차이

ISP27 : EXPER/CALC COMPARISON
 KOREA KAERI CATHARE 2 (2 loop)

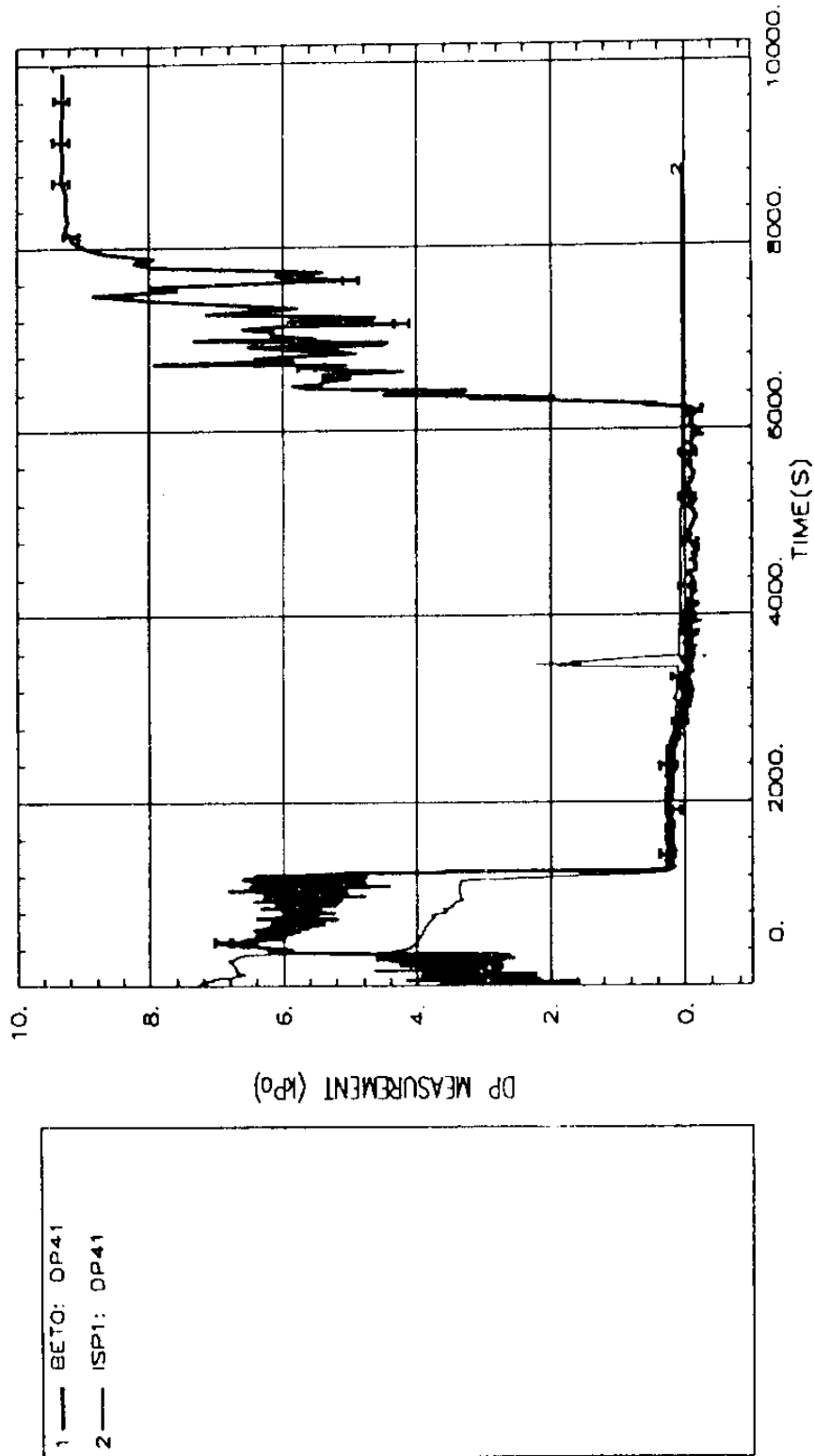


그림 110 ISP-27의 SG1의 Plenum의 입구에서 압력강하

ISP27 : EXPR/CALC COMPARISON
 KOREA KAERI CATHARE 2 (2 loop)

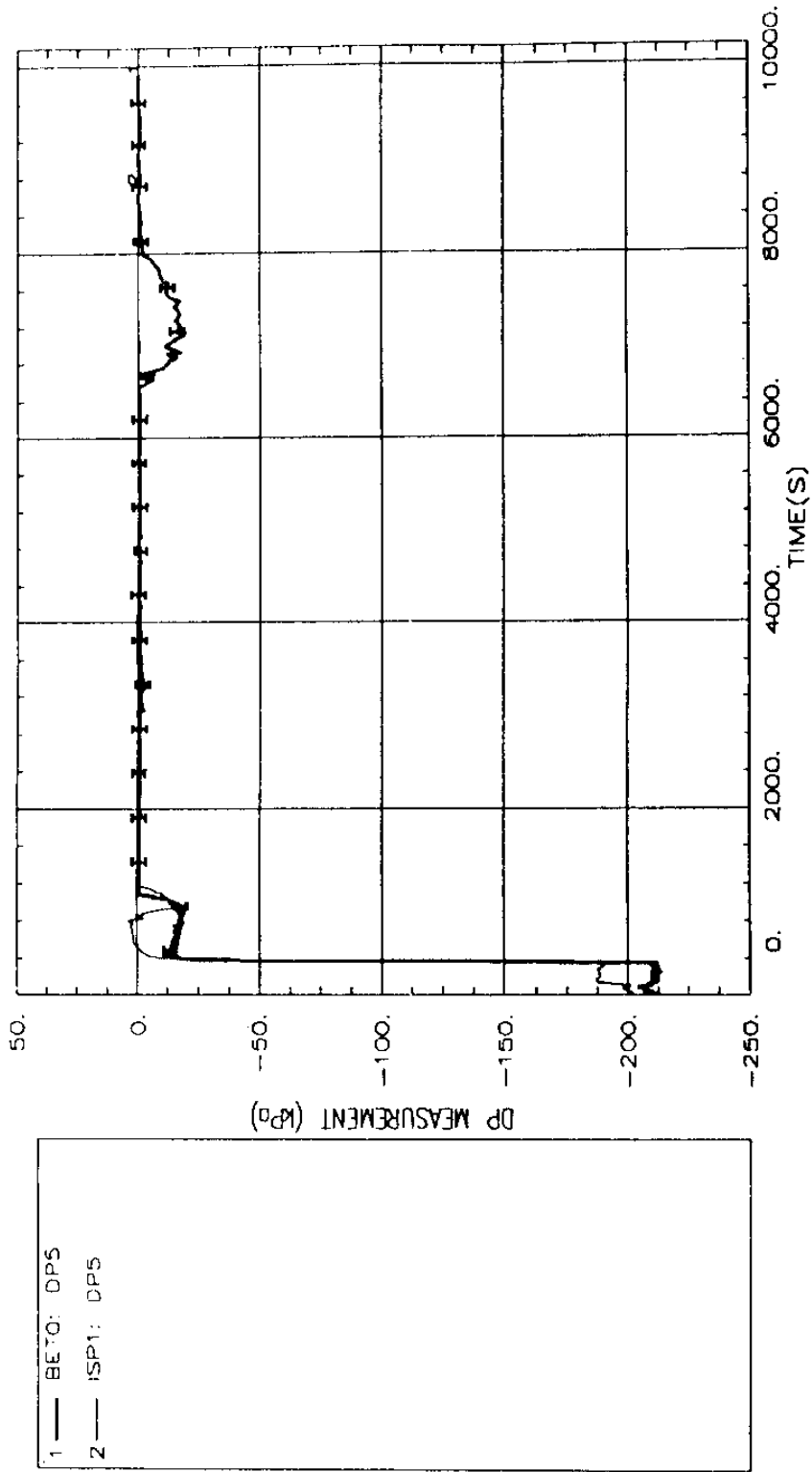


그림 111 ISP-27의 SG2의 Plena의 입,출구 압력차이

ISP27 : EXPER/CALC COMPARISON
 KOREA KAERI CATHARE 2 (2 loop)

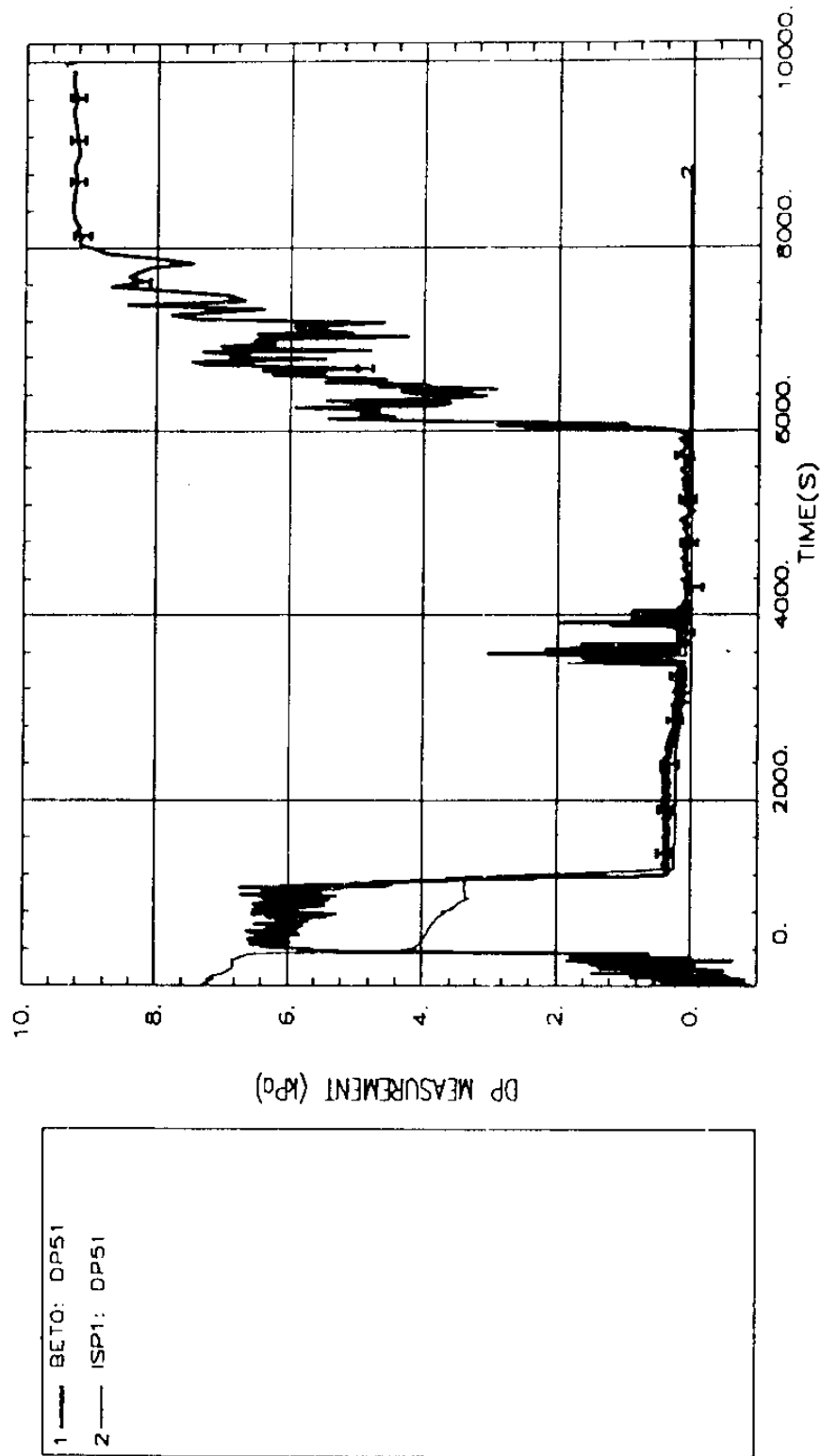


그림 112 ISP-27의 SG2의 Plenum의 입구에서 압력강하

ISP27 : EXPR/CALC COMPARISON
 KOREA KAERI CATHARE 2 (2 loop)

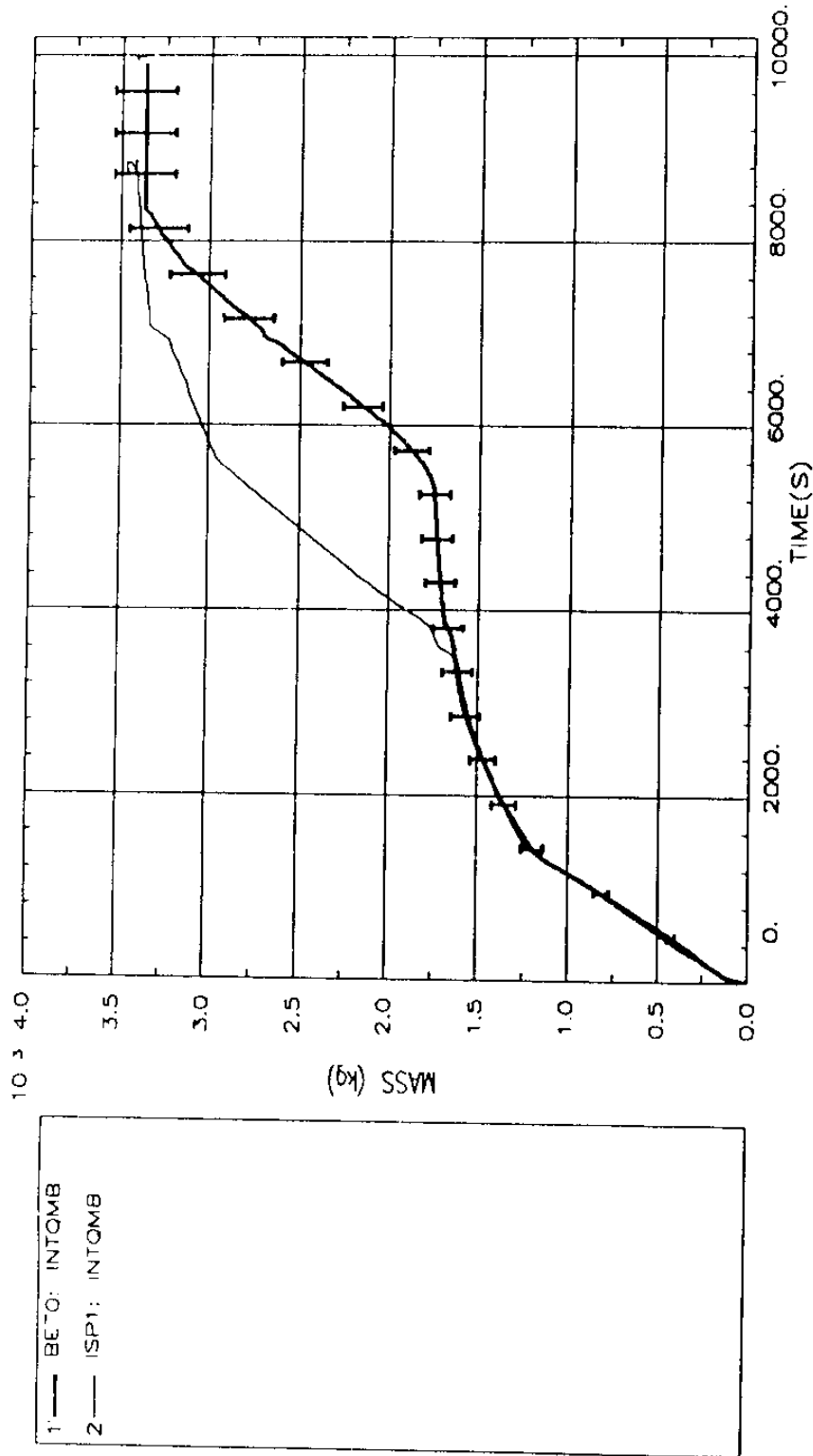


그림 113 ISP-27의 Break 유량의 합계

ISP27 : EXPER/CALC COMPARISON
 KOREA KAERI CATHARE 2 (2 loop)

