

JAERI-M
7459

OG L-1における供用期間中検査
(基本的考え方・炉内管供用前検査結果)

1978年1月

中村 圀夫・大岡 紀一

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

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

OG L-1における供用期間中検査
(基本的考え方・炉内管供用前検査結果)

日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉部
中村 啓夫・大岡 紀一

(1977年12月5日受理)

OG L-1は、日本原子力研究所大洗研究所に設置されている材料試験炉(JMTR)に据えつけられた我国最初の高温・高圧炉内ガスループであり、1977年3月試料部出口平均ガス温度1000℃で100時間の連続運転に成功した。

OG L-1は高温・高圧で運転されるために、機器の設計に際して多くの新しい手法が用いられた。この資料では、(1)高温構造物の設計における供用期間中検査の考え方、(2)同ループで最も使用条件の厳しい部位のひとつである炉内管に関する真直度ならびに真円度測定用検査装置の開発、ならびに(3)同装置を用い1976年12月実施した炉内管供用前検査の結果について報告する。

In-service Inspection of OGL-1

Inspection ideas
and
Results of in-pile tube pre-service inspection

Kunio NAKAMURA and Kiichi OHOKA

Division of JMTR Project, Oarai Research Establishment

(Received December 5, 1977)

OGL-1 is the first high temperature in-pile gas loop in Japan for VHTR fuel development. It was installed to Japan Materials Testing Reactor in October 1976, and the first irradiation test of coated particle dispersion fuel has been successfully performed at average specimen-outlet gas temperature 1832 F.

Since it is operated under at very high coolant temperature and pressure, special structural design methods were applied to the loop components. In-service inspection is extremely important to ensure integrity of the components.

Fundamental ideas of the inspection and results of the pre-service inspection on an in-pile tube, one of the critical design components of the loop because of the severe operating conditions, are described.

Keywords : OGL-1 In-pile loop, In-service Inspection, Pre-service Inspection, Inspection Bases, Development, Operation, High Temperature, Component Integrity

目 次

1. 緒 言	1
2. OGL-1の概要	2
3. 供用期間中検査	9
3.1 基本的考え方	9
3.2 破壊モードと供用期間中検査	9
3.2.1 炉内管仕切管	10
3.2.2 仕切管ベローズ	10
3.2.3 加熱器伝熱管	11
3.3 炉内管供用期間中検査	11
3.3.1 装置の概要	11
3.3.2 供用前検査	13
3.3.3 考 察	14
4. 結 言	27
謝 辞	27
参考文献	28
Appendix 1 炉内管仕切管のクリープ座屈評価コード	29
Appendix 2 炉内管仕切管の真直度に関する供用期間中検査結果評価コード	34

CONTENTS

1.	INTRODUCTION	1
2.	SUMMARY OF OGL-1	2
3.	INSERVICE INSPECTION FOR OGL-1	9
3.1	DESIGN BASES	9
3.2	RELATION BETWEEN FRACTURE MODES AND INSPECTION BASES ..	9
3.2.1	INPILE TUBE	10
3.2.2	HIGH TEMPERATURE BELLOWS	10
3.2.3	HEATING TUBES IN THE ELECTRIC HEATER	11
3.3	INSERVICE INSPECTION FOR INPILE TUBE	11
3.3.1	INSPECTION APPARATUS	11
3.3.2	PRESERVICE INSPECTION	13
3.3.3	DISCUSSION	14
4.	CONCLUSIONS	27
	ACKNOWLEDGEMENTS	27
	REFERENCES	28

APPENDIX

1.	CREEP BUCKLING EVALUATION	29
2.	CALCULATION OF INPILE TUBE BENDING DEFORMATION	34

1. 緒 言

近年、ASMEを中心に軽水炉用原子力機器の圧力バウンダリに対する供用期間中検査の規格化が進められている。⁽¹⁾これは高度な品質管理にもかかわらず、材料中には原子単位の欠陥が存在するものであり、これらの欠陥が何らかの原因で集積してマクロな欠陥を形成するという仮定にもとづいている。ASME Code Sec.Xでは、在来の軽水炉について供用中に成長したこのようなマクロな欠陥を圧力バウンダリが破損する以前に検知し、機器の寿命中に不安定破壊に移行する可能性があるかを破壊力学的手法で評価している。

600°Cの高温で運転される高速炉に対する同様な試みが、FFTFの設計グループによってなされた。⁽²⁾R.A.Moenらは、FFTFの圧力バウンダリに介在する欠陥が不安定破壊を生じる以前に充分検知できる大きさに成長しているかどうかを破壊力学的手法を用いて評価した。

OGL-1の設計に際しては、その運転温度、圧力が在来の原子力機器に比べて高いのでつぎのような設計の基本方針を定めた。すなわち、高温構造物は断熱材を内蔵する構造を採用し、1次系の内圧をうけもつ比較的低温の耐圧部材 (Pressure Boundary) と、高温の冷却材流れを分割する機能部材 (Functional Structure) とに機能を分離分担させる設計とし、前者の信頼性の向上に努める。後者にかかる荷重は自重と冷却材流れによって生じる 2 kg/cm^2 程度の差圧であり、後者は必ず耐圧部材に格納されている。

OGL-1の供用期間中検査は、この設計基本思想にもとづき、耐圧部材に対しては放射線を用いた体積検査を実施し、一方機能部材に対しては疲れ、クリープ座屈などの在来の材料力学的破壊に対する検査を実施する。機能部材に破壊力学を基礎とする供用期間中検査を行わないのは、高温における非線形破壊力学の適用に関して必ずしも実績のある、確立された手法がないことと、材料データが充分蓄積されていないことによる。

この資料では、主にOGL-1機能部材に対する供用期間中検査の基本的考え方について述べる。とくに原子炉内に挿入される部分 (炉内管 - In-pile Tube) の機能部材は、比較的使用経験の浅い雰囲気、すなわち高温の中性子場で使用されるため、供用期間中検査のための特殊な測定器が開発され、1976年12月にはこの測定器を用いて炉内管の使用前の状態を把握するための供用前検査が実施されたので、この結果もあわせて報告する。

2. OGL-1の概要

OGL-1の主な仕様はTable-1に示すとおりである。1次系の主要な高温機器は、炉内のテストセクションへ送り込まれるヘリウムガスを加熱する150 kWの電気加熱器、テストセクションからの復路ガスの熱を利用して往路ガスを予熱しあわせて温度制御を行う2台の再生熱交換器、Fig.1に示すように原子炉圧力容器内に据えつけられテストセクションを包含するリエントランスタイプの炉内管、およびこれらの機器を結ぶ多重管構造の高温配管である。各機器の概要をFig.2~5に示す。OGL-1の1次系は、この他に1次系の熱を除去する冷却器、ヘリウムガスを循環させるガス循環機、フィルターおよびこれらの機器を結ぶ単重管構造の中、低温配管ならびに弁類などから構成される。

OGL-1の1次系の概要ならびに各部の運転温度をFig.6に示す。

Table 1 Specification of OGL-1.

Possible test conditions	
coolant	Helium gas (impurity less than 10 vpm)
pressure	maximum 35 kg/cm ² G
temperature	maximum 1000 °C
flow rate	maximum 100 g/sec
Neutron flux	
thermal	average 6×10^{13} nv (<0.625eV)
fast	average 0.6×10^{13} nv (>1MeV)
Nuclear heat of fuel specimen	maximum 135 Kw
Size of test section	Bore: 80 mm, Height: less than 750 mm

