

J A E R I - M

88-156

FPガス圧力計再計装技術の開発

—FPガス圧力計の試作結果—

1988年8月

小森 芳広・大島 邦男・鈴木 康夫

河村 弘・桜井 文雄・大岡 紀一

斎藤 実

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、
お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡
東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division Department
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-
ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1988

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 日青工業株式会社

F P ガス圧力計再計装技術の開発

— F P ガス圧力計の試作結果 —

日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉部

小森 芳広・大島 邦男・鈴木 康夫・河村 弘

桜井 文雄・大岡 紀一・斎藤 実

(1988年7月27日受理)

発電炉等で照射された燃料棒にF P ガス圧力計を再計装し、再照射試験中の燃料棒内圧を測定するための方法を考案した。本方法を実現するためには、遠隔操作による照射済燃料棒の端栓加工を始めとし、F P ガス圧力計等の再計装機器の燃料棒への取り付け及び再計装後の燃料棒の照射試験用キャップセルへの装荷に至るまでの一連の技術を確立する必要があり、現在、各関連技術開発が順調に進められている。本報告では、考案された再計装方法の概要を述べるとともに、再計装機器のうちのF P ガス圧力計の試作、炉外性能試験及びJMTRにて実施した炉内性能試験の結果をまとめたものである。試作時に得られた経験を反映して、本圧力計の構造に關しいいくつかの改良が行われた。一連の性能試験結果から、原子炉内供用条件下で、本圧力計は所要の性能を發揮し得ることが確認された。

JAERI-M 88-156

Development of Reinstrumenting Technique of Fuel Rods
with Pressure Gages
- In and Out-of-pile Characteristics of Developed
Fission Gas Pressure Gages -

Yoshihiro KOMORI, Kunio OHSHIMA, Yasuo SUZUKI, Hiroshi KAWAMURA
Fumio SAKURAI, Kiichi OOKA, Minoru SAITO

Department of JMTR Project
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received July 27, 1988)

Comprehensive procedures were designed in order to reinstrument irradiated fuel rods with fission gas pressure gages and measure inner pressure of the fuel rods in following re-irradiation experiments. The procedures have necessitated development of wide-ranging techniques which have been successfully being carried out. This report outlines the reinstrumenting procedures and summarizes in and out-of-pile characteristics of the developed pressure gage. Efforts were made to provide designed performance in fabrication process, which resulted in several revisions in the pressure gage design. In and out-of-pile performance tests verified successful workability of the developed pressure gage under expected service environments.

Keywords: Reinstrumenting Technique, Fuel Rods, Fission Gas Pressure Gages,
Out-of-pile Performance Test

目 次

1. 序 論	1
2. F P ガス圧力計再計装技術の概要	1
2.1 F P ガス圧力計再計装手順	2
2.2 開発スケジュール	3
3. F P ガス圧力計の設計	9
3.1 設計条件	9
3.2 構 造	10
3.3 スプリング・ベローズ系の設計	11
4. 試作及び検査結果	22
4.1 試作結果	22
4.2 検査結果	23
5. 性能試験	31
5.1 F P ガス圧力計の性能評価パラメータ	31
5.2 炉外性能試験	32
5.3 炉内性能試験	33
6. 結 言	49
謝 辞	49
参考文献	49
付 錄 F P ガス圧力計炉外較正試験詳細データ	50

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of technique for reinstrumenting a fuel rod with a fission gas pressure gage	1
2.1 Reinstrumenting procedure	2
2.2 Development schedule	3
3. Design	9
3.1 Design requirements	9
3.2 Configuration	10
3.3 Design of spring and bellows	11
4. Manufacturing and inspection	22
4.1 Manufacturing	22
4.2 Inspection	23
5. Performance tests	31
5.1 Parameters for evaluating performance	31
5.2 Out-pile performance tests	32
5.3 In-pile performance tests	33
6. Concluding remarks	49
Acknowledgements	49
Reference	49
Appendix Out-pile calibration data of fission gas pressure gage	50

1. 序 論

今後の軽水炉燃料研究においては、安全性及び経済性の観点から、高燃焼度燃料のふるまいの究明が一層重要なものと考えられる。しかし、現在のところ、高燃焼度燃料については十分な照射データが得られていない。従って、JMTRに対しても、これらのデータを取得するために、高燃焼度燃料の再照射試験に対する要求が今後高まるものと予想される。こうした試験で採取すべき最も重要なデータは、燃料からのFPガス放出量及び燃料中心温度であり、これらのデータを得るために、再照射試験に先立ち高燃焼度燃料棒に内圧計あるいは温度計を再計装する必要がある。しかし、そのための再計装技術は国内では未だ確立されていない。国外では、内圧計の再計装技術に関しては、HALDENプロジェクト等で実用化されているが、照射設備の構造等がJMTRの場合と異っており、直接技術導入することは不可能である。また、燃料中心温度計の再計装技術については未だ実用化されたという情報は得られていない。従って、いずれに関しても、我が国で速やかに技術開発を行う必要がある。以上の状況から、昭和60年度から、まず燃料棒内圧計を再計装するための技術開発に着手した。

本技術開発の具体的目標は、発電炉等で高燃焼度まで照射された燃料棒にFPガス圧力計を再計装し、再照射試験中の内圧を測定するための技術を確立することである。燃料棒としては主としてBWR燃料棒を対象としている。また、再照射試験は、具体的にJMTR出力急昇試験設備にて行うことと想定している。

本技術開発は、材料試験炉部が昭和55年度から実施している軽水炉燃料安全性研究に関する照射実験法の開発の一環として行っているものであり、昭和67年度までに終了する予定である。

本報告書は、FPガス圧力計再計装技術の概要を紹介するとともに、関連開発機器のうちのFPガス圧力計の試作及び特性試験結果についてまとめたものである。

なお、再計装におけるもう一つの課題である中心温度計の再計装については、昭和63年度から調査を開始し、64～65年度にかけて技術開発を行う予定である。

2. FPガス圧力計再計装技術の概要

JMTR出力急昇試験設備を用いて照射済燃料の再照射試験を行なう場合には、再計装された燃料棒（以下“再計装燃料棒”と略す）は、BOCAキャップセルと呼ばれる沸騰水型の照射用キャップセルに装荷され、原子炉内に挿入される。JMTR出力急昇試験設備をFig. 1に示す。また再計装燃料棒がBOCAキャップセルに装荷された状態をFig. 2に示す。

BOCAキャップセル内部の冷却材は、BWR相当の圧力及び温度条件に保持される。再計装燃料棒は、照射済の燃料棒に内圧測定のための再計装機器が取り付けられたものである。再計装機器は、圧力センサであるFPガス圧力計、燃料棒端栓に穴を開けるための穿孔装置及びBOCAキャップセルに装着するための装着装置から構成される。再計装機器の構成についてFig. 3に示す。B

1. 序 論

今後の軽水炉燃料研究においては、安全性及び経済性の観点から、高燃焼度燃料のふるまいの究明が一層重要なものと考えられる。しかし、現在のところ、高燃焼度燃料については十分な照射データが得られていない。従って、JMTRに対しても、これらのデータを取得するためには、高燃焼度燃料の再照射試験に対する要求が今後高まるものと予想される。こうした試験で採取すべき最も重要なデータは、燃料からのFPガス放出量及び燃料中心温度であり、これらのデータを得るために、再照射試験に先立ち高燃焼度燃料棒に内圧計あるいは温度計を再計装する必要がある。しかし、そのための再計装技術は国内では未だ確立されていない。国外では、内圧計の再計装技術に関しては、HALDENプロジェクト等で実用化されているが、照射設備の構造等がJMTRの場合と異っており、直接技術導入することは不可能である。また、燃料中心温度計の再計装技術については未だ実用化されたという情報は得られていない。従って、いずれに関しても、我が国で速やかに技術開発を行う必要がある。以上の状況から、昭和60年度から、まず燃料棒内圧計を再計装するための技術開発に着手した。

本技術開発の具体的目標は、発電炉等で高燃焼度まで照射された燃料棒にFPガス圧力計を再計装し、再照射試験中の内圧を測定するための技術を確立することである。燃料棒としては主としてBWR燃料棒を対象としている。また、再照射試験は、具体的にJMTR出力急昇試験設備にて行うことを想定している。

本技術開発は、材料試験炉部が昭和55年度から実施している軽水炉燃料安全性研究に関する照射実験法の開発の一環として行っているものであり、昭和67年度までに終了する予定である。

本報告書は、FPガス圧力計再計装技術の概要を紹介するとともに、関連開発機器のうちのFPガス圧力計の試作及び特性試験結果についてまとめたものである。

なお、再計装におけるもう一つの課題である中心温度計の再計装については、昭和63年度から調査を開始し、64~65年度にかけて技術開発を行う予定である。

2. FPガス圧力計再計装技術の概要

JMTR出力急昇試験設備を用いて照射済燃料の再照射試験を行なう場合には、再計装された燃料棒（以下“再計装燃料棒”と略す）は、BOCAキャップセルと呼ばれる沸騰水型の照射用キャップセルに装荷され、原子炉内に挿入される。JMTR出力急昇試験設備をFig. 1に示す。また再計装燃料棒がBOCAキャップセルに装荷された状態をFig. 2に示す。

BOCAキャップセル内部の冷却材は、BWR相当の圧力及び温度条件に保持される。再計装燃料棒は、照射済の燃料棒に内圧測定のための再計装機器が取り付けられたものである。再計装機器は、圧力センサであるFPガス圧力計、燃料棒端栓に穴を開けるための穿孔装置及びBOCAキャップセルに装着するための装着装置から構成される。再計装機器の構成についてFig. 3に示す。B

BOCAキャップセル内部のスペース的制約から、再計装機器の外径は約14mm以下、長さは約300mm以下に限定されている。また、照射済燃料を取り扱うため、再計装作業はホットラボのセル内で遠隔操作により行う必要がある。

従って、再計装機器の小型化及び再計装作業の遠隔操作性が本技術開発上の大きな課題である。

2.1 FPガス圧力計再計装手順

FPガス圧力計の再計装手順について、Fig. 4に示すとともに、以下に概略を記す。

(1) 照射済燃料棒端栓の加工

最初に、燃料棒端栓の中ぐり加工を行う。加工の目的は、後で行う端栓穿孔のために、端栓の肉厚を薄くしておくことである。端栓肉厚は、穿孔能力等を考慮して、約1.5mmとする予定である。専用の端栓加工機が使用され、その加工精度は約±0.1mmの予定である。

(2) 再計装機器の溶接

穿孔装置、FPガス圧力計、装着装置が互いに溶接され再計装機器として一体となったものが、自動のTIG溶接機により燃料棒端栓に溶接される。

(3) 燃料棒端栓の穿孔

燃料棒の内圧を測定するために、穿孔装置により燃料棒端栓に穴を開け、燃料棒と圧力計とを連通させる、穿孔の方法はアーク放電を利用したものであり、次のとおりである。

燃料棒端栓に再計装機器を溶接した際に、穿孔装置内部の電極先端が燃料棒端栓の直上に適当なギャップをもって位置する様に設計されている。従って、端栓と穿孔装置間に外部から直流電圧をかけることにより電極と端栓間にアーク放電を生じさせ、端栓の中央部付近を溶融させて小さな穴を開ける。これにより、燃料棒内のFPガスを外部へ漏洩させることなく燃料棒とFPガス圧力計は通じ燃料棒内圧の測定が可能となる。本穿孔法は、遠隔操作が容易であり、ドリルを用いた穿孔法と比較して以下の利点を有している。

- ① 切粉が出て燃料棒内に入ったり計測機器内に入ったりして悪影響を及ぼす心配が無い。
- ② 装置自体の構造が簡単であるため小型化が可能である。

(4) 再計装燃料棒のBOCAキャップセルへの挿入、装着

再計装燃料棒は、BOCAキャップセル下部端栓に設けられた挿入孔から挿入され、FPガス圧力計出力信号接続のための装着が行われる。挿入は自動装入装置により行われ、BOCAキャップセルを横に倒した状態で再計装燃料棒は水平にキャップセル内に送り込まれる。BOCAキャップセル内はBWR冷却材を模擬した高压水で満されているため、装着に使用される装着装置は、FPガス圧力計出力信号の接続をワンタッチで行い、かつ接続部の水密性を保持する必要がある。このため、装着装置は言わゆるクイックジョイントとピンコネクタを組み合わせた特殊な構造となっている。

また、経済性の観点から、BOCAキャップセルの再使用を検討しており、そのために装着装置は

装着と同様に取りはずしも容易な設計となっている。

以上が、照射済燃料棒内のFPガスをそのまま保持して再照射試験を行う場合の再計装手順である。

一方、再照射試験の目的によっては、再計装時に燃料棒内のFPガスをサンプリングしたり、別のガスと置換することも考えており、このための装置も併せて開発中である。この場合には、予め胴部に置換孔の開いた穿孔装置を使用し、その置換孔を通じてFPガスのサンプリング及び置換を行う。置換終了後は、通常のTIG溶接により置換孔を溶封する。

2.2 開発スケジュール

FPガス圧力計の再計装に当っては、再計装機器の開発の他、ホットラブにおける照射済燃料棒及びFPガスの取り扱い技術等、種々の関連技術開発が必要とされる。本技術の開発スケジュールについてTable 1に示す。昭和65年度に最終的な炉内確証試験を実施し、本技術の確立を図る予定である。

Table 1 Development schedule

Development item	Fiscal year 1985	1986	1987	1988	1989	1990	1992
• Pressure transducer	■						
• Punching Device and Connector	■						
• Encapsulating of reinstrumented fuel rod into BOCA capsule		■					
• Handling of reinstrumented fuel rod in Hot Laboratory		■					
In-pile qualification test							
• Manufacture of BOCA capsule							
• In-pile qualification test							