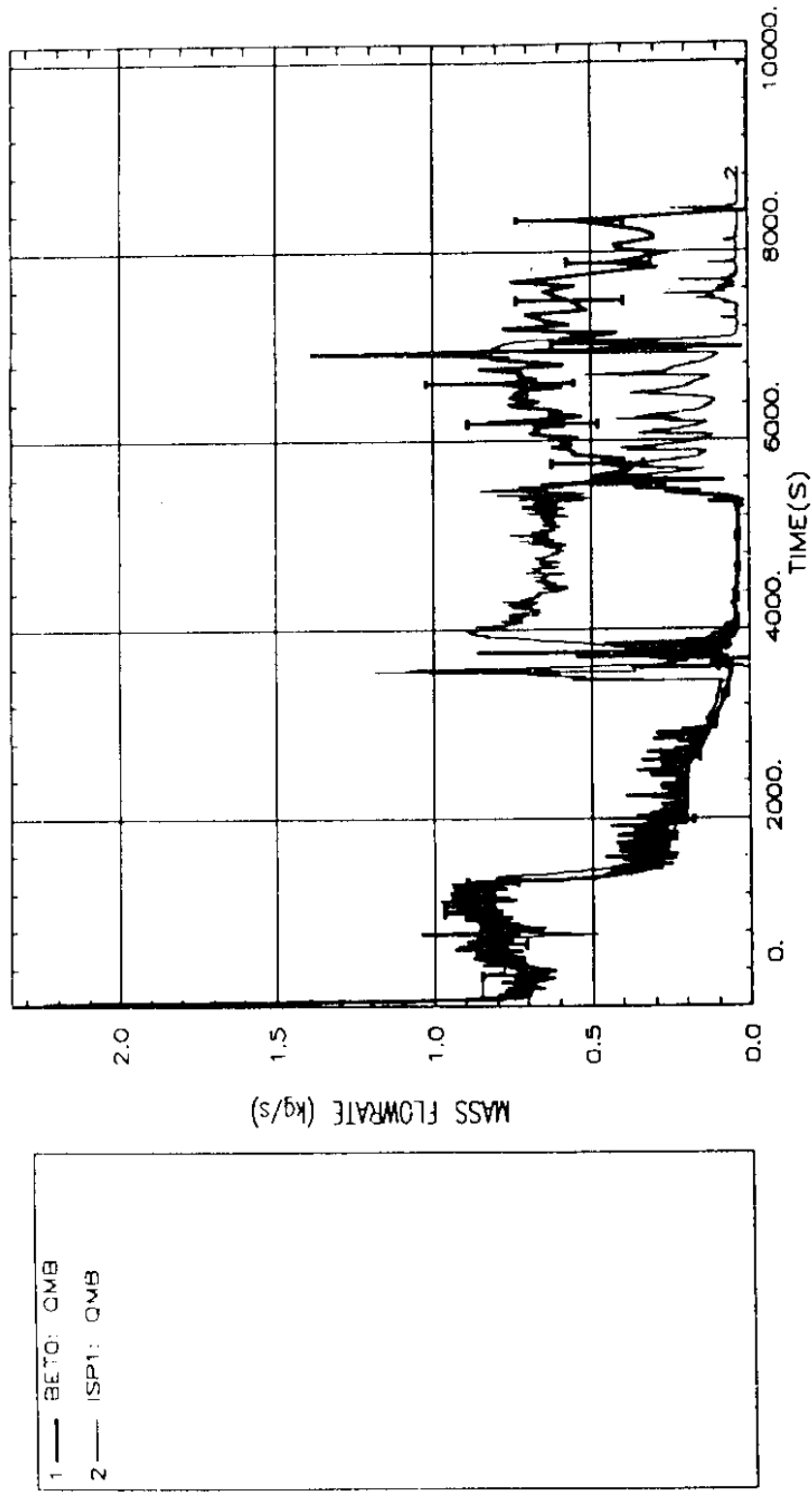


그림 114 ISP-27의 Break 유량

ISP27 : EXPER/CALC COMPARISON
 KOREA KAERI CATHARE 2 (2 loop)

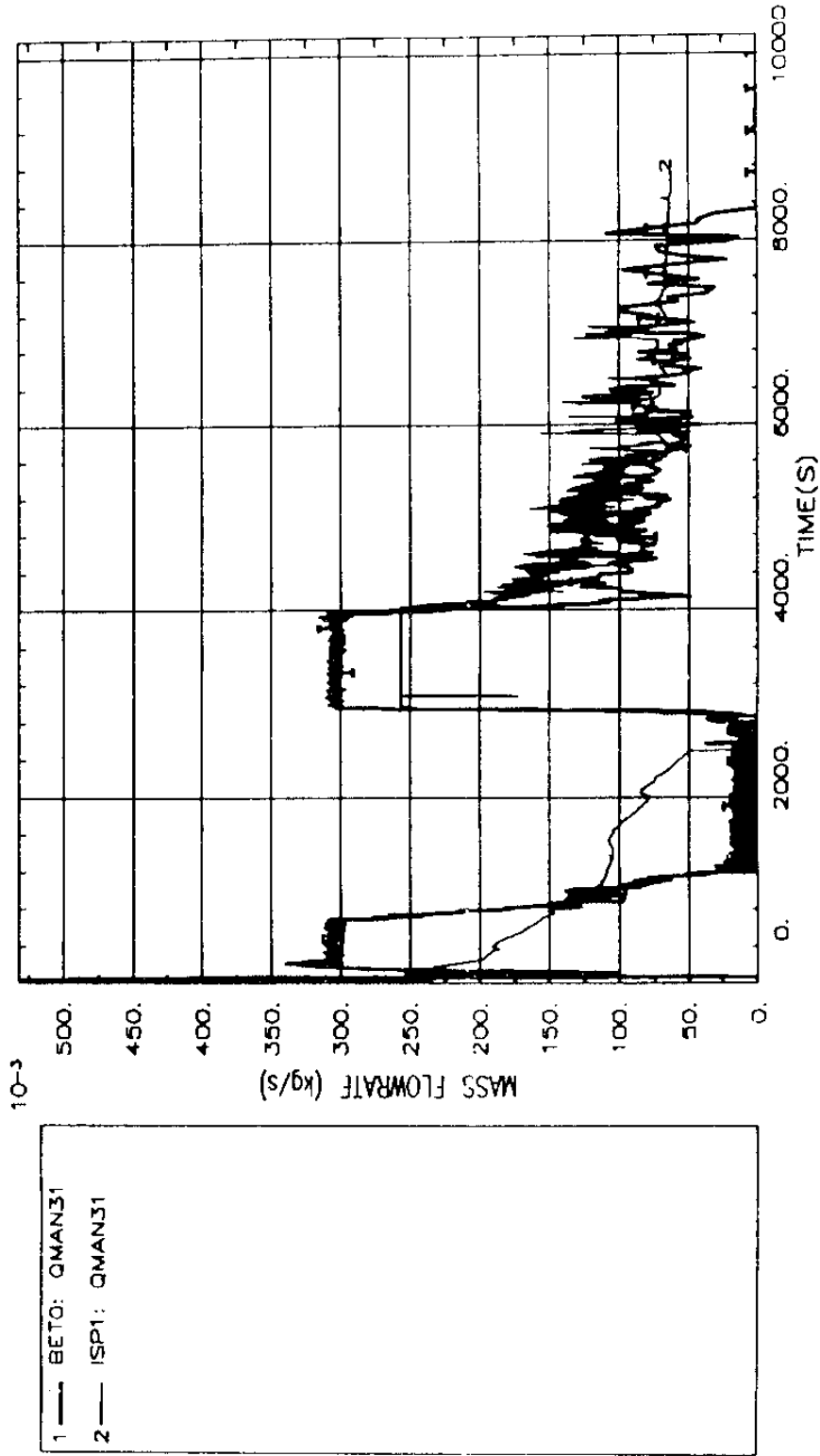


그림 115 ISP-27의 SG1에 공급된 주급수 유량

ISP27 : EXPER/CALC COMPARISON
 KOREA KAERI CATHARE 2 (2 loop)

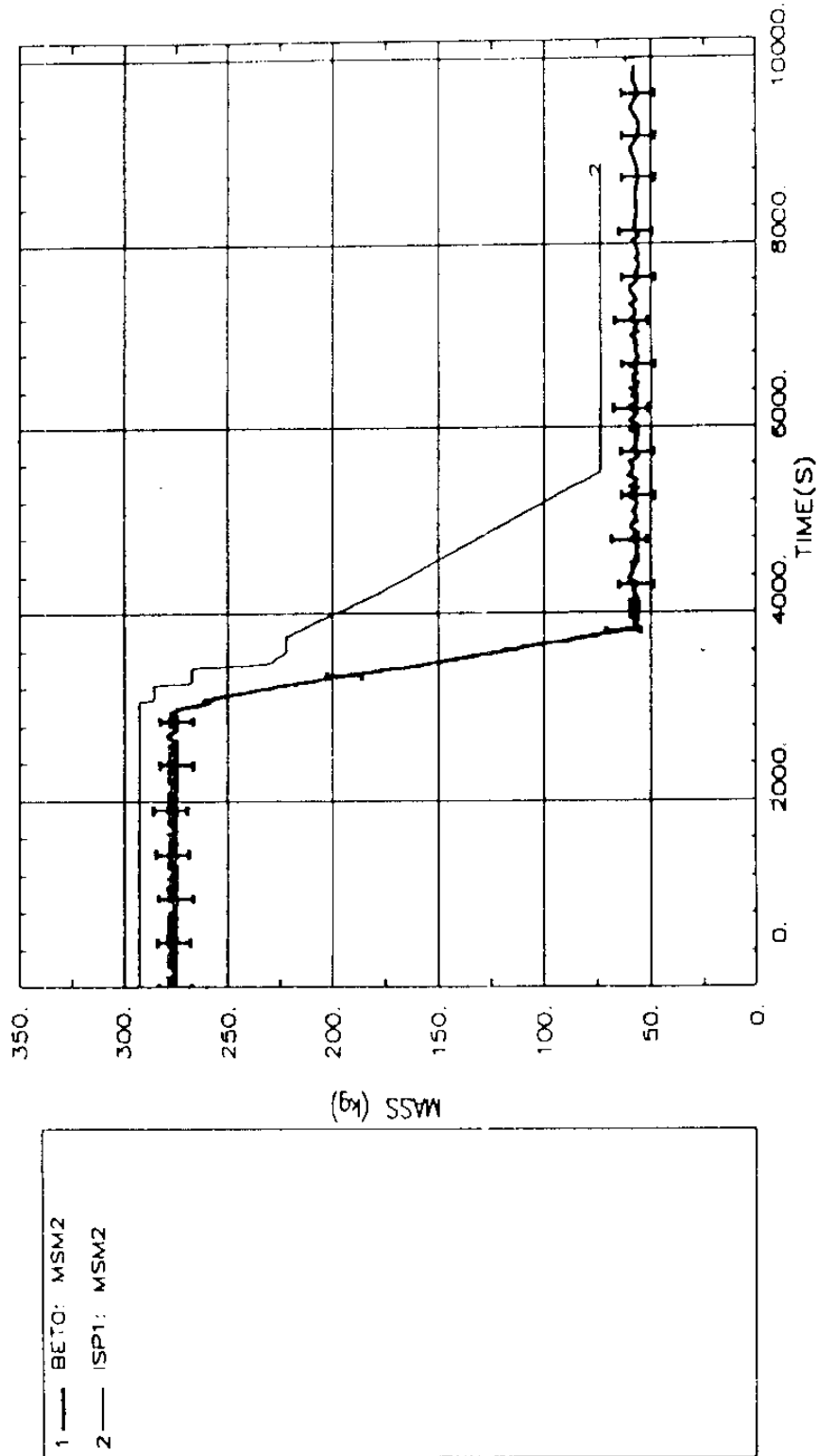


그림 116 ISP-27의 Accumulator 2의 재고량

ISP27 : EXPR/CALC COMPARISON
 KOREA KAERI CATHARE 2 (2 loop)

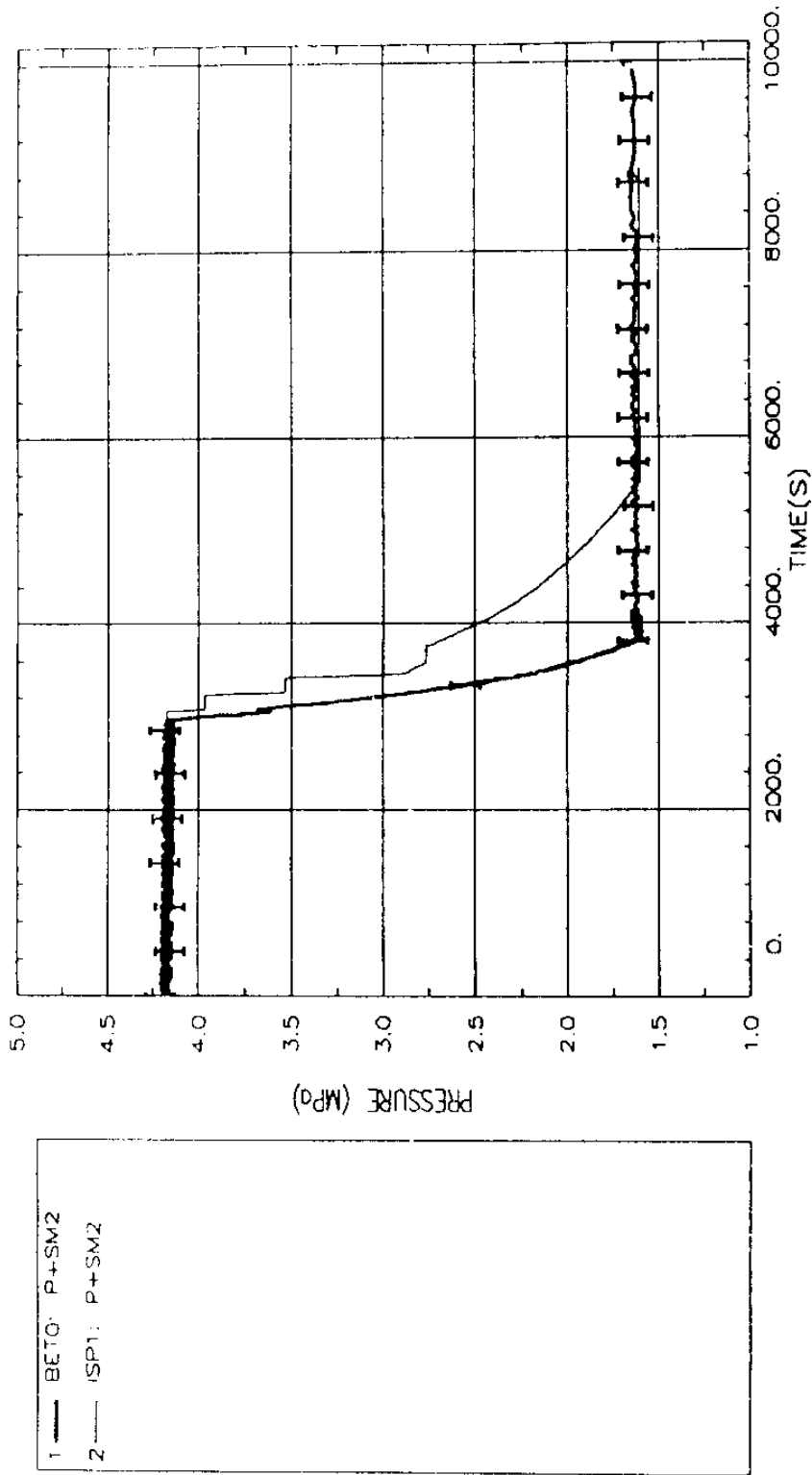


그림 117 ISP-27의 Accumulator 2의 압력

ISP27 : EXPR/CALC COMPARISON
 KOREA KAERI CATHARE 2 (2 loop)

