

JAERI-Tech

97-003



JT-60トロイダル磁場コイル
冷却管内部観察用ファイバースコープの開発

1997年2月

新井 貴・小池常之・清水正亜

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

本レポートは、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、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。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）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1997

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 日立高速印刷株式会社

JT - 60 トロイダル磁場コイル
冷却管内部観察用ファイバースコープの開発

日本原子力研究所那珂研究所核融合装置試験部
新井 貴・小池 常之・清水 正亜

(1997年1月7日受理)

JT - 60において、トロイダル磁場 (TF) コイル冷却管内からの水浸出しを平成4年10月にTFコイルNo.9 (TFC - 9), 平成7年7月にTFC - 14の2回経験している。その都度、局所的に無通水とするなどの処置をして運転を継続してきている。単位TFコイルの重量及び外径は、それぞれ90トン, 6mであり、装置に組み込まれている状況から、不具合コイルを交換することは非現実的である。そのため、不具合箇所の状態を正確に把握し、運転に反映させる必要がある。TFコイルの冷却管は小断面 (4mm × 20mm) で長尺 (30m) でかつ曲がり部を有するため、既存の検査技術は適用不可能であった。そこで、このような条件に適合したファイバースコープの開発を行い細管内部の任意の位置の観察を可能とした。このファイバースコープを使用してTFコイル冷却管のリーク位置の状況を観察し、JT - 60の実験運転に反映している。

Development of Fiber Scope for JT-60
Toroidal Field Coil Cooling Pipe

Takashi ARAI, Tsuneyuki KOIKE and Masatsugu SHIMIZU

Department of Fusion Facility
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 7, 1997)

Water leak was found twice in TF coil cooling pipes of JT-60 so far. First time was TFC-9 at October 1992 and second time was TFC-14 at July 1995. On all such occasions, it was stopped cooling water in part of cooling pipe and JT-60 operation was continued. Since JT-60 TF coils, of which weight and outer diameter are 90 tons and 6m, respective, were installed in a sophisticated way, it was not realistic to replace faulty coils. Therefore it is necessary to develop the inspection techniques to identify the water leak position in the cooling pipes of TF coils and reflect for JT-60 operation. In order to inspect long pipes(30m)with small cross section(4mm X 20mm)and with a bending of an angle of about 90 deg., a ready-made fiberscope could not be used, and so inspection techniques are developed. We developed the stiff and smooth fiber scope which is capable to be inserted into these long pipe. Observation area can be fixed by specially made fiber scope adapter even for such a long pipe. This technique has been successfully applied to the inspection of water leak from the cooling pipe, which took place in JT-60 TF coils.

Keywords:TF Coil Cooling Pipe, Water Leak, Fiber Scope, JT-60, Inspection, Techniques

目 次

1. はじめに	1
2. TFC の水漏洩箇所の同定	1
2. 1 TFC - 9 の同定	1
2. 2 TFC - 14 の同定	1
3. ファイバースコープの開発	2
3. 1 現有ファイバースコープの問題点	2
3. 2 模擬欠陥の予備観察	3
3. 3 模擬体挿入試験	3
3. 4 先端機構の開発	4
4. 矩形冷却管内観察用ファイバースコープ	4
5. 観察結果	4
5. 1 TFC - 9 観察結果	5
5. 2 TFC - 14 観察結果	5
5. 3 健全性試験における観察結果	5
6. おわりに	6
謝辞	6
参考文献	6

Contents

1. Introduction	1
2. Inspection Technique of Water Leak Position	1
2.1 Water Leak Position of TFC-9	1
2.2 Water Leak Position of TFC-14	1
3. Development of Fiber Scope	2
3.1 The Problem with the Present Fiber Scope	2
3.2 Preliminary Observation Testing of Model Defect	3
3.3 Insert Testing of Fiber Scope into Cooling Pipe	3
3.4 Development of Fiber Scope Adapter	4
4. System of Fiber Scope for JT-60 Toroidal Field Coil Cooling Pipe	4
5. Observation Result of JT-60 Toroidal Field Coil Cooling Pipe	4
5.1 Observation Result of TFC-9	5
5.2 Observation Result of TFC-14	5
5.3 Confirmation Test	5
6. Summary	6
Acknowledgement	6
References	6

1. はじめに

J T - 6 0 トロイダル磁場コイル (T F) コイルは、プラズマを安定に保持するためにトロイダル方向の強磁場を発生させるコイルであり、単位コイル 1 8 個をトーラス状に等間隔に配置している [1]。コイル通電によるジュール発熱は、導体内に矩形の冷却管を埋め込み強制水冷却することにより除去している。この内の 2 個 (T F C - 9 及び T F C - 1 4) より水浸出しが発見されたため、ソープショーンスニッファー法によりリーク位置の同定作業を行なった。この方法により、リーク位置は判明したものの中所の詳細については把握できない。そのため、リークの発生については、多種多様の原因が想定され、真の原因は特定できない。詳細に解析するためには、リーク位置の状況が観察できるようなファイバースコープ等をリーク位置まで挿入することによって実際にその場の状況を観察する必要があった。このため、新たに長尺矩形細管観察用のファイバースコープを開発した。本報告は、冷却管内用ファイバースコープの開発とその応用について述べる。

2. T F C の水漏洩箇所の同定

2. 1 T F C - 9 の同定

T F C は、プラズマを安定に保持するためトロイダル方向の強磁場を発生させるためのコイルである。外径 6 m、重量約 9 0 t o n の単位コイルを 1 8 個トーラス状に等間隔に配置し、プラズマ中心において約 4 T の磁場を発生させる。導体、絶縁材、冷却配管、補強部等から構成される。図 2. 1 トロイダル磁場コイル外形図及び断面図に示す。

T F C の水浸出しへは、T F C - 9 の最下部内面の水溜まりにより発見された (図 2. 1 参照)。T F C - 9 各冷却管 (総数 3 8 チャンネル、) の気密試験により、B - 8 チャンネルにおいて、30 分の間に約 $2 \text{ kg} / \text{cm}^2 \text{ G}$ の圧力降下を確認した。図 2. 2 に T F C - 9 各チャンネル気密試験結果 (抜粋) を示す。B - 8 チャンネルは冷却管口金部から 2 流路の矩形冷却管に分岐され導体内に入っているため、口金部を切断して (図 2. 3 参照) 1 流路毎の気密試験を行った。その結果、B - 8 - 1 にて同様の圧力降下を確認したが、B - 8 - 2 では、圧力降下がなかった。したがって、漏洩流路は B - 8 - 1 と断定した。この時点で、所持しているファイバースコープを用いてチャンネル内を観察したが作業は極めて困難であるとともに最も長でも口金から 3 m までしか挿入できなかった。B - 8 - 1 内のリーク位置同定には、真空機器に良く利用されるヘリウムリーク試験方法のソープショーンスニッファー法を改良した試験方法を採用した [2]。これは、予め、ヘリウムガスを冷却管内に充填し、リーク箇所から欠陥等へ浸透させておき、素早く、冷却管内を排氣する。その後、冷却管内に一方向から窒素ガスを流し、冷却管内をサンプリングプローブ (キャビラリーチューブ) にて挿入あるいは引き抜きを行いヘリウムを吸引することによってリーク位置を検査する方法である。この方法によりリーク位置は、冷却管の入口から 8 m 奥まった箇所であることが判明した。図 2. 4 に B - 8 チャンネル冷却管展開長とコイル断面図におけるリーク位置を示す。このリーク位置は、コイル内側の最狭部に位置する。処置として、リーク流路には水を流さない処置をして窒素ガスを封入して通電している。

2. 2 T F C - 1 4 の同定

T F C - 1 4 の場合、T F C - 9 の経験があり、対応及び対策も迅速に行うことができた。まず水浸出し位置が A パンケーキ側面の A - 1 チャンネルにて発見され、当初、口金付近の可能性が高いとの判断の下に口金回りの常温硬化シリコーンゴム (R T V シリコーンゴム) を除去し、口金部を検査した。しかし、口金に異常はなく発見されなかった。そこで、リークチャンネルを同定するため、A パンケーキの全チャンネルの気密試験を行った結果、A - 1 2 チャンネルであることが判明した。図 2. 5 に T F C - 1 4 に

1. はじめに

J T - 6 0 トロイダル磁場コイル (T F) コイルは、プラズマを安定に保持するためにトロイダル方向の強磁場を発生させるコイルであり、単位コイル 1 8 個をトーラス状に等間隔に配置している [1]。コイル通電によるジュール発熱は、導体内に矩形の冷却管を埋め込み強制水冷却することにより除去している。この内の 2 個 (T F C - 9 及び T F C - 1 4) より水浸出しが発見されたため、ソープションスニッパー法によりリーク位置の同定作業を行なった。この方法により、リーク位置は判明したものの中のリーク箇所の詳細については把握できない。そのため、リークの発生については、多種多様の原因が想定され、眞の原因是特定できない。詳細に解析するためには、リーク位置の状況が観察できるようなファイバースコープ等をリーク位置まで挿入することによって実際にその場の状況を観察する必要があった。このため、新たに長尺矩形細管観察用のファイバースコープを開発した。本報告は、冷却管内用ファイバースコープの開発とその応用について述べる。

2. T F C の水漏洩箇所の同定

2. 1 T F C - 9 の同定

T F C は、プラズマを安定に保持するためトロイダル方向の強磁場を発生させるためのコイルである。外径 6 m、重量約 9 0 t o n の単位コイルを 1 8 個トーラス状に等間隔に配置し、プラズマ中心において約 4 T の磁場を発生させる。導体、絶縁材、冷却配管、補強部等から構成される。図 2. 1 トロイダル磁場コイル外形図及び断面図に示す。

T F C の水浸出しへは、T F C - 9 の最下部内面の水溜まりにより発見された（図 2. 1 参照）。T F C - 9 各冷却管（総数 3 8 チャンネル、）の気密試験により、B - 8 チャンネルにおいて、3 0 分の間に約 $2 \text{ kg} / \text{cm}^2 \text{ G}$ の圧力降下を確認した。図 2. 2 に T F C - 9 各チャンネル気密試験結果（抜粋）を示す。B - 8 チャンネルは冷却管口金部から 2 流路の矩形冷却管に分岐され導体内に入っているため、口金部を切断して（図 2. 3 参照）1 流路毎の気密試験を行った。その結果、B - 8 - 1 にて同様の圧力降下を確認したが、B - 8 - 2 では、圧力降下がなかった。したがって、漏洩流路は B - 8 - 1 と断定した。この時点で、所持しているファイバースコープを用いてチャンネル内を観察したが作業は極めて困難であるとともに最も長でも口金から 3 m までしか挿入できなかった。B - 8 - 1 内のリーク位置同定には、真空機器に良く利用されるヘリウムリーク試験方法のソープションスニッパー法を改良した試験方法を採用した [2]。これは、予め、ヘリウムガスを冷却管内に充填し、リーク箇所から欠陥等へ浸透させておき、素早く、冷却管内を排氣する。その後、冷却管内に一方向から窒素ガスを流し、冷却管内をサンプリングプローブ（キャビラリーチューブ）にて挿入あるいは引き抜きを行いヘリウムを吸引することによってリーク位置を検査する方法である。この方法によりリーク位置は、冷却管の入口から 8 m 奥まった箇所であることが判明した。図 2. 4 に B - 8 チャンネル冷却管展開長とコイル断面図におけるリーク位置を示す。このリーク位置は、コイル内側の最狭部に位置する。処置として、リーク流路には水を流さない処置をして窒素ガスを封入して通電している。

2. 2 T F C - 1 4 の同定

T F C - 1 4 の場合、T F C - 9 の経験があり、対応及び対策も迅速に行うことができた。まず水浸出し位置が A パンケーキ側面の A - 1 チャンネルにて発見され、当初、口金付近の可能性が高いとの判断の下に口金回りの常温硬化シリコーンゴム (R T V シリコーンゴム) を除去し、口金部を検査した。しかし、口金に異常はなく発見されなかった。そこで、リークチャンネルを同定するため、A パンケーキの全チャンネルの気密試験を行った結果、A - 1 2 チャンネルであることが判明した。図 2. 5 に T F C - 1 4 に

おける気密試験結果及び図2. 6にソープショーンスニッファー法によるリーク位置の同定を示す。TFC-14のリーク位置は、A-12-1の流路に有り、TFC-9同様、最狭部付近に位置し、冷却管の入口から5.9mの箇所であった。措置としてリーク流路には水を流さない処置をして窒素ガスを封入した。

3. ファイバースコープの開発

3. 1 現有ファイバースコープの問題点

先にも述べたようにリーク位置を確認できたものの発生原因を究明するためには、リーク箇所の状態を観察する必要があった。原研（JT-60第2試験室）の所有する3mのファイバースコープは、本体各部の狭い部を観察するために購入したものであるが、購入当時は、最小、最長のファイバースコープであった。そのファイバースコープの型式を表3. 1に示す。側視と直視の2本のファイバーを所有しており、画素数は、3,000画素である。TFC冷却管内を観察することを検討するに当たり、小径用のファイバースコープの調査をした結果、製作メーカーの情報から産業用のファイバースコープにおいては、ファイバー外径4mmΦ以下では、長さが10m程度のものが製作可能であることが判明した。今回、観察する冷却管は、断面形状が矩形で3次元の曲りをもち複雑である。図3. 1に冷却管流路図を示す。この図は、導体内の冷却管をデフォルメしたものであるが、冷却管は、断面が矩形であり口金より20cm付近で90度曲がり、大きな円を描くように湾曲し、全長約30mでしかも2ターンしており、ファイバースコープの挿入には極めて困難な形状をしている。少なくとも挿入口を冷却水入口と出口の2箇所で考えると最低でも15m長さのファイバースコープが必要である。また、図3. 2の冷却管路の断面に示すように導体の位置（ターン）により冷却管の断面形状が異なり、B-8-1以外の冷却管においても使用可能なようになる必要がある。したがって、欠陥の詳細な3次元位置及び形状を同定するためには、新規にファイバースコープを開発する必要がある。

今回は、既存の仕様をベースに冷却管に挿入できるものを開発する。以降に冷却管内観察用ファイバースコープに必要な基本的な項目を示す。

○現有ファイバースコープの問題点と開発項目の整理

問題点	開発項目
1) 直径2~3mmΦ以下、長さ10m以上のファイバーの汎用品はない。	ファイバー自身は現有技術の延長上のものを使用し15m程度（ファイバーメーカでは、特注で3mmΦ×10mのものを製作した経験を持っている。）
2) 既製のファイバー外被では冷却管内壁と摩擦抵抗が大きい。そのため、折れ易い。	外被の材質を摩擦抵抗の小さいものに変更し、かつ剛性を上げて挿入可能にする。
3) 冷却管の形状の変化 イ) 4mm×20mmの角管 視野は通常、先端の1mmないし2mm程度の箇所を観察することになるが角管であるためどの面を見ているか分からな	視野位置がねじれないようにガイドを取付ける。 先端に視野位置を移動・固定できる機構を設ける。

おける気密試験結果及び図2. 6にソープショーンスニッファー法によるリーク位置の同定を示す。TFC-14のリーク位置は、A-12-1の流路に有り、TFC-9同様、最狭部付近に位置し、冷却管の入口から5.9mの箇所であった。措置としてリーク流路には水を流さない処置をして窒素ガスを封入した。

3. ファイバースコープの開発

3. 1 現有ファイバースコープの問題点

先にも述べたようにリーク位置を確認できたものの発生原因を究明するためには、リーク箇所の状態を観察する必要があった。原研（JT-60第2試験室）の所有する3mのファイバースコープは、本体各部の狭い部を観察するために購入したものであるが、購入当時は、最小、最長のファイバースコープであった。そのファイバースコープの型式を表3. 1に示す。側視と直視の2本のファイバーを所有しており、画素数は、3,000画素である。TFC冷却管内を観察することを検討するに当たり、小径用のファイバースコープの調査をした結果、製作メーカーの情報から産業用のファイバースコープにおいては、ファイバー外径4mmΦ以下では、長さが10m程度のものが製作可能であることが判明した。今回、観察する冷却管は、断面形状が矩形で3次元の曲りをもち複雑である。図3. 1に冷却管流路図を示す。この図は、導体内の冷却管をデフォルメしたものであるが、冷却管は、断面が矩形であり口金より20cm付近で90度曲がり、大きな円を描くように湾曲し、全長約30mでしかも2ターンしており、ファイバースコープの挿入には極めて困難な形状をしている。少なくとも挿入口を冷却水入口と出口の2箇所で考えると最低でも15m長さのファイバースコープが必要である。また、図3. 2の冷却管路の断面に示すように導体の位置（ターン）により冷却管の断面形状が異なり、B-8-1以外の冷却管においても使用可能なようになる必要がある。したがって、欠陥の詳細な3次元位置及び形状を同定するためには、新規にファイバースコープを開発する必要がある。

今回は、既存の仕様をベースに冷却管に挿入できるものを開発する。以降に冷却管内観察用ファイバースコープに必要な基本的な項目を示す。

○現有ファイバースコープの問題点と開発項目の整理

問題点	開発項目
1) 直径2~3mmΦ以下、長さ10m以上のファイバーの汎用品はない。	ファイバー自身は現有技術の延長上のものを使用し15m程度（ファイバーメーカでは、特注で3mmΦ×10mのものを製作した経験を持っている。）
2) 既製のファイバー外被では冷却管内壁と摩擦抵抗が大きい。そのため、折れ易い。	外被の材質を摩擦抵抗の小さいものに変更し、かつ剛性を上げて挿入可能にする。
3) 冷却管の形状の変化 イ) 4mm×20mmの角管 視野は通常、先端の1mmないし2mm程度の箇所を観察することになるが角管であるためどの面を見ているか分からな	視野位置がねじれないようにガイドを取付ける。 先端に視野位置を移動・固定できる機構を設ける。

くなる。

- | | |
|---------------------------------|-------------------|
| 口) 冷却管が湾曲している。
直径 6 m 円を 2 周 | 2) 項と関連あり同様に対処する。 |
| ハ) 90 度に曲がっている。 | 2) 項と関連あり同様に対処する。 |
| 4) 先端の視野方向を同定できない。 | 視野方向を同定できる機構の開発 |

○次段階の問題点（開発項目）

- | | |
|--|-------------------------------------|
| 1) 観察位置の光量（明るさ）の問題 | 現状でどの程度判別できるかにより、今後開発項目になる。 |
| 2) 分解能（ファイバーの本数）の問題
(ライトガイドとファイバー本数比) | 現状でどの程度判別できるかにより、前項とも関連し、新規開発項目となる。 |