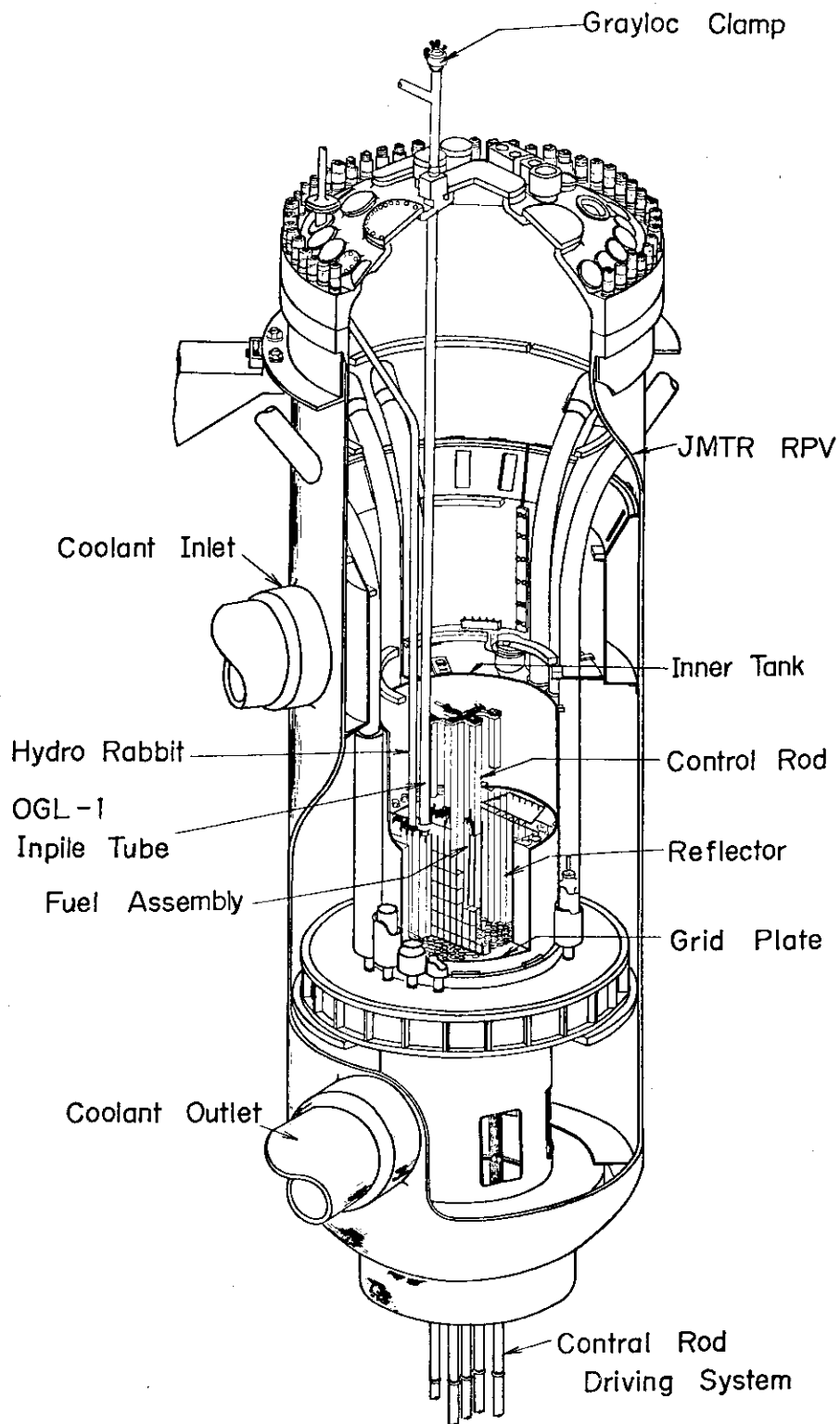


Fig.1 Perspective View of JMTR

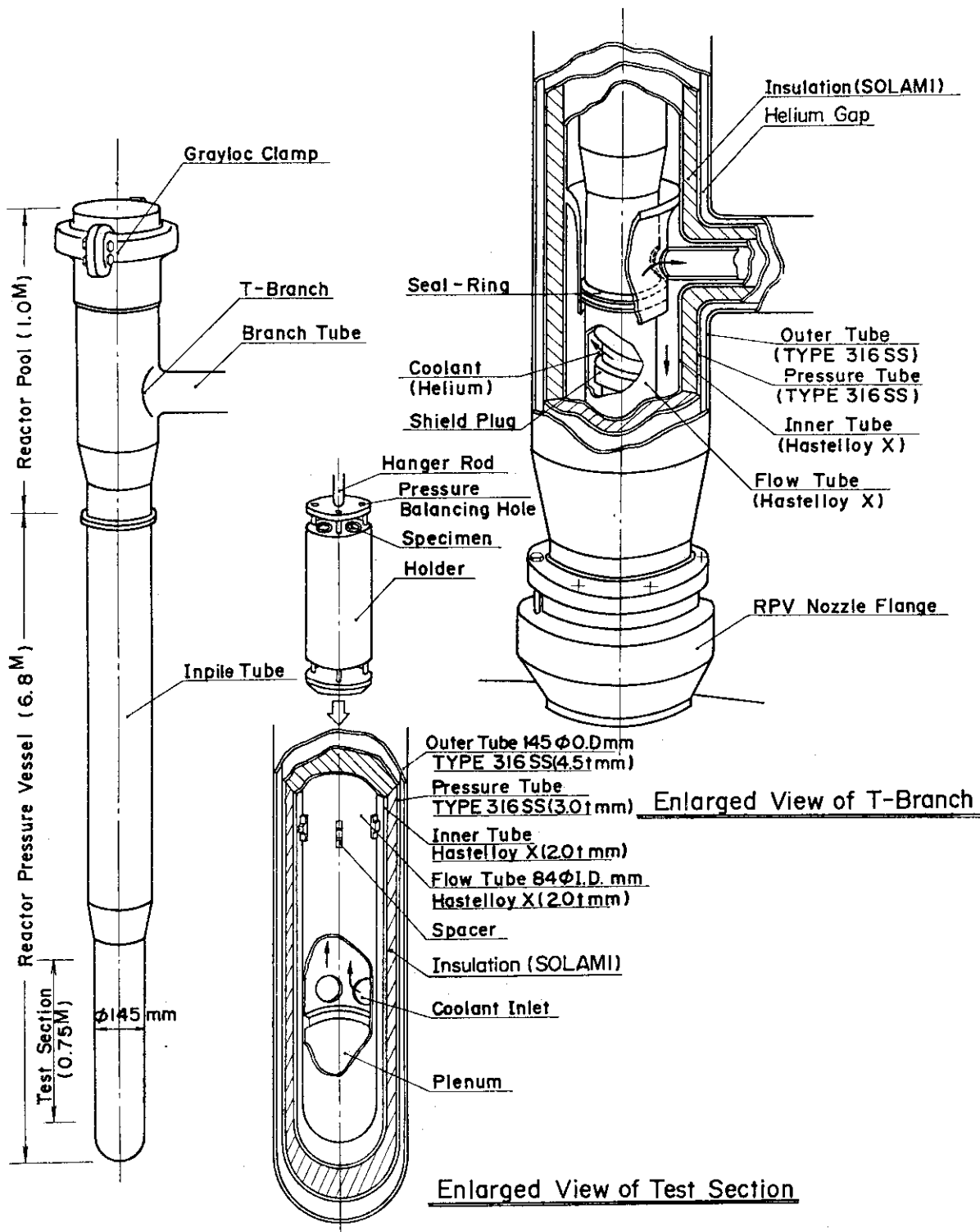


Fig. 2 Perspective View of OGL-1 Inpile Tube

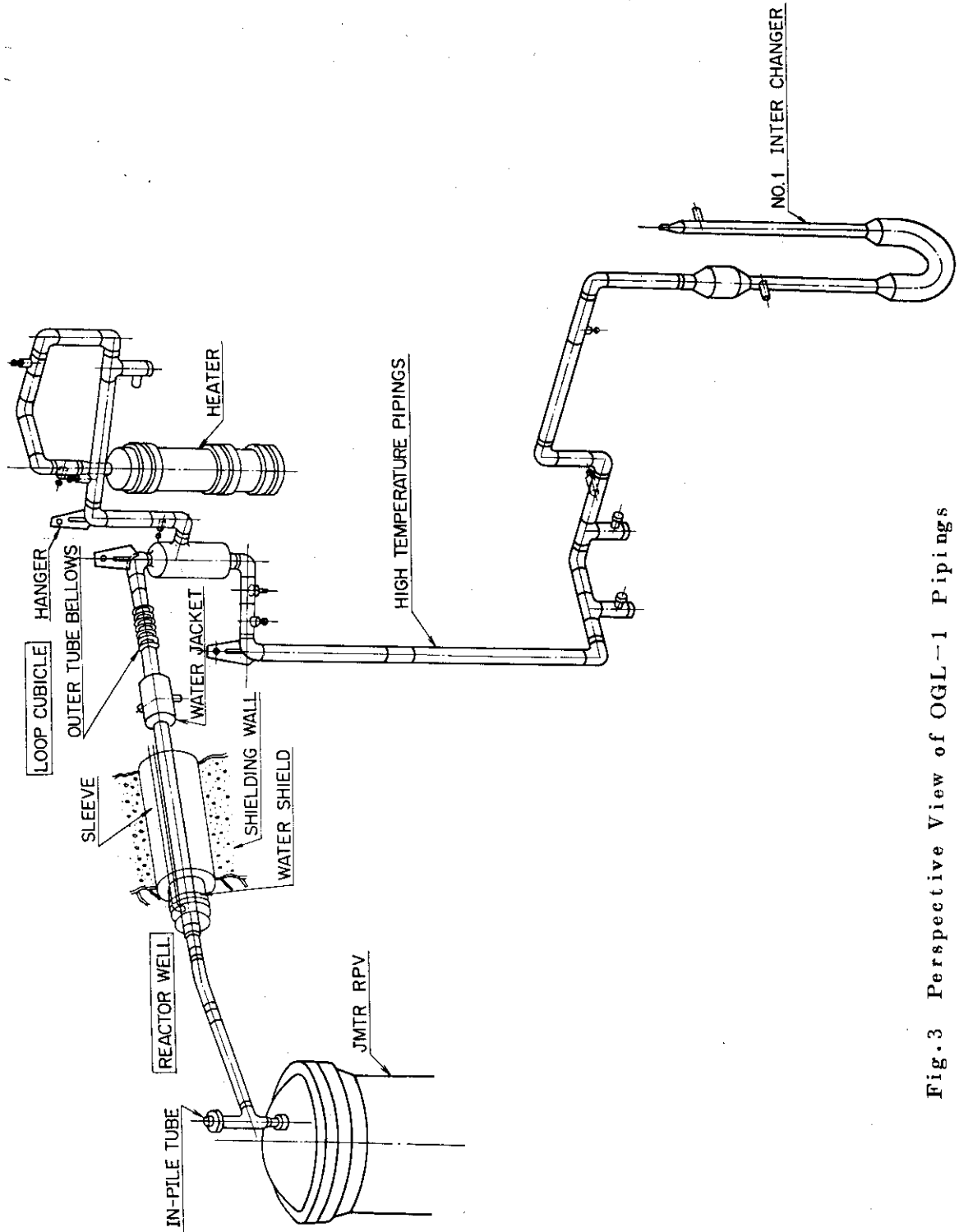


Fig.3 Perspective View of OGL-1 Piping

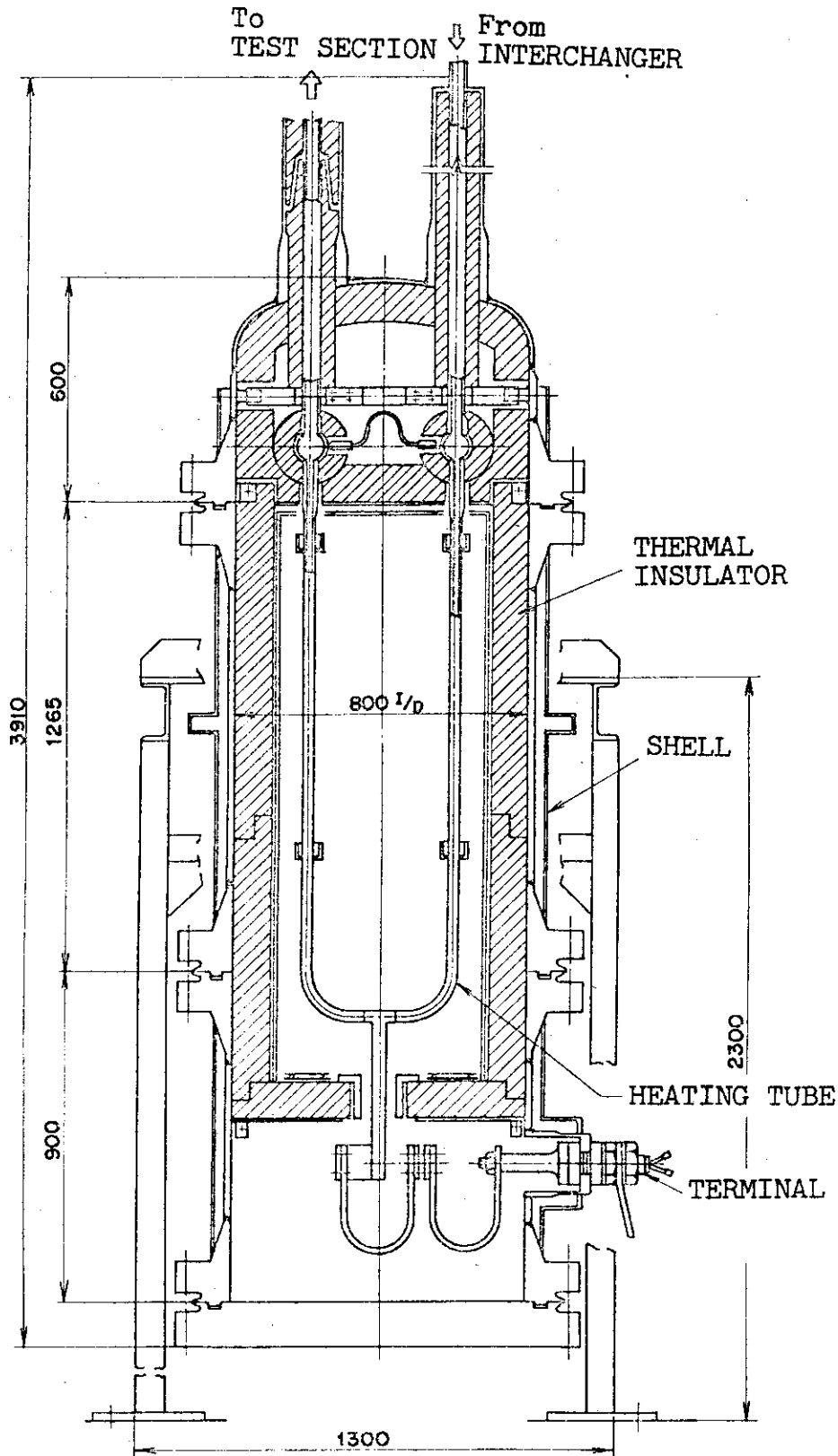


Fig. 4 OGL-1 150KW Electric Heater

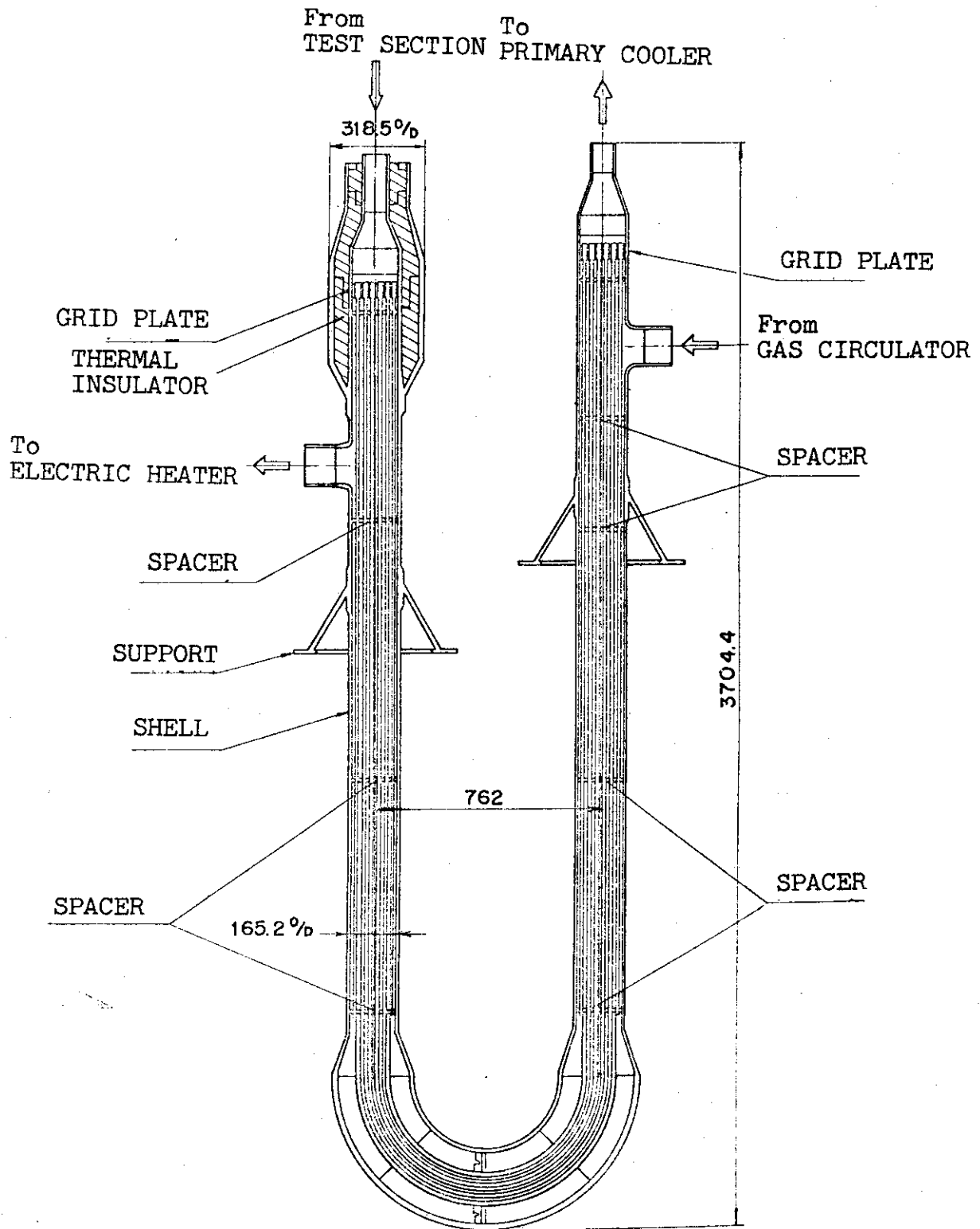


Fig. 5 OGL-1 Interchanger

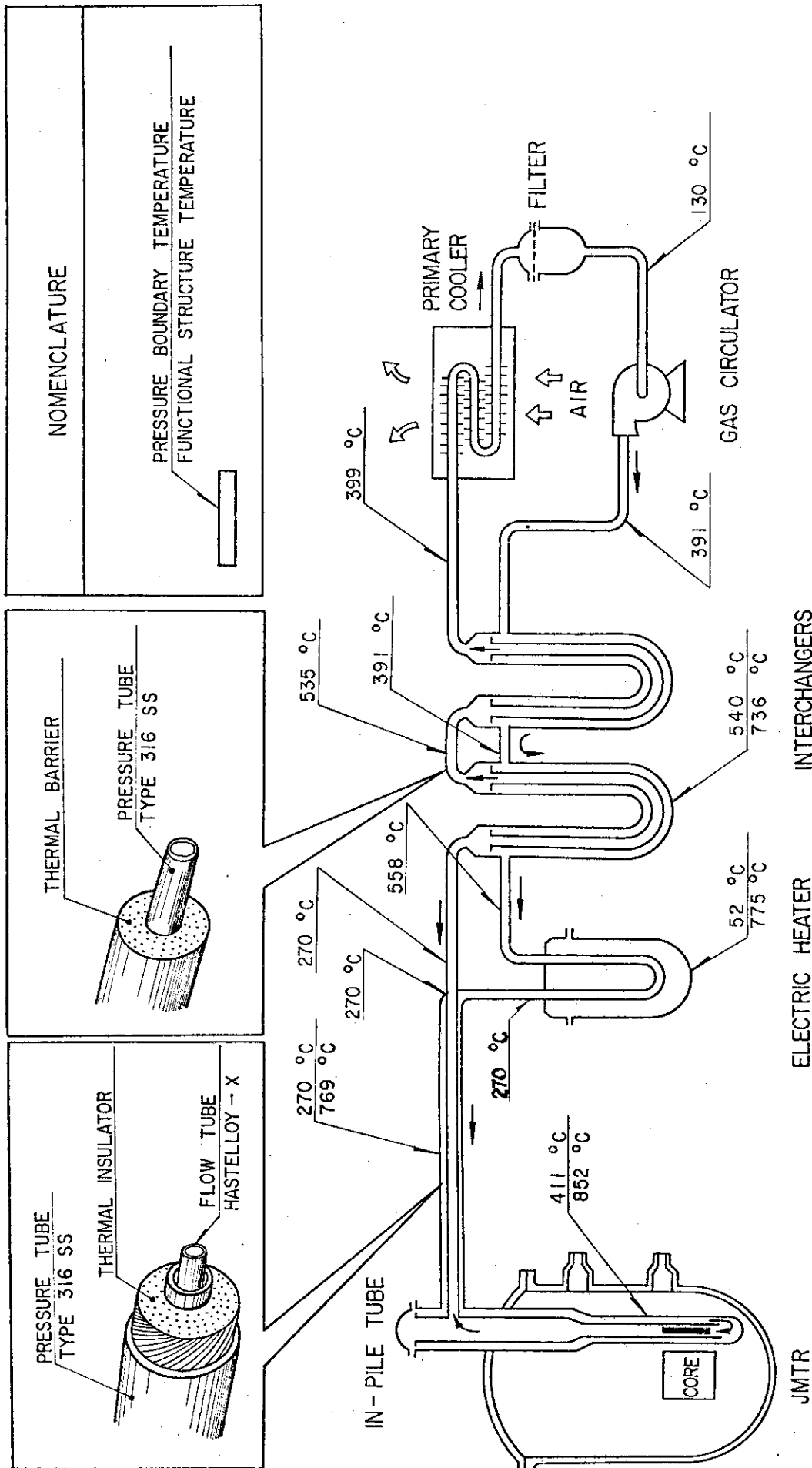


Fig. 6 Flow Diagram and Operating Condition of OGL-1 Primary Cooling System

3. 供用期間中検査

3.1 基本的考え方

緒言でふれたように、OGL-1の構造設計ではその分担する機能に応じて構造材を「耐圧部材」と「機能部材」に区分した。前者はOGL-1の1次系の圧力を支持する耐圧バウンダリを構成する部材であり、後者は1次系のヘリウムガスの流れを分離したり、対流を防止したりする部材であり、その外側には必ず耐圧部材を有する構造とした。

両者を分離して設計で評価するのは主につぎの理由による。

- (1) 機能部材として使用する材料は1000℃に近い1次系のヘリウムガスに直接接するため、ニッケルベースの耐熱合金鋼「ハステロイ-X」が選ばれた。しかし、このような高温でしかも特殊な雰囲気におけるハステロイ-Xの材料データは、構造解析をフォローできるほど充分蓄積されていない。
- (2) 運転時機能部材にかかる荷重は、構造上の配慮を払うことにより自重および約2 kg/cm²の差圧に限ることができた。差圧は、1次系ガス流により試料部などに生じる圧力損失に起因するものである。したがって機能部材にかかる荷重は、耐圧部材に比べて単純である。
- (3) 機能部材は、耐圧部材の場合と異りその破損が直接公衆の災害に結びつかない。したがって機能部材の破損を検知する適当な計装を設けることにより未然に災害を防止できる。

供用期間中検査に対する基本的考え方も、構造設計に準じ耐圧部材および機能部材に各々分離して定められた。

耐圧部材に対する検査は、将来適当な破壊力学的アプローチが可能のように放射線源を用いた体積検査ならびに液体浸透探傷試験とした。その目的は欠陥の位置および大きさを検知することにある。耐圧部材でとくに使用条件が厳しくなると予想される中、低温配管(Fig.6 参照)に重点をおいて検査を行なう。このため予め管外壁の保温材はとり外すことが可能な構造とした。

機能部材に対する検査は、十分な精度を有するに至らない材料データを用いたことにより予測が難しい高温での材料挙動に対する設計の不足を補うために、それぞれの部位に支配的な破壊モードと結びつくパラメータの変化量を測定することとした。耐圧部材の場合と異り、検査の結果に対する破壊力学的アプローチは考えていない。検査の結果は、設計に用いられたような材料力学的手法で評価する。検査の対象は、炉内管仕切管、仕切管ベローズおよび加熱器伝熱管である。いずれも外側に耐圧部材があるため、それぞれ特殊な測定器が開発された。

3.2 破壊モードと供用期間中検査

機能部材に生じる破壊モードの特徴は、高温下であるため顕著な変形をとまなりことである。このような変形は機能部材の機能喪失をまねくばかりではなく、その不安定破壊にも結びつく。

この節では、OGL-1のシステムの中で「使用条件の厳しさ」という観点から選ばれた供用期間中検査の対象部位について、考慮される破壊モードと対応する検査の方法について述べる。

3.2.1 炉内管仕切管

炉内管はFig.2に示すような垂直四重管である。冷却材のヘリウムガスは一番内側の流路仕切管(Flow Tube)の外側を下降し、底部よりその内側に流入し照射試料の熱を得て昇温され上昇するリエントランス型ループである。炉内管は既存のPWR型の原子炉(JMTR)に挿入されるため、万一の圧力バウンダリの損傷が直接原子炉の1次系に影響を及ぼさないよう圧力管の外側をさらに外套管(Outer tube)で包む構造とした。また約50℃の原子炉1次冷却水の中で1000℃の高温を実現するために、高性能の断熱材を内蔵している。

仕切管に接するガス温度は約1000℃で、さらに原子炉およびOGL-1試料からの中性子照射をうける。このような環境ではOGL-1の他の部位に比べて使用寿命が短くなることも予想され、さらに照射試料が仕切管と融着する可能性も否定できないので、仕切管は交換可能な構造とした。

炉内管仕切管の破壊モードは曲りによる照射試料交換の機能障害ならびに外圧によるクリープ座屈である。

(1) 照射試料交換の機能障害

OGL-1の照射試料は、原子炉の停止期間に炉内管頂部のグレイロックフランジを解放して取出し、あるいは装荷される。したがって仕切管の曲りならびに内径の変形は照射試料の交換作業に支障をきたす恐れがある。

(2) クリープ座屈

炉内管は前述のようにリエントランス型なので、仕切管は照射試料部における冷却材ヘリウムガスの圧損による内外差圧約 2 kg/cm^2 の外圧をうける。外圧をうける薄肉円筒のクリープ座屈は、偏平度が重要なパラメータである⁽³⁾。このため仕切管は設計に際して内径について(長径-短径)= 0.1 mm を仮定してクリープ座屈の評価を行った。この結果寿命で10倍以上の安全率が見込まれることが判ったため、製作ではこの値 0.1 mm を許容製作誤差と定め、OGL-1の供用期間中にその変形を逐次監視することとした。クリープ座屈解析に用いた計算コードを巻末のAppendix Iに示す⁽⁴⁾。