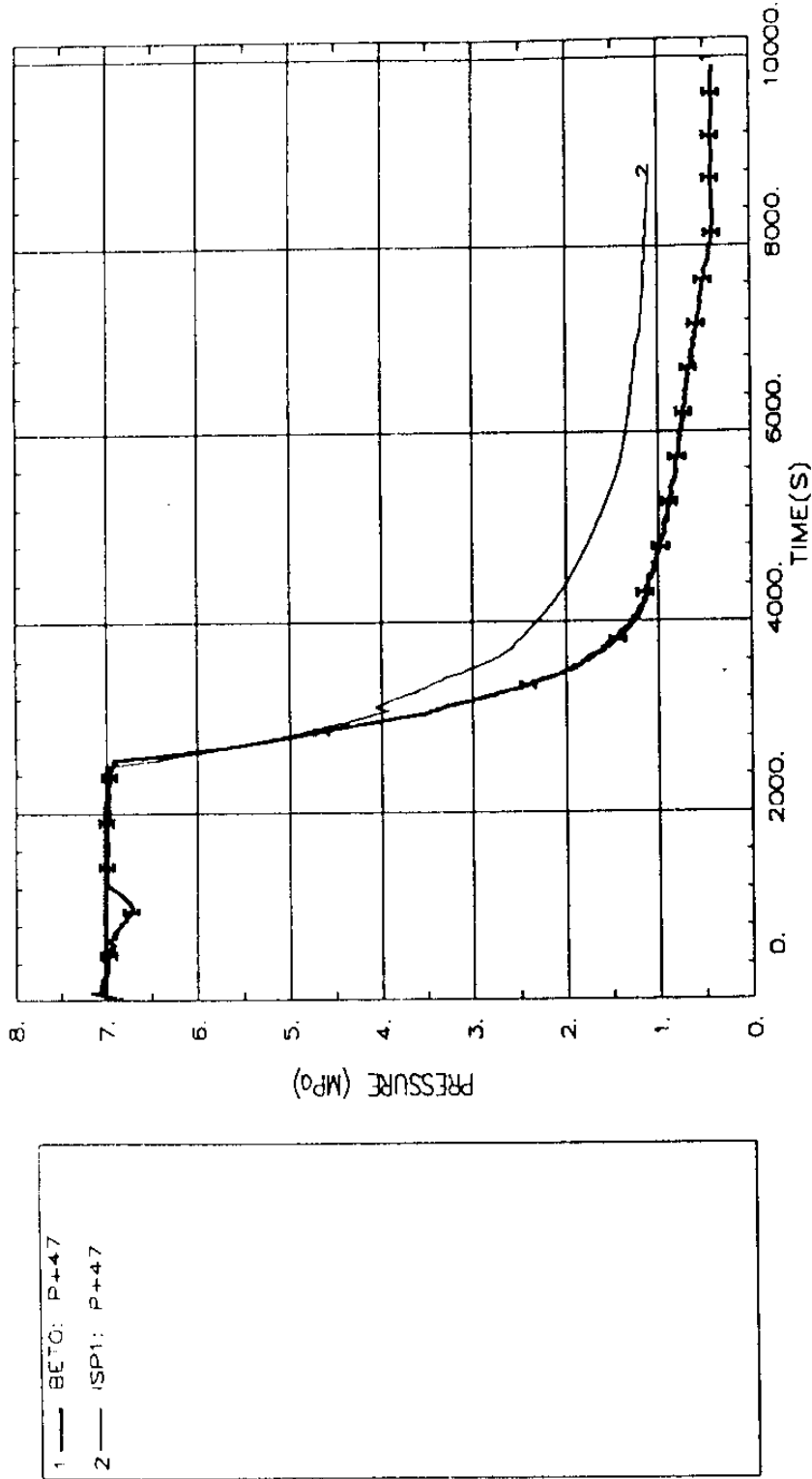


그림 118 ISP-27의 SG1의 Steam Dome 압력

ISP27 : EXPER/CALC COMPARISON
 KOREA KAERI CATHARE 2 (2 loop)

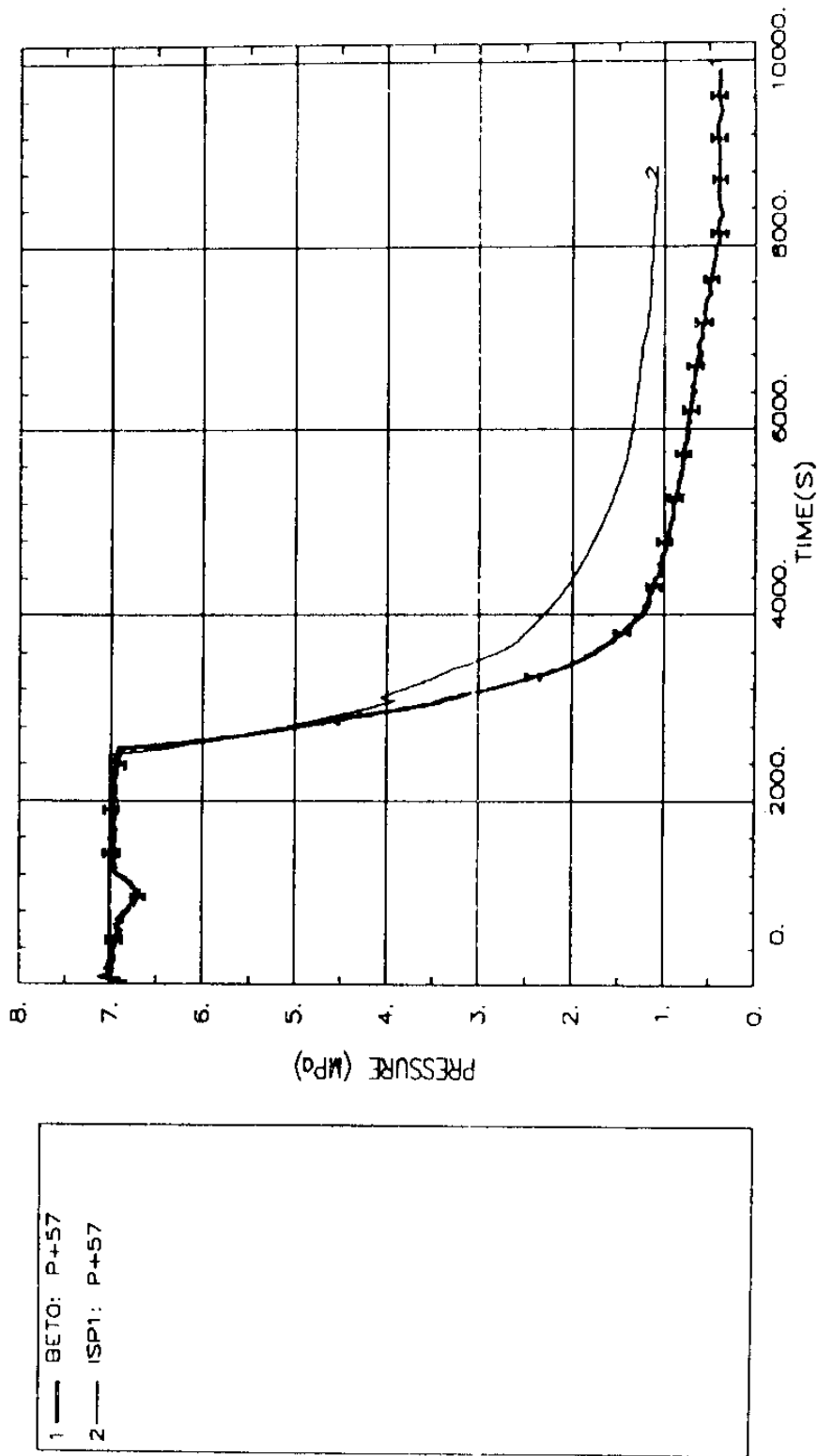


그림 119 ISP-27의 SG2의 Steam Dome 압력

ISP27 : EXPER/CALC COMPARISON
 KOREA KAERI CATHARE 2 (2 loop)

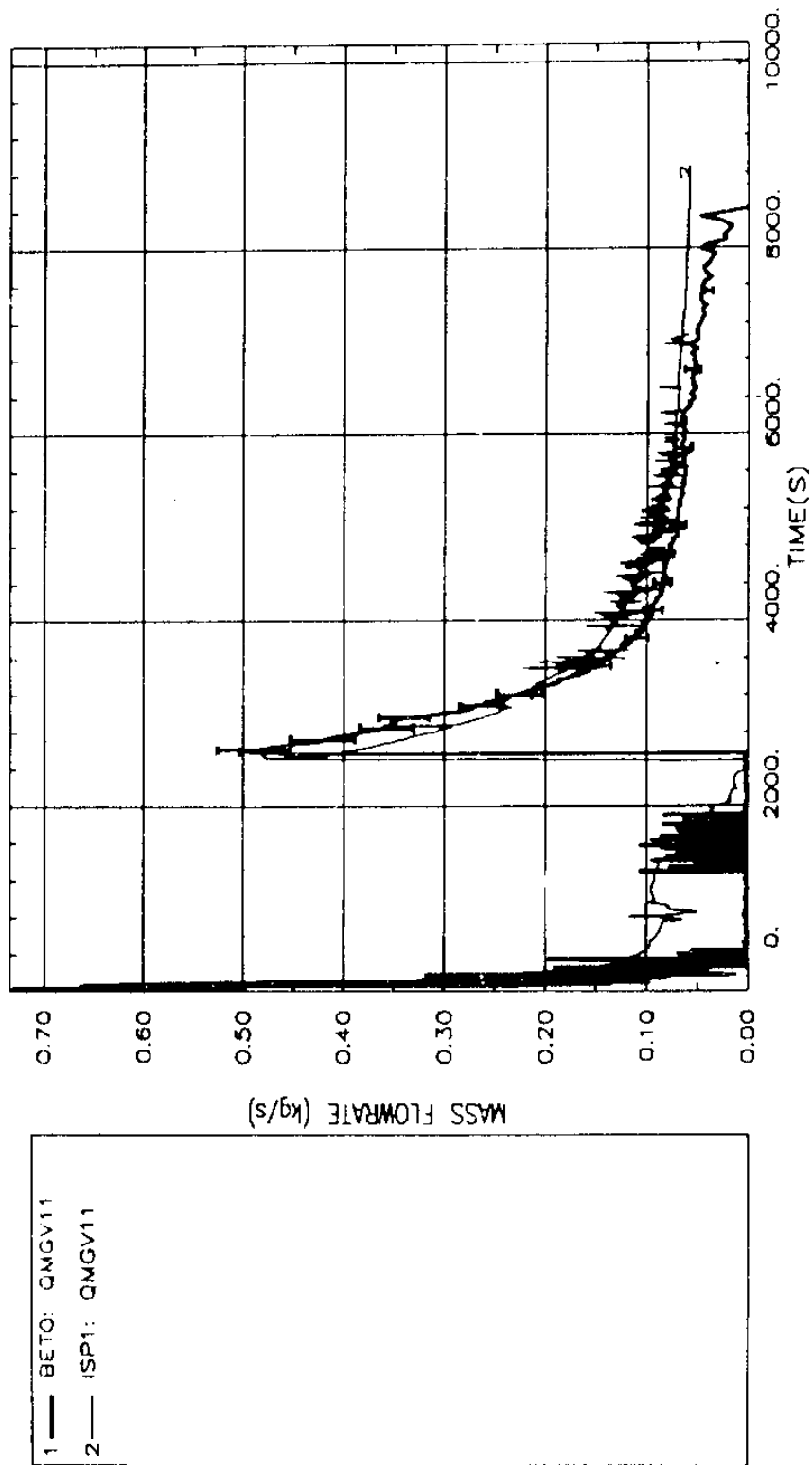


그림 120 ISP-27의 SG1의 증기유량

ISP27 : EXPER/CALC COMPARISON
 KOREA KAERI CATHARE 2 (2 loop)

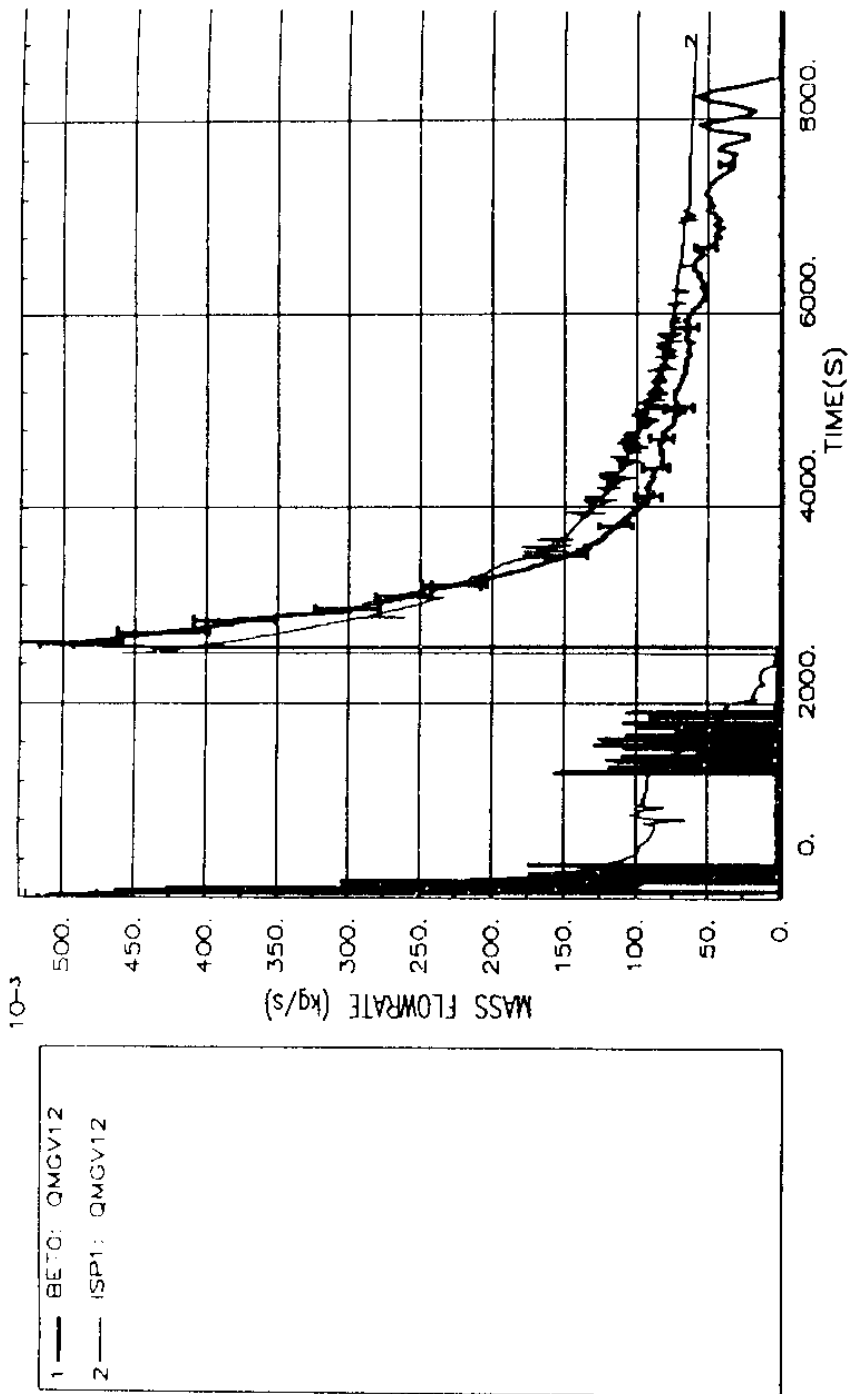


그림 121 ISP-27의 SG2의 증기유량

ISP27 : EXPR/CALC COMPARISON
 KOREA KAERI CATHARE 2 (2 loop)

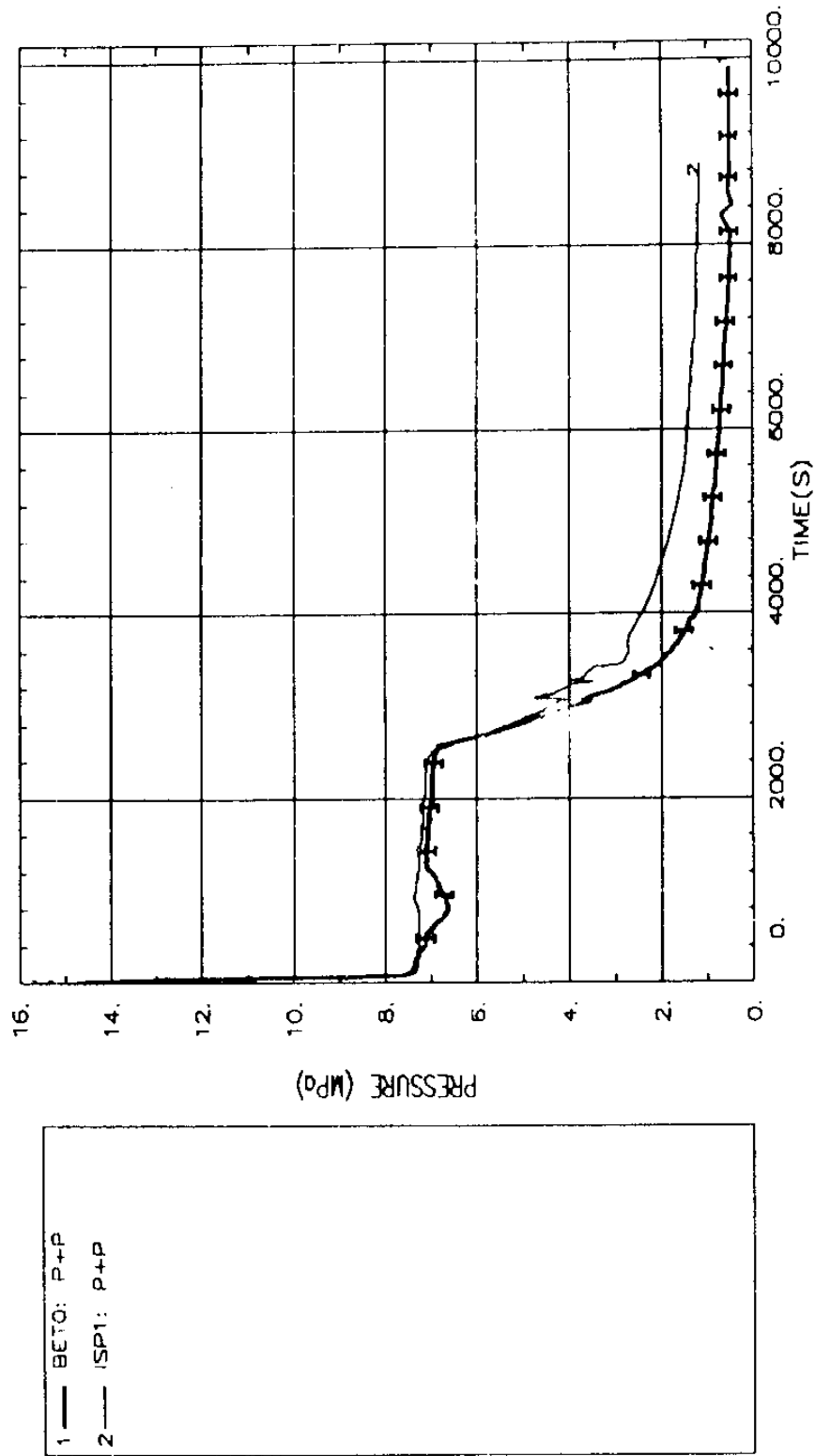


그림 122 ISP-27의 가압기 압력

ISP27 : EXPR/CALC COMPARISON
 KOREA KAERI CATHARE 2 (2 loop)