以上の項目について開発を行ない、冷却管内の欠陥構造を究明するために適したファイバースコープを製作する。

3. 2 模擬欠陥の予備観察

矩形冷却管内の模擬欠陥を製作し、所有しているファイバースコープを利用して観察可能な欠陥の大きさを確認した。模擬欠陥の種類は、横キズ、横コーナキズ、縦キズ及び穴の 4 種類である。キズは、各々 4 ~ 6 種類の大きさの欠陥を準備した。図 3. 3 及び図 3. 4 に模擬欠陥の設計形状と測定値を示す。実施方法は、冷却管の配管形状及び 90 度の湾曲を模擬した配管を使用してファイバースコープを側視にて観察した。模擬欠陥の観察風景を写真 1 に、模擬欠陥観察結果を表 3. 2 示す。模擬冷却管の形状は、長さ 500 mm、幅 24 mm、高さ 4.0 mm、管厚さ 1.2 mm のものを使用した。

試験の結果、判別可能な欠陥の大きさは、各々 0.1 mm 程度であり、それ以下の 0.05 mm の判別は、縦キズと横コーナキズが可能で、他のキズでは、不可能であった。他に実施中に明らかになった点は、問題点で前述したようにファイバースコープで欠陥を観察する時、位置の同定が困難であり、ファイバースコープ挿入方向と観察方向とが特定できず判別が難しかった。このため対策を必要とした。（詳細は、先端機構の開発にて述べる。）

3. 3 模擬体挿入試験

予備コイル (TFC-19) を使用し、ファイバースコープを想定した模擬体である各種チューブ類の挿入、引き抜き試験を行い、挿入可能な長さと引き抜きの容易性を確認し、それぞれの剛性を評価した。表 3. 3 に挿入試験結果を示す。試験結果は、SUS チューブでは剛性が強すぎ挿入に抵抗があると同時に再使用時に塑性変形が残り使用が困難であった。テフロンチューブでは、剛性が弱く挿入時に力の伝達が容易でなく挿入長さも短かすぎた。模擬ファイバースコープの外皮のみではテフロンと同様であった。

これらの経験を基に、剛性補強のためガラス繊維強化プラスチック (FRP) 線を入れた模擬ファイバースコープを製作し、挿入試験を行った。用意した長さ 1.5 m 全てが特に大きな抵抗もなく挿入可能なことが確認できた。図 3. 5 に模擬ファイバースコープの断面形状を示す。FRP 線入り模擬ファイバースコープは、剛性の異なる 2 種類を製作した。剛性の違いは、テフロン外皮は同一で FRP 線の芯数を 6 芯

と8芯とすることにより調整した。これに対応してライトガイドの芯数を30芯と20芯とした。

3. 4 先端機構の開発

先端機構は、矩形冷却管内の幅及び高さ方向の位置固定とファイバースコープ先端の回転防止のために必要なものである。まず第一段階では、ファイバースコープを2本抱き合わせ粘着テープにて固定した一体型とし、冷却管内に挿入した。この結果は、約1.4mまで挿入できたが抵抗が非常に大きくファイバーの折れが懸念された。次に、翼状粘着テープを先端付近に取付け回転防止を試みたが冷却管内にて遊びが大きく視野にぶれを生じた。このような経験を基に、先端部分に剛性の強いFRP材を使用して冷却管内をガイドする方法とした。試験は、模擬欠陥の予備観察の際に使用した90度湾曲矩形配管を利用し、1面をアクリル板にすることにより挿入状況が確認できるようにした。写真2に先端アダプターの通過試験を示す。これによりアダプターの通過具合を確認しながら形状を決定した。側視用のアダプターは、ファイバーを固定する位置を偏心させることにより視野を移動させる構造とし、これを数種類用いて冷却管内全域をカバーできるようにした。また、その後、実機コイルの観察経験により、欠陥は、冷却管コーナー部に存在していることが多いと判断してコーナーを中心に観察できるように水平面から20度傾けた位置で観察できるようにファイバースコープ先端部分を改造した。図3.6に先端アダプターと冷却管断面における位置関係を示す。

4. 矩形冷却管内観察用ファイバースコープ

前章の開発及び試験により、冷却管の欠陥を観察できるファイバースコープの開発は可能となつたため、実機用ファイバースコープを製作し、TFC-9冷却管チャンネル内の欠陥を観察し、原因究明に反映させることとした。

図4.1に矩形冷却管内観察用ファイバースコープの外観を示す。有効長を最長の1.4mとし、外径φ3mmに収めることができるように、中心にイメージガイドを3,000画素、その周囲にライトガイドを30芯、剛性調整用のFRP線を6芯、配した。先端に冷却管の形状に合わせたアダプターを取り付けた。ピントは、後方の接眼レンズにより調整する。照明用の光はライトガイドリード部よりライトガイドを通して先端を照らす。この光源は、既存の装置をそのまま使用し、互換性があるようにした。また、接眼レンズ部分にビデオカメラを装着して観察状況を録画できるようにした。図4.2に冷却管内観察用ファイバースコープ装置の構成図を示す。ファイバースコープの挿入、引き抜き操作は、当初人間の手により行っていたが、記録画像の鮮明度を上げるために一定速度で引き抜き可能なように引き抜き装置を開発した。図4.3に引き抜き装置を示す。これら、一連の開発により、各種の問題点を克服し、実機コイル冷却管内の観察が可能となった。

5. 観察結果

冷却管のコイル導体への出入口部（口金部）は、溶接により一体構造となっているため、まず、観察する前に冷却管口金部を加工（切断）してファイバースコープが挿入可能なようにする必要がある。写真3に加工した口金部分を示す。口金部絶縁碍子に引き抜き装置を取り付けてファイバースコープを挿入し、観察を開始する。観察結果は、ビデオ録画し、後日、詳細な検討を行えるように配慮している。

実機コイル冷却管内の観察は、これまで3回の機会があった。1回目は、TFC-9の水浸出し後リーグ位置観察の必要性（今回の開発の動機）が生じた平成6年12月、2回目は、TFC-14に水浸出しを発見した平成7年7月、3回目は、TFCの健全性チェックの一環として行った観察で平成7年11～

と8芯とすることにより調整した。これに対応してライトガイドの芯数を30芯と20芯とした。

3.4 先端機構の開発

先端機構は、矩形冷却管内の幅及び高さ方向の位置固定とファイバースコープ先端の回転防止のために必要なものである。まず第一段階では、ファイバースコープを2本抱き合わせ粘着テープにて固定した一体型とし、冷却管内に挿入した。この結果は、約1.4mまで挿入できたが抵抗が非常に大きくファイバーの折れが懸念された。次に、翼状粘着テープを先端付近に取付け回転防止を試みたが冷却管内にて遊びが大きく視野にぶれを生じた。このような経験を基に、先端部分に剛性の強いFRP材を使用して冷却管内をガイドする方法とした。試験は、模擬欠陥の予備観察の際に使用した90度湾曲矩形配管を利用し、1面をアクリル板にすることにより挿入状況が確認できるようにした。写真2に先端アダプターの通過試験を示す。これによりアダプターの通過具合を確認しながら形状を決定した。側視用のアダプターは、ファイバーを固定する位置を偏心させることにより視野を移動させる構造とし、これを数種類用いて冷却管内全域をカバーできるようにした。また、その後、実機コイルの観察経験により、欠陥は、冷却管コーナー部に存在していることが多いと判断してコーナーを中心に観察できるように水平面から20度傾けた位置で観察できるようにファイバースコープ先端部分を改造した。図3.6に先端アダプターと冷却管断面における位置関係を示す。

4. 矩形冷却管内観察用ファイバースコープ

前章の開発及び試験により、冷却管の欠陥を観察できるファイバースコープの開発は可能となつたため、実機用ファイバースコープを製作し、TFC-9冷却管チャンネル内の欠陥を観察し、原因究明に反映させることとした。

図4.1に矩形冷却管内観察用ファイバースコープの外観を示す。有効長を最長の1.4mとし、外径φ3mmに収めることができるように、中心にイメージガイドを3,000画素、その周囲にライトガイドを30芯、剛性調整用のFRP線を6芯、配した。先端に冷却管の形状に合わせたアダプターを取り付けた。ピントは、後方の接眼レンズにより調整する。照明用の光はライトガイドリード部よりライトガイドを通して先端を照らす。この光源は、既存の装置をそのまま使用し、互換性があるようにした。また、接眼レンズ部分にビデオカメラを装着して観察状況を録画できるようにした。図4.2に冷却管内観察用ファイバースコープ装置の構成図を示す。ファイバースコープの挿入、引き抜き操作は、当初人間の手により行っていたが、記録画像の鮮明度を上げるために一定速度で引き抜き可能なように引き抜き装置を開発した。図4.3に引き抜き装置を示す。これら、一連の開発により、各種の問題点を克服し、実機コイル冷却管内の観察が可能となった。

5. 観察結果

冷却管のコイル導体への出入口部（口金部）は、溶接により一体構造となっているため、まず、観察する前に冷却管口金部を加工（切断）してファイバースコープが挿入可能なようにする必要がある。写真3に加工した口金部分を示す。口金部絶縁碍子に引き抜き装置を取り付けてファイバースコープを挿入し、観察を開始する。観察結果は、ビデオ録画し、後日、詳細な検討を行えるように配慮している。

実機コイル冷却管内の観察は、これまで3回の機会があった。1回目は、TFC-9の水浸出し後リーグ位置観察の必要性（今回の開発の動機）が生じた平成6年12月、2回目は、TFC-14に水浸出しを発見した平成7年7月、3回目は、TFCの健全性チェックの一環として行った観察で平成7年11～

と8芯とすることにより調整した。これに対応してライトガイドの芯数を30芯と20芯とした。

3. 4 先端機構の開発

先端機構は、矩形冷却管内の幅及び高さ方向の位置固定とファイバースコープ先端の回転防止のために必要なものである。まず第一段階では、ファイバースコープを2本抱き合わせ粘着テープにて固定した一体型とし、冷却管内に挿入した。この結果は、約1.4mまで挿入できたが抵抗が非常に大きくファイバーの折れが懸念された。次に、翼状粘着テープを先端付近に取付け回転防止を試みたが冷却管内にて遊びが大きく視野にぶれを生じた。このような経験を基に、先端部分に剛性の強いFRP材を使用して冷却管内をガイドする方法とした。試験は、模擬欠陥の予備観察の際に使用した90度湾曲矩形配管を利用し、1面をアクリル板にすることにより挿入状況が確認できるようにした。写真2に先端アダプターの通過試験を示す。これによりアダプターの通過具合を確認しながら形状を決定した。側視用のアダプターは、ファイバーを固定する位置を偏心させることにより視野を移動させる構造とし、これを数種類用いて冷却管内全域をカバーできるようにした。また、その後、実機コイルの観察経験により、欠陥は、冷却管コーナー部に存在していることが多いと判断してコーナーを中心に観察できるように水平面から20度傾けた位置で観察できるようにファイバースコープ先端部分を改造した。図3.6に先端アダプターと冷却管断面における位置関係を示す。

4. 矩形冷却管内観察用ファイバースコープ

前章の開発及び試験により、冷却管の欠陥を観察できるファイバースコープの開発は可能となつたため、実機用ファイバースコープを製作し、TFC-9冷却管チャンネル内の欠陥を観察し、原因究明に反映させることとした。

図4.1に矩形冷却管内観察用ファイバースコープの外観を示す。有効長を最長の1.4mとし、外径φ3mmに収めることができるように、中心にイメージガイドを3,000画素、その周囲にライトガイドを30芯、剛性調整用のFRP線を6芯、配した。先端に冷却管の形状に合わせたアダプターを取り付けた。ピントは、後方の接眼レンズにより調整する。照明用の光はライトガイドリード部よりライトガイドを通して先端を照らす。この光源は、既存の装置をそのまま使用し、互換性があるようにした。また、接眼レンズ部分にビデオカメラを装着して観察状況を録画できるようにした。図4.2に冷却管内観察用ファイバースコープ装置の構成図を示す。ファイバースコープの挿入、引き抜き操作は、当初人間の手により行っていたが、記録画像の鮮明度を上げるために一定速度で引き抜き可能なように引き抜き装置を開発した。図4.3に引き抜き装置を示す。これら、一連の開発により、各種の問題点を克服し、実機コイル冷却管内の観察が可能となった。

5. 観察結果

冷却管のコイル導体への出入口部（口金部）は、溶接により一体構造となっているため、まず、観察する前に冷却管口金部を加工（切断）してファイバースコープが挿入可能なようにする必要がある。写真3に加工した口金部分を示す。口金部絶縁碍子に引き抜き装置を取り付けてファイバースコープを挿入し、観察を開始する。観察結果は、ビデオ録画し、後日、詳細な検討を行えるように配慮している。

実機コイル冷却管内の観察は、これまで3回の機会があった。1回目は、TFC-9の水浸出し後リーグ位置観察の必要性（今回の開発の動機）が生じた平成6年12月、2回目は、TFC-14に水浸出しを発見した平成7年7月、3回目は、TFCの健全性チェックの一環として行った観察で平成7年11～

12月である。以下に各々の観察結果の一例を報告する。

5. 1 TFC-9 観察結果

平成4年10月に水浸出しを発見したTFC-9のB-8-1のリーク位置は、予めソープショーンスニッパー法により口金部からの距離は8m付近であると同定していた。そのため、開発したファイバースコープを使用し、8mの前後2mを重点的に観察した。欠陥としては、冷却水入口側口金部から8, 019mmのリーク位置付近に3箇所の亀裂を発見した。即ち、冷却水入口側から8, 000mmの位置に36mmの亀裂②（この亀裂がリーク位置と一致）と反対側に10mmの亀裂①、8, 400mmの位置に60mmの亀裂③の3箇所であった。図5. 1に亀裂位置を、それぞれの亀裂の様子を写真4、5、6に示す。写真の中で円の中央の黒い部分は、ファイバースコープ自身の影である。亀裂は、冷却管と平行に入っており、観察の様子とリーク位置の関係から全てが貫通しているのではなく亀裂の一部が貫通していると思われる。また、亀裂は、全て冷却管の絶縁側コーナーの部分の短辺側に存在し、矩形冷却管平坦部には、亀裂は無かった。

B-8-2の冷却管の内部の様子も同時に観察したが、亀裂と思われるような欠陥は存在しなかった。

5. 2 TFC-14 観察結果

平成7年夏にTFC-14に水浸出しを発見し、ただちに、気密試験とソープショーンスニッパー法による作業を行いA-12-1の冷却管最狭部（6, 798mm）より約850mm入口に近い部分の5, 895mmの位置に同定できた。次に、ファイバースコープによる観察を行いTFC-9と同様に冷却管コーナー部短辺側に亀裂を発見した。図5. 2に亀裂位置を写真7、8に亀裂の状況を示す。写真の中で円の中央部分が白く見えるものは、ライトガイドの光量を多くし過ぎたためのハレーションである。亀裂位置は、リーク位置と一致した箇所で最狭部より約880mm手前側の層間絶縁側に2箇所発見した。亀裂の長さは、亀裂②は非常に長く約450mm程度であり、亀裂①は、亀裂が筋状のものか不鮮明であったが約100mm程度である。

5. 3 健全性試験における観察結果

TFC-9、TFC-14と2つのコイルに亀裂を発見した結果を踏まえ、全TFCの状態を把握すべく全チャンネル気密試験と12チャンネルのファイバースコープによる観察を行った。（平成7年11月～12月）TFC-9のB-8とTFC-14のA-12はもとより、TFCの構造及び別途実施の強度解析結果等を考慮して比較できるチャンネルについて観察を行った。表5. 1にファイバースコープ観察箇所及び結果を示す。この時期の観察では、先に発見した亀裂状態の進展の有無が大きな注目点であった。これについては、TFC-14の場合、観察の間隔が平成7年7月から約3ヶ月後観察であったため及びこのリーク以降コイル運転条件（転倒力制限等）変更に起因すると推察されるが亀裂の進展は観察できなかった。しかし、TFC-9の場合、観察の間隔が1年間あったため及び転倒力制限以前に高転倒力の発生した運転があったことに起因すると推察されるが、亀裂は当初より大きくなっているように観察された。また、B-8-2には、新しい亀裂が発見された。このことによりB-8チャンネルは、窒素ガス封入をおこない無通水とした。その他の観察結果では、有意な異常は観察されなかった。図5. 3にTFC-9 B-8亀裂位置を示す。TFC-14 A-12亀裂位置については、それほど変化なく図5. 2を参照されたい。各冷却管の状態の一例をTFC-9について写真9に、TFC-14について写真10に示す。写真の中央の黒い部分は、ファイバースコープ自身の影である。

6. おわりに

実機用ファイバースコープを製作して、冷却管内面を観察した結果、亀裂を発見することができ矩形冷却管内観察用ファイバースコープの開発は成功したと言える。但し、視野の確保、特にコーナー部の観察が困難な部分があり、アダプター改良の余地がある。また、解像度に関しては、さらに鮮明な画像を入手できれば、亀裂の深さ方向の情報等、亀裂のより詳細な情報を得ることができ、今後の検討・対策方法へ、さらに反映できると思われる。この2点は、今後、ファイバースコープを改良する上で重要な項目である。

謝辞

本報告書をまとめるに当たり、有意義なコメント及び御指導を戴いた西堂雅博 JT-60第2試験室長及び船橋昭昌核融合装置試験部長に深く感謝致します。また、(株)日立製作所、(株)東芝の開発、試験に携わった各位に深くお礼を申し上げます。

参考文献

- [1] T. Ando, M. Ohkubo, S. Nishio, M. Shimizu, H. Takatsu, M. Yamamoto,
M. Isaka, M. Ohta, JT-60 Team, Construction of Toroidal and poloidal Field
Coils of JT-60, 9th International Conference on Magnet Technology (1985)
- [2] 新井他, To be published in JAERI-tech
- [3] ダイヤガイドスコープカタログ、三菱電線工業株式会社 (1991)
- [4] OES工業用内視鏡カタログ、オリンパス光学工業株式会社 (1992)
- [5] J. R. Last, T. Bonicelli et al., JET TFcoil fault - detection, Diagnosis and
revention, Fusion Technology 1990 ed. B. E. Keen, M. Huguet, R.
Hemsworth, (Elsevier Science Publishers B. V., 1991)

