

KAERI/TR-1912/2001

가압경수로 실물길이 3 X 3 핵연료봉다발에 대한
임계열유속 실험 - 축방향 균일 열유속 분포

Critical Heat Flux Tests for PWR Type Full Length 3 X 3
Fuel Rod Bundle - Uniform Axial Heat Flux Profile

KAERI

한국원자력연구소

제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 “원전 안전계통 실증실험” 과제에서 수행된 가압경수로형 실물길이 3 x 3 핵연료봉다발에 대한 임계열유속 실험의 기술보고서로 제출합니다.

2001년 9월 10일

저 자 : 문 상 기 (열수력안전연구팀)
천 세 영 (열수력안전연구팀)
최 기 용 (열수력안전연구팀)
박 종 국 (열수력안전연구팀)
윤 영 중 (열수력안전연구팀)
김 복 득 (열수력안전연구팀)

요약문

I. 제목

가압경수로 실물길이 3 X 3 핵연료봉다발에 대한 임계열유속 실험 - 축방향
균일 열유속 분포

II. 연구개발의 요약

임계열유속(Critical Heat Flux: CHF)에 대한 기존의 수 많은 연구는 주로 상용 원자로의 운전조건에서 수행되었으며, 냉각재 상실사고나 운전 과도시와 같은 저유량 조건에서의 CHF 현상에 대한 이해가 부족한 실정이다. 특히 이러한 저유량 조건에서의 기존 연구들은 대부분 낮은 압력하에서 원형관을 이용하여 수행되었기 때문에, 상용 원자로의 봉다발에서 존재하는 비가열 벽면(제어봉 안내관, 계측관 등)의 영향에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 저유량 조건에서 3 x 3 봉다발 시험대를 이용하여, 비가열 벽면의 영향과 계통압력의 영향을 실험적으로 관찰하였다.

실험은 한국원자력연구소의 RCS CHF Loop를 이용하였으며, 가압경수로 실물길이로 제작된 시험대는 균일한 축방향 열유속 분포를 갖는 3 x 3의 봉다발로 구성되었다. 비가열 벽면의 영향을 모사하기 위해, 3개의 비가열봉이 시험대에 위치해 있으며, 비가열봉 및 가열봉의 외경은 9.52 mm, 가열길이는 3670 mm이다. 임계열유속 실험은 계통압력 0.49 ~ 15.07 MPa, 질량유속 44 ~ 652 kg/m²s, 입구과냉도 45 ~ 354 kJ/kg, 출구건도 0.25 ~ 1.27의 조건에서 수행되었으며, 163개의 임계열유속 데이터를 생산하였다. 또한 본 연구에서는 부수로 코드를 사용하기 위해 입구 및 출구에서의 부수로 유체 온도 분포, 봉다발 및 지지격자에서의 압력강하 데이터를 수집하였다.

CHF는 질량유속이 증가함에 따라 증가하며, 저압에서의 CHF는 그 기울기가 고압에 비해 크고 CHF에 대한 질량유속의 영향은 저압에서 커지는 것을 알 수 있었다. CHF는 입구과냉도의 증가에 따라 선형적으로 증가하였으며, 질량유속이 작아질수록 CHF에 대한 입구 과냉도의 영향은 작아졌다. 이러한 CHF에 대한 질량유속 및 입구과냉도의 영향은 일반적으로 알려져 있는 경향과 동일하게 나타났다. 3 MPa 이상의 압력 및 50 또는 150 kg/m²s의 아주 낮은 질량유속에서는 임계건도가 1보다 크게 나타났다. 이는 가열구간에서 발생된 수증기가 시험대

상부 플래넘에서 응축되어 생성된 포화수가 주로 비가열봉부를 통하여 가열봉다발의 가열구간에 하향류로 공급되기 때문인 것으로 판단된다. CHF는 압력의 증가에 따라 단조롭게 감소하고, 질량유속이 낮아질수록 CHF에 대한 압력의 영향은 작아졌다. CHF는 압력의 증가에 따라 2 ~ 4 MPa 근방에서 최대치를 나타내는 것으로 알려져 있으나, 본 실험에서는 비가열봉 영역에서 가열봉다발 영역에 지속적인 포화수의 공급이 이루어지고 있고, 그 결과 저압영역에서의 CHF의 최대치는 나타나지 않았다.

SUMMARY

I. Project Title

Critical Heat Flux Tests for PWR Type Full Length 3 x 3 Fuel Rod Bundle - Uniform Axial Heat Flux Profile

II. Summary of Project

Most of the CHF studies have been focused on CHF phenomena under high pressure and high flow rate conditions, because of their relevance to the operation ranges of nuclear power plants. Therefore, so far, CHF phenomena under low flow rate conditions that plays a key role in the thermal hydraulic behavior during loss-of-coolant accidents and operational transients are poorly understood as compared with those under high flow rate conditions. Moreover, most of the CHF studies under low flow conditions have been performed under low pressure conditions using round tubes. Thus, consideration for the influences of pressure and unheated wall such as guide tubes of control rods has not been carefully studied until now. This report presents the results from the CHF experiments carried out in a 3 x 3 rod bundle with unheated rods at low flow under a wide range of pressure conditions.

The CHF experiments have been conducted in the reactor coolant system thermal hydraulic loop facility (RCS loop facility) of KAERI. The test section consists of six heated rods and three unheated rods which have prototypical heated length of 3670 mm, diameter of 9.52 mm and pitch of 12.6 mm of PWR type nuclear power plants. Three unheated rods simulate unheated wall or cold wall. Total 163 CHF data have been obtained in the system pressure from 0.49 to 15.07 MPa, mass flux from 44 to 652 kg/m²s, inlet subcooling from 45 to 354 kJ/kg, and exit quality from 0.25 to 1.27.

CHF increases with increasing mass flux and the increasing rates of the CHF are large at low system pressure compared to high system pressure. Thus, the effects of mass flux on the CHF become large at low system pressure. CHF increases linearly with increasing inlet subcooling. The effect of inlet subcooling on the CHF becomes small as the mass flux becomes small. The effects of inlet subcooling and mass flux

on the CHF are consistent with previous understandings.

The critical qualities at test section exit have values larger than 1 for system pressure larger than 3 MPa and very low mass flux of 50 or 150 kg/m²s. This may be due to the downward saturated water flow to the heated region through unheated region, which is generated by condensation of steam in upper plenum of the test section. The CHF decreases monotonously as increasing system pressure and the effect of system pressure on the CHF becomes small as decreasing mass flux. It is a general understanding that the CHF shows a maximum at system pressure of 2 ~ 4 MPa. However, in this study, the maximum CHF at low system pressure is not shown.

CONTENTS

I. Introduction	10
II. Test Facility and Test Section	12
III. Experimental Results	14
IV. Conclusions and Further Studies	16
References	17
Appendix A. Heater Rod Drawings	42
Appendix B. 3 x 3 Rod Bundle CHF Data Base with Uniform Heat Flux Profile	52

목 차

제 1 장 서론	10
제 2 장 실험장치 및 실험방법	12
제 3 장 실험 결과	14
제 4 장 결론 및 향후 연구	16
참고문헌	17
부록 A. 가열봉 설계도	42
부록 B. 균일열유속 분포를 갖는 3 x 3 봉다발 임계열유속 데이터베이스 ...	52

그림 목차

그림 1. KAERI RCS 열수력 루프 개념도	19
그림 2. KAERI RCS 열수력 루프	20
그림 3. 실험대 단면 및 계측기 설치 위치	21
그림 4. 실험대, 봉다발 및 실험대 Flow Housing	22
그림 5. 실험대 Flow Housing	23
그림 6. 가열봉 및 지지격자	24
그림 7. 부수로 유체 온도 측정용 열전대	25
그림 8. 부수로 유체 온도 측정용 열전대 고정체(실험대 출구)	26
그림 9. 부수로 유체 온도 측정용 열전대 고정체(실험대 입구)	27
그림 10. 봉다발내 지지격자 설치 위치	28
그림 11. 지지격자 단면도	29
그림 12. 가열봉 벽면온도 측정용 열전대 설치 위치	30
그림 13. 실험대 차압 측정 위치	31
그림 14. 데이터 획득계통 화면(HP-VEE)	32
그림 15. 임계열유속 발생시 가열봉 벽면온도의 거동	33
그림 16. 낮은 질량유속에서 벽면온도의 거동	34
그림 17. 높은 질량유속에서 벽면온도의 거동	35
그림 18. 임계열유속에 대한 질량유속의 영향	36
그림 19. 임계열유속에 대한 입구과냉도의 영향	38
그림 20. 질량유속과 임계건도의 관계	39
그림 21. 임계건도에 미치는 계통압력의 영향	40
그림 22. 임계열유속에 미치는 계통압력의 영향	41

기호설명

G	질량유속 ($\text{kg/m}^2\text{s}$)
Δh_{in}	입구과냉도 (kJ/kg)
P	계통압력 (MPa)
q_{CHF}	임계열유속 (kW/m^2)
X_{CHF}	임계건도 (-)

제 1 장 서 론

비등열전달 계통에 있어서 임계열유속(CHF)은 가열면의 열유속 또는 표면온도가 증가하거나 유량, 압력, 유체온도 등 유동조건이 변화할 때 증기의 발생으로 인해 가열표면에 액체가 계속적으로 접할 수 없게 되면서 가열표면과 유체사이의 열전달계수가 급격하게 낮아지는 현상으로 정의된다. CHF는 원자로 설계 및 안전 해석을 비롯하여 보일러와 열교환기의 열설계, 핵융합로, 고집적전자부품 등의 냉각장치 설계에서 중요한 변수로 고려되고 있다. 특히 원자로의 핵연료봉과 같이 가열표면에서 열유속이 조절되는 시스템에서는 CHF 현상이 발생하면 곧바로 표면온도가 급격하게 상승하여 핵연료봉의 용융으로 이어질 수 있다. 그러므로 지난 40년 동안 원자로 개발과 더불어 CHF에 대한 많은 연구가 수행되어 왔으며, 이러한 노력의 결과, CHF 현상에 대한 기본적인 이해가 크게 진전되었고, 개발된 수많은 CHF 상관식들이 핵연료 개발 및 노심 설계에 적용되고 있다. 그러나 이들 상관식들은 제한된 범위의 실험자료에 근거하고 있으며 적용범위 또한 제한되어 있다. 이는 새로운 형상이나 운전조건에 대한 실험자료의 부족으로 인해 CHF 현상의 이해도가 아직 만족할만한 수준에 이르지 못하고 있기 때문이다.

최근 원자로 냉각재 상실사고나 운전 과도시와 같은 저유량 조건에서의 CHF 현상을 파악하기 위한 실험적 연구가 수행되고 있다[1-4]. 저자들도 단일 가열봉 환상유로를 사용하여 CHF 실험을 수행한 바 있으며[5-7], 원형관이나 환상유로에서의 저유량 CHF의 연구는 상당한 진전을 보여주고 있다. 실제 원자로 노심은 연료봉 다발로 구성되어 있고 연료봉 사이에는 제어봉 안내관, 계측관 등 가열되지 않는 벽면들이 존재하며, 이들은 부수로 내에서의 엔탈피 분포 및 CHF에 상당한 영향을 미치는 것으로 알려지고 있다. 봉다발에서의 CHF에 대한 연구도 광범위하게 수행되어 왔으나[8], 이들 연구는 대부분 원자로의 정상 운전 조건을 대상으로 수행되었고 저유량 조건에서 봉다발내 비가열 벽면을 고려한 실험적 연구는 전무한 상태이다.

본 연구는 비가열봉 3개를 포함한 3 x 3 가열봉다발 수직 실험대를 사용하여, 광범위한 압력조건에서 저유량 CHF 실험을 수행하고 압력이 저유량 CHF 특성에 미치는 영향을 조사하였다. 특히 저유량 조건에서 비가열 벽면의 영향을 평가하기 위해, 3개의 비가열봉이 존재하는 3 x 3 봉다발에서 실험을 수행하였다. 본 보고서는 실험장치의 자세한 내용, 실험방법, 실험 데이터 및 기본적인 분석결과

를 제공함으로써, 기존 상관식 및 해석코드 모델의 검증 등에 이용하는 것을 목적으로 한다.

제 2 장 실험장치 및 실험방법

그림 1과 2는 CHF 실험이 수행된 한국원자력연구소의 RCS 열수력 Loop 장치를 보여준다. 실험장치는 순환펌프, 오리피스 유량계, 예열기, CHF 실험대, 기/수 분리기, 응축기, 가압기, 열교환기 등으로 이루어져 있다. 실험대에 유입되는 유량의 측정은 3종류의 오리피스 유량계 중에서 실험유량의 범위에 적합한 것을 선택하여 사용한다. 유량은 순환펌프의 회전속도 조절, 유량제어 밸브 및 우회밸브의 조절을 조합하여 제어된다. 저유량 영역에서 흔히 관찰되는 유량의 진동은 실험대 입구측의 밸브를 충분히 Throttling하여 제거하였다. 예열기는 실험대 입구의 용수 온도를 조절하기 위하여 설치되어 있으며, 실험대에서 가열된 순환용수는 수증기-물의 2상유동 상태로 실험대를 나와 기/수 분리기 및 응축기에서 완전히 단상의 물이 되어, U-Tube형 열교환기에서 설정된 온도까지 냉각된다. 실험장치의 압력은 내부에 가열기가 설치된 가압기에 의해 조절된다. 실험대에서 발생하는 압력강하는 계통압력에 비해 무시할 만 하기 때문에, 본 보고서에서 정의하는 계통압력은 실험대 입구에서 측정된 값을 사용하였다.

실험대는 그림 3에 보여준 바와 같이 축방향 출력분포가 균일한 6개 가열봉과 3개의 비가열봉으로 구성된 3 x 3 봉다발이 압력용기내에 설치된 Flow Housing 내부에 장전되어있다. 실험대 내부 유로 및 가열봉의 기하학적 형상은 가압경수로의 원자로심과 동일하며, 가열봉 및 비가열봉은 직경 9.52 mm, 가열 길이 3670 mm, 봉사이의 피치 12.6 mm를 갖는다. 가열봉은 SCR(Silicon Controlled Rectifier) 출력제어기를 사용하여 AC 전원에 의해 간접적으로 가열된다. 가열봉에는 그 표면 온도를 측정하고 CHF를 검출하기 위해 Sheath 직경이 0.5 mm인 K-Type 비접지형 열전대 6 혹은 4개가 부착되어 있다. 또한 같은 형태의 열전대가 가열 구간 입구 및 출구에서의 부수로에서의 유체 온도를 측정하기 위해 각각 16개씩이 설치되어 있다. 이러한 부수로 유체 온도의 측정은 부수로 코드 등을 사용한 국부조건의 예측에 필수적인 중요 데이터이다. 그림 3은 실험대 및 가열봉의 단면, 열전대의 설치 위치 및 부수로 유체 온도 측정용 열전대의 위치를 자세히 보여주고 있다. 그림 4와 5는 실험대, 봉다발 및 실험대 Flow Housing의 자세한 기하학적 형상을 나타내며, 그림 6은 설치된 봉다발과 지지격자의 실물을 보여준다. 부수로 유체 온도 측정용 열전대에 대한 자세한 기하학적 형상은 그림 7, 8, 9에 나타나 있다. 그림 10 ~ 13은 봉다발내 지지격자의 설치 위치, 지지격자 단면도, 가열봉 벽면온도 측정용 열전대 설치위치 및 차압 측정

위치를 보여준다. 부록 A에는 가열봉에 대한 자세한 설계도가 나타나 있다.

실험은 다음과 같은 순서와 방법으로 수행된다. 먼저 실험대 입구의 유량, 온도 및 압력을 설정된 조건에 맞춘 다음, 실험대 가열봉다발에 전원을 공급하고 서서히 가열전력을 증가시킨다. CHF 근방에서 공급 전력을 미세하게 Step 상태로 증가시켜 수 분 동안 유지하여 정상상태를 확인한 후 다음 Step으로 증가시킨다. CHF가 발생하면 CHF 검출기에 의해 전력공급을 감소시키거나 정지시킨다. CHF의 발생 판단조건은 가열봉 표면 온도가 갑자기 지속적으로 상승하는 현상으로 판단하며, 본 실험에서는 표면 온도가 포화온도 보다 110 K 이상 상승하면 CHF가 발생한 것으로 판단하였다. 예비실험 결과 이러한 CHF 정의는 최종적인 CHF 값에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

본 실험의 주요 측정변수는 실험대 입구 및 출구 플레넘 압력, 실험대 입구 유량, 가열봉다발의 가열 구간 입구 및 출구의 물 온도, 가열봉 표면 온도, 가열봉다발에 투입한 전력, 가열구간 입구 및 출구에서의 부수로 유체 온도, 실험대에서의 차압 등이며 측정된 신호는 모두 Workstation급 자료처리장치에서 자동적으로 수집, 처리된다. 이들 측정 변수의 불확실도는 Sensor 및 계측기기의 정밀도와 교정결과로부터 ANSI/ASME PTC 19.1[9] 코드의 방법으로 평가하였으며, 관찰된 불확실도는 압력, 유량 및 온도에 대하여 각각 자료처리장치 지시치의 $\pm 0.14\%$, $\pm 1.70\%$ 및 1.17 K 이하였다. 가열봉다발 전력 측정에 대한 불확실도는 1.42% 이하였다.

제 3 장 실험결과

본 연구에서는 다음과 같은 조건에서 163개의 CHF 실험자료를 얻었다.

- 계통 압력 : 0.49 ~ 15.07 MPa
- 질량유속 : 44 ~ 652 kg/m²s
- 입구과냉도 : 45 ~ 354 kJ/kg
- 출구 건도 : 0.25 ~ 1.27

가열구간 출구에서의 건도가 커짐에 따라 출구 플레넘의 압력은 약간 불안정하게 된다. 따라서 본 논문에서는 실험대 입구 플레넘의 압력을 계통 압력으로 사용한다. 입구 과냉도는 압력 조건에 다른 증발잠열과 가열구간 입구 엔탈피의 차이로 정의된다. 부록 A에 자세한 임계열유속 데이터 베이스가 첨부되어 있다.