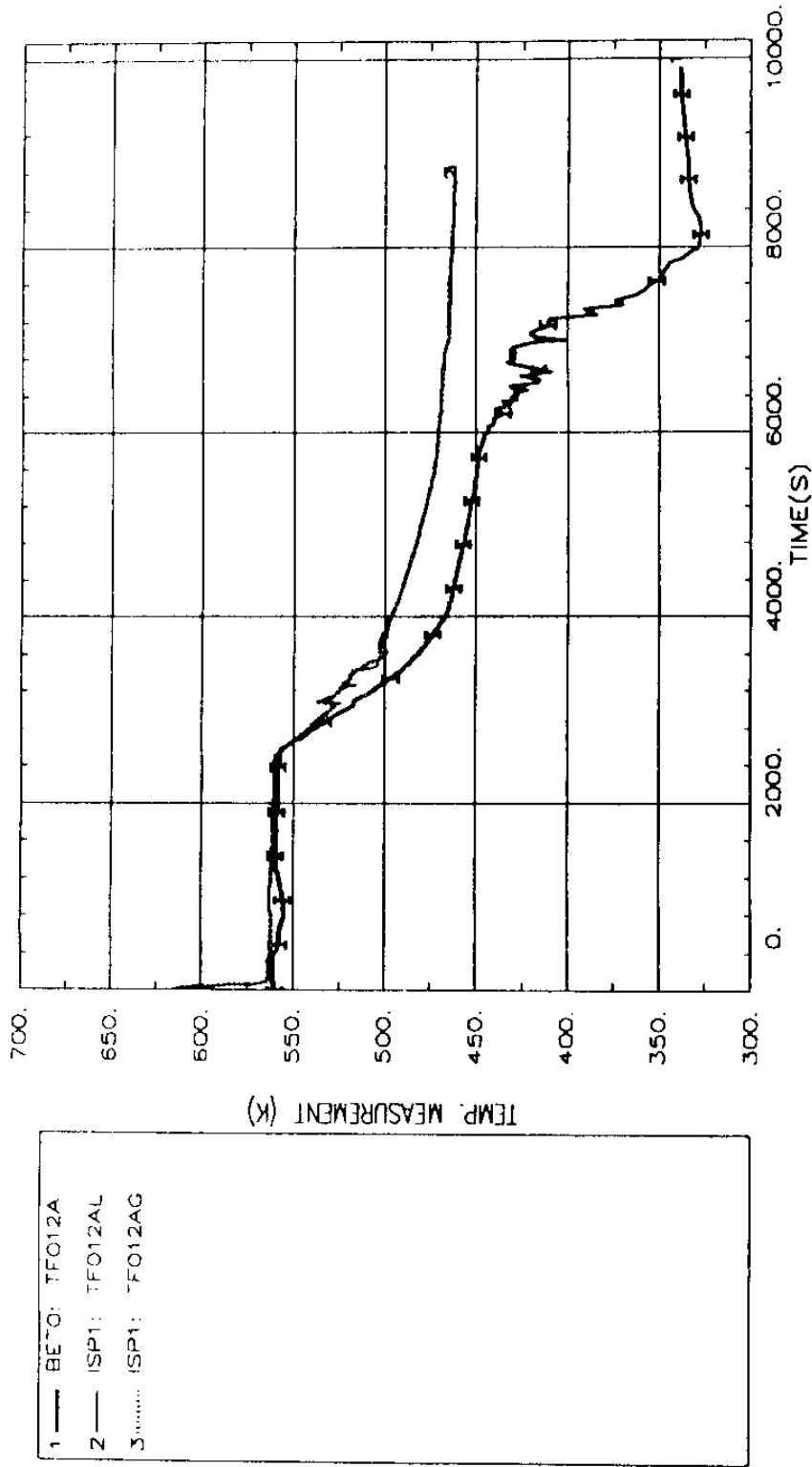


그림 123 ISP-27의 노심 입구온도

ISP27 : EXPER/CALC COMPARISON
 KOREA KAERI CATHARE 2 (2 LOOP)

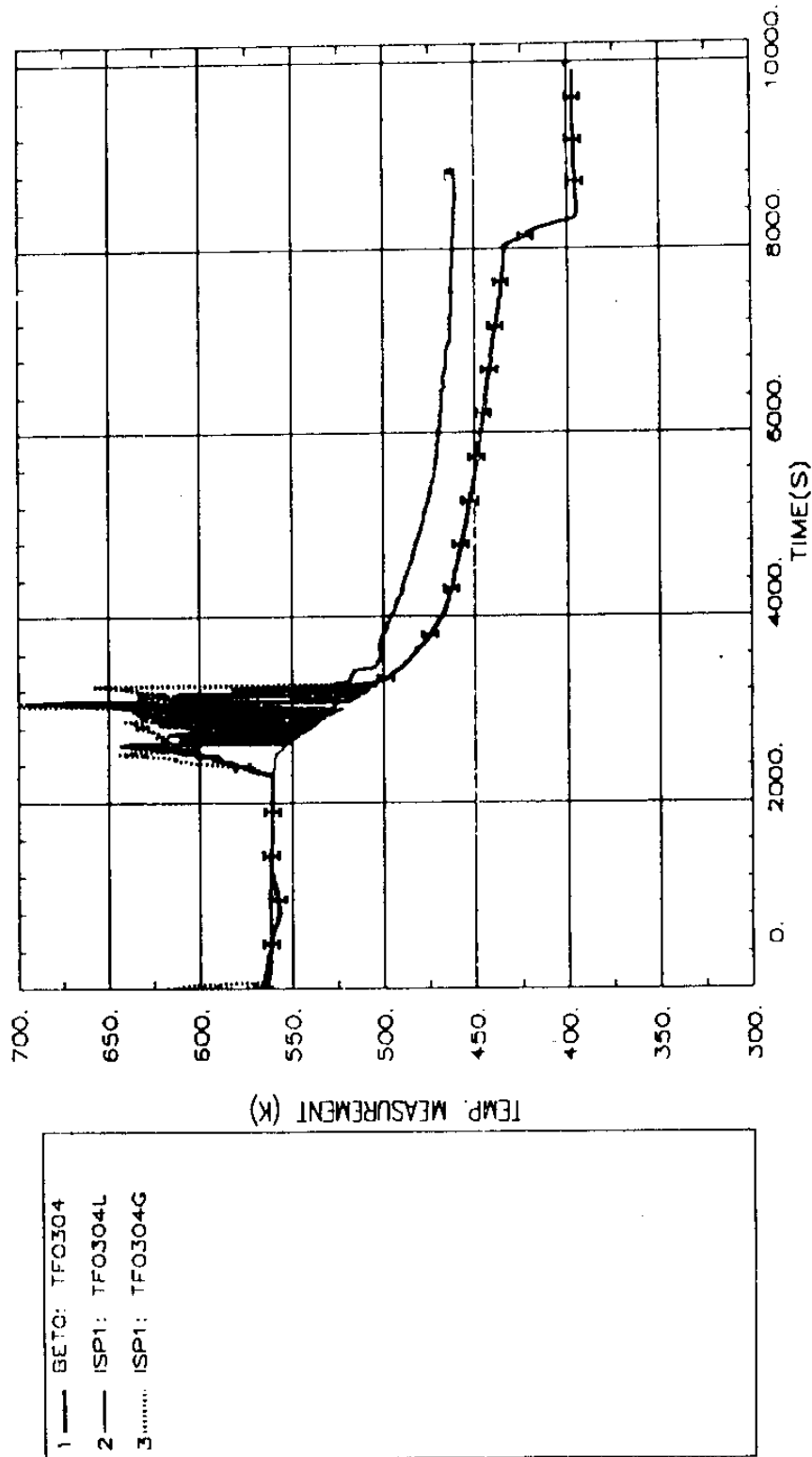


그림 124 ISP-27의 노심 출구온도

ISP27 : EXPR/CALC COMPARISON
 KOREA KAERI CATHARE 2 (2 loop)

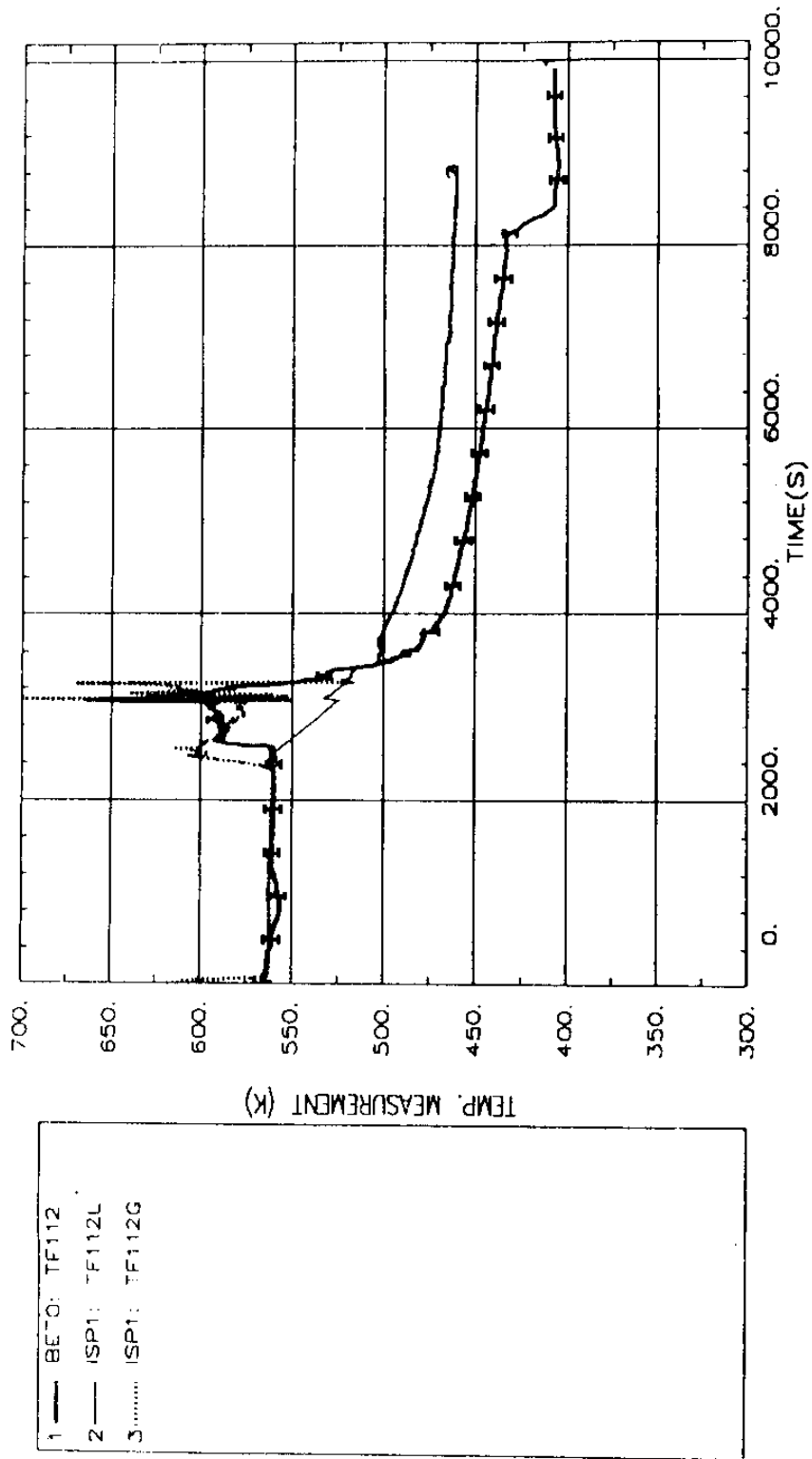


그림 125 ISP-27의 고온관1의 온도

ISP27 : EXPR/CALC COMPARISON
 KOREA KAERI: CATHARE_2 (2 loop)

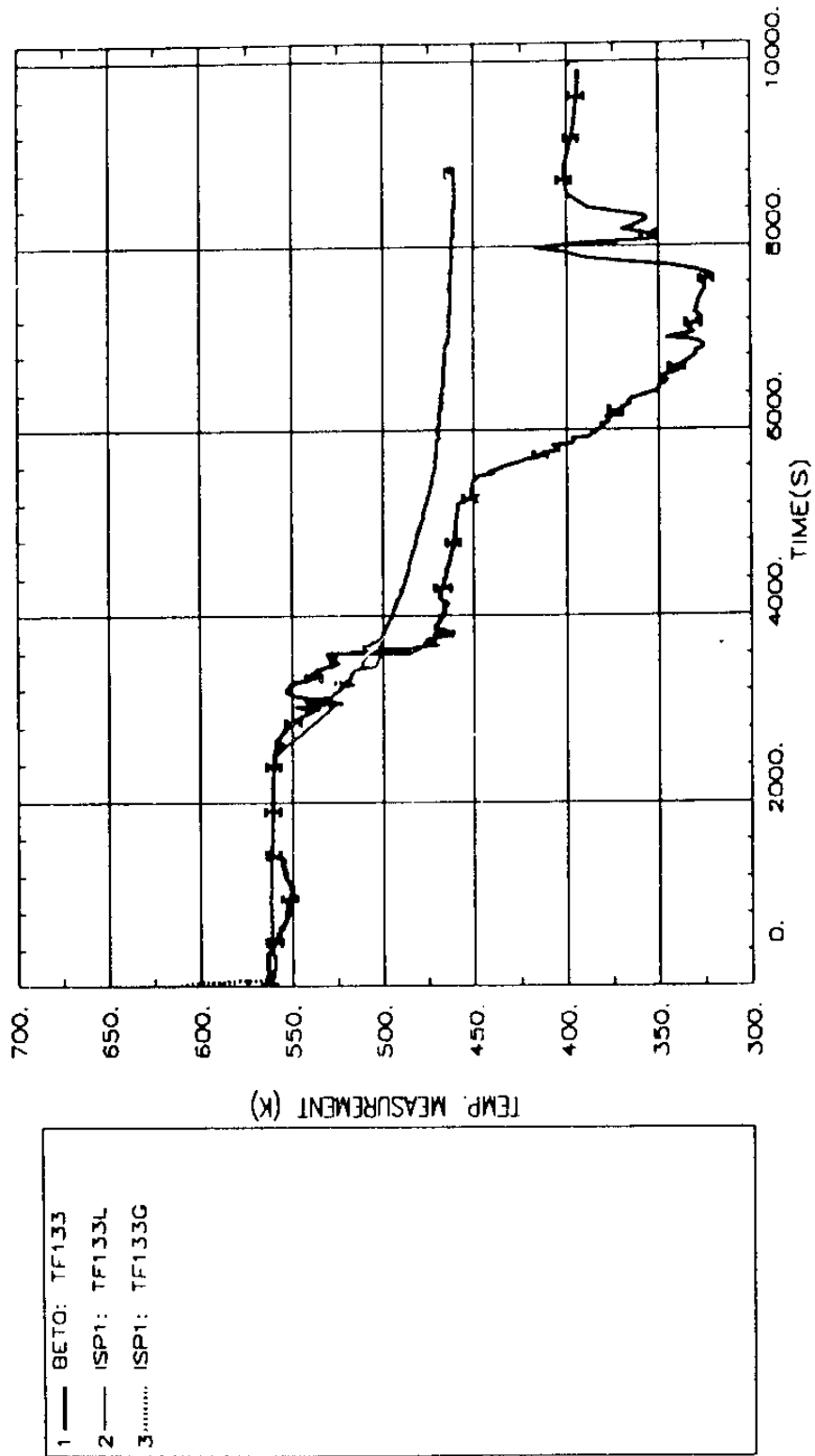


그림 126 ISP-27의 저온관1의 온도

ISP27 : EXPER/CALC COMPARISON
 KOREA KAERI CATHARE 2 (2 loop)