■ completed

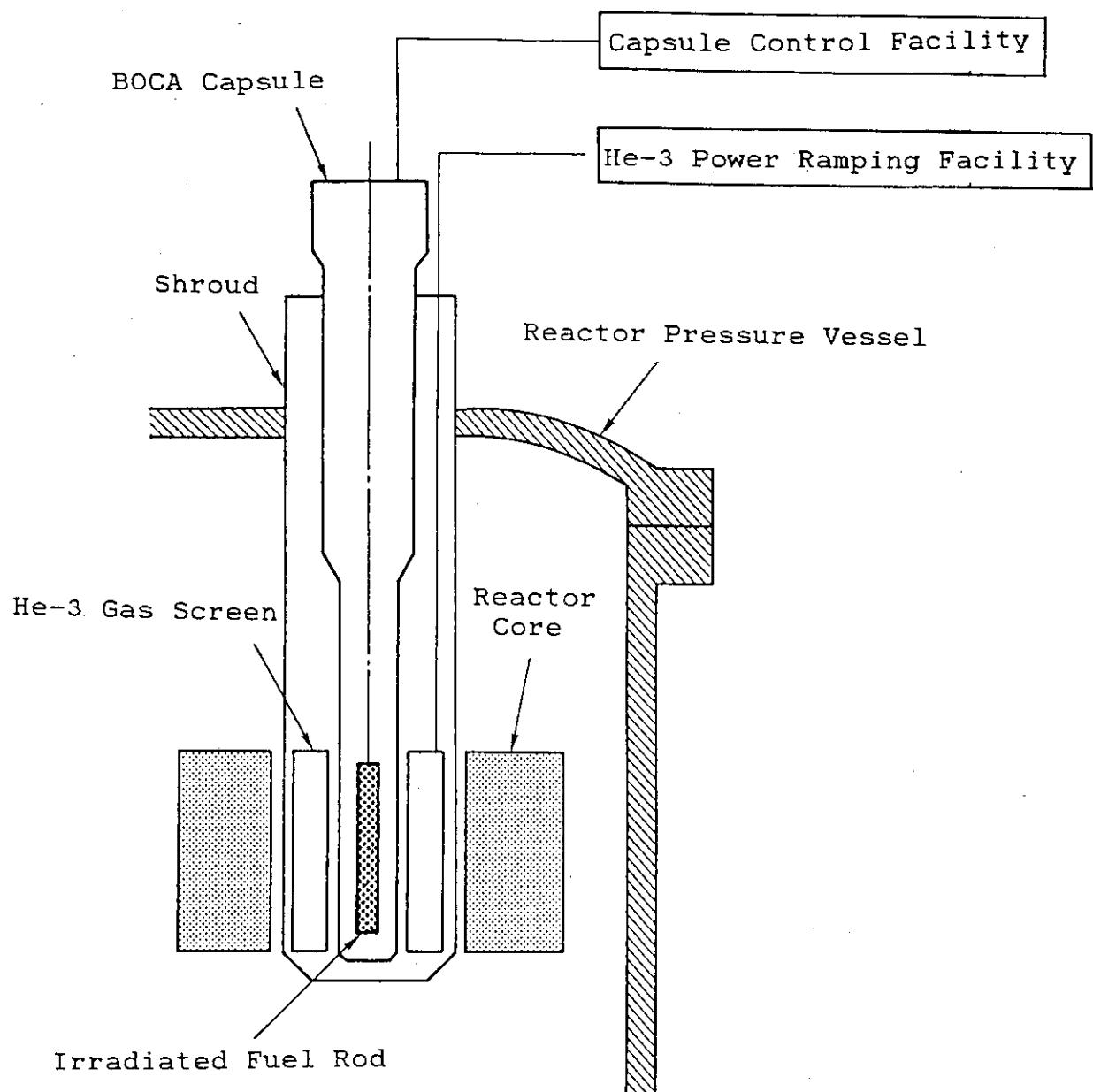


Fig. 1 JMTR power ramping facility

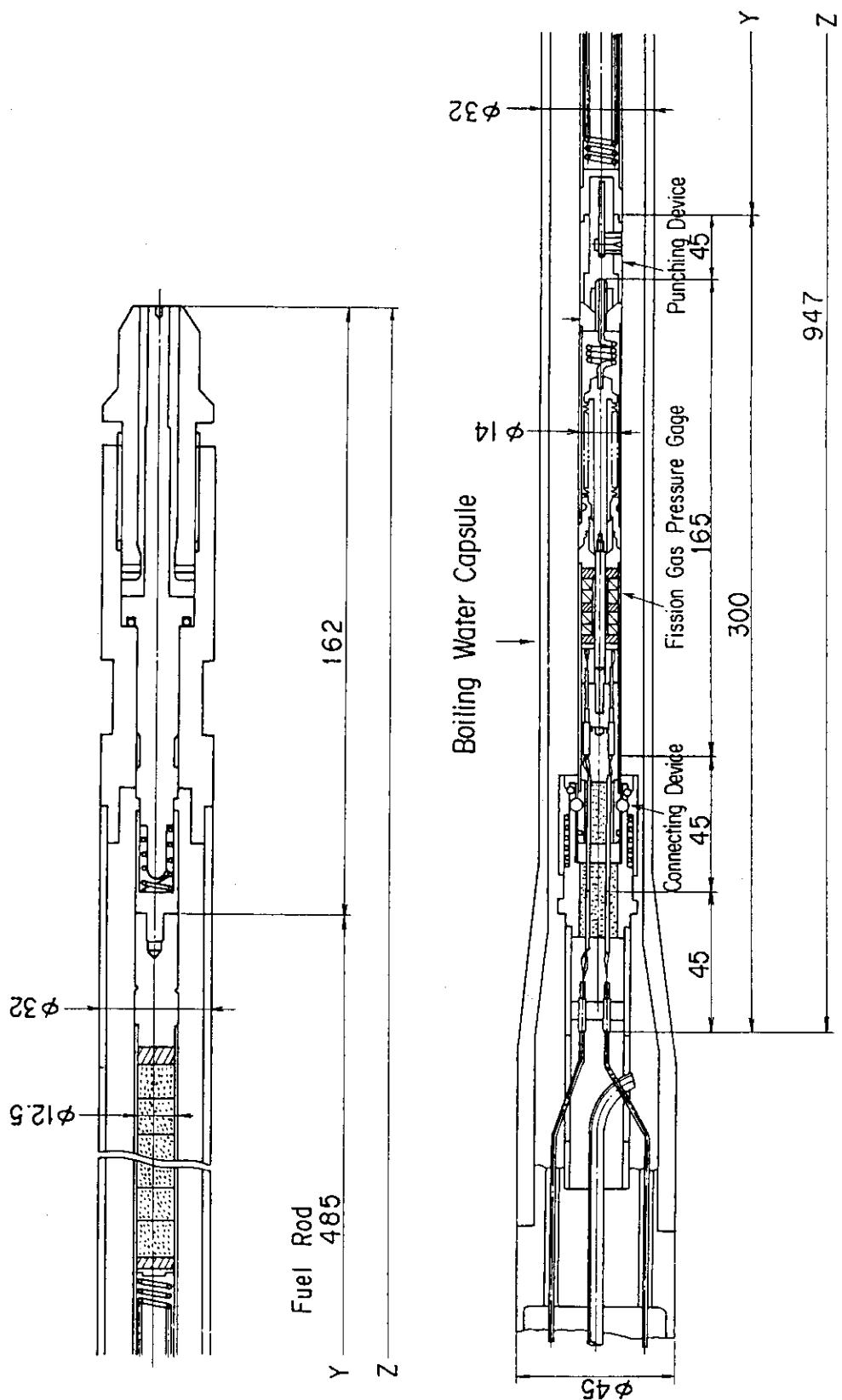


Fig. 2 Reinstrumented fuel rod in boiling water capsule

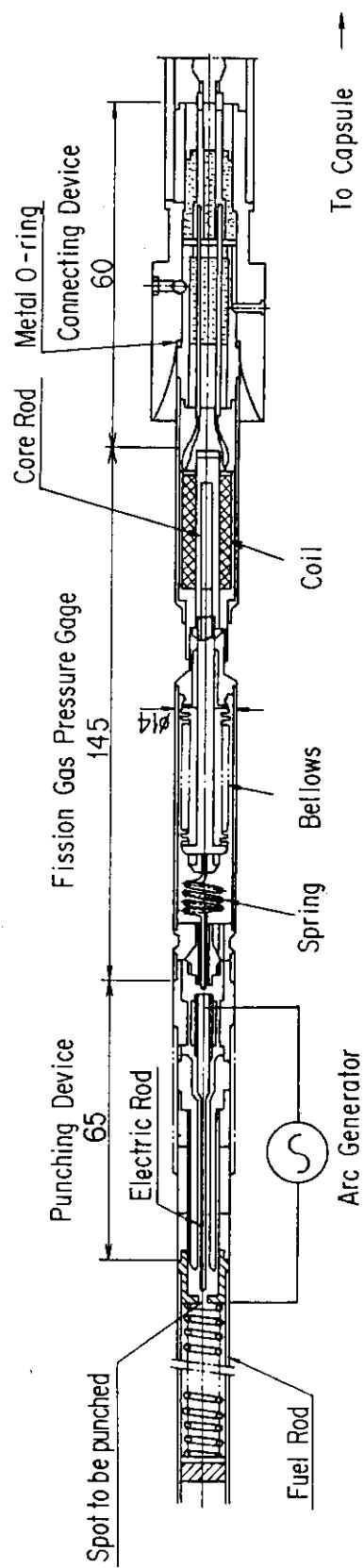


Fig. 3 Configuration of reinstrumenting devices

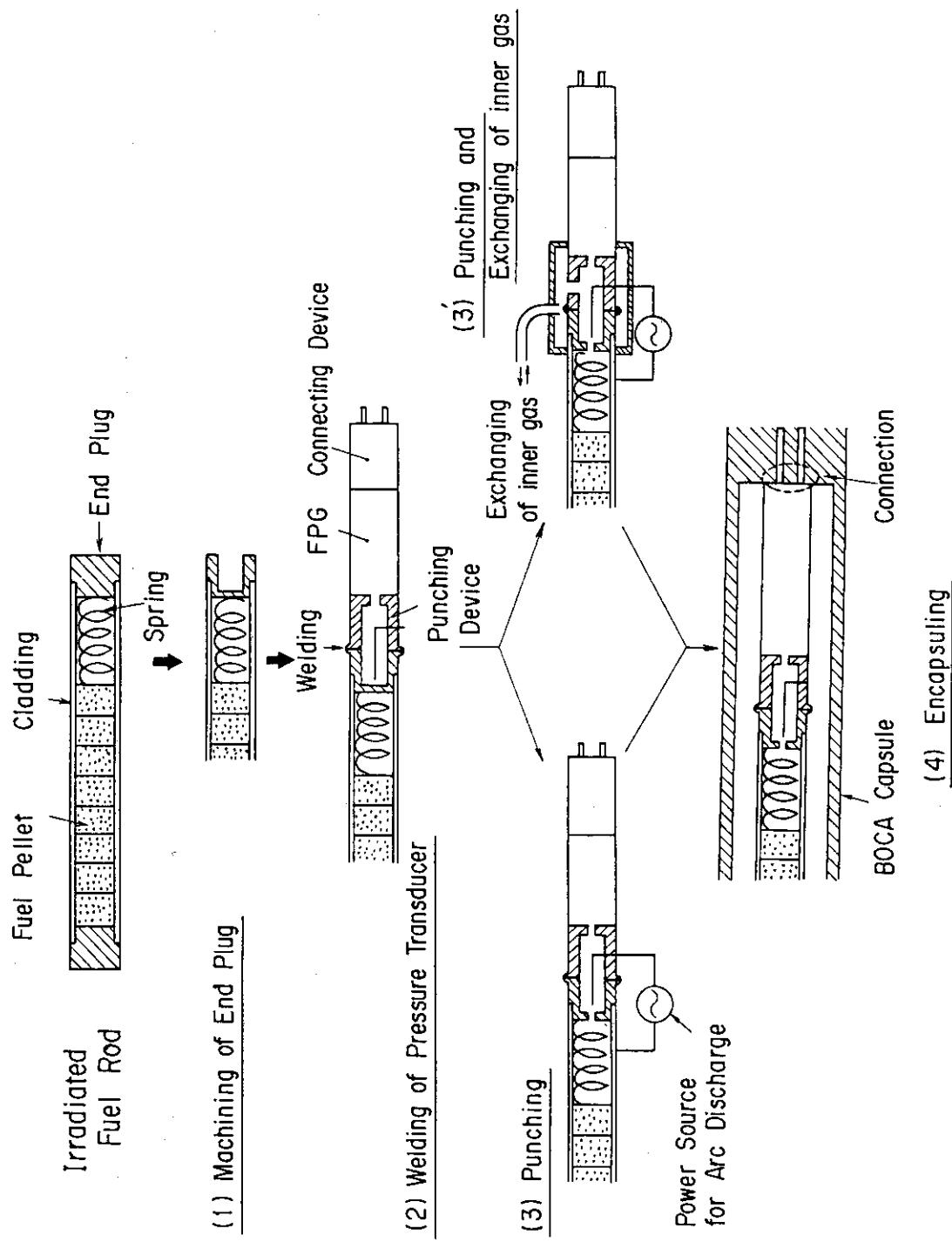


Fig. 4 Reinstrumenting procedure of fission gas pressure gage

3. F P ガス圧力計の設計

本章以降では、照射済燃料棒内圧測定のために使用される再計装機器のうち、F P ガス圧力計の設計、製作及び性能試験結果について報告する。

3.1 設計条件

(1) 圧力測定範囲

F P ガス圧力計のフルスケールの決定に際しては、照射済燃料の再照射試験時にどの程度の圧力範囲の測定が必要とされるかについて目安を知る必要がある。このため、現在再照射試験が予想されるケースについて FEMAX I - III コードを用いて燃料棒内圧の計算を行った。計算結果について Fig. 5 に示す。燃料棒のベース照射時の線出力は 300 W/cm 、出力急昇試験時の最高到達線出力は $400, 500, 550 \text{ W/cm}$ の 3 ケース、保持時間は 1 時間と仮定した。同図中には、参考として R 2 炉における Demo - Ramp 及び Inter - Ramp 計画で得られた実験データ⁽¹⁾を併記した。R 2 で得られた実験データは、ベース照射時の線出力が $280 \sim 400 \text{ W/cm}$ と幅があり、今回の計算結果との厳密な比較は出来ないが、全体的には計算値の方がやや高い傾向が見られ、このことは柳沢⁽²⁾が指摘しているとおりである。従って、計算結果になお若干の余裕を取って F P ガス圧力計の測定範囲を決めておけば、実際の再照射試験に十分対応出来るものと考えられる。但し、圧力計は一概にフルスケールを大きくする程、低圧側での測定精度が悪くなるため、余裕は適切な値とすることが望ましい。

Fig. 4 に基づき、照射済燃料棒を燃焼度に応じて 3 つにクラス分けし、それぞれのケースで必要とされる F P ガス圧力計のフルスケールを設定した。その結果を Tabl 2 に示す。

圧力計全般について言えることであるが、低圧用のものほど圧力変化に対応する出力信号の変化が小さくなり、高精度を得るために設計が難しい。このため、試作の第一段階として、最も低圧用であるフルスケール 1.6 MPa の F P ガス圧力計を製作し性能試験を行うこととした。本試作で確立した技術をより高圧用の F P ガス圧力計の製作に適用することは容易である。

(2) 圧力測定精度

Table 2 の(a)のケースについて考えると、ベース照射終了時の燃料棒内圧は高々 $0.2 \sim 0.3 \text{ MPa}$ と推定される。従って、少くともそれより一桁下の測定精度が必要であり、フルスケール 1.6 MPa に対し $\pm 2\%$ (圧力値で約 $\pm 0.03 \text{ MPa}$) を設計目標とする。

(3) 動作圧力感度

動作圧力感度は、測定精度より一桁以上小さいことが必要であるが、感度 0.003 MPa となると圧力感度部の製作が事実上極めて困難であるため、設計目標を 0.01 MPa とする。

(4) 設計温度及び設計圧力

JMTR出力急昇試験設備による再照射試験時の条件を参照し、これを包含する値として設計温度 400°C 、設計圧力は 9 MPa （外筒外圧）とする。

(5) 設計寿命

F P ガス圧力計は再照射試験のための再計装機器として開発しているものであり、その意味では JMTR 1 サイクル運転即ち約 550 時間の設計寿命で十分である。しかし、一般の定常照射実験にも使用される可能性があるため、JMTRで 3 ~ 4 サイクルの照射試験を考慮すると、2000 時間程度の寿命は必要である。

(6) 耐熱サイクル性

将来 JMTR 出力急昇試験設備で行うことが予想されている再照射試験内容を参考して、本圧力計は、 $100 \sim 300^{\circ}\text{C}$ の温度範囲で 100 回の熱サイクルに対しても十分健全であることが必要である。負荷熱サイクルの詳細については、「5 章 性能試験」に記する。

以上の設計条件をまとめて Table 3 に示す。

3.2 構 造

3.2.1 圧力感知及び検出方法の選択

F P ガス圧力計として要求される性能は、圧力を感知しそれを電気信号に変換して検出することであり、その具体的方法を決めるため、既存のタイプについてスクリーニングを行った。

現在圧力感知方法としてはダイヤフラム型及びベローズ型、検出方法としてはゼロバランス型及び変位検出型に大別される。それぞれの型の利害得失について Table 4 及び Table 5 に示す。スクリーニングにおける基本的な要求事項は次のとおりである。

- ① 高精度であること。（ $\pm 0.03 \text{ MPa}$ ）
- ② 動圧測定が可能であること。
- ③ 耐放射線性を有すること。
- ④ 圧力計の最外径が 14mm 以下であること。
- ⑤ 長さは可能な限り短いこと。

①に示す様に、本圧力計では高精度が要求されている。従って、圧力感知部にダイヤフラムを使う場合には、たわみを大きくとる必要があり、このためダイヤフラムの直径を大きくすることが要求される。検討に依れば、感度の高い E I 型差動トランジストと組み合わせた場合でも、所要の精度を得るには圧力測定範囲に対応し $0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$ のダイヤフラムのたわみが必要となる。しかし、④の制約条件下ではダイヤフラムの直径は最大でも 10mm 程度であり、現在の製作技術ではこの大きさで所要のたわみを生じさせるのは殆ど不可能であることが分った。

一方、ベローズ型については、調査の結果④の外径制約条件下で①の精度を満足するものが製作可能であるとの見通しが得られた。以上から、圧力感知方法としては、ベローズ型を採用することとした。

また、検出方法としては、②の動圧測定の条件からゼロバランス型は無理である。従って変位検出方式が適当であり、このタイプで実績のある差動トランスを採用することにした。

3.2.2 FP ガス圧力計の構造

前項の検討に基づきFPガス圧力計の設計を行い、各種の性能試験を実施することを目的として昭和60～61年度にかけて合計6体の圧力計を製作した。圧力計の内訳についてTable 6に、また構造についてFig. 6～Fig. 8に示す。

本圧力計では、測定精度の向上の観点から、ヒステリシスを可能な限り小さくするため、圧力感知部にベローズに加えてスプリングを使用し、スプリング及びベローズを直列に接続する構造とした。圧力が変化すると、スプリング・ベローズ系が収縮し、ベローズに連結された差動トランスのコアロッドが移動するため、その動きを差動トランスにより電気信号に変換して検出する仕組みである。

製作した6体のFPガス圧力計はほぼ同一の構造であるが、昭和60年度に製作したFP1A～FP1Dではスプリングを引張側で使用しているのに対し、昭和61年度に製作したFP2A, 2Bでは圧縮側で使用している点が異なる。これはEP1A～1Dの試作及び性能試験結果を考慮し、FP2A, 2Bでは、スプリングの伸縮時の動きをよりスムースにするために改良したためである。

Fig. 6及びFig 7に示すとおりFP1A～1D及びFP2Aでは上部端栓に加圧管が接続されており、これは較正試験時にFPガス圧力計に加圧するためである。FP2Bは、燃料棒に直接溶接され実証試験に供するため、完成検査終了後加圧管は切継された。

また、FPガス圧力計を燃料棒に接続すると、総プレナム体積としては増加することになり燃料棒内圧が低下するので、この変化を最小に留めるためにFPガス圧力計内のプレナムを極力小さくした。設計時に計算した結果では、圧力計内のプレナムは約3cm³である。このプレナム体積は、再照射試験のデータ解析上重要な情報となるので、正確に求めておくことが必要である。

ベローズは、小形化がより容易であることから成形ベローズを使用した。また、スプリング・ベローズ系の真直度を保つため、適度のプリテンションを与える様に調節ネジを設けた。調節ネジは、調節後点溶接にて固定される。ベローズ及びスプリングには実績があり高温まで安定した機械的特性を有するインコネル系合金を使用した。

3.3 スプリング・ベローズ系の設計

圧力感知部であるスプリング・ベローズ系の設計では、測定圧力範囲に対する変位量の決定が基本事項であり、必要とされる変位量は測定精度または感度から決まる。本圧力計の感度としては、Table 3に示したとおり0.01 MPaを設計目標としている。一方、差動トランスの最小感度は、これまでの実績から約10μmと予想されるため、スプリング・ベローズ系としては少くとも10μm / 0.01 MPaの変位量が必要であり、従ってフルスケール1.5 MPaに対しては1.5 mm以上の変位量が必要となる。変位量を大きくとるためにはベローズ及びスプリングを長くする必要があるが、それによりヒステリシスは逆に増加し、また、機器の小型化という設計方針にも反する。このため、最適化が必要である。このため、今回は1.5 MPaに対し変位量2mmを設計目標とし

た。

圧力変化に対する変位の再現性及び直線性を向上させるためには、ベローズのバネ定数をスプリングのそれに比較して可能な限り小さくし、スプリング主導の変形機構とすることが必要である。このため、ベローズの肉厚を安全性を保ちつつほぼ限界付近まで薄くし、0.08 mmとした。これをもとに、スプリングのバネ定数を以下のとおり決定した。

これまでの製作データを参照し、肉厚0.08 mmのベローズの室温における1山当りのバネ定数は約15.1 kg/mmと推定される。使用ベローズの山数を20とすると、ベローズ全体のバネ定数 K_B^{400} は0.755 kg/mmとなる。さらに、400°Cにおけるバネ定数 K_B^{400} は、ヤング率の温度変化をもとに次の様に推定出来る。

$$K_B^{400} = K_B^{RT} \times \frac{E^{400}}{E^{RT}} = 0.674 \text{ (kg/mm)}$$

E^{400} ; 400°Cにおけるヤング率

E^{RT} ; 室温におけるヤング率

変化量は、1.5 MPaのとき2 mmと決められているため、スプリング・ベローズ系の400°Cにおける総合バネ定数 K^{400} は、次のとおりである。

$$K^{400} = \frac{AeP}{\delta} = 4.613 \text{ kg/mm}$$

Ae ; ベローズの有効面積 0.615 cm²

P ; 圧力 1.5 MPa

δ ; 変位量 2 mm

従って400°Cにおけるスプリングのバネ定数 K_s^{400} は、次のとおりである。

$$K_s^{400} = K^{400} - K_B^{400} = 3.939 \text{ (kg/mm)}$$

K^{400} に占める K_s^{400} と K_B^{400} の割合は、

K_s^{400} が85%

K_B^{400} が15%

であり、明らかにスプリング主導の変形機構となり設計方針を満足する。

ベローズの場合と同様にヤング率の比を用いてスプリングの室温におけるバネ定数 K_s^{RT} を推定すると

$$K_s^{RT} = K_s^{400} \times \frac{E^{RT}}{E^{400}} = 4.426 \text{ kg/mm}$$

となる。

Table 2 Required operating pressure range of FPG for BWR fuel rods

	Average Burn-up (MWD/T)	Estimated inner pressure at Power Ramping Test ⁽¹⁾ (MPa)	Required Operating Pressure of FPG (MPa)
(a) Fuel Rods irradiated at JMTR	~ 6,000	0.7	1.6
(b) Common BWR Fuel Rods	~20,000	2.1	3.0
(c) High Burn-up BWR Fuel Rods	~40,000	not available by calculation due to lack of extended data	7.0

(1) Calculated value at the terminal power of 550 W/cm and initial pressure of 0.1 MPa
(without pre-pressurization)

Table 3 Design parameters of fission gas pressure gage

(FP1A~FP2B)

(1) Operating Pressure Range	0.1~1.6 MPa
(2) Accuracy	± 2 % / F. S.
(3) Sensitivity	0.01 MPa
(4) Design Temperature	400°C
(5) Design Pressure	
(i) External Pressure on Outer Tube	9 MPa (Hydraulic)
(ii) External Pressure on Bellows	2 MPa (He gas)
(6) Design Life	2,000 hours
(7) Endurance for Thermal Cycling	
(i) Cycle Number	100 times
(ii) Temperature range	100 ~ 300°C

Table 4 Pressure detecting method (Diaphragm)

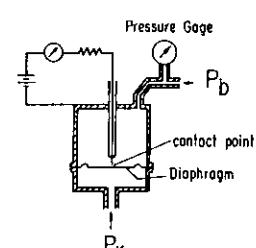
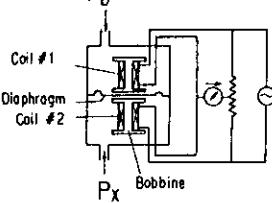
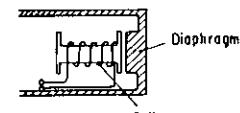
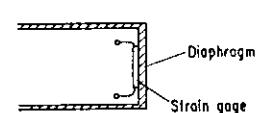
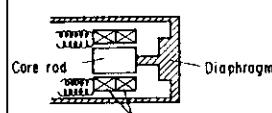
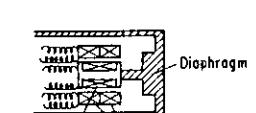
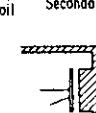
Conversion into an electric signal	Fundamentals of the structure	Advantage	Disadvantage
<u>Zero-balance type</u>			
(a) Contact point type		<ul style="list-style-type: none"> high accuracy 	<ul style="list-style-type: none"> Incapable of dynamic measuring large space is required for diaphragm
(b) Reactance type		<ul style="list-style-type: none"> high accuracy 	<ul style="list-style-type: none"> largely affected by temperature change complicated instrumentation
<u>Displacement type</u>			
(a) Eddy current		<ul style="list-style-type: none"> simple configuration easily miniaturized 	<ul style="list-style-type: none"> low sensitivity complicated instrumentation
(b) Strain gage type		<ul style="list-style-type: none"> simple configuration simple instrumentation 	<ul style="list-style-type: none"> largely affected by neutron and temperature
(c) Linear voltage differential transformer type		<ul style="list-style-type: none"> high sensitivity 	<ul style="list-style-type: none"> complicated configuration
(d) Movable coil type		<ul style="list-style-type: none"> highly stable to irradiation 	<ul style="list-style-type: none"> complicated configuration
(e) Capacitance type		<ul style="list-style-type: none"> simple configuration easily miniaturized 	<ul style="list-style-type: none"> low sensitivity

Table 5 Pressure detecting method (Bellows)

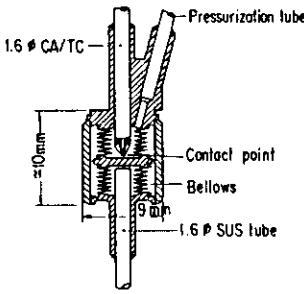
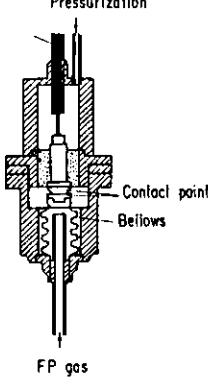
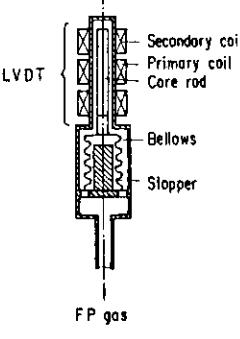
Conversion into an electric signal	Fundamentals of the structure	Advantage	Disadvantage
<u>Zero-balance type</u>		<ul style="list-style-type: none"> high accuracy 	<ul style="list-style-type: none"> incapable of dynamic measuring
<u>Contact point type</u>		<ul style="list-style-type: none"> high accuracy simple configuration 	<ul style="list-style-type: none"> incapable of dynamic measuring
<u>Displacement type</u>		<ul style="list-style-type: none"> applicable to dynamic measuring 	<ul style="list-style-type: none"> Operating temperature is limited to about 300 °C

Table 6 List of fission gas pressure gages in the present study

FPG No	Applied Tests
FP1A	Calibration Test and Thermal Cycling Test
FP1B	Out-pile Tests
FP1C	Calibration Test and Thermal Cycling Test
FP1D	Calibration Test and High Temperature Hold Test
FP2A	In-pile Tests
FP2B	Demonstration Test (Measuring inner pressure of the fuel rod)