일반적으로 수직 상향류 균일 가열봉의 경우 임계열유속은 가열구간 상단부에서 발생한다. 본 실험에서도 임계열유속은 그림 3에 나타난 가열봉 R1 또는 R2의 가열구간 상단부로부터 10 혹은 30 mm(T/C 1 및 2)의 위치에서 발생하였다. 그림 15는 임계열유속 실험시 가열봉 벽면온도의 거동을 보여준다. 임계열유속이 가까워짐에 따라, 실험대에 투입된 총출력이 미세하게 증가함에 따라 임계열유속 지점에서 벽면온도가 갑자기 상승하는 것을 보여준다. 또한 임계열유속에 가까워짐에 따라 가열봉 벽면에 존재하는 액체가 고갈되어 벽면온도가 증가하고, 다시 적심 과정을 반복함에 따라 온도가 감소하는 벽면온도의 진동을 보여주고 있다. 그림 16과 17은 계통압력 3 MPa, 입구 과냉도 340 kJ/kg의 동일한 조건에서 질량유속이 각각 50, 650일 경우에 벽면온도의 거동을 보여준다. 그림에 나타난 것처럼 낮은 질량유속과 높은 질량유속에서 벽면온도의 거동은 큰 차이를 보이고 있다. 질량유속이 높아지면 벽면에 존재하는 기포 혹은 액막의 고갈과 적심이 매우 빠르게 반복됨에 따라 벽면온도의 진동이 매우 빠르게 나타난다. 반면에 낮은 질량유속에서는 이러한 벽면온도의 진동이 느려지며, 이에 따라 그림 16에 나타난 것처럼 임계열유속 근처에서 벽면온도는 서서히 증가하는 것을 알 수 있다.

그림 18은 질량유속과 CHF의 관계를 보여준다. CHF는 질량유속이 증가함에 따라 증가하며, 저압에서의 CHF는 그 기울기가 고압에 비해 크고 CHF에 대한 질량유속의 영향은 저압에서 커지는 것을 알 수 있다. 그림 19는 유량을 고정할 경우 CHF가 입구 과냉도의 증가에 따라 선형적으로 증가함을 보여준다. 본 실험 범위에서 CHF는 입구 과냉도의 증가에 따라 선형적으로 증가하였다. 일반적으로

입구 과냉도를 고정하여 유량을 증가시키면 CHF는 증가한다. 본 실험에서는 거의 대부분의 CHF 자료가 그림 19와 같이 CHF는 입구 과냉도에 따라 선형적으로 증가하였다. 또한 그림 18과 19에 나타난 것처럼 질량유속이 작아질수록 CHF에 대한 입구 과냉도의 영향은 작아지는 것을 알 수 있다.

CHF 조건에서 CHF가 발생한 축방향 위치의 단면 평균 건도를 열역학적 평형을 가정하여 구한 값으로 정의한 임계건도(Critical quality)와 질량유속과의 관계를 나타내면 그림 20과 같다. 본 실험조건에서 임계건도 범위는 0.25 ~ 1.27로 나타났다. CHF 현상은 이상유동 양식과 밀접한 관계가 있다. 즉 CHF의 발생기구는 기포류 및 슬러류(Slug flow) 영역에서는 핵비등 이탈(DNB), 환상류에서는 액막의 건조(Dryout)로 크게 구분된다. 저유량 조건에서의 CHF 발생기구는 다음과 같이 분류할 수 있다.[2, 10-12]

- 매우 낮은 유량 조건에서 플러딩(Flooding)에 의한 CHF 발생
- 슬러류 또는 처언(Churn)류에서 환상류로 유동양식이 천이 조건에서 CHF가 발생
- 환상류에서 액막의 건조(Liquid film dryout)
- 액상의 완전한 증발, 즉 출구건도가 약 100 %가 될 때.

그림 21은 임계건도에 대한 압력의 영향을 보여준다. 그림 20 및 21에서 3 MPa 이상의 압력 및 50 또는 150 kg/m²s의 아주 낮은 유량에서는 임계건도가 100 %를 넘어서고 있다. 이는 가열구간에서 발생한 수증기가 실험대 상부 Plenum에서 응축되어 생성된 포화수가 주로 비가열봉부를 통하여 가열봉다발의 가열구간에 하향류로 공급되고 있는 것을 나타낸다.

그림 22 (a) 및 (b)는 CHF에 대한 계통 압력의 영향을 보여준다. 질량유속이 650 및 350 kg/m²s의 경우, CHF는 압력의 증가에 따라 단조롭게 감소하고 질량유속이 낮아질수록 CHF에 대한 압력의 영향은 작아져 질량유속 50 kg/m²s에서는 압력의 영향은 거의 나타나지 않고 CHF는 압력이 변해도 거의 일정한 값을 보여주고 있다. Bowditch 등[13]의 5 x 5 가열봉다발에서의 CHF 실험 및 Chun 등[5]의 환상유로에서의 CHF 실험에 의하면 유량이 클 경우(300 kg/m²s 이상) CHF는 압력이 증가하여 2 ~ 4 MPa 근방에서 최대치가 된 후 15.0 MPa 까지 천천히 선형적으로 감소하는 것으로 보고되고 있다. 본 실험의 경우 비가열봉 영역에서 가열봉다발 영역에 계속적인 물의 공급이 이루어지고 있어, 그 결과 저압 영역에서 CHF의 최대치가 나타나지 않는 것으로 생각된다.

제 4 장 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 비가열봉 3개를 포함한 3 x 3 가열봉다발 수직 실험대를 사용하여, 압력 0.48 ~ 15.07 MPa, 질량유속 44 ~ 652 kg/m²s, 입구 과냉도 45 ~ 354 kJ/kg의 범위에서 CHF 실험을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) CHF에 대한 질량유속 및 입구 과냉도의 영향은 일반적으로 알려져 있는 경향과 같다.
- (2) 질량유속 50 또는 150 kg/m²s 및 압력 3.0 MPa 이상에서는 가열구간에서 발생한 수증기가 실험대 상부에서 응축하여 포화수가 비가열봉부를 통하여 가열구간에 하향류로 공급되어 임계건도가 100 %를 넘어서는 경우가 있다.
- (3) CHF는 압력의 증가에 따라 2 ~ 4 MPa 근방에서 최대치를 나타내는 것으로 알려져 있으나, 본 실험에서는 비가열봉 영역에서 가열봉다발 영역에 계속적인 물의 공급이 이루어지고 있고 그 결과 저압 영역에서 CHF의 최대치가 나타나지 않았다.

본 연구에서 수행된 3 x 3 봉다발 임계열유속 연구의 향후 연구 방향은 다음과 같다.

- (1) 생산된 봉다발 임계열유속 데이터를 이용하여, 기존 상관식 혹은 모델의 검증을 수행한다. 이에 따라 기존 상관식 혹은 모델의 적용 가능성 및 신뢰도를 검증한다.
- (2) 축방향 열유속 분포를 제외하고는 동일한 형상을 갖는 3 x 3 봉다발 임계열유속에 대한 실험을 수행하여, 축방향 열유속 분포시 비가열 벽면 등의 영향을 평가한다.
- (3) 유량과도시 임계열유속의 거동을 실험적으로 규명하고, 코드 개발 등을 위한 유량과도기 임계열유속 데이터를 생산한다.

참고문헌

- (1) Mishima, M. and Nishihara, H., 1987, "Effect of channel geometry on critical heat flux for low pressure water," *Int. J. Heat Mass Transfer*, 28, 1115-1129.
- (2) E-Genk, M. S. et al., 1988, "Experimental studies of critical heat flux for low flow of water in vertical annuli at near atmospheric pressure," *Int. J. Heat Mass Transfer*, 31, 2291-2304.
- (3) Park, J. W. et al., 1997, "Critical heat flux and flow pattern for water flow in annular geometry," *Nucl. Eng. Des.*, 172, 137-155.
- (4) Schoesse, T. et al., 1997, "Critical heat flux in a vertical annulus under low upward flow and near atmospheric pressure," *J. Nucl. Sci. Technol.*, 34(6), 559-570.
- (5) Chun, S. Y. et al., 2001, "Effect of pressure on critical heat flux in uniformly heated vertical annulus under low flow conditions," *Nucl. Eng. Des.*, 203, 159-174.
- (6) Chun, S. Y. et al., 2001, "Critical heat flux under zero flow conditions in vertical annulus with uniformly and non-uniformly heater sections," *Nucl. Eng. Des.*, 205, 265-279.
- (7) Chun, S. Y. et al., 2000, "Critical heat flux in an internally heated annulus with a non-uniform axial heat flux distribution under low flow conditions," *2nd Japan-Korea Symp. on Nucl. Thermal Hydraulics and Safety*.
- (8) 장순홍, 백원필, 1997, "임계열유속-기초와 응용," 淸文閣, 165-172.
- (9) ANSI/ASME PTC 19.1, 1985, "ASME Performance test codes, Supplement on instruments and apparatus, Part 1, Measurement uncertainty, ASME, New York.
- (10) Mishima K. and Ishii M., 1982, "Experimental study on natural convection boiling burnout in annulus," *Proc. of the 7th Int. Heat Transfer Conf.*, Munchen, Vol. 4, 309-314. .
- (11) Rogers J. T. et al., 1982, "Flow boiling critical heat fluxes for water in a vertical annulus at low pressure and velocities," *Proc. of the 7th Int.*

Heat Transfer Conf., Munchen, Vol. 4, 339-344.

- (12) Kumamaru H. et al., 1990, "Critical heat flux for annulus under high-pressure, low-flow and mixed inlet conditions," *J. Nucl. Sci. Tech.*, 27[1], 68-80.
- (13) Bowditch, F. H. and Mogford, D. J., 1987, "An experimental and Analytical study of fluid flow and critical heat flux in PWR fuel elements," AEE Winfrith, AEE-R 2050.