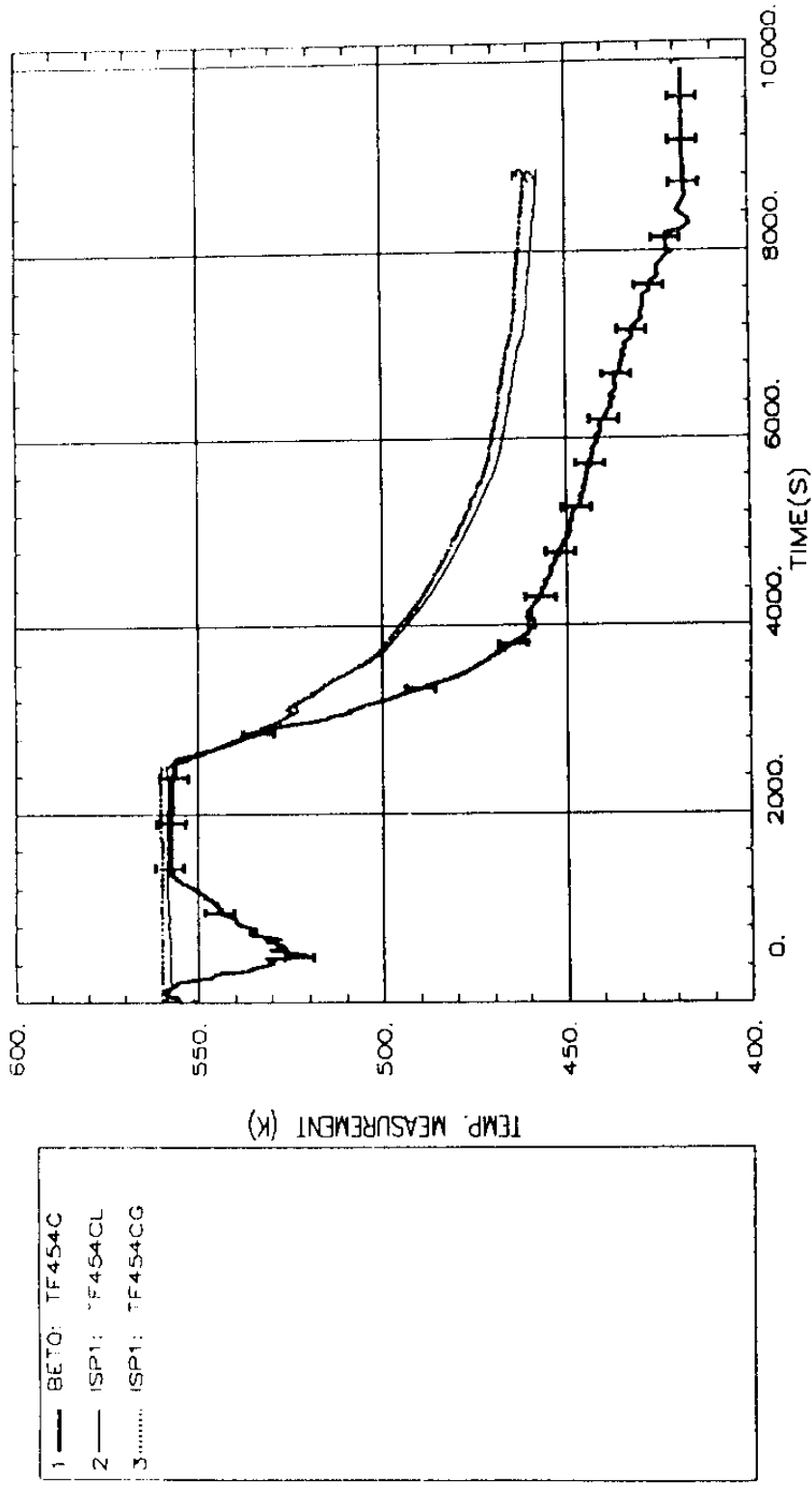


그림 127 ISP-27의 SG1 Downcomer 바닥에서 온도

ISP27 : EXPER/CALC COMPARISON
 KOREA KAERI CATHARE 2 (2 loop)

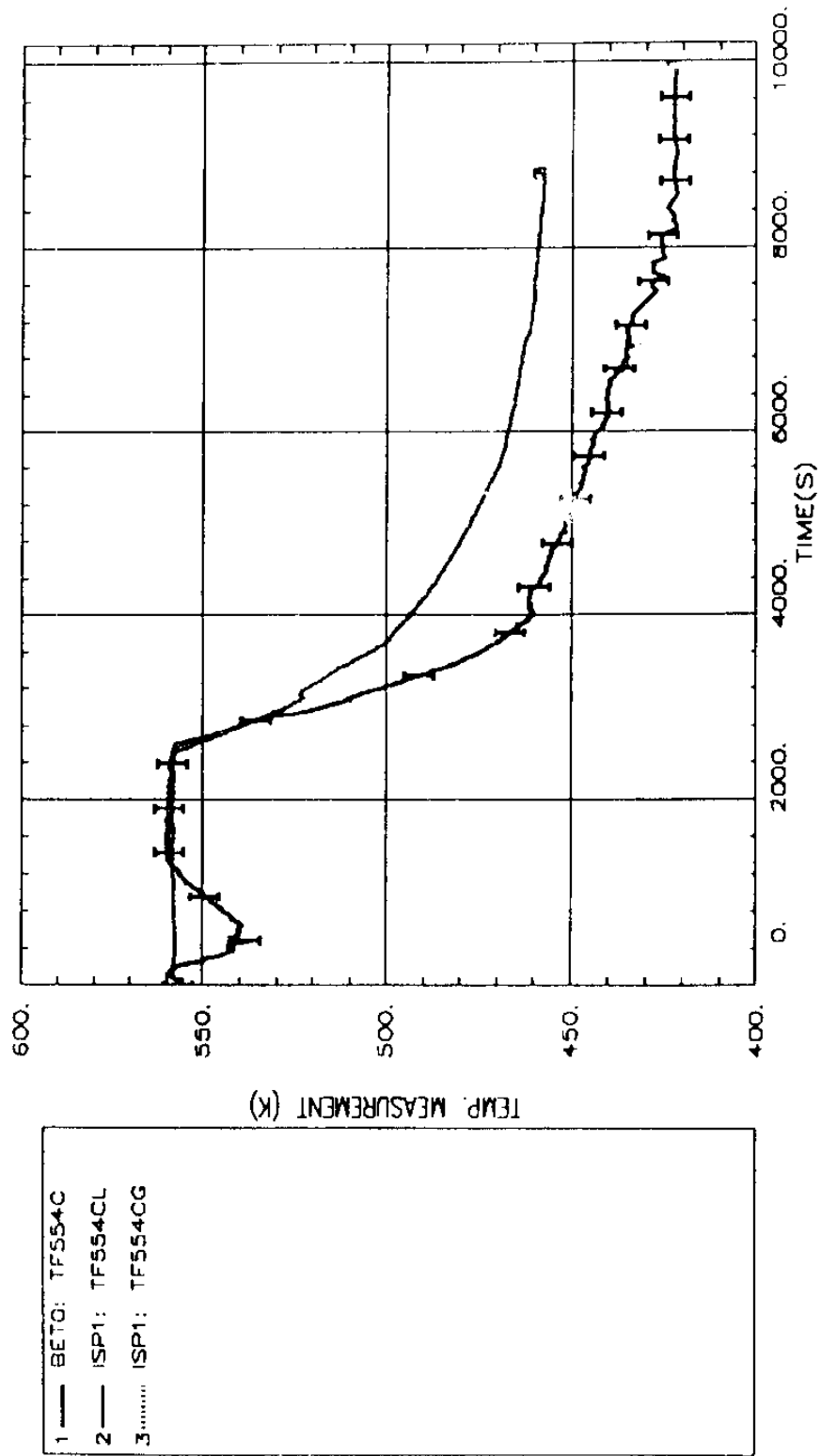


그림 128 ISP-27의 SG2 Downcomer 바닥에서 온도

ISP27 : EXPER/CALC COMPARISON
 KOREA KAERI CATHARE 2 (2 loop)

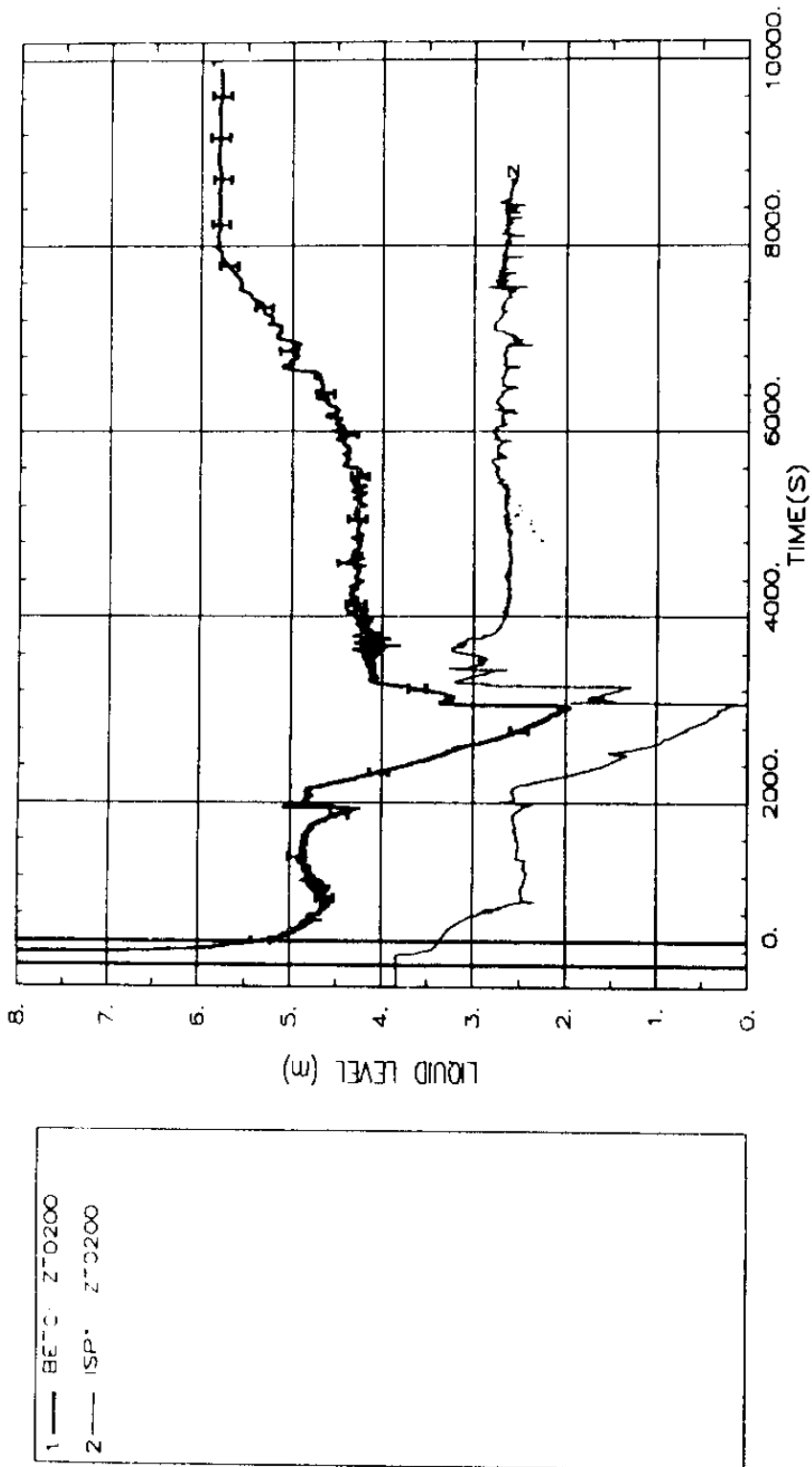


그림 129 ISP-27의 노심의 Collapsed Level

ISP27 : EXPER/CALC COMPARISON
 KOREA KAERI CATHARE 2 (2 loop)

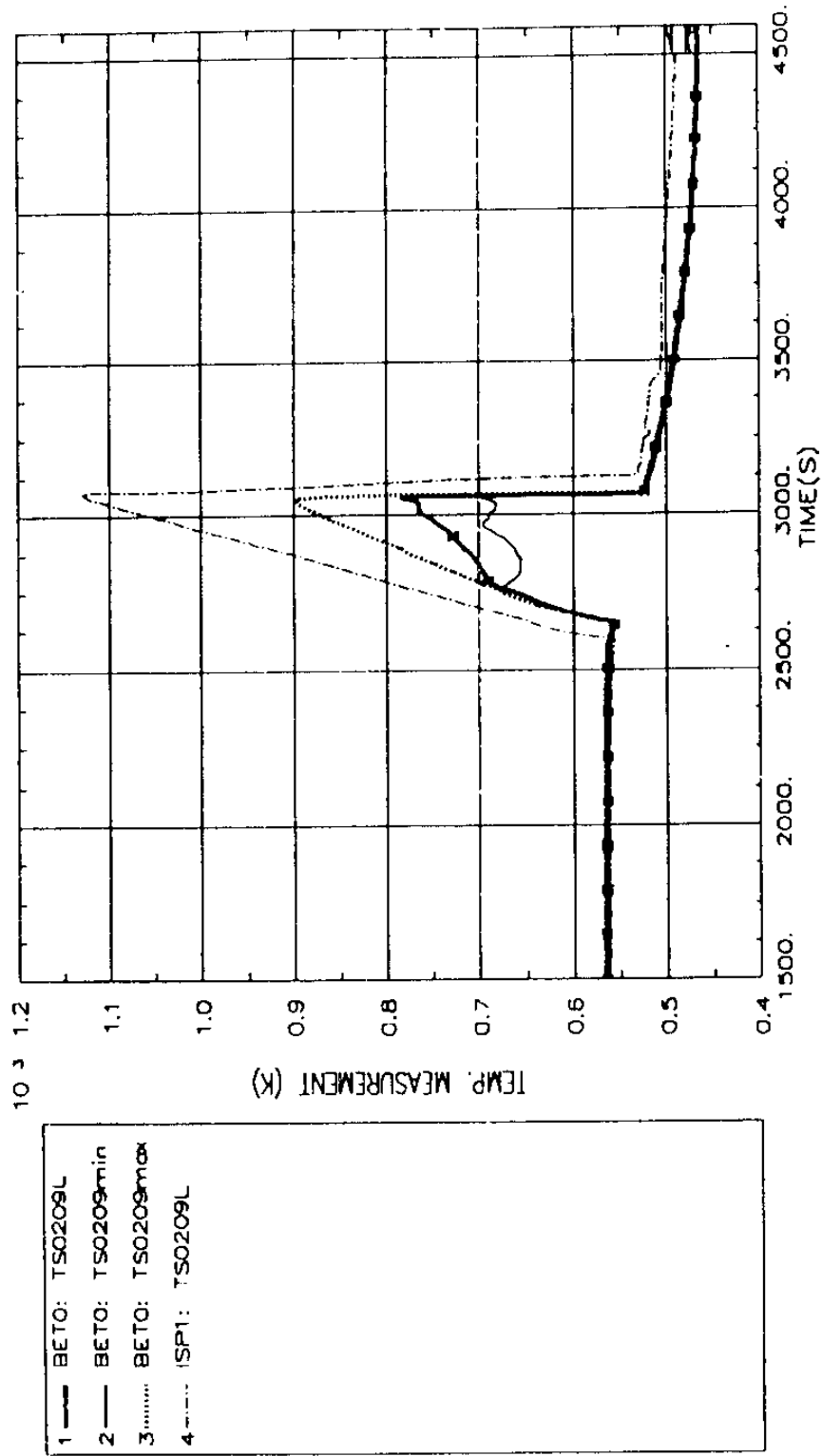
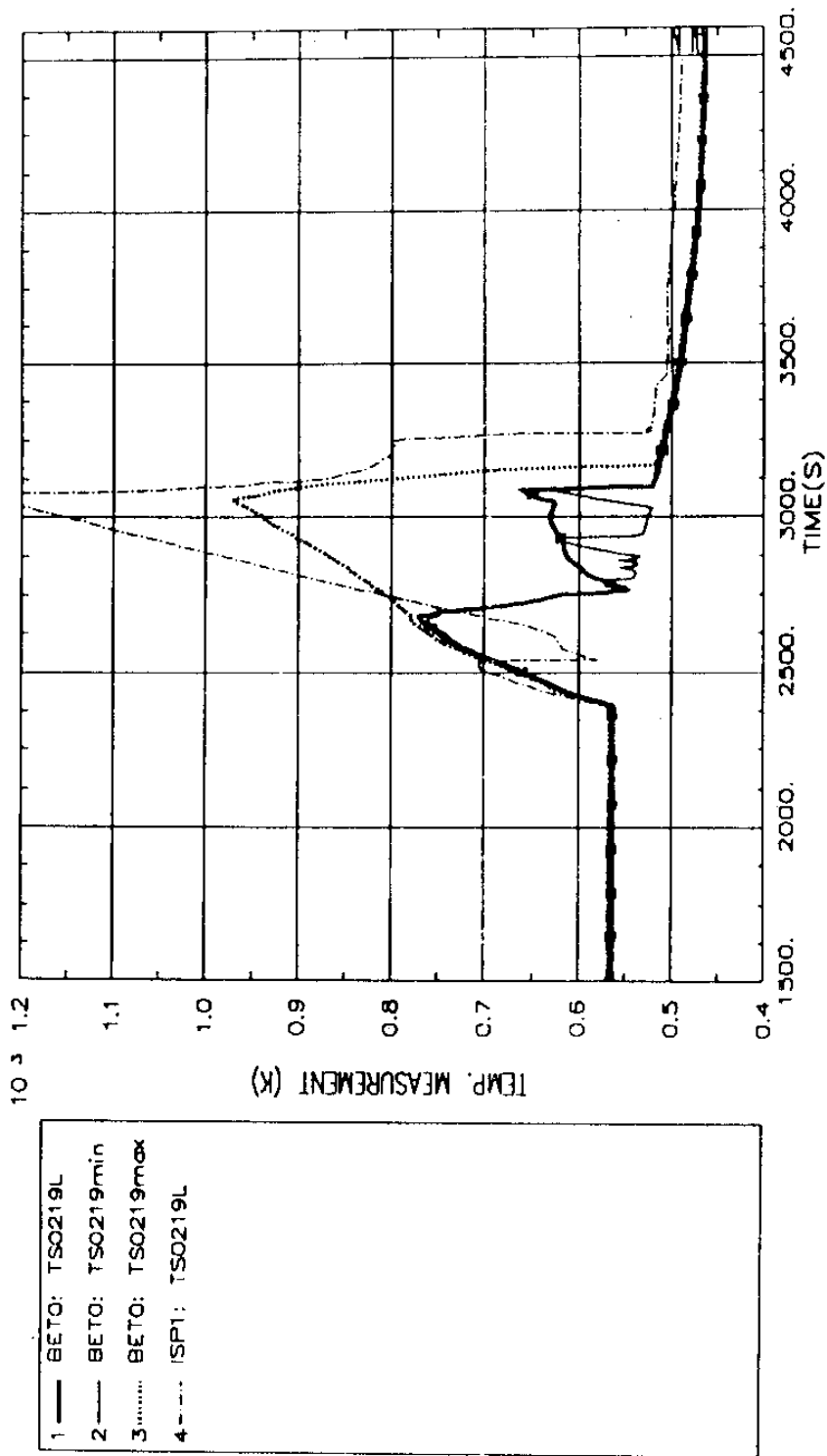