また内径変形の推定に関する解析結果をFig.7に示す。

3.2.2 仕切管ベローズ

炉内管と炉外機器を結ぶ高温配管は、炉内管同様多重管構造を採用した。しかしこれらの配管は炉建屋と隔離されたループキュービクル(気密室)内に設けられるため、炉内管の場合と異なり外套管はない。

多重管構造の場合、内外の管相互の温度差による熱膨張の違いを吸収する必要がある。とくに最も内側の仕切管は、内外を径路および復路の冷却材ヘリウムガスが流れるため高い気密性が要求される。すなわち少量のヘリウムガスのリークを許すスライドジョイント型の継手(Fig.8参照)の使用は適さない。このためFig.9に示すベローズジョイントが用いられた。

ベローズの破壊モードはくり返し変位による疲れである。とくに高温下で変位を拘束し疲れ

にクリープが重畳する場合は、疲れ寿命は短縮されることはよく知られている⁽⁵⁾。一般にペローズが使用する材料の塑性域で用いられる場合は、いわゆる低サイクル疲れが問題となる。OGL-1では、ペローズの応力解析に必ずしも適当な手法が見当らなかつたことから、実機を用いた高温疲れ試験を行いこの結果に2/3を乗じて(安全率1.5)設計寿命と定めた⁽⁶⁾。試験の結果をFig.10に示す。しかし、熱疲れ、あるいは300時間をこえるような変位拘束をうける疲れに対する評価はまだ確立されたものがない。またこのペローズの寿命がOGL-1炉外機器の機能部材の寿命にとってクリティカルとなるため、体積検査によりペローズの変形を監視することとした。これは、ペローズ実機による高温疲れ試験の結果から、損傷をうけた部分にペローズの変形が集中することが判つたためである。

3.2.3 加熱器伝熱管

OGL-1は燃料試料の核発熱による熱だけで目標の試料出口平均ガス温度1000℃を得ることは不可能である。このため、炉内管へ送り込まれるヘリウムガスは予め150kWの電気加熱器で昇温する必要がある。

加熱器は炉外大型ガスループ(HTGL)で用いられた実績から直接加熱型が採用され、伝熱管には他の機能部材同様ハステロイ-Xが選ばれた。伝熱管は三次元の変形を防止するために、累旋式を用いずUチューブ式とした。伝熱管はFig.11に示すようにノズルならびにサポートを介して断熱材を内蔵する圧力容器内に収められている。

伝熱管の破壊モードは熱膨張のくり返しによる疲れ、または進行性の大変形である。後者は重大な機能障害を生むおそれがある。このため加熱器底部フランジにノズルを設け、Fig.11に示す特殊なボアスコープを用いて伝熱管を直接肉眼で観察することとした。

3.3 炉内管供用期間中検査

前述の三箇所の機能部材に対する供用期間中検査の内、炉内管の供用期間中検査について、新たに開発した検査装置の概要⁽⁷⁾ならびに供用前検査の結果⁽⁸⁾を述べる。

3.3.1 装置の概要

炉内管供用期間中検査装置は、頂部に検出器の駆動装置を有する全長約10m、外径約200mmφの全ステンレス鋼製の測定器本体と、リレーボックスを介して測定器の制御および検出器からの信号の表示・記録などを行なう制御装置よりなり、両者は多軸の信号ケーブルで連結されている。装置の概要をFig.12に示す。

(1) 測定器本体

測定器本体は、上部より駆動装置、γ線遮蔽体、駆動ロッド、曲り検出器、連結棒および内径検出器から構成されている。

駆動装置は電動機を用いてワイヤーにより検出器と死荷重をつるべ式に上下させるものである。測定器は炉内管部からの放射線のストリーミングを防止するためにセッティングに特殊な装置(OGL-1試料交換機)を用いる。このため寸法上の制限が厳しく、限られたスペース内に駆動装置を収めるために無駄な間隙はすべて省かれた。しかし検出器からの信号をとり出すケーブルは検出器と一体で伸縮する必要があり、また巻取りの曲率に制限があるためケーブ

ルの芯をエポキシで固めるなどの特殊な加工が行なわれ、さらにその耐久性が試験され良好な成績をおさめた。

γ 線遮蔽体は測定器が炉内管にセッティングされた後、炉内管部からの放射線のストリーミングを防止するもので、鉄40 cm相当の遮蔽能力を有する。

駆動ロッドは検出器を上下させるガイドの役目をするものである。

曲り検出器は、外径86 mm ϕ 、全長344 mmの円筒で、内部にX-Y2方向の鉛直軸に対する傾きを各々検出する差動トランス型水準器を有する。炉内管内に挿入されるため、寸法上の厳しい制約のある中で所定の検出精度を得るよう設計ではとくに注意が払われた。曲り検出器は120度毎に三方向上下250 mm間隔に設けられた6個の滑車により仕切管にセッティングされる。滑車は4個が半径方向に固定、2個が可動で仕切管の壁面にフィットする構造となっている。曲り検出器の主な仕様をつぎに示す。

測定精度 : 12.5秒以内

最大スパン : ± 600 秒

ゲージ間隔 : 250 mm

測定方式 : 検出器のゲージ間隔による区間測定方式

連結棒は曲り検出器と内径検出器を連結するもので、連結部にはいずれもユニバーサルジョイントを用いている。両検出器はこの連結棒により常時一定(約2 m)の間隔に保たれる。

内径検出器は測定器の下端にとりつけられた外径74 mm ϕ 、全長465 mmの内筒である。内部に電動機を有し、検出器の下半分は測定器の軸を回転軸として190度回転し仕切管の内径を測定する。検出器を炉内管へセッティングする方法は曲り検出器の場合と同一である。測定は検出器の回転部180度方向に各々設けられた2本の触針の半径方向変位を差動トランスで検出するものである。先端に回転するルビーボールを有する触針は、通常検出器内に収められていて測定時自動的に押し出されて仕切管に接触する。このため装置の設計に先立って、ルビーボールの耐摩耗性ならびに被測定物(ハステロイ-X)との融着の有無が試験され良好な成績をおさめた。内径検出器の主な仕様をつぎに示す。