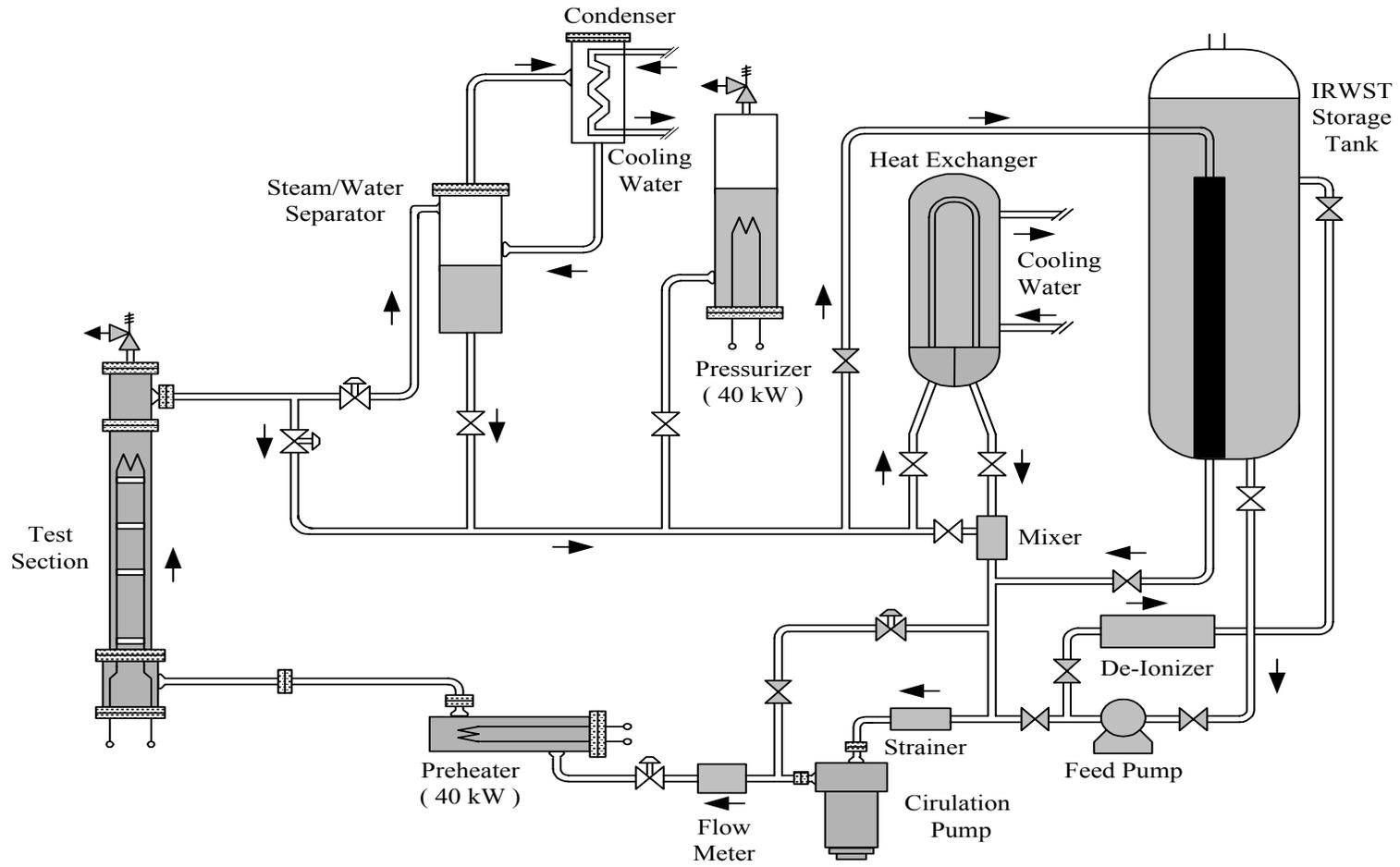


그림 1. KAERI RCS 열수력 루프 개념도

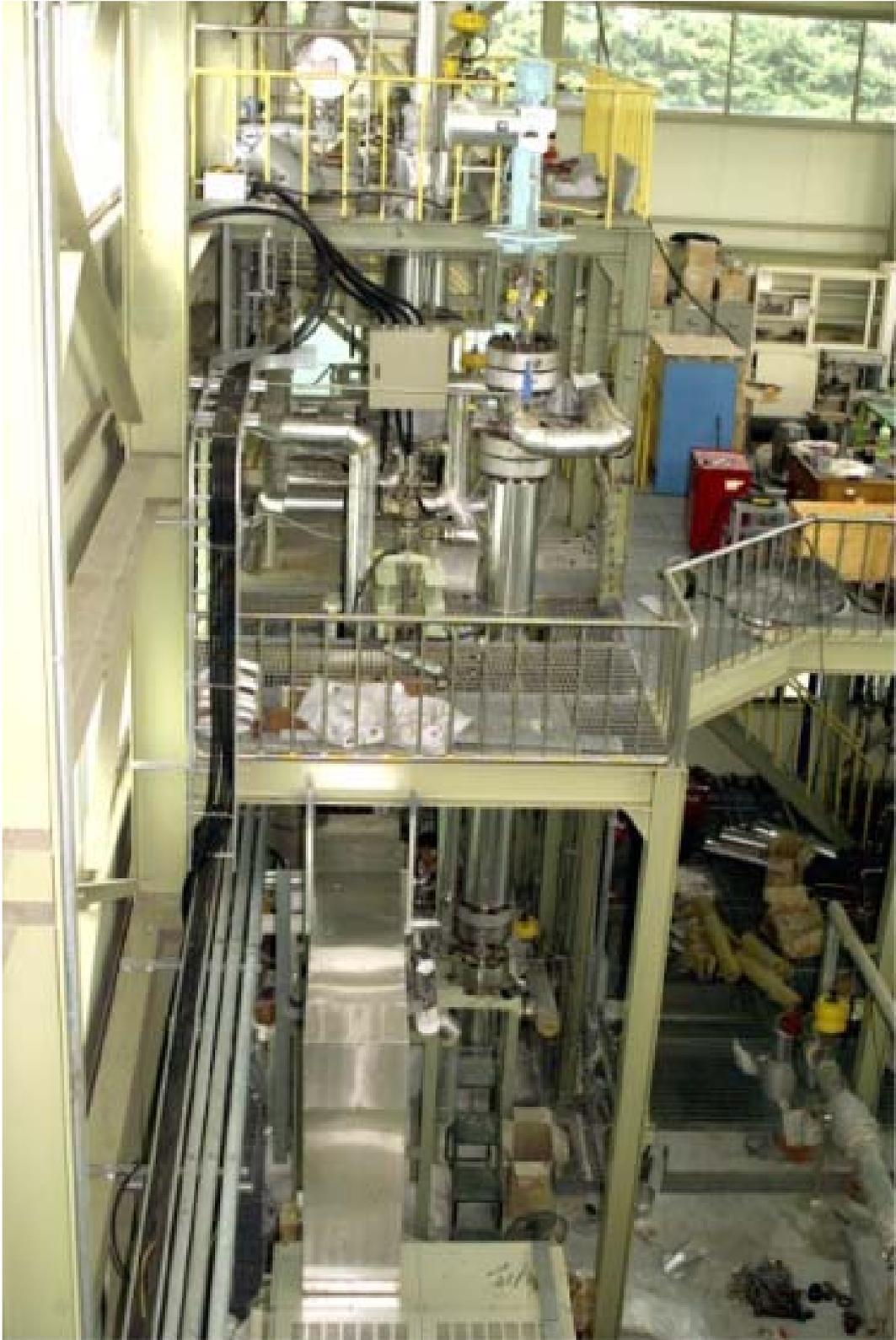


그림 2. KAERI RCS 열수력 루프

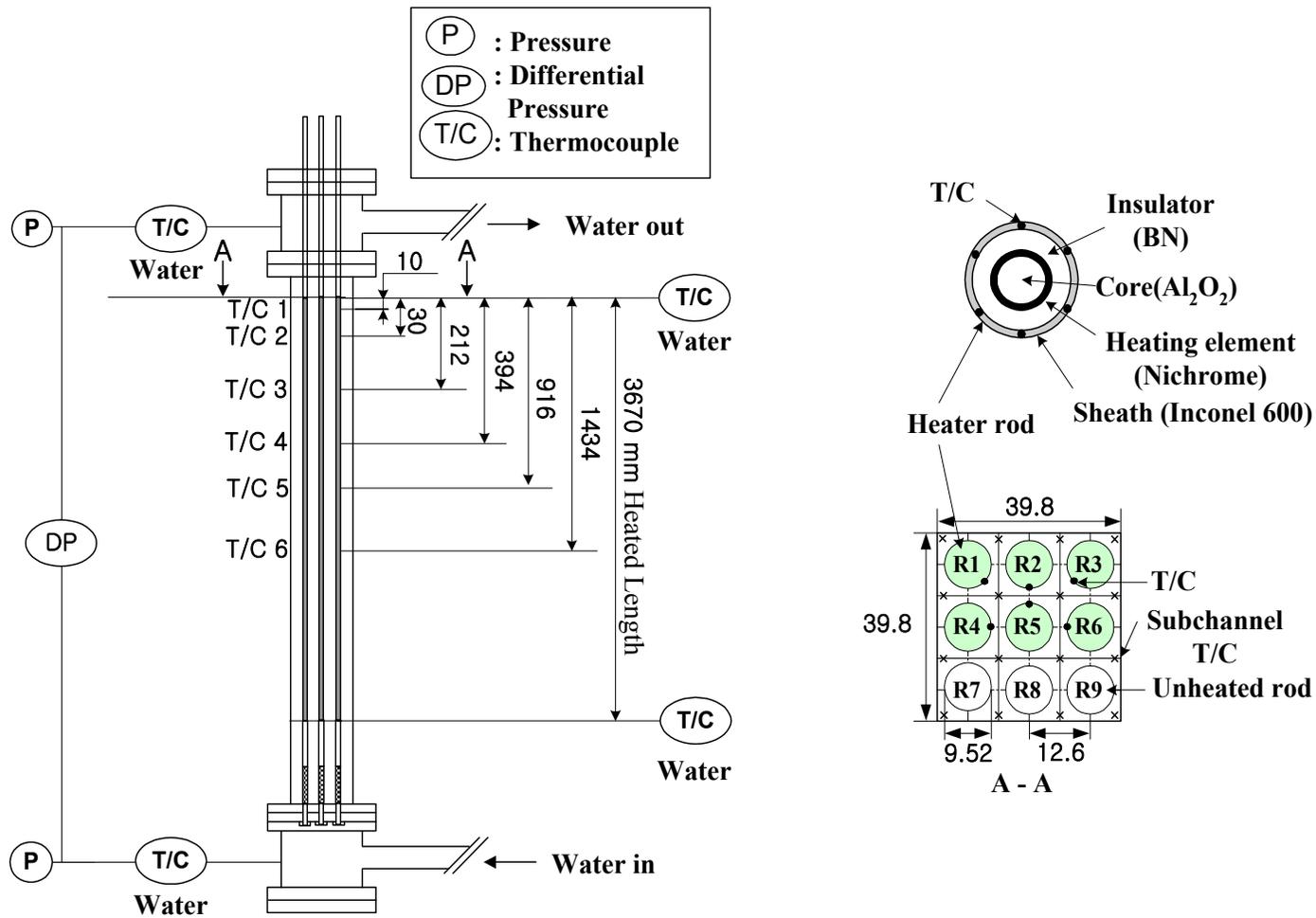


그림 3. 실험대 단면 및 계측기 설치 위치

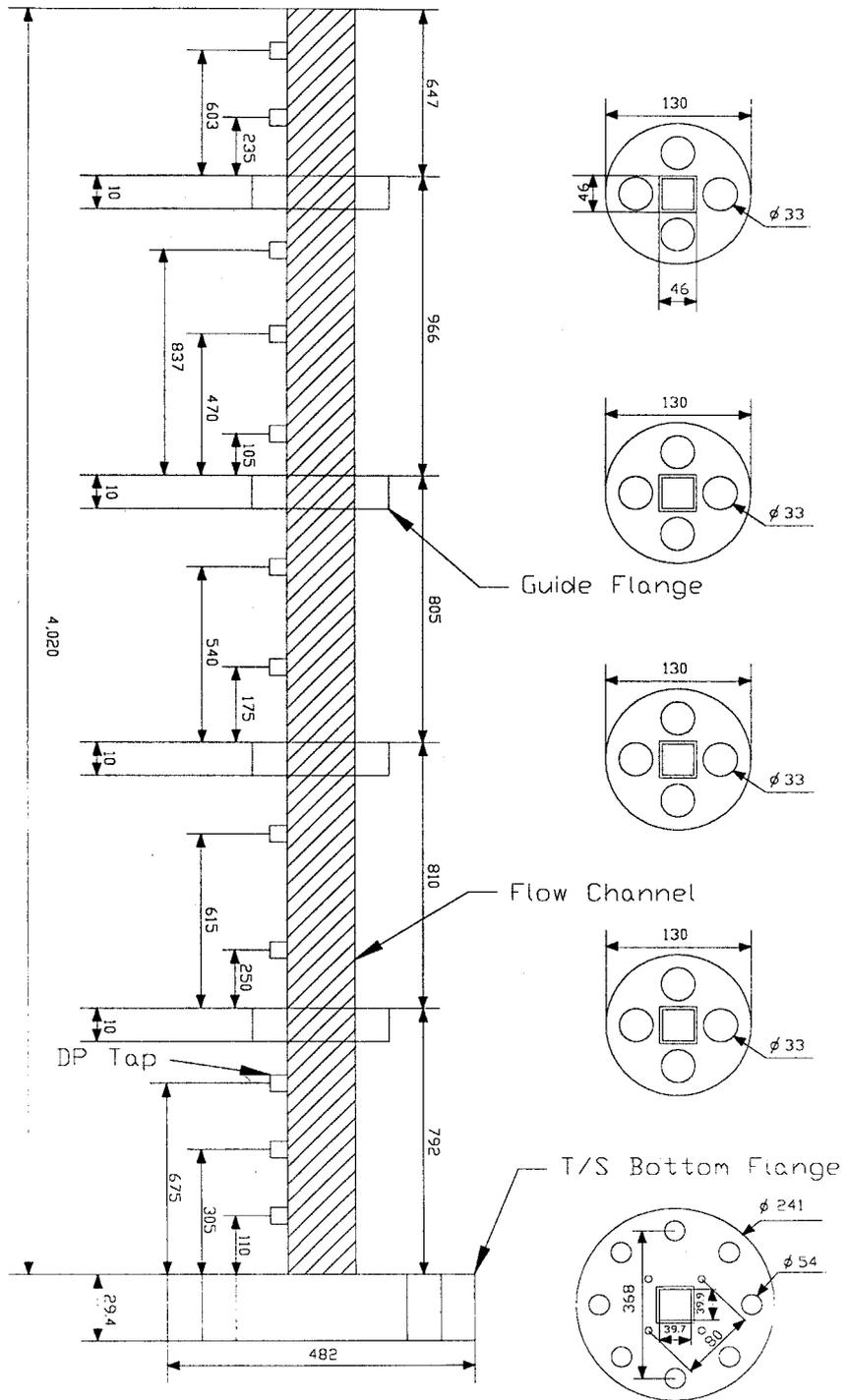
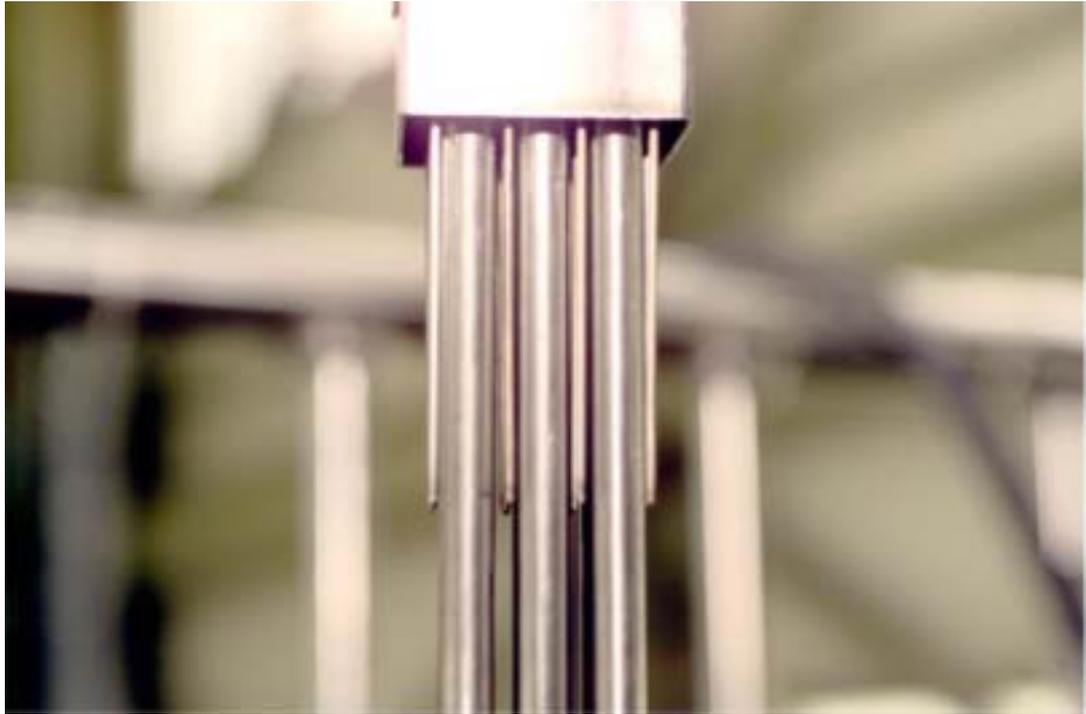


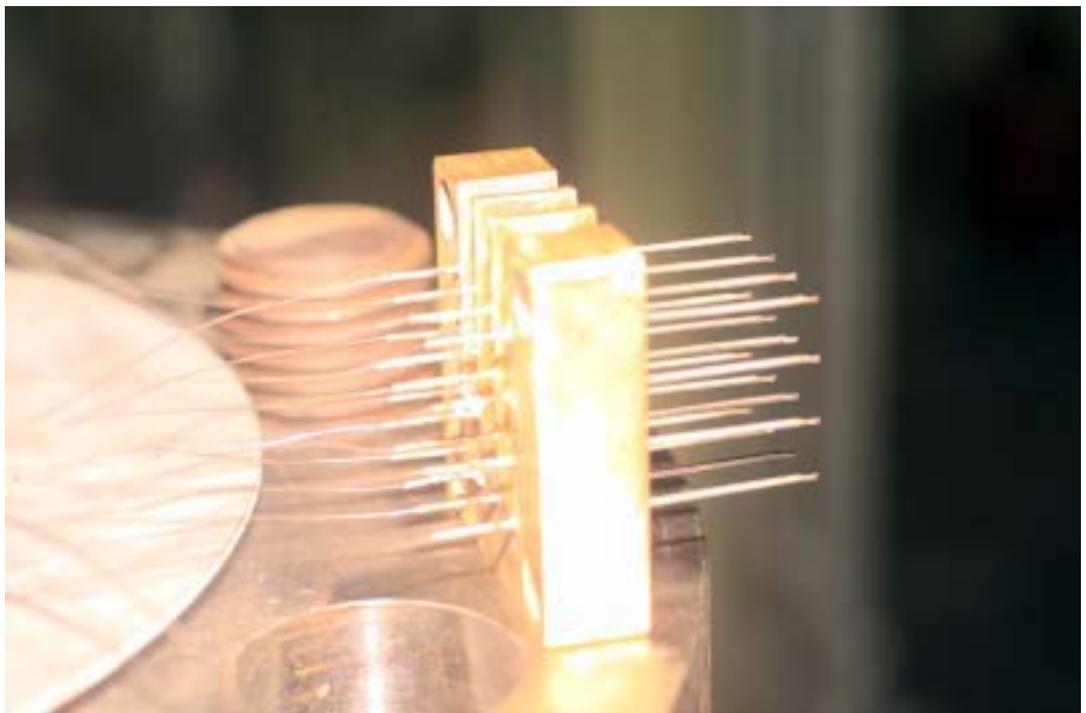
그림 5. 실험대 Flow Housing



그림 6. 가열봉 및 지지격자

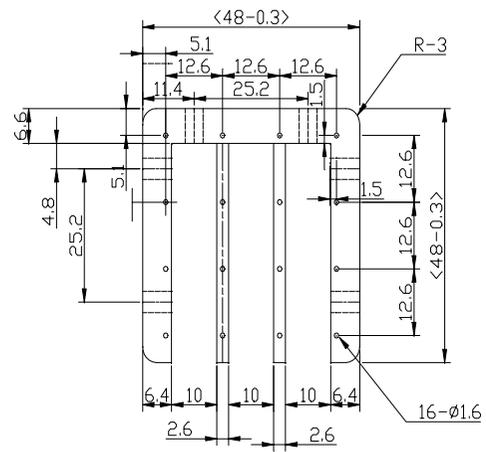


(a) 부수로 유체온도 측정 열전대



(b) 부수로 유체온도 측정 열전대 고정체

그림 7. 부수로 유체 온도 측정용 열전대



NOTE
 1. $\phi 1.6$ 가공후 상부 모따기
 2. 수량 : 3EA

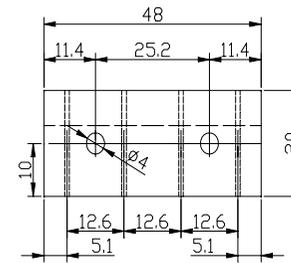
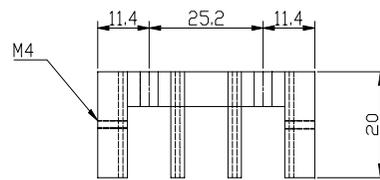
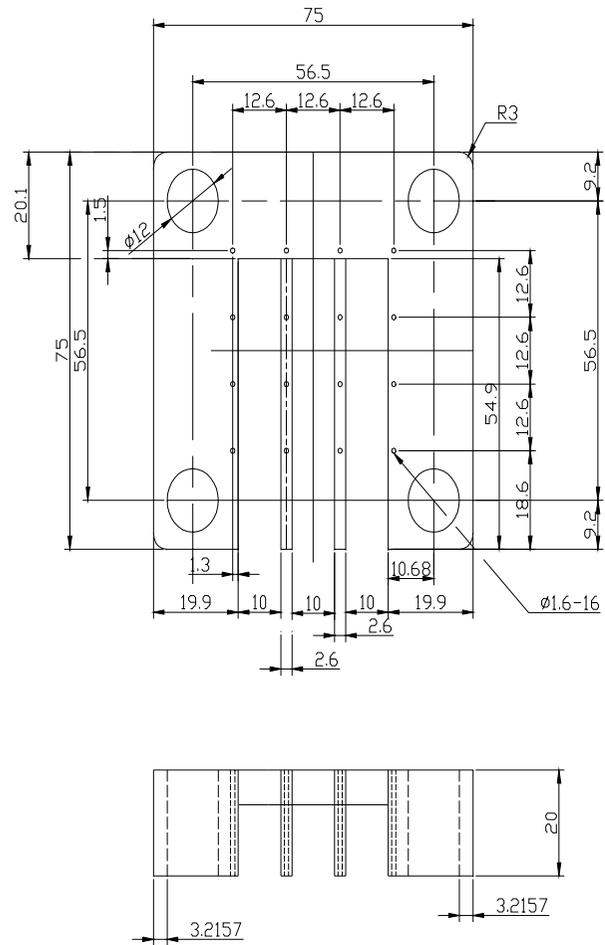


그림 8. 부수로 유체 온도 측정용 열전대 고정체(실험대 출구)



NOTE
 1. $\phi 1.6$ 가공후 하단부 모따기
 2. 수량: 3EA

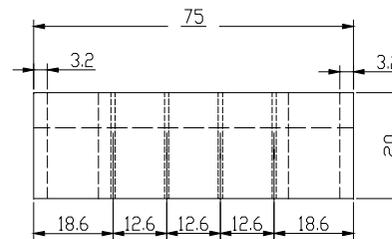


그림 9. 부수로 유체 온도 측정용 열전대 고정체(실험대 입구)

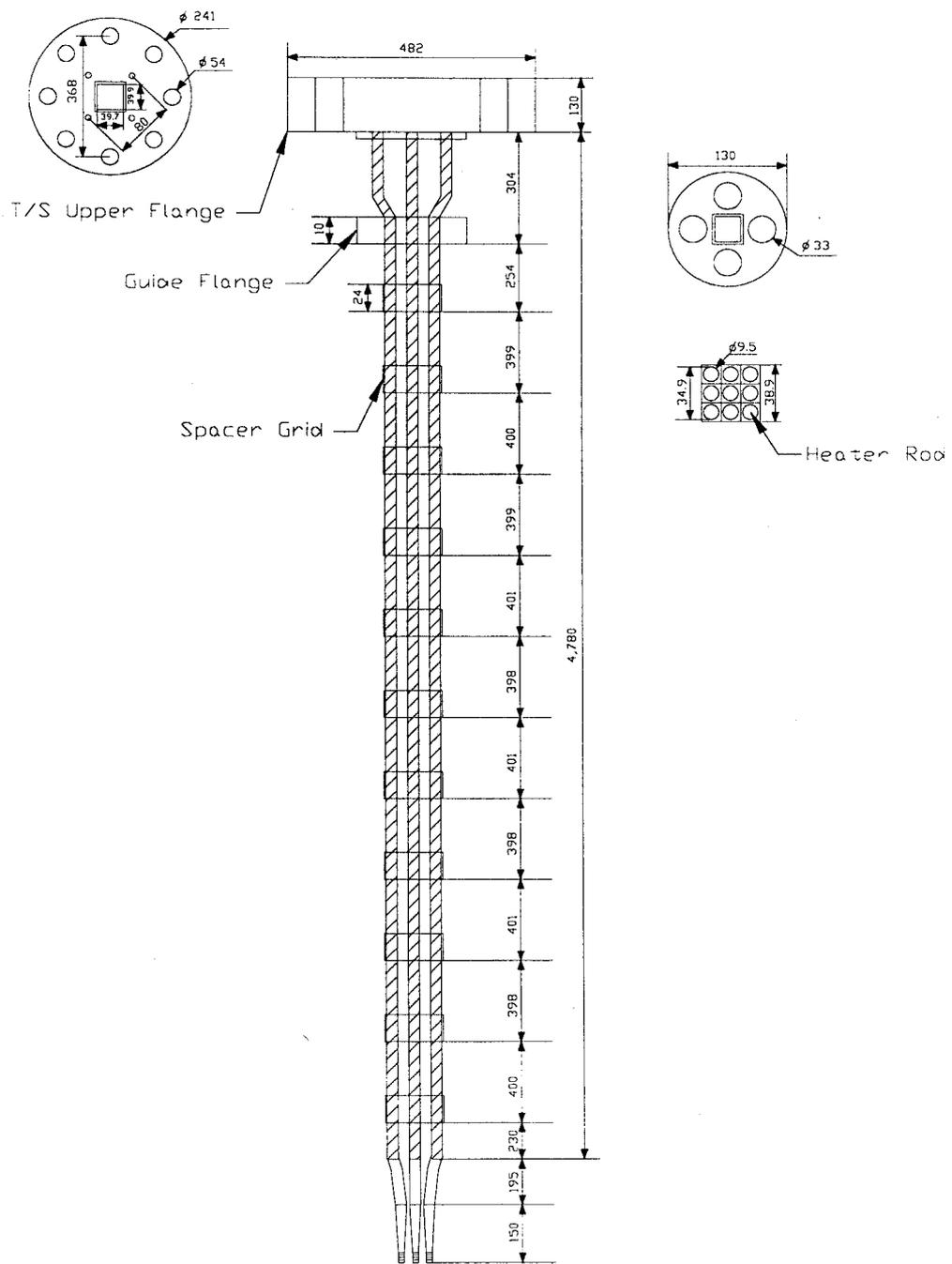


그림 10. 봉다발내 지지격자 설치 위치

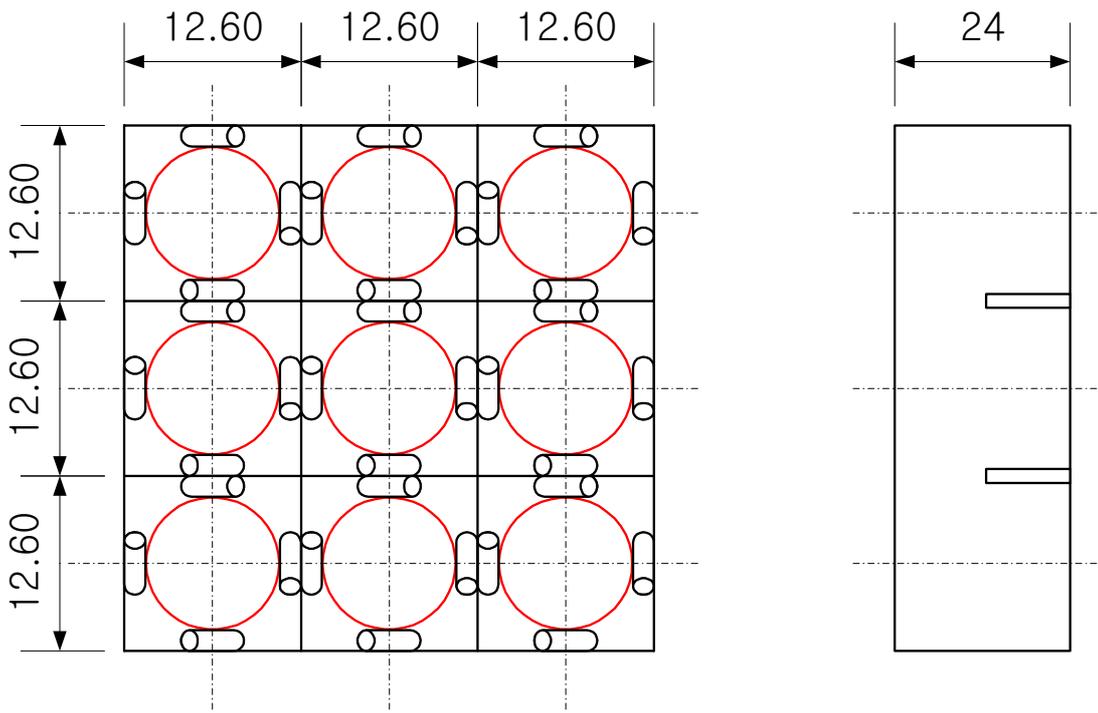
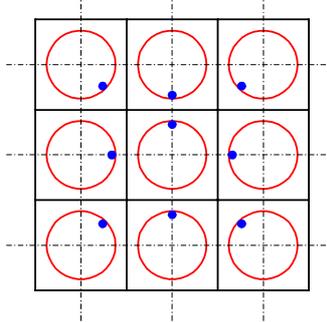
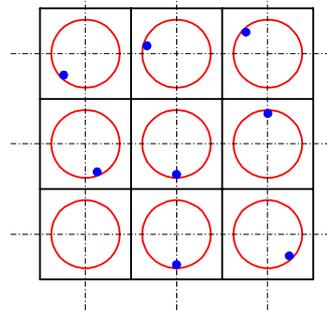