그림 130 ISP-27의 노심 1.628m 위치에서의 피복재온도

ISP27 : EXPER/CALC COMPARISON
 KOREA KAERI CATHARE 2 (2 loop)



그 립 131 ISP-27의 노심 2.648m 위치에서의 피복재온도

ISP27 : EXPER/CALC COMPARISON
 KOREA KAERI CATHARE 2 (2 loop)

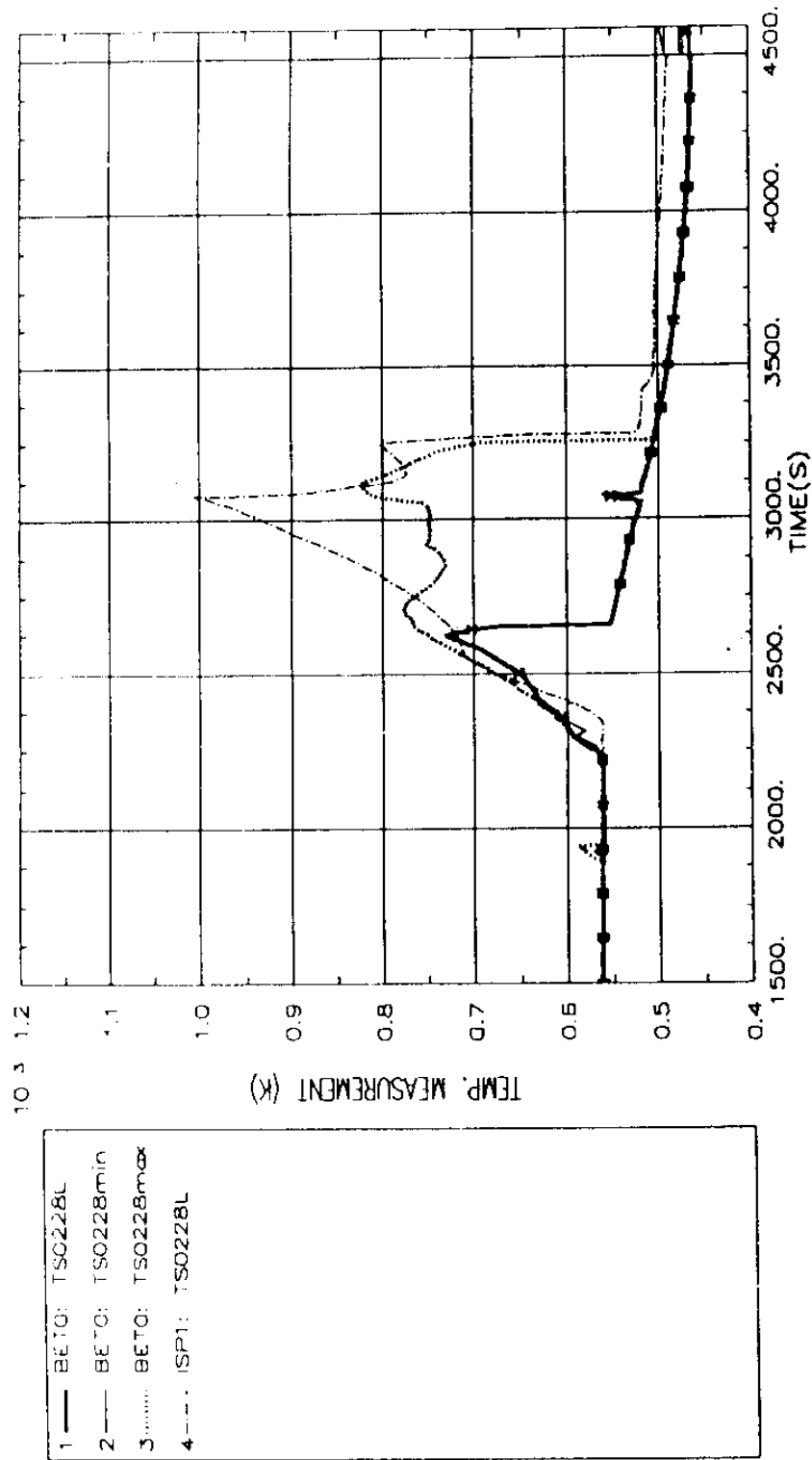


그림 132 ISP-27의 노심 3,600m 위치에서의 피복재온도

표 1 설계기준사고 이해를 위한 대형 실험장치

	PKL	BETHSY	LOBI	LOFT	LSSTF
NUMBER OF LOOPS (REACTOR/FACILITY)	4 / 3	3 / 3	4 / 3	4 / 2	4 / 2
SCALE VOLUME	1:134	1: 100	1: 700	1: 48	1: 48
ELEVATION	1:1	1: 1	1: 1	1: 2	1: 1
POWER (MW) (%NP) RODS	1.25 5 340	3. 10 428	3.3 100 84	50. 100 1300 (FUEL)	10. 14 1080
PRESSURE (MPa)	4	16.	16.	16.	16.
DOWNCOMER	EXTERNAL	EXTERNAL	INTERNAL	INTERNAL	INTERNAL
HOT LEG DIAMETER (mm)	Double 113 Single 80.8	118	Triple 73.7 Single 46.1	280	207

표 2 BETHSY 실험장치의 실험 수행 상황

<u>CHARACTERIZATION TESTS</u>		x
<u>STEADY STATE tests :</u>		
. Single phase NC		
- Balanced loops (low, high P)	3.1	x
- Unbalanced loops (isolation of 1, 2 SGs)	3.4a	x
. Two phase NC		
- Balanced loops		
high P 2% NP	4.1a	x
5% NP	4.1aTC	x
low P	4.1b	
- Unbalanced loops	5.1b	x
- non condensible gas	7.2	x
. Degradation of SG mass inventory		
- Single phase at PCS (NC, FC)	5.1a	x
- Two phase NC	4.1aTC	x
. Two-phase flow forced convection	8.1a	x
. Feed and bleed at PCS	5.2a	x

표 2 BETHSY 실험장치의 실험 수행 상황(계속)

<u>SMALL - INTERMEDIATE BREAKS</u>		
Cold leg :		
2" : - w HPIS 1 FILE, -EOP-	4.2a	x
- wo HPIS, delayed ultimate procedure	9.1b	x
3" : - safety injection in intact loops	6.1a	x
- safety injection in every loop	6.1b	x
- pumps on	8.1b	
- delayed pump trip	8.1c	
6" : - UHSN 3%, conservatrice power curve	6.2TC	x
- UHSN 2%, realistic power curve	6.2	x
10"	6.3	x
Hot leg : 6"	6.4	
Steam break at pressurizer	6.5	x
PV lower plenum	4.2b	
RHRS break -EOP-	6.8	

표 2 BETHSY 실험장치의 실험 수행 상황(계속)

<u>STEAM GENERATOR TUBE RUPTURE</u>			
. single w HPIS and AFWS	-EOP-	3.4b	x
. single wo HPIS and AFW	-EOP-	9.3	
. multiple (6 tubes) w HPIS, AFWS	-EOP-	4.3b	x
. multiple + steam line rupture	-EOP-	9.2	
<u>TOTAL LOSS OF FEEDWATER</u>			
. 2 HPIS files, 3 relief valves	-EOP-	5.2c	x
. 1 HPIS file, 1 relief valve	-EOP-	5.2b	
. delayed recovery of AFWS	-EOP-	5.2e	
<u>BLACK OUT AND AFWS FAILURE</u>	-EOP-	5.2d	
<u>LOSS OF RHRS</u>			
. PCS open :			
- pressurizer		6.9a	
- pressurizer + SG inlet plenum		6.9b	
- pressurizer + SG outlet plenum		6.9c	
. PCS half-open		6.9d	
<u>LARGE BREAKS - reflooding phase -</u>			
- wo non condensible gas		6.7a 1...4	x
- with "		6.7b	x
. to be defined		6.7c...e	

표 3 단상 자연대류 실험의 종류

Phase	Actions	Characterization	
		Primary	Secondary
1	Cooling by SG2 and SG3	Single Phase	Isolated SG1
2	Cooling by SG2 and SG3	Two Phase	Isolated SG1
3	Cooling by SG2 and SG3 Filling of Primary	Two Phase to Single Phase	Isolates SG1
4	Cooling by Only SG3	Single Phase	Isolated SG1 and SG2

표 4 단상 자연대류 실험의 초기조건

변 수	평균값
노심출력(kw)	883
RCS 압력(bar)	155.8
가압기 수위(m)	6.13
가압기 온도(°C)	341.3
노심 입구온도(°C)	280.6
노심 출구온도(°C)	301.6
하향통로 유량(cm ³ /s) [kg/sec]	9087[7.50]
Loop1:	
고온관 압력(bar)	155.6
고온관 입구 평균온도(m/s)	0.326
고온관 입구온도(°C)	302.6
저온관 출구 평균유속(m/s)	0.304
저온관 출구온도(°C)	283.1
증기발생기 입구측 온도(°C)	302.1
증기발생기 출구측 온도(°C)	283.5
고온관 냉각재 유량(kg/sec)	2.55
Loop2:	
고온관 압력(bar)	156.5
고온관 입구 평균유속(m/s)	0.332
고온관 입구온도(°C)	303.4
저온관 출구 평균유속(m/s)	0.282
저온관 출구온도(°C)	281.3
증기발생기 입구측 온도(°C)	303.3
증기발생기 출구측 온도(°C)	284.3
고온관 냉각재 유량(kg/sec)	2.60
Loop3:	
고온관 압력(bar)	156.4
고온관 입구 평균온도(m/s)	0.330
고온관 입구온도(°C)	301.6
저온관 출구 평균유속(m/s)	0.304
저온관 출구온도(°C)	281.6
증기발생기 입구측 온도(°C)	301.7
증기발생기 출구측 온도(°C)	283.7
고온관 냉각재 유량(kg/sec)	2.58

표 4 단상 자연대류 실험의 초기조건(계속)

번	수	평균 값
SG1:		
	압력(bar)	69.4
	수위(m)	13.56
	급수유량(cm ³ /s)	116.9
	급수온도(°C)	14.4
	증기유량(kg/sec)	0.0736
	Upper head 온도(°C)	282.6
	총 유체질량(kg)	908.8
SG2:		
	압력(bar)	69.3
	수위(m)	13.63
	급수유량(cm ³ /s)	107.4
	급수온도(°C)	14.0
	증기유량(kg/sec)	0.0408
	Upper head 온도(°C)	282.8
	총 유체질량(kg)	930.1
SG3:		
	압력(bar)	69.2
	수위(m)	13.56
	급수유량(cm ³ /s)	107.4
	급수온도(°C)	13.8
	증기유량(kg/sec)	
	Upper head 온도(°C)	282.4
	총 유체질량(kg)	903.8

표 5 안전주입으로 공급된 질량의 분포도

Location	Mass(kg)
Primary system	208.0
Pressurizer	112.0
Pressure vessel	7.0
Hot leg1	0.8
SG1 tube(upstream)	41.0
SG1 tube(downstream)	39.0
Crossover leg1	5.2
Cold leg1	<0.1
Hot leg2	<0.1
SG2 tube (upstream)	<0.2
SG2 tube (downstream)	0.0
Crossover leg2	1.8
Cold leg2	<0.1
Hot leg3	<0.1
SG3 tube (upstream)	<0.1
SG3 tube (downstream)	<0.1
Crossover leg3	<0.1
Cold leg3	0.0

표 6 단상 자연대류 실험결과 요약

	Phase 1	Phase 2	Phase 3
01 (kg/2)	1.10	-	-
02 (kg/s)	2.85	3.0	1.70
03 (kg/s)	2.95	3.0	3.60
W1 (kw)	18	-	-
W2 (kw)	420	430	35
W3 (kw)	440	430	855

표 7 이상 자연대류 실험시 일차계통에서 배출된 질량

Stage	draining mass(kg)	Integrated draining mass	Primary mass(kg)	ratio (%)
1.1	0.0	0.0	1824	100
1.2	177	177	1735	95.0
1.3	88.9	265.9	1605	88.0
1.4	88.6	354.5	1563	85.7
1.5	89.7	444.2	1474	80.8
1.6	87.2	531.4	1387	76.0
1.7	86.9	618.3	1300	71.3
1.8	88.3	706.6	1212	66.4
1.9	88.0	794.6	1124	61.6
1.10	87.7	882.3	1036	56.8
1.11	88.5	970.8	947	51.9
1.12	84.2	1055.0	863	47.3
1.13	88.3	1143.3	775	42.5
1.14	87.2	1230.5	668	37.7
1.15	75.2	1305.7	613	33.6
2.0	0	0	1824	100
2.1	91.4	91.4	1761	96.5
2.1	352.3	443.7	1478	81.0
2.3	698.5	1142.2	782	42.9

표 8 증기발생기 재고량 변화의 자연대류 실험 주요결과

	STATES				
	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
TIME (s)	5765. to 6732.	11908 to 12783	15028 to 16491	18466 to 19679	21400 to 21800
CORE POWER W02 (kW)	580.	583.5	577.1	577.2	277.
PRIMARY PRESSURE PP (MPa)	15.49	15.51	15.51	15.50	15.58
FLOWRATE QM05 (kg/s)	6.80	6.78	6.60	6.45	4.74
TEMPERATURE HOT LEG: TFHL (°C)	302.1	303.7	309.7	HEATING 318.3 to 323.1	332.3 to 335.2
TEMPERATURE COLD LEG: TFCL (°C)	285.7	287.1	293.4	HEATING 303.3 to 308.3	325.1 to 328.5
TEMPERATURE SG HEAD : THGV (°C)	288.8	291.2	298.7	HEATING 309.3 to 313.8	328.4 to 331.1
FP PUMP FP2F (hPa)	38.13	37.84	37.08	35.87	31.00
SECONDARY PRESSURE (MPa)	6.95	6.95	6.95	6.94	6.83
LEVEL ACHIEVED (m)	3.33 ± 0.07	2.27 ± 0.07	1.05 ± 0.035	0.43 ± 0.035	< 0.05 ± 0.035
FEEDWATER FLOWRATE (g/s)	115.2	111.3	105.1	91.3	0.
FEEDWATER TEMPERATURE TFAN3j (°C)	267.8	267.8	267.4	266.0	245.4
RISER INFLOW TEMPERATURE TFJ54 (°C)	285.2	285.8	285.24	286.0	301.7
RISER HEAD SUPERHEATING TFJ71-TSAT (°C)	5.7	7.9	308.1 15.4	328.1 to 313.6	to 331.4

표 9 증기발생기 재고량 변화의 강제대류 실험 주요결과

	STATES					
	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6
TIME (s)	9521. to 10833.	18248 to 19095	21317 to 22386	24649 to 25588	27827 to 28836	3692 to 3790
POWER (kW)	1408.	1470.	1427.	1424.	1426.	579.
SPEED (rpm)	2000.	1998.8	1997.4	1998.7	1998.7	1998.
PRIMARY PRESSURE (MPa)	15.33	15.33	15.39	15.43	15.49	15.51
FLOWRATE Q05 (kg/s)	95.04	94.25	93.73	92.62	90.90	90.95
HOT LEG TEMPERATURE THTL (°C)	288.8	291.5	292.05	297.4	303.2	302.0
COLD LEG TEMPERATURE TCTL (°C)	286.15	288.6	290.7	295.8	301.7	301.4
TEMPERATURE HEAD SG TUBE THGZ (°C)	287.0	289.8	290.7	295.8	301.7	301.4
DI. PUMP DISP (hPa)	-2478.	-2461.	-2451.	-2427.	2387.	-2389.5
SECONDARY PRESSURE (MPa)	6.93	6.94	6.93	6.94	6.94	6.94
LEVEL ACHIEVED (m)	10.20 +0.17	3.10 +0.07	2.11 +0.07	1.08 +0.035	0.61 +0.035	0.27 +0.035
FEEDWATER FLOWRATE (kg/s)	0.287	0.296	0.286	0.280	0.275	0.101
TEMPERATURE FEEDW. (°C)	271.6	271.7	271.5	271.7	271.4	267.
SUPERHEAT. RISER HEAD THJ71-TSAT (°C)	0.	5.5	7.3	11.4	17.4	18.