測定精度 : 20 μ m以内

最大スパン : ± 3 mm

回転角度 : 190度

触針 : 測定力20 grで3 mm ϕ のルビーボールを回転させる。

測定方式 : 直径測定直接接触方式

組み立てられた測定器本体は、放射能で汚染される可能性が高いため測定後除染が可能なように表面を平滑にし、水密性の高い構造とした。

(2) 制御装置

制御装置は検出器の制御盤、検出器からの出力および検出器位置を示す指示計ならびにこれらの信号を記録するレコーダーから構成されている。

制御盤には検出器の操作ボタンならびに警報設備が組込まれている。検出器は自動あるいは手動で運転される。自動運転の場合は、内径は炉中心-150 mmから上方へ2 m、曲りは炉中心+1181から上方へ2 m、各々250 mm間隔で9点自動的に測定を行なう。手動運転の場合

は上記 2 m の範囲で任意の測定位置が選択できる。警報は検出器が被測定物にひっかかり破損することを防止するために、無負荷または過負荷の場合発せられシーケンスインターロックにより検出器の走行は自動的に停止する。

指示計は、検出器の位置をポテンシオメーターで検知して指示するデジタル位置指示計、X 軸および Y 軸方向の曲りを指示する線形出力計ならびに内径を指示する線形出力計の 4 点である。

指示計の出力は同時にレコーダに記録される。レコーダの指示は測定精度を上げるため対数的に拡大することが可能である。

3.3.2 供用前検査

供用期間中検査にとって供用前検査は重要な意味をもっている。すなわち供用前検査は計器の零点較正に相当するものであり、装置の使用前の状態を把握しその後装置に生じる変化量（例えば変形量、クラック寸法など）を知るためには不可欠の検査である。

(1) 試験の経緯

炉内管の供用前検査は、OGL-1 のコールドラン（核出力なしの試運転）が終った 1976 年 12 月 8 日、OGL-1 照射試料の炉内挿入に先立って行なわれた。実際の測定に要した時間は約 2 時間であったが、先に述べたように測定器を炉内管内にセッティングするための作業に約 1.5 日を費やし、延べ 2 日の日程であった。

二種類の検出器は測定器の組立前に各々較正され、組立後 JMTR のモックアップを用いて駆動試験を行ない OGL-1 試料交換機を用いて炉内管内へ挿入された。検査の様子を Fig. 13 および 14 に示す。

検査後測定機は汚染検査を受け解体され保管された。データは直ちに解析され、整理された。この結果はつぎの節で詳しく述べる。

供用期間中検査は、この後原子炉（JMTR）が保守点検のため長期停止する夏期に 1 回 / 年の割合で実施される。その第 1 回は 1977 年 8 月が予定されている。

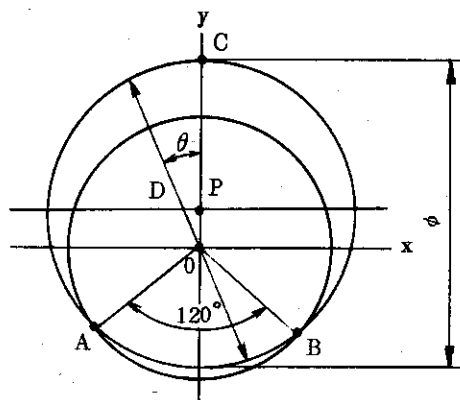
(2) 検出器の較正

検出器は検査前に各々単体で較正された後組立てられる。較正には各々仕切管の一部を模擬した特殊な治具が用いられる。

内径検出器の較正に用いられるのは内径を検定済の三種類の円筒である。これらの円筒は各々内径 $82.5 \pm 0.1 \text{ mm}\phi$ 、 $84.0 \pm 0.1 \text{ mm}\phi$ および $85.5 \pm 0.1 \text{ mm}\phi$ に製作されている。前述のとおり検出器を仕切管にフィッティングさせる滑車は 120 度毎三方向に配置されその内一方向のみ可動であるため、標準の仕切管内径（ $84.0 \text{ mm}\phi$ ）を外れるとたとえそれが直円であっても Fig. 15 に示すような図形を描く。これは仕切管の中心と検出器の中心が偏ることによるものである。

すなわち次の図において検出器の回転中心を O、被測定物の中心を P、 $OA = OB$ を固定滑車、OC を可動滑車とし、内径 ABC の直径を ϕ 、y 軸より θ 回転した位置の測定値を D とすれば、つぎの関係が成立する。

$$D = 2 \sqrt{\left(\frac{\phi}{2}\right)^2 - \left\{ \left(\sqrt{\left(\frac{\phi}{2}\right)^2 - 1323 - 21} \right) \sin \theta \right\}^2}$$



ただし $82 \leq \phi \leq 86$, $0 \leq \theta \leq 190^\circ$

この式で ϕ と θ を変数として求めた D が Fig.15 である。したがって仕切管の真円からの変形量は、Fig.15 の図形からの偏差によって求められる。ここで仮想真円の直径は指示開始点のオフセット量から求めることができる。

曲り検出器の較正に用いられるのは円筒を有する定盤である。検出器はこの円筒の中に据えつけられ、まず定盤を水平に保ち零点を較正した後定盤を約 600 秒傾けて測定スパンを較正する。

較正作業中の検出器を Fig.16 に示す。

(3) 検査の結果

供用前検査結果を Table 2, Fig.17 および 18 に示す。検出器および装置各部はいずれも正常に作動し、必要なデータを得ることができた。結果をまとめてつぎに示す。

i) 内径測定の結果、真円度は Table 2 に示すとおり +100 mm を除きいずれも当初製作で要求された値 ± 0.1 mm を満足していることが判った。また各測定位置での偏平の方向にはとくに規則性はみられなかった。これを Fig.17 に示す。ここで測定された真円からの偏りは、180 度方向に均等に分布しているものと仮定した。これは内径検出器は常に直径の変化だけを指示するためである。

ii) 真直度測定の結果、測定範囲 (約 2 m) における累積曲りは北西方向に約 8 mm であり、その傾きは各測定位置 (250 mm 毎) でほぼ等しいことが判った。これを Fig.18 に示す。結果は Appendix II に示す簡単なプログラムを用いて整理した。

3.3.3 考察

炉内管供用前検査の結果からつぎのことが判った。

- i) 炉内管仕切管の内径は据付後も製作時の真円度を保っており、その変型モードは 1 次 (長円) である。したがって仕切管がその寿命中外圧によるクリープ座屈を生じることはない。しかし、今後も変形の進行を監視する必要がある。
- ii) 炉内管仕切管の真直度は良好であるが、その軸が鉛直軸に対して約 $8/2000$ (mm/mm) 傾いている。これが仕切管単独の変形か炉内管全体の変形かは明らかではない。しかし現在、この変形が OGL-1 の試料交換に際してとくに機能障害を及ぼしてはいない。むしろ炉内管内での仕切管の偏心により、冷却材流れの不均一が OGL-1 の運転に障害とならないか早急に検討する必要がある。

iii) 前項で述べた仕切管の傾きの原因は明らかではない。もし外力が働くとすれば技管等によるモーメントであり、原子炉炉心部 (Fig.1 参照) がこれを抱束することにより傾きを生じるものと考えられる。

しかしこの傾きは仕切管が製作公差の範囲で炉内管内で一方に片寄った場合生じる偏り (仮想軸より約 6.5 mm) でも生じ得るし、実際 Fig.19 に示すように OGL-1 を模擬した炉外大型ガスループ (HTGL) における実験でも同程度の変形を生じた。重要なことはこの変形が進行性のものかどうかである。なぜなら炉内管自体は高い剛性を有しているが、仕切管は可撓性が高くまた高温にさらされるので、その変形は前述の外圧によるクリープ座屈を助長するからである。また、もし炉内管全体が変形をしているのであれば変形は進行せず非常に大きな外力が働いている可能性があるからである。

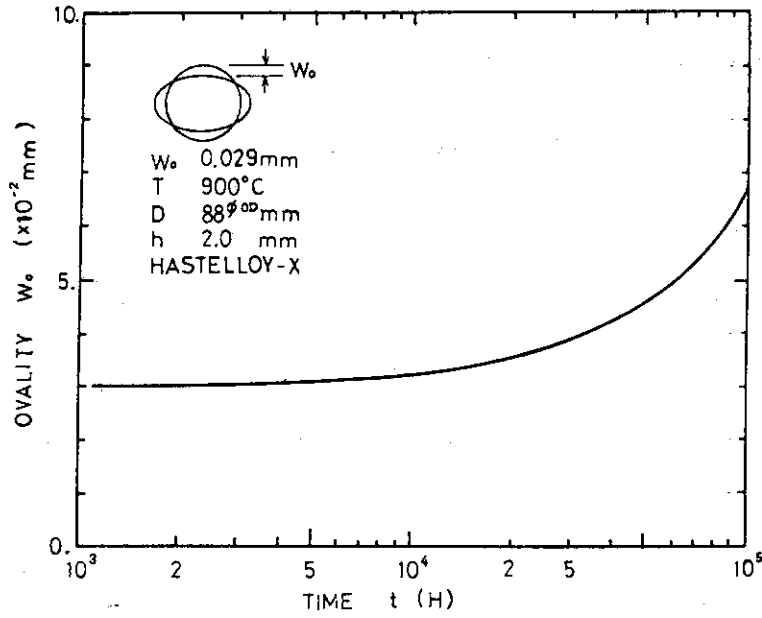


Fig. 7 Increment in Ovality of OGL-1 In-pile Tube with Time

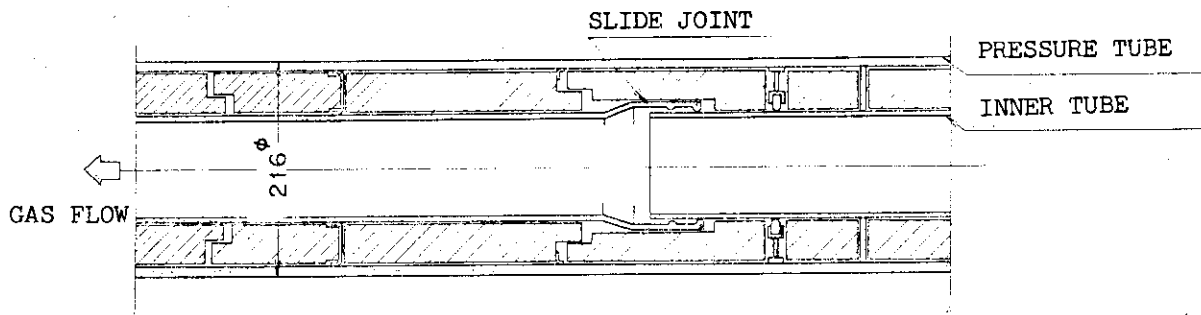


Fig. 8 Slide Joint of OGL-1 High-temperature Pipings

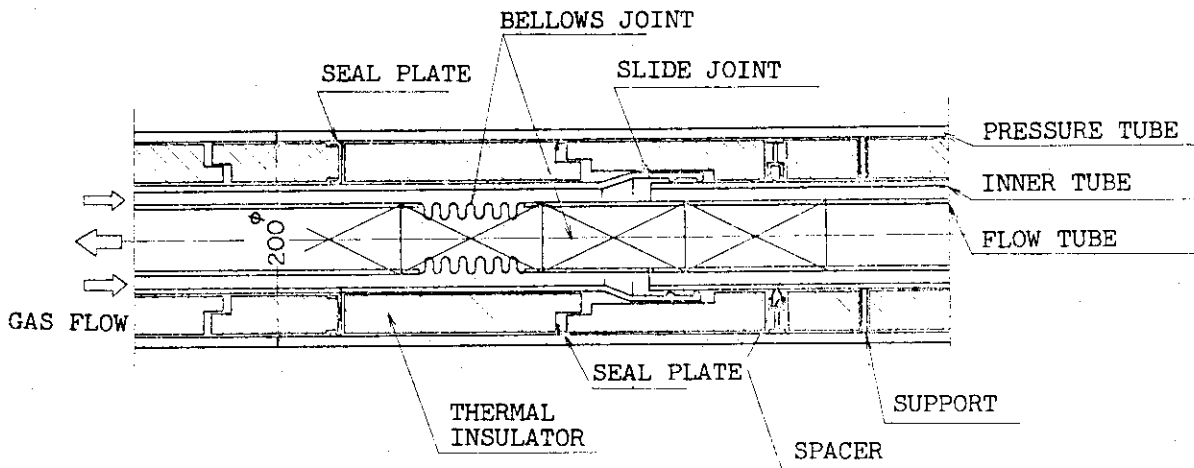


Fig. 9 Bellows Joint of OGL-1 High-temperature Pipings

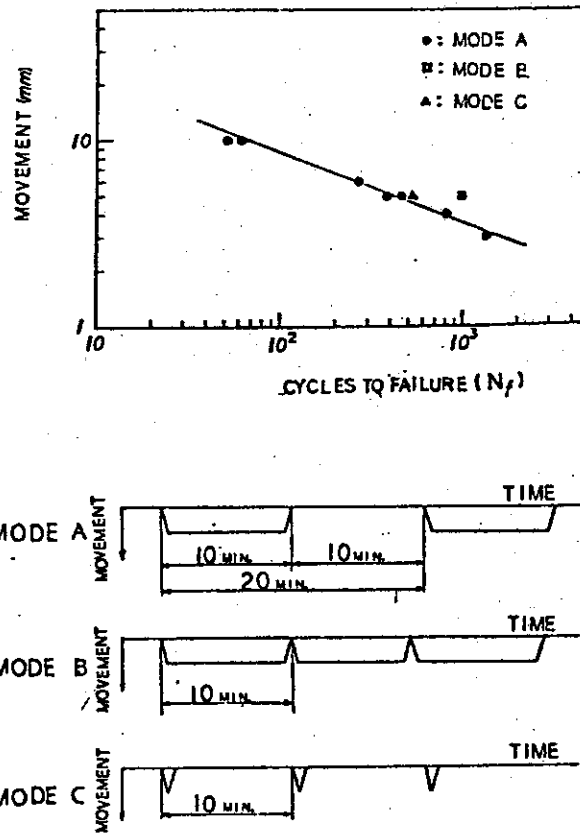


Fig. 10 Fatigue Life Curve for Constant Amplitude Cycling with Hold Time of OGL-1 Flow Tube Bellows⁽⁶⁾