6. おわりに

実機用ファイバースコープを製作して、冷却管内面を観察した結果、亀裂を発見することができ矩形冷却管内観察用ファイバースコープの開発は成功したと言える。但し、視野の確保、特にコーナー部の観察が困難な部分があり、アダプター改良の余地がある。また、解像度に関しては、さらに鮮明な画像を入手できれば、亀裂の深さ方向の情報等、亀裂のより詳細な情報を得ることができ、今後の検討・対策方法へ、さらに反映できると思われる。この2点は、今後、ファイバースコープを改良する上で重要な項目である。

謝辞

本報告書をまとめるに当たり、有意義なコメント及び御指導を戴いた西堂雅博 JT-60第2試験室長及び船橋昭昌核融合装置試験部長に深く感謝致します。また、(株)日立製作所、(株)東芝の開発、試験に携わった各位に深くお礼を申し上げます。

参考文献

- [1] T. Ando, M. Ohkubo, S. Nishio, M. Shimizu, H. Takatsu, M. Yamamoto, M. Isaka, M. Ohta, JT-60 Team, Construction of Toroidal and poloidal Field Coils of JT-60, 9th International Conference on Magnet Technology (1985)
- [2] 新井他, To be published in JAERI-tech
- [3] ダイヤガイドスコープカタログ、三菱電線工業株式会社 (1991)
- [4] OES 工業用内視鏡カタログ、オリンパス光学工業株式会社 (1992)
- [5] J. R. Last, T. Bonicelli et al., JET TFcoil fault - detection, Diagnosis and revention, Fusion Technology 1990 ed. B. E. Keen, M. Huguet, R. Hemsworth, (Elsevier Science Publishers B. V., 1991)

6. おわりに

実機用ファイバースコープを製作して、冷却管内面を観察した結果、亀裂を発見することができ矩形冷却管内観察用ファイバースコープの開発は成功したと言える。但し、視野の確保、特にコーナー部の観察が困難な部分があり、アダプター改良の余地がある。また、解像度に関しては、さらに鮮明な画像を入手できれば、亀裂の深さ方向の情報等、亀裂のより詳細な情報を得ることができ、今後の検討・対策方法へ、さらに反映できると思われる。この2点は、今後、ファイバースコープを改良する上で重要な項目である。

謝辞

本報告書をまとめるに当たり、有意義なコメント及び御指導を戴いた西堂雅博 JT-60第2試験室長及び船橋昭昌核融合装置試験部長に深く感謝致します。また、(株)日立製作所、(株)東芝の開発、試験に携わった各位に深くお礼を申し上げます。

参考文献

- [1] T. Ando, M. Ohkubo, S. Nishio, M. Shimizu, H. Takatsu, M. Yamamoto,
M. Isaka, M. Ohta, JT-60 Team, Construction of Toroidal and poloidal Field
Coils of JT-60, 9th International Conference on Magnet Technology (1985)
- [2] 新井他, To be published in JAERI-tech
- [3] ダイヤガイドスコープカタログ、三菱電線工業株式会社 (1991)
- [4] OES工業用内視鏡カタログ、オリンパス光学工業株式会社 (1992)
- [5] J. R. Last, T. Bonicelli et al., JET TFcoil fault - detection, Diagnosis and
revention, Fusion Technology 1990 ed. B. E. Keen, M. Huguet, R.
Hemsworth, (Elsevier Science Publishers B. V., 1991)

表 3. 1 ファイバースコープ型式

名 称	型 式	仕 様
ファイバースコープ (三菱電線工業)	ダイアガイドスコープ 直視 S A D 3 5 - A 0 1 1 5	直視、視野角 35° スコープ外径 ϕ 1.0 mm 挿入長 15 m SUS管
	側視 S A S 3 5 - A 0 3 0 3	側視、視野角 35° スコープ長 ϕ 3.0 mm 挿入長 3 m テフロン
	光源装置 Fiber Optic Lightsource Model LS3000 XENON	キセノンランプ
ビデオカメラ (ビクター)	Color Video Camera TK-800 VICTOR	CCD、 30万画素
	KAMERA Control UNIT TK-U800	VHS
	Video Recorder	VHS
アダプター	PENTAX VIDEO KC ADAPTER (ペンタックス)	25 mm
	Fiber -Zoom Adapter 49mm (三菱電線工業)	
スチールカメラ (ペンタックス)	SMC PENTAX M-ZOOM付 1 : 2.8 40-80 mm	40~80 mmズーム $f: 3.5$

表3. 2 模擬欠陥観察結果

テストピース形状	欠陥観察結果	備考
No. 1 (横キズ)	①欠陥大きさ 1.0, 0.5, 0.2, 0.1 mm まで判別可能 ②ファイバーと欠陥までの距離が近いため有効 視野が狭い ③ハレーションが生じることがある	
No. 2 (コーナー横キズ)	①欠陥大きさ 1.0, 0.5, 0.2, 0.1, 0.05 mmまで判別可能	
No. 3 (縦キズ)	①欠陥大きさ 0.5, 0.2, 0.1, 0.05 mm まで判別可能 ②ハレーションが生じる	
No. 3 (丸穴)	①欠陥大きさ ϕ 1.0, ϕ 0.5, ϕ 0.2, ϕ 0.1 mmまで判別可能 ②欠陥大きさ ϕ 0.05, ϕ 0.01 mmは 判別不可 ③ファイバーと欠陥までの距離が近いため有効 視野が狭い ④ハレーションが生じる	
その他	①矩形の長辺部観察時のファイバーの位置出しが 困難 ②ファイバーの配管挿入の向きと観察時の向きの 判別が難しい	

表3.3 挿入試験結果

試験物	挿入距離(m)
SUSチューブ(外径0.8mm、内径0.5mm)	16.3
テフロンチューブ(外径2.6mm、内径1.5mm)	10.4
テフロンチューブ(外径2.6mm、内径1.5mm)	8.1
SUSチューブ(外径0.8mm、内径0.5mm) +テフロンチューブ(外径2.0mm、内径1.5mm)	10.1
テフロンチューブ(模擬ファイバースコープ用) (外径3.0mm、内径2.0mm)	9.2
模擬ファイバースコープ(外径3.0mm、内径2.0mm) FRP線、イメージガイド、ライトガイド)	>15.0

表5.1 健全性試験時ファイバースコープ観察箇所及び観察結果

	検査箇所	気密試験結果		ファイバースコープ 観察結果
		流路1	流路2	
1	TFC-9 B-8 チャンネル (IN側)	×	×	前回発見した亀裂を確認した。 B-8-2に新しく亀裂を発見した。
2	TFC-14 A-12 チャンネル (IN側)	×	○	A-12-1にて前回発見した亀裂を確認し、5.7~5.9m付近に筋状の線を発見した。
3	TFC-5 B-1 チャンネル (IN側)	○		5.8~6.6m付近に筋状の跡が見られる。
4	TFC-5 A-12 チャンネル (IN側)	○		異常なし
5	TFC-6 A-1 チャンネル (IN側)	○		異常なし
6	TFC-8 B-8 チャンネル (IN側)	○		異常なし
7	TFC-8 B-1 チャンネル (OUT側)	○		異常なし
8	TFC-9 B-7 チャンネル (IN側)	○		6.5~7.0m付近に数箇所、筋状の跡が見られる。
9	TFC-9 B-9 チャンネル (IN側)	○		5.3~6.8m付近に数箇所、筋状の跡が見られる。
10	TFC-14 A-1 チャンネル (IN側)	○		異常なし
11	TFC-17 B-8 チャンネル (IN側)	○		最狭部の中央部分に腐蝕らしきものあり。
12	TFC-18 A-12 チャンネル (IN側)	○		異常なし

備考：検査箇所の決定については下記の考慮した。

1. B-8 及び A-12 は、亀裂の在った部位と他のコイルとの比較
2. A社製 (TFC-5、8、9、14) と B社 (TFC-6、17、18) の比較
3. A-1 及び B-1 は、応力が最大
4. TFC-9 の B-7 及び B-9 は、B-9 が無通水となるため健全性の確認
5. B-1 における IN側と OUT側の比較

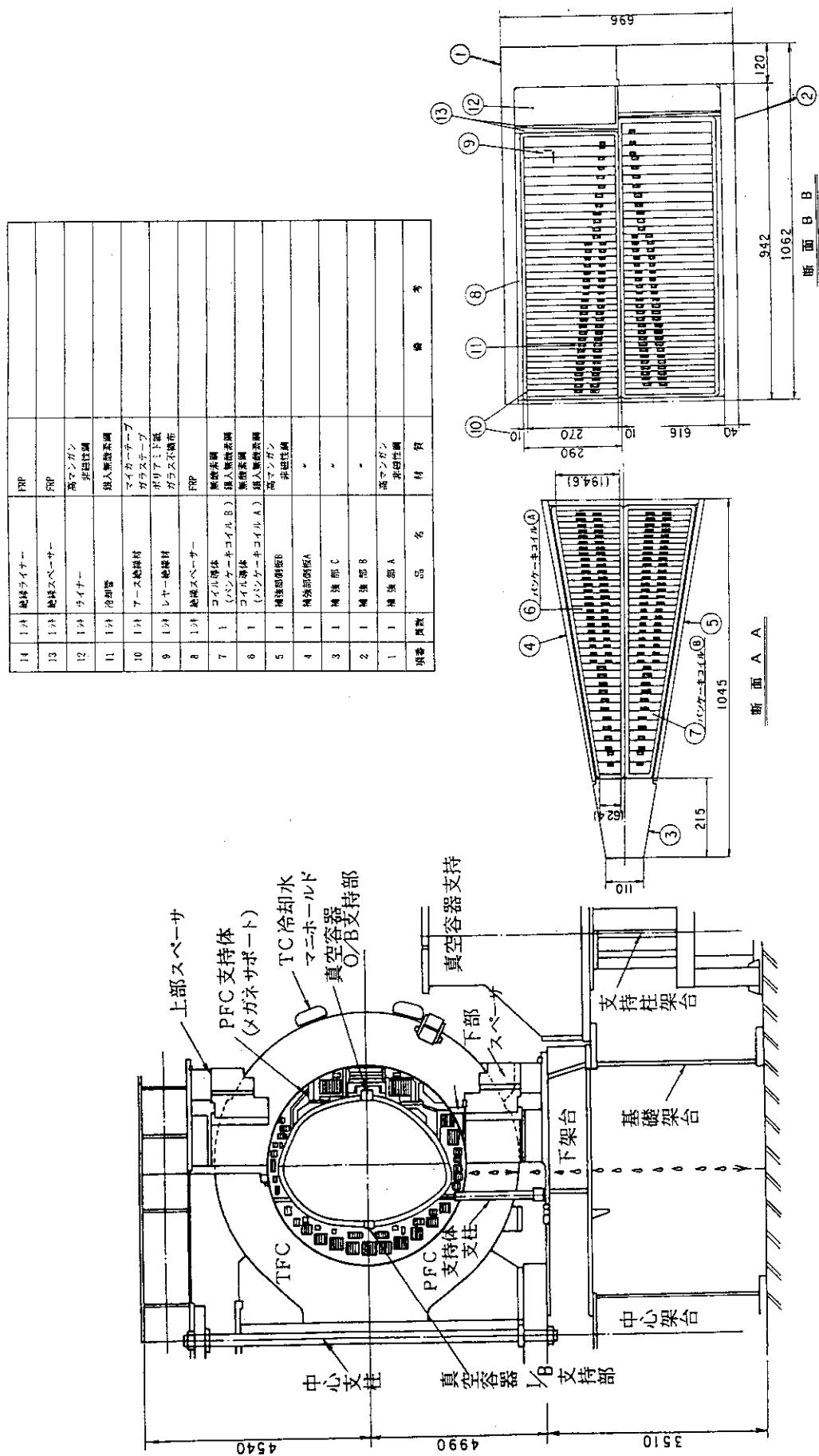
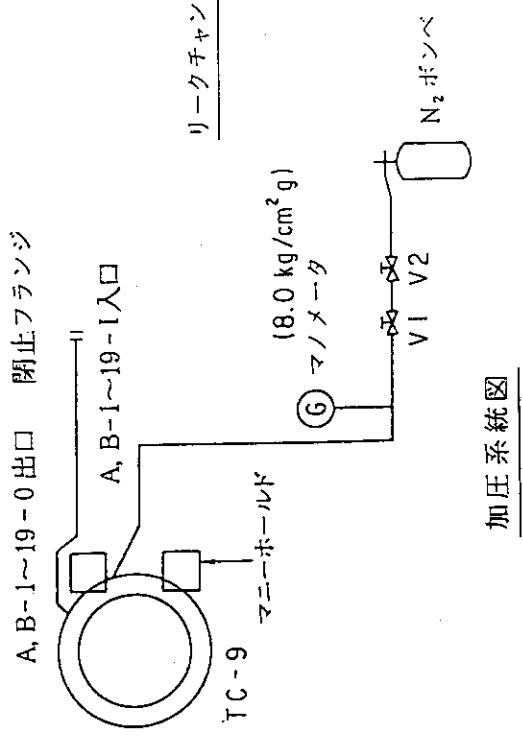


図2.1 トロイダル磁場コイル外形図及び断面図

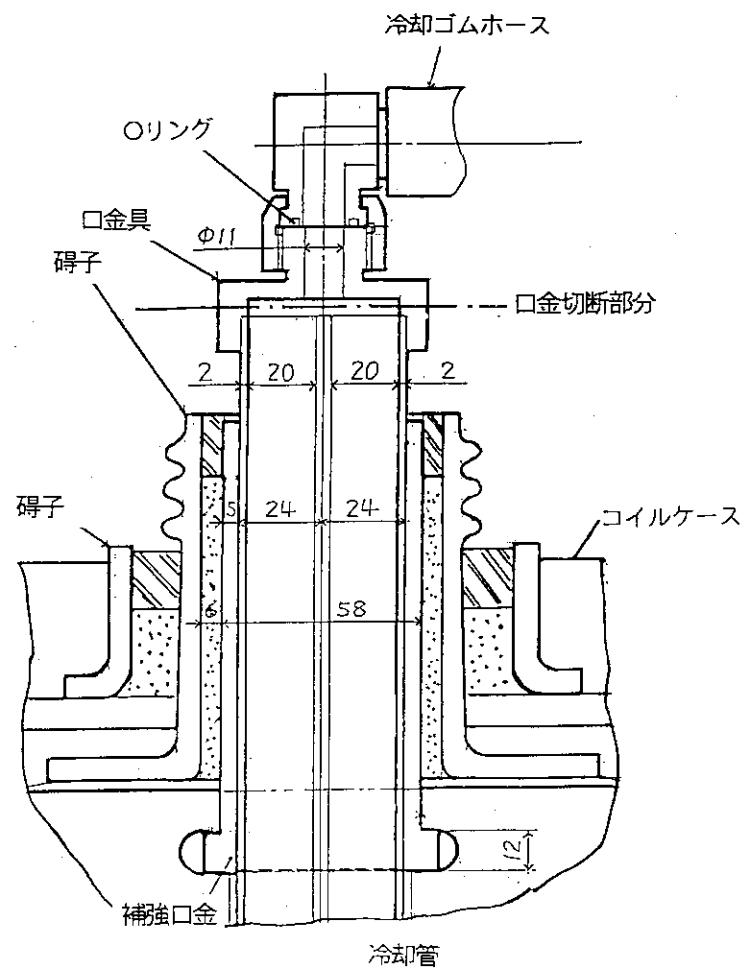
TC-9 各チャンネル毎に N₂ ガスを封入し圧力の経過を見る。

冷却チャンネル毎に N₂ ガスを封入し圧力の経過を見る。

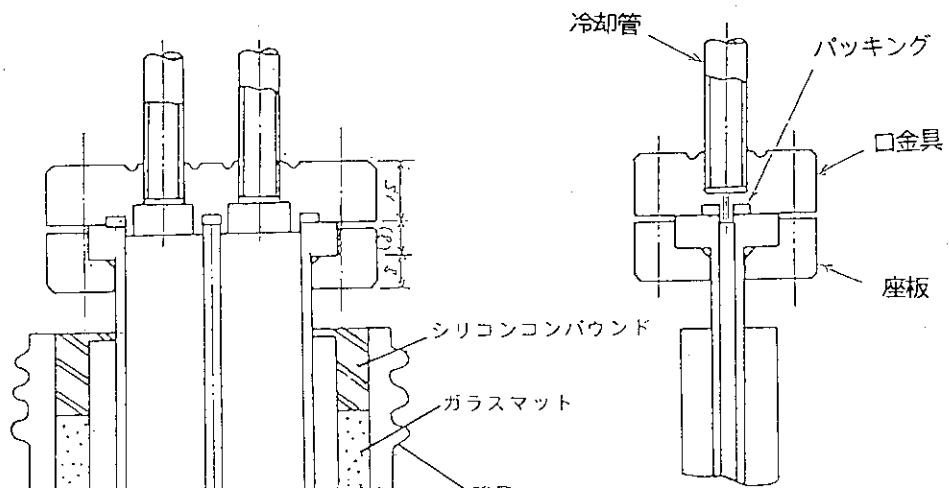


No.	初期圧力(kg/cm ² g)	経過時間	圧力	経過時間	圧力	経過時間	圧力	経過時間	圧力
A-1	8.096	0分	8.096	4分	8.098	30分	+ 0.002		
A-2	8.167	0分	8.167	2分	8.168	30分	+ 0.001		
A-3	8.074	0分	8.071	3分	8.074	30分	+ 0.003		
A-4	8.180	0分	8.180	2分	8.181	30分	+ 0.001		
A-5	8.297	0分	8.296	2分	8.295	30分	- 0.001		
A-6	8.176	0分	8.177	2分	8.178	30分	+ 0.001		
B-7	8.136	0分	8.135	1分	8.135	30分	± 0.000		
B-8	8.041	0分	-	一分	5.972	30分	- 2.069		
B-9	8.156	0分	8.156	1分	8.155	30分	- 0.001		
B-10	8.638	0分	8.637	1分	8.637	30分	± 0.000		
B-11	8.181	0分	8.180	1分	8.180	30分	± 0.000		
B-12	8.061	0分	8.061	1分	8.060	30分	- 0.001		
B-13	8.131	0分	8.131	2分	8.130	30分	- 0.001		
B-14	8.140	0分	8.140	1分	8.140	30分	± 0.000		
B-15	8.088	0分	8.088	1分	8.087	30分	- 0.001		
B-16	8.081	0分	8.081	1分	8.081	30分	± 0.000		
B-17	8.116	0分	8.115	1分	8.115	30分	± 0.000		
B-18	8.243	0分	-	一分	8.239	30分	- 0.004		
B-18-2	8.055	0分	8.055	1分	8.053	30分	- 0.002		
B-19	8.240	0分	-	一分	8.227	45分	- 0.013		
B-19-2	8.159	0分	8.158	1分	8.136	52分	- 0.022		