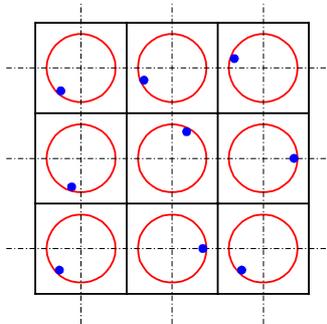
그림 11. 지지격자 단면도



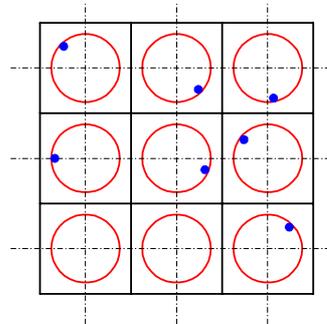
10 mm



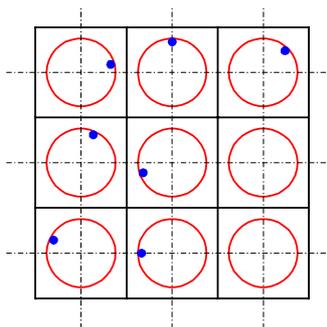
30 mm



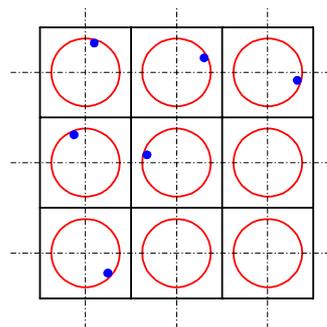
212 mm



394 mm



916 mm



1438 mm

그림 12. 가열봉 벽면온도 측정용 열전대 설치 위치
(표시된 숫자는 가열봉 가열길이 끝으로부터의 거리를 나타냄)

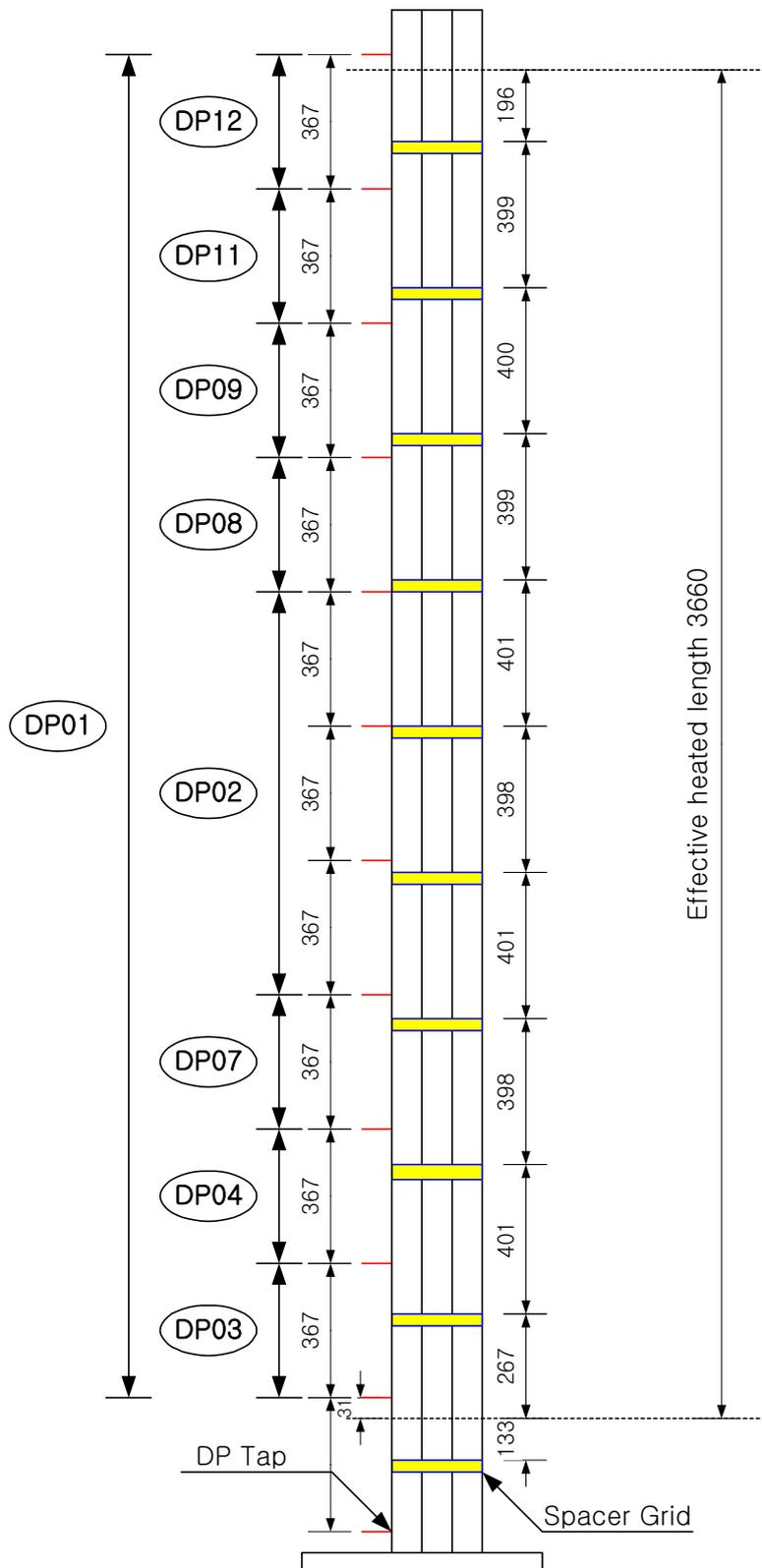


그림 13. 실험대 차압 측정 위치

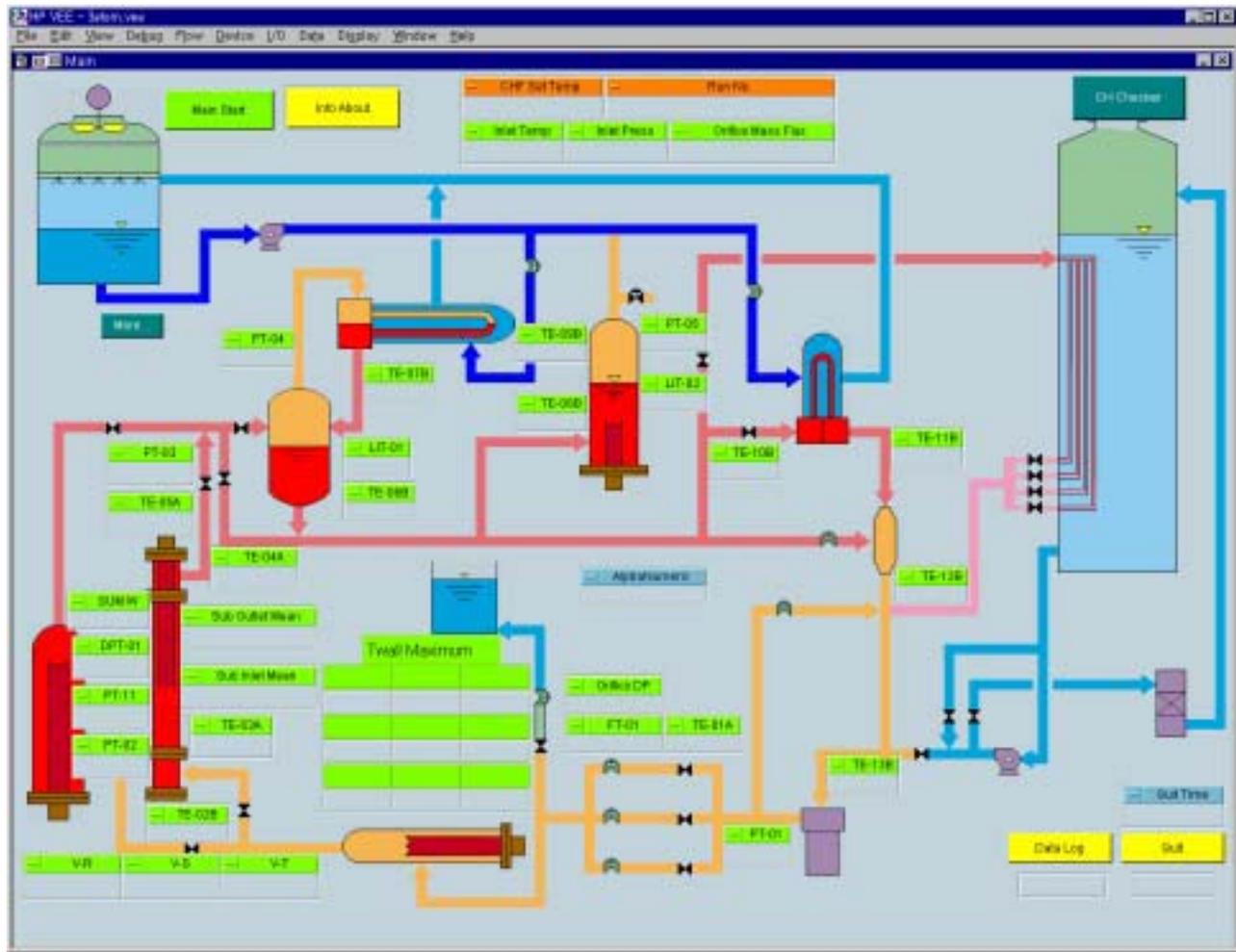


그림 14. 데이터 획득계통 화면(HP-VEE)

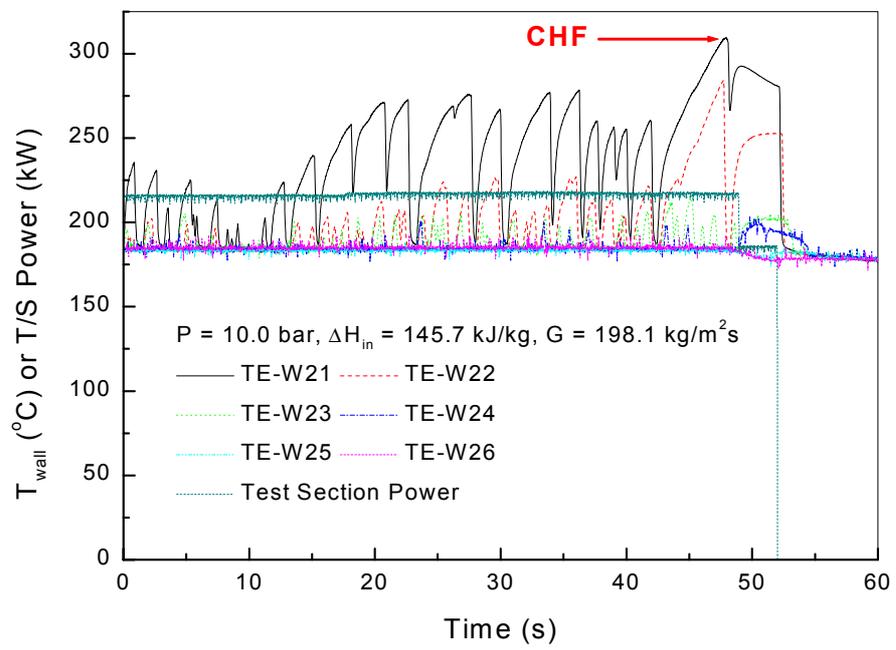


그림 15. 임계열유속 발생시 가열봉 벽면온도의 거동

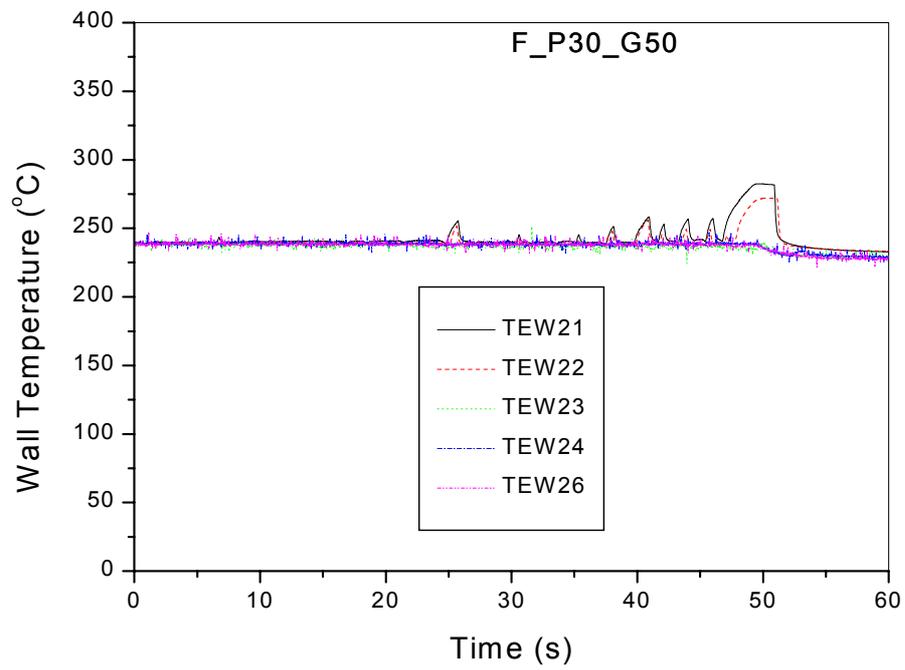


그림 16. 낮은 질량유속에서 벽면온도의 거동
 (계통압력 3 MPa, 입구과냉도 340 kJ/kg, 질량유속 50 kg/m²s)