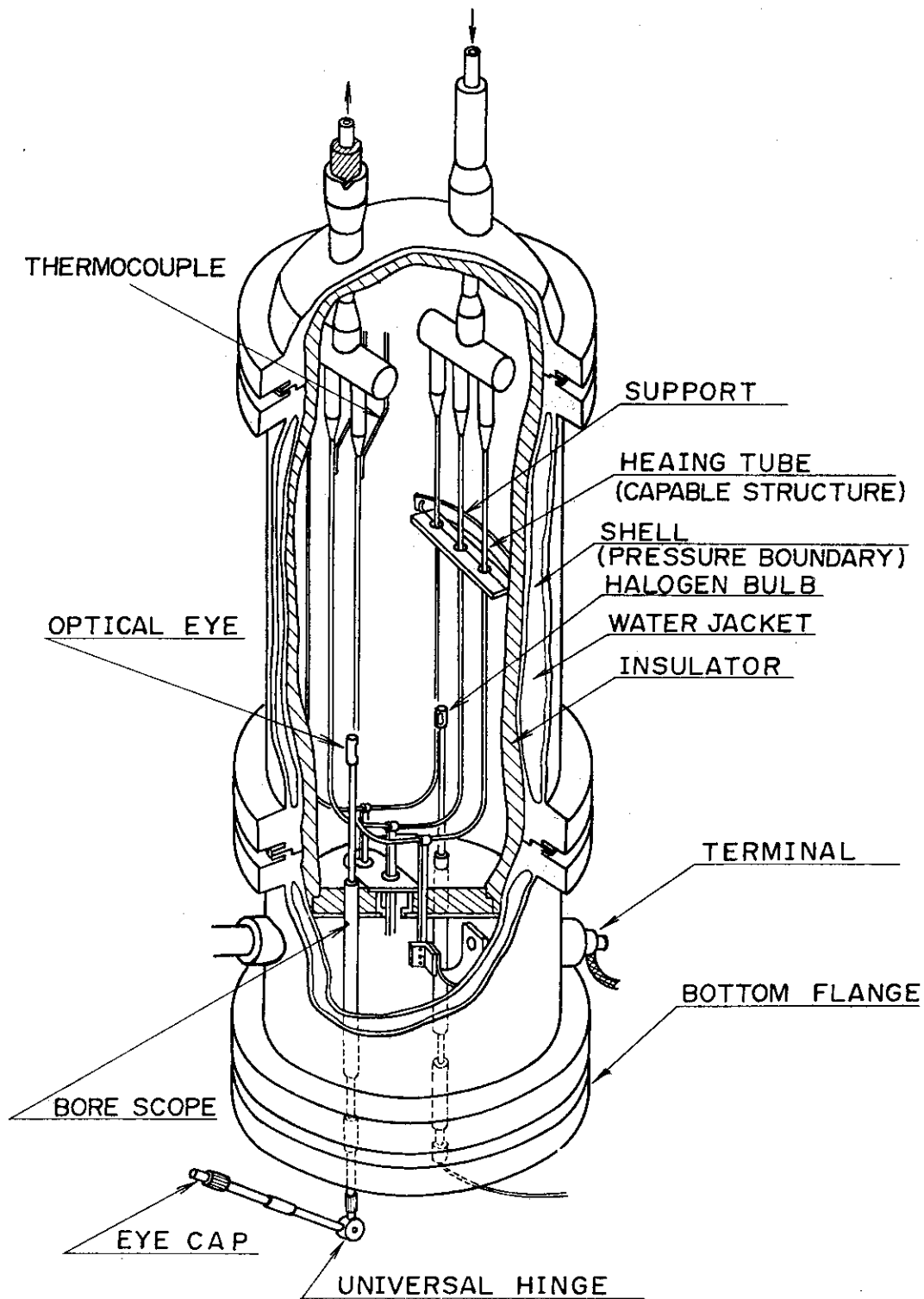


Fig. 11 Perspective View of OGL-1 150 kW Electric Heater and Bore Scope for In-service Inspection

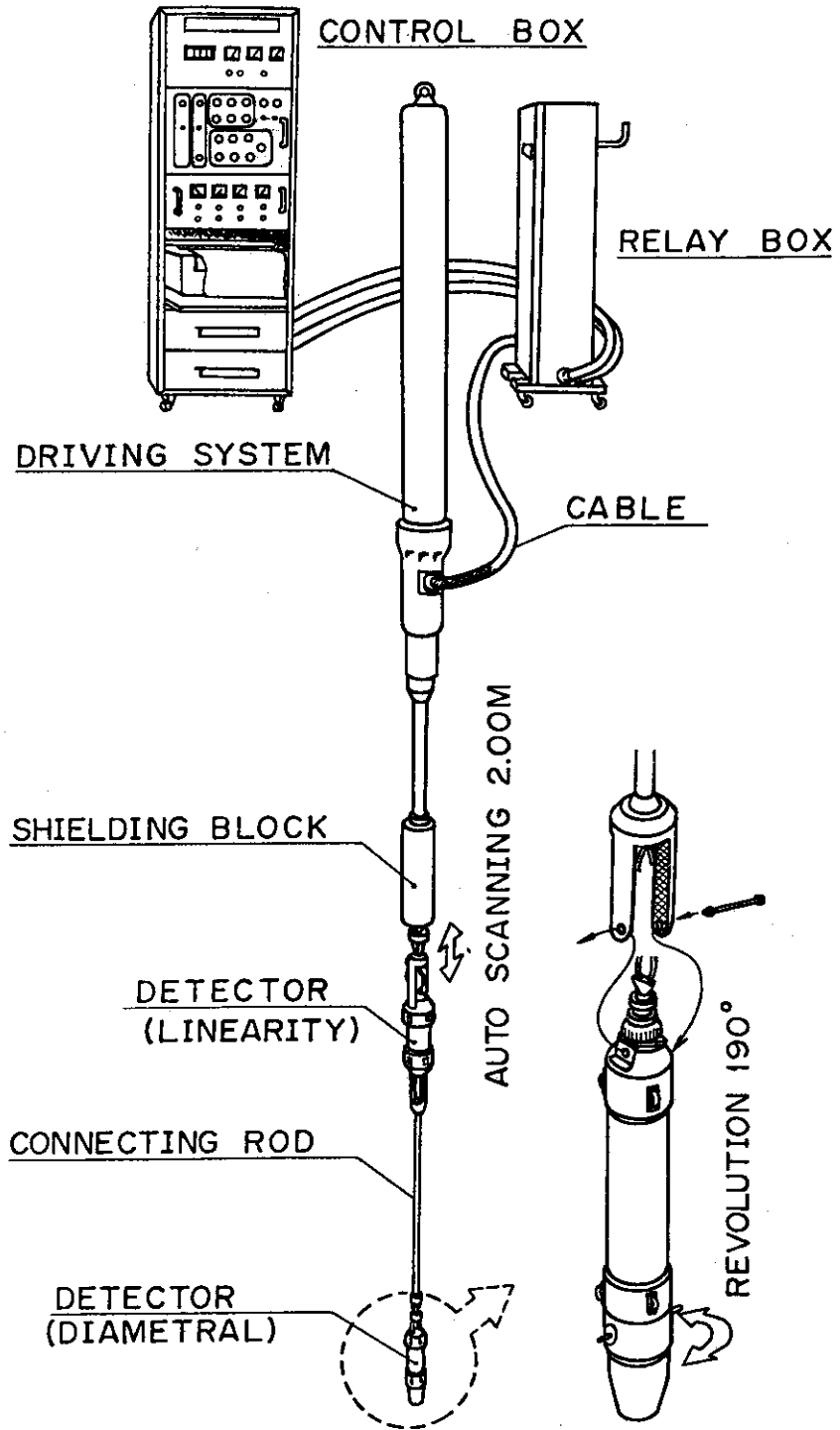


Fig. 12 Perspective View of In-service Inspection Apparatus for OGL-1 In-pile Tube.

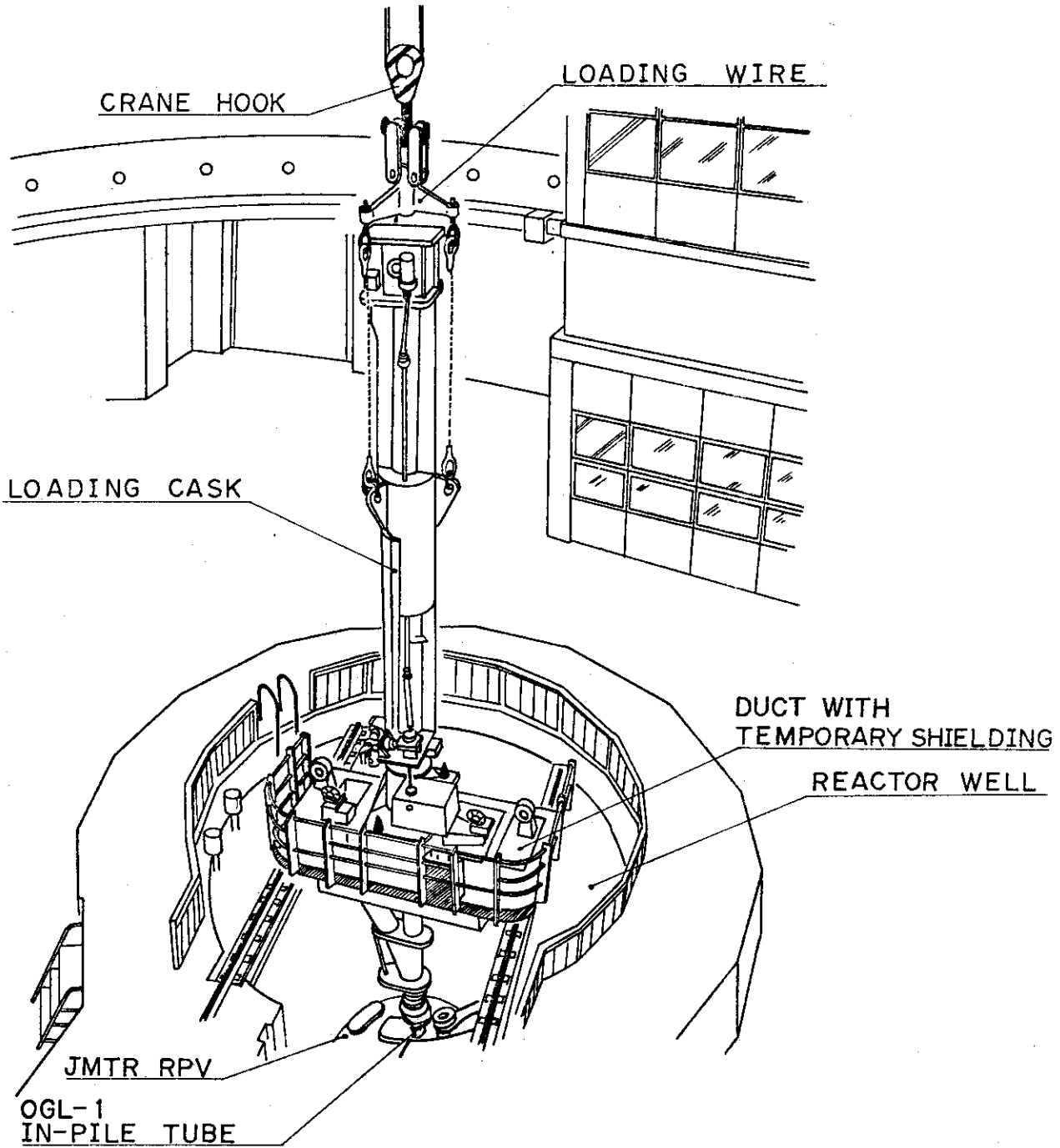


Fig. 13 Perspective View of OGL-1 Specimen Transfer System (I. S. I. & Specimen Exchange)