図 2. 2 TFC-9 冷却チャンネル気密試験結果（抜粋）



(改造前)



(改造後)

図2.3 矩形冷却管口金断面図

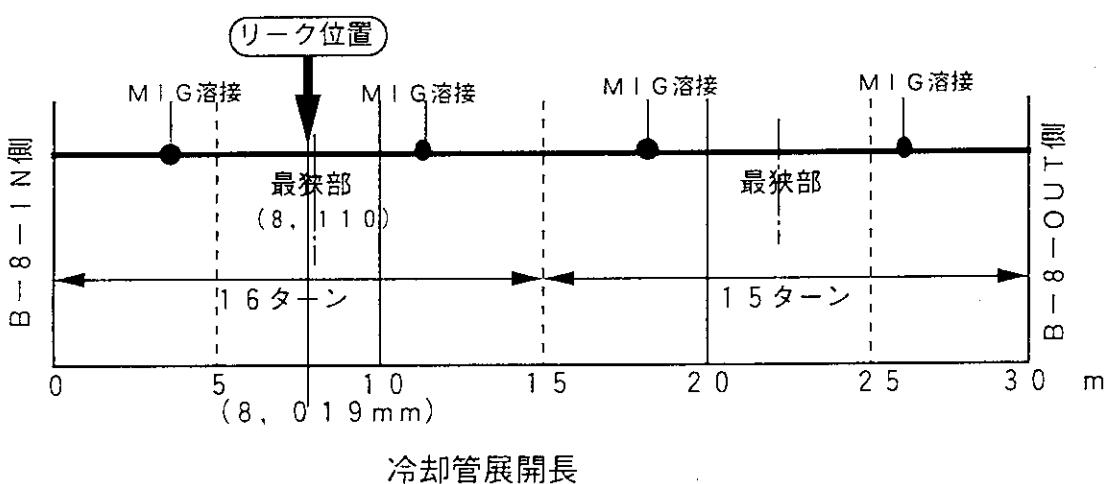
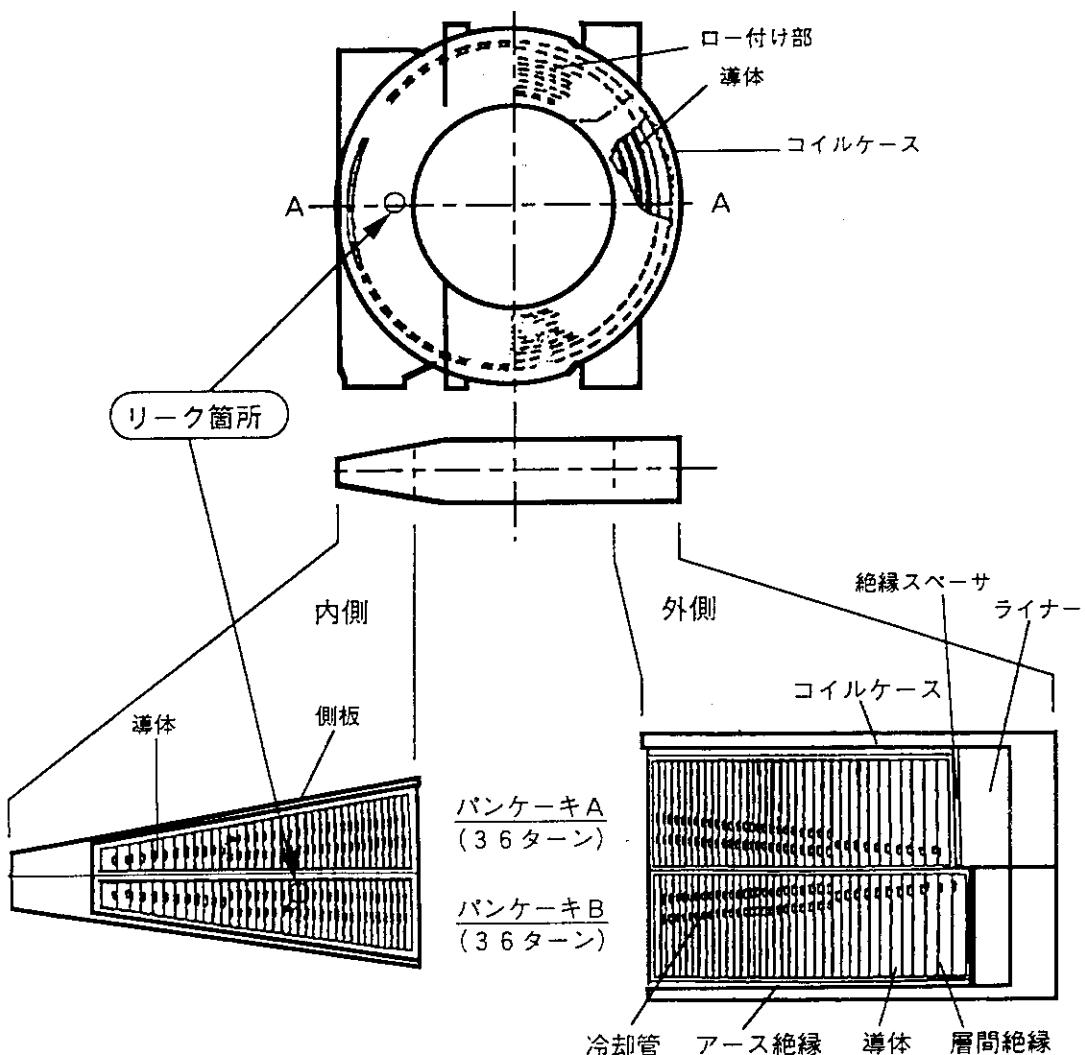
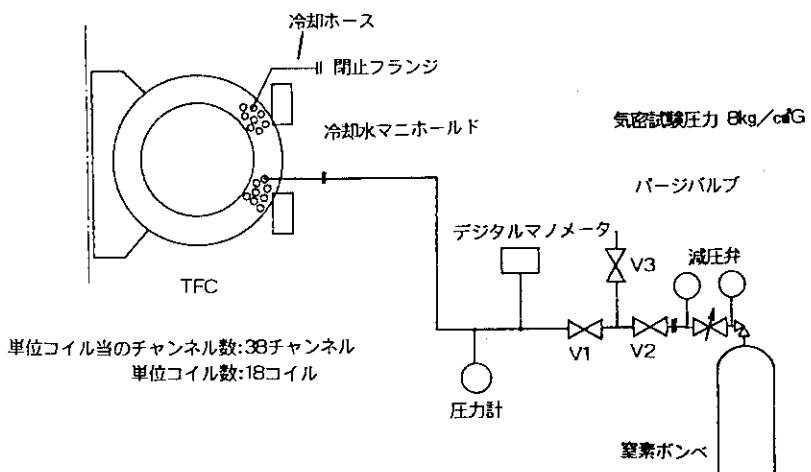


図2.4 TFC-9 B-8チャンネルリーク位置



チャンネル	圧力 (kg/cm ²)								備考
	0分	2分	5分	10分	15分	20分	29~15分 圧力下	冷却流路	
A-1	8.054	8.052	8.052	8.050	8.050	8.048	0.002	2流路	
2	8.152	8.149	8.148	8.146	8.146	8.145	0.003	"	
3	8.149	8.148	8.147	8.146	8.145		0.003	"	
4	8.253	8.253	8.252	8.251	8.251		0.002	"	
5	8.138	8.138	8.138	8.138	8.138		0.000	"	
6	8.117	8.116	8.115	8.114	8.114		0.002	"	
7	8.143	8.142	8.142	8.141	8.141		0.001	"	
8	8.122	8.121	8.120	8.120	8.120		0.001	"	
9	8.201	8.201	8.201	8.200	8.200		0.001	"	
10	8.239	8.239	8.238	8.237	8.237		0.002	"	
11	8.274	8.273	8.272	8.272	8.272		0.001	"	
12	8.120	7.950	7.380	6.840	6.343	5.880	1.607	"	最大リーク
13	8.140	8.139	8.138	8.138	8.138		0.001	1流路	
14	8.439	8.438	8.438	8.437	8.436	8.436	0.002	"	
15	8.246	8.245	8.244	8.243	8.243		0.002	"	
16	8.170	8.168	8.168	8.167	8.167		0.001	"	
17	8.064	8.063	8.063	8.063	8.063		0.000	"	
18	8.117	8.115	8.114	8.113	8.112		0.003	"	
19	8.162	8.162	8.161	8.160	8.158	8.158	0.004	"	
12①	8.417	8.055	-	6.733	-	5.369	2.433	"	リーク
12②	8.116	8.115	-	8.111	-	8.106	0.009	"	

図2.5 TFC-14冷却チャンネル気密試験結果

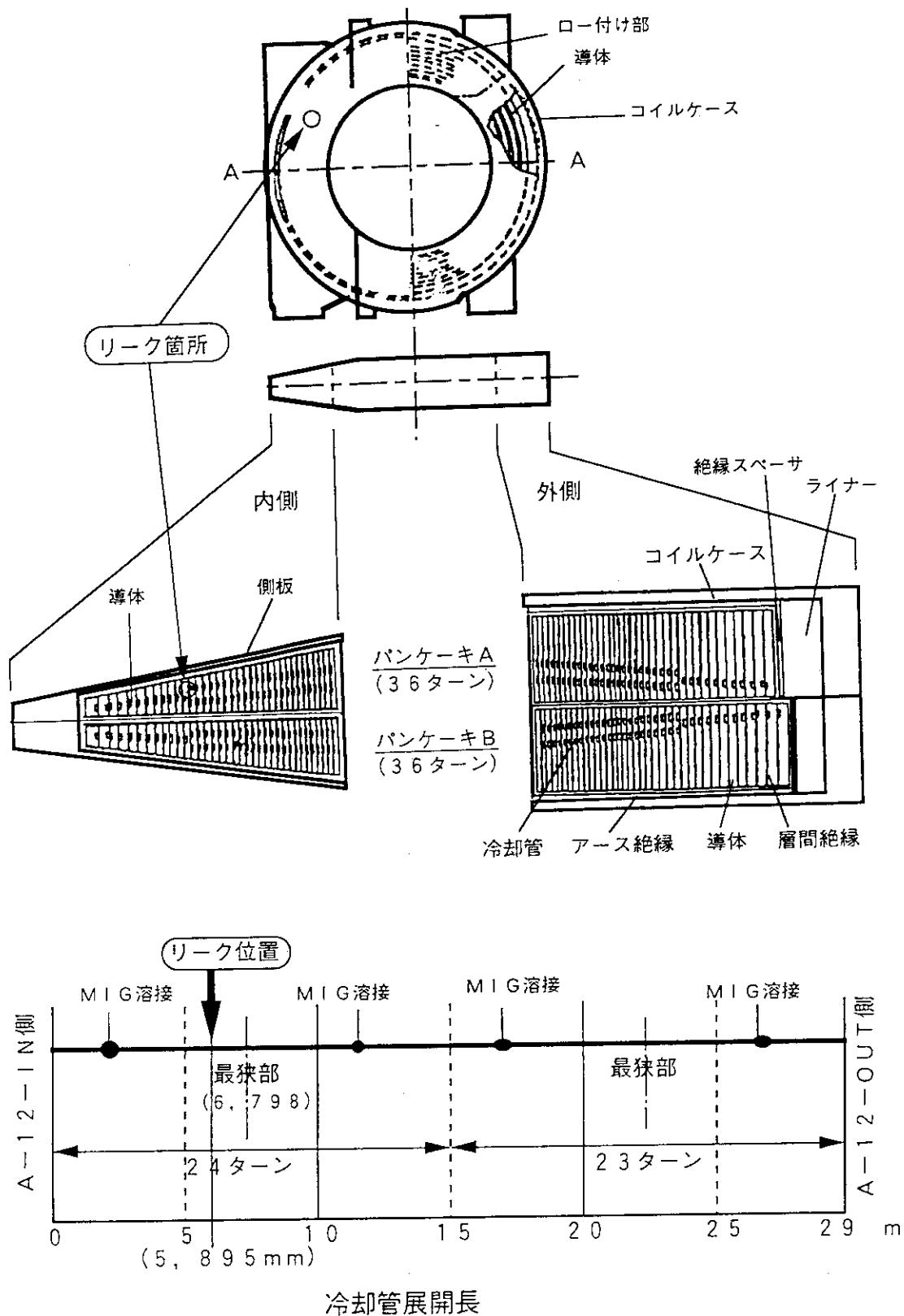


図2.6 TFC-14 A-12 チャンネルリーク位置

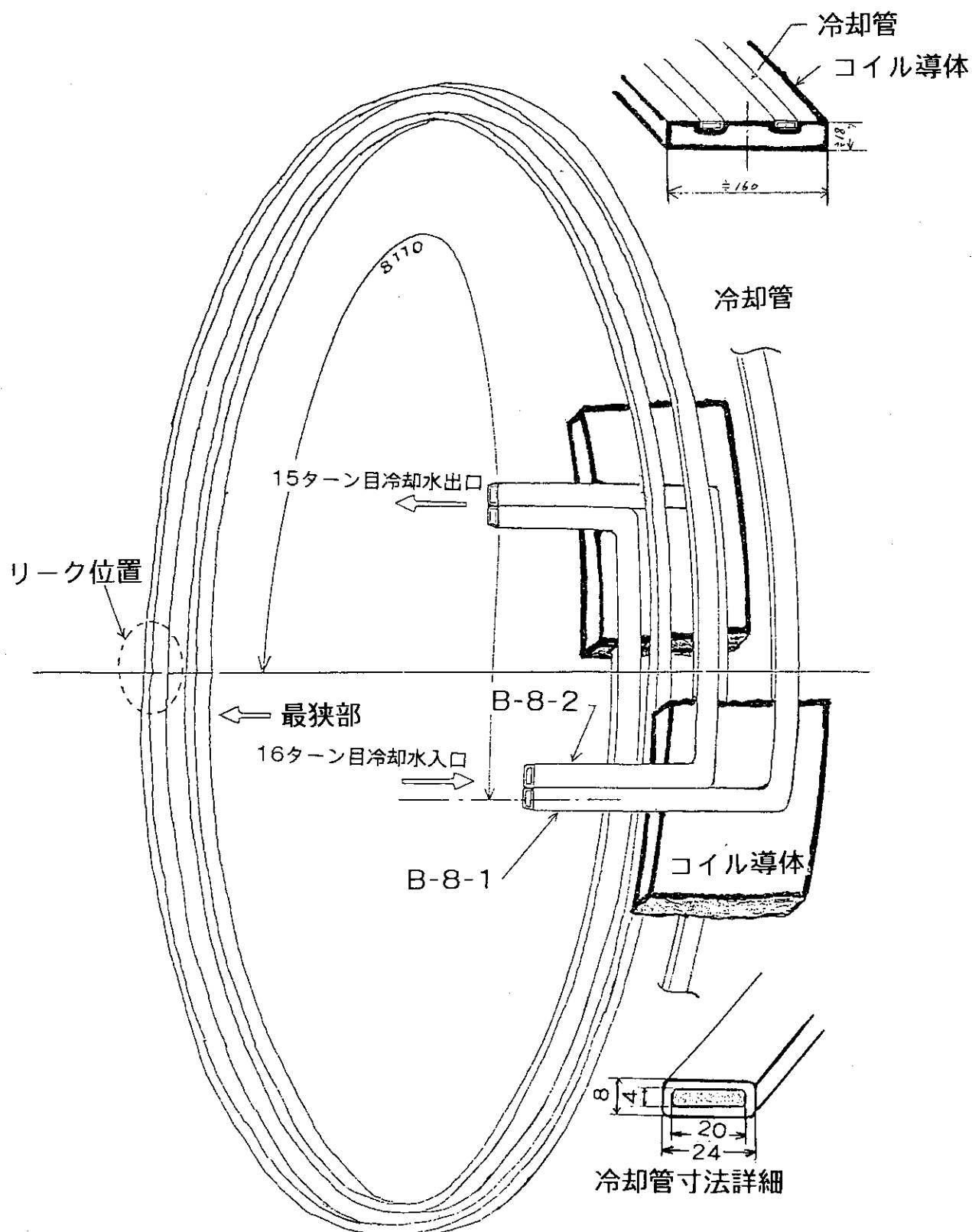


図3.1 冷却管流路図

ターン数	導体厚 t (mm)	冷却路 タイプ*	冷却路断面		冷却路位置	
			a	b	y 1	y 2
1 ~ 2	16.3	A	20	4	68.9	113.9
3 ~ 4	16.3	A	20	4	66.2	111.2
5 ~ 6	16.6	A	20	4	63.5	108.5
7 ~ 8	16.9	A	20	4	60.6	105.6
9 ~ 10	17.2	A	20	4	57.9	102.9
11 ~ 12	17.6	A	20	4	55.0	100.0
13 ~ 14	18.1	A	20	4	52.0	97.0
15 ~ 16	18.4	A	20	4	48.5	94.0
17 ~ 18	19.0	A	15	5	48.4	88.4
19 ~ 20	19.6	A	15	5	45.2	85.2
21 ~ 22	20.3	A	15	5	41.9	81.9
23 ~ 24	21.3	A	15	5	38.5	78.5
25 ~ 26	22.0	B	20	7	54.9	
27 ~ 28	23.0	B	20	7	51.1	
29 ~ 30	24.8	B	20	7	47.2	
31 ~ 32	27.2	B	20	7	41.8	
33 ~ 34	28.5, 30.0	B	15	8.5	38.2	
35	31.8	B	15	8.5	32.9	
36	34.9	B	15	8.5	32.9	