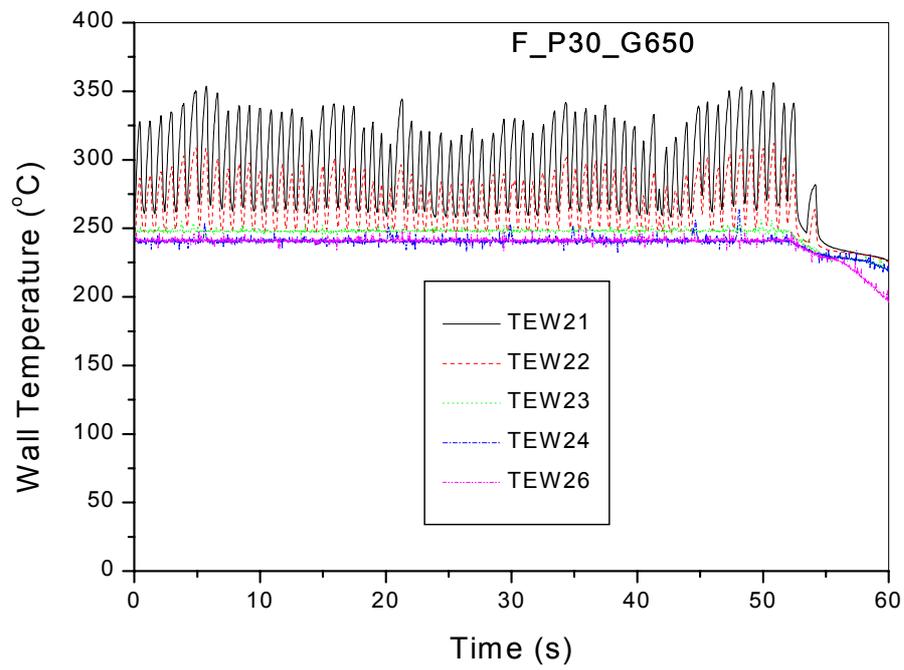
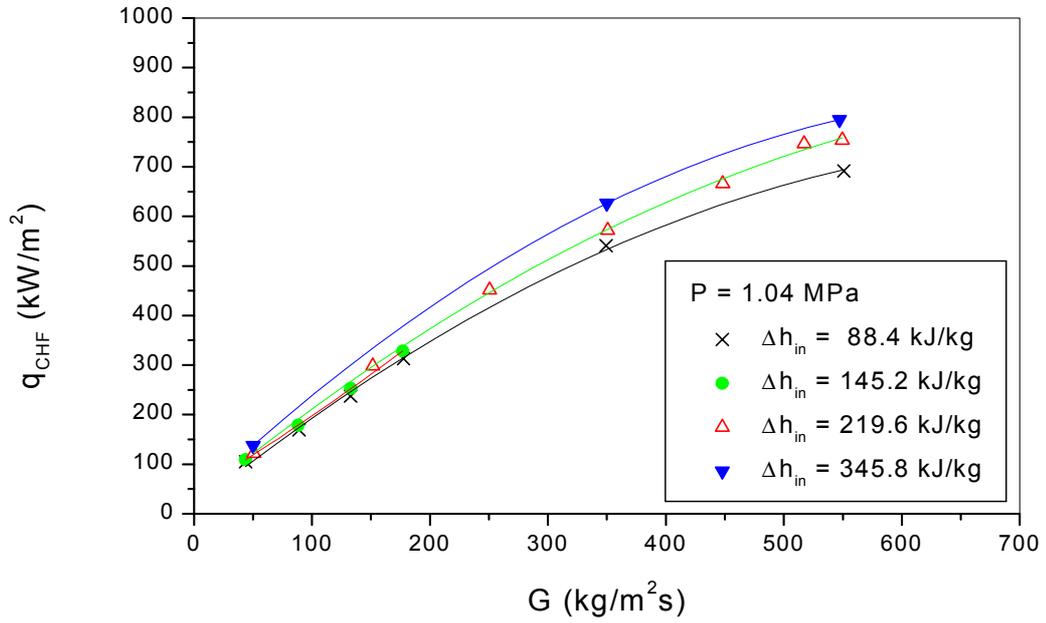
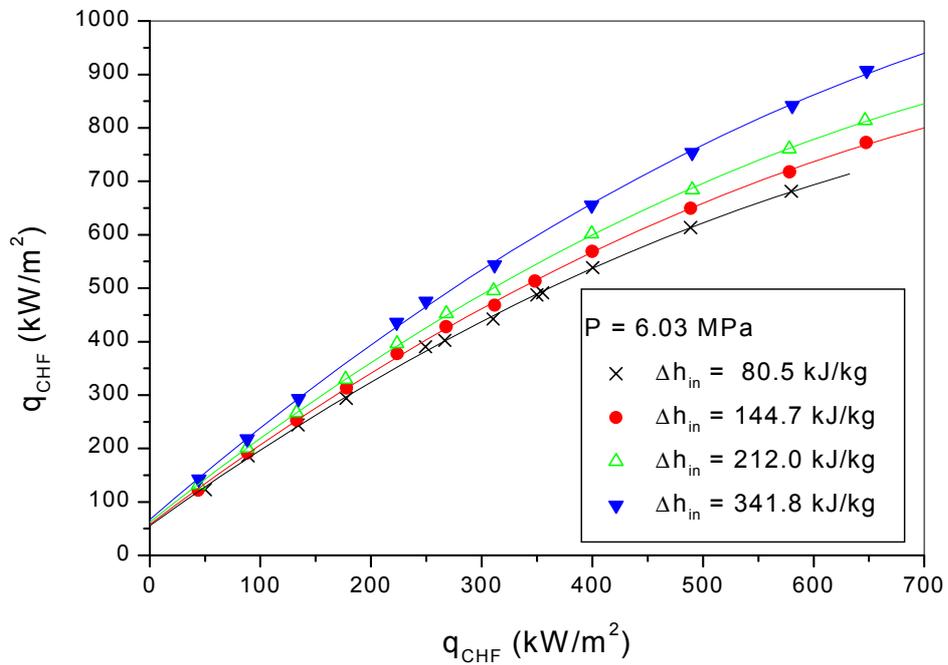


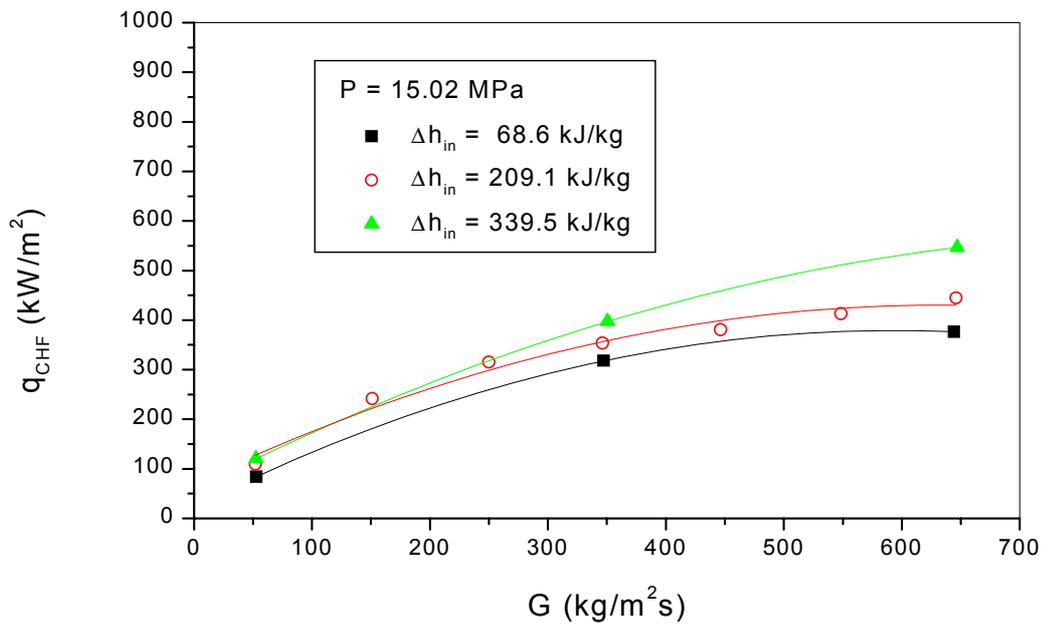
그림 17. 높은 질량유속에서 벽면온도의 거동
 (계통압력 3 MPa, 입구과냉도 340 kJ/kg, 질량유속 650 kg/m²s)



(a) P = 1.04 MPa



(b) P = 6.03 MPa



(c) P = 15.02 MPa

그림 18. 임계열유속에 대한 질량유속의 영향

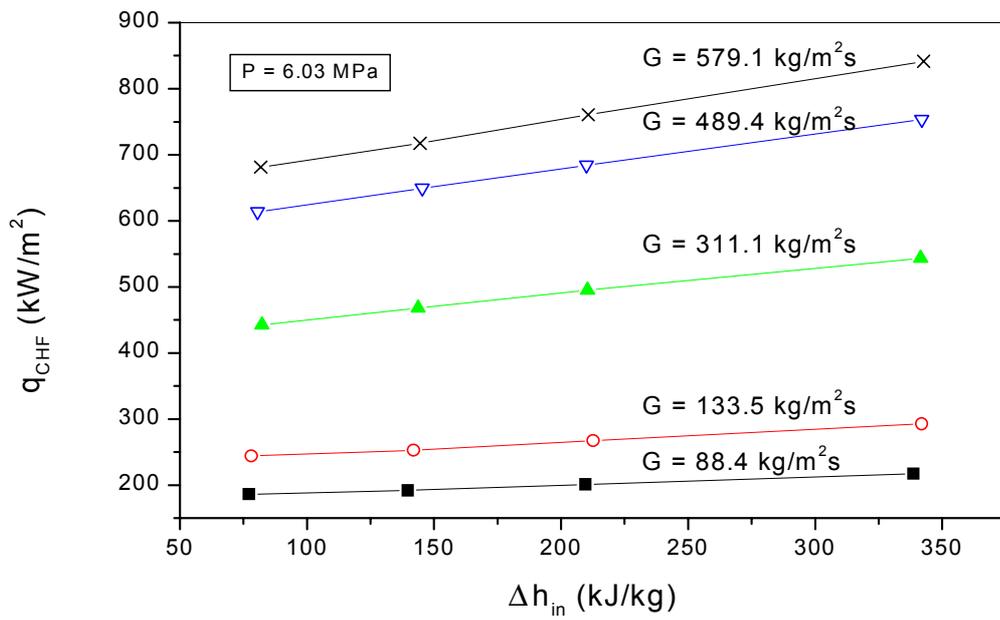


그림 19. 임계열유속에 대한 입구과냉도의 영향 ($P = 6.03 \text{ MPa}$)

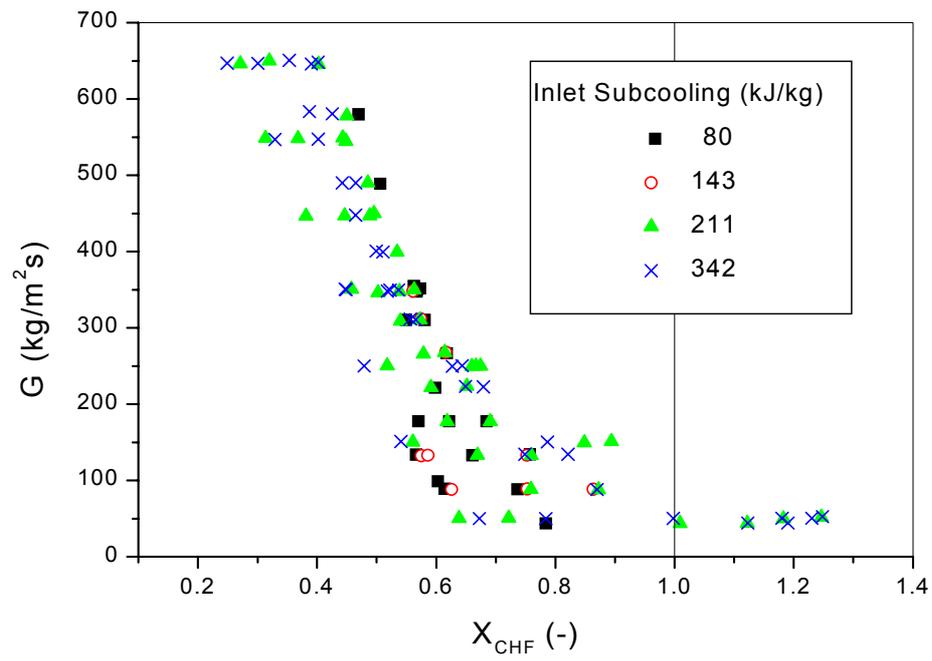


그림 20. 질량유속과 임계건도의 관계

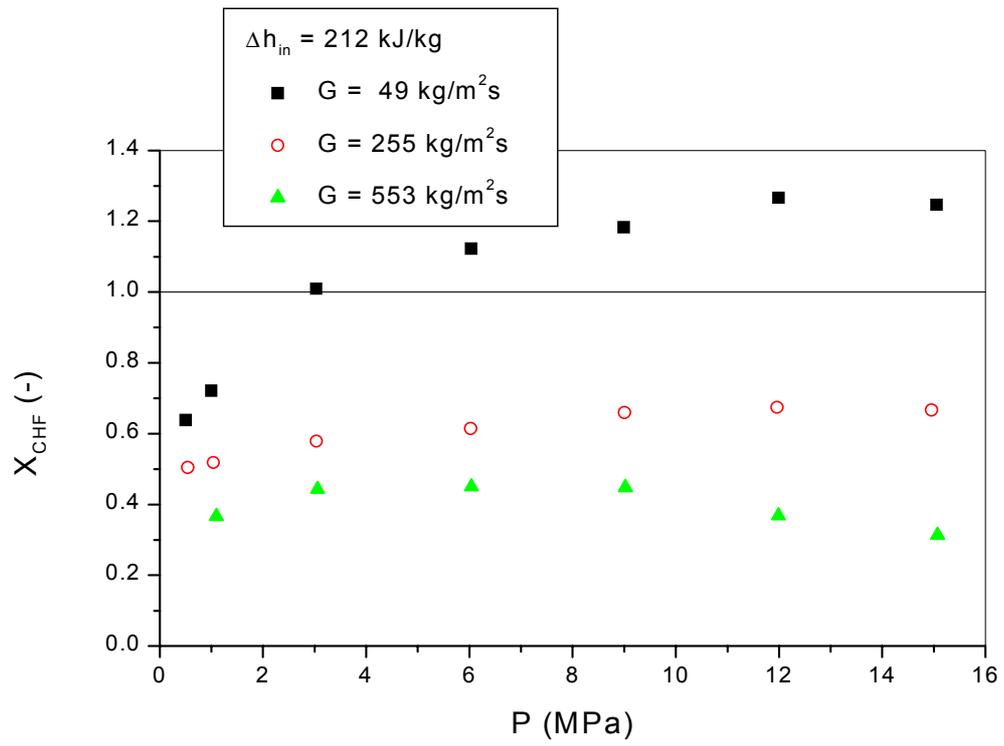
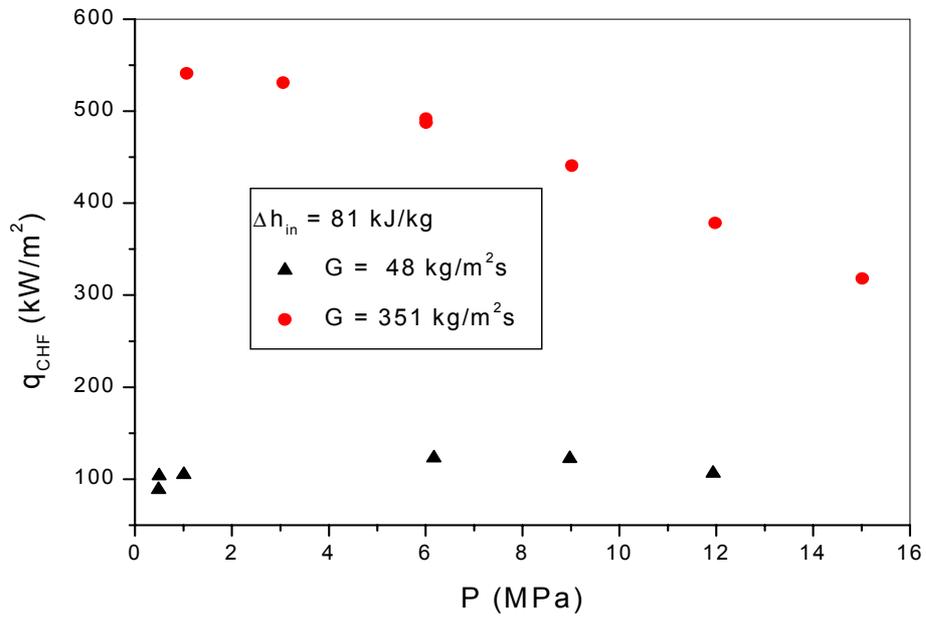
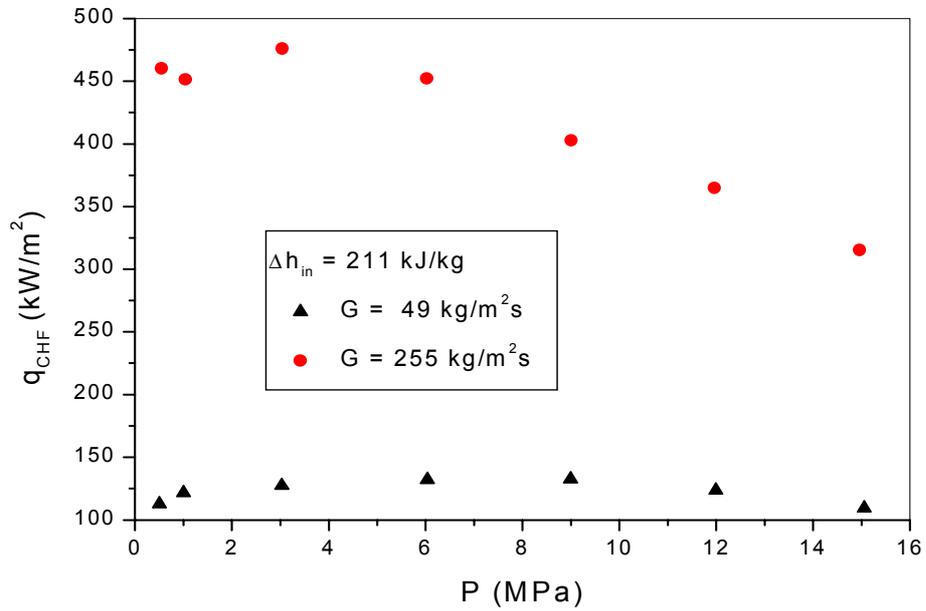


그림 21. 임계건도에 미치는 계통압력의 영향



(a) $\Delta h_{in} = 81 \text{ kJ/kg}$



(b) $\Delta h_{in} = 211 \text{ kJ/kg}$

그림 22. 임계열유속에 미치는 계통압력의 영향

부록 A. 가열봉 설계도

提出図書一覧表

担当者
K.
Tobita

納入先：LG/KAERI

品名：HEATER ROD BUNDOL

注番

作番 N031367

NO	名称	図番	用途	備考
①	Flat Power Heater Rod	NC-107-352.1	承・決・ <input checked="" type="radio"/> ・参	初・再・既
②	Grid Spacer	ND-111-907.0	承・決・ <input checked="" type="radio"/> ・参	初・再・既
③	Lower TiePlate	ND-111-908.0	承・決・ <input checked="" type="radio"/> ・参	初・再・既
④	Lower Electrode	ND-111-910.0	承・決・ <input checked="" type="radio"/> ・参	初・再・既
⑤	Flexible Lead	ND-111-911.0	承・決・ <input checked="" type="radio"/> ・参	初・再・既
⑥	Dimension of Thermocouple(1/2)	NC-107-494.1	承・決・ <input checked="" type="radio"/> ・参	初・再・既
⑦	Dimension of Thermocouple(2/2)	NC-107-495.1	承・決・ <input checked="" type="radio"/> ・参	初・再・既
⑧	PACKING LIST	NE-110-726.0	承・決・ <input checked="" type="radio"/> ・参	初・再・既
9			承・決・完・参	初・再・既
10			承・決・完・参	初・再・既
11			承・決・完・参	初・再・既
12			承・決・完・参	初・再・既
13			承・決・完・参	初・再・既
14			承・決・完・参	初・再・既
15			承・決・完・参	初・再・既
16			承・決・完・参	初・再・既
17			承・決・完・参	初・再・既
18			承・決・完・参	初・再・既
19			承・決・完・参	初・再・既
20			承・決・完・参	初・再・既

配布先	部数
顧客	3
返却	
営業	
東支	1
大管	
広管	
品管	
一管	1
原製	1
熱製	
一検	1
工事	
開発	
原管	
一設	
二設	
VAC設	
熱技	
控	1
合計	8