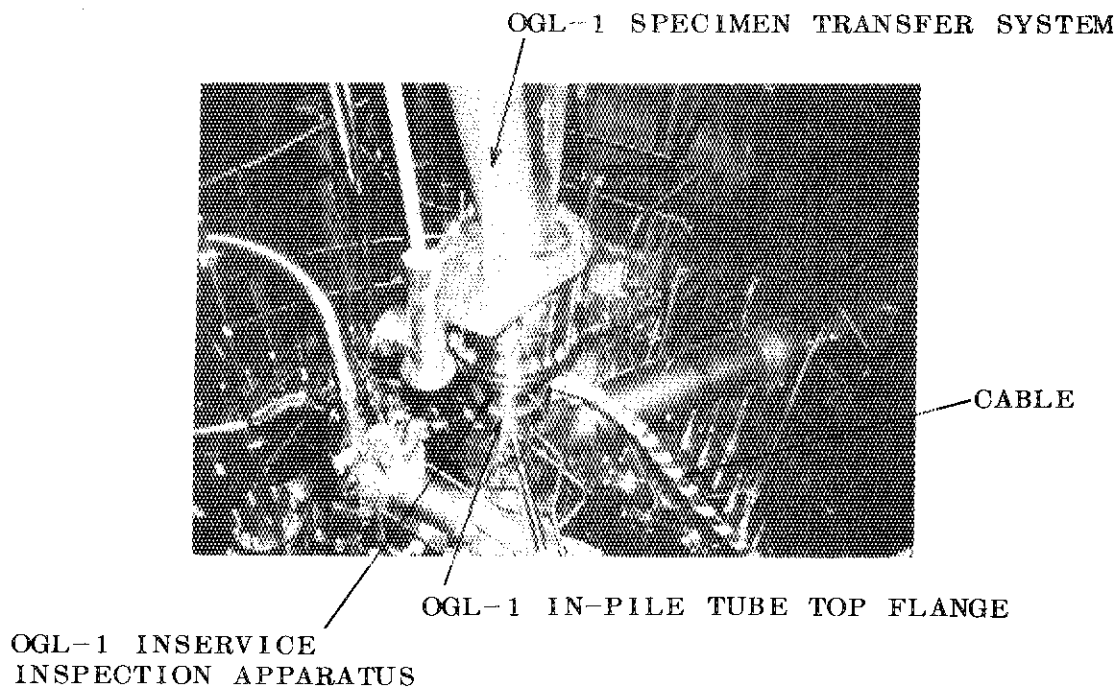


Fig. 14 OGI-1 Inservice Inspection Apparatus set in the In-pile Tube

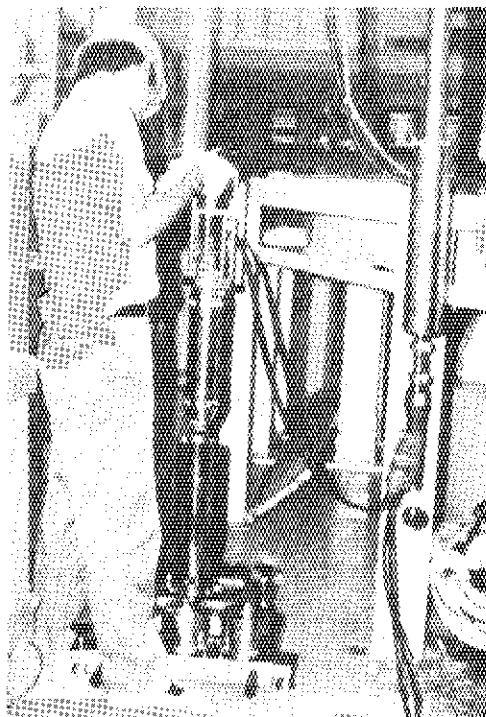


Fig. 16 Calibration of OGI-1 Inservice Inspection Apparatus

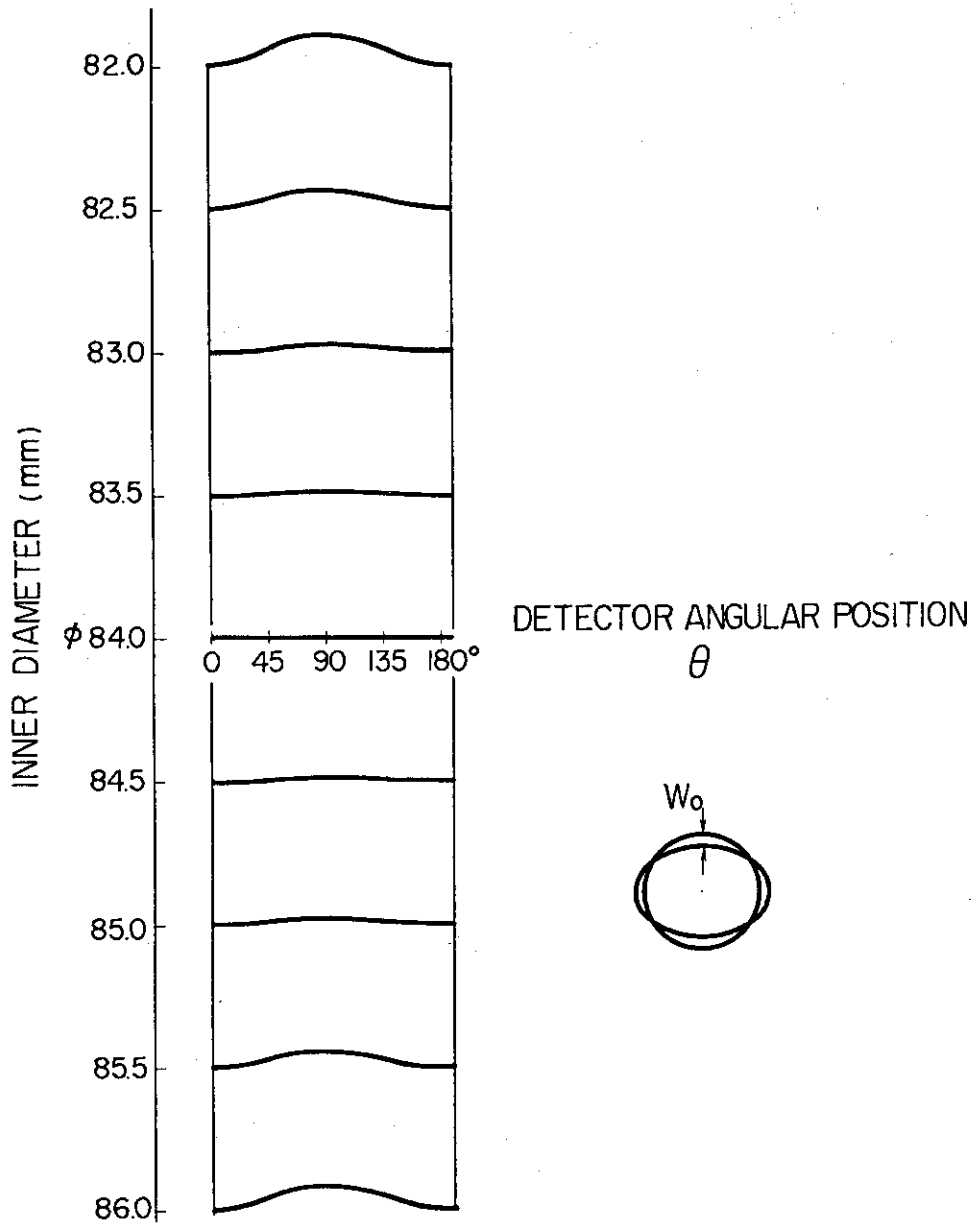
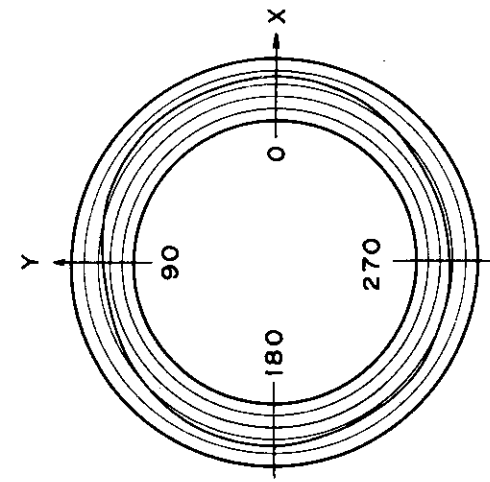
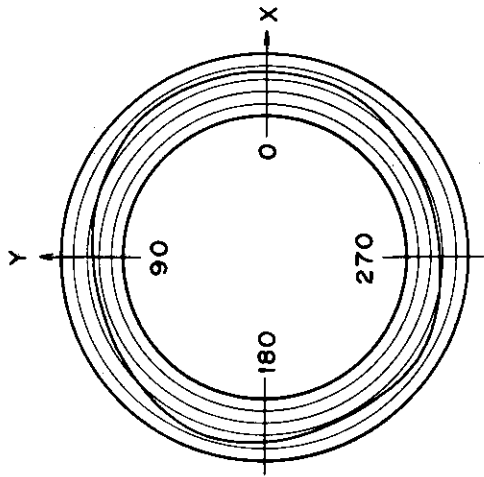


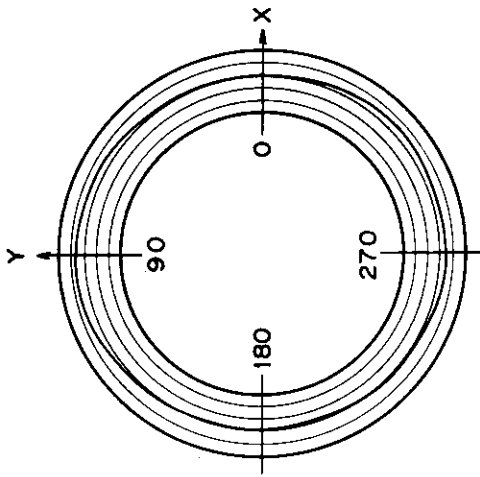
Fig.15 Theoretical Figure as a Function of the Diametral Variables (Tube Ovality Index $W_0 = 0$)



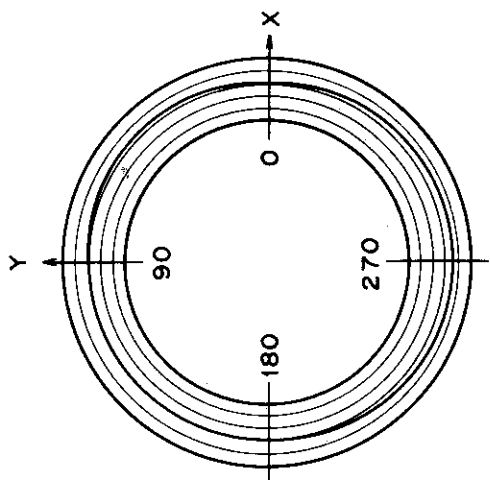
ELEVATION 350mm



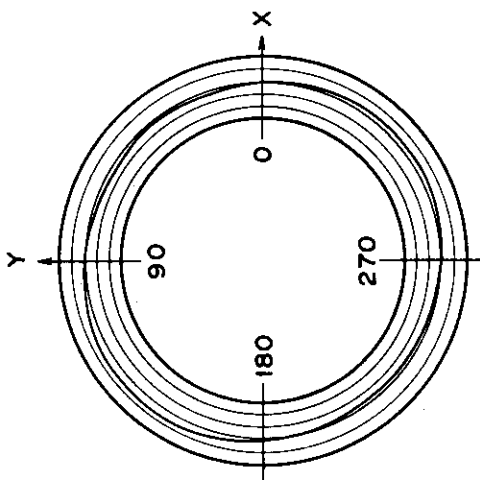
ELEVATION 100mm



ELEVATION 850mm



ELEVATION 150mm



ELEVATION 600mm

SCALE OF DEFECT : x 50
MEASURE : 0.05 mm / DIV.

Note that symmetric defects are assumed.

Fig. 17(1) Results of OGL-1 In-pile Tube Diametral Defect Measurement (Top View)

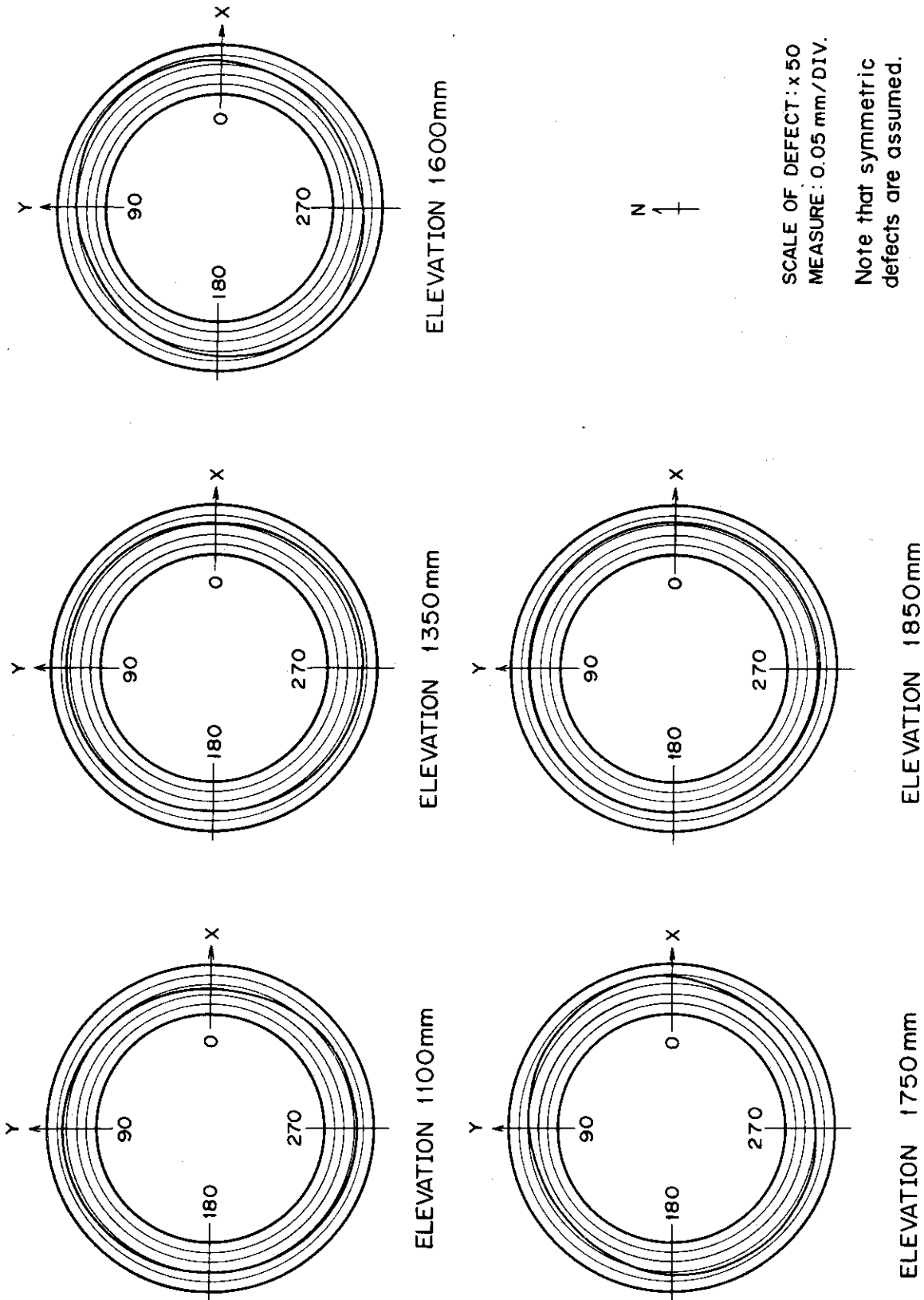


Fig. 17(2) Results of OGL-1 In-pile Tube Diametral Defect Measurement (Top View)