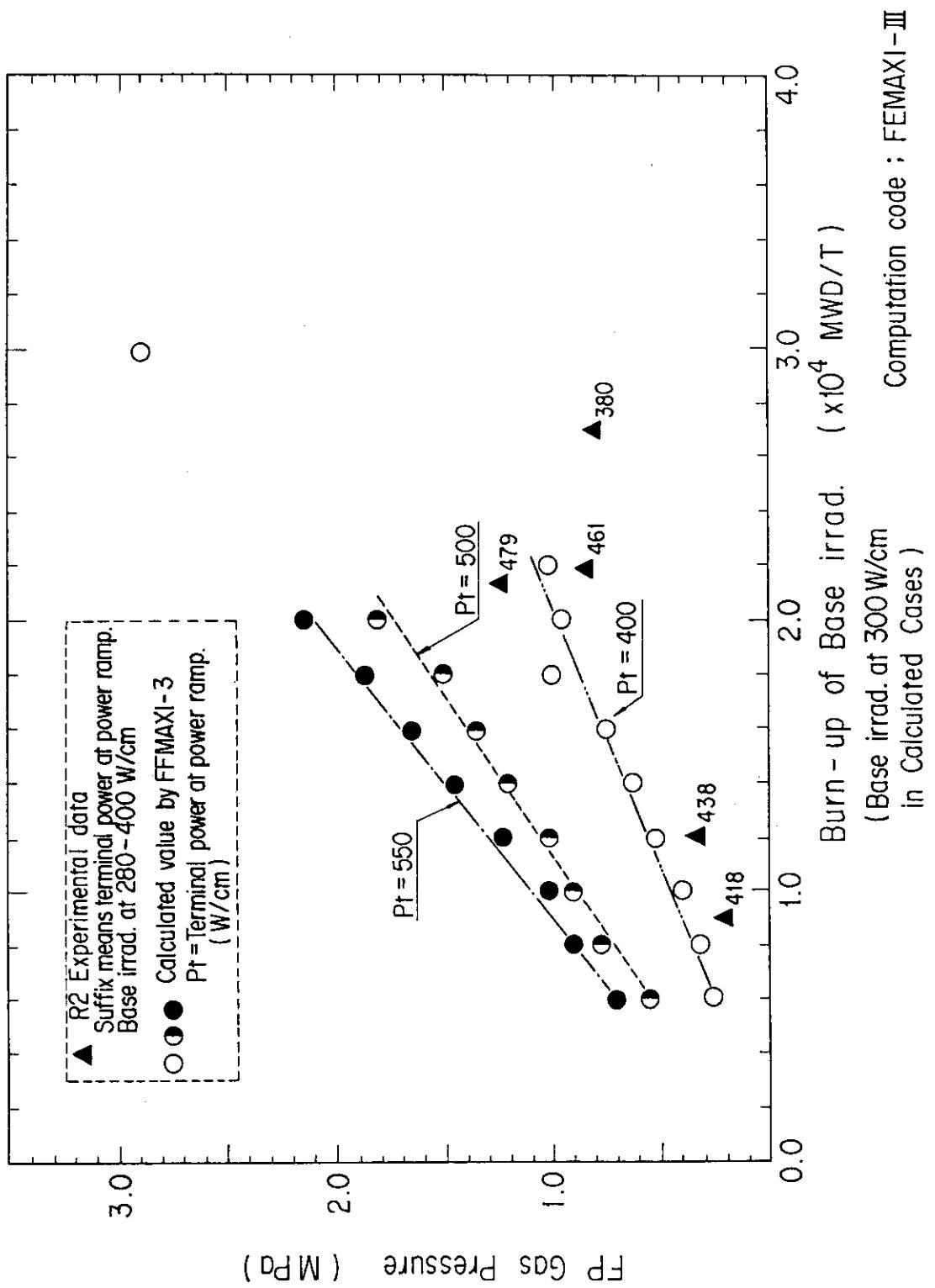


Fig. 5 Fission gas pressure in LWR fuel rods

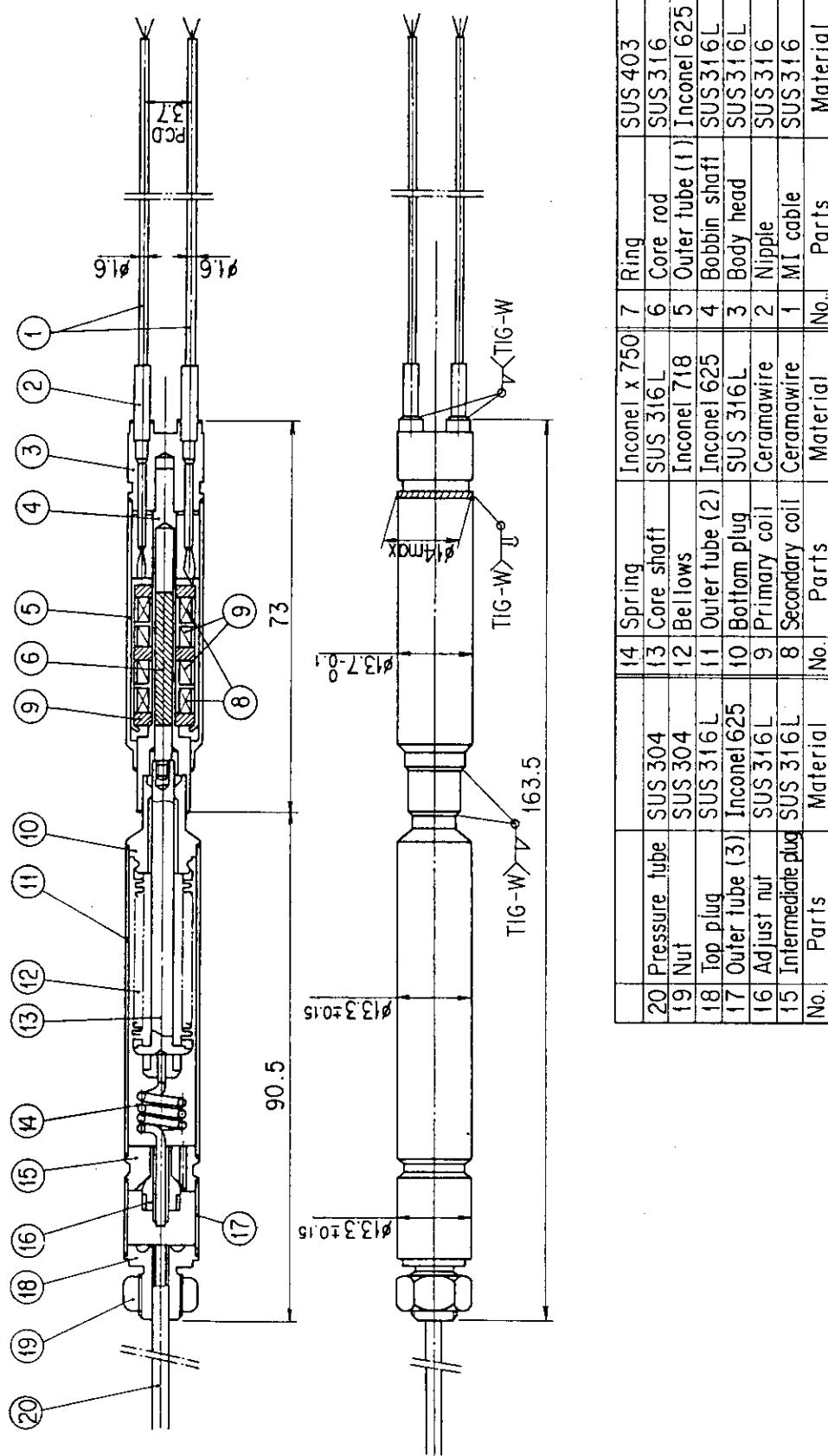
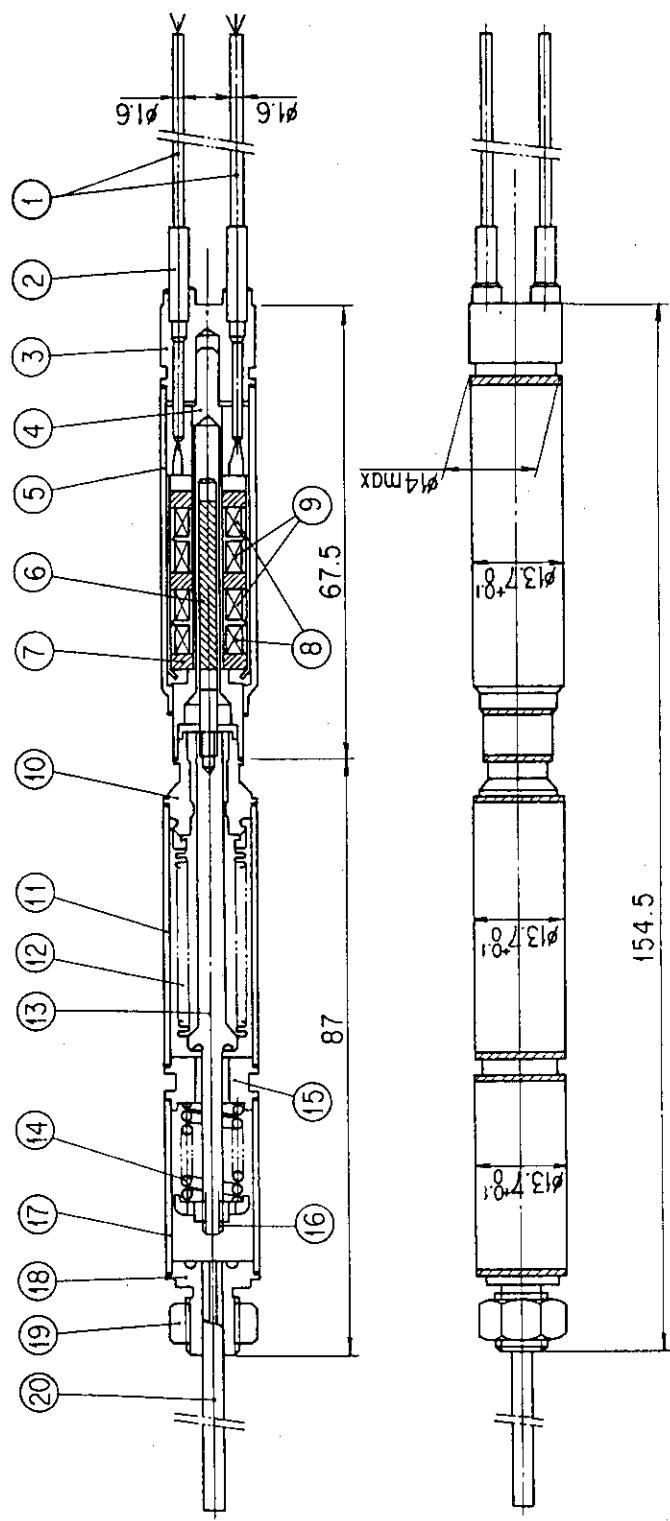


Fig. 6 Fission gas pressure gage (FP1A ~ FP1D)



No.	Parts	Material	No.	Parts	Material	No.	Parts	Material
20	Pressure tube	SUS 304	14	Spring	Inconel x 750	7	Ring	SUS 403
19	Nut	SUS 304	13	Core shaft	SUS 316L	6	Core rod	SUS 316
18	Top plug	SUS 316L	12	Bellows	Inconel 718	5	Outer tube (1)	Inconel 625
17	Outer tube (3)	Inconel 625	11	Outer tube (2)	Inconel 625	4	Bobbin shaft	SUS 316L
16	Adjust nut	SUS 316L	10	Bottom plug	SUS 316L	3	Body head	SUS 316
15	Intermediate plug	SUS 316L	9	Primary coil	Ceramawire	2	Nipple	SUS 316
			8	Secondary coil	Ceramawire	1	M1 cable	SUS 316

Fig. 7 Fission gas pressure gage (FP2A)

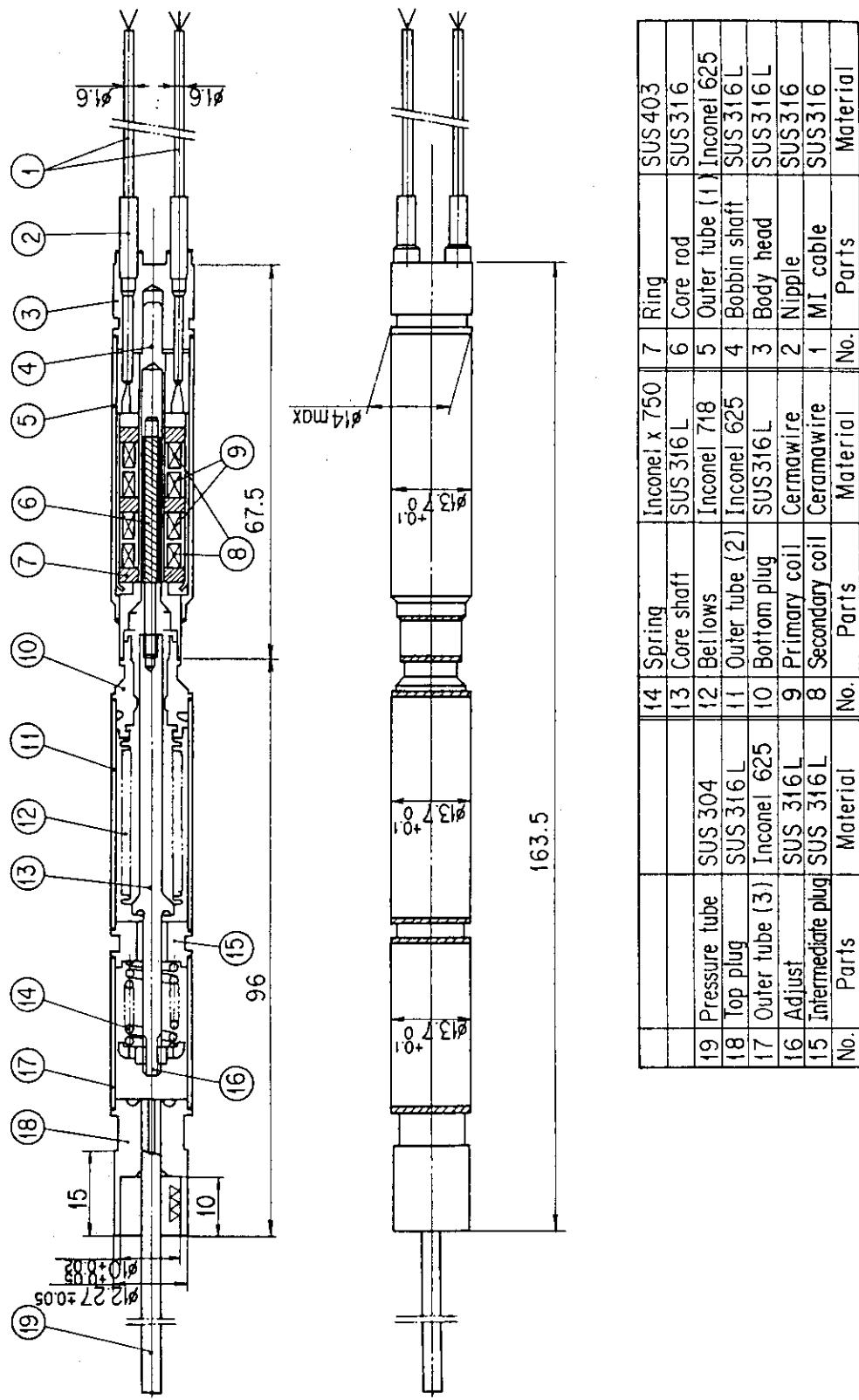


Fig. 8 Fission gas pressure gage (FP2B)

4. 試作及び検査結果

4.1 試作結果

前章の設計に基づき、FPガス圧力計の試作を行った。本圧力計を構成する差動トランスアセンブリ、ベローズアセンブリ及び両アセンブリを接合した完成品の写真をFig.11に示す。試作により得られた主な結果を以下にまとめる。

(1) 真直度

本圧力計では溶接箇所が非常に多いため、真直度を良好に保つことは難しいが、真直度が悪くなるとベローズに連結したコアロッドが円滑に動かなくなるため、細心の注意が必要である。

FP1A～FP1Dでは、較正試験時に加圧から減圧及び減圧から加圧に転じるときにコアロッドの動きがスムースでなく、約0.1 MPaの、いわゆる不感帯が現れた。この様子をFig.12に示す。これらの圧力計の真直度を測定した結果、0.5～0.6 /全長であることが分った。このため、FP1Dについて差動トランスアセンブリとベローズアセンブリとの溶接部を切削し分離した後、治具を使用して真直度を良好に保ちつつ再溶接した結果、不感帯は解消した。これらの結果を考慮し、FP2A及び2Bの製作では、溶接時に特別の治具を用いた結果、直直度は0.1 /全長に抑えられ、不感帯は現れなかった。

(2) スプリング・ベローズ系駆動性の改善

(1)とも若干関連するが、FP1A～1Dの設計では、スプリングが引張力を受けて伸びる時に変形の軸がずれる事が明らかとなった。このため、FP2A, 2Bでは、スプリングの両端の直線部分をなくして圧縮側で使用する様に変更した。

(3) スプリングの熱処理

スプリングのバネ定数は設計で約4.4 kg/mmと規定され、それに応じてスプリングの直径、線径等が決められた。製作後、バネ定数を安定させるため、スプリングの熱処理が行われる。本圧力計に用いたスプリングは710 °Cで2時間保持された。その結果、最終的なバネ定数は3.7～4.5 kg/mmものによってバラツキが見られた。従って、設計値に近いバネ定数のスプリングを得るために、スプリングの加工精度を上げるとともに、必要数よりかなり多目にバネを製作し、熱処後に適当なものを選ぶことが必要である。

(4) 外筒真円度

本圧力計の外筒の設計外圧は9 MPaと非常に高いため、座屈に対する考慮が必要である。計算によれば、本圧力計の限界圧力は、設計外圧9 MPaに対し約2の安全率を有する。しかし、外筒の初期不整、特に偏平が大きいと限界圧力は著しく減少するので、真円度には注意する必要があ

る。

チモシェンコ⁽³⁾に依れば、偏平円筒の座屈については次式が成立する。

$$u_0 = \left(\sigma - \frac{pR}{t} \right) \left(1 - \frac{p}{p_c} \right) \cdot \frac{t^2}{6_p R}$$

u_0 ; $(R_{max} - R_{min})/2$ (R は半径)

σ ; 許容応力

p ; 外圧

t ; 肉厚

p_c ; 相当する真円の限界圧力

いま、許容応力として降伏応力をとると、設計外圧 9 MPa に対し許容される偏平限界は $u_0 = 0.04$ mm となる。従って $R_{max} - R_{min} < 0.8$ mm ならば設計条件下では座屈は生じない。製作では、これに 2ないし 3 の安全率をとり基準を設定する必要がある。これは実際に十分達成可能な値である為、実施上特に問題は見当らないが、重要なチェック項目の一つであるため、検査項目に含める必要がある。

4.2 検査結果

ベローズ及び差動トランスアセンブリの単品及び完成時、両アセンブリを接続した後の FP ガス圧力計として完成した後に検査を実施した。それぞれの検査項目は次のとおりである。

(1) ベローズアセンブリ

① 単品検査

- | | |
|-----------|----------|
| ・外観写真 | ・外観・寸法検査 |
| ・材料検査 | ・重量測定 |
| ・荷重変位特性試験 | |

② 完成検査

- | | |
|------------|-----------|
| ・外観写真 | ・外観・寸法検査 |
| ・溶接部検査 | ・He リーク検査 |
| ・圧力・変位特性試験 | ・全体 X 線写真 |
| ・ベローズ耐圧試験 | ・外筒耐圧試験 |

(2) 差動トランスアセンブリ

① 単品検査

- | | |
|---------|----------|
| ・外観写真 | ・外観・寸法検査 |
| ・材料検査 | ・重量測定 |
| ・導通絶縁検査 | |

(2) 完成検査

- ・外観写真
- ・He リーク検査
- ・伸び較正試験
- ・導通絶縁検査
- ・溶接部検査
- ・全体 X 線写真

(3) FP ガス圧力計

(1) 完成検査

- ・外観写真
- ・導通絶縁検査
- ・溶接部検査
- ・耐圧試験
- ・外観・寸法検査
- ・He リーク検査
- ・圧力較正試験
- ・重量測定

ベローズアセンブリの圧力変位特性試験結果を Table 7 に示す。また一例として FP 2 A に組み込んだベローズアセンブリの 400°C における試験結果を Fig. 13 に示す。直線性、ヒステリシスとも非常に優れており、従ってベローズアセンブリは満足出来る性能を有していることが分った。*

また、差動トランスアセンブリの伸び較正試験結果を Table 8 ~ 9 に示す。また一例として FP 2 A に組み込んだ差動トランスアセンブリの 400°C における試験結果を Fig. 14 に示す。本圧力計での差動トランスコアロッドの移動量設計値は約 2 mm であるが、差動トランス自体はこれを越える約 3 mm の広い範囲にわたり極めて優れた直線性を有することが分った。

但し、今後の使用に際しては、 $(E_1 - E_2) / (E_1 + E_2) = 0$ 付近を避けることが望しい。この付近では、信号処理機の演算精度が悪く、計算誤差が大きくなるためである。

* フルスケールに対する変位量は、設計目標より若干低く、1.3 ~ 1.7 mm であった。

Table 7 Bellows assembly calibration data

P (MPa)	Na	FP 1 A			FP 1 B			FP 1 C			FP 1 D			FP 2 A			FP 2 B			Displacement (mm)		
		Temp	R.T.	400°C	R.T.	400°C	R.T.	400°C	R.T.	400°C	R.T.	400°C	R.T.	400°C	R.T.	400°C	R.T.	400°C	R.T.	400°C	R.T.	400°C
0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.4	0.271	0.299	0.288	0.312	0.274	0.297	0.270	0.294	0.352	0.360	0.369	0.381	0.392	0.344	0.350	0.352	0.356	0.367	0.367	0.367	0.367	
0.7	0.547	0.595	0.572	0.618	0.562	0.606	0.537	0.583	0.692	0.703	0.722	0.746	0.765	0.675	0.686	0.697	0.708	0.728	0.728	0.728	0.728	
1.0	0.818	0.887	0.856	0.922	0.846	0.910	0.804	0.876	1.024	1.040	1.067	1.101	1.130	1.002	1.014	1.037	1.059	1.080	1.080	1.080	1.080	
1.3	1.089	1.183	1.141	1.230	1.129	1.222	1.079	1.166	1.352	1.373	1.407	1.451	1.491	1.332	1.343	1.368	1.393	1.427	1.427	1.427	1.427	
1.6	1.362	1.478	1.426	1.538	1.416	1.529	1.351	1.457	1.677	1.705	1.744	1.802	1.855	1.652	1.667	1.699	1.731	1.765	1.765	1.765	1.765	
1.3	1.105	1.187	1.141	1.230	1.146	1.230	1.084	1.165	1.355	1.378	1.412	1.465	1.508	1.334	1.345	1.371	1.397	1.426	1.426	1.426	1.426	
1.0	0.828	0.890	0.856	0.925	0.857	0.920	0.812	0.874	1.024	1.040	1.067	1.100	1.134	1.009	1.018	1.038	1.058	1.079	1.079	1.079	1.079	
0.7	0.554	0.597	0.573	0.620	0.572	0.614	0.546	0.586	0.693	0.703	0.719	0.739	0.764	0.682	0.687	0.699	0.711	0.728	0.728	0.728	0.728	
0.4	0.278	0.301	0.289	0.314	0.288	0.306	0.272	0.291	0.354	0.359	0.366	0.375	0.386	0.347	0.348	0.352	0.356	0.366	0.366	0.366	0.366	
0.1	0.001	0	0	0.007	0	0.001	-0.002	0	0	0	-0.002	-0.008	-0.004	0.003	-0.001	0	-0.001	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	

Table 8 LVDT assembly calibration data (1)

No Core Position (mm)	F P 1 A						F P 1 B						F P 1 C						F P 1 D							
	R. T.	100°C	200°C	300°C	400°C	R. T.	100°C	200°C	300°C	400°C	R. T.	100°C	200°C	300°C	400°C	R. T.	100°C	200°C	300°C	400°C	R. T.	100°C	200°C	300°C	400°C	
-1.40	-.2148	-.2202	-.2238	-.2280	-.2515	-.2200	-.2245	-.2292	-.2350	-.2585	-.2369	-.2403	-.2483	-.2489	-.2780	-.2147	-.2170	-.2179	-.2210	-.2411						
-1.20	-.1842	-.1896	-.1923	-.1972	-.2150	-.1895	-.1934	-.1972	-.2025	-.2228	-.2050	-.2082	-.2153	-.2183	-.2413	-.1844	-.1856	-.1877	-.1894	-.2052						
-1.00	-.1537	-.1574	-.1608	-.1646	-.1793	-.1581	-.1607	-.1644	-.1688	-.1864	-.1721	-.1749	-.1810	-.1837	-.2036	-.1531	-.1548	-.1552	-.1573	-.1702						
-0.80	-.1224	-.1265	-.1291	-.1322	-.1428	-.1253	-.1279	-.1314	-.1349	-.1478	-.1383	-.1417	-.1458	-.1482	-.1645	-.1220	-.1233	-.1237	-.1258	-.1369						
-0.60	-.0912	-.0943	-.0962	-.0992	-.1067	-.0935	-.0961	-.0986	-.1002	-.1098	-.1040	-.1064	-.1094	-.1132	-.1238	-.0916	-.0920	-.0918	-.0937	-.1098						
-0.40	-.0602	-.0629	-.0663	-.0663	-.0713	-.0622	-.0680	-.0659	-.0663	-.0736	-.0696	-.0709	-.0731	-.0755	-.0825	-.0611	-.0616	-.0616	-.0604	-.0615	-.0667					
-0.20	-.0302	-.0316	-.0367	-.0323	-.0359	-.0309	-.0315	-.0328	-.0329	-.0329	-.0374	-.0352	-.0355	-.0355	-.0391	-.0417	-.0306	-.0306	-.0293	-.0298	-.0315					
0.00	-.0002	0	-.0003	0	-.0001	.0001	.0002	.0003	.0002	.0003	-.0003	.0001	.0001	-.0001	-.0001	-.0001	-.0001	-.0001	-.0001	-.0004	.0004					
0.20	.0314	.0316	.0315	.0336	.0366	.0316	.0321	.0322	.0336	.0356	.0343	.0362	.0363	.0358	.0358	.0305	.0303	.0303	.0307	.0334	.0337					
0.40	.0626	.0632	.0650	.0674	.0698	.0637	.0650	.0660	.0674	.0670	.0684	.0721	.0722	.0729	.0807	.0609	.0615	.0620	.0630	.0675						
0.60	.0939	.0960	.0976	.1014	.1077	.0945	.0989	.0998	.1026	.1104	.1009	.1083	.1089	.1101	.1213	.0913	.0928	.0939	.0949	.1020						
0.80	.1263	.1278	.1306	.1337	.1427	.1250	.1322	.1336	.1378	.1485	.1357	.1452	.1451	.1470	.1629	.1225	.1246	.1250	.1266	.1376						
1.00	.1569	.1596	.1640	.1650	.1788	.1560	.1654	.1669	.1732	.1865	.1715	.1801	.1820	.1845	.2046	.1544	.1565	.1562	.1568	.1733						
1.20	.1884	.1908	.1972	.1982	.2130	.1884	.1985	.2000	.2075	.2237	.2072	.2152	.2189	.2209	.2449	.1850	.1883	.1878	.1922	.2095						
1.40	.2184	.2210	.2283	.2293	.2489	.2191	.2280	.2320	.2405	.2598	.2428	.2497	.2563	.2581	.2856	.2167	.2207	.2203	.2248	.2480						

