JAERI-Tech
97-053

# HENDEL炉内構造物実証試験部($T_2$)の供用後試験
## —第1報：解体検査の結果—

1997年10月

藤崎　勝夫・稲垣　嘉之・高野　栄・大内　義弘
加藤　道雄・会田　秀樹・関田　健司・森崎　徳浩
須山　和昌・岩月　仁*・小川　益郎

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。
入手の問合わせは，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公済会資料センター（〒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　㈱高野高速印刷

# HENDEL炉内構造物実証試験部（$T_2$）の供用後試験
## —第１報：解体検査の結果—

日本原子力研究所大洗研究所核熱利用研究部
藤崎　勝夫・稲垣　嘉之・高野　　栄・大内　義弘
加藤　道雄・会田　秀樹・関田　健司・森崎　徳浩
須山　和昌・岩月　　仁*・小川　益郎

（１９９７年１０月１日受理）

本報告書は、HTTR炉床部構造物の構造健全性の確認、HTTRの運転・保守、供用期間中検査等に反映するデータの取得を目的として実施したHENDEL炉内構造物実証試験部（$T_2$）の解体検査の結果について述べたものである。$T_2$検査部は、1982年以来約14,500時間の試験運転を行い、1997年６月に解体した。解体時に実施した目視・寸法検査により、全ての黒鉛構造物に破損は見られず、その設置状況は据付時と同じ状態で保持されていることを確認した。腐食については、高温プレナムブロックには微小な酸化痕が生じていたが、他の黒鉛ブロックでは観察されなかった。また、高温プレナムブロックのヘリウムガス流路やサポートポストの表面に磁性を有する黒色粉末が付着していた。炉心拘束バンドの締付力については、据付時に比較して約20％低下していたが、低温冷却材の漏えいを増加させる固定反射体間のギャップの拡がりは生じていなかった。

大洗研究所：〒311-13　茨城県東茨城郡大洗町成田町新堀3607
*　石川島播磨重工業（株）

# After-service Inspection of HENDEL In-core Structure Test Section $T_2$
## − First Report:Inspection Results at Dismantlement −

Katsuo FUJISAKI, Yoshiyuki INAGAKI, Sakae TAKANO, Yoshihiro OUCHI,
Michio KATO, Hideki AITA, Kenji SEKITA, Norihiro MORISAKI,
Kazumasa SUYAMA, Jin IWATSUKI* and Masuro OGAWA

Department of Advanced Nuclear Heat Technology
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received October 1, 1997)

The HENDEL in-core structure test section $T_2$, a full-scale test facility of the HTTR core bottom structure, was operated for approximately 14,500 hours since 1986 and dismantled in June, 1997. This report presents inspection results at dismantlement of the $T_2$ test section to confirm structural integrity of the HTTR core bottom structure and to obtain serviceable data for operation, maintenance and in-service inspection of HTTR. Visual and dimensional inspections at dismantlement showed that there was no damage of graphite blocks and an arrangement of graphite blocks was kept the same condition as that before the onset of operation. Slight corrosion was observed at coolant flow channels of hot plenum blocks, but, no corrosion was observed in other graphite blocks. Magnetic black powder was plated out at coolant flow channels of hot plenum blocks, surface of core support posts, and so on. Although restraint force of core restraint bands after service was lowered approximately 20% compared with that before service, there was no increase of gap among adjacent permanent reflector blocks so as to increase leakage flow of a cold coolant.

Keywords : HENDEL, HTTR, Core Bottom Structure, Graphite Blocks, Structural Integrity, Dismantlement, After-service Inspection, Visual Inspection, Dimensional Inspection

---

* Ishikawajima-Harima heaby Industries Co.,Ltd.

# 目　　次

1．はじめに …… 1
2．ＨＴＴＲの炉内構造物の構造 …… 2
3．ＨＥＮＥＤＥＬ　$T_2$試験部の構造 …… 10
4．検査項目と方法 …… 21
　4．1　検査項目 …… 21
　4．2　検査方法 …… 22
5．解体作業 …… 26
6．検査結果と考察 …… 40
　6．1　炉床部構造物 …… 40
　　6．1．1　目視検査 …… 40
　　6．1．2　寸法検査 …… 40
　　6．1．3　炉心拘束バンドの締付力の測定 …… 41
　6．2　圧力容器 …… 42
7．ま と め …… 56
謝　　辞 …… 56
参考文献 …… 57