표 10 증기발생기 재고량 변화의 자연대류 실험시 실험치와
계산치의 비교

		STATES				
		1.0	1.1	1.2	1.3	1.4
CORE POWER W02 (kW)	e c	580.	580. 580.	577.0 580.	577.1 580.	577.2 580.
PRESSUR. PRESSURE MPa	e c	15.45	15.49 15.43	15.51 15.44	15.51 15.51	15.50 15.58
FLOWRATE QM05 kg/s	e c	7.09	6.80 6.86	6.78 6.80	6.60 6.68	6.45 6.8
Bypass/QM05 %	e c	1.3	1.25 1.5	1.33 1.50	1.70 1.75	2.4 2.0
TEMPERATURE HL °C	e c	301.2	302.1 302.3	303.7 303.1	309.7 307.4	320.8 314.7
TEMPERATURE CL °C	e c	285.6	285.7 286.3	287.1 287.0	293.4 291.3	306.0 300.
TEMPERATURE THGV °C	e c	286.2	288.8 289.3	291.2 290.7	298.7 297.0	311.4 307.
PRESSURE DGV MPa	e c	6.95	6.95 6.95	6.95 6.05	6.95 6.95	6.94 6.94
COLLAPSED LEVEL m	e c	10.	3.33 + 0.07 3.22	2.27 ± 0.07 2.30	1.05 ± 0.035 1.04	0.43 + 0.035 0.47
SWELLED LEVEL m	e c	12.4	3.81 ± 0.50 3.756	2.58 ± 0.24 3.008	1.21 ± 0.16 1.512	0.58 ± 0.15 0.8
FEEDWATER FLOWRATE (kg/s)		0.118	0.115 0.116	0.111 0.117	0.105 0.113	0.091 0.093
TEMPERATURE RISER INFLOW °C	e c	285.2	285.2 285.4	285.8 285.8	285.24 285.25	286.0 285.4
RATE OF RECIRCUL.	e c	1.06	1.08 1.06	1.08 1.06	1.08 1.06	1.08 5.9
SUPERHEAT. RISER HEAD °C	e c	0.	5.7 2.3	7.9 3.5	15.4 9.9	25.6 14.7

표 11 증기발생기 재고량 변화의 강제대류 실험시 실험치와
계산치의 비교

		STATES					
		2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6
CORE POWER kW	e	1408	1470	1426	1424	1426	579
	c	1408	1470	1427	1426	1426	580
PRESSU. PRESSURE MPa	e	15.3	15.3	15.4	15.4	15.9	15.5
	c	15.4	15.4	15.4	15.4	15.4	15.6
TEMPERATURE HL °C	e	288.8	291.5	293.0	297.4	303.2	302.1
	c	289.5	291.3	292.3	297.2	301.0	295.3
TEMPERATURE CL °C	e	286.2	288.6	290.3	294.6	300.5	300.9
	c	286.7	288.5	289.6	294.5	298.4	294.8
TEMPERATURE SG °C	e	287.	289.8	291.4	295.8	301.7	301.4
	c	287.6	289.6	290.7	295.7	299.6	294.8
DP PUMP hPa	e	-2478	-2460	-2452	-2427	-2387	-2389
	c	-2423	-2414	-2407	-2380	-2352	-2379
SECONDARY PRESSURE MPa	e	6.93	6.94	6.94	6.94	6.95	6.94
	c	6.93	6.93	6.93	6.93	6.93	6.93
COLLAPSED LEVEL SG m	e	10.2	3.10	2.11	1.08	0.61	0.27
	c	+0.17 10.24	+0.07 3.08	+0.07 2.18	+0.035 1.03	+0.035 0.564	+0.035 0.25
SWELLED LEVEL SG m	e		3.8	2.725	1.37	0.89	0.375
	c		+0.41 4.13	+0.27 3.01	+0.23 1.39	+0.16 0.935	+0.10 0.53
FEEDWATER FLOWRATE kg/s	e	0.287	0.296	0.286	0.280	0.275	0.101
	c	0.289	0.299	0.289	0.284	0.280	0.101
RECIRCULAT. RATE	e	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06
	c	1.045	1.046	1.046	1.047	1.625	6.2
TEMPERATURE RISER INFLOW °C	e	284.9	285.6	285.8	286.0	286.2	286.4
	c	284.5	285.2	285.2	285.2	285.2	285.2
SUPERHEAT. RISER HEAD °C	e	0.	5.6	7.4	11.4	17.5	18.1
	c	0.	1.7	2.7	6.8	9.55	5.8

표 12 증기발생기 재고량 변화의 자연대류 실험의 민감도 분석 결과

COMPARISON EXPERIMENT-CATHARE (CALCULATION B)						
NO. 2 & NP, CALCULATION SECONDARY SIDE WITH STRUCTURES						
			STATES			
			1.1	1.2	1.3	1.4
PRESSU. PRESSURE MPa	e		15.49	15.51	15.51	15.50
	c		15.43	15.44	15.51	15.58
FLOWRATE QM05 kg/s	e		6.80	6.78	6.60	6.45
	c		6.90	6.80	6.67	
TEMPERATURE HL °C	e		302.1	303.7	309.7	320.8
	c		302.1	303.6	308.1	318.7
TEMPERATURE CL °C	e		285.7	287.1	293.4	306.0
	c		286.3	287.4	292.4	304.6
TEMPERATURE THGV °C	e		288.8	291.2	298.7	311.4
	c		288.7	291.6	297.9	310.40
COLLAPS. LEVEL m	e		3.33	2.27	1.05	0.43
	c		+0.07 3.25	+0.07 2.30	+0.035 1.05	+0.035 0.47
SWELLED LEVEL m	e		3.80	2.58	1.21	0.58
	c		+0.50 4.13	+0.24 2.624	+0.16 1.387	+0.15 0.733
TEMPERATURE RISER INFLOW °C	e		285.2	285.8	285.24	286.0
	c		284.1	284.4	284.85	287.3
RECIRCUL. RATE	e		1.08	1.08	1.08	1.08
	c		1.06	1.08	1.08	1.08
SUPERHEAT. RISER HEAD °C	e		5.7	7.9	15.4	25.6
	c		3.7	6.7	12.8	25.0
1/ 1 kW/C.m ²	e		2.10	2.02	2.35	2.27
	c		2.09	2.11	2.20	2.30
1/ 2 kW/C.m ²	e		1.88	1.93	1.96	2.07
	c		1.71	1.85	2.10	2.24

표 13 증기발생기 재고량 변화의 강제대류 실험의 민감도 분석 결과

COMPARISON EXPERIMENT AND CATHARE (CALCULATION B) CF, 5 % NP, CALCULATION SECONDARY SIDE WITH STRUCTURES							
		STATES					
		2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6
TEMPERATURE HL °C	e c	288.8 289.4	291.5 291.35	293.0 292.4	297.4 297.3	303.2 304.8	302.1 301.5
TEMPERATURE CL °C	e c	286.2 286.7	288.6 288.5	290.3 289.7	294.6 294.6	300.5 302.25	300.9 300.6
TEMPERATURE SG HEAD °C	e c	287.0 287.5	289.8 289.7	291.4 290.8	295.8 295.8	301.7 303.5	301.4 301.4
COLLAPS. LEVEL SG m	e c	10.2 +0.17 10.24	3.10 +0.07 3.19	2.11 +0.07 2.17	1.08 +0.035 1.065	0.61 +0.035 0.575	0.27 +0.035 0.27
SWELLED LEVEL m	e c		3.8 +0.41 4.13	2.725 +0.27 3.008	1.37 +0.23 1.387	0.89 +0.16 0.733	0.375 +0.10 0.33
FEEDWATER FLOWRATE kg/s	e c	0.287 0.291	0.296 0.300	0.286 0.289	0.280 0.284	0.275 0.277	0.101 0.1076
RECIRCULAT. RATE	e c	1.06 1.045	1.06 1.046	1.06 1.055	1.06 1.057	1.06 1.054	1.06 1.07
TEMPERATURE RISER INFLOW °C	e c	284.9 282.1	285.6 284.8	285.8 285.0	286.0 285.2	286.2 285.2	286.4 285.1
SUPERHEAT. RISER HEAD °C	e	0.	5.6	7.4	11.4	17.5	18.1
1/X1 kW/C.m ²	e c	5.1 4.5	5.7 5.86	5.7 6.07	6.4 6.65	6.9 7.06	7.2 6.95
1/X2 kW/C.m ²	e c	5.0 3.64	5.6 5.05	5.6 5.40	6.3 6.20	6.8 7.02	7.2 6.95

표 14 증기발생기 재고량 변화의 실험치와 CATHARE 계산치의 민감도 비교 분석

COMPARISON EXPERIMENT AND CATHARE CALCULATIONS					
		STATES			
		1.2 NC	2.2 CF	2.3 CF	2.4 CF
TEMPERATURE HI.	ex	303.7	291.5	293.0	297.4
°C	A	303.1	291.3	292.3	297.2
°C	B	303.6	291.35	292.4	297.3
°C	C	303.2	291.35	293.0	297.3
TEMPERATURE CL.	ex	287.1	288.6	290.3	294.6
°C	A	287.0	288.5	289.6	294.5
°C	B	287.4	288.5	289.7	294.6
°C	C	287.0	288.5	290.3	294.6
TEMPERATURE HEAD	ex	291.2	289.8	291.4	295.8
SG °C	A	290.7	289.6	290.7	295.7
SG °C	B	291.6	289.7	290.8	295.8
SG °C	C	290.0	289.7	291.5	295.8
SWELLED LEVEL SG	ex	2.72	3.80	2.72	1.37
m	A	3.008	4.13	3.008	1.387
m	B	2.624	4.13	3.008	1.387
m	C	3.008	4.13	2.63	1.387
TEMPERA. INFLOW	ex	285.8	285.6	285.8	286.0
RISER °C	A	285.4	285.2	285.2	285.2
RISER °C	B	284.4	284.8	285.0	285.2
RISER °C	C	284.6	284.8	285.0	285.2
SUPERHEAT. HEAD	ex	7.9	5.6	7.4	11.4
RISER °C	A	3.5	1.7	2.7	6.8
RISER °C	B	6.7	2.9	4.0	8.4
RISER °C	C	7.05	3.94	6.13	10.

표 15 급수완전 상실사고의 원자로 및 가압기의 정상상태 주요변수

PARAMETERS	Average	Standard Deviation	Maximum Deviation
Core power WO2 Kw	1094	6	44
Vessel pressure PO2 MPa	14.49	0.08	0.21
Press. level (1) ZTP1 m	4.43	0.06	0.15
Upper head TF (C)	288.2	0.1	--
Lower plenum TF (C)	286.6	0.1	--
Bottom upp.plenum TF (C)	288.3	0.1	--
Top upp.plenum TF (C)	290.3	1.5	--
TF core inlet -->regression*			
TF (C)	286.5	--	--
TF core outlet --> regression*			
TF (C)	287.9	--	--
Downcomer fl.rate (2) Q05N l/s	202.8	2	7

표 16 급수완전 상실사고의 일차계통 LOOP의 정상상태 주요변수

PRIMARY LOOPS									
PARAMETER	average			standard deviation			maximum deviation		
	B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3
CL pressure									
P013 MPa	14.73	14.64	14.73	0.08	0.10	0.09	0.21	0.23	0.23
DP-inlet P									
-outlet P									
DPGVI hPa	-2088	-2114	-2096	14	12	12	41	33	35
Mean TF C.L.	286.6	286.7	286.3	0.3	0.4	1.0	-	-	-
Mean TF L.S.	286.7	286.6	287.0	0.4	0.2	1.0	-	-	-
Mean TF H.L.	287.9	288.2	288.1	0.6	0.5	0.3	-	-	-
Pump speed									
VFi rpm	2948	2955	2946	2.0	2.5	2.0	5.0	7.5	7.5
CL velocity									
- local (m/s)									
(1) top Vi33N	6.7	5.5	6.3	0.2	0.3	0.3	0.5	0.8	0.9
middle Vi32N	8.1	7.5	7.1	0.2	0.1	0.1	0.5	0.4	0.4
bottom Vi31N	6.4	6.5	5.6	0.2	0.1	0.1	0.7	0.4	0.5
- flow:(C.L.)									
(2) mean VBFi	6.7	6.1	6.0	0.1	0.1	0.1	0.4	0.2	0.2
(m/s)									
HL velocity									
- local :									
(1) top Vi13N	-	7.1	7.7	-	0.4	0.2	-	0.8	0.5
middle Vi12N	7.2	7.8	7.7	0.2	0.2	0.1	0.6	0.5	0.4
bottom Vi11N	6.9	6.9	-	0.3	0.2	-	0.7	1.3	-
- flow:(H.L.)									
(2) mean VBCi	6.6	6.9	7.2	0.2	0.1	0.1	0.4	0.6	0.3

표 17 급수완전 상실사고의 이차계통의 정상상태 주요변수

PARAMETERS	SECONDARY								
	average			standard deviation			maximum deviation		
	SG1	SG2	SG3	SG1	SG2	SG3	SG1	SG2	SG3
SG PRESSURE									
P117 (MPa)	7.07	6.99	6.97	0.01	0.02	0.02	0.02	0.04	0.03
SG LEVEL									
(1) ZTIR1 (m)	5.75	5.78	5.76	0.03	0.05	0.06	0.06	0.11	0.13
NEW FLOWRATE									
QMAH31 (KG/S)	0.235	0.241	0.235	0.004	0.003	0.003	0.0160	.090	.090
NEW TEMPERATURE									
TEMP1 (C)	268.5	268.7	269.1	0.3	0.3	0.3	1.2	0.8	1.1
SG MASS									
MSG1 (kg)	318.	325.6	323.	0.7	0.7	0.7	2.1	2.0	2.6
TEMP SG OUTLET	284.3	285.8	286.2	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	0.4
TEMP RISER INLET									
TEMP10 (C)	284.6	286.7	284.6	0.3	0.2	0.2	0.7	0.6	0.5

표 18 급수완전 상실사고의 각 LOOP 및 펌프의 정상상태 유량

	COLD LEGS	DELTA P SG	PUMP CHARAC.
Mean velocity			
1	6.7 + 0.3		
2 (m/s)	6.1 + 0.3		
3	6.0 + 0.3		
Mean flowrate			
1	55 + 3	50.6 + 0.5	50.8 + 1
2 (kg/s)	50 + 3	50.9 + 0.5	50.9 + 1
3	49 + 3	50.7 + 0.5	51.2 + 1
Loop flowrate Q (kg/s)	51.3 + 3	50.7 + 0.5	51.0 + 1
Total flowrates Q (kg/s)	154 + 9	152.2 + 1.5	152.9 + 3

DOWNCOMER FLOWRATE Q MEASURED	151.2 + 1.7
-------------------------------------	-------------

표 19 급수완전 상실사고의 사고진행 상황

* 1800 s after the SI signal	2590 s.
--> fully opening of pressurizer relief valves	2593 s.
- PP = 42 bar	4440 s.
--> Opening of accumulator injections trace heating modified	4449 s.
- PP = 15 bar	8278 s.
--> Stopping of accumulator injections	
- PP = 10 bar	8815 s.
--> Start-up of LPSI (2 lines)	
- End of test (stable RHRS conditions)	10025 s.