Table 9 LVDT assembly calibration data (2)

$$\text{LVDT Output} \left(\frac{E_1 - E_2}{E_1 - E_2} \right)$$

Core Position (mm)	Temp.	FP 2 A				FP 2 B				
		R.T.	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	R.T.	100 °C	200 °C	300 °C
-1.40	-2093	-2132	-2193	-2186	-2498	-2066	-2142	-2198	-2270	-2508
-1.20	-1801	-1826	-1919	-1895	-2164	-1790	-1851	-1890	-1966	-2134
-1.00	-1498	-1516	-1599	-1569	-1806	-1507	-1544	-1571	-1658	-1777
-0.80	-1194	-1208	-1286	-1243	-1442	-1204	-1239	-1245	-1338	-1423
-0.60	-0895	-0888	-0965	-0937	-1078	-0898	-0927	-0929	-1009	-1063
-0.40	-0587	-0580	-0653	-0638	-0725	-0601	-0623	-0613	-0678	-0708
-0.20	-0294	-0277	-0340	-0320	-0365	-0308	-0328	-0296	-0352	-0360
0.00	-0004	.0030	-0027	.0000	-0018	-0019	-0022	.0011	-0011	-0013
0.20	.0298	.0335	.0287	.0320	.0320	.0271	-0281	.0315	.0302	.0335
0.40	.0594	.0649	.0599	.0649	.0649	.0558	.0586	.0622	.0619	.0685
0.60	.0896	.0961	.0924	.0969	.1001	.0850	.0890	.0930	.0933	.1033
0.80	.1206	.1279	.1240	.1296	.1363	.1146	.1193	.1243	.1250	.1389
1.00	.1515	.1591	.1560	.1627	.1727	.1451	.1503	.1562	.1573	.1755
1.20	.1820	.1911	.1873	.1948	.2087	.1754	.1803	.1887	.1886	.2107
1.40	.2122	.2228	.2178	.2263	.2442	.2066	.2109	.2207	.2201	.2458

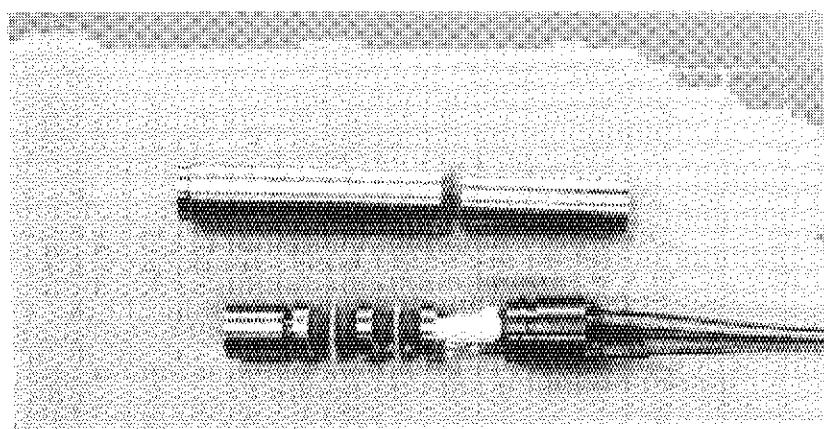


Fig. 9 LVDT assembly

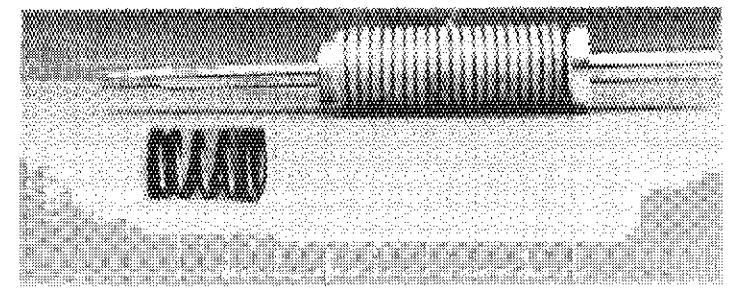


Fig. 10 Bellows assembly

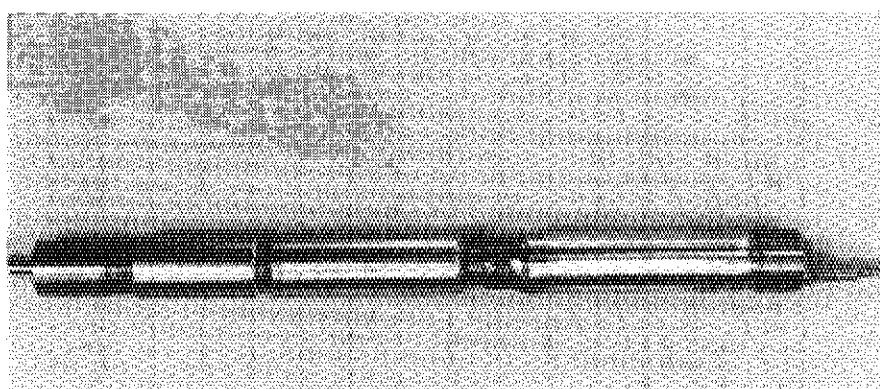
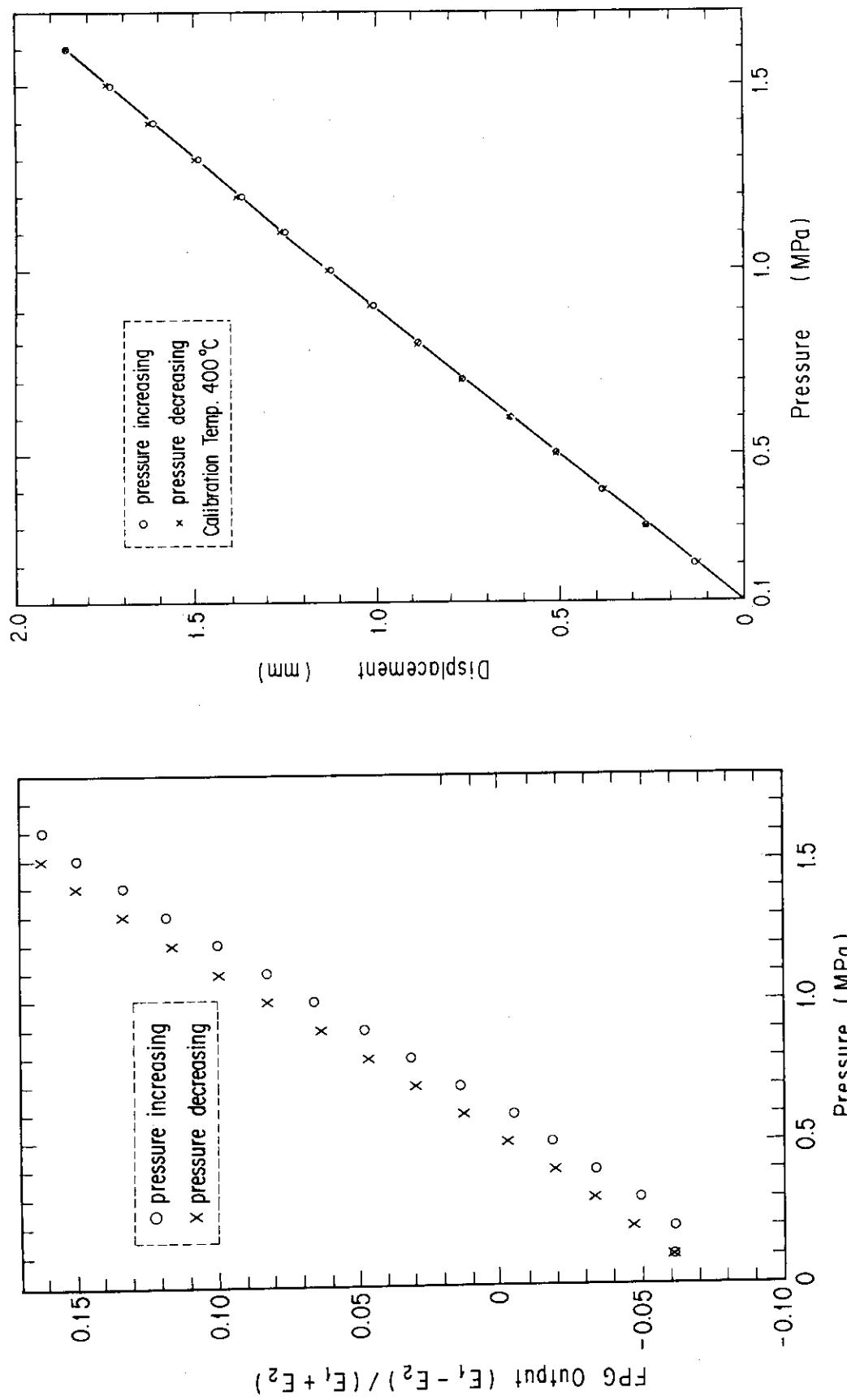


Fig. 11 Fission gas pressure gage



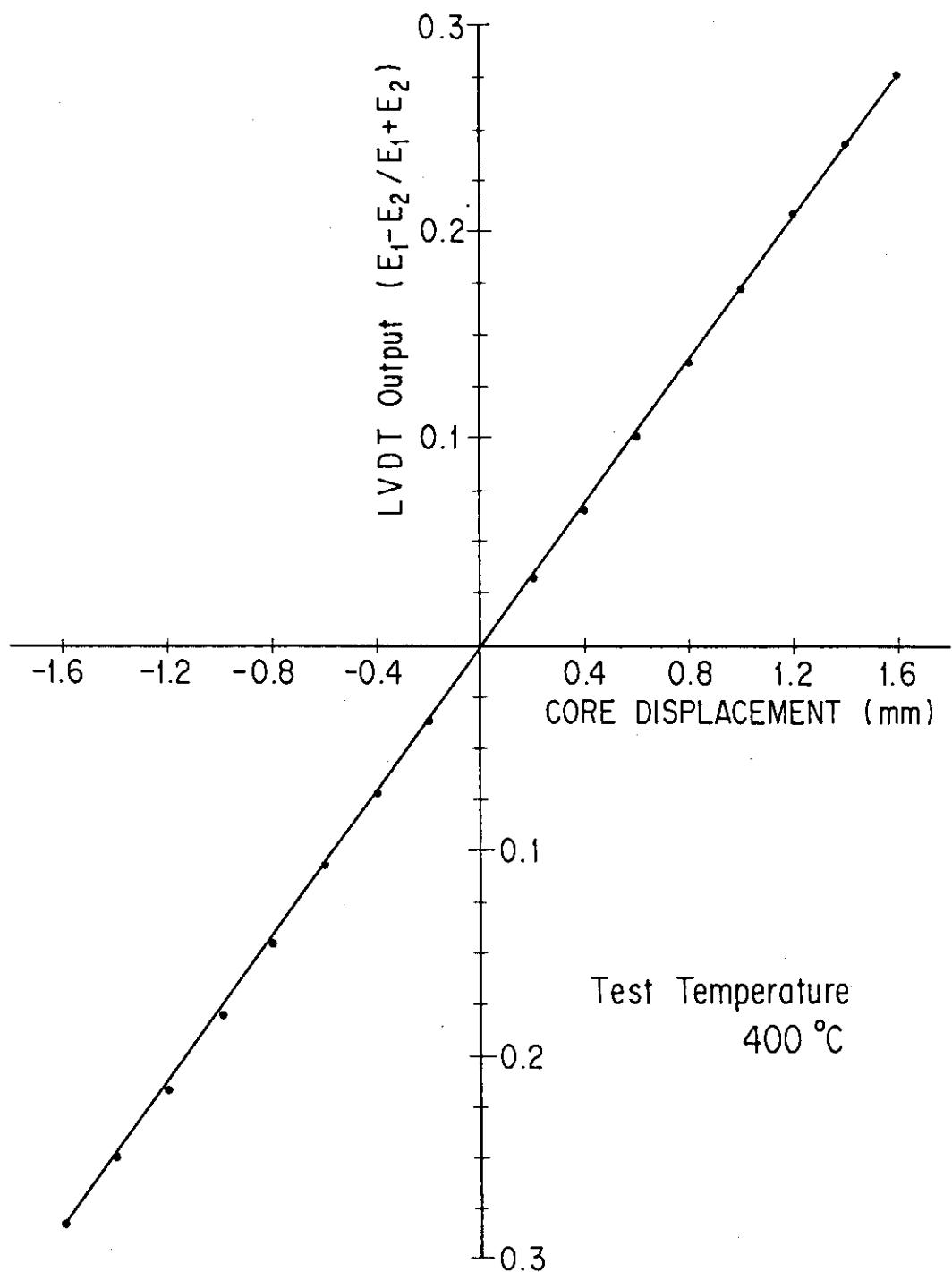


Fig. 14 LVDT assembly calibration data

5. 性能試験

5.1 F P ガス圧力計の性能評価パラメータ

F P ガス圧力計の性能を評価するために、F P ガス圧力計の性能を代表する以下に示す 5 つのパラメータを設定した。これらのパラメータは、いずれも較正試験から得られる値である。

(1) 零点のシフト

本圧力計では、ベローズ及びスプリングから成る変形機構を採用していることから、出力の温度依存性が生じることは避けられないが、これについては、較正試験時にデータを採っておくことより補正出来る。従って、零点のシフトが問題となるのは、一定温度条件下にもかかわらずドリフトしていく様な場合である。これは、実際の供用時には非常に重要なパラメータの一つである。

(2) 直線性

原理上、本圧力計の出力は圧力変化に対し線形であると考えられる。従って、較正データは直線で近似されるはずであり、この直線からのずれは、測定精度を悪くする一つの要因である。較正データの直線性は、データの回帰直線の誤差項の分散 σ^2 ⁽⁴⁾ から判断される。

$$\sigma^2 = \frac{\sum (Y_i - (\alpha + \beta X_i))^2}{n - 2}$$

Y_i ; F P ガス圧力計出力

X_i ; 圧力 (MPa)

n ; データ数

α , β は、最小 2 乗法により求めた較正データの回帰直線である。

$$Y_i = \alpha + \beta X_i$$

$$\beta = \left(\frac{\sum X_i Y_i}{n} - \bar{X} \cdot \bar{Y} \right) / \left(\frac{\sum X_i^2}{n} - \bar{X}^2 \right)$$

$$\alpha = \bar{Y} - \beta \bar{X}$$

Y_i は X_i に比較して 2 衡程小さい値なので、回帰計算上、 X_i と Y_i の重みのバランスをとるために、 $Y_i = Y_i \times 100$ と置き換えている。 σ^2 から直観的に直線性を把握することは出来ないが、直線性の相対的比較等は可能である。

(3) 感 度

感度は、単位圧力の変化に対し、F P ガス圧力計の出力がどれだけ変化するかを表わすパラメータであり、次式で定義する。

$$\text{Sensitivity} = \frac{\left[\frac{1.6 \text{ MPa}}{\text{FPガス圧力計出力}} \right] - \left[\frac{0.1 \text{ MPa}}{\text{FPガス圧力計出力}} \right]}{1.5} \quad (\text{MPa}^{-1})$$

(4) ヒステリシス

同圧力に対する FP ガス圧力計出力は常に等しいはずであるが、実際には圧力上昇中と下降中では僅かに異なっており、これはヒステリシスのためである。本来、ヒステリシスは上昇及び下降時の較正曲線の囲む面積で定義するべきであるが、本圧力計の場合は較正曲線の囲む面積が非常に小さく、面積計算をしても誤差が大きくなる。従って、ヒステリシスとしては次の値を定義した。

$$\text{Hysteresis} = \sum_{p=0.1}^{1.5} \left[\left(\frac{\text{圧力上昇時の } p \text{ MPa}}{\text{FPガス圧力計出力}} \right) - \left(\frac{\text{圧力下降時の } p \text{ MPa}}{\text{FPガス圧力計出力}} \right) \right] \times \frac{1}{15} \times \frac{100}{\left(\frac{1.6 \text{ MPa}}{\text{FPガス圧力計出力}} \right) - \left(\frac{0.1 \text{ MPa}}{\text{FPガス圧力計出力}} \right)} \quad (\%)$$

即ち、圧力上昇時及び下降時の同圧力に対する FP ガス圧力計出力の差の絶対値の和を点数で割って平均を求め、その値のフルスケールに対する割合を % で表わしたものである。

(5) 絶縁抵抗値

本圧力計では、絶縁抵抗が $10^4 \sim 10^5 \Omega$ 程度までは正常な出力信号が得られる。それ以下になるとノイズの混入、励磁電流のリーク等から出力信号が非常に不安定になる。従って、絶縁抵抗が安定していることは最も重要である。

5.2 炉外性能試験

5.2.1 炉外較正試験

製作した FP ガス圧力計 6 体全てについて炉外にて較正試験を実施した。較正試験装置について Fig. 15 に示す。装置は、圧力調節系及び温度調節系を組み合わせた単純な構造である。

また、FP ガス圧力計の出力電圧 E_1 及び E_2 を含めたデータについては付録に示す。

Fig. 12 に一例を示したとおり、初年度に製作した FP 1A ~ 1D ではヒステリシスが大きく、圧力計として十分な出来ではなかった。原因を検討し、特に真直度の点で改善を行った結果、次年間に製作した FP 2A 及び 2B ではヒステリシスは極めて小さくなり、圧力計として満足の出来るものとなった。

FP 2A 及び 2B に関する各性能訂価パラメータの値を Fig. 15, 16 に示す。同図から FP 2A 及び 2B とも、感度及び直線性は温度が上昇するにつれて僅かに上昇する傾向にあることが分る。零点は、温度によって少なからず変化するが、較正時に詳細にデータを採っておく事で対処出来る。ヒステリシスは温度依存性が見られず、平均してフルスケールに対し約 0 ~ 2 % 程度であった。絶縁抵抗は、室温で約 $10^{11} \Omega$ 、400 °C では $10^7 \sim 10^8 \Omega$ まで低下するが、測定には全く支障のない値である。

以上から、炉外では FP 2A 及び FP 2B は、室温～400°C の範囲で安定した特性を示し、十分使用可能であることを確認した。

5.2.2 炉外熱サイクル試験

FP ガス圧力計の熱サイクルに対する耐久性を確認するために、FP 1A 及び FP 1B の 2 体について炉外にて熱サイクル試験を実施した。試験では、零点のドリフト、感度及び絶縁抵抗の変化等に注目した。

負荷熱サイクル条件については、JMTR 出力急昇試験設備で将来予定している照射実験を参考して Fig.18 に示すとおりとし、これを 100 回くり返した。試験終了後に較正試験を行い、試験開始前のものと比較した。その結果について Table 10 に示す。

絶縁抵抗及び感度とも熱サイクル負荷前後の変化は小さく、本圧力計が熱サイクルに対し十分安定していることが示された。絶縁抵抗は、熱サイクル試験中、温度の変化に対応して規則的な変化を示した。

零点のドリフトについては、温度によって若干大きく出ており、零点の安定性についてはなお改善の余地がある。これに関しては、例えば製作時にスプリング・ベローズ系に負荷するプリテンションを少しだけ大きくする等の方法を講じる必要がある。

5.3 炉内性能試験

製作した 6 体の圧力計のうち FP 1D 及び FP 2A について炉内較正試験、さらに FP 2B については炉内実証試験を計画した。これらのうち、本節では、これまでに終了した FP 1D の炉内較正試験結果及び現在実施中である FP 2A の炉内較正試験の途中経過について報告する。FP 2B については、昭和 62 年 6 月から試験中であり、次報にまとめる。

5.3.1 FP 1D 炉内較正試験

FP 1D を照射用の 84M-40J キャップセルに装荷し、JMTR 75～76 サイクルに較正試験を行った。照射用キャップセルの構造について、Fig.19 に示す。また、JMTR 炉心内の照射位置について Fig.20 に示す。

試験の内容は、炉外較正試験の場合と殆ど同様であるが、温度コントロールは行わない為、照射温度下での較正のみである。将来、精度について厳密な議論をする段階では、ヒータ装置付きの照射用キャップセルを使用した温度別の炉内較正試験を行うことを検討する必要がある。

FP 1D の照射量は、約 $5.8 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2 (\phi f)$ である。照射温度については、FP ガス圧力計内の差動トランジスタの 1 次コイル用の M 1 ケーブル（クロメル・アルメル線使用）の熱起電力測定の結果から約 160°C と推定される。

JMTR 75 サイクルの原子炉起動時の較正データを Fig.21 に示す。原子炉出力の上昇、即ち FP ガス圧力計の温度上昇とともに零点が上昇した。また、Fig.20 から分る様に、較正曲線の傾きが殆ど変化していないことから温度変化により感度は殆ど変化しなかったと考えられ、これらの結果は、炉外較正試験の場合と同様である。

絶縁抵抗については、原子炉定格出力到達直後は、 $0.85\text{M}\Omega$ であったが、その後徐々に低下し、3日後には $0.5\text{M}\Omega$ 以下となり精密抵抗計の測定限界を下回った。絶縁抵抗の変化について、製作初期も含めてFig.22に示す。そして、約13日後には、テスター測定値で約 $18\text{K}\Omega$ まで低下した。この段階で出力信号が極めて不安定となり圧力測定不能となった為、試験を中止した。照射中、絶縁抵抗の低下とともに圧力計の零点が大きくドリフトした。この様子をFig.23に示す。なお、照射終了後の測定から、1次コイルと2次コイル間の絶縁抵抗が $126\text{ }\Omega$ に低下していることが分った。従って、両コイルが恐らくFPガス圧力計内部のいずれかの箇所で通じてしまったものと考えられる。本照射試験に使用した照射キャップセルには、同タイプの差動トランスを使用した炉内計測機器4体が装荷され同時にそれぞれの照射試験を実施していたが、これらのうち比較的中性子束の高い位置に装荷されていた他の2体にも全く同様の現象が観察された。従って、この現象を重視し、原因を調査することとした。本圧力計で使用している差動トランスについて、今回の様な絶縁低下の生じる可能性のある箇所として以下が考えられる。(Fig. 6 参照)

- ① コイル素線のアルミナ絶縁層
- ② コイルボビンのセラミックコーティング
- ③ MIケーブルとコイル素線の銀ろう接部
- ④ MIケーブルとニップルのEB溶接部
- ⑤ MIケーブル
- ⑥ MIケーブルと補償導線のコネクタ

これらの中から、絶縁抵抗低下の原因箇所を調べるために、本圧力計の模擬体を用いた照射実験を現在実施中である。

5.3.2 FP2A炉内較正試験

FP2Aを照射用の86M-40Jキャップセルに装荷し、JMTR78サイクルから炉内較正試験を開始した。JMTR82サイクルまで合計5サイクル照射する予定である。照射用キャップセルの構造についてFig.24に示す。また、JMTR炉心内の照射位置についてFig.20に示す。本試験も、FP1D同様、照射温度下での較正試験である。

JMTR78サイクル定格出力運転中のFP2Aの照射温度は、1次コイル用MIケーブルの熱起電力から $130 \sim 135\text{ }^{\circ}\text{C}$ と推定される。照射量は、78サイクル終了時で約 $1.1 \times 10^{20}\text{n/cm}^2(\phi f)$ に達した。

原子炉起動時の較正データをFig.25に示す。出力上昇とともに較正曲線は同図中上方へシフトする傾向にあるが、傾きも若干変化しており、これは炉外試験の場合と同様である。

また、定格出力運転中の較正試験結果についてTable 11に示す。また、試験結果を性能評価パラメータについてまとめFig. 26に示す。

照射中の本圧力計の絶縁抵抗は約 $2\text{M}\Omega$ であり、極めて安定していた。差動トランス自体の構造はFP1Dの場合と全く同様であるため、何故FP1Dの場合にのみ著しい絶縁低下が生じたのかについて今後原因を検討する予定である。

Fig. 24から、全ての性能評価パラメータは照射中安定していることが分った。パラメータの中には温度依存性が大きいものがあるため、より高温での特性は推定出来ないが、少なくとも今回

の照射温度（約 130°C）付近では、本圧力計は十分健全であることが確認された。

照射中の零点のドリフト及びヒステリシス等を考慮すると、本圧力計の測定精度は概略で約 1 ~ 2% F. S. と推定される。

なお、実際に本圧力計を供用する場合には、圧力較正式の計算誤差及び信号処理系の演算誤差が上記に加わり全体としての測定精度となるため、これらの誤差を少なくするための検討が今後の中心的課題である。

圧力較正式については、圧力は F P ガス圧力計及び温度の 2 変数の関数となるので、較正データから回帰式を求めるステップは複雑になる。これに関しては、同様に 2 変数を扱って回帰式を求めているクリープデータ解析に関する Larson - Miller 法⁽⁵⁾ が参考になると思われる。直交関数列を用いた回帰計算プログラムが適用可能である。