Contents

1. Introduction ..... 1
2. Structure of HTTR Reactor Internals ..... 2
3. Structure of the HENDEL $T_2$ Test Section ..... 10
4. Inspection Items and Procedure ..... 21
4.1 Inspection Items ..... 21
4.2 Inspection Procedure ..... 22
5. Dismantlement ..... 26
6. Inspection Results and Consideration ..... 40
6.1 Core Bottom Structure ..... 40
6.1.1 Visual Inspection ..... 40
6.1.2 Dimensional Inspection ..... 40
6.1.3 Measurement of Restraint Force of Core Restraint Bands ..... 41
6.2 Pressure Vessel ..... 42
7. Concluding Remarks ..... 56
Acknowledgement ..... 56
References ..... 57

# 1．はじめに

日本原子力研究所は、新材料の創出等を目指した高温工学に関する先端的基礎研究、並びに高温核熱利用の有効性の実証を目的として、大洗研究所に我が国初の高温ガス炉である高温工学試験研究炉（HTTR：High Temperature Engineering Test Reactor）[1]の建設を進めており、平成９年度に臨界を予定している。高温ガス炉は、軽水炉よりも原子炉出口の冷却材温度をはるかに高温にすることが可能なことから発電等の利用において高い熱効率が得られるとともに、以下に示す高い固有の安全性を有している[2]。

①出力密度が小さく熱容量が大きいため、冷却能力の異常な低下等の事象が生じても炉心温度の変化が極めて緩やかである。

②中性子寿命が長く、反応度の温度係数が負で大きいため、大きな反応度が印加された場合でも出力が急上昇しにくく、かつ上昇幅は小さく抑えられる。

③炉心が高温になっても燃料被覆や炉心構成物は溶融することなく、炉心溶融の心配がない。

④ヘリウムガスは化学的に不活性であるため、燃料や構造材との化学的相互作用が少ない。また、ヘリウムガス、黒鉛とも放射化されにくいので従事者の被爆線量が低い。

これらの特性は、ヘリウムガス、被覆燃料粒子並びに黒鉛の使用により実現されるものである。特に高温ガス炉の炉心は黒鉛ブロックの積層構造になっており、炉心の安全性並びに健全性を確保するためには、高温ガス炉の供用期間中において炉内構造物の健全性を確保することが必要である。

これまで世界で建設・運転が行われてきた高温ガス炉は、OECD ／ NEA の国際プロジェクトによる英国の Dragon 炉（熱出力 20MW、原子炉出口冷却材温度 750 ℃）を初めとして、独国の AVR 炉（熱出力 46MW、電気出力 15MW、原子炉出口冷却材温度 950 ℃）と THTR 炉（電気出力 300MW、原子炉出口冷却材温度 750 ℃）、米国の Peach Bottom 炉（電気出力 40MW、原子炉出口冷却材温度 728 ℃）と Fort St. Vrain 炉（電気出力 330MW、原子炉出口冷却材温度 782 ℃）の５基[3]と少なく、しかも各国によって炉心及び炉内構造物の形状が異なるため、これらの実績のみで HTTR の設計・製作を行うことは困難であった。

このため、大型構造機器実証試験ループ（HENDEL）に HTTR の炉心を支持する黒鉛構造物（主に炉床部構造物）の実寸大モデルである炉内構造物実証試験部（$T_2$）[4,5]を建設して炉床部構造物の製作・組立の実証を行うとともに、1986 年から 1996 年までに構造健全性の実証、炉内の熱流動挙動の解明等を目的として各種試験[6]を実施してきた。HENDEL を解体する機会に対応し、炉床部構造物の構造健全性の確認、HTTR の運転・保守及び供用期間中検査（ISI：In-Service Inspection）の実施方法並びに次期高温ガス炉の設計に必要なデータを取得するために、1997 年６月に$T_2$試験部の解体作業を行い、供用後における炉床部構造物の破損状況、供用前後における炉床部構造物の寸法変化、黒鉛構造物の腐食等についての検査を実施した。

本報告書は、$T_2$試験部の解体時に実施した検査結果をまとめたものである。

# 2．HTTR 炉内構造物の構造

HTTR は、熱出力 30MW、原子炉出口の冷却材（ヘリウムガス）最高温度が約 950℃の性能を有す高温ガス炉である。原子炉の構造を Fig. 2.1 に示す。燃料は原研で開発を進めてきたピン・イン・ブロック型である。酸化ウランの燃料核を高密度炭素、SiC 等で４層にコーティングされた被覆燃料粒子は円筒状の燃料コンパクトに成形され、燃料コンパクトは燃料棒内に収納されて、六角柱状の燃料ブロックに装荷される。燃料ブロック内の燃料棒の周囲には幅約３ mm の環状流路が形成され、冷却材はこの流路を下降しながら加熱される。炉心は５層、計 180 個の燃料ブロックで構成され、炉心の周囲には黒鉛製の反射体が設置されている。これらの構造物は、Fig. 2.2 に示す炉床部構造物で支持されている。