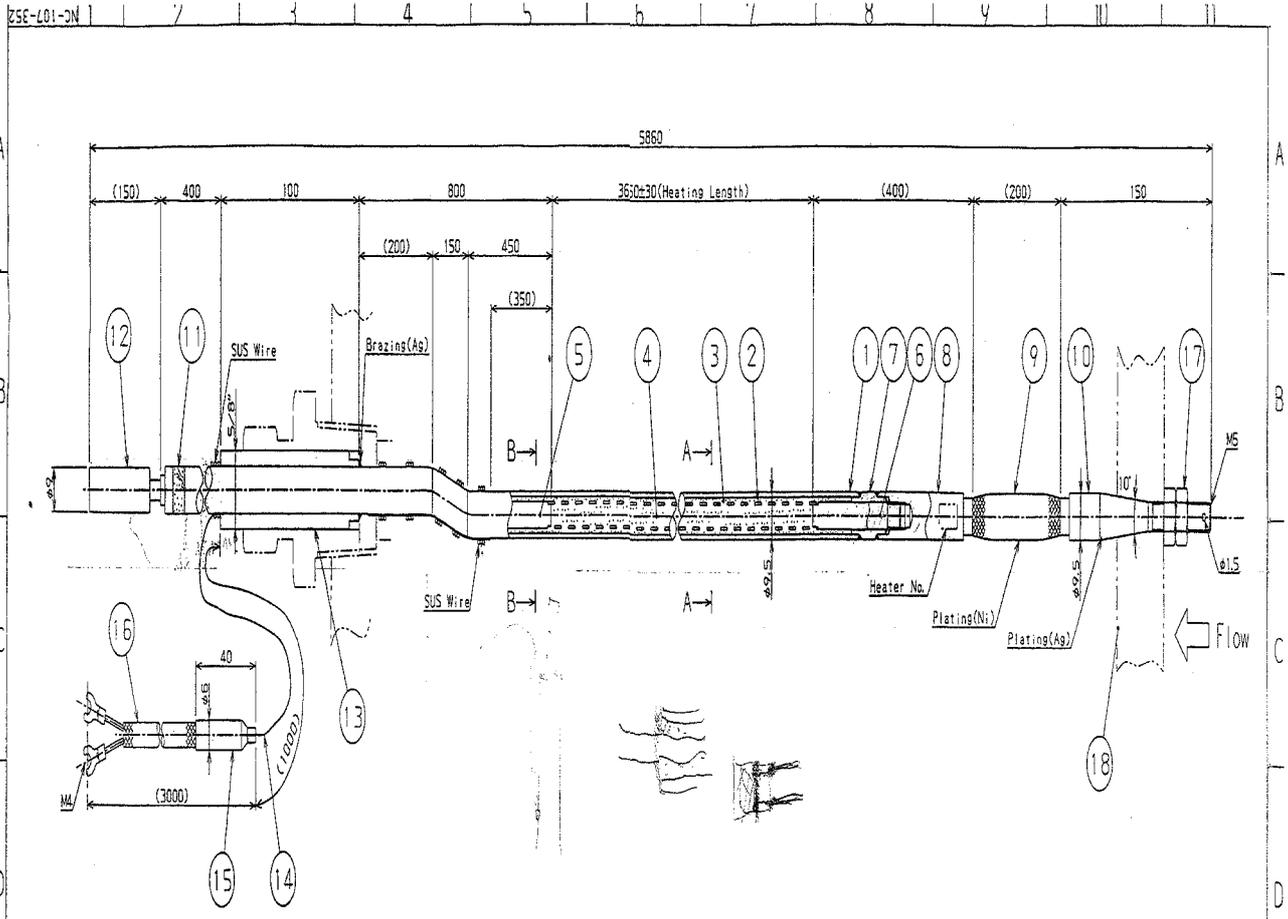
注1) 今回提出図書はNo. 欄を○で囲みます。

注2) 用途及び備考欄の略称

承：御承認申請図書
 決：決定図書
 完：完成図書
 参：参考図書
 初：初回提出図書
 再：再提出図書
 既：既提出済図書

FINISHED PRODUCT
DRAWING

助川電気工業株式会社
SUKEGAWA ELECTRIC CO., LTD



Design Specification

1. Operating Pressure : Max.160 bar
2. Operating Fluid Temperature : Max.347C
3. Working Fluid : De-Ionized Water

FINISHED PRODUCT DRAWING

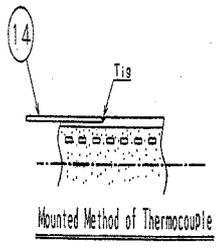
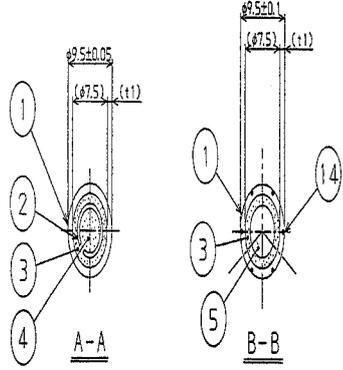
Heater Specification

1. Type : Grounded Indirect Heating
2. Power : 66.6kW/Rod
3. Power Supply : AC440V,60Hz,3φ, Y
4. Total Qty : 9

Thermocouple Specification

1. Type : K (Chromel Alumel)
2. Class : 0.4 Grade
3. Outside Dia. : φ0.5
4. Sheath Material : NCF 600
5. Junction : Ungrounded-Single
6. Standard : JIS C 1602-1981

QTY	NO.	PART NAME	MATERIAL	DRAWING NO.	REMARKS
1	18	Lower Tie Plate	Ni	ND-111-908	
1set	17	Not	SUS		
6	16	Compensation Wire	Chromel Alumel		Glass Covered Wire
6	15	Adapter	SUS 304		
6	14	Thermocouple			
1	13	Seal Sleeve	SUS 304		
1	12	Terminal(2)	Cu		
1	11	Isolator	Al ₂ O ₃		
1	10	Terminal(1)	Ni		
1	9	Flexible Lead	Cu		
1	8	Lower Conductor(2)	Ni		
1	7	Sheath Conductor	Ni		
1	6	Lower Conductor(1)	Ni		
1	5	Upper Conductor	Ni and Cu		
1set	4	Core	Al ₂ O ₃		
1set	3	Insulator	BN and MgO		
1set	2	Heating Element	Nichrome		
1	1	Sheath	NCF 600		

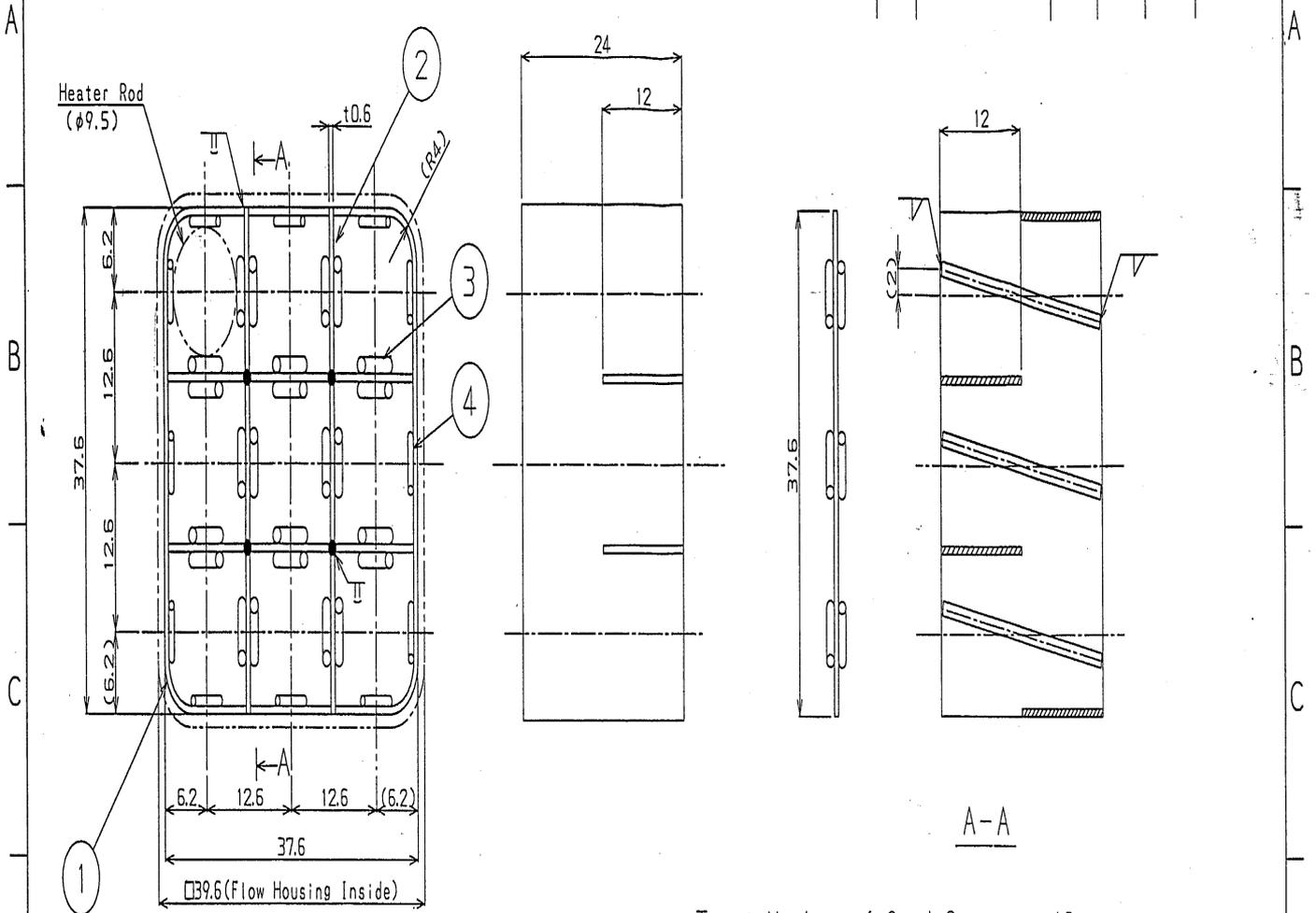


REV. NO.	DESCRIPTION	DATE	REV'D	APP'D
◇	Add Drawing of T/C	95/11/11		
◇				
◇				
◇				
◇				

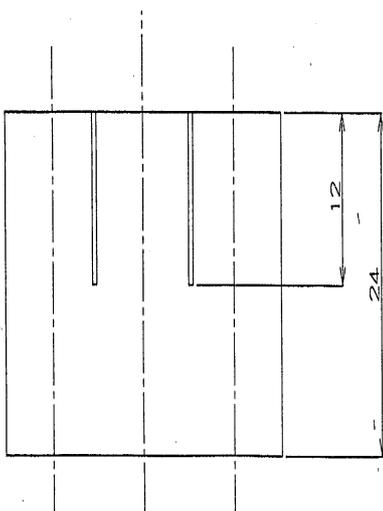
DRAWN BY: K. Tobito	'95-7-14	3RD ANGLE PROJECTION	TITLE: LG/KAERI
SCALE: Not Scale			Heater Rod Bundle for RCS Loop Test Section
APP'D BY: T. Ogasawara	'95-3-18	JOB NO. NO31367	Flat Power Heater Rod
SUKEGAWA ELECTRIC CO., LTD.			DRAWING NO. NC-107-352

LD06-111-0N

REV. NO.	DESCRIPTION	DATE	REV'D	APP'D	JOB NO.
◇					NO31367



Total Number of Grid Spacer : 10



Q'TY	NO.	PART NAME	MATERIAL	DRAWING NO.	REMARKS
12	4	Wire Spacer(2)	SUS		φ0.8
24	3	Wire Spacer(1)	SUS		φ1.2
4	2	Inner Flame	SUS 304		
1	1	Outer Flame	SUS 304		

DRANN BY	K. Tobita	195.7.14	3RD ANGLE PROJECTION	TITLE	LG/KAERI
CHK'D BY	K. Tobita	195.7.14	SCALE	Heater Rod Bundle for RCS Loop Test Section	
APP'D BY	S. Yamashita	95.7.18	UNITS	Grid Spacer	
				DRAWING NO.	REV. NO.
				ND-111-907	◇

FINISHED PRODUCT DRAWING

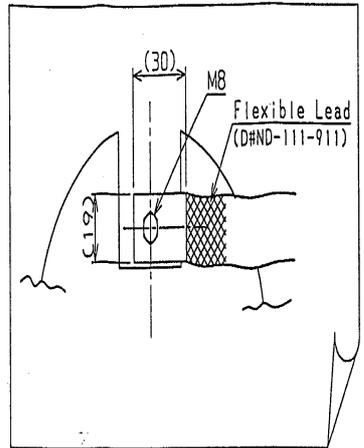
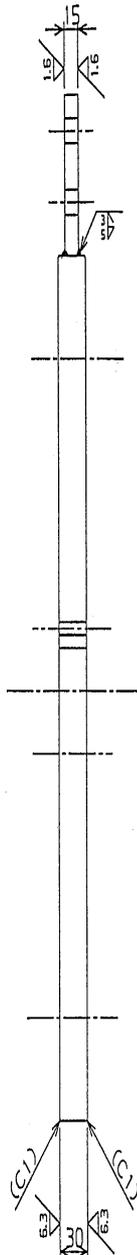
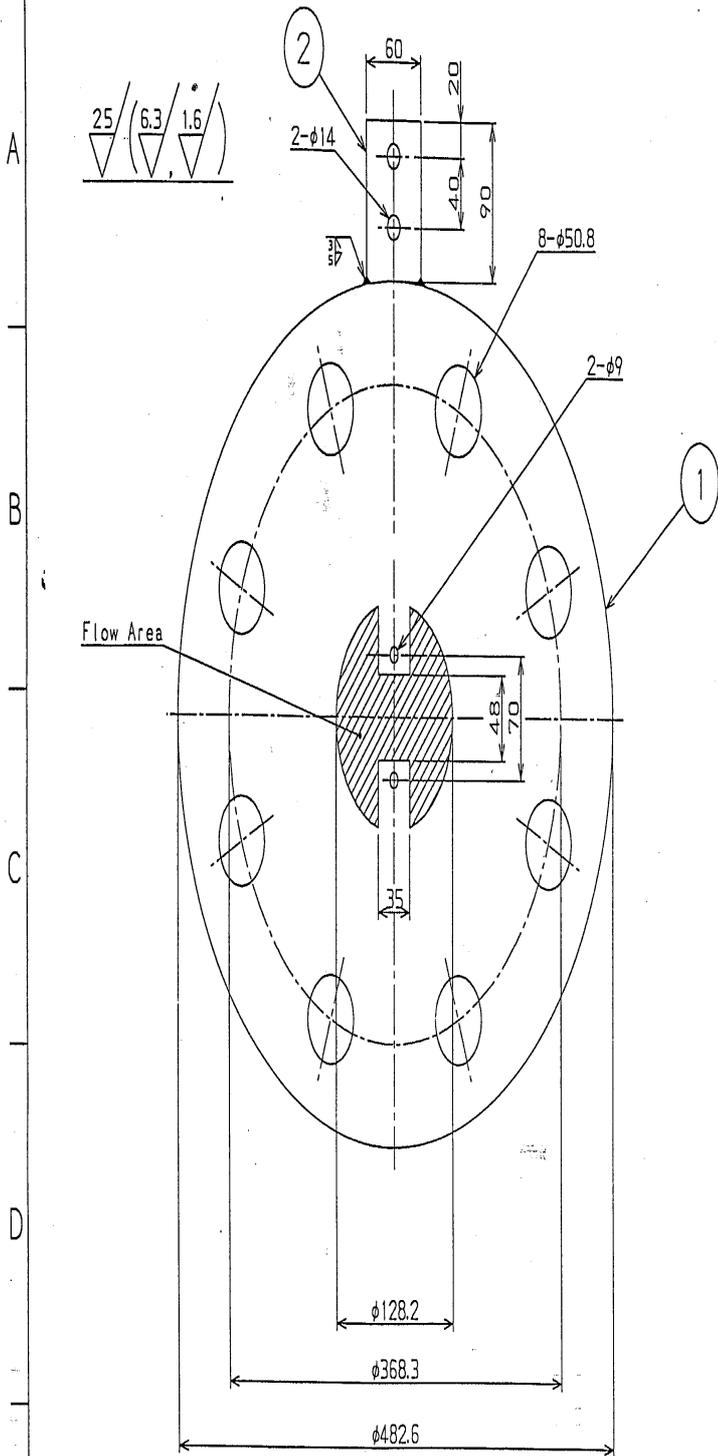
SUKEGAWA ELECTRIC CO., LTD.