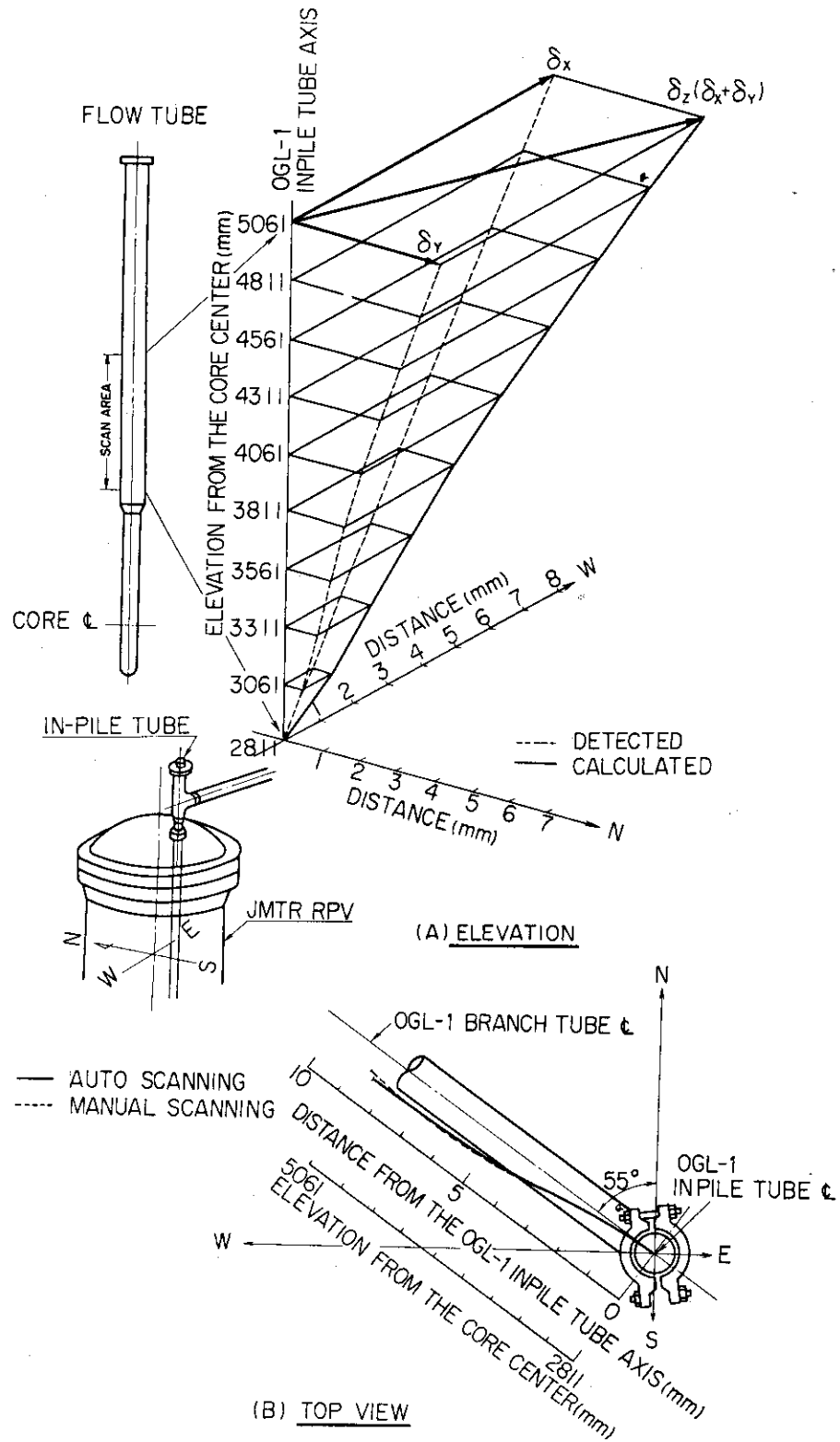


Fig.18 Results of the OGL-1 Inpile Tube Pre-service Inspection
(Straightness of the Flow Tube)

Table 2 Results of the OGL-1 Inpile Tube Pre-service Inspection (Flow Tube Ovality)

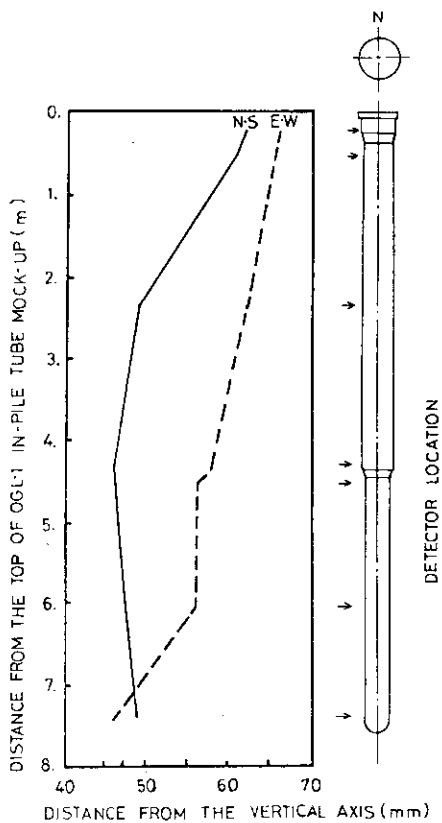
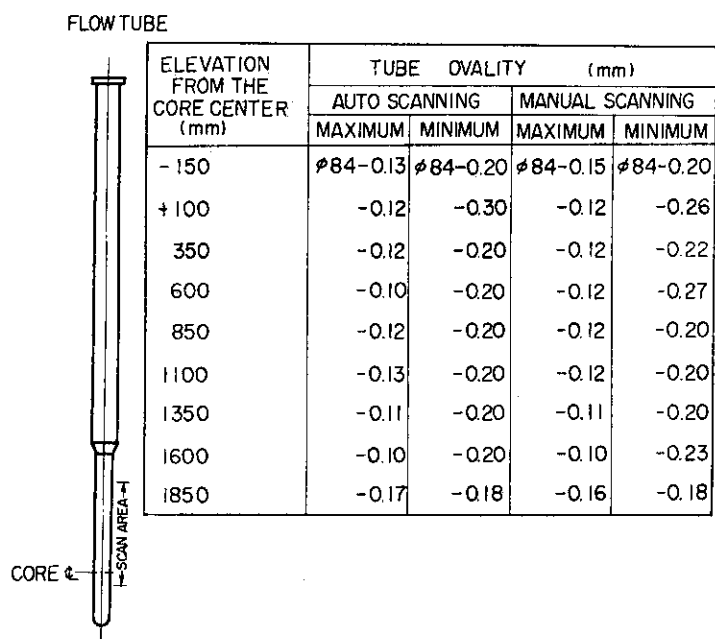


Fig. 19 Straightness of the Flow Tube of OGL-1 In-pile Tube Mock-up after 550Hrs Operation in High Temperature Out-pile Gas Loop

4. 結 言

OGL-1は比較的経験の浅い高温の原子力機器という特殊性から、きわめて開発的要素が強い。したがって構造設計にあたっては十分な安全余裕を見込むことで、必ずしも十分でないデータをもとに設計を行うことが少くない。しかし幸なことに、高温では構造物が損傷をうける前に大きな変形を生じることが多い。また、この変形を監視することで正確な機器の寿命を推定することが可能である。OGL-1の供用期間中検査の必要性は正にこうした点にある。そして得られたデータは、原研が開発をすすめる「多目的高温ガス炉」の供用期間中検査ならびに設計にも有意義なものとなる⁽⁹⁾し、高温機器の合理的な安全余裕を定めるための有力な手がかりになるであろう。

この資料が今後の高温機器設計ならびに供用期間中検査の一助となれば幸である。

謝 辞

本報告書の作成にあたり、適切な助言ならびに御指導をいただきました日本原子力研究所材料試験炉部高田稔部長、大内信平部長、松永朔郎課長ならびに伊丹宏治課長に深く感謝の意を表します。

また、OGL-1炉内管供用期間中検査装置の開発ならびに測定に関し、協力いただいた株式会社小坂研究所川端文雄、大橋公男の両氏に深く感謝の意を表します。

4. 結 言

OGL-1は比較的経験の浅い高温の原子力機器という特殊性から、きわめて開発的要素が強い。したがって構造設計にあたっては十分な安全余裕を見込むことで、必ずしも十分でないデータをもとに設計を行うことが少くない。しかし幸なことに、高温では構造物が損傷をうける前に大きな変形を生じることが多い。また、この変形を監視することで正確な機器の寿命を推定することが可能である。OGL-1の供用期間中検査の必要性は正にこうした点にある。そして得られたデータは、原研が開発をすすめる「多目的高温ガス炉」の供用期間中検査ならびに設計にも有意義なものとなろうし、⁽⁹⁾高温機器の合理的な安全余裕を定めるための有力な手がかりになるであろう。

この資料が今後の高温機器設計ならびに供用期間中検査の一助となれば幸である。

謝 辞

本報告書の作成にあたり、適切な助言ならびに御指導をいただきました日本原子力研究所材料試験炉部高田稔部長、大内信平部長、松永朔郎課長ならびに伊丹宏治課長に深く感謝の意を表します。

また、OGL-1炉内管供用期間中検査装置の開発ならびに測定に関し、協力いただいた株式会社小坂研究所川端文雄、大橋公男の両氏に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. XI, Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components (July 1, 1974)
- (2) M.T.Jakub and R.A.moen, Translating Elevated Temperature material Properties into Rules for Structural Design, 1st SM:RT, (Sept.1971), L 3 / 6
- (3) I.Berman, J.M.Chern and G.D.Gupta, A Parametric Study of Elastic-Plastic-Creep Buckling of a Thin Cylindrical Shell, Trans. ASME, Vol.96, Series J, No.3 (Aug.1974)
- (4) D.R.Buttemer and A.Gelman, Instantaneous and Time-Dependent Collapse of Externally Pressurized Circular Tubes with Initial Out-of-Roundness, GAMM-8219 (Nov.6, 1970)
- (5) 例えば R.D.Campbell, Creep/Fatigue Interaction Correlation for 304 Stainless Steel Subjected to Strain-controlled Cycling with Hold time at Peah Strain, Trans.ASME, Vol.93, Series B, No.4 (Nov.1971)
- (6) K.Kobatake et.al., Elevated Temperature Fatigue Tests and Inelastic Stress Analysis of Bellows, Trans. ASME, Vol.97, Series 5, No.3 (Aug.1975)
- (7) 中村, 大岡, OGL-1 炉内管供用期間中検査装置の開発, 日本原子力学会年会予稿集 (1977)
- (8) 大岡, 中村, OGL-1 照射性能試験 (その 8) 炉内管供用前検査, 日本原子力学会分科会予稿集 (1977)
- (9) 大岡, 江崎, 村岡, 古平, 多目的高温ガス実験炉の供用期間中検査の考え方, 日本非破壊検査協会分科会予稿集 (1976)

Appendix 1. 炉内管仕切管のクリープ座屈評価コード

炉内管仕切管の外圧によるクリープ座屈の解析に用いた計算コードのリフトならびに入出力例を以下に示す。本コードは米国GA社で開発されたものである⁽⁴⁾。

```

      DIMENSION DZ(7),STRS(7),TAU(7),CO(7),DET(7),DEX(7),F(7),AMI(7),
      1TITLE(50)
      DATA FACT/14./
      DATA TPR/90./
      REAL NU
C
10 READ(5,211)(TITLE(I),I=1,20)
20 READ(5,220) R,H,@Q,U,V,@C,DT,TIME,ACC,Y,E,NU,MATL
   WRITE (6,240)(TITLE(I),I=1,20),R,H,@Q,U,V,@C,Y,E,NU,DT,TIME,ACC
   RO=R
   R=R-0.5*H
C
C   COMPUTE PROGRAM CONSTANTS
C
      IF (TPR.GT.0.) AA=3.9/TPR
      B=-86.5E-06*ACC**2+.122*ACC+89.625
      PM=-14.5E-06*ACC**2+.0322*ACC-8.175
      CKH=EXP(-B/2.)
      TMAX=TIME
      NN=0
      DTS=DT
60 CONTINUE
      DT=DTS
      NN=NN+1
      IF (NN.GT.20) GO TO 20
      WO=0.0000625*FLOAT(NN)
      MC=0
      PP=PM-1.
      PPH=PP/2.
      ENU=E/(1-NU*NU)
      RH=R**2/(3.*H)
C
C   COMPUTE INSTANTANIOUS COLLAPSE PRESURE
C
      SIY=-Y
      BET1=1.+6.*WO/H
      GAM1=SIY*H/(R*@C)
      PS111=(BET1-GAM1-SQRT((GAM1-BET1)**2+4.*GAM1))/2.
      PS11=PS111*@C
      W7=1000.*WO
      FORWO=4.*W7
      WRITE(6,340)
      WRITE (6,320) ACC,@Q,@C,W7,FORWO
      WRITE (6,330) H,R
      WRITE (6,260) PS11
      IF (PS11.LE.@Q) GO TO 190
C
C   COMPUTE STRESSES
C
      TIME=0.
      @=@Q
      WKEY=-1.
      WRITE (6,300)
70 CONTINUE
      IF (TIME.EQ.0.) GO TO 350
      WRITE (6,250) TIME,@,STRS,STRSA,W0
350 CONTINUE
      WKEY=WKEY+1.
      WTIME=TMAX/100.*WKEY