また、信号処理系の演算精度向上については、特性試験による演算精度の確認を行い、その結果によっては演算器等ハード面の一部改造等も検討する必要がある。

Table 10 Results of thermal cycling tests

Characteristics		Temperature (°C)	Before Thermal Cycling	After 100 Thermal Cycling	Characteristic Change (%)
FP1A	Zero Drift $\left(\frac{E_1 - E_2}{E_1 + E_2} \right)$	R. T. 1 0 0 2 0 0 3 0 0 4 0 0	- 0. 0 4 4 2 - 0. 0 4 5 4 - 0. 0 4 7 4 - 0. 0 4 8 1 - 0. 0 5 3 2	- 0. 0 4 2 5 - 0. 0 4 4 1 - 0. 0 4 6 3 - 0. 0 4 5 1 - 0. 0 4 6 4	3. 8 2. 9 2. 3 6. 2 1. 2. 8
	Sensitivity (MPa^{-1})	R. T. 1 0 0 2 0 0 3 0 0 4 0 0	0. 1 3 8 5 0. 1 4 3 1 0. 1 5 0 1 0. 1 5 7 9 0. 1 7 7 9	0. 1 3 7 5 (0. 2 1 4 6) 0. 1 5 2 1 0. 1 5 8 8 0. 1 7 8 5	- 0. 7 1. 3 0. 6 0. 1
	Insulation Resistance (Ω)	R. T. 4 0 0	$2. 6 \times 10^{10}$ $1. 7 \times 10^7$	$2. 2 \times 10^{10}$ $1. 5 \times 10^7$	
	Zero Drift $\left(\frac{E_1 - E_2}{E_1 + E_2} \right)$	R. T. 1 0 0 2 0 0 3 0 0 4 0 0	- 0. 0 6 2 0 - 0. 0 6 5 0 - 0. 0 7 1 4 - 0. 0 7 3 1 - 0. 0 7 3 6	- 0. 0 6 9 8 - 0. 0 6 3 9 - 0. 0 6 5 1 - 0. 0 6 7 1 - 0. 0 8 0 2	- 1. 2. 6 1. 7 8. 8 8. 2 - 9. 0
FP1B	Sensitivity (MPa^{-1})	R. T. 1 0 0 2 0 0 3 0 0 4 0 0	0. 1 5 0 9 0. 1 5 5 7 0. 1 7 0 1 0. 1 8 5 1	0. 1 5 6 4 0. 1 5 4 3 0. 1 6 1 1 0. 1 9 4 5	3. 6 - 0. 9 - 0. 0 2 - 1. 4 5. 1
	Insulation Resistance (Ω)	R. T. 4 0 0	$2. 0 \times 10^{10}$ $2. 3 \times 10^7$	$1. 5 \times 10^{10}$ $1. 2 \times 10^7$	

Table 11 FPG in-pile calibration data

		Former Half of 78 Cycle					Middle Shutdown			Latter Half of 78 Cycle			FPG Output $\left(\frac{E_1 - E_2}{E_1 + E_2} \right)$
Date	P (MPa)	1987 Mar. 19	1988 Mar. 21	1988 Mar. 23	1988 Mar. 25	1988 Mar. 27	1988 Mar. 31	1988 Apr. 3	1988 Apr. 6	1988 Apr. 8	1988 Apr. 10		
0.1	-0.0378	-0.0338	-0.0349	-0.0353	-0.0338	-0.0338	-0.0533	-0.0338	-0.0342	-0.0342	-0.0326	-0.0326	
0.2	-0.0159	-0.0148	-0.0161	-0.0166	-0.0152	-0.0152	-0.0361	-0.0150	-0.0152	-0.0141	-0.0138	-0.0138	
0.3	0.0055	0.0036	0.0024	0.0020	0.0036	0.0036	-0.0192	0.0339	0.0339	0.035	0.045	0.049	
0.4	0.0264	0.0220	0.0207	0.0201	0.0174	0.0028	0.0218	0.0215	0.0222	0.0222	0.0230	0.0230	
0.5	0.0468	0.0401	0.0386	0.0382	0.0399	0.0133	0.0398	0.0394	0.0404	0.0404	0.0408	0.0408	
0.6	0.0669	0.0578	0.0563	0.0555	0.0575	0.0290	0.0577	0.0569	0.0579	0.0579	0.0582	0.0582	
0.7	0.0863	0.0752	0.0731	0.0727	0.0744	0.0444	0.0746	0.0738	0.0746	0.0746	0.0755	0.0755	
0.8	0.1054	0.0920	0.0903	0.0902	0.0914	0.0600	0.0922	0.0913	0.0916	0.0916	0.0930	0.0930	
0.9	0.1259	0.1099	0.1075	0.1068	0.1084	0.0754	0.1127	0.1086	0.1086	0.1086	0.1095	0.1095	
1.0	0.1452	0.1267	0.1246	0.1238	0.1255	0.0910	0.1260	0.1256	0.1258	0.1258	0.1266	0.1266	
1.1	0.1648	0.1442	0.1414	0.1408	0.1426	0.1065	0.1431	0.1425	0.1427	0.1427	0.1435	0.1435	
1.2	0.1846	0.1615	0.1580	0.1576	0.1596	0.1221	0.1601	0.1596	0.1596	0.1596	0.1605	0.1605	
1.3	0.2040	0.1782	0.1754	0.1747	0.1767	0.1387	0.1772	0.1764	0.1773	0.1773	0.1774	0.1774	
1.4	0.2236	0.1947	0.1920	0.1914	0.1936	0.1537	0.1939	0.1931	0.1927	0.1927	0.1943	0.1943	
1.5	0.2426	0.2115	0.2088	0.2081	0.2108	0.1696	0.2110	0.2099	0.2105	0.2105	0.2112	0.2112	
1.6	0.2621	0.2285	0.2254	0.2248	0.2275	0.1853	0.2275	0.2254	0.2264	0.2264	0.2277	0.2277	
1.5	0.2428	0.2115	0.2087	0.2084	0.2110	0.1698	0.2110	0.2098	0.2104	0.2104	0.2114	0.2114	
1.4	0.2228	0.1947	0.1917	0.1918	0.1940	0.1539	0.1939	0.1930	0.1935	0.1935	0.1945	0.1945	
1.3	0.2031	0.1778	0.1749	0.1748	0.1770	0.1382	0.1770	0.1757	0.1765	0.1765	0.1775	0.1775	
1.2	0.1838	0.1607	0.1577	0.1577	0.1601	0.1223	0.1599	0.1590	0.1592	0.1592	0.1603	0.1603	
1.1	0.1643	0.1434	0.1408	0.1409	0.1430	0.1066	0.1430	0.1422	0.1422	0.1422	0.1434	0.1434	
0.7	0.0863	0.0757	0.0733	0.0729	0.0753	0.0448	0.0752	0.0742	0.0750	0.0750	0.0759	0.0759	
0.6	0.0675	0.0591	0.0562	0.0560	0.0584	0.0294	0.0582	0.0575	0.0582	0.0582	0.0588	0.0588	
0.5	0.0473	0.0410	0.0388	0.0386	0.0408	0.0136	0.0406	0.0399	0.0407	0.0407	0.0414	0.0414	
0.4	0.0264	0.0229	0.0182	0.0208	0.0229	-0.0026	0.0226	0.0222	0.0228	0.0228	0.0235	0.0235	
0.3	0.0060	0.0049	0.0029	0.0024	0.0047	-0.0191	0.0044	0.0041	0.0047	0.0047	0.0053	0.0053	
0.2	-0.0154	-0.0135	-0.0157	-0.0161	-0.0140	-0.0360	-0.0144	-0.0146	-0.0138	-0.0138	-0.0133	-0.0133	
0.1	-0.0374	-0.0324	-0.0341	-0.0350	-0.0330	-0.0530	-0.0335	-0.0333	-0.0325	-0.0325	-0.0322	-0.0322	

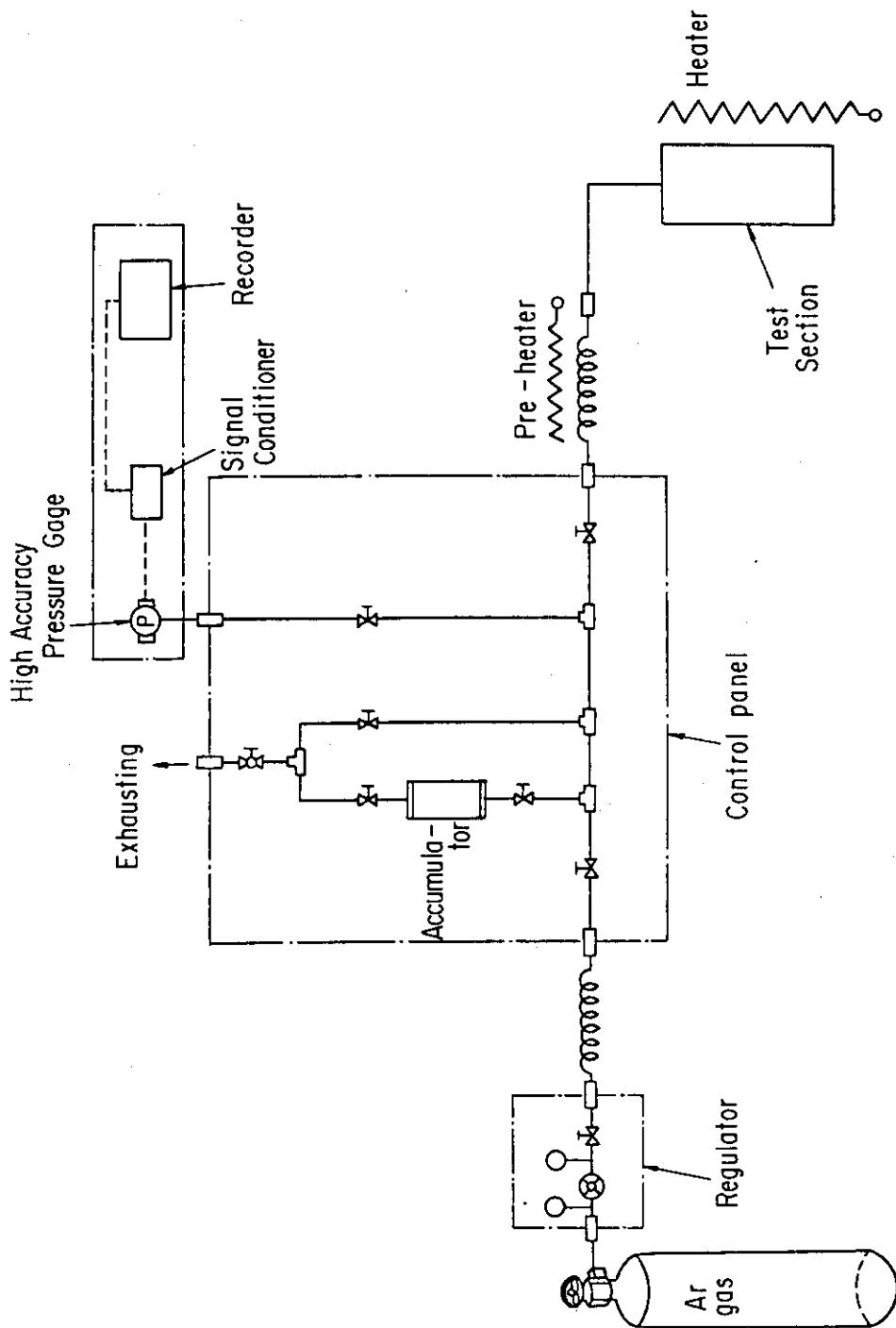


Fig. 15 Out-pile FPG calibration unit

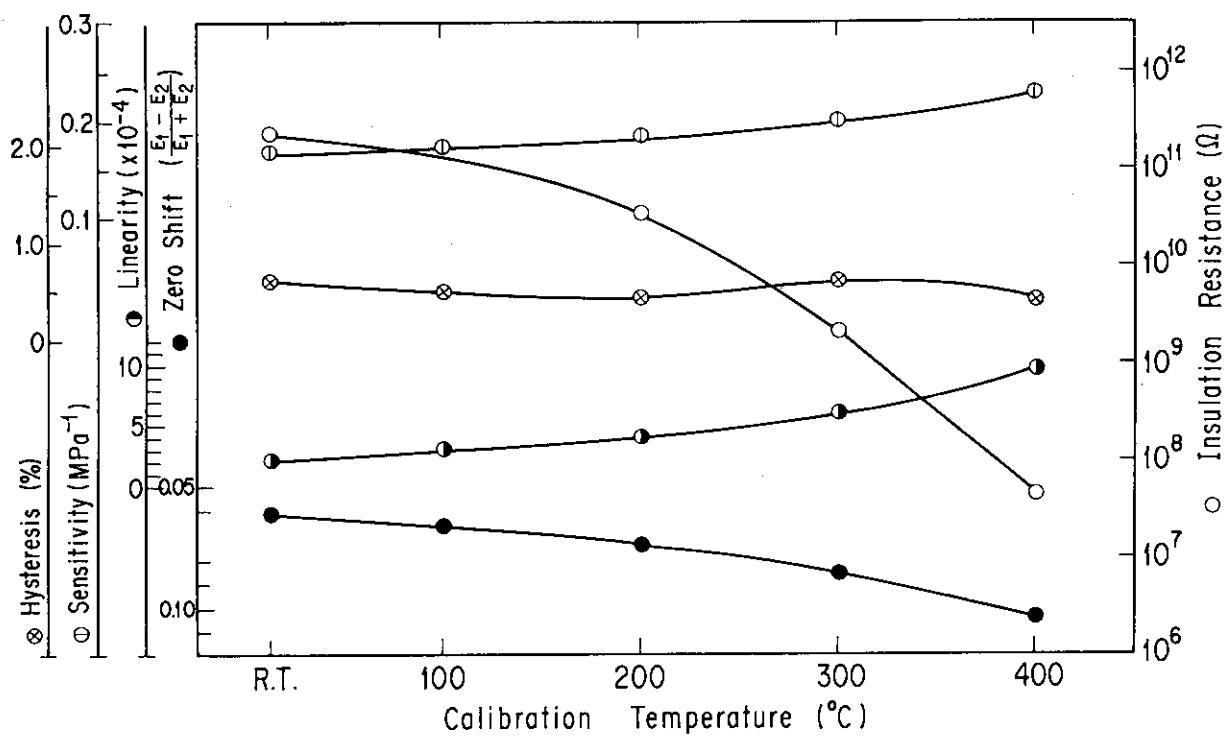


Fig. 16 Characteristics of FP2A in out-pile calibration test

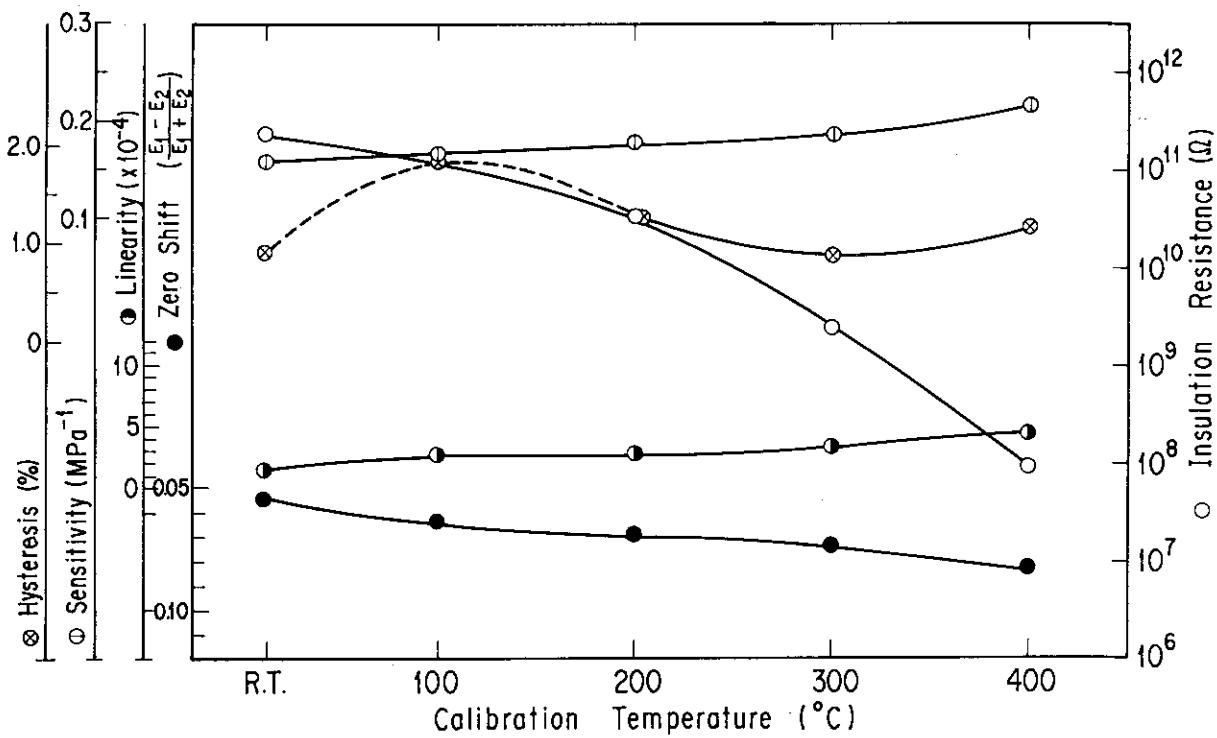


Fig. 17 Characteristics of FP2B in out-pile calibration test

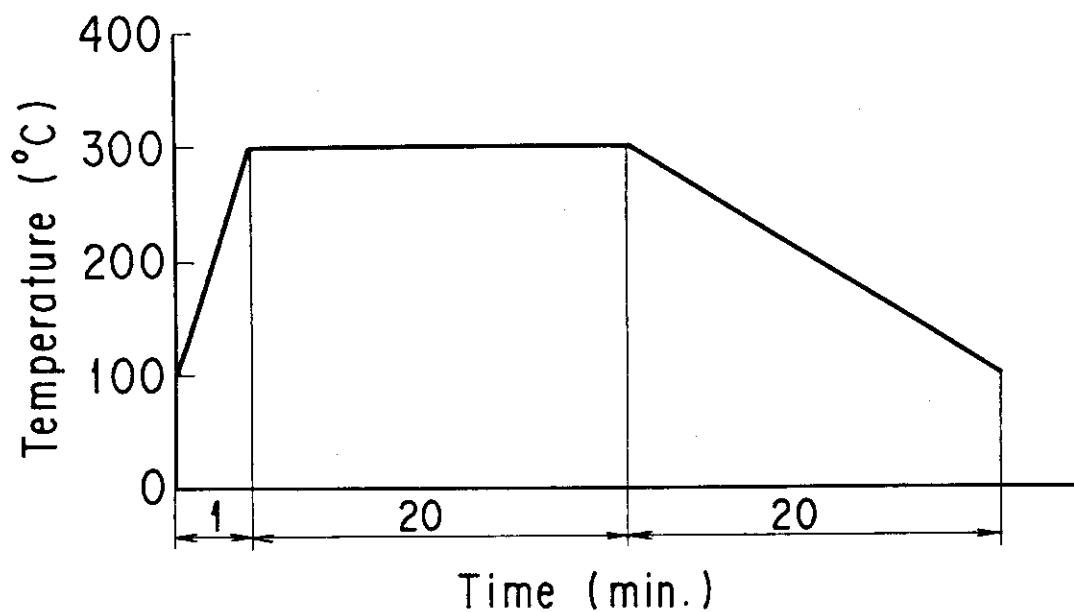
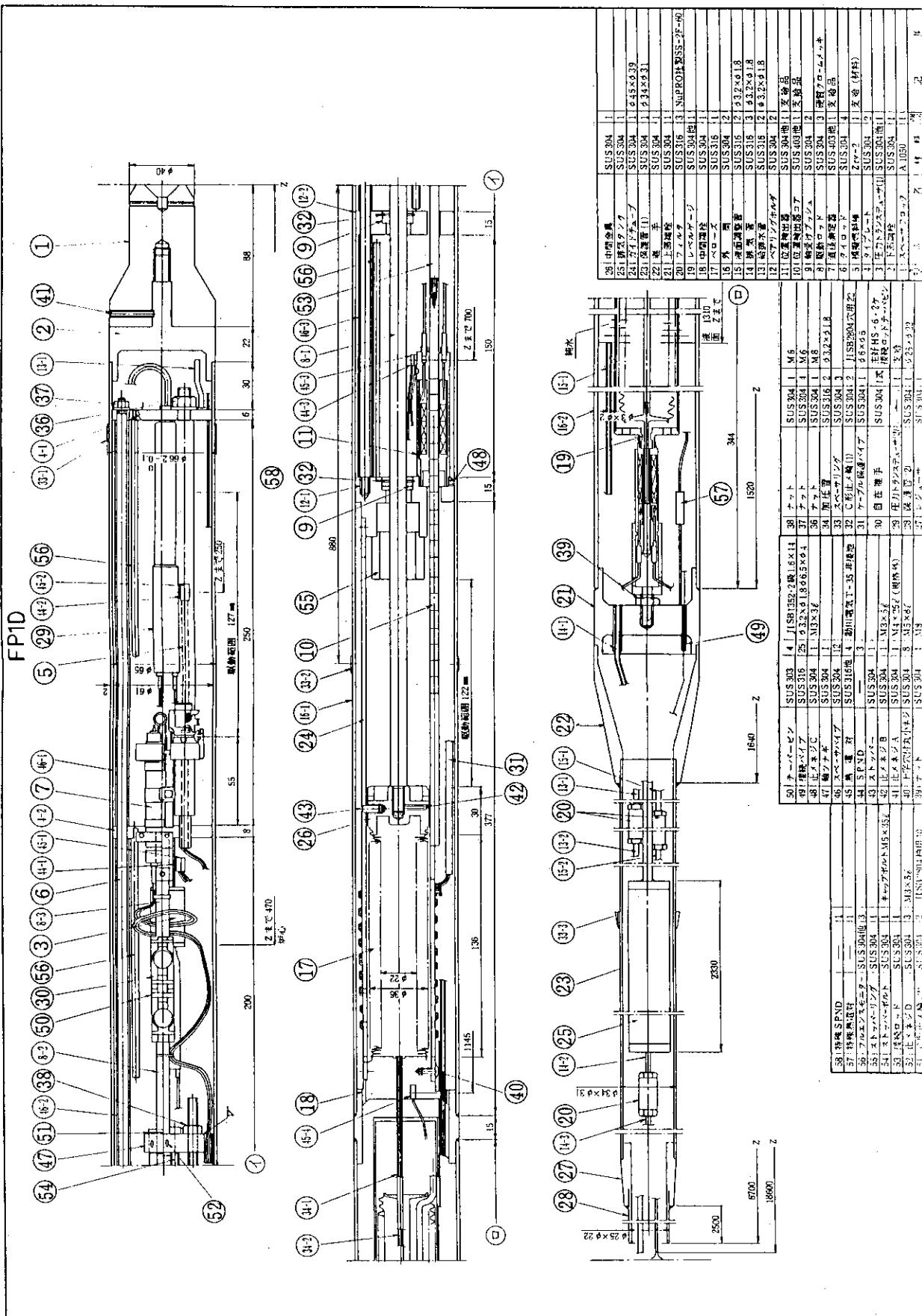