炉床部構造物は、黒鉛ブロックの積層構造からなる炉心を所定の位置に配置し、炉心重量を支持するとともに、中性子漏えい防止、熱遮へい、放射線遮へい等の機能を有するもので、炉心支持黒鉛構造物、炉心支持鋼構造物、遮へい体等から構成されている[7]。

炉心支持黒鉛構造物は、固定反射体ブロック、高温プレナムブロック、サポートポスト、炉床部断熱層から構成される。固定反射体は、周方向 12 個、高さの方向８段の計 96 個の黒鉛ブロック（材質：原子炉級準等方性黒鉛 PGX）を組合わせて円筒状の空間を形成し、燃料体黒鉛ブロック、可動反射体ブロック、制御棒案内ブロック等の炉心構成要素、高温プレナムブロック、炉床部断熱層等を収納する。

固定反射体ブロックの構造を Fig. 2.3 (a), (b) に示す。固定反射体ブロックは、構造的一体性を確保するため、上下面および側面で隣接ブロックとキー結合を行っている。また、隣接する固定反射体ブロックの間にはシール要素を設けて、炉心支持黒鉛構造物内外の冷却材の圧力差によって生じる低温冷却材の炉心内への漏れ込み量を減少させる構造にしている。

高温プレナムブロックから炉床部断熱層までの構造を Fig. 2.4 (a), (b) に示す。高温プレナムブロックは、PGX 黒鉛で製作されたシール用ブロックおよびキー結合用ブロックからなる２層構造で、炉心領域の下にあり、炉心を支持してその荷重をサポートポストに伝えるとともに、炉心領域で昇温された冷却材を高温プレナムに導く機能を有する。シール用ブロックの側面には、炉心領域の黒鉛ブロックカラム間ギャップの冷却材の流れ込みを防止するために、シール要素を設けている。キー結合用ブロックは、１個当たり３組のサポートポストおよびポストシートで支持されており、また、側面で隣接ブロックとキー結合を行っている。高温プレナムブロックの配列は、中心の１領域とそれを取り囲む周辺６領域の計７領域となっている。

高温プレナムは、各炉心領域で加熱された冷却材を混合する機能を有するもので、高温プレナムブロックの下部に位置している。その内部には高温プレナムブロックを支持するための円柱状のサポートポスト（材質：原子炉級微粒等方性黒鉛 IG-110）、円盤状の混合促進板（材質：PGX 黒鉛）等の構造物があり、その高さは 400mm である。混合促進板は直径 883mm、厚さ 100mm で、高温プレナムの底面から 200mm 上部の位置に設置されている。

炉床部断熱層は、高温プレナムの下部にあって、炉心重量を炉心支持板等の炉心支持鋼構造物へ伝達するとともに、その高温化を抑制するもので、プレナム下部ブロック（材質：PGX 黒鉛）、

炭素ブロック（ASR-0RB 炭素）および下端ブロック（材質：PGX 黒鉛）の積層構造である。

炉心支持鋼構造物は、炉心支持板、炉心支持格子、炉心拘束機構から構成される。炉心支持板（材質：SUS316 および２¼ Cr － 1 Mo 鋼）は、炉心構成要素、炉心支持黒鉛構造物等の垂直荷重を直接支持するもので、炉心支持格子を介してその荷重を原子炉圧力容器に伝達する。炉心支持板は、各領域の炉心及び炉床部黒鉛構造物の荷重を支持する六角形状の７枚の平板と、全周の固定反射体ブロックを支持する１枚の平板からの組み合わせで構成される。この組合せ部の隙間を流れる低温冷却材の炉床部への漏えいを防止するために、1 枚の平板からなるシールプレート（材質： ２¼ Cr － 1 Mo 鋼）を炉心支持板の下面に設置している。シールプレートと炉心支持格子の間は低温冷却材（約 400 ℃） の流路となっており、炉心支持板を設計温度（約 450 ℃）以下に冷却している。

炉心拘束機構は、固定反射体ブロックを周囲から緊縛して固定反射体ブロックを周方向に一体化する機能を有するもので、周方向 12 本の炉心拘束バンド、２枚のレストレイントリング（材質：２¼ Cr － 1 Mo 鋼）等で１組の構成となる。炉心拘束バンドは、２種の金属（材質：SUS316 および低合金鋼）を組み合わせたバネ構造で、その収縮力は側部遮へい体を介して固定反射体へ伝達される。固定反射体外周の冷却材流路は、側部遮へい体によって２流路に分けられており、各流路の冷却材流量が等しくなるようにレストレイントリングで調節を行っている。