ND-111-907

◇

016-111-QN 1

REV. NO.	DESCRIPTION	DATE	REV'D	APP'D	JOB NO.
◇					NO31367



FINISHED PRODUCT DRAWING

1	2	Terminal Plate	SUS 304		
1	1	Lower Electrode	SUS 304		
Q'TY	NO.	PART NAME	MATERIAL	DRAWING NO.	REMARKS
DRAWN BY	<i>K. Tobita</i>	195.7.14	3RD ANGLE PROJECTION	TITLE LG/KAERI	
CHK'D BY	<i>K. Tobita</i>	195.7.14	SCALE 1:4	Heater Rod Bundle for RCS Loop Test Section	
APP'D BY	<i>Y. Sasawama</i>	195.7.18	UNITS mm	Lower Electrode	
SUKEGAWA ELECTRIC CO., LTD.				DRAWING NO.	REV. NO.
				ND-111-910	◇

A
B
C
D
E

1 2 3 4 5 6 7 8

116-111-QN 1

2

3

4

5

6

7

8

REV. NO.	DESCRIPTION	DATE	REV'D	APP'D	JOB NO.
◇					NO31367

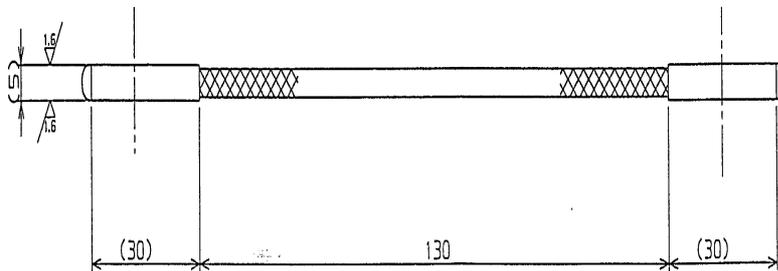
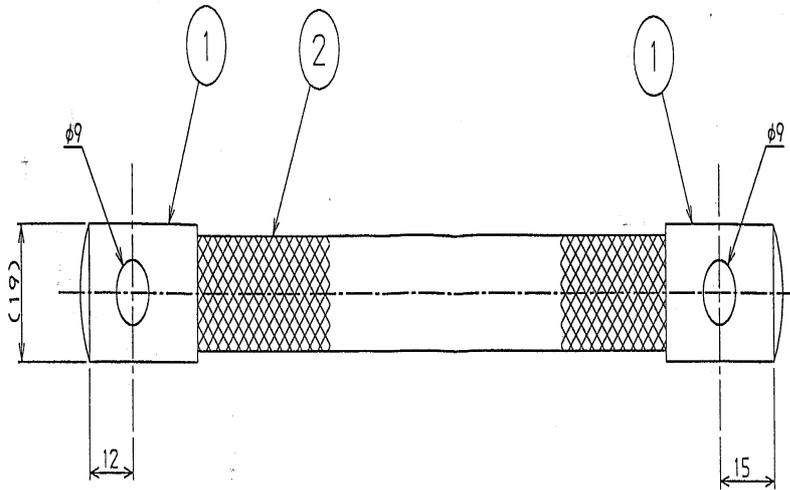
A

B

C

D

E



FINISHED PRODUCT DRAWING

Total Q'ty : 2

1	2	Lead	Cu		38mm ²
2	1	Terminal	Cu		
Q'TY	NO.	PART NAME	MATERIAL	DRAWING NO.	REMARKS
DRAWN BY	K. Tobita	195-10-25	3RD ANGLE PROJECTION	TITLE	
CHK'D BY	K. Tobita	S	SCALE 1:1	LG/KAERI	
APP'D BY	M. Suresh	195-10-25	UNITS mm	Heater Rod Bundle for RCS Loop Test Section	
				Flexible Lead	
				DRAWING NO.	REV. NO.
SUKEGAWA ELECTRIC CO., LTD.				ND-111-911	◇

1

2

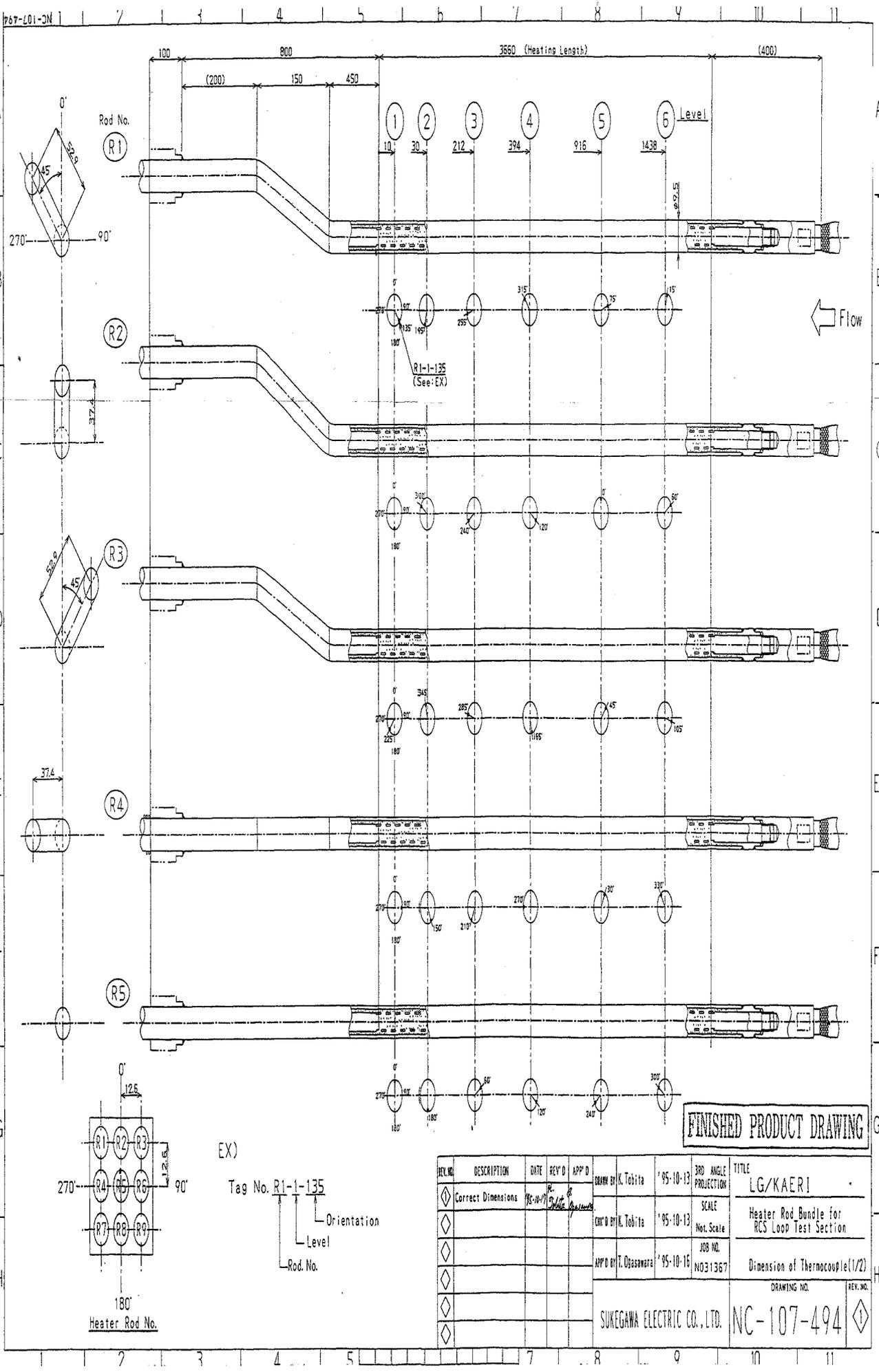
3

5

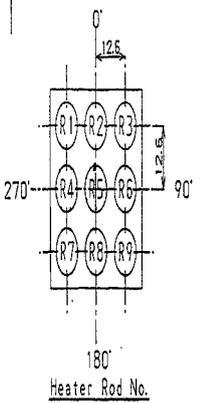
6

7

8

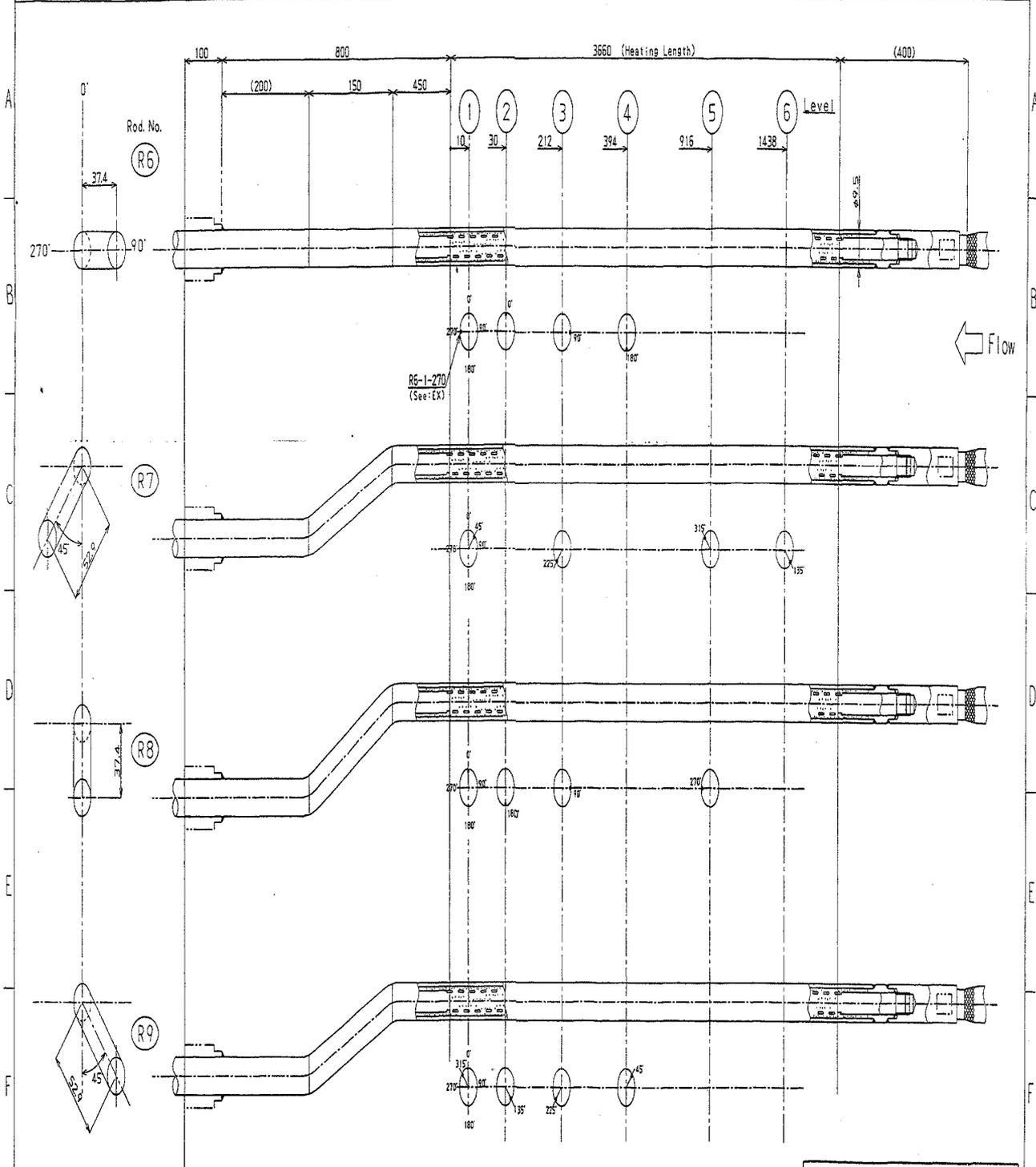


FINISHED PRODUCT DRAWING



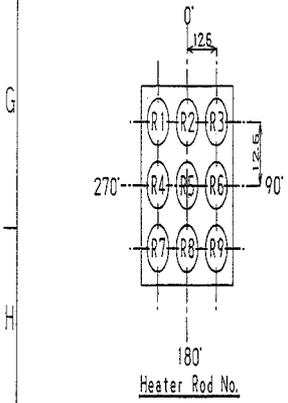
EX)
 Tag No. R1-1-135
 Orientation
 Level
 Rod No.

REV. NO.	DESCRIPTION	DATE	REV'D	APP'D	DRAWN BY	DATE	3RD ANGLE PROJECTION	TITLE
1	Correct Dimensions	95-10-13			K. Tobita	95-10-13	3RD ANGLE PROJECTION	LG/KAERI
2		95-10-13			K. Tobita	95-10-13	SCALE Not Scale	Heater Rod Bundle for RCS Loop Test Section
3					T. Ogasawara	95-10-16	JOB NO. ND31367	Dimension of Thermocouple(1/2)
SUKEGAWA ELECTRIC CO., LTD.								DRAWING NO. NC-107-494
								REV. NO.



FINISHED PRODUCT DRAWING

Total Number of Thermocouple: 46



EX) Tag No. RG-1-270

Orientation

Level

Rod No.

REV. NO.	DESCRIPTION	DATE	REV'D	APP'D	DRAWN BY	DATE	3RD ANGLE PROJECTION	TITLE	
◇	Correct Dimensions	95-10-7	KC		K. Tobita	'95-10-13	SCALE	LG/KAERI	
◇					K. Tobita	'95-10-13	Not Scale	Heater Rod Bundle for RCS Loop Test Section	
◇					T. Ogasawara	'95-10-16	JOB NO.	Dimension of Thermocouple(2/2)	
◇							NO31367		
◇							DRAWING NO.		
◇							REV. NO.		
SUNEGAWA ELECTRIC CO. LTD.								NC-107-495	◇

빈

면

부록 B. 균일열유속 분포를 갖는 3 x 3 봉다발
임계열유속 데이터베이스

3 X 3 Rod Bundle CHF Data (Uniform Axial/Radial Heat Flux)

Geometry

- Flow Channel Width	39.7 X 39.9	mm X mm
- Flow Channel Flow Area	9.43105E-05	m ²
- Total No. of Heating Rods	6	-
- Total No. of Non-Heating Rods	3	-
- Heater Rod Outside Diameter	9.5222	mm
- Heater Rod Pitch	12.6	mm
- Heater Rod Arrangement	square	-
- Heated Length	3669.78	mm
- Axial Heat Flux Distribution	uniform	-
- Radial Heat Flux Distribution	uniform	-
- Coolant Flow Direction	Vertically upwards	-
- Coolant	Deionized hot water	-

Nomenclature

- PIN	:	Inlet Pressure
- G	:	Mass Flux
- TIN	:	Inlet Water Temperature
- DHIN	:	Inlet Subcooling
- XC	:	Critical Quality at CHF Location
- XE	:	Exit Quality
- CHF	:	Critical Heat Flux
- CHF Location	:	T/C ID at CHF Location

CHF Data Base (Total No. of Data : 163)

ID	PIN (kPa)	G (kg/m ² s)	TIN (°C)	DHIN (kJ/kg)	XC (-)	XE (-)	CHF (kW/m ²)	CHF Location
3U6_B_P10_G100	1007.7	89.091	162.074	79.432	0.6147	0.6201	169.2994	TE-W12
3U6_B_P10_G150	987.9	132.646	161.803	76.814	0.5804	0.5821	237.4114	TE-W21
3U6_B_P10_G200	998.9	177.529	161.358	80.861	0.5701	0.5718	313.2303	TE-W21
3U6_B_P10_G350	1066.4	349.368	161.852	91.327	0.4928	0.4943	541.0360	TE-W21
3U6_B_P10_G50	1006.6	43.802	161.782	80.491	0.7840	0.7907	104.8527	TE-W12
3U6_B_P10_G550_1	1146.7	550.856	158.234	121.263	0.3758	0.3794	691.6884	TE-W22
3U6_B_P120_G350	11976.4	347.140	312.104	79.386	0.5672	0.5689	378.4168	TE-W21
3U6_B_P120_G50	11933.1	50.240	313.784	67.310	1.1639	1.1740	106.3018	TE-W12
3U6_B_P120_G650_3	12052.1	652.339	311.855	84.099	0.3459	0.3470	465.5600	TE-W11
3U6_B_P150_G350	15016.3	347.162	331.262	83.380	0.5527	0.5544	317.9452	TE-W11
3U6_B_P150_G50	14960.6	52.848	336.287	44.649	0.9379	1.0561	83.8548	TE-W14
3U6_B_P150_G650	15070.5	644.179	332.392	77.769	0.2867	0.3306	376.4831	TE-W34
3U6_B_P30_G100	2995.9	88.513	216.710	79.216	0.7366	0.7430	178.9955	TE-W12
3U6_B_P30_G150	3005.0	132.870	216.271	82.020	0.6610	0.6630	241.8093	TE-W11
3U6_B_P30_G200	3000.4	177.355	216.668	79.800	0.6216	0.6234	304.2716	TE-W21
3U6_B_P30_G250	3009.8	221.338	216.635	80.769	0.5985	0.6002	366.6718	TE-W21
3U6_B_P30_G300	2999.2	268.232	217.160	77.439	0.5827	0.5844	432.4144	TE-W21
3U6_B_P30_G350_1	3012.1	310.270	216.672	80.799	0.5493	0.5509	474.7125	TE-W21
3U6_B_P30_G400	3056.5	355.586	216.902	83.578	0.5345	0.5361	530.8956	TE-W21
3U6_B_P30_G450	3071.8	406.783	215.758	90.132	0.5092	0.5107	584.3083	TE-W21
3U6_B_P30_G550	3081.7	491.071	217.115	84.760	0.4873	0.4888	673.7147	TE-W21
3U6_B_P30_G650	3114.6	573.070	215.993	92.704	0.4549	0.4563	744.0930	TE-W21
3U6_B_P5_G100	505.6	88.170	132.877	83.229	0.5752	0.5769	163.8983	TE-W21
3U6_B_P5_G100_1	498.2	98.816	133.456	78.358	0.6028	0.6080	192.4249	TE-W22

3U6_B_P5_G150	499.9	133.818	133.455	78.916	0.5663	0.5712	245.7891	TE-W22
3U6_B_P5_G200	511.8	178.350	132.970	84.821	0.5823	0.5840	335.5154	TE-W21
3U6_B_P5_G250	569.6	250.132	130.474	113.167	0.5350	0.5399	444.9525	TE-W22
3U6_B_P5_G50_1	487.2	44.186	133.400	74.979	0.6228	0.6283	88.6347	TE-W12
3U6_B_P5_G50_2	496.4	49.893	132.269	82.837	0.6433	0.6489	103.6524	TE-W12
3U6_B_P60_G100	5978.1	88.661	260.091	77.218	0.8767	0.8843	186.3627	TE-W12
3U6_B_P60_G150	6012.1	134.075	260.279	78.175	0.7575	0.7597	244.0514	TE-W11
3U6_B_P60_G200	5998.3	177.454	260.100	78.297	0.6844	0.6864	293.9595	TE-W21
3U6_B_P60_G250_1	5957.4	249.154	260.224	75.407	0.6457	0.6476	390.6026	TE-W21
3U6_B_P60_G300	5993.4	266.659	259.780	79.611	0.6178	0.6196	402.2621	TE-W21
3U6_B_P60_G350	6032.4	310.329	259.678	82.283	0.5805	0.5822	442.5103	TE-W21
3U6_B_P60_G350_1	6012.5	349.906	260.053	79.319	0.5673	0.5690	487.4272	TE-W11
3U6_B_P60_G400	6007.9	354.976	259.786	80.387	0.5628	0.5645	491.5497	TE-W11
3U6_B_P60_G450_1	6047.5	400.290	259.596	83.528	0.5443	0.5459	538.5425	TE-W11
3U6_B_P60_G50_1	6168.1	50.224	259.734	89.521	1.0301	1.0391	123.0229	TE-W12
3U6_B_P60_G550	6046.1	488.721	260.184	80.534	0.5062	0.5077	613.5498	TE-W11
3U6_B_P60_G650	6045.9	579.631	259.917	81.848	0.4697	0.4712	681.2085	TE-W11
3U6_B_P90_G350_2	9020.0	351.554	288.851	82.074	0.5732	0.5749	440.5955	TE-W21
3U6_B_P90_G50_1	8976.4	49.872	289.524	76.419	1.1812	1.1846	122.3855	TE-W11
3U6_B_P90_G650_1	9064.0	646.900	288.833	84.192	0.4123	0.4136	605.4918	TE-W11
3U6_C_P10_G100	992.7	88.387	146.383	144.355	0.6259	0.6278	178.3276	TE-W11
3U6_C_P10_G150	1002.2	132.900	146.780	144.469	0.5860	0.5878	252.6677	TE-W21
3U6_C_P10_G200	1006.8	177.006	146.707	145.659	0.5695	0.5713	328.2996	TE-W21
3U6_C_P10_G50	997.8	43.727	146.176	146.224	0.7921	0.7945	109.3258	TE-W11
3U6_C_P30_G100	2958.1	88.952	202.363	141.071	0.7529	0.7598	191.9154	TE-W12
3U6_C_P30_G150	2982.0	133.059	202.014	144.732	0.6645	0.6665	255.5803	TE-W11
3U6_C_P30_G200	3022.1	176.441	202.379	146.574	0.6327	0.6347	324.3695	TE-W21
3U6_C_P30_G250	3039.4	221.326	202.469	147.662	0.5919	0.5938	383.7031	TE-W21
3U6_C_P30_G300	3065.4	263.134	202.159	151.291	0.5673	0.5691	440.4364	TE-W21
3U6_C_P30_G350	3029.2	309.654	202.143	148.249	0.5445	0.5462	499.5253	TE-W21
3U6_C_P30_G400	3052.4	354.677	202.247	149.780	0.5290	0.5307	558.3311	TE-W21
3U6_C_P30_G50	3057.3	43.731	202.248	150.196	0.9642	0.9728	118.3751	TE-W12
3U6_C_P5_G100	513.6	88.222	118.124	148.552	0.5753	0.5771	172.1631	TE-W21
3U6_C_P5_G150	500.7	132.407	118.180	144.166	0.5755	0.5773	257.9709	TE-W21
3U6_C_P5_G200	519.3	177.352	117.743	151.975	0.5693	0.5711	343.5580	TE-W21
3U6_C_P5_G50_1	493.7	43.517	117.295	145.633	0.7003	0.7024	101.3685	TE-W11
3U6_C_P60_G100	5915.8	88.604	246.575	139.712	0.8635	0.8713	192.0418	TE-W12
3U6_C_P60_G150	5997.9	132.906	247.060	141.932	0.7521	0.7544	252.6238	TE-W11
3U6_C_P60_G200	6023.6	177.913	246.529	145.906	0.6883	0.6904	313.2561	TE-W21
3U6_C_P60_G250	6020.7	223.851	246.437	146.187	0.6543	0.6563	377.1344	TE-W21
3U6_C_P60_G300	5996.7	267.875	246.665	143.764	0.6163	0.6182	427.7934	TE-W21
3U6_C_P60_G350	5981.3	311.717	246.491	143.746	0.5740	0.5758	468.2977	TE-W21
3U6_C_P60_G350_1	5975.9	348.163	246.501	143.399	0.5613	0.5631	513.0212	TE-W11
3U6_C_P60_G450	6030.2	400.048	246.425	146.771	0.5375	0.5392	568.7716	TE-W11
3U6_C_P60_G50	6044.4	43.778	246.522	147.090	1.0757	1.1474	122.0262	TE-W13
3U6_C_P60_G550	6033.7	488.838	246.760	145.355	0.4970	0.4986	649.4033	TE-W11
3U6_C_P60_G650	6027.6	578.148	246.860	144.537	0.4585	0.4601	717.3899	TE-W11
3U6_C_P60_G650_1	6071.9	647.636	246.580	148.332	0.4355	0.4370	772.3431	TE-W11
3U6_D_P10_G150	988.6	151.465	131.872	205.693	0.5783	0.5802	298.1725	TE-W21
3U6_D_P10_G250	1042.4	250.491	131.909	215.707	0.5179	0.5196	451.3849	TE-W21
3U6_D_P10_G350	1037.6	350.677	131.364	217.140	0.4578	0.4593	572.0517	TE-W21
3U6_D_P10_G450	1042.2	448.232	131.176	218.796	0.4067	0.4081	666.0422	TE-W21
3U6_D_P10_G50	1001.2	50.748	131.581	209.353	0.7214	0.7282	121.7452	TE-W12