Fig. 18 Condition of applied thermal cycle



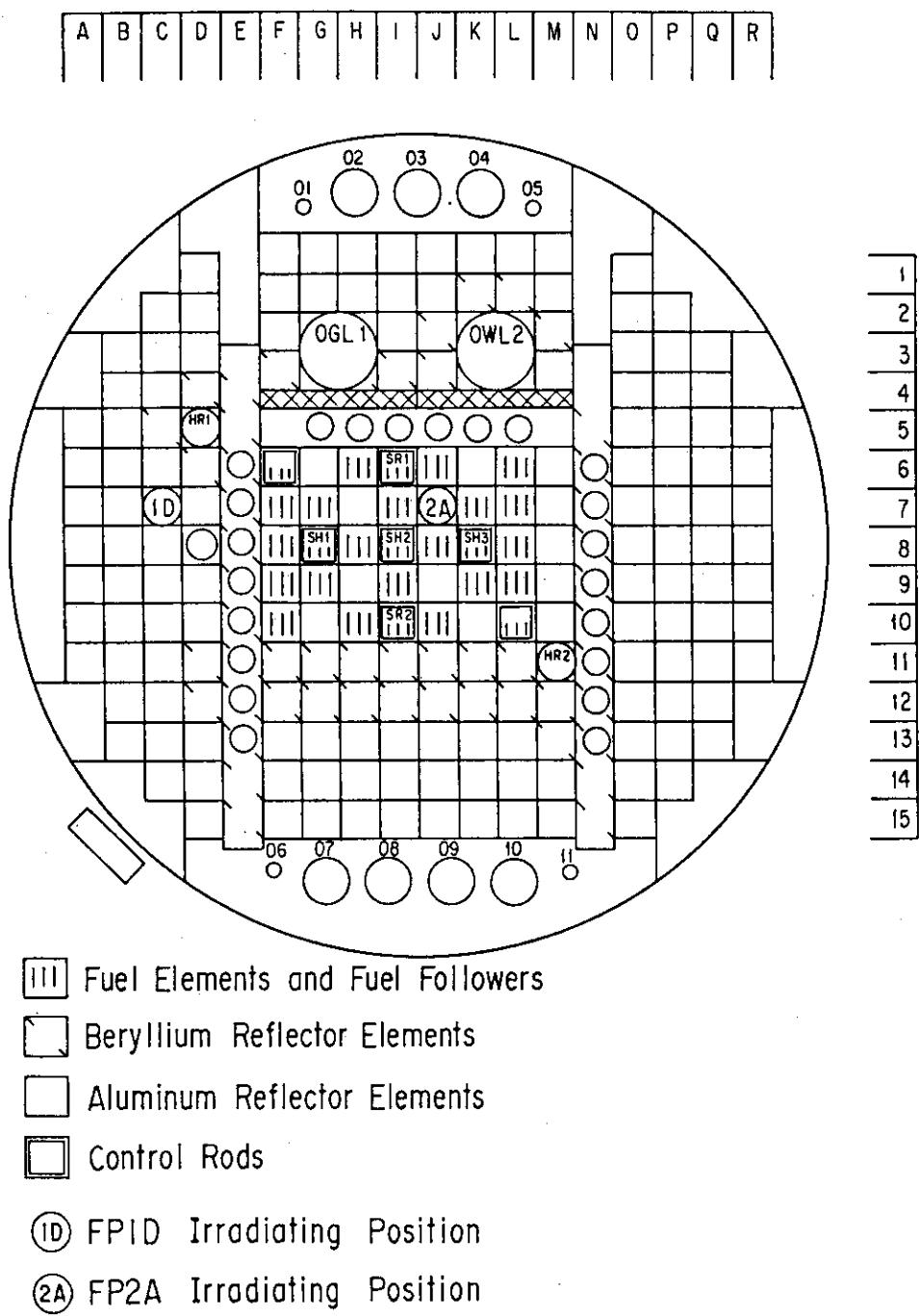


Fig. 20 FPG Irradiating position

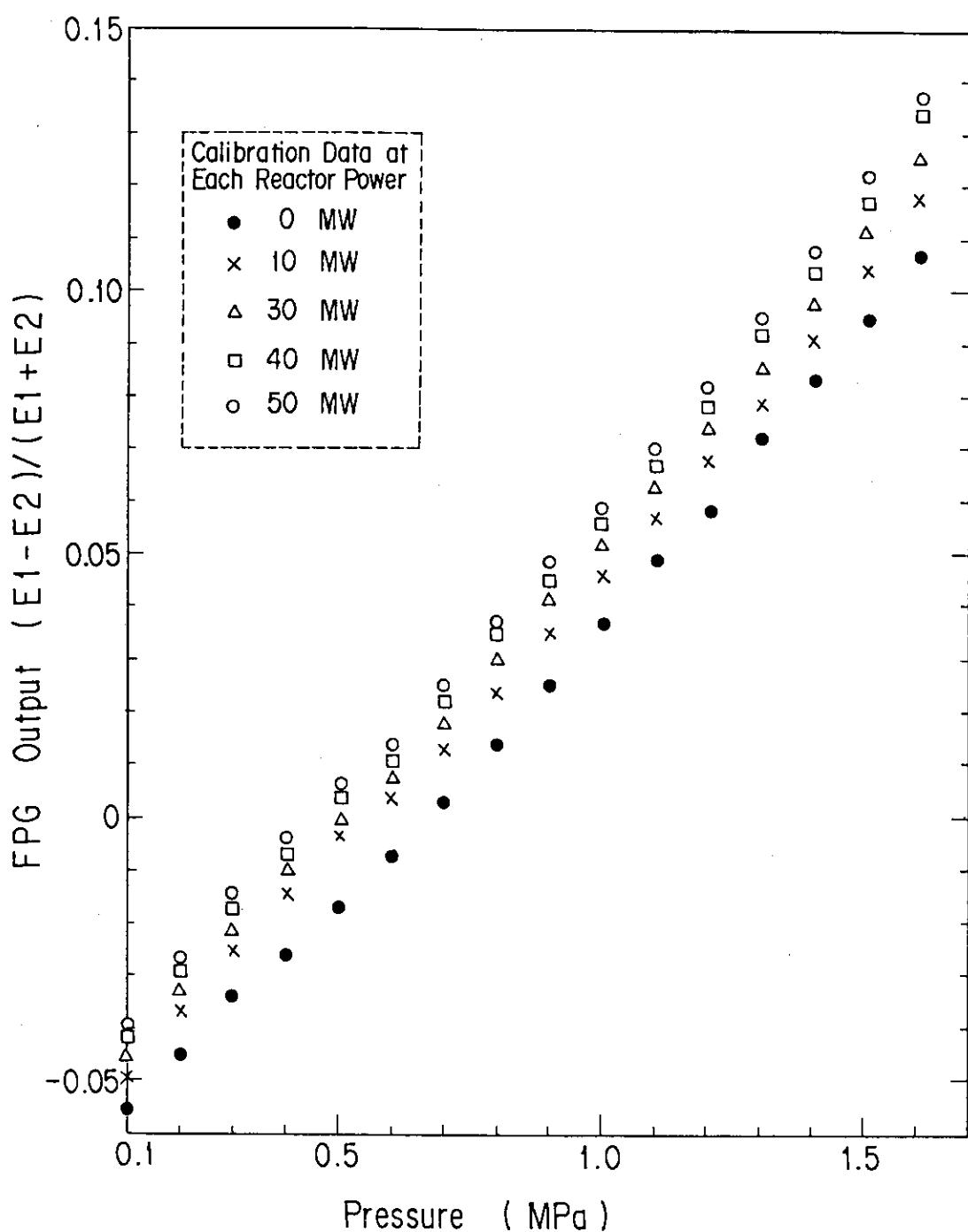


Fig. 21 FPG in-pile calibration data (FP1D)

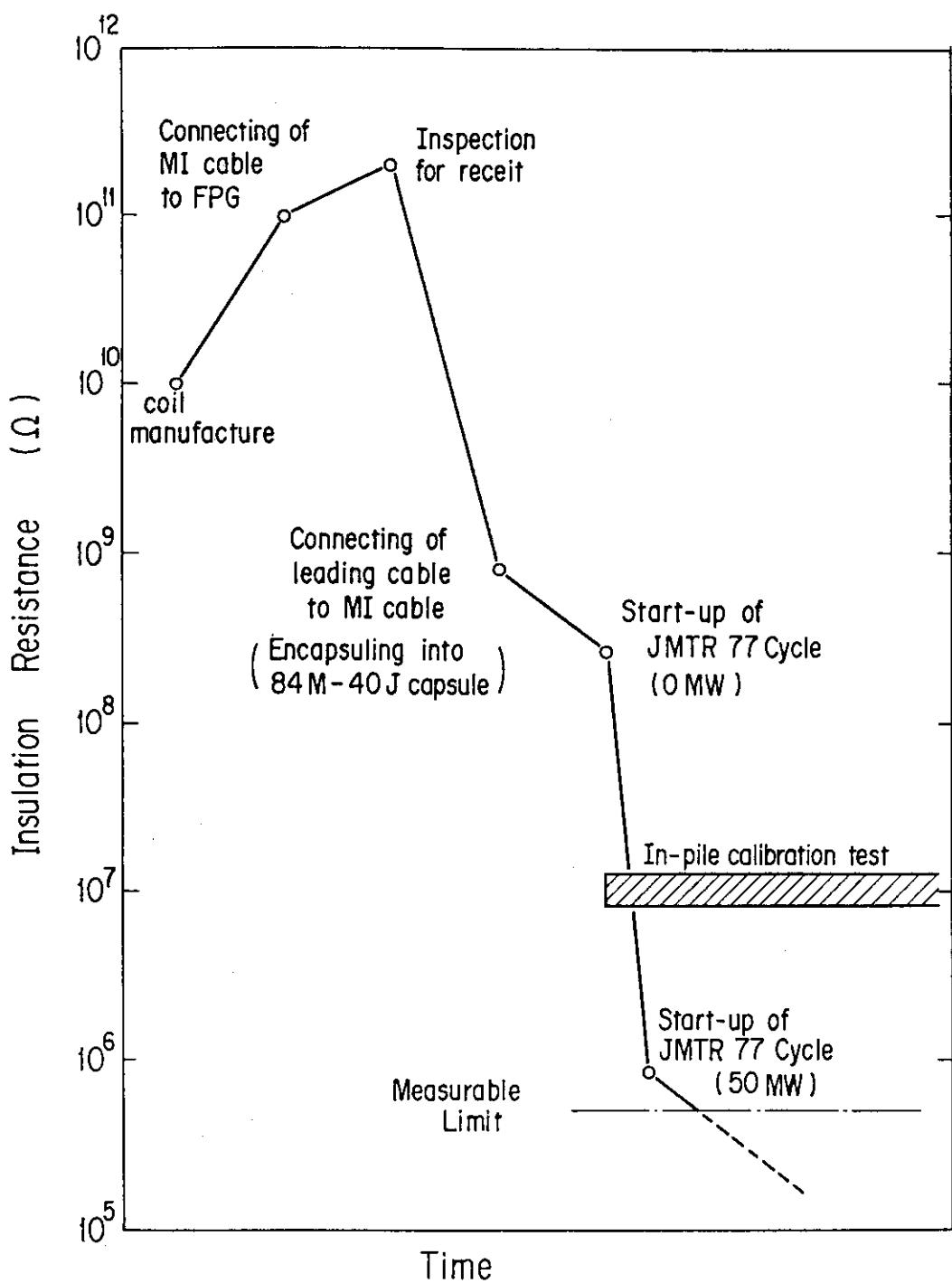


Fig. 22 History trend of insulation resistance of FPG (FP1D)

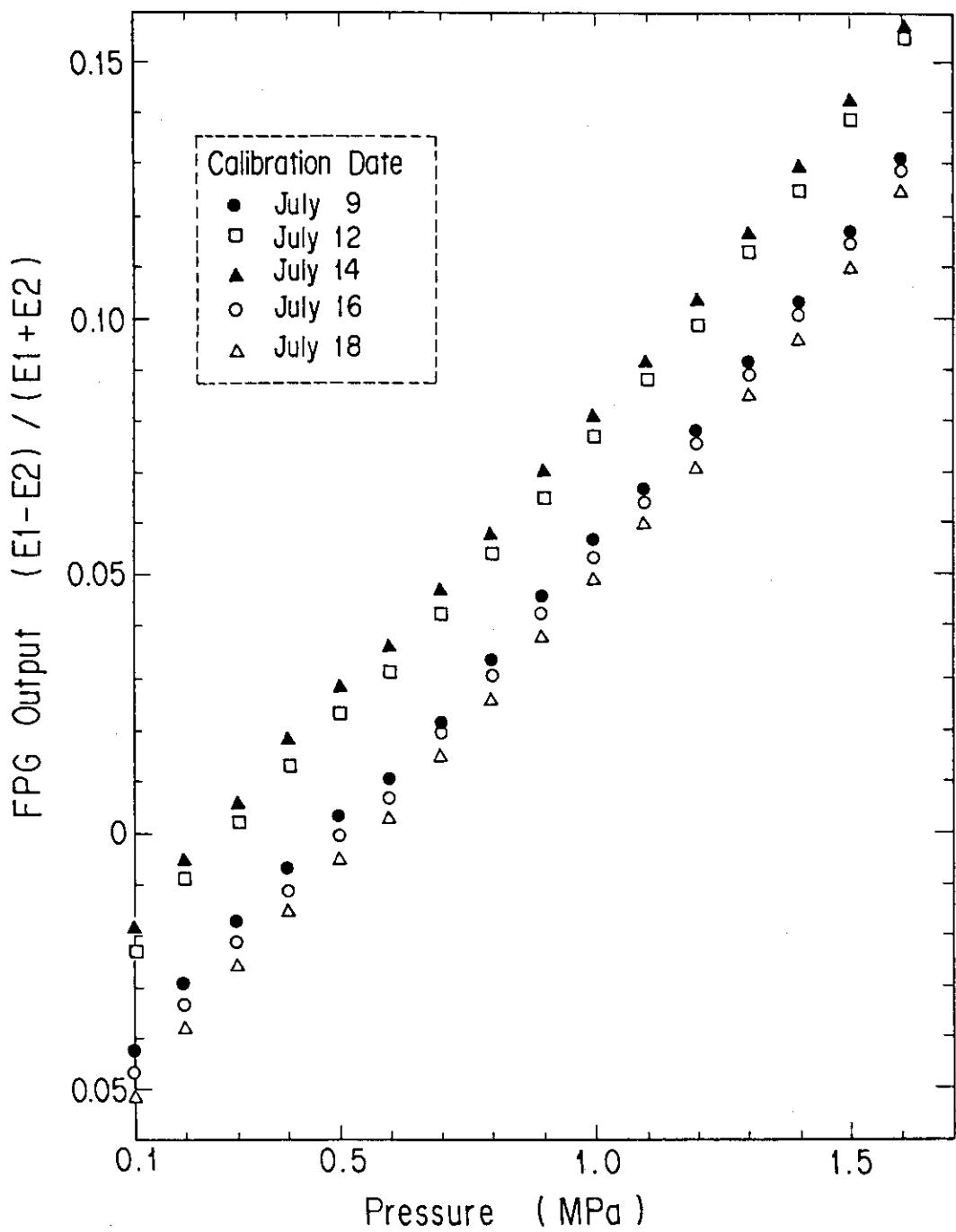


Fig. 23 FPG in-pile calibration data (FP1D)

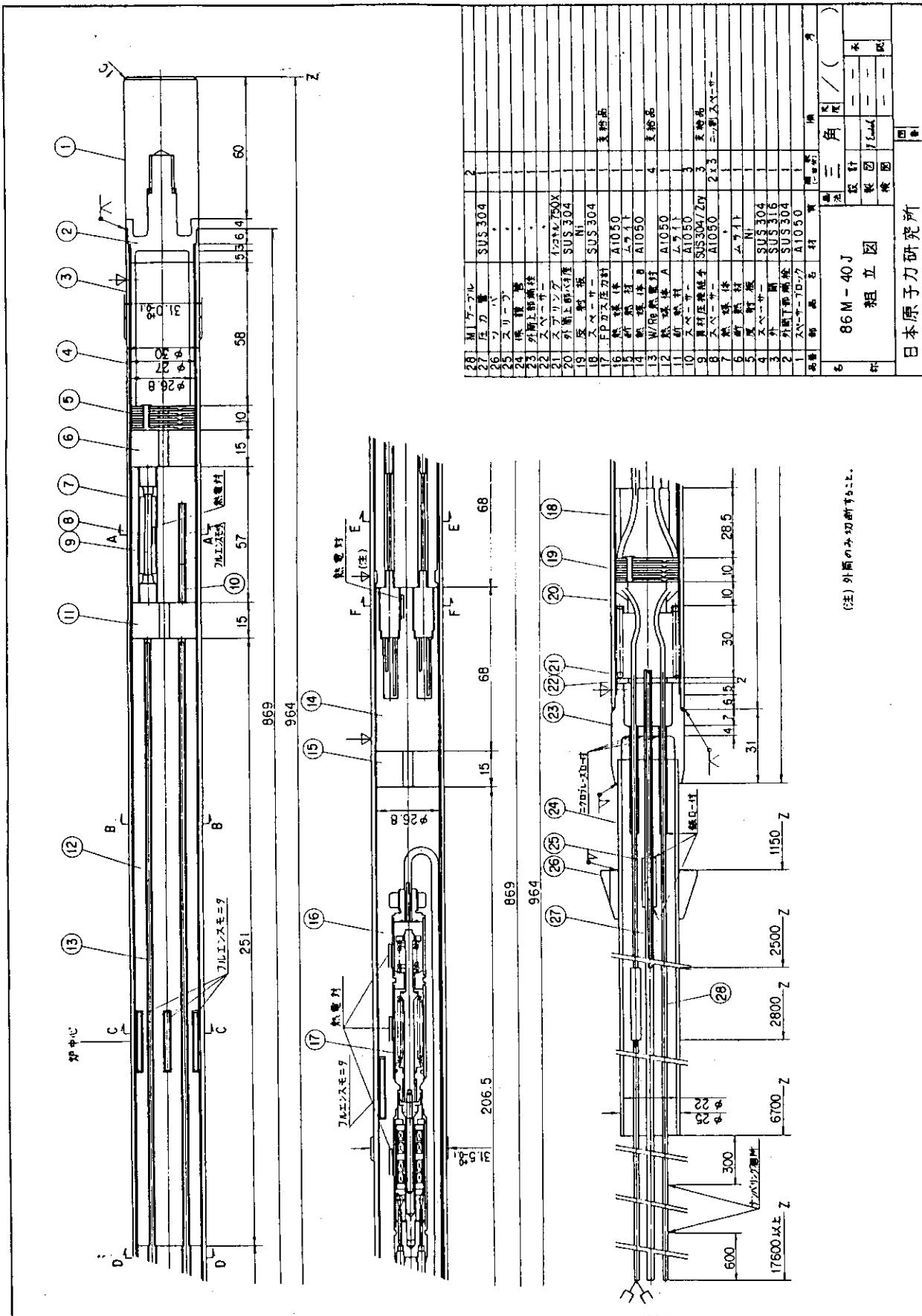


Fig. 24 Irradiation capsule for FP2A

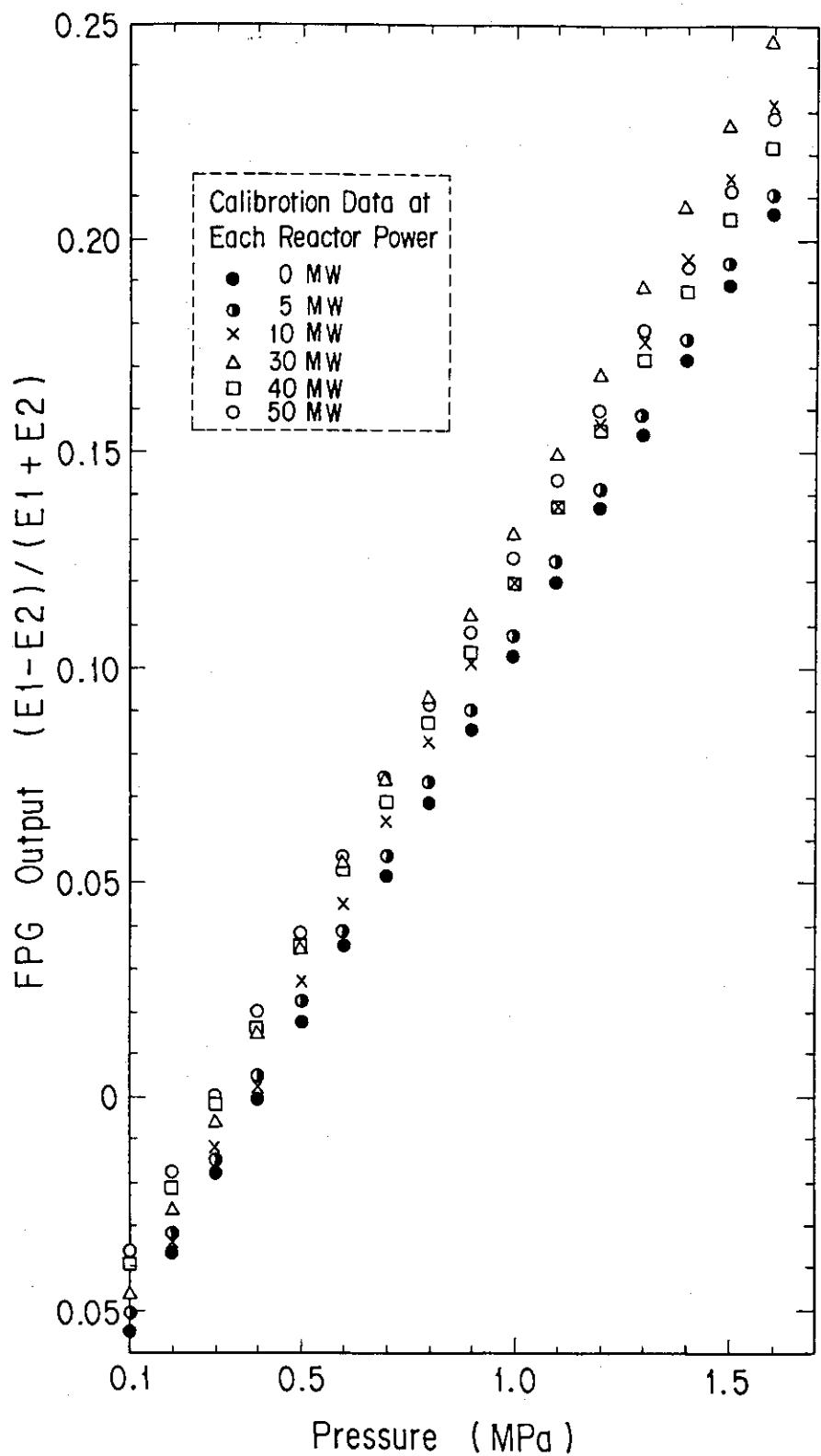


Fig. 25 FPG in-pile calibration data (FP2A)