* 冷却路タイプ

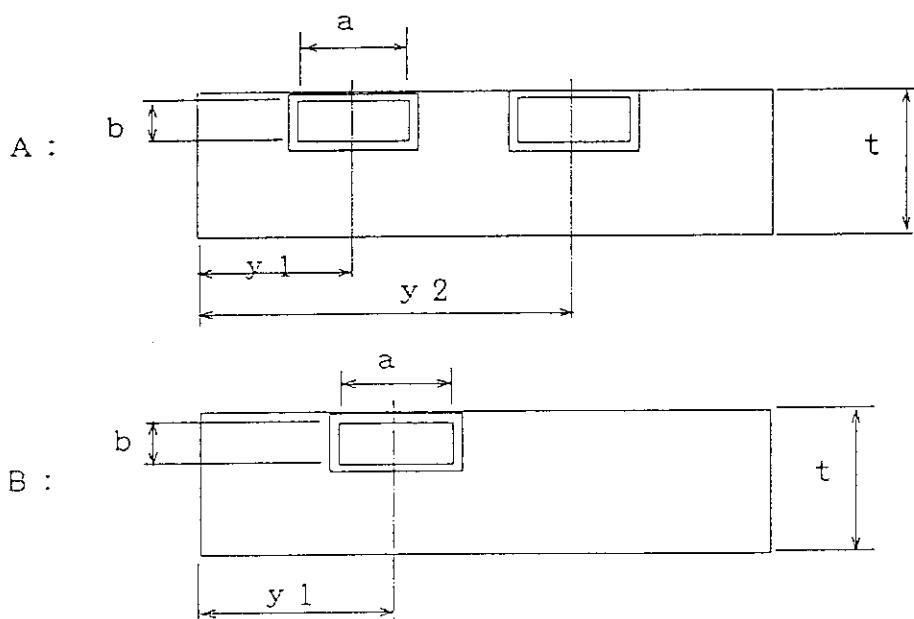
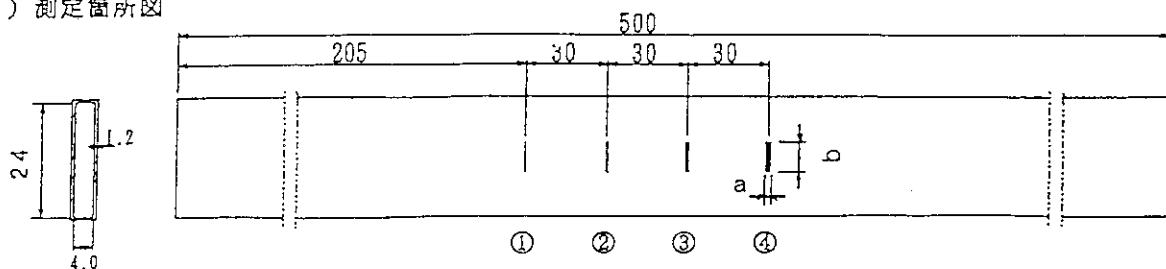


図 3. 2 矩形冷却管断面形状図

1. テストピースNo 1 (横キズ)

1) 測定箇所図



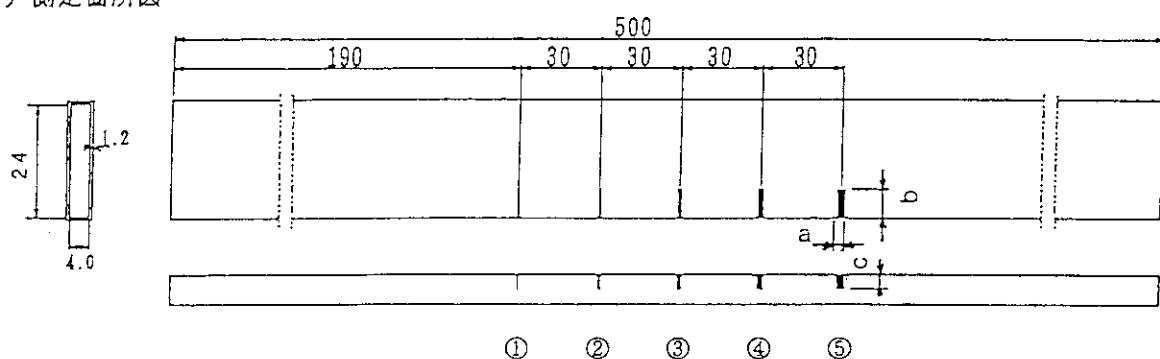
2) 測定結果

単位 : mm

測定箇所	①		②		③		④	
	a	b	a	b	a	b	a	b
設計値	0.1	5.0	0.2	5.0	0.5	5.0	1.0	5.0
実測値	0.11	4.99	0.20	5.00	0.51	5.01	1.02	5.00

2. テストピースNo 2 (コーナー横キズ)

1) 測定箇所図



2) 測定結果

単位 : mm

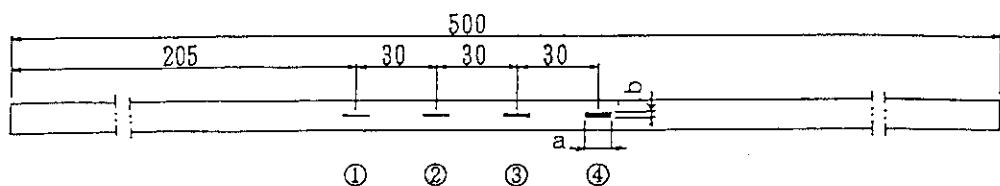
測定箇所	①			②			③		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
設計値	0.05	8.0	2.0	0.1	8.0	2.0	0.2	8.0	2.0
実測値	0.07	8.24	2.06	0.09	8.17	2.04	0.19	8.19	2.05

測定箇所	④			⑤		
	a	b	c	a	b	c
設計値	0.5	8.0	2.0	1.0	8.0	2.0
実測値	0.49	8.15	2.04	1.00	8.21	2.05

図3. 3 欠陥観察用模擬欠陥形状図 (1)

3. テストピースNo 3 (縦キズ)

1) 測定箇所図



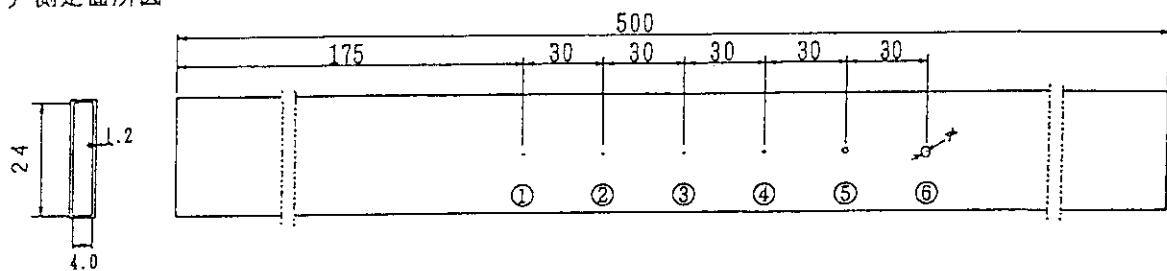
2) 測定結果

単位: mm

測定箇所	①		②		③		④	
	a	b	a	b	a	b	a	b
設計値	0.05	5.0	0.1	5.0	0.2	5.0	0.5	5.0
実測値	0.06	4.99	0.11	5.00	0.20	4.99	0.50	5.01

4. テストピースNo 2 (丸穴)

1) 測定箇所図

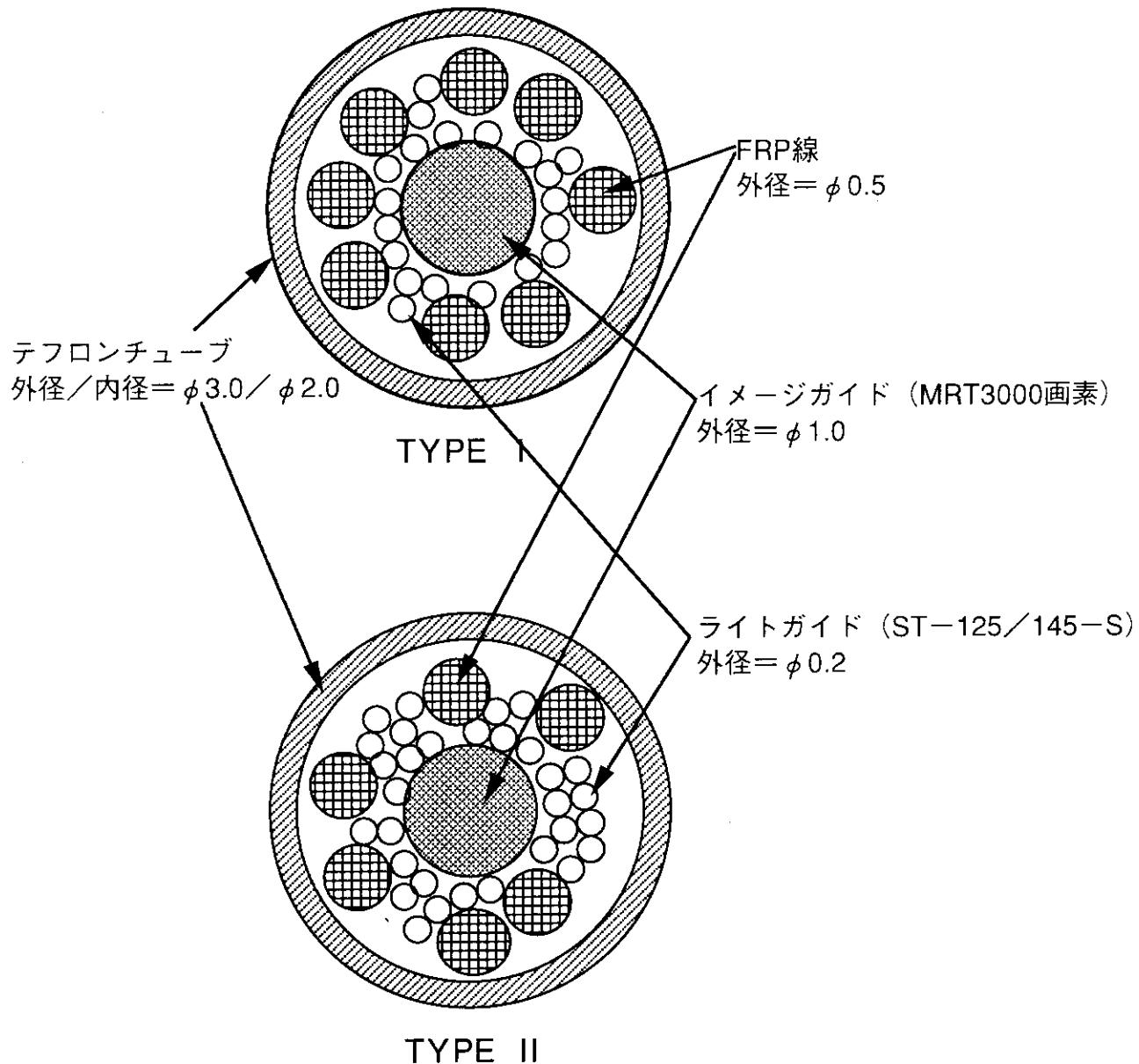


2) 測定結果

単位: mm

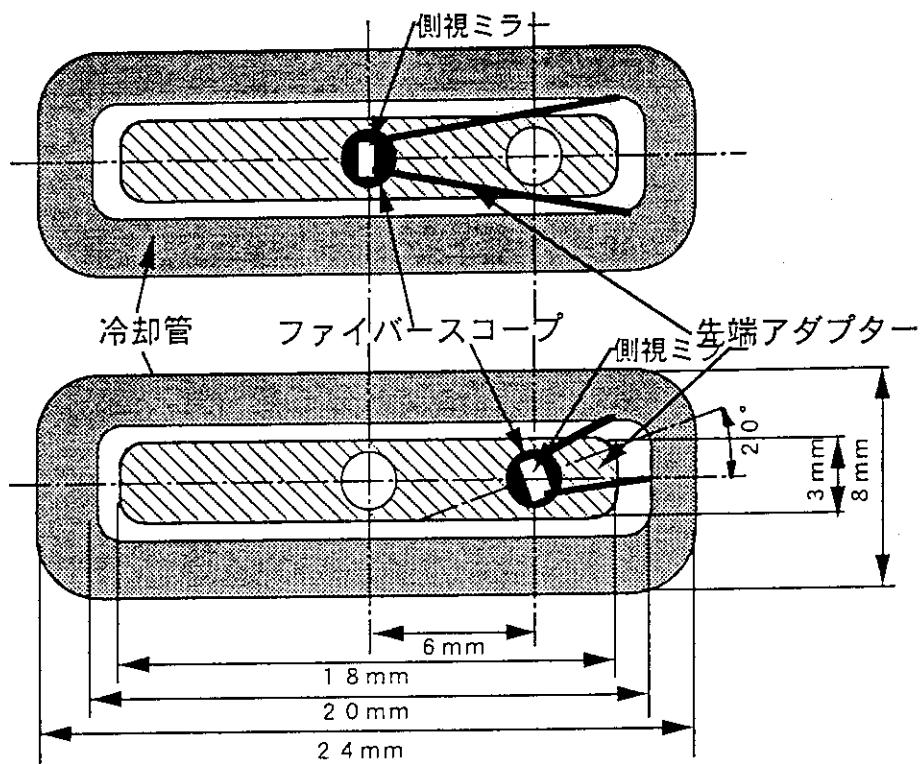
測定箇所	①	②	③	④	⑤	⑥
設計値	0.01	0.05	0.1	0.2	0.5	1.0
実測値	0.012	0.05	0.11	0.21	0.50	1.02

図3. 4 欠陥観察用模擬欠陥形状図 (2)

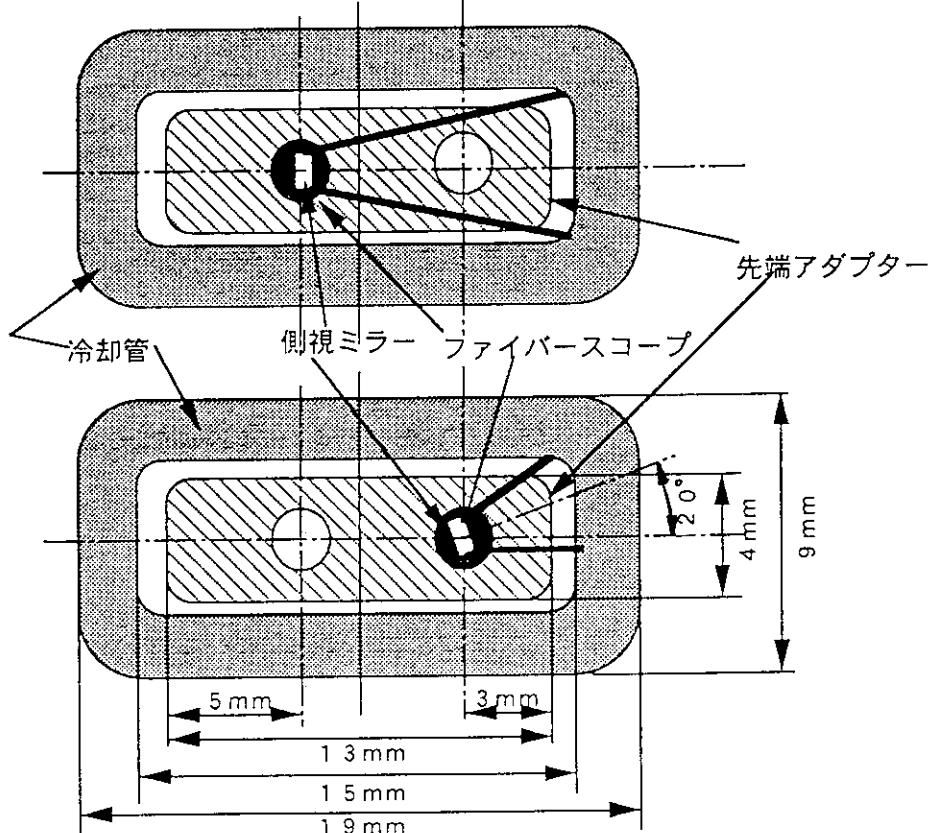


	TYPE I	TYPE II
イメージガイド 外径 = $\phi 1.0$	1芯	
ライトガイド 外径 = $\phi 0.2$	20芯	30芯
FRP線 外径 = $\phi 0.5$	8芯	6芯