3U6_D_P10_G550	1177.5	517.165	129.942	248.005	0.3811	0.3825	746.5331	TE-W21
3U6_D_P10_G550_1	1098.5	549.427	132.663	222.687	0.3667	0.3680	753.7816	TE-W21
3U6_D_P120_G150	12004.3	149.464	289.197	209.828	0.8483	0.8511	262.9201	TE-W21
3U6_D_P120_G250	11962.3	249.926	289.212	208.010	0.6743	0.6766	364.8905	TE-W21
3U6_D_P120_G350	11956.7	347.735	289.078	208.492	0.5379	0.5398	426.3241	TE-W21
3U6_D_P120_G450	11957.5	447.031	289.264	207.534	0.4462	0.4479	476.7895	TE-W11
3U6_D_P120_G50	11993.0	49.984	289.661	206.886	1.2665	1.2705	123.7050	TE-W11
3U6_D_P120_G550	11987.4	547.965	289.420	207.940	0.3679	0.3694	510.3466	TE-W11
3U6_D_P120_G650	12002.1	650.002	289.484	208.207	0.3196	0.3209	551.3366	TE-W11
3U6_D_P150_G150	14989.4	151.039	311.136	209.255	0.8939	0.9030	241.5291	TE-W22
3U6_D_P150_G250	14958.1	249.969	311.286	207.105	0.6665	0.6689	315.2451	TE-W21
3U6_D_P150_G350	15016.9	346.220	311.563	207.887	0.5021	0.5040	353.7219	TE-W31
3U6_D_P150_G450	15050.7	446.437	311.097	211.982	0.3813	0.3830	380.5175	TE-W11
3U6_D_P150_G50	15054.7	52.089	311.678	208.758	1.2462	1.2582	109.4695	TE-W12
3U6_D_P150_G550	15073.0	548.469	311.385	211.215	0.3133	0.3147	412.8683	TE-W11
3U6_D_P150_G650	15020.2	645.994	311.683	207.321	0.2711	0.2724	444.4703	TE-W11
3U6_D_P30_G100	3007.8	88.554	187.757	210.614	0.7588	0.7612	199.7864	TE-W11
3U6_D_P30_G150	3017.4	133.203	187.725	211.587	0.6692	0.6713	269.8465	TE-W21
3U6_D_P30_G200	3012.7	177.257	187.605	211.712	0.6185	0.6205	336.0929	TE-W21
3U6_D_P30_G250	3022.6	221.818	187.788	211.757	0.5914	0.5934	404.9744	TE-W21
3U6_D_P30_G300	3036.1	265.842	188.183	211.171	0.5785	0.5804	476.0092	TE-W21
3U6_D_P30_G350	3020.1	308.928	188.020	210.513	0.5396	0.5414	522.3347	TE-W21
3U6_D_P30_G450	3061.4	446.981	188.179	213.362	0.4885	0.4902	697.7014	TE-W21
3U6_D_P30_G50	3031.3	43.968	187.996	211.586	1.0091	1.0122	127.4617	TE-W11
3U6_D_P30_G550	3058.5	548.974	187.586	215.741	0.4431	0.4446	794.8072	TE-W21
3U6_D_P30_G650_1	3086.9	651.581	186.459	223.157	0.4063	0.4077	887.7330	TE-W21
3U6_D_P5_G150	504.2	150.264	102.480	211.690	0.5609	0.5627	300.5698	TE-W21
3U6_D_P5_G250	545.8	249.893	102.395	225.074	0.5044	0.5061	460.2191	TE-W21
3U6_D_P5_G50	503.2	50.474	102.507	211.253	0.6381	0.6401	112.7252	TE-W11
3U6_D_P60_G100	6009.8	88.127	232.918	209.631	0.8722	0.8805	200.9620	TE-W12
3U6_D_P60_G150	6052.4	132.635	232.760	212.721	0.7596	0.7620	267.3012	TE-W11
3U6_D_P60_G200	6003.5	177.001	232.242	212.444	0.6905	0.6927	329.6770	TE-W21
3U6_D_P60_G250	6035.4	223.451	232.659	212.256	0.6512	0.6534	395.8985	TE-W21
3U6_D_P60_G300	6027.4	268.057	232.892	210.725	0.6141	0.6161	452.0454	TE-W21
3U6_D_P60_G350	6027.9	310.766	232.953	210.467	0.5729	0.5748	495.1057	TE-W21
3U6_D_P60_G450	6047.1	399.373	232.886	211.840	0.5343	0.5361	601.9323	TE-W11
3U6_D_P60_G50	6036.7	44.119	233.079	210.363	1.1220	1.1990	132.1280	TE-W13
3U6_D_P60_G550	6017.5	490.187	232.927	210.014	0.4852	0.4869	684.0201	TE-W11
3U6_D_P60_G650	6041.2	577.915	233.056	210.719	0.4499	0.4515	760.4395	TE-W11
3U6_D_P60_G650_1	6229.9	646.386	233.023	221.244	0.4212	0.4228	813.6719	TE-W11
3U6_D_P90_G150	8992.4	150.125	264.706	205.684	0.7733	0.7809	276.0935	TE-W12
3U6_D_P90_G250	9006.8	249.682	263.382	212.911	0.6596	0.6618	402.7410	TE-W21
3U6_D_P90_G350	9029.8	349.758	263.732	212.220	0.5628	0.5647	496.2907	TE-W11
3U6_D_P90_G450	8996.3	449.798	264.073	209.007	0.4956	0.4974	577.0359	TE-W11
3U6_D_P90_G50	8990.5	50.152	264.039	208.912	1.1825	1.1861	132.6686	TE-W11
3U6_D_P90_G550	9022.4	544.695	263.812	211.487	0.4481	0.4498	648.8701	TE-W11
3U6_D_P90_G650	9083.8	645.490	264.168	212.503	0.4024	0.4039	709.9969	TE-W11
3U6_F_P10_G350_2	1033.3	349.932	100.880	345.504	0.4487	0.4504	626.3069	TE-W21
3U6_F_P10_G50	1016.9	50.122	101.956	337.891	0.7838	0.7864	137.7432	TE-W11
3U6_F_P10_G550	1089.0	547.061	101.292	353.953	0.3291	0.3305	795.0159	TE-W21
3U6_F_P120_G350	11980.7	348.099	263.523	339.759	0.5177	0.5199	479.8862	TE-W21
3U6_F_P120_G50	11983.7	50.454	263.864	338.206	1.2303	1.2344	131.2860	TE-W11
3U6_F_P120_G650	11988.7	646.636	263.961	337.934	0.3007	0.3023	648.1491	TE-W11

3U6_F_P150_G350	15014.5	350.615	287.430	340.221	0.4472	0.4494	397.1635	TE-W21
3U6_F_P150_G50	15033.6	52.682	287.734	339.399	1.2480	1.2523	120.2611	TE-W11
3U6_F_P150_G650	15000.9	646.910	287.604	338.772	0.2491	0.2507	546.9975	TE-W21
3U6_F_P30_G350	3020.2	349.434	158.260	340.717	0.5224	0.5244	640.6680	TE-W21
3U6_F_P30_G50	3015.9	50.223	158.201	340.601	0.9977	1.0075	154.3570	TE-W12
3U6_F_P30_G650	3168.1	645.811	160.526	343.471	0.3904	0.3920	962.6872	TE-W11
3U6_F_P5_G150	509.5	151.172	72.127	340.948	0.5409	0.5428	321.1623	TE-W21
3U6_F_P5_G250	522.4	249.979	72.068	345.287	0.4790	0.4807	485.2909	TE-W21
3U6_F_P5_G50	504.0	50.095	71.580	341.471	0.6725	0.6793	127.1373	TE-W12
3U6_F_P60_G100	5989.8	88.200	204.487	338.733	0.8699	0.8789	217.2603	TE-W12
3U6_F_P60_G150	6026.3	134.459	204.221	341.936	0.7485	0.7511	292.8157	TE-W11
3U6_F_P60_G250	6012.2	223.264	204.479	340.001	0.6491	0.6515	435.7673	TE-W11
3U6_F_P60_G250_1	6006.2	249.597	204.237	340.759	0.6269	0.6292	475.0093	TE-W11
3U6_F_P60_G350	6044.9	311.668	204.539	341.529	0.5564	0.5585	543.3374	TE-W11
3U6_F_P60_G450	6033.7	399.361	204.449	341.318	0.5105	0.5125	655.0285	TE-W11
3U6_F_P60_G50_1	6019.7	44.459	204.195	341.690	1.1229	1.2051	142.1926	TE-W13
3U6_F_P60_G550	6055.8	490.018	204.583	341.931	0.4650	0.4669	753.4547	TE-W11
3U6_F_P60_G650	6057.3	580.519	204.428	342.710	0.4253	0.4271	841.2986	TE-W11
3U6_F_P60_G650_1	6131.4	647.943	204.310	347.304	0.4016	0.4033	906.8992	TE-W11
3U6_F_P90_G150	9010.2	134.394	237.033	339.771	0.8210	0.8297	285.7669	TE-W12
3U6_F_P90_G150_1	9044.0	150.590	236.828	342.253	0.7864	0.7893	308.3431	TE-W11
3U6_F_P90_G250	9001.9	222.596	236.987	339.612	0.6789	0.6814	408.1055	TE-W21
3U6_F_P90_G250_1	9003.7	250.539	237.110	339.117	0.6433	0.6457	441.4799	TE-W21
3U6_F_P90_G350	9023.3	310.688	236.656	342.126	0.5652	0.5674	500.3699	TE-W11
3U6_F_P90_G350_1	9022.9	349.544	237.041	340.306	0.5368	0.5390	542.4452	TE-W11
3U6_F_P90_G450	9017.9	400.664	236.673	341.804	0.4991	0.5012	592.8032	TE-W11
3U6_F_P90_G450_1	9042.1	447.627	237.083	340.973	0.4645	0.4664	630.5508	TE-W11
3U6_F_P90_G50	9002.0	44.456	236.660	341.148	1.1900	1.1939	126.6487	TE-W11
3U6_F_P90_G50_1	9198.3	50.503	237.168	347.578	1.1805	1.1844	142.3651	TE-W11
3U6_F_P90_G550	9047.8	489.848	236.885	342.157	0.4420	0.4439	668.9587	TE-W11
3U6_F_P90_G550_1	9041.0	547.206	237.072	340.975	0.4019	0.4037	703.1607	TE-W11
3U6_F_P90_G650	9051.9	583.409	236.757	342.941	0.3869	0.3887	733.7754	TE-W11
3U6_F_P90_G650_1	9085.2	650.587	237.303	341.880	0.3533	0.3550	773.3872	TE-W11

서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호		위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드	
KAERI/TR-1912/2001					
제목 / 부제		가압경수로 실물길이 3 X 3 핵연료봉다발에 대한 임계열유속 실험 - 축방향 균일 열유속 분포			
연구책임자 및 부서명 (AR,TR 등의 경우 주저자)		문상기 (열수력안전연구팀)			
연구자 및 부서명		문상기, 천세영, 최기용, 박종국, 윤영중, 김복득 (열수력안전연구팀)			
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구소	발행년	2001
페이지	56 p.	도표	있음(√), 없음()	크기	26 cm
참고사항	원전 안전계통 실증실험				
비밀여부	공개(√), 대외비(), _ 급비밀	보고서종류	기술보고서		
연구위탁기관		계약번호			
초록 (15-20줄내외)		<p>저유량 및 광범위한 압력 조건하에서 균일하게 가열되는 수직 3 x 3 봉다발을 이용한 임계열유속(CHF)실험을 수행하였다. 특히 본 연구에서는 저유량 조건에서 비가열 벽면과 계통압력의 영향을 실험적으로 관찰하였다. 실험은 한국원자력연구소의 RCS CHF Loop를 이용하였으며, 가압경수로 실물길이로 제작된 시험대에는 비가열 벽면의 영향을 모사하기 위한 3개의 비가열봉이 위치해 있으며, 비가열봉 및 가열봉의 외경은 9.52 mm, 가열길이는 3670 mm이다. 임계열유속 실험은 계통압력 0.49 ~ 15.07 MPa, 질량유속 44 ~ 652 kg/m²s, 입구과냉도 45 ~ 354 kJ/kg, 출구건도 0.25 ~ 1.27의 조건에서 수행되었으며, 163개의 임계열유속 데이터를 생산하였다. CHF에 대한 질량유속 및 입구과냉도의 영향은 일반적으로 알려져 있는 것과 동일하게 나타났다. CHF는 질량유속과 입구과냉도가 증가함에 따라 증가하였으며, 질량유속과 입구과냉도의 영향은 각각 저압 조건과 높은 질량유속에서 크게 나타났다. 3 MPa 이상의 압력 및 50 또는 150 kg/m²s의 아주 낮은 질량유속에서는 임계건도가 1보다 크게 나타났다. 이는 가열구간에서 발생된 수증기가 시험대 상부 플레넘에서 응축되고, 여기서 생성된 포화수가 주로 비가열봉부를 통하여 가열봉다발의 가열구간에 하향류로 공급되기 때문인 것으로 판단된다. CHF는 압력의 증가에 따라 단조롭게 감소하고, 질량유속이 낮아질수록 CHF에 대한 압력의 영향은 작아졌다. CHF는 압력의 증가에 따라 2 ~ 4 MPa 근방에서 최대치를 나타내는 것으로 알려져 있으나, 본 실험에서는 비가열봉 영역에서 가열봉다발 영역에 지속적인 포화수의 공급이 이루어지고 있어 저압영역에서의 CHF의 최대치는 나타나지 않았다.</p>			
주제명키워드 (10단어내외)		3 x 3봉다발 임계열유속, 저유량, 광범위한 압력조건, 비가열 벽면			

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET							
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.		INIS Subject Code	
KAERI/TR-1912/2001							
Title / Subtitle		Critical Heat Flux Tests for PWR Type Full Length 3 X 3 Fuel Rod Bundle - Uniform Axial Heat Flux Profile					
Project Manager and Department (or Main Author)		Sang-Ki Moon (Thermal Hydraulic Safety Research Team)					
Researcher and Department		Sang-Ki Moon, Se-Young Chun, Ki-Yong Choi, Jong-Kuk Park, Young-Jung Youn, Bok-Deok Kim (Thermal Hydraulic Safety Research Team)					
Publication Place	Taejon	Publisher	KAERI		Publication Date	2001	
Page	56 p.	Ill. & Tab.	Yes(<input checked="" type="checkbox"/>), No (<input type="checkbox"/>)		Size	26 Cm.	
Note							
Classified	Open(<input checked="" type="checkbox"/>), Restricted(<input type="checkbox"/>), ___ Class Document		Report Type		Technical Report		
Sponsoring Org.				Contract No.			
Abstract (15-20 Lines)		<p>An experimental study on critical heat flux (CHF) has been performed for water flow in a uniformly heated vertical 3 by 3 rod bundle under low flow and a wide range of pressure conditions. Especially, this study has an objective to investigate the effects of unheated rods and system pressure under low flow conditions. The experiments have been conducted in the reactor coolant system thermal hydraulic loop facility (RCS loop facility) of KAERI. The test section consists of six heated rods and three unheated rods which have prototypical heated length of 3670 mm, diameter of 9.52 mm, and pitch of 12.6 mm of PWR type nuclear power plants. Total 163 CHF data have been obtained in the system pressure from 0.49 to 15.07 MPa, mass flux from 44 to 652 kg/m²s, inlet subcooling from 45 to 354 kJ/kg, and exit quality from 0.25 to 1.27. The general trends of the CHF are coincident with previous understandings. CHF increases as the mass flux or inlet subcooling increases. The effects of mass flux and inlet subcooling become large at low pressure and high mass flux, respectively. At low flow and system pressure above 3 MPa, some critical qualities are larger than 1 due to counter-current flow in the test section. Since there is a supply of water to the heated section from unheated section, the maximum CHFs at system pressure between 2 and 4 MPa are not shown.</p>					
Subject Keywords (About 10 words)		3 x 3 Rod Bundle CHF, Low Flow, Wide Range of Pressure Effect of Unheated Rods					