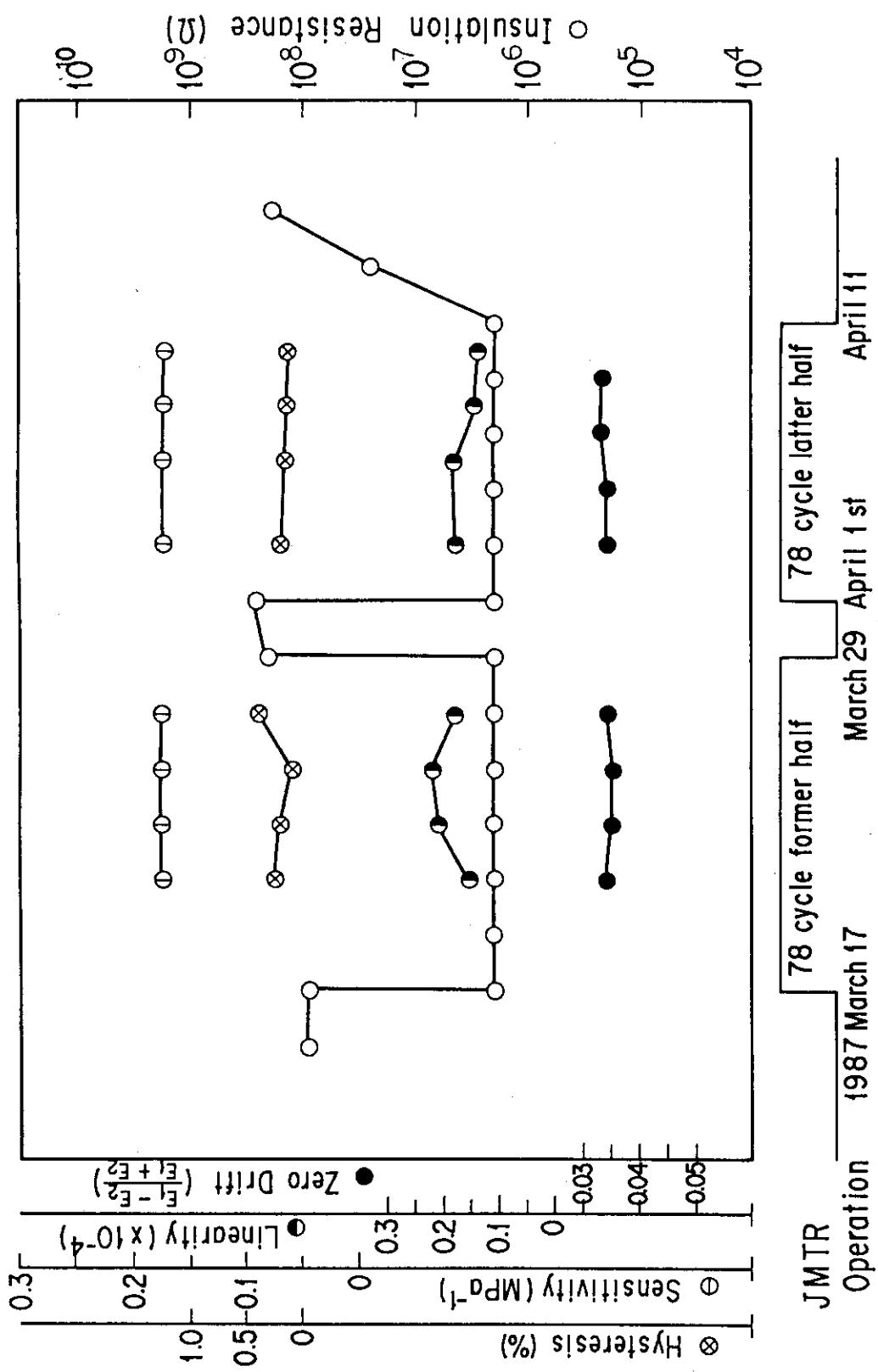


Fig. 26 Characteristics change of FP2A in in-pile calibration test

6. 結 言

照射済燃料棒に F P ガス圧力計を再計装し、再照射試験中の燃料棒内圧を測定するための方法を考案した。また、再計装機器のうちの F P ガス圧力計について試作及び性能試験を実施した。初年度に試作した 4 体のうち、真直度が悪いため駆動部の動きが良好でないものがあった。この結果を反映して、次年度の製作では溶接時に特別の治具を用いた結果、駆動性は改善された。炉外及び炉内性能試験の結果から、本圧力計の感度、ヒステリシス及び直線性は、使用条件下で十分安定していることが分った。但し、初年度に作成した圧力計は、炉内で著しい絶縁低下を呈し、それに伴って零点がドリフトした。この点については、早急に解決すべく、原因調査のための実験を現在実施中である。この絶縁低下は全ての圧力計で生じるわけではないので部品の品質管理的な面からの考慮も必要である。炉内性能試験は現在も継続中であり、照射量は約 4×10^{20} n / cm² に達しているが、F P ガス圧力計は正常に作動している。炉内性能試験の最終結果については続報にまとめる予定である。

謝 辞

本報告書の作成にあたり適切な御指導を賜りました、桜井裕材料試験炉部長、山本章同部次長並びに同部照射一課原山泰雄主任研究員に深く感謝致します。また本圧力計の設計に際し助言載いた原子炉計測研究室荒克之主任研究員、本再計装法の考案に際し御協力載いたホットラボ課及び照射実験に際し御協力載いた照射第 1 課遠藤泰一氏及び石井忠彦氏に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- (1) 中田宏勝、瀬崎勝二：“JMTR 出力急昇試験設備の開発（その 3）” JAERI-M 85-021 (1985)
- (2) 柳澤和章：“照射後試験データによる長期照射燃料棒の内圧增加に関する解析評価と FEMAX I-III 計算” JAERI-M 80-021 (1984)
- (3) 鵜戸口英善、岡村弘之訳：“材料力学 中巻” 東京図書 (1967)
- (4) 真壁肇：“確率と統計” サイエンス社 (1975)
- (5) 平修二：“金属材料の高温強度” 養賢堂 (1968)

6. 結 言

照射済燃料棒に F P ガス圧力計を再計装し、再照射試験中の燃料棒内圧を測定するための方法を考案した。また、再計装機器のうちの F P ガス圧力計について試作及び性能試験を実施した。初年度に試作した 4 体のうち、真直度が悪いため駆動部の動きが良好でないものがあった。この結果を反映して、次年度の製作では溶接時に特別の治具を用いた結果、駆動性は改善された。炉外及び炉内性能試験の結果から、本圧力計の感度、ヒステリシス及び直線性は、使用条件下で十分安定していることが分った。但し、初年度に作成した圧力計は、炉内で著しい絶縁低下を呈し、それに伴って零点がドリフトした。この点については、早急に解決すべく、原因調査のための実験を現在実施中である。この絶縁低下は全ての圧力計で生じるわけではないので部品の品質管理的な面からの考慮も必要である。炉内性能試験は現在も継続中であり、照射量は約 4×10^{20} n / cm² に達しているが、F P ガス圧力計は正常に作動している。炉内性能試験の最終結果については続報にまとめる予定である。

謝 辞

本報告書の作成にあたり適切な御指導を賜りました、桜井裕材料試験炉部長、山本章同部次長並びに同部照射一課原山泰雄主任研究員に深く感謝致します。また本圧力計の設計に際し助言載いた原子炉計測研究室荒克之主任研究員、本再計装法の考案に際し御協力載いたホットラボ課及び照射実験に際し御協力載いた照射第 1 課遠藤泰一氏及び石井忠彦氏に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- (1) 中田宏勝、瀬崎勝二：“JMTR 出力急昇試験設備の開発（その 3）” JAERI-M 85-021 (1985)
- (2) 柳澤和章：“照射後試験データによる長期照射燃料棒の内圧增加に関する解析評価と FEMAX1-III 計算” JAERI-M 80-021 (1984)
- (3) 鵜戸口英善、岡村弘之訳：“材料力学 中巻” 東京図書 (1967)
- (4) 真壁肇：“確率と統計” サイエンス社 (1975)
- (5) 平修二：“金属材料の高温強度” 養賢堂 (1968)

6. 結 言

照射済燃料棒に F P ガス圧力計を再計装し、再照射試験中の燃料棒内圧を測定するための方法を考案した。また、再計装機器のうちの F P ガス圧力計について試作及び性能試験を実施した。初年度に試作した 4 体のうち、真直度が悪いため駆動部の動きが良好でないものがあった。この結果を反映して、次年度の製作では溶接時に特別の治具を用いた結果、駆動性は改善された。炉外及び炉内性能試験の結果から、本圧力計の感度、ヒステリシス及び直線性は、使用条件下で十分安定していることが分った。但し、初年度に作成した圧力計は、炉内で著しい絶縁低下を呈し、それに伴って零点がドリフトした。この点については、早急に解決すべく、原因調査のための実験を現在実施中である。この絶縁低下は全ての圧力計で生じるわけではないので部品の品質管理的な面からの考慮も必要である。炉内性能試験は現在も継続中であり、照射量は約 4×10^{20} n / cm² に達しているが、F P ガス圧力計は正常に作動している。炉内性能試験の最終結果については続報にまとめる予定である。

謝 辞

本報告書の作成にあたり適切な御指導を賜りました、桜井裕材料試験炉部長、山本章同部次長並びに同部照射一課原山泰雄主任研究員に深く感謝致します。また本圧力計の設計に際し助言載いた原子炉計測研究室荒克之主任研究員、本再計装法の考案に際し御協力載いたホットラボ課及び照射実験に際し御協力載いた照射第 1 課遠藤泰一氏及び石井忠彦氏に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- (1) 中田宏勝、瀬崎勝二：“JMTR 出力急昇試験設備の開発（その 3）” JAERI-M 85-021 (1985)
- (2) 柳澤和章：“照射後試験データによる長期照射燃料棒の内圧增加に関する解析評価と FEMAX1-III 計算” JAERI-M 80-021 (1984)
- (3) 鵜戸口英善、岡村弘之訳：“材料力学 中巻” 東京図書 (1967)
- (4) 真壁肇：“確率と統計” サイエンス社 (1975)
- (5) 平修二：“金属材料の高温強度” 養賢堂 (1968)

付 錄

F P ガス圧力計炉外較正試験詳細データ

Table A1 Fission Gas Pressure Gage Out-pile Calibration Data (FP1A)

P (MPa)	Temp		R. T.		1 0 0 °C		2 0 0 °C		3 0 0 °C		4 0 0 °C	
	E 1 (V rms)	E 2 (V rms)	E 1 E 2 RATIO (V rms)									
0.1	.875	.956	-0.0442	.915	1.002	-0.0454	.964	1.060	-0.0474	1.028	1.132	-0.0481
0.2	.887	.945	-0.0317	.926	.992	-0.0344	.977	1.051	-0.0365	1.041	1.121	-0.0370
0.3	.900	.935	-0.0191	.941	.980	-0.0203	.993	1.038	-0.0222	1.060	1.105	-0.0208
0.4	.914	.923	-0.0049	.955	.966	-0.0057	1.010	1.023	-0.0064	1.076	1.087	-0.0051
0.5	.926	.911	0.0082	.968	.952	0.0083	1.026	1.006	0.0098	1.195	1.070	0.0115
0.6	.937	.896	0.0224	.981	.936	0.0235	1.040	.990	0.0246	1.110	1.061	0.0273
0.7	.948	.883	0.0355	.993	.920	0.0382	1.053	.973	0.0375	1.126	1.033	0.0431
0.8	.959	.869	0.0492	1.005	.904	0.0529	1.066	.954	0.0554	1.141	1.014	0.0589
0.9	.969	.853	0.0637	1.015	.888	0.0667	1.078	.935	0.0710	1.157	.992	0.0768
1.0	.980	.837	0.0787	1.026	.870	0.0823	1.088	.917	0.0853	1.170	.972	0.0724
1.1	.989	.821	0.0928	1.035	.854	0.0958	1.099	.896	0.1018	1.182	.951	0.1083
1.2	.999	.805	0.1075	1.044	.835	0.1112	1.108	.876	0.1169	1.195	.929	0.1252
1.3	1.006	.789	0.1209	1.058	.817	0.1262	1.117	.857	0.1317	1.206	.906	0.1420
1.4	1.014	.772	0.1355	1.060	.799	0.1404	1.125	.837	0.1468	1.216	.885	0.1575
1.5	1.021	.756	0.1491	1.067	.781	0.1548	1.135	.816	0.1635	1.226	.862	0.1743
1.6	1.028	.739	0.1636	1.074	.763	0.1693	1.143	.798	0.1777	1.234	.842	0.1888
1.5	1.024	.750	0.1545	1.068	.772	0.1609	1.140	.808	0.1704	1.231	.850	0.1831
1.4	1.017	.767	0.1401	1.060	.791	0.1453	1.132	.828	0.1551	1.220	.877	0.1636
1.3	1.009	.883	0.1261	1.052	.809	0.1306	1.124	.849	0.1394	1.211	.897	0.1490
1.2	1.001	.800	0.1116	1.044	.827	0.1160	1.115	.869	0.1240	1.200	.919	0.1326
1.1	.994	.819	0.0965	1.036	.845	0.1015	1.105	.889	0.1083	1.189	.940	0.1170
1.0	.984	.838	0.0801	1.027	.864	0.0862	1.094	.909	0.0924	1.176	.963	0.0996
0.9	.975	.850	0.0685	1.018	.882	0.0716	1.083	.928	0.0771	1.163	.985	0.0829
0.8	.965	.866	0.0541	1.007	.901	0.0556	1.070	.947	0.0610	1.148	1.006	0.0659
0.7	.954	.881	0.0398	.997	.917	0.0418	1.057	.966	0.0450	1.133	1.026	0.0496
0.6	.942	.894	0.0261	.985	.933	0.0271	1.043	.984	0.0291	1.116	1.047	0.0317
0.5	.930	.909	0.0114	.972	.949	0.0120	1.028	1.000	0.0138	1.101	1.065	0.0166
0.4	.918	.922	-0.0022	.959	.963	-0.0021	1.013	1.016	-0.0015	1.083	1.083	0.0000
0.3	.905	.935	-0.0163	.945	.977	-0.0166	.997	1.031	-0.0168	1.066	1.100	-0.0157
0.2	.892	.948	-0.0304	.931	.991	-0.0312	.981	1.045	-0.0316	1.047	1.117	-0.0323
0.1	.879	.959	-0.0435	.916	1.003	-0.0453	.964	1.059	-0.0470	1.029	1.132	-0.0477

Table A2 Fission Gas Pressure Gage Out-pile Calibration Data (FP1B)

Temp (MPa)	R. T.			100 °C			200 °C			300 °C			400 °C		
	E 1 (V rms)	E 2 (V rms)	RATIO E1-E2/E1+E2	E 1 (V rms)	E 2 (V rms)	RATIO E1-E2/E1+E2	E 1 (V rms)	E 2 (V rms)	RATIO E1-E2/E1+E2	E 1 (V rms)	E 2 (V rms)	RATIO E1-E2/E1+E2	E 1 (V rms)	E 2 (V rms)	RATIO E1-E2/E1+E2
0.1	.8896	1.0073	-0.0620	.9452	1.0766	-0.0650	.9973	1.1507	-0.0714	1.0592	1.2262	-0.0731	1.0939	1.2676	-0.0736
0.2	.8948	1.0622	-0.0616	.9457	1.0774	-0.0651	.9981	1.1520	-0.0716	1.0598	1.2272	-0.0732	1.0941	1.2680	-0.0736
0.3	.9087	1.0034	-0.0495	.9548	1.0718	-0.0577	1.0097	1.1428	-0.0618	1.0686	1.2217	-0.0688	1.0947	1.2680	-0.0733
0.4	.9279	.9914	-0.0331	.9712	1.0577	-0.0426	1.0285	1.1241	-0.0444	1.0913	1.1995	-0.0472	1.1205	1.2462	-0.0751
0.5	.9422	.9762	-0.0177	.9884	1.0414	-0.0261	1.0465	1.1033	-0.0264	1.1095	1.1795	-0.0306	1.1450	1.2208	-0.0320
0.6	.9542	.9619	-0.0040	1.0040	1.0239	-0.0098	1.0609	1.0837	-0.0106	1.1261	1.1572	-0.0136	1.1662	1.1929	-0.0113
0.7	.9685	.9403	0.0148	1.0190	1.0054	0.0067	1.0748	1.0622	0.0059	1.1424	1.1320	0.0046	1.1838	1.1676	0.0069
0.8	.9815	.9199	0.0324	1.0316	.9865	0.0223	1.0881	1.0386	0.0233	1.1585	1.1026	0.0247	1.2058	1.1273	0.0336
0.9	.9922	.8997	0.0489	1.0451	.9624	0.0412	1.1018	1.0212	0.0429	1.1719	1.0755	0.0429	1.2190	1.0995	0.0515
1.0	1.0031	.8768	0.0672	1.0517	.9375	0.0602	1.1128	.9869	0.0600	1.1874	1.0427	0.0649	1.2377	1.0561	0.0782
1.1	1.0124	.8558	0.0838	1.0702	.9094	0.0812	1.1280	.9513	0.0850	1.2008	1.0109	0.0859	1.2509	1.0222	0.1006
1.2	1.0221	.8333	0.1018	1.0804	.8839	0.0000	1.1386	.9246	0.1037	1.2148	.9760	0.1088	1.2634	.9878	0.1224
1.3	1.0313	.8110	0.1196	1.0898	.8597	0.0180	1.1494	.8970	0.1233	1.2254	.9478	0.1277	1.2775	.9483	0.1479
1.4	1.0388	.7919	0.1349	1.0991	.8357	0.1361	1.1587	.8775	0.1403	1.2336	.9267	0.1421	1.2883	.9191	0.1673
1.5	1.0464	.7727	0.1505	1.1073	.8135	0.1530	1.1690	.8474	0.1595	1.2459	.8955	0.1636	1.2996	.8806	0.1895
1.6	1.0529	.7556	0.1644	1.1143	.7927	0.1686	1.1767	.8262	0.1750	1.2555	.8688	0.1820	1.3065	.8637	0.2040
1.5	1.0545	.7567	0.1644	1.1143	.7927	0.1686	1.1771	.8264	0.1750	1.2560	.8690	0.1821	1.3068	.8638	0.2041
1.4	1.0487	.7727	0.1515	1.1100	.8042	0.1598	1.1742	.8359	0.1683	1.2565	.8697	0.1819	1.3073	.8642	0.2041
1.3	1.0403	.7925	0.1352	1.1014	.8270	0.1423	1.1666	.8576	0.1527	1.2481	.8933	0.1657	1.2968	.8961	0.1827
1.2	1.0317	.8147	0.1175	1.0925	.8490	0.1254	1.1570	.8827	0.1345	1.2372	.9221	0.1459	1.2859	.9273	0.1620
1.1	1.0232	.8361	0.1006	1.0825	.8741	0.1065	1.1462	.9108	0.1144	1.2244	.9545	0.1239	1.2726	.9628	0.1386
1.0	1.0144	.8585	0.0832	1.0719	.8999	0.0872	1.1361	.9368	0.0961	1.2138	.9822	0.1055	1.2598	.9983	0.1158
0.9	1.0044	.8813	0.0653	1.0624	.9216	0.0710	1.1257	.9625	0.0782	1.2038	1.0067	0.0872	1.2463	1.0342	0.0930
0.8	.9941	.9035	0.0477	1.0513	.9449	0.0533	1.1152	.9861	0.0614	1.1901	1.0381	0.0682	1.2318	1.0695	0.0705
0.7	.9827	.9240	0.0308	1.0403	.9660	0.0370	1.1032	1.0111	0.0436	1.1775	1.0645	0.0504	1.2157	1.1049	0.0477
0.6	.9708	.9439	0.0140	1.0265	.9905	0.0178	1.1395	1.0372	0.0246	1.1636	1.0922	0.0312	1.2002	1.1352	0.0278
0.5	.9584	.9627	-0.0022	1.0134	1.0006	0.0014	1.0734	1.0642	0.0043	1.1460	1.1211	0.0110	1.1816	1.1676	0.0060
0.4	.9438	.9806	-0.0191	.9974	1.0019	-0.0170	1.0555	1.0900	-0.0161	1.1292	1.1478	-0.0082	1.1591	1.1997	-0.0172
0.3	.9299	.9942	-0.0334	.9810	1.0008	-0.0344	1.0376	1.1120	-0.0346	1.1103	1.1725	-0.0272	1.1377	1.2251	-0.0370
0.2	.9164	1.0071	-0.0472	.9657	1.0055	-0.0491	1.0199	1.1299	-0.0512	1.0888	1.1969	-0.0473	1.1153	1.2485	-0.0563
0.1	.9021	1.0195	-0.0611	.9500	1.0095	-0.0638	1.0027	1.1460	-0.0667	1.0679	1.2151	-0.0645	1.0908	1.2670	-0.0747

Table A3 Fission Gas Pressure Gage Out-pile Calibration Data (FP1C)

Temp (MPa)	R. T.		1 0 0 °C		2 0 0 °C		3 0 0 °C		4 0 0 °C			
	E 1 (V rms)	E 2 (V rms)	RATIO E1-E2/E1+E2	E 1 (V rms)	E 2 (V rms)	RATIO E1-E2/E1+E2	E 1 (V rms)	E 2 (V rms)	RATIO E1-E2/E1+E2	E 1 (V rms)	E 2 (V rms)	RATIO E1-E2/E1+E2
0.1	.993	1.161	-0.0780	1.030	1.221	-0.0849	1.078	1.310	-0.0972	1.147	1.416	-0.1050
0.2	.993	1.161	-0.0780	1.029	1.220	-0.0849	1.077	1.310	-0.0976	1.147	1.415	-0.1046
0.3	1.007	1.152	-0.0672	1.047	1.210	-0.0722	1.114	1.287	-0.0721	1.173	1.399	-0.0879
0.4	1.031	1.137	-0.0489	1.074	1.193	-0.0325	1.137	1.272	-0.0560	1.205	1.378	-0.0670
0.5	1.050	1.123	-0.0336	1.098	1.177	-0.0347	1.165	1.252	-0.0360	1.238	1.355	-0.0451
0.6	1.069	1.108	-0.0179	1.119	1.162	-0.0189	1.184	1.234	-0.0194	1.263	1.336	-0.0281
0.7	1.091	1.091	0.0000	1.142	1.144	-0.0009	1.213	1.213	-0.0000	1.296	1.309	-0.0050
0.8	1.108	1.075	0.0151	1.163	1.126	0.0162	1.236	1.191	0.0185	1.323	1.284	0.0150
0.9	1.127	1.057	0.0321	1.182	1.108	0.0323	1.255	1.173	0.0338	1.343	1.264	0.0303
1.0	1.144	1.039	0.0481	1.201	1.088	0.0494	1.278	1.148	0.0536	1.367	1.240	0.0487
1.1	1.161	1.020	0.0646	1.221	1.067	0.0673	1.297	1.127	0.0701	1.392	1.212	0.0691
1.2	1.176	1.001	0.0804	1.237	1.047	0.0832	1.317	1.102	0.0889	1.414	1.186	0.0877
1.3	1.193	.980	0.0980	1.255	1.024	0.1014	1.334	1.080	0.1052	1.438	1.155	0.1091
1.4	1.206	.961	0.1131	1.272	1.001	0.1192	1.352	1.056	0.1229	1.453	1.134	0.1233
1.5	1.221	.939	0.1306	1.286	.979	0.1355	1.369	1.031	0.1408	1.474	1.103	0.1440
1.6	1.233	.919	0.1459	1.300	.957	0.1520	1.384	1.009	0.1567	1.493	1.075	0.1628
1.5	1.234	.920	0.1458	1.298	.960	0.1497	1.378	1.019	0.1498	1.487	1.086	0.1558
1.4	1.221	.940	0.1300	1.282	.984	0.1315	1.360	1.046	0.1305	1.472	1.108	0.1411
1.3	1.208	.959	0.1149	1.266	1.006	0.1144	1.344	1.070	0.1135	1.450	1.140	0.1197
1.2	1.194	.979	0.0989	1.251	1.027	0.0983	1.326	1.093	0.0963	1.427	1.170	0.0990
1.1	1.179	.999	0.0826	1.234	1.049	0.0810	1.307	1.117	0.0784	1.407	1.195	0.0815
1.0	1.163	1.018	0.0665	1.214	1.073	0.0617	1.288	1.139	0.0614	1.386	1.220	0.0637
0.9	1.147	1.036	0.0508	1.198	1.090	0.0472	1.268	1.162	0.0436	1.363	1.246	0.0448
0.8	1.109	1.055	0.0339	1.179	1.110	0.0301	1.248	1.182	0.0272	1.340	1.264	0.0272
0.7	1.112	1.072	0.0183	1.160	1.128	0.0140	1.225	1.204	0.0086	1.315	1.293	0.0084
0.6	1.092	1.090	0.0009	1.138	1.148	-0.0044	1.202	1.224	-0.0091	1.288	1.316	-0.0108
0.5	1.073	1.106	-0.0151	1.118	1.167	-0.0206	1.179	1.242	-0.0260	1.261	1.338	-0.0296
0.4	1.054	1.120	-0.0304	1.098	1.180	-0.0360	1.155	1.260	-0.0435	1.236	1.357	-0.0467
0.3	1.034	1.135	-0.0466	1.074	1.197	-0.0542	1.131	1.278	-0.0610	1.205	1.378	-0.0670
0.2	1.014	1.148	-0.0620	1.055	1.210	-0.0684	1.106	1.294	-0.0783	1.176	1.397	-0.0859
0.1	.992	1.162	-0.0789	1.031	1.224	-0.0856	1.077	1.311	-0.0980	1.146	1.415	-0.1050