図3.5 模擬ファイバースコープの形状



1) 1~16ターン用先端アダプター



2) 17~24ターン用先端アダプター

図3.6 先端アダプターと冷却管断面における位置関係

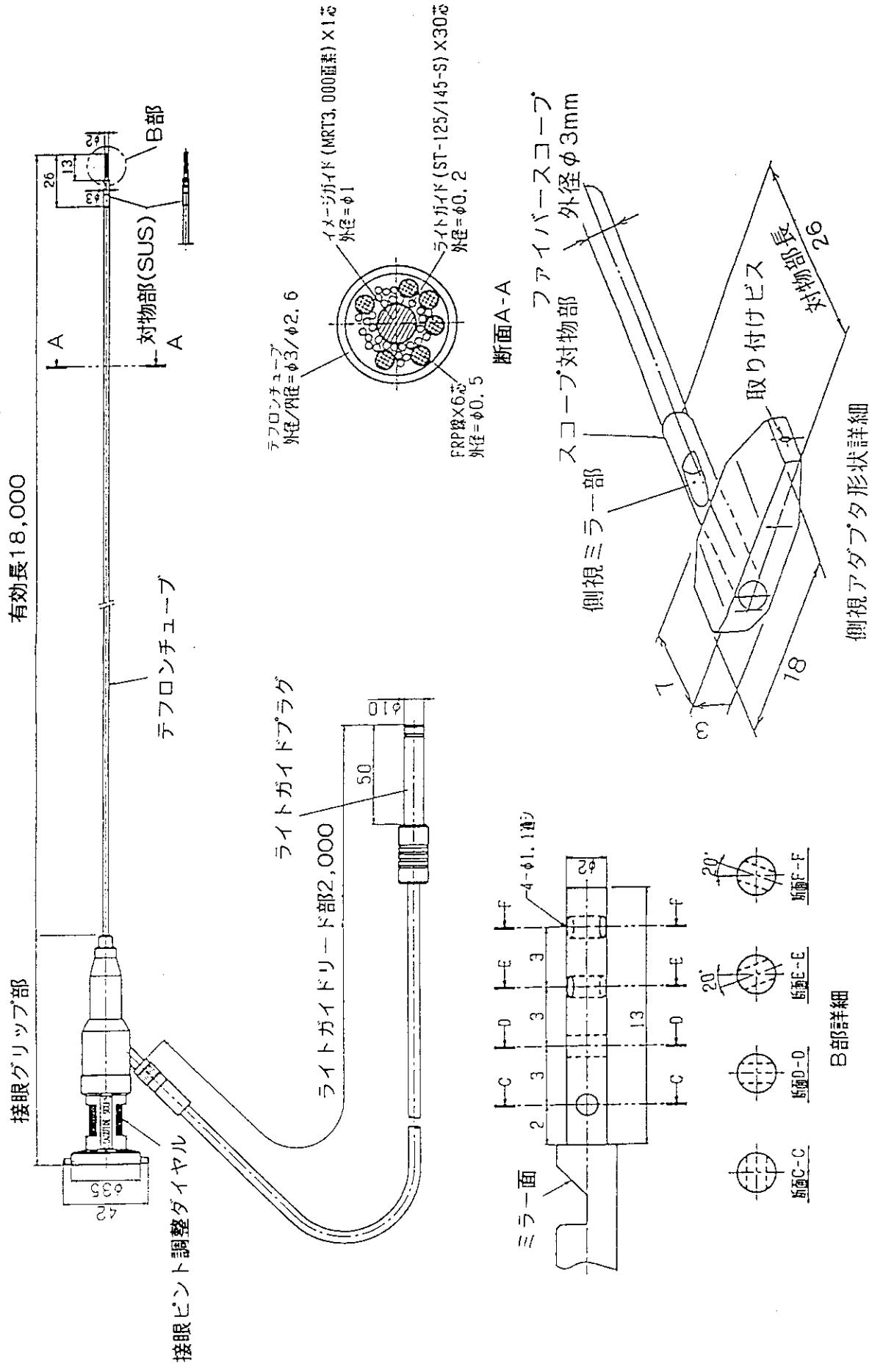


図4. 1 矩形冷却管内観察用ファイバースコープ外観図

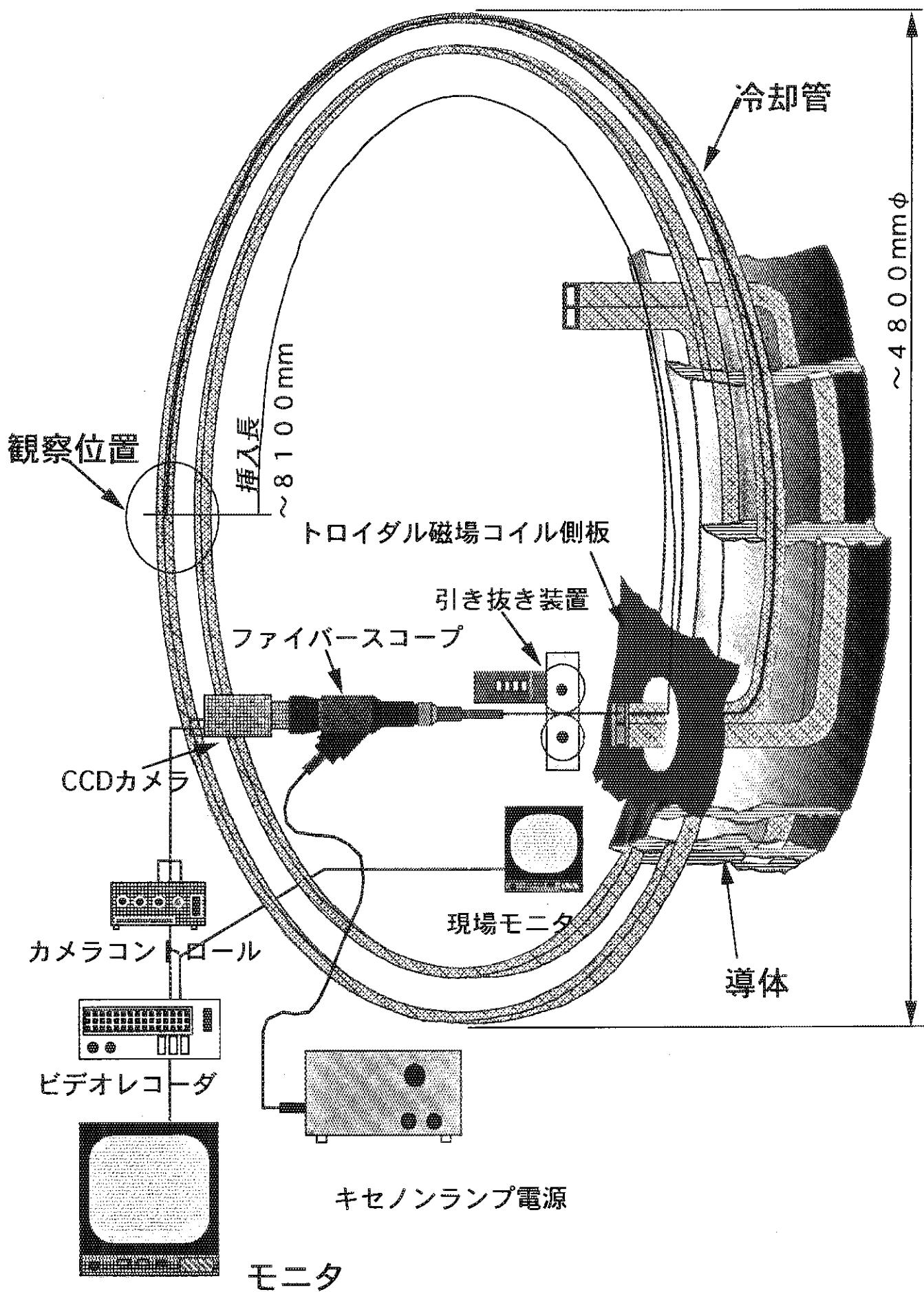


図4.2 冷却管内観察用ファイバースコープ装置の構成図

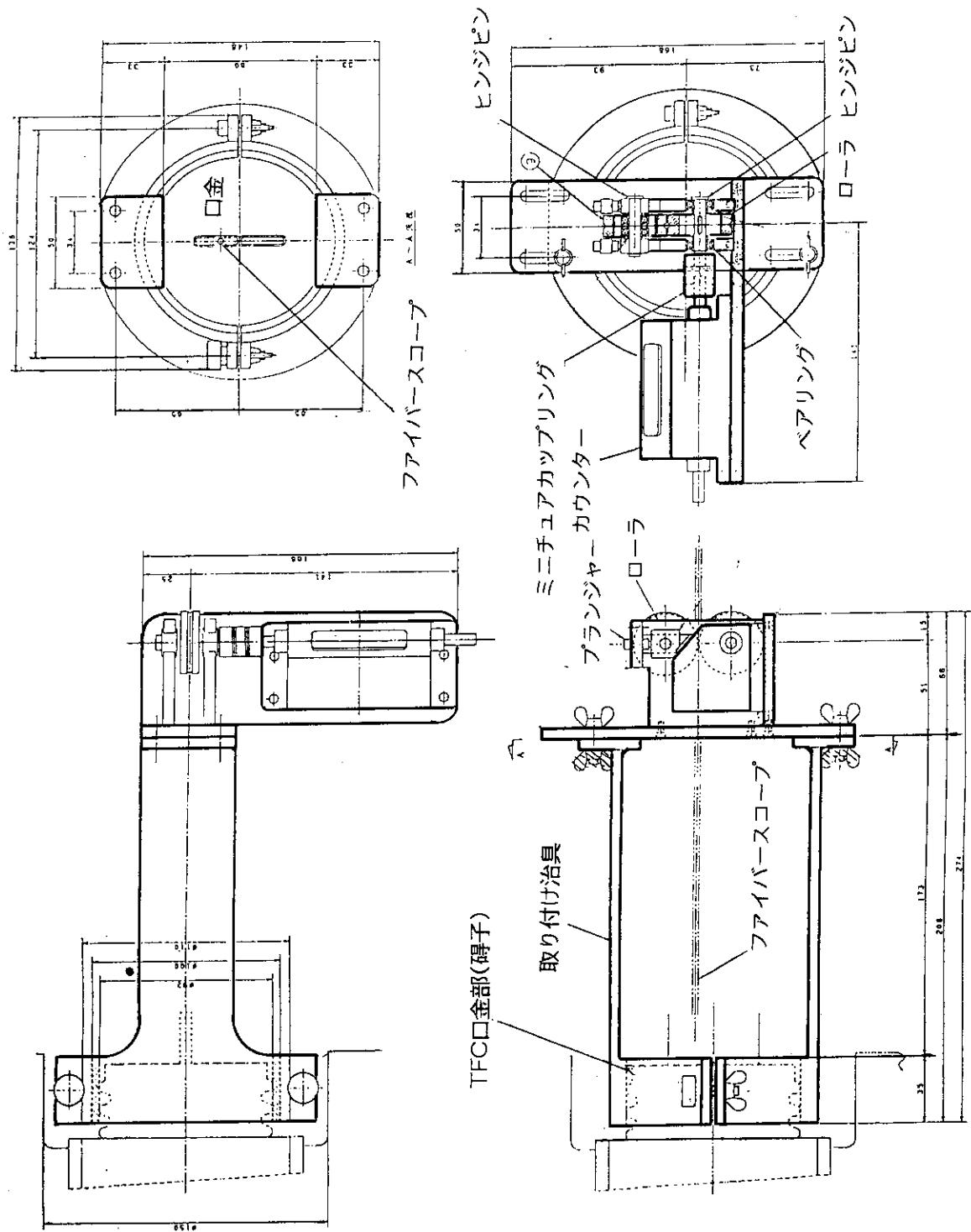


図4.3 引き抜き装置

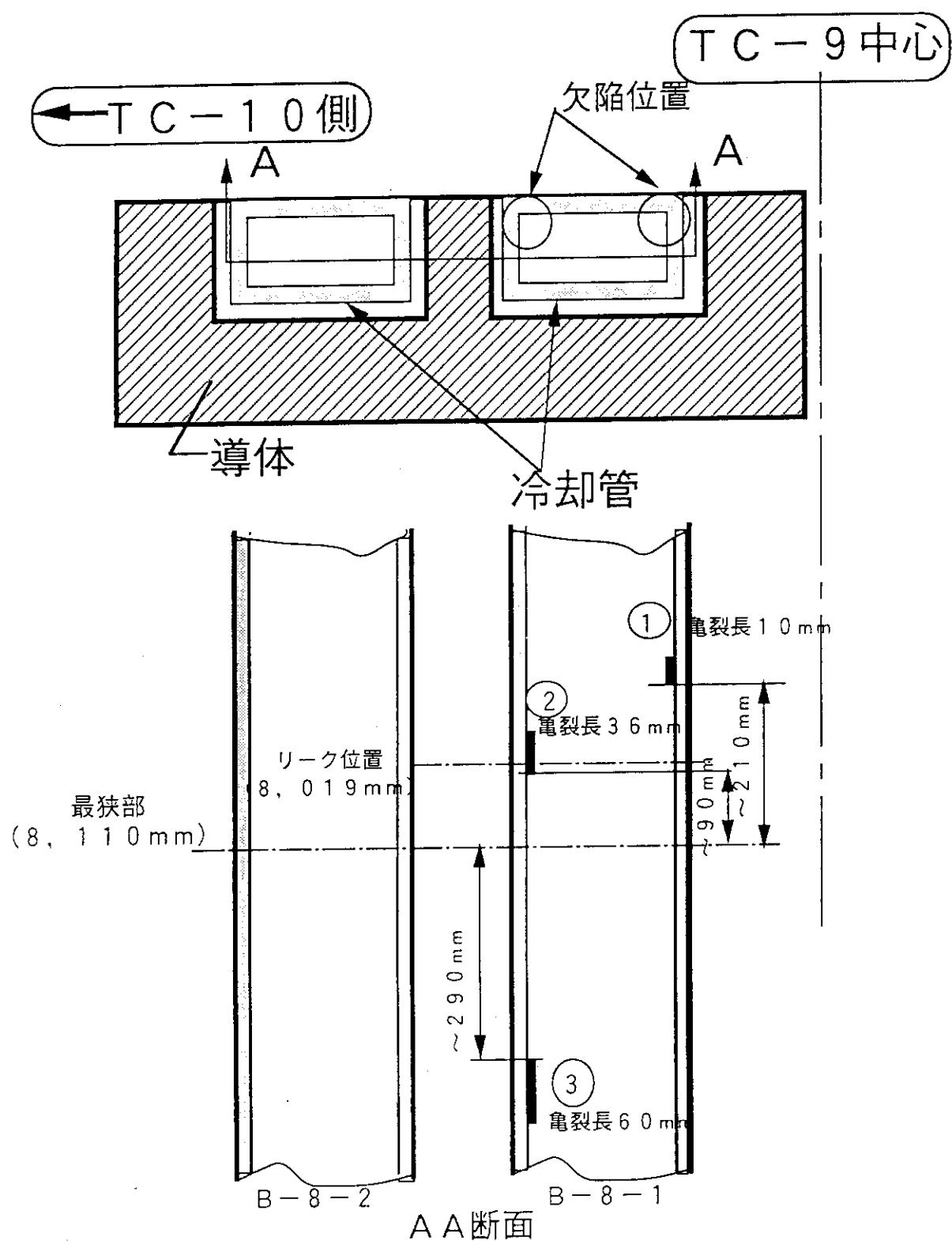


図5.1 TFC-9 B-8 亀裂位置 (平成6年12月)

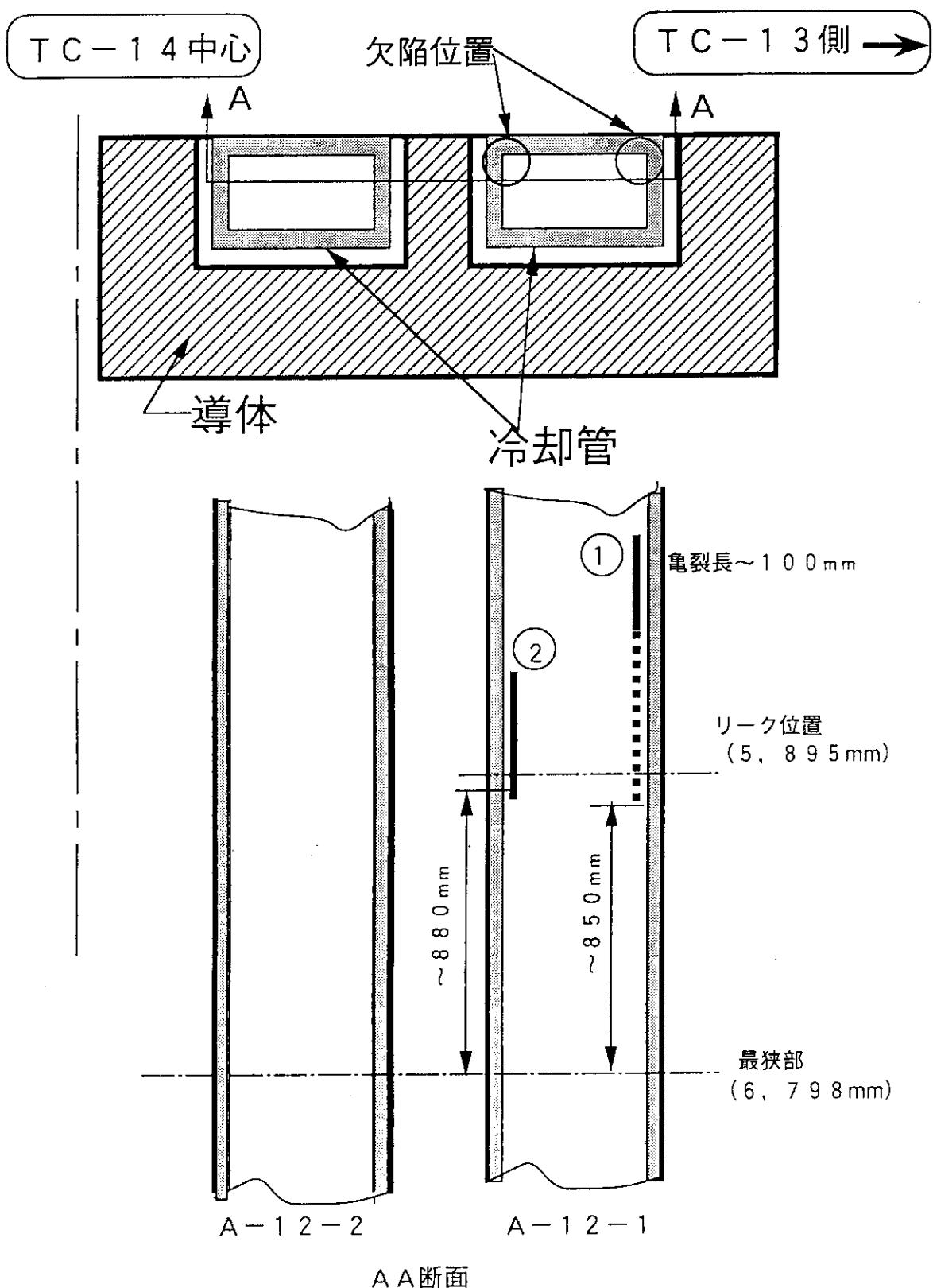


図5.2 TFC-14 A-12 亀裂位置

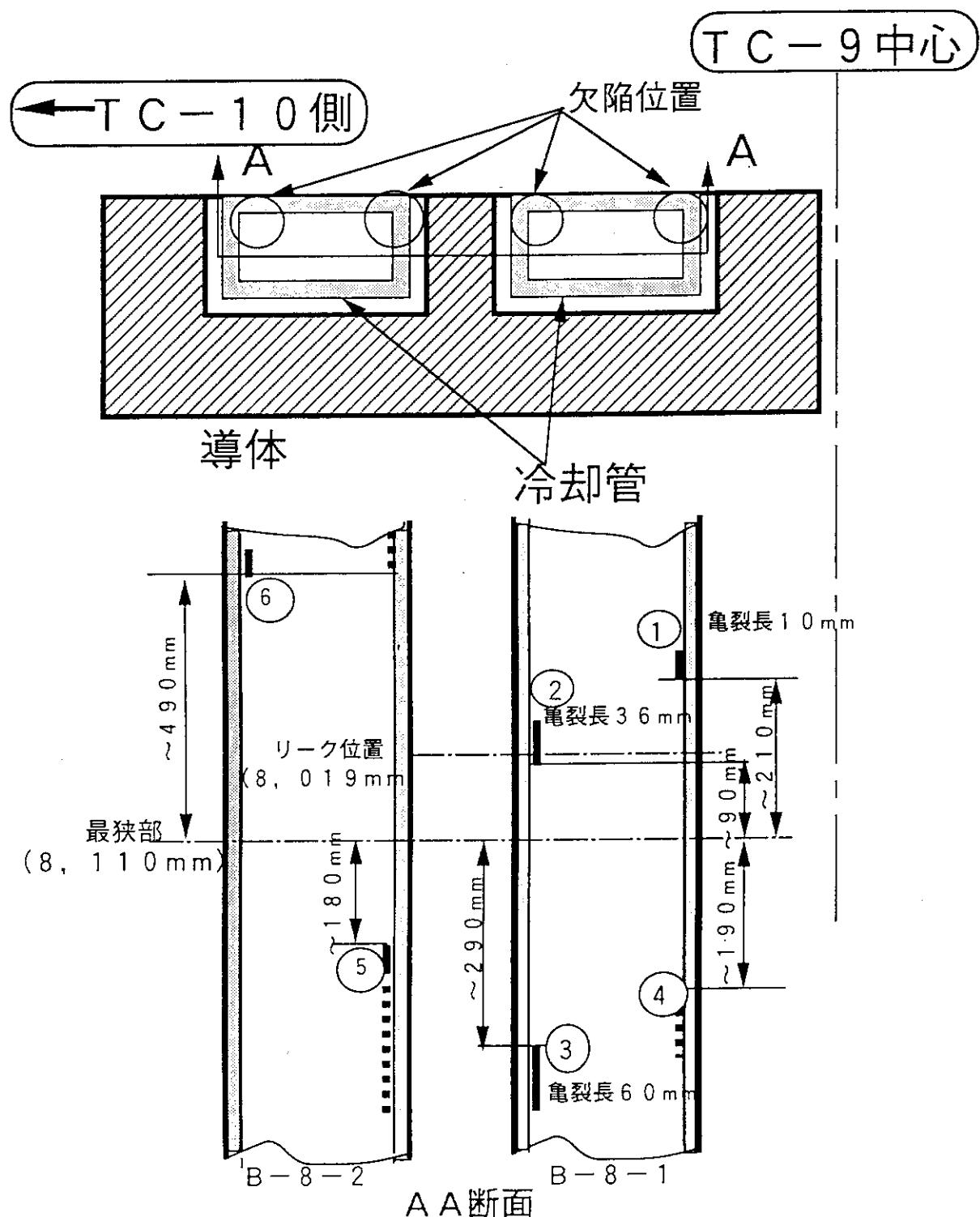


図5.3 TFC-9 B-8亀裂位置(平成7年12月)