표 20 급수완전 상실사고의 냉각계 펌프의 Cooldown 상황

REGULATIONS		PUMP P1	PUMP P2	PUMP P3
THERMAL BARRIERS	POWER WATT	3800 ± 1000	3500 ± 1000	3500 ± 1000
BEARING INJECTION	TFSC21 s*	279.3 ± 0.2	285.1 ± 0.3	285.9 ± 0.2
	TFSC41 s*	77.3 ± 0.3	79.1 ± 0.2	79.6 ± 0.3
	OSC = Cto	1.5 l/mn	1.5 l/mn	1.5 l/mn
SEAL COOLDOWN SYSTEM (WATT)	POWER CIRCUIT 1	1000. ± 500.	1500. ± 500.	1000. ± 500.
	POWER CIRCUIT 2	1600. ± 500.	2500. ± 500.	1400. ± 500.

표 21 급수완전 상실사고 실험시 관측된 주요 물리적 현상

PART 1		
EVENTS	TIME	FIGURES
* Loss of feedwater --> Core power decay	0. s	2.32
* 2 SG levels < 3 meters --> SI signal	788. s	2.31
--> shutdown of primary coolant pumps according to a pump coastdown law	793. s	2.36
--> start-up of HPSI injection 2 lines	799. s	2.37
* P _{1P} > 163 bar --> regulation of primary coolant pressure by VRDF11 (P.O.R.V.)	1033. s	2.30
FEED AND SPILL PHASE		
* 300 s after the SI signal --> isolation of the SG steam lines --> changeover to atmospheric dump mode (set point 71.7 bar)	1095. s	2.33 to 2.35
* V _{pump} = 100 rpm --> pump, bearing injection and seals cooldown stopped	1420. s	2.36
--> two-phase pressurizer level reaches vent line nozzle	1820. s	2.39
* 1800 s after the SI signal --> fully opening of pressurizer relief valves	2590. s 2593. s	2.38

표 21 급수완전 상실사고 실험시 관측된 주요 물리적 현상(계속)

FEED AND BLEED PHASE		
==> boiling of primary coolant	2595. s	
* downcomer flowrate peak (QM05N)	2640. s	2.41
==> Start of U-tube draining SG 2 & 3	2650. s	2.64
==> appearance of a level in the H.L. the upper head bypass flowrate becomes < 0	2680. s	2.52
==> collapse of downcomer flowrate (very pronounced trough)	2700. s	2.47
==> appearance of a void fraction in core	2680. s	2.41
==> appearance of a level in C.L.	2680. s	2.49
==> draining of the upper vessel part:	2700. s	2.63
* DP033 (start)	2690. s	
* DP033 (end)	2710. s	
* DP032 (start)	2711. s	2.45
* DP032 (end)	2746. s	
* DP042 (start)	2650. s	
* DP042 (end)	2810. s	
* DP041 (start)	2810. s	2.46
* DP041 (end)	3030. s	
==> start of U-tube draining SG1	2875. s	2.64
==> pressurizer collapsed level stable (10 m) constant up to 3450. s	3000. s	2.39
==> draining of R.C.C. guide tube (start)	3050. s	2.66
==> end of U-tube draining		
SG2 & 3 (down-flow side)	3150. s	2.65
SG2 & 3 (up-flow side)	3290. s	
==> clearing of R.C.C. guide tube (oscillations in port-hole vicinity)	3250. s	2.66
to	3400. s	
==> downcomer flowrate peak (QM05N)	3350. s	2.41

표 21 급수완전 상실사고 실험시 관측된 주요 물리적 현상(계속)

--> collapse of DECUVE (pressure vessel level) * new drop in H.L. level	3400. s	2.51
--> lowering of pressurizer collapsed level	3450. s	2.39
--> P _{primary} = P _{secondary}	3500. s	2.30
--> pressurizer level stabilized	3525. s	2.39
--> end of U-tube draining		
SGL (down-flow side)	3540. s	2.65
SGL (up-flow side)	3670. s	
--> new drop in pressurizer collapsed level	3820. s	2.39
--> primary cooling system mass is minimum : QHPSI-QPORV	4010. s	2.23
--> pressurizer collapsed level stabilized at 6.8 m (holds up to 4500. s)	4100. s	2.39

PART 2		
EVENTS	TIME	FIGURES
- P+F = 42 bar	4440. s	
--> Start-up of accumulator injections * raising of H.L. collapsed levels	4449. s	2.7
--> core coolant becomes single-phase	6925. s	
--> RHRS conditions are reached P+F < 25 bar, TESCM < 177 c, DTSAT > 20 C	8025. s	2.74
- P+F = 15 bar	8278. s	2.70
--> shutdown of accumulator injections		
--> loss of RHRS conditions		2.74
- P+F = 10 bar	8815. s	2.75
--> start-up of LPSI (2 lines)		
--> raising of H.L. level	8900. s	2.71
--> ALP → 0 (pressurizer full of liquid)	9975. s	2.76
--> Stable RHRS conditions obtained	10025. s	

표 22. 6" 파단사고의 초기조건

항 목	측 정 값
노심출력 (kW)	2861 ± 30
Upper Head 온도(°C)	318.2 ± 2.
가압기 압력(MPa)	15.5 ± 0.15
가압기 수위(m)	7.05 ± 0.25
가압기내 압력차이(kPa)	39.05 ± 1.2
노심입구 온도(°C)	284. ± 1.
노심출구 온도(°C)	319. ± 1.
노심입.출구 온도 차이(°C)	35.0 ± 1.
일차계통 총질량(kg)	1955. ± 50.
Pump 속도(rpm)	
Loop1	144. ± 6.
Loop2	151. ± 6.
Loop3	147. ± 6.
고온관 온도(°C)	
Loop1	318.22
Loop2	318.18
Loop3	318.28
저온관 온도(°C)	
Loop1	283.44
Loop2	283.62
Loop3	283.55

표 22. 6" 파단사고의 초기조건 (계속)

증기발생기 2차측 압력(MPa)	
SG1	6.91 ± 0.07
SG2	6.90 ± 0.07
SG3	6.88 ± 0.07
증기발생기 2차측 수위(m)	
SG1	13.6 ± 0.2
SG2	13.6 ± 0.2
SG3	13.6 ± 0.2
증기발생기 온도차이(°C)	33.7 ± 5
Pump 온도차이(°C)	1.0 ± 0.5
Downcomer 온도(°C)	284.22

* 가압기 수위는 가압기 밑면에서부터의 높이

* 증기발생기 수위는 증기발생기 튜브시트 윗면에서부터의 높이

표23. 6" 파단사고의 진행경위

시간(sec)	경 위
0.0	- 6" 파단이 일어남
8.0	<ul style="list-style-type: none"> - Scram Signal (P + P < 12.9 MPa) - 17초의 Time Delay후 (SERMA + 10%) 곡선으로 출력 감소 - RCP 정지 - Condencer 차단 - 주급수 공급차단
13.0	<ul style="list-style-type: none"> - SI Signal (P + P < 11.7 MPa) - 30초의 Time Delay후 SI 공급 - 69초 Time Delay후 보조급수 공급
357.0	- Accumulator 작동 (P + P < 4.0 MPa)
613.0	<ul style="list-style-type: none"> - 보조급수로 증기발생기 수위제어를 위하여 운전자 조절 운전 모드 선택
1464.0	- Loop3 Accumulator 공급중단
1527.0	- Loop2 Accumulator 공급중단
4410	- 실험종료 (P + P < 0.7 MPa)

표·24. 단상자연대류 실험의 정상상태 실험치와 계산값 비교

변 수	실 험 값	계 산 값
Core Power (kw)	883(874 - 890)	882
PZR Pressure(MPa)	15.68(15.49 - 15.67)	15.53
PZR Temperature(° C)	341.3(340.2 - 342.3)	344.87
PZR Water Level(m)	4.37(4.27 - 4.41)	4.30
Upper Head Temp.(° C)	300.5(299.7 - 301.2)	302.07
Core Inlet Temp.(° C)	280.6(279.3 - 281.2)	283.90
Core Outlet Temp.(° C)	201.6(300.6 - 302.1)	305.41
Downcomer Flow(kg/sec)	7.5(6.66 - 8.25)	8.24
Upper Head Bypass Flow(kg/sec)	0.15	0.15
Loop1		
Hot Leg Pressure(MPa)	15.66(15.57 - 15.74)	15.59
Hot Leg Velocity(m/sec)	0.326(0.255 - 0.375)	0.345
Hot Leg Temp.(° C)	302.6(301.4 - 303.1)	305.37
SG Inlet Temp.(° C)	302.1(300.9 - 302.6)	305.35
SG Outlet Temp.(° C)	283.5(283.0 - 284.0)	285.00
Cold Leg Temp.(° C)	283.1(282.8 - 283.5)	283.63
Cold Leg Velocity(m/sec)	0.304(0.260 - 0.341)	0.325
Loop2		
Hot Leg Pressure(MPa)	15.65(15.54 - 15.73)	15.58
Hot Leg Velocity(m/sec)	0.332(0.225 - 0.358)	0.345

표 24. 단상자연대류 실험의 정상상태 실험치와 계산값 비교(계속)

Hot Leg Temp.(°C)	303.4(302.6 - 304.8)	305.37
SG Inlet Temp.(°C)	303.3(301.9 - 303.8)	305.32
SG Outlet Temp.(°C)	284.3(284.0 - 284.5)	284.33
Cold Leg Temp.(°C)	281.3(281.1 - 281.6)	283.50
Cold Leg Velocity(m/sec)	0.282(0.235 - 0.325)	0.325
Loop3		
Hot Leg Pressure(MPa)	15.64(15.55 - 15.73)	15.59
Hot Leg Velocity(m/sec)	0.330(0.298 - 0.398)	0.344
Hot Leg Temp.(°C)	301.6(300.2 - 301.9)	305.37
SG Inlet Temp.(°C)	301.7(300.2 - 300.4)	305.32
SG Outlet Temp.(°C)	283.7(283.3 - 284.2)	284.99
Cold Leg Temp.(°C)	281.6(281.3 - 281.8)	283.56
Cold Leg Velocity(m/sec)	0.304(0.248 - 0.349)	0.325
SG1		
Pressure(MPa)	6.94(6.92 - 6.98)	6.88
Water Level(m)	13.56(13.50 - 13.60)	13.52
Steam Flow(kg/sec)	0.0736(0.0223 - 0.132)	0.1081
Riser Inlet Temp.(°C)	279.1(278.2 - 279.9)	282.14
Upper Head Temp.(°C)	282.6(282.3 - 283.0)	287.44
Total Mass(kg)	908.0(897.6 - 917.8)	905.59

표 24. 단상자연대류 실험의 정상상태 실험치와 계산값 비교(계속)

SG2		
Pressure(MPa)	6.93(6.92 - 6.97)	6.88
Water Level(m)	13.63(13.60 - 13.65)	13.61
Steam Flow(kg/sec)	0.0408(0.0184 - 0.0672)	0.010186
Riser Inlet Temp.(° C)	281.4(280.9 - 282.1)	281.95
Upper Head Temp.(° C)	282.8(282.5 - 283.3)	284.77
Total Mass(kg)	903.1(922.1 - 936.0)	853.65
SG3		
Pressure(MPa)	6.92(6.90 - 6.95)	6.88
Water Level(m)	13.56(13.50 - 13.58)	13.52
Steam Flow(kg/sec)	-	0.1077
Riser Inlet Temp.(° C)	279.9(279.2 - 280.4)	282.14
Upper Head Temp.(° C)	282.4(282.3 - 282.8)	284.77
Total Mass(kg)	903.8(895.4 - 909.1)	853.45

표 25. 단상자연대류실험 계산시 CPU Time과 실시간 비교

항 목	CRAY 2S	Solborne 5/604	SUN 4/370
Real Time (sec)	9855.37	9974.12	10131.98
CPU Time (sec)	7375.4	1.0389E5	1.4324E5
No. of Total Iteration			
Primary Side	9258	9655	9430
Secondary Side	5874	9720	11367
No. of Time Step			
Primary Side	1480	1850	1920
Secondary Side	1765	2456	2643
CPU Time/Real Time	0.75	10.42	14.14
Total Iteration/Real Time			
Primary Side	0.94	0.97	0.93
Secondary Side	0.60	0.97	1.12
Total Iteration/CPU Time			
Primary Side	1.26	0.093	0.066
Secondary Side	0.80	0.094	0.079
Time Step/Real Time			
Primary Side	0.15	0.19	0.19
Secondary Side	0.18	0.25	0.26

표 26 정상상태에 대한 CATHARE 모의 계산 결과 비교

변수	측정위치	실험값	모의계산값
압력강하(kPa)	Core Heated Length	161.5	174.08
	Cold Leg1 to Hot Leg1	268.91	294.56
	Pressurizer	28.97	26.29
	SG1 Boiler Section	16.94	83.23
재고량(kg)	SG1 Secondary Side	823.28	840.54
	Accumulator 2	276.49	292.52
압력(MPa)	SG1 Steam Dome	6.93	6.88
	Pressurizer	15.51	15.50
	Accumulator 2	4.18	4.18
유동량(kg/sec)	Downcomer	150.34	146.13
	Feed Water	0.52	0.53
	Steam Line	0.52	0.53
온도 (°C)	Core Inlet	559.90	560.2
	Core Outlet	566.35	563.85
	Bottom of SG1 Downcomer	555.55	555.53

표 27 ISP-27 계산시 CPU Time과 실시간 비교

RUN NO	Submitted CPU Time	Experimental Time		Input File	Result File	Graphic File
		Begin	End			
1	1,000	0.	305.6	Test_42	Test_23	Resu_23
2	2,000	305.6	852.3	Test_23	Test_24	Resu_24
3	2,000	852.3	1395.2	Test_24	Test_26	Resu_26
4	2,000	1395.2	1769.5	Test_26	Test_27	Resu_27
5	3,800	1769.5	2507.2	Test_27	Test_28	Resu_28
6	1,000	2507	2596	Test_43	Test_44	Resu_44
7	1,500	2596.2	2988.3	Test_44	Test_45	Resu_45
8	1,500	2986.9	3089.7	Test_45	Test_46	Resu_46
9	1,500	3089.5	3253.6	Test_46	Test_47	Resu_47
10	10,000	3253.6	4557.8	Test_47	Test_48	Resu_48
11	1,500	4557.8	4817.7	Test_48	Test_49	Resu_49
12	1,500	4817.6	4931.8	Test_49	Test_50	Resu_50
13	2,000	4931.8	5060.3	Test_50	Test_51	Resu_51
14	2,000	5060.3	5161.2	Test_51	Test_52	Resu_52
15	2,000	5161.2	5276.7	Test_52	Test_53	Resu_53
16	10,000	5276.7	5503.9	Test_53	Test_54	Resu_54
17	2,000	5503.9	5702.6	Test_54	Test_55	Resu_55
18	2,000	5702.6	5831.8	Test_55	Test_56	Resu_56
19	20,000	5831.8	6990.9	Test_56	Test_57	Resu_57

표 27 ISP-27 계산시 CPU Time과 실시간 비교(계속)

20	2,000	6990.9	7051.5	Test_57	Test_58	Resu_58
21	2,000	7051.5	7272.1	Test_58	Test_59	Resu_59
22	5,000	7272.1	7581.6	Test_59	Test_60	Resu_60
23	2,000	7581.6	7653.3	Test_60	Test_61	Resu_61
24	2,000	7653.3	7726.7	Test_61	Test_62	Resu_62
25	20,000	7726.7	8526.1	Test_62	Test_63	Resu_63
26	20,000	8526.1	8727.3	Test_63	Test_64	Resu_64

주 의

1. 이 보고서는 과학기술처에서 시행한 특정연구개발 사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 과학기술처에서 시행한 특정연구개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.

가압경수로 안전성 실증실험 연구

1991年 12月 15日 印刷

1991年 12月 20日 發行

發行人 林 昌 生

發行處 韓國 原子力 研究所

大田直轄市 儒城區 德津洞 150

印刷所 新 友 社

믿는마음 지킨약속 나져지는 신뢰사회