Table A4 Fission Gas Pressure Gage Out-pile Calibration Data (FP1D)

P (MPa)	Temp	R. T.		1 0 0 °C		2 0 0 °C		3 0 0 °C		4 0 0 °C	
		E 1 (V rms)	E 2 (V rms)	RATIO E1-E2/E1+E2	E 1 (V rms)	E 2 (V rms)	RATIO E1-E2/E1+E2	E 1 (V rms)	E 2 (V rms)	RATIO E1-E2/E1+E2	E 1 (V rms)
0.1	1.0747	1.1996	-0.0549	1.1354	1.2796	-0.0597	1.1950	1.3620	-0.0653	1.2389	1.4768
0.2	1.0915	1.1885	-0.0425	1.1526	1.2675	-0.0475	1.2153	1.3494	-0.0523	1.2855	1.4452
0.3	1.1062	1.1782	-0.0315	1.1695	1.2551	-0.0353	1.2339	1.3373	-0.0402	1.3070	1.4317
0.4	1.1208	1.1664	-0.0199	1.1858	1.2431	-0.0236	1.2527	1.3236	-0.0275	1.3284	1.4167
0.5	1.1357	1.1564	-0.0090	1.2018	1.2317	-0.0123	1.2712	1.3116	-0.0156	1.3499	1.4060
0.6	1.1500	1.1505	-0.0002	1.2176	1.2244	-0.0028	1.2887	1.3048	-0.0062	1.3700	1.3984
0.7	1.1651	1.1463	0.0081	1.2335	1.2217	0.0048	1.3067	1.3005	0.0024	1.3896	1.3981
0.8	1.1789	1.1341	0.0194	1.2492	1.2088	0.0164	1.3240	1.2903	0.0129	1.4097	1.3848
0.9	1.1919	1.1225	0.0300	1.2623	1.1949	0.0274	1.3402	1.2740	0.0253	1.4279	1.3361
1.0	1.2043	1.1088	0.0413	1.2761	1.1799	0.0392	1.3570	1.2584	0.0377	1.4462	1.3484
1.1	1.2168	1.0910	0.0545	1.2897	1.1612	0.0524	1.3722	1.2424	0.0496	1.4656	1.3320
1.2	1.2295	1.0820	0.0638	1.3036	1.1491	0.0630	1.3879	1.2266	0.0617	1.4831	1.3146
1.3	1.2411	1.0675	0.0752	1.3169	1.1339	0.0747	1.4027	1.2098	0.0738	1.5012	1.2997
1.4	1.2513	1.0535	0.0858	1.3306	1.1202	0.0858	1.4179	1.1928	0.0862	1.5184	1.2758
1.5	1.2623	1.0372	0.0979	1.3424	1.1004	0.0991	1.4311	1.1709	0.1000	1.5347	1.2534
1.6	1.2730	1.0237	0.1085	1.3546	1.0838	0.1111	1.4454	1.1550	0.1117	1.5497	1.2321
1.5	1.2636	1.0351	0.0994	1.3441	1.0994	0.1001	1.4337	1.1702	0.1012	1.5377	1.2572
1.4	1.2534	1.0527	0.0870	1.3320	1.1197	0.0866	1.4196	1.1951	0.0859	1.5216	1.2833
1.3	1.2409	1.0666	0.0755	1.3182	1.1355	0.0745	1.4054	1.2142	0.0730	1.5053	1.3049
1.2	1.2296	1.0809	0.0644	1.3039	1.1485	0.0634	1.3922	1.2306	0.0616	1.4877	1.3199
1.1	1.2167	1.0926	0.0537	1.2889	1.1605	0.0524	1.3756	1.2445	0.0500	1.4706	1.3350
1.0	1.2040	1.1093	0.0409	1.2775	1.1779	0.0406	1.3591	1.2600	0.0378	1.4512	1.3496
0.9	1.1900	1.1236	0.0287	1.2632	1.1928	0.0287	1.3422	1.2753	0.0256	1.4328	1.3674
0.8	1.1783	1.1356	0.0185	1.2480	1.2058	0.0172	1.3259	1.2918	0.0130	1.4148	1.3869
0.7	1.1648	1.1465	0.0079	1.2329	1.2188	0.0058	1.3098	1.3050	0.0018	1.3958	1.4019
0.6	1.1511	1.1586	-0.0032	1.2177	1.2332	-0.0063	1.2910	1.3180	-0.0103	1.3776	1.4162
0.5	1.1358	1.1693	-0.0145	1.2027	1.2471	-0.0181	1.2728	1.3313	-0.0225	1.3564	1.4316
0.4	1.1218	1.1768	-0.0239	1.1858	1.2543	-0.0281	1.2535	1.3381	-0.0326	1.3389	1.4361
0.3	1.1066	1.1817	-0.0328	1.1684	1.2584	-0.0371	1.2346	1.3415	-0.0415	1.3144	1.4400
0.2	1.0906	1.1912	-0.0441	1.1516	1.2682	-0.0482	1.2160	1.3525	-0.0531	1.2922	1.4535
0.1	1.0750	1.2005	-0.0552	1.1352	1.2793	-0.0597	1.1953	1.3643	-0.0660	1.2453	1.4855
										-0.0880	1.2120
										-0.1375	1.5984

Table A5 Fission Gas Pressure Gage Out-pile Calibration Data (FP2A)

Temp P (MPa)	R. T.		1 0 0 °C				2 0 0 °C				3 0 0 °C				4 0 0 °C			
	E 1 (V rms)	E 2 (V rms)	RATIO E1-E2/E1+E2	E 1 (V rms)	E 2 (V rms)	RATIO E1-E2/E1+E2	E 1 (V rms)	E 2 (V rms)	RATIO E1-E2/E1+E2	E 1 (V rms)	E 2 (V rms)	RATIO E1-E2/E1+E2	E 1 (V rms)	E 2 (V rms)	RATIO E1-E2/E1+E2	E 1 (V rms)	E 2 (V rms)	RATIO E1-E2/E1+E2
0.1	0.9806	1.10589	-0.0614	1.0177	1.1630	-0.0666	1.0755	1.2482	-0.0743	1.1364	1.3511	-0.0863	1.1407	1.4053	-0.1039			
0.2	1.0005	1.0933	-0.0443	1.0398	1.1453	-0.0483	1.1003	1.2250	-0.0552	1.1641	1.3282	-0.0658	1.1740	1.3790	-0.0802			
0.3	1.0202	1.0779	-0.0275	1.0611	1.1282	-0.0306	1.1252	1.2097	-0.0361	1.1916	1.3064	-0.0459	1.2070	1.3529	-0.0569			
0.4	1.0401	1.0626	-0.0107	1.0830	1.1111	-0.0128	1.1500	1.1904	-0.0172	1.2182	1.2848	-0.0266	1.2400	1.3275	-0.0340			
0.5	1.0610	1.0466	0.0068	1.1048	1.0935	0.0051	1.1754	1.1710	0.0018	1.2464	1.2633	-0.0067	1.2727	1.3025	-0.0115			
0.6	1.0783	1.0232	0.0233	1.1242	1.0740	0.0227	1.1976	1.1498	0.0203	1.2744	1.2410	0.0132	1.3059	1.2767	0.0113			
0.7	1.0950	1.0095	0.0406	1.1412	1.0533	0.0400	1.2180	1.1263	0.0391	1.2971	1.2151	0.0326	1.3334	1.2468	0.0335			
0.8	1.1090	.9906	0.5639	1.1573	1.0318	0.0573	1.2362	1.1625	0.0571	1.3190	1.1886	0.0520	1.3597	1.2151	0.0561			
0.9	1.1229	.9703	0.0729	1.1722	1.0096	0.0745	1.2634	1.0775	0.0754	1.3393	1.1606	0.0714	1.3825	1.1826	0.0779			
1.0	1.1360	.9488	0.0897	1.1861	.9864	0.0919	1.2655	1.0510	0.0941	1.3583	1.1320	0.0918	1.4040	1.1490	0.0998			
1.1	1.1481	.9270	0.1065	1.1999	.9627	0.1093	1.2843	1.0245	0.1125	1.3758	1.1018	0.1105	1.4247	1.1129	0.1228			
1.2	1.1592	.9051	0.1230	1.2108	.9383	0.1268	1.2980	.9975	0.1309	1.3922	1.0710	0.1303	1.4430	1.0774	0.1450			
1.3	1.1698	.8820	0.1402	1.2218	.9130	0.1446	1.3105	.9702	0.1492	1.4065	1.0465	0.1414	1.491	1.0460	0.1677			
1.4	1.1794	.8590	0.1571	1.2317	.8885	0.1619	1.3271	.9424	0.1676	1.4204	1.0096	0.1690	1.4758	1.0035	0.1904			
1.5	1.1883	.8358	0.1741	1.2408	.8636	0.1792	1.3330	.9144	0.1862	1.4329	.9752	0.1880	1.4898	.9675	0.2123			
1.6	1.1963	.8127	0.1909	1.2492	.8386	0.1966	1.3431	.8866	0.2047	1.4443	.9465	0.2072	1.5016	.9316	0.2392			
1.5	1.1884	.8341	0.1751	1.2432	.8621	0.1810	1.3336	.9124	0.1875	1.4330	.9467	0.1883	1.4903	.9647	0.2140			
1.4	1.1792	.8575	0.1579	1.2350	.8860	0.1645	1.3234	.9388	0.1700	1.4217	1.0060	0.1712	1.4763	1.0024	0.1911			
1.3	1.1707	.8781	0.1428	1.2253	.9105	0.1473	1.3121	.9650	0.1524	1.4085	1.0364	0.1521	1.4608	1.0385	0.1689			
1.2	1.1602	.9012	0.1256	1.2138	.9370	0.1286	1.2995	.9827	0.1338	1.3938	1.0570	0.1328	1.4443	1.0747	0.1467			
1.1	1.1484	.9252	0.1076	1.2019	.9615	0.1111	1.2841	1.0231	0.1131	1.3778	1.0986	0.1127	1.4268	1.1087	0.1254			
1.0	1.1300	.9460	0.0916	1.1896	.9841	0.0945	1.2695	1.0495	0.0948	1.3601	1.1280	0.0932	1.4063	1.1448	0.1025			
0.9	1.1236	.9676	0.0745	1.1753	1.0080	0.0766	1.2645	1.0737	0.0776	1.3412	1.1578	0.0733	1.3849	1.1791	0.0892			
0.8	1.1091	.9890	0.0572	1.1598	1.0310	0.0588	1.2262	1.1004	0.0581	1.3186	1.1859	0.0517	1.3603	1.2143	0.0567			
0.7	1.0940	1.0090	0.0404	1.1430	1.0533	0.0408	1.2172	1.1255	0.0391	1.2987	1.2134	0.0339	1.3357	1.2456	0.0349			
0.6	1.0708	1.0283	0.0202	1.1253	1.0740	0.0233	1.1979	1.1480	0.0212	1.2757	1.2383	0.0144	1.3080	1.2752	0.0126			
0.5	1.0598	1.0465	0.0063	1.1060	1.0933	0.0058	1.1756	1.1696	0.0025	1.2478	1.2617	-0.0055	1.2748	1.3011	0.0102			
0.4	1.0395	1.0625	-0.0107	1.0837	1.1104	-0.0121	1.1505	1.1891	-0.0164	1.2197	1.2836	-0.0255	1.2417	1.3265	-0.0330			
0.3	1.0202	1.0770	-0.0270	1.0613	1.1273	-0.0301	1.1258	1.2085	-0.0354	1.1920	1.3056	-0.0454	1.2086	1.3522	-0.0560			
0.2	1.0002	1.0926	-0.0441	1.0391	1.1446	-0.0483	1.1011	1.2282	-0.0545	1.1635	1.3278	-0.0659	1.1750	1.3778	-0.0794			
0.1	0.9808	1.1078	-0.0610	1.0170	1.1616	-0.0663	1.0764	1.2480	-0.0738	1.1365	1.3505	-0.0864	1.1415	1.4042	-0.1031			

Table A6 Fission Gas Pressure Gage Out-pile Calibration Data (FP2B)

Temp (MPa)	R. T.			100 °C			200 °C			300 °C			400 °C		
	E 1 (V rms) E1-E2/E1+E2	E 2 (V rms) E1-E2/E1+E2	RATIO (V rms) E1-E2/E1+E2	E 1 (V rms) E1-E2/E1+E2	E 2 (V rms) E1-E2/E1+E2	RATIO (V rms) E1-E2/E1+E2	E 1 (V rms) E1-E2/E1+E2	E 2 (V rms) E1-E2/E1+E2	RATIO (V rms) E1-E2/E1+E2	E 1 (V rms) E1-E2/E1+E2	E 2 (V rms) E1-E2/E1+E2	RATIO (V rms) E1-E2/E1+E2	E 1 (V rms) E1-E2/E1+E2	E 2 (V rms) E1-E2/E1+E2	RATIO (V rms) E1-E2/E1+E2
0.1	.9619	1.0728	-0.0545	1.0325	1.1732	-0.0638	1.0864	1.2473	-0.0689	1.1668	1.3462	-0.0735	1.1862	1.3984	-0.0821
0.2	.9822	1.0609	-0.0385	1.0561	1.1593	-0.0466	1.1133	1.2298	-0.0487	1.1944	1.3264	-0.0524	1.2257	1.3754	-0.0576
0.3	1.0035	1.0476	-0.0215	1.0796	1.1433	-0.0287	1.1403	1.2125	-0.0307	1.2240	1.3070	-0.0328	1.2599	1.3535	-0.0358
0.4	1.0239	1.0347	-0.0052	1.0997	1.1280	-0.0127	1.1665	1.1953	-0.0122	1.2570	1.2874	-0.0119	1.2955	1.3296	-0.0130
0.5	1.0418	1.0198	0.0106	1.1201	1.1108	0.0042	1.1893	1.1769	0.0052	1.2826	1.2663	0.0064	1.3311	1.3066	0.0093
0.6	1.0586	1.0044	0.0267	1.1393	1.0927	0.0209	1.2116	1.1561	0.0234	1.3066	1.2450	0.0249	1.3598	1.2787	0.0307
0.7	1.0748	.9876	0.0422	1.1574	1.0739	0.0374	1.2316	1.1356	0.0406	1.3303	1.2168	0.0446	1.3862	1.2500	0.0517
0.8	1.0900	9703	0.0580	1.1745	1.0538	0.0542	1.2520	1.1124	0.0590	1.3524	1.1904	0.0637	1.4117	1.2182	0.0736
0.9	1.1042	.9520	0.0740	1.1908	1.0328	0.0711	1.2702	1.0896	0.0765	1.3715	1.1649	0.0815	1.4341	1.1872	0.0942
1.0	1.1178	.9333	0.0899	1.2065	1.0104	0.0885	1.2882	1.0652	0.0948	1.3909	1.1364	0.1007	1.4556	1.1538	0.1157
1.1	1.1300	.9141	0.1056	1.2200	.9890	0.1046	1.3040	1.0412	0.1121	1.4077	1.1088	0.1188	1.4764	1.1178	0.1382
1.2	1.1415	.8941	0.1215	1.2330	.9663	0.1213	1.3195	1.0158	0.1300	1.4243	1.0791	0.1379	1.4938	1.0840	0.1590
1.3	1.1523	.8737	0.1375	1.2451	.9425	0.1383	1.3339	.9897	0.1481	1.4394	1.0489	0.1569	1.5108	1.0477	0.1810
1.4	1.1621	.8533	0.1532	1.2564	.9185	0.1554	1.3467	.9645	0.1654	1.4532	1.0212	0.1751	1.5262	1.0117	0.2027
1.5	1.1715	.8320	0.1694	1.2667	.8943	0.1723	1.3590	.9375	0.1835	1.4662	.9962	0.1938	1.5395	.9780	0.2230
1.6	1.1789	.8111	0.1852	1.2763	.8698	0.1894	1.3704	.9104	0.2017	1.4787	.8598	0.2128	1.5524	.9406	0.2454
1.5	1.1737	.8272	0.1731	1.2704	.8845	0.1791	1.3623	.9321	0.1875	1.4681	.9870	0.1960	1.5427	.9688	0.2285
1.4	1.1620	.8499	0.1581	1.2603	.9083	0.1623	1.3524	.9560	0.1717	1.4573	1.0130	0.1799	1.5291	1.0045	0.2071
1.3	1.1542	.8709	0.1398	1.2488	.9328	0.1448	1.3380	.9877	0.1506	1.4433	1.0433	0.1609	1.5147	1.0385	0.1865
1.2	1.1444	.8904	0.1248	1.2378	.9545	0.1292	1.3256	1.0124	0.1340	1.4288	1.0724	0.1425	1.4987	1.0738	0.1652
1.1	1.1329	.9109	0.1086	1.2251	.9773	0.1125	1.3118	.10376	0.1167	1.4110	1.1046	0.1218	1.4807	1.1093	0.1434
1.0	1.1208	.9308	0.0926	1.2102	1.0016	0.0943	1.2968	1.0628	0.0992	1.3927	1.1349	0.1020	1.4606	1.1453	0.1210
0.9	1.1076	.9500	0.0765	1.1930	1.0266	0.0750	1.2805	1.0863	0.0821	1.3758	1.1600	0.0851	1.4388	1.1795	0.0990
0.8	1.0935	.9686	0.0605	1.1785	1.0458	0.0597	1.2618	1.1111	0.0635	1.3548	1.1874	0.0657	1.4157	1.2116	0.0777
0.7	1.0783	.9867	0.0443	1.1606	1.0672	0.0419	1.2422	1.1343	0.0454	1.3330	1.2141	0.0467	1.3910	1.2430	0.0562
0.6	1.0616	1.0045	0.0276	1.1425	1.0864	0.0252	1.2214	1.1565	0.0273	1.3097	1.2394	0.0276	1.3629	1.2742	0.0336
0.5	1.0449	1.0205	0.0118	1.1233	1.1052	0.0081	1.1993	1.1775	0.0092	1.2841	1.2642	0.0078	1.3336	1.3030	0.0116
0.4	1.0265	1.0356	-0.0044	1.1021	1.1235	-0.0096	1.1749	1.1982	-0.0098	1.2590	1.2859	-0.0106	1.3023	1.3304	-0.0107
0.3	1.0063	1.0493	-0.0209	1.0798	1.1408	-0.0275	1.1486	1.2175	-0.0291	1.2307	1.3075	-0.0303	1.2676	1.3559	-0.0337
0.2	.9850	1.0625	-0.0378	1.0556	1.1568	-0.0457	1.1193	1.2322	-0.0480	1.1983	1.3269	-0.0509	1.2311	1.3764	-0.0557
0.1	.9643	1.0754	-0.0544	1.0303	1.1695	-0.0633	1.0904	1.2471	-0.0670	1.1641	1.3423	-0.0711	1.1907	1.3955	-0.0792

Table A7 Fission Gas Pressure Gage Out-pile Calibration Data
(FP2B, After repaired)

P (MPa)	Temp		R. T.		1 0 0 °C		2 0 0 °C		3 0 0 °C		RATIO E1-E2/E1+E2
	E 1 (V rms)	E 2 (V rms)	RATIO E1-E2/E1+E2	(V rms)	E 1 (V rms)	E 2 (V rms)	RATIO E1-E2/E1+E2	(V rms)	E 1 (V rms)	E 2 (V rms)	
0.1	1.023	1.048	-0.0121	1.089	1.124	-0.0158	1.145	1.211	-0.0280	1.222	-0.0412
0.2	1.048	1.032	0.0077	1.113	1.104	0.0041	1.177	1.186	-0.0038	1.252	-0.0133
0.3	1.056	1.015	0.0245	1.132	1.086	0.0207	1.199	1.166	0.0140	1.289	0.0062
0.4	1.082	0.998	0.0404	1.150	1.067	0.0374	1.220	1.145	0.0317	1.314	0.0254
0.5	1.098	0.979	0.0573	1.167	1.047	0.0542	1.239	1.123	0.0491	1.337	0.0441
0.6	1.112	0.961	0.0728	1.185	1.026	0.0719	1.259	1.099	0.0679	1.360	0.0637
0.7	1.126	0.942	0.0890	1.202	1.007	0.0883	1.279	1.076	0.0862	1.382	0.0831
0.8	1.139	0.924	0.1042	1.215	0.986	0.1040	1.297	1.052	0.1043	1.404	0.1016
0.9	1.153	0.904	0.1211	1.229	0.963	0.1214	1.311	1.028	0.1210	1.421	0.1198
1.0	1.164	0.883	0.1373	1.241	0.940	0.1380	1.325	1.001	0.1393	1.437	0.1382
1.1	1.174	0.861	0.1538	1.252	0.916	0.1550	1.339	0.975	0.1573	1.452	0.1574
1.2	1.183	0.840	0.1696	1.263	0.892	0.1722	1.349	0.949	0.1741	1.466	0.1761
1.3	1.192	0.818	0.1861	1.272	0.868	0.1898	1.361	0.923	0.1918	1.478	0.1939
1.4	1.199	0.797	0.2014	1.281	0.845	0.2051	1.370	0.898	0.2081	1.489	0.2116
1.5	1.206	0.776	0.2170	1.288	0.822	0.2209	1.379	0.872	0.2252	1.500	0.2295
1.6	1.212	0.756	0.2317	1.295	0.798	0.2275	1.386	0.847	0.2414	1.509	0.2471
1.5	1.207	0.773	0.2192	1.290	0.817	0.2245	1.381	0.866	0.2292	1.562	0.2327
1.4	1.199	0.794	0.2032	1.282	0.841	0.2077	1.371	0.892	0.2117	1.491	0.2142
1.3	1.192	0.816	0.1873	1.274	0.865	0.1912	1.361	0.919	0.1939	1.480	0.1964
1.2	1.184	0.838	0.1711	1.264	0.889	0.1742	1.351	0.945	0.1768	1.468	0.1782
1.1	1.175	0.859	0.1554	1.254	0.913	0.1574	1.339	0.972	0.1588	1.454	0.1595
1.0	1.165	0.881	0.1388	1.243	0.937	0.1404	1.326	0.998	0.1411	1.439	0.1403
0.9	1.154	0.902	0.1226	1.230	0.961	0.1228	1.312	1.025	0.1228	1.422	0.1215
0.8	1.142	0.924	0.1055	1.217	0.984	0.1059	1.298	1.050	0.1056	1.404	0.1025
0.7	1.128	0.943	0.0893	1.203	1.006	0.0892	1.279	1.076	0.0862	1.385	0.0837
0.6	1.113	0.961	0.0733	1.187	1.027	0.0723	1.262	1.100	0.0686	1.363	0.0644
0.5	1.097	0.979	0.0568	1.169	1.048	0.0546	1.241	1.122	0.0504	1.338	0.0449
0.4	1.081	0.997	0.0404	1.151	1.067	0.0371	1.220	1.143	0.0326	1.314	0.0258
0.3	1.065	1.015	0.0240	1.132	1.085	0.0212	1.199	1.165	0.0144	1.290	0.0070
0.2	1.048	1.032	0.0077	1.112	1.106	0.0027	1.176	1.186	-0.0042	1.262	-0.0133
0.1	1.030	1.047	-0.0082	1.189	1.124	-0.0158	1.145	1.211	-0.0280	1.223	-0.0408