```

```

80 CONTINUE
  Q=@O-U*TIME-V*TIME**2
  QRR=Q*R/H
  PSI=Q/QC
  D=1./(H*(1.-PSI))
  DZ(1)=6.*D
  DZ(2)=4*D
  DZ(3)=2.*D
  DZ(4)=0.
  DZ(5)=-DZ(3)
  DZ(6)=-DZ(2)
  DZ(7)=-DZ(1)
  SPSI=6./(H*(1.-PSI))
  SX=-Q*R/(2.*H)
  SXSQ=SX*SX
  DO 90 I=1,7
90 STRS(I)=-QRR*(1.+WO*DZ(I))
  S1=STRS(1)
  S2=STRS(7)
  STRSA=(STRS(1)+STRS(7)+3*(STRS(2)+STRS(3)+STRS(5)+STRS(6))+2*STRS(
14))*1./16.
  IF (TIME.EQ.0.) WRITE (6,250) TIME,Q,STRS,STRSA,WO
  IF (TIME.GE.TMAX) GO TO 210
  PRIM=1.+FACT*EXP(-AA*TIME)
  IF (TPR.LE.0.) PRIM=1.
  DT=DTS
  DO 100 I=1,7
100 TAU(I)=SQRT(STRS(I)**2+SXSQ-SX*STRS(I))
  TAU1=TAU(1)
  TAU2=TAU(7)
  IF (TAU1.GE.Y.OR.TAU2.GE.Y) GO TO 200
  DO 110 I=1,7
110 CO(I)=(CKH*TAU(I)**PPH)**2*PRIM
130 CONTINUE
  DO 140 I=1,7
  DET(I)=CO(I)*(STRS(I)-SX/2.)*DT
140 DEX(I)=CO(I)*(SX-STRS(I)/2.)*DT
  DET1=DET(1)
  DET2=DET(7)
  DW=-PH*(DET1-DET2)
  IF (DT.LE..01) GO TO 150
  IF (MC.GE.100) GO TO 150
  IF (DW.LE..05*WO) GO TO 150
  DT=(.05*WO/DW)*DT
  WTIME=TIME
  MC=MC+1
  GO TO 130
150 CONTINUE
  NC=0
  WO=WO+DW
  DO 160 I=1,7
160 F(I)=DET(I)+NU*DEX(I)
  FF=F(1)+2*F(2)+F(3)-F(5)-2*F(6)-F(7)
  FF=ENU*FF/H*3./8.
  FAV=(F(1)+3*F(2)+3*F(3)+2*F(4)+3*F(5)+3*F(6)+F(7))*1./16.
  ZF=0
  DO 170 I=1,7
  Z=H/2.-ZF*H/6.
  ZF=ZF+1.

```

```

170 AMI(I)=FF*Z
    DO 180 I=1,7
180 STRS(I)=STRS(I)+AMI(I)-ENU*F(I)-QRH*DW*DZ(I)+ENU*FAV
    S1=STRS(1)
    S2=STRS(7)
    STRSA=(STRS(1)+STRS(7)+3*(STRS(2)+STRS(3)+STRS(5)+STRS(6))+2*STRS(
14))*1./16.
    TIME=TIME+DT
    IF (TIME.GE.WTIME) GO TO 70
    GO TO 80
190 WRITE (6,270) QO,PSII
    GO TO 20
200 CONTINUE
    WRITE (6,280) TIME
    IF (TIME.LT.10.) GO TO 20
    GO TO 60
210 WRITE (6,290)
    GO TO 60
C
211 FORMAT(20A4)
220 FORMAT (6F12.6/5E12.6,1E11.5,111)
230 FORMAT (2E12.6)
240 FORMAT(1H /// 5X,20A4 // 5X,18HINPUT VARIABLES... / 132H RADIUS
1 THICKNESS INITIAL P. A B CRITICAL P.YIELD S.
2 T.MODULUS NU D.TIME MAX.TIME TEMP. /12E11.
34)
250 FORMAT (1H ,F9.2,9F12.0,1E12.5)
260 FORMAT (1H ,36X,39H INSTANTANIOUS COLLAPSE PRESSURE = ,F9.2,4H
1 PSI/)
270 FORMAT (1H ,2X,23HTHE APPLIED PRESSURE OF ,F9.2,61H PSI, IS GREATER
1 THEN THE INSTANTANIOUS COLLAPSE PRESSURE OF ,F9.2,4H PSI)
280 FORMAT (1H ,29HTHE SHELL HAS COLLAPSED AFTER ,F12.2,6H HOURS)
290 FORMAT (1H ,10X,47HTHE MAXIMUM TIME HAS BEEN EXCEEDED, NO COLLAPSE
1)
300 FORMAT (1H0,3X,4HTIME,6X,8HPRESSURE,34X,25HHOOP STRESS (AT 90 DEG.
1) ,28X,10HAVG. STRS.,7X,2HWO/29X,6HINSIDE,29X,6HCENTER,29X,7HOUTS
2IDE,/)
310 FORMAT (1H ,40X,18HMATERIAL IS 316 SS/)
320 FORMAT (1H ,40X,13HTEMPERATURE = ,F9.2,7H DEG. F//41X,18HAPPLIED PR
1ESSURE = ,F9.2,4H PSI//41X,19HCRITICAL PRESSURE = ,F9.2,4H PSI//41X,
242HINITIAL OUT-OF-ROUNDNESS (MILS).... WO=1F7.4,//80X,10HDMAX-D
3MIN=1F5.2,/)
330 FORMAT (1H ,40X11HTHICKNESS =F8.5,7H INCHES//41X12HMEAN RADIUS=F9.
15,6HINCHES/)
340 FORMAT (1H1,40X,23HMATERIAL IS HASTELLOY X/)
    STOP
    END

```

```

*.....*.....*.....*.....*.....*.....*.....*.....*.....*.....*
1 INPUT DATA
2 0.1715 0.015
3 5. E+028. E+031.54 E+035. E+042.02 E+070.3 E+03
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43

```

INPUT VARIABLES...
 RADIUS THICKNESS INITIAL P. A B CRITICAL P. YIELD S. T. MODULUS NU D. TIME MAX. TIME TEMP.
 0.1715E+00 0.1500E-01 0.3000E+03 0.0 0.0 0.2000E+04 0.3000E+05 0.2020E+08 0.3000E+00 0.5000E+03 0.8000E+04 0.1540E+04

MATERIAL IS HASTELLOY X

TEMPERATURE = 1540.00 DEG. F

APPLIED PRESSURE = 300.00 PSI

CRITICAL PRESSURE = 2000.00 PSI

INITIAL OUT-OF-ROUNDNESS (MILS).... WO= 1.1875

DMAX-DMIN= 4.75

THICKNESS = 0.01500 INCHES

MEAN RADIUS= 0.16400INCHES

INSTANTANEOUS COLLAPSE PRESSURE = 1729.14 PSI

TIME	PRESSURE	INSIDE	HOOP STRESS (AT 90 DEG.) CENTER	OUTSIDE	AVG. STRS.	WO
0.0	300.	-5113.	-3891.	-1447.	-3280.	0.11875E-02
3.91	300.	-4210.	-4239.	-967.	-3280.	0.12469E-02
8.10	300.	-4235.	-4292.	-854.	-3280.	0.13092E-02
12.62	300.	-4261.	-4346.	-736.	-3280.	0.13747E-02
17.51	300.	-4288.	-4404.	-613.	-3280.	0.14434E-02
22.85	300.	-4316.	-4464.	-484.	-3280.	0.15156E-02
28.70	300.	-4345.	-4526.	-348.	-3280.	0.15914E-02
35.16	300.	-4376.	-4591.	-207.	-3280.	0.16709E-02
42.34	300.	-4409.	-4659.	-59.	-3280.	0.17545E-02
50.33	300.	-4443.	-4730.	97.	-3280.	0.18422E-02
59.18	300.	-4479.	-4804.	259.	-3280.	0.19345E-02
68.88	300.	-4517.	-4881.	430.	-3280.	0.20310E-02
1068.88	300.	-5285948.	-5695907.	5553631.	-3280.	0.10548E+01

1068.89 HOURS
 THE SHELL HAS COLLAPSED AFTER

Appendix 2. 炉内管仕切管の真直度に関する供用期間中検査結果評価コード

炉内管仕切管の曲り測定結果の解析には、簡単なプログラムを用いた。以下にそのリストならびに入出力例を示す。

```

C
C
C      **OGL-1 IN-PILE TUBE (FLOW TUBE) STRAIGHTNESS ANALYSIS**
C
C
C      INPUT DATA
C      CARD NO. VARIABLE FORMAT          NOTE
C      -----
C      1      DATE      3A4      DATE OF THE OGL-1 IN-SERVICE INSPECTION TAKEN
C      N      I6        NUMBER OF DATA, LESS THAN 50 CASES
C      2      POS(I)    F8.1     THIS CARD SHOULD BE REQUIRED IN CASEA OF DATA
C      DATAZ(I) F8.1     ELEVATION OF THE DETECTOR INDICATED ON THE
C      CONTROL PANEL
C      DATAZ(I) F8.1     AN ANGLE ON THE PLANE WHICH CONTAINS X-Z
C      CO-ORDINATE AXIS AT POS(I), UNIT IN SEC.
C      DATAY(I)  F8.1     AN ANGLE ON THE PLANE WHICH CONTAINS Y-Z
C      CO-ORDINATE AXIS AT POS(I), UNIT IN SEC.
C      IF YOU REQUIRE TO CONTINUE THE CALCULATION OF ANY OTHER CASES YOU JASTO
C      REPEAT BY THE SAME WAY
C
C      DIMENSION POS(50), POSL(50), POSU(50), DX(50), DY(50), DZ(50),
C      1SUMDX(50), SUMDY(50), SUMDZ(50), DEG(50), DATAZ(50), DATAY(50), DATAZ(50
C      2), DATE(3)
C      10 FORMAT(3F8.1)
C      20 FORMAT(10F12.3)
C      30 FORMAT(3A4, I6)
C      40 FORMAT(1H1, 5X, 55H**RESULTS OF OGL-1 IN-PILE TUBE STRAIGHTNESS ANAL
C      1YSIS**, 10X, 8H  DATE , 3A4//
C      23X, 9HDETECTOR , 12H UPPER      , 12H LOWER      , 12H DELTA X   , 12H
C      3 DELTA Y   , 12H DELTA Z   , 12H SUM OF      , 12H SUM OF      , 12H
C      4SUM OF      , 12H ANGLE      /
C      53X, 9HPOSITION , 12H POSITION , 12H POSITION , 12H (MM)      , 12H
C      6 (MM)      , 12H (MM)      , 12H D-X (MM) , 12H D-Y (MM) , 12H
C      7D-Z (MM) , 12H (DEG)      //
C      READ (5, 30) (DATE(L), L=1, 3), N
C      WRITE (6, 40) (DATE(L), L=1, 3)
C      READ (5, 10) (POS(I), DATAZ(I), DATAY(I), I=2, N+1)
C      SUMDX(1)=0.
C      SUMDY(1)=0.
C      SUMDZ(1)=0.
C      DO 1 J=2, N+1
C      POSL(J)=POS(J)+2811.
C      POSU(J)=POS(J)+3061.
C      1 CONTINUE
C      POSL(N+2)=POSU(N+1)
C      DO 2 J=2, N+1
C      DX(J)=(POSL(J+1)-POSL(J))*TAN(DATAZ(J)/3600./180.*3.1415)
C      SUMDX(J)=SUMDX(J-1)+DX(J)
C      DY(J)=(POSL(J+1)-POSL(J))*TAN(DATAY(J)/3600./180.*3.1415)
C      SUMDY(J)=SUMDY(J-1)+DY(J)
C      DZ(J)=SQRT(DX(J)**2+DY(J)**2)
C      DATAZ(J)=ATAN(DZ(J)/(POSL(J+1)-POSL(J)))*180./3.1415
C      SUMDZ(J)=SQRT(SUMDX(J)**2+SUMDY(J)**2)
C      DEG(J)=ATAN(DX(J)/DY(J))*180./3.1415
C      2 CONTINUE
C      WRITE (6, 20) (POS(K), POSL(K), POSU(K), DX(K), DY(K), DZ(K), SUMDX(K), SUM
C      1DY(K), SUMDZ(K), DEG(K), K=2, N+1)
C      STOP
C
C      END

```

```

.....*.....*.....*.....*.....*.....*.....*.....*.....*
1 INPUT
2 AUG.30,1977 9
3 0. 417. 735.
4 250. 474. 693.
5 500. 450. 636.
6 750. 513. 621.
7 1000. 531. 636.
8 1250. 555. 684.
9 1500. 615. 690.
10 1750. 642. 735.
11 2000. 630. 696.

```

DATE AUG.30,1977

RESULTS OF CUL-1 IN-PILE TUBE STRAIGHTNESS ANALYSIS

DETECTOR POSITION	UPPER POSITION	LOWER POSITION	DELTA X (MM)	DELTA Y (MM)	DELTA Z (MM)	SUM OF D-X (MM)	SUM OF D-Y (MM)	SUM OF D-Z (MM)	ANGLE (DEG)
0.0	2811.000	3061.000	0.505	0.891	1.024	0.505	0.891	1.024	29.569
250.000	3061.000	3311.000	0.574	0.840	1.018	1.080	1.731	2.040	34.372
500.000	3311.000	3561.000	0.545	0.771	0.944	1.625	2.502	2.983	35.282
750.000	3561.000	3811.000	0.622	0.753	0.976	2.247	3.254	3.955	39.561
1000.000	3811.000	4061.000	0.644	0.771	1.004	2.891	4.025	4.955	39.860
1250.000	4061.000	4311.000	0.673	0.829	1.068	3.563	4.854	6.022	39.057
1500.000	4311.000	4561.000	0.745	0.836	1.120	4.309	5.690	7.138	41.712
1750.000	4561.000	4811.000	0.778	0.891	1.183	5.087	6.581	8.318	41.137
2000.000	4811.000	5061.000	0.764	0.844	1.138	5.850	7.425	9.453	42.152