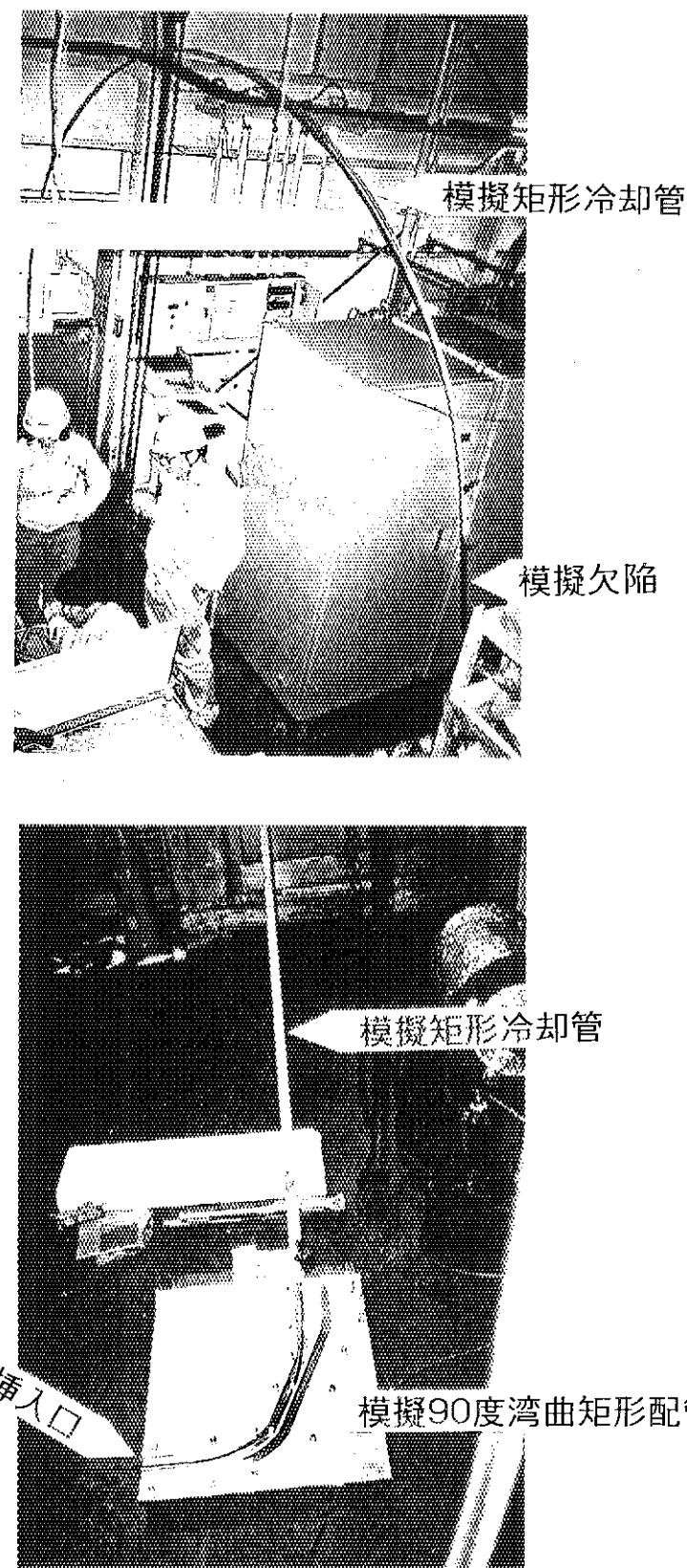


写真 1 模擬欠陥観察風景

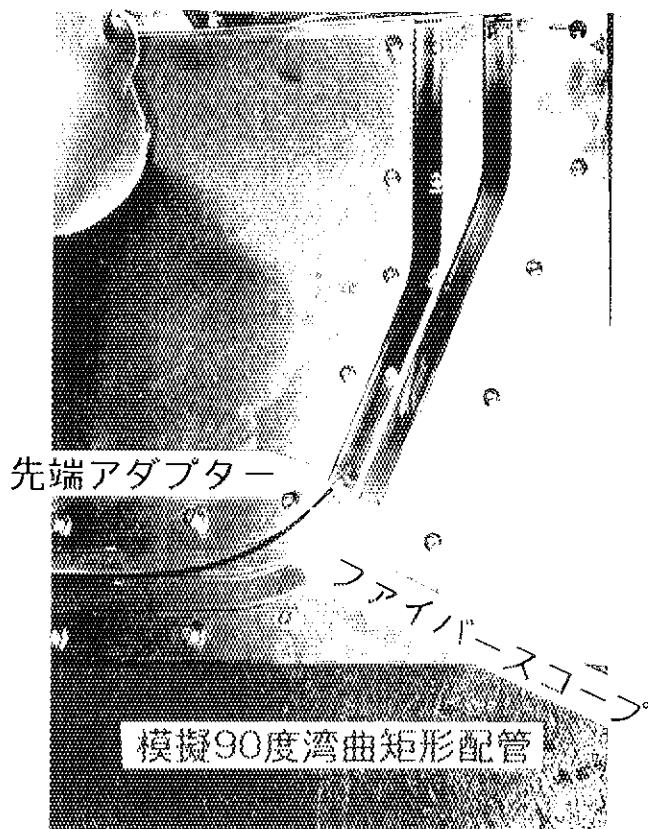


写真2 先端アダプターの通過試験

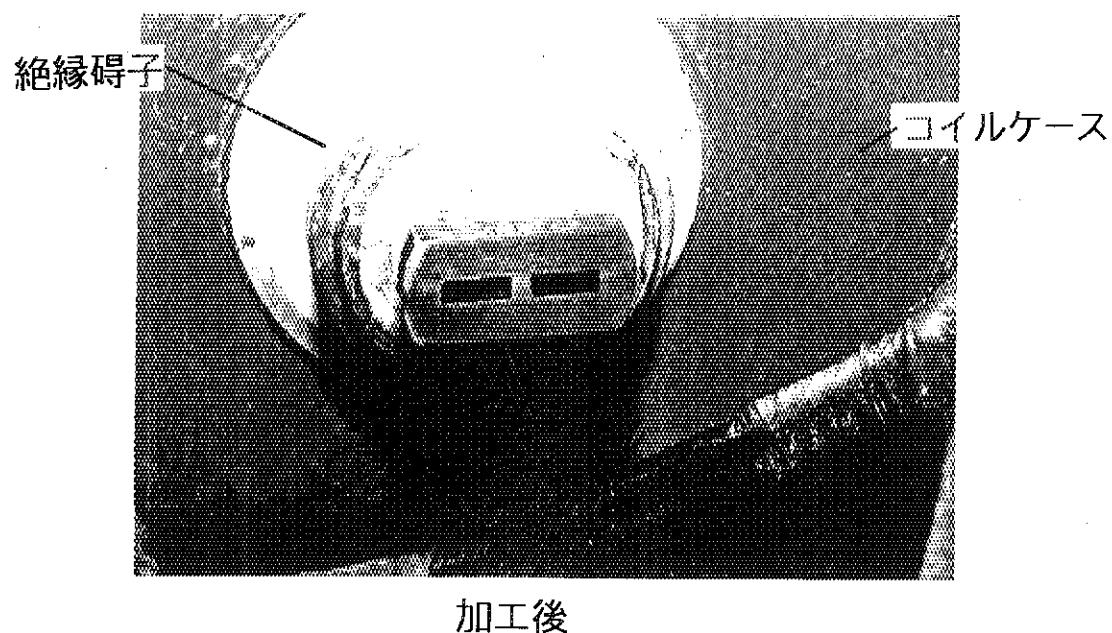
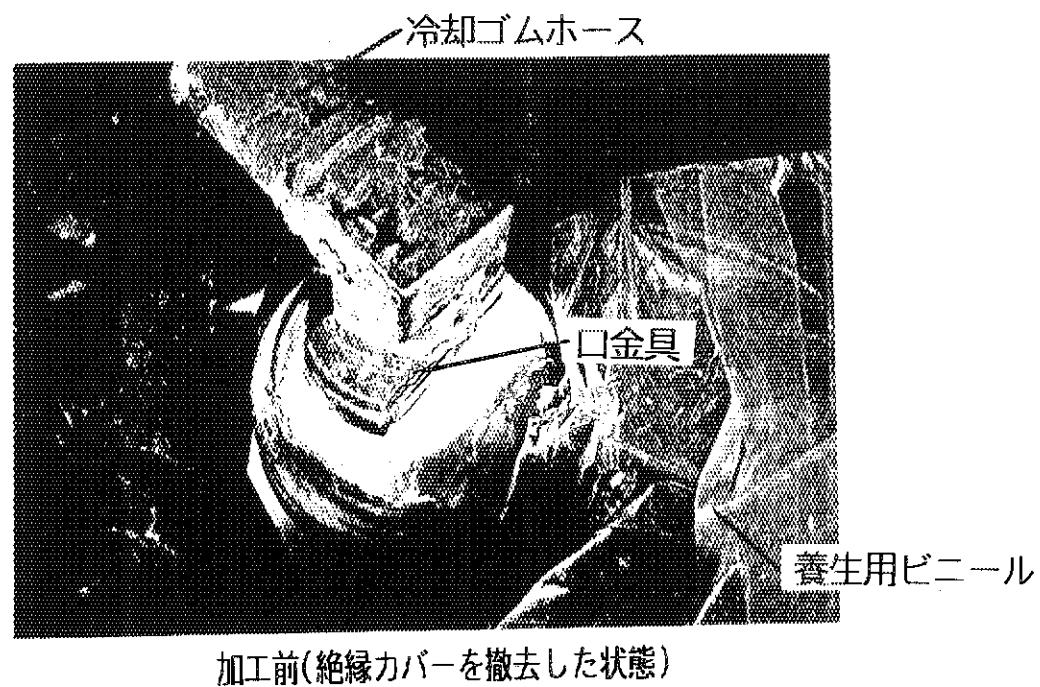


写真3 口金の加工前後の状態

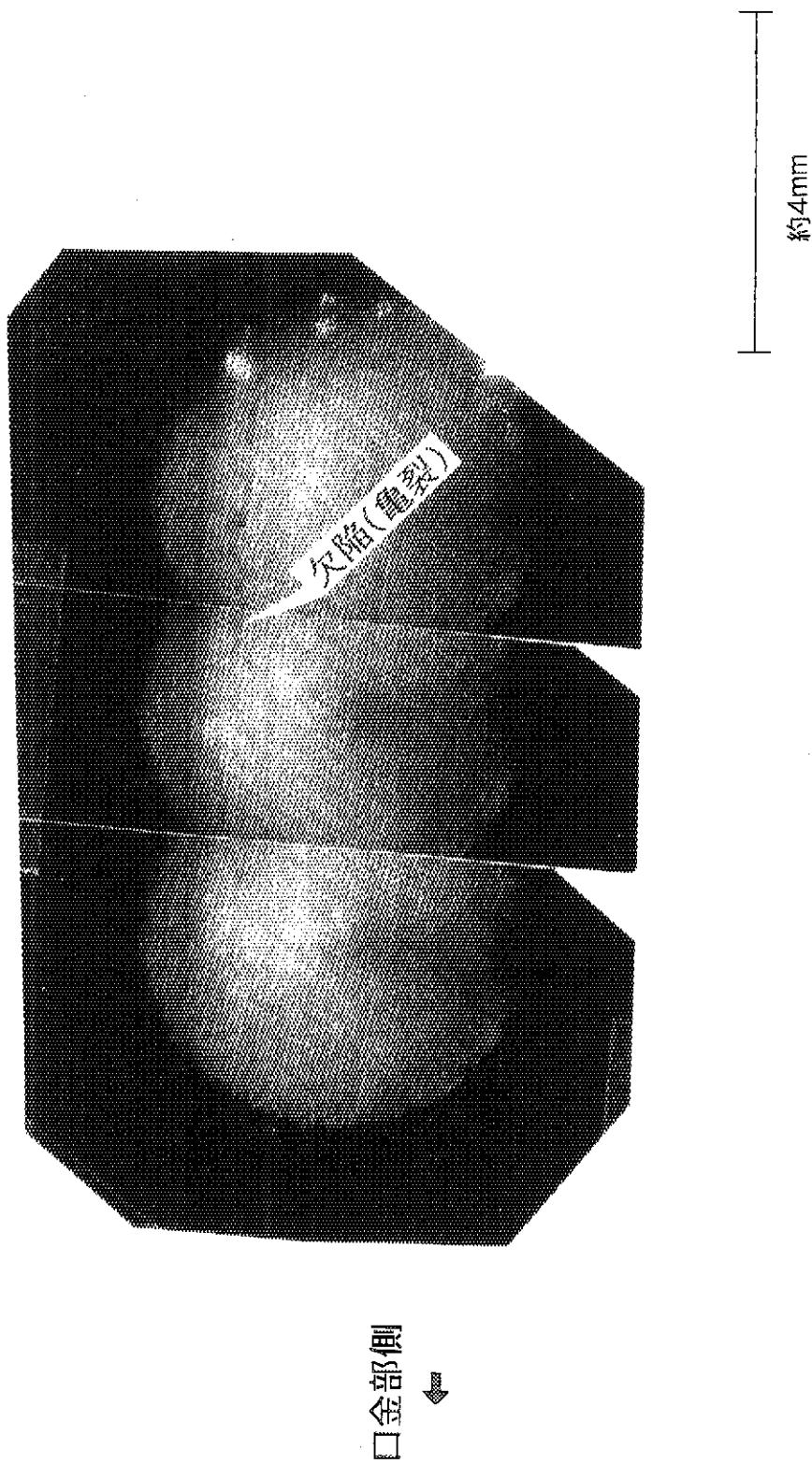


写真4 TFC-9壊裂①(平成6年12月)

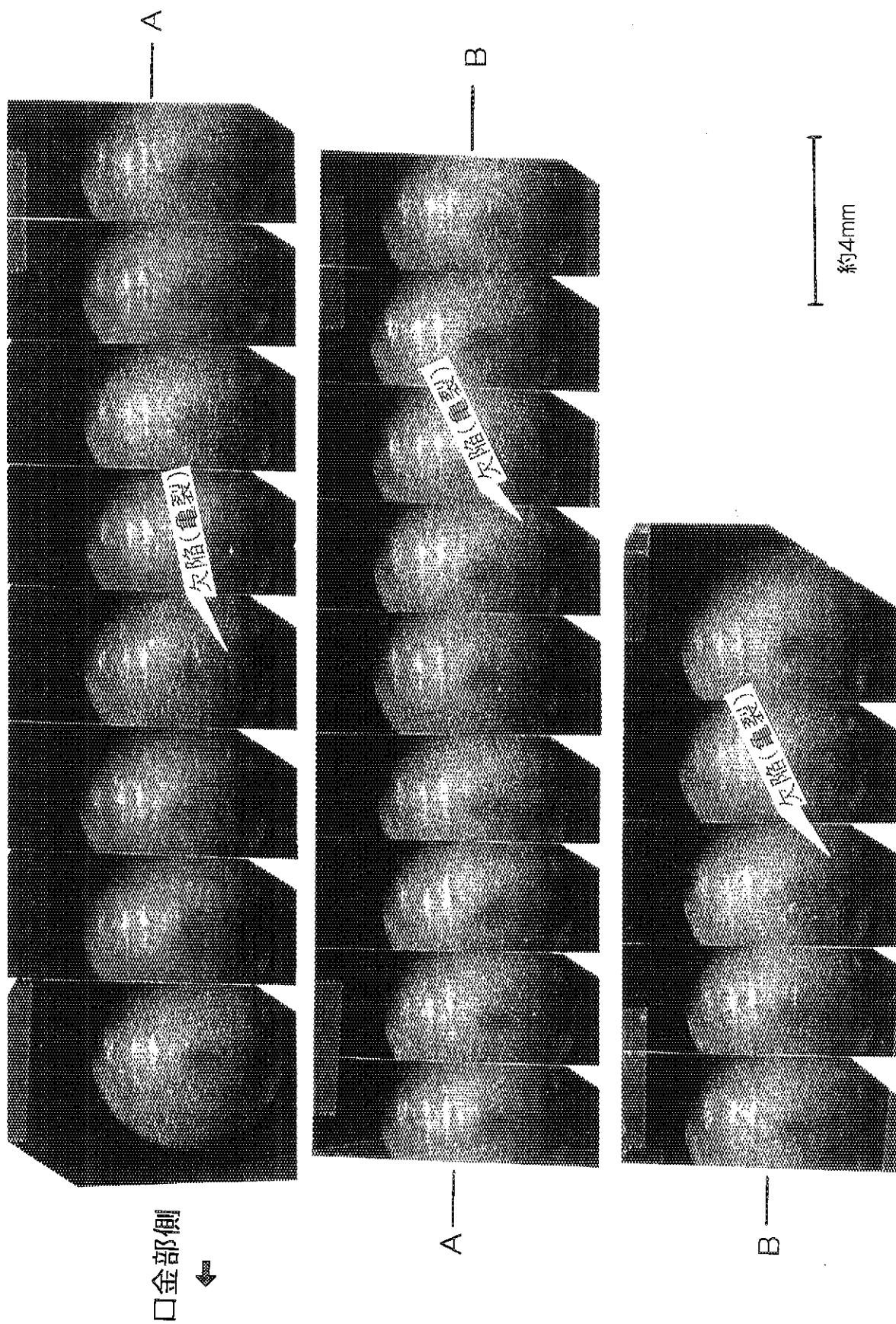


写真5 TFC-9 剥裂②(平成6年12月)

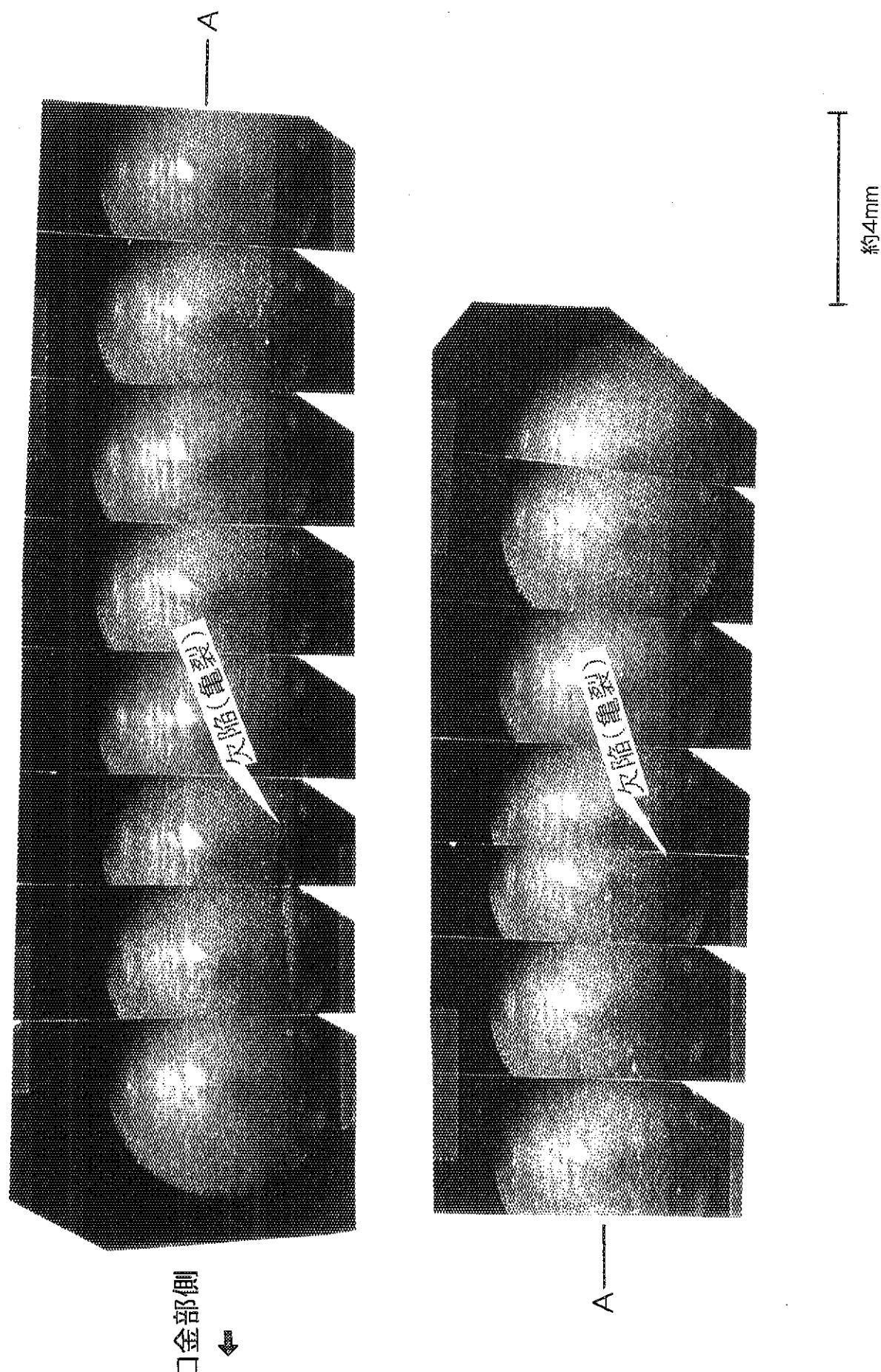


写真 6 TFC-9 壴裂③(平成6年12月)

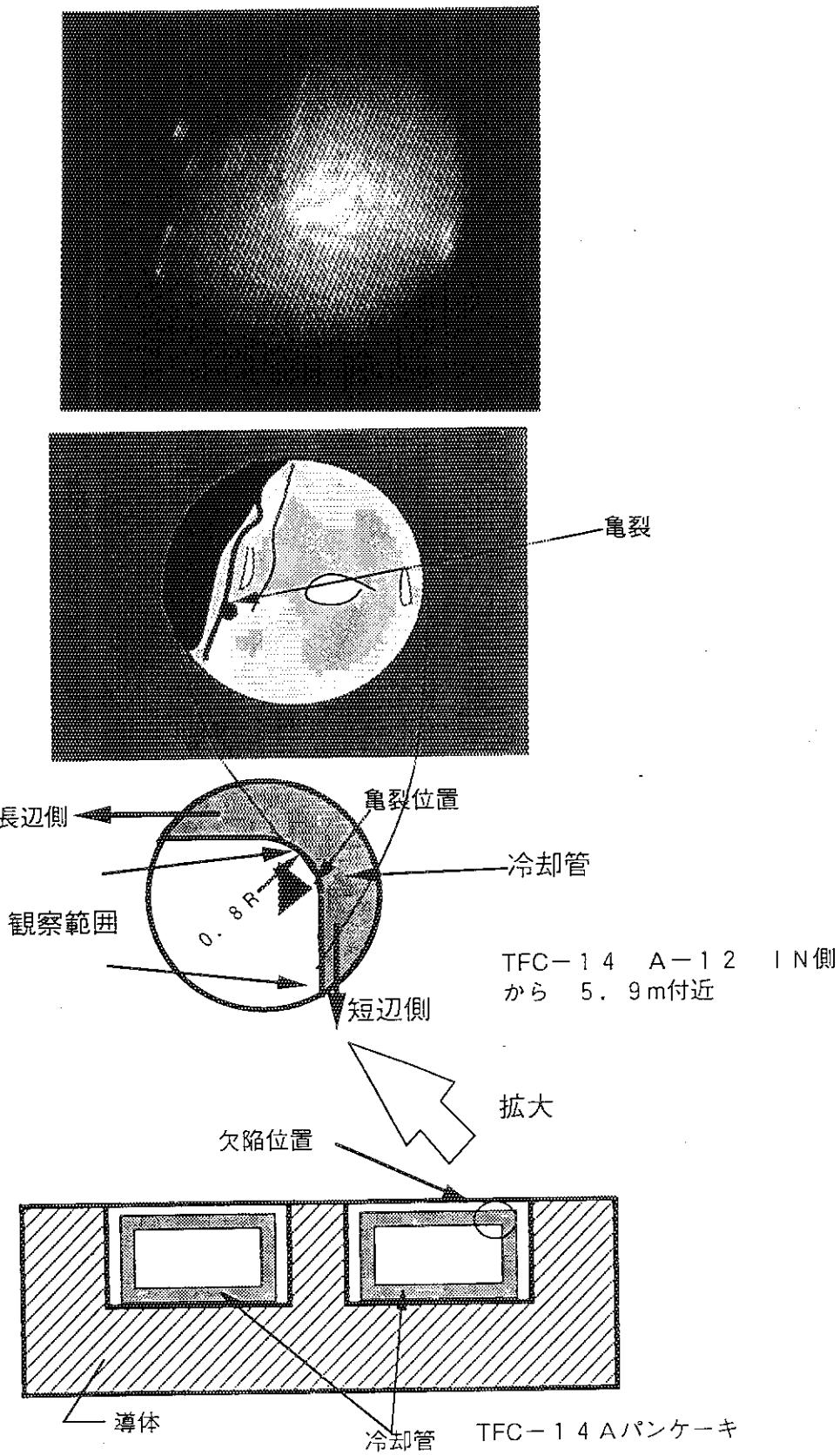


写真7 TFC-14亀裂①(平成7年7月)

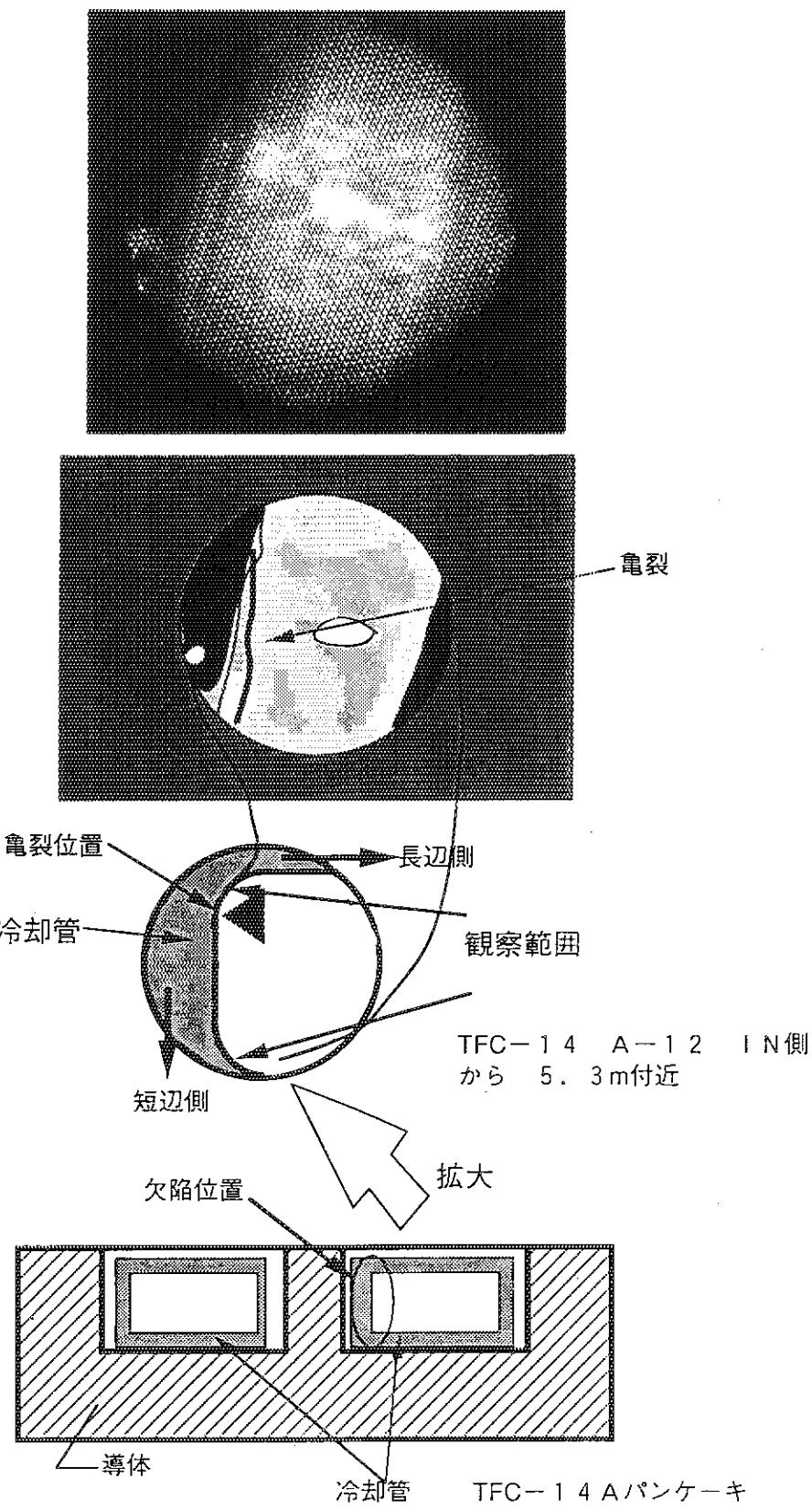
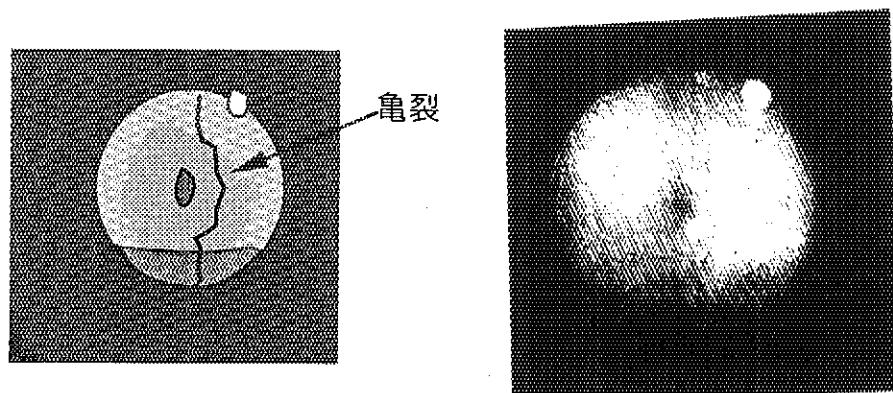
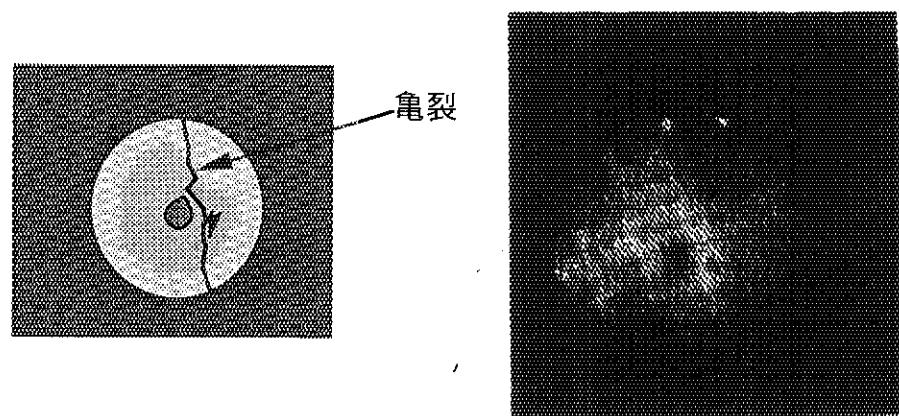


写真8 TFC-14亀裂②(平成7年7月)



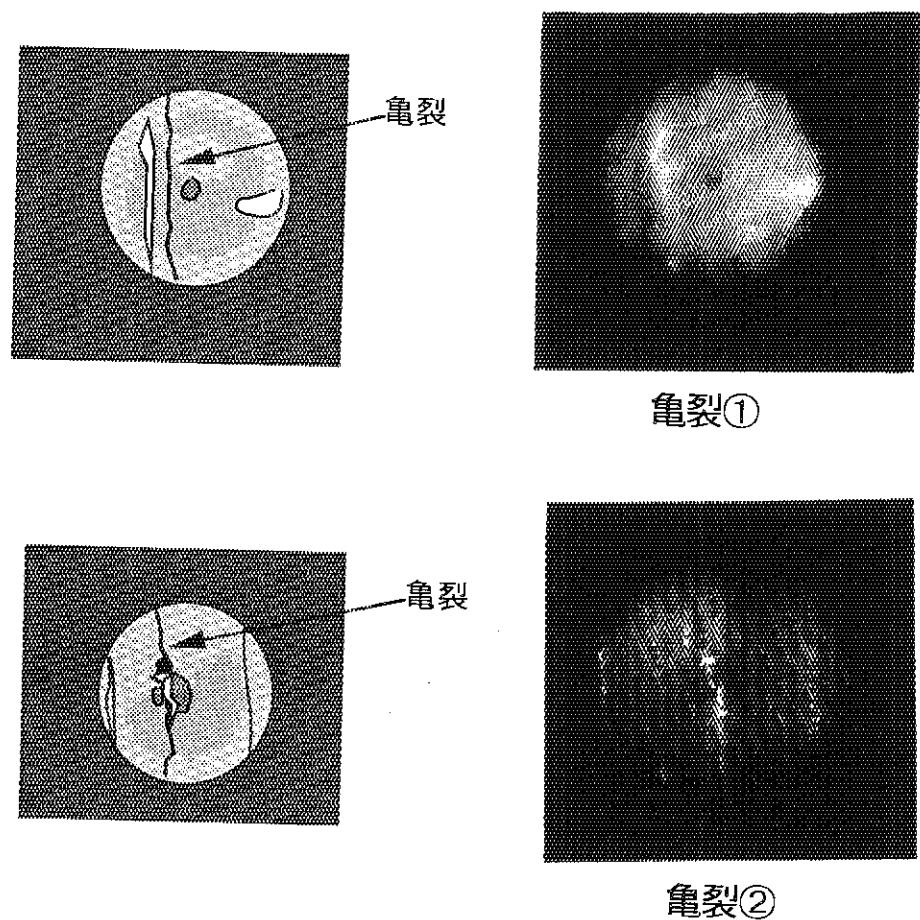
亀裂⑤



亀裂⑥

(図5。3 TFC-9B-8亀裂位置を参照のこと)

写真9 TFC-9亀裂 (平成7年12月)



(図5. 2 TFC-14 A-12亀裂位置を参照のこと)

写真10 TFC-14亀裂 (平成7年12月)