HTTR の出口管は、中心の流路を高温冷却材（約 950 ℃）、外側の環状流路を低温冷却材（約 400 ℃）が流れる二重管構造となっており、２流路の間には冷却材間の熱交換を防ぐために繊維状断熱材が設置されている。

出口管の外側流路を通って原子炉圧力容器内に流入した低温冷却材は、炉心支持板下面を流れ、固定反射体側部および炉心拘束機構を冷却しながら、上部へ向かって流れる。冷却材は、圧力容器の上部プレナムで各燃料チャンネルに流量配分され、炉心部で加熱される。加熱された高温冷却材は、７領域に分割された高温プレナムブロック内で混合される。 さらに、高温プレナムブロックの下部に設けられた高温プレナム内で混合され、出口管の中心流路を通って炉外へ流出する。

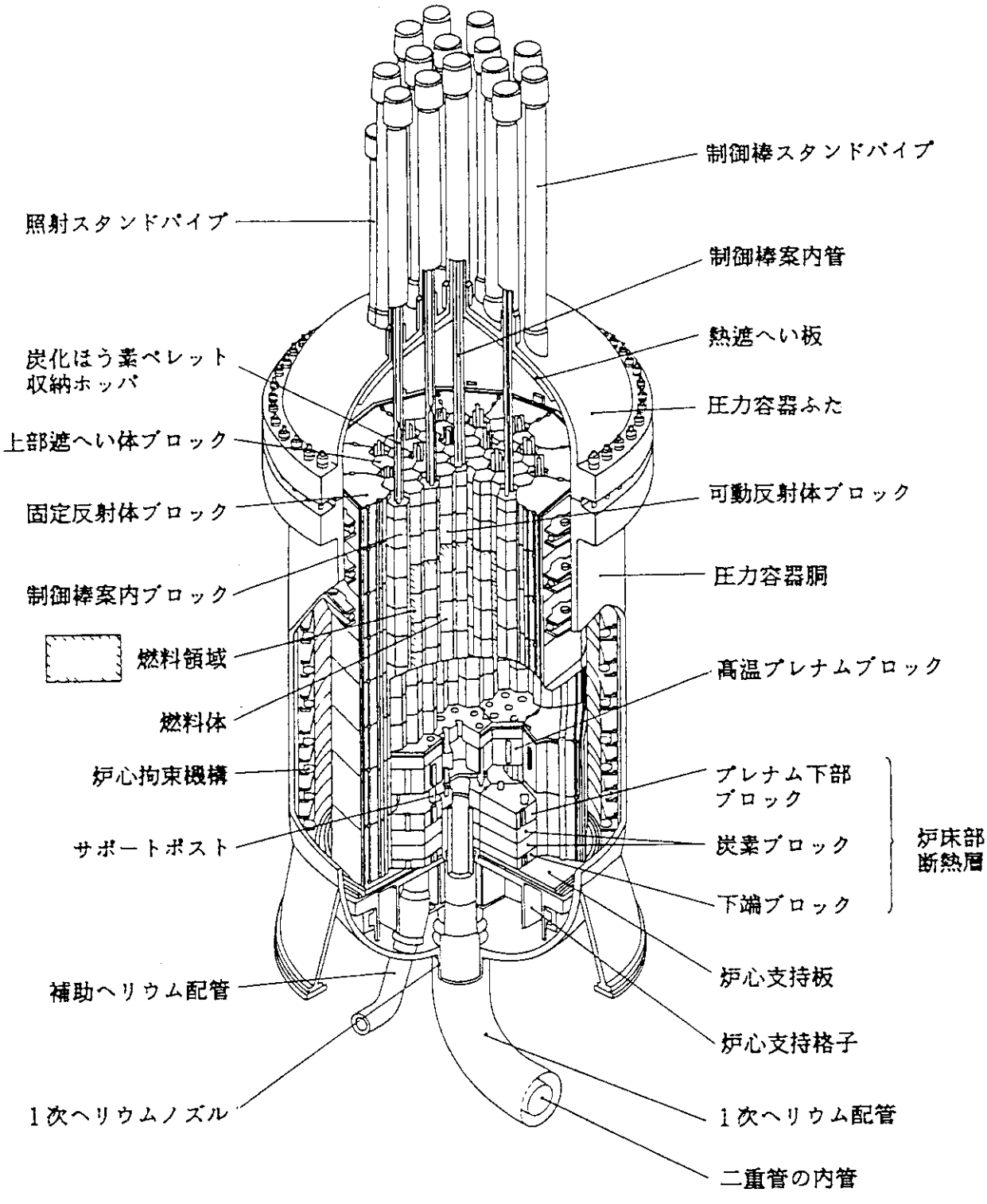



Fig. 2.1 Schematic view of the HTTR reactor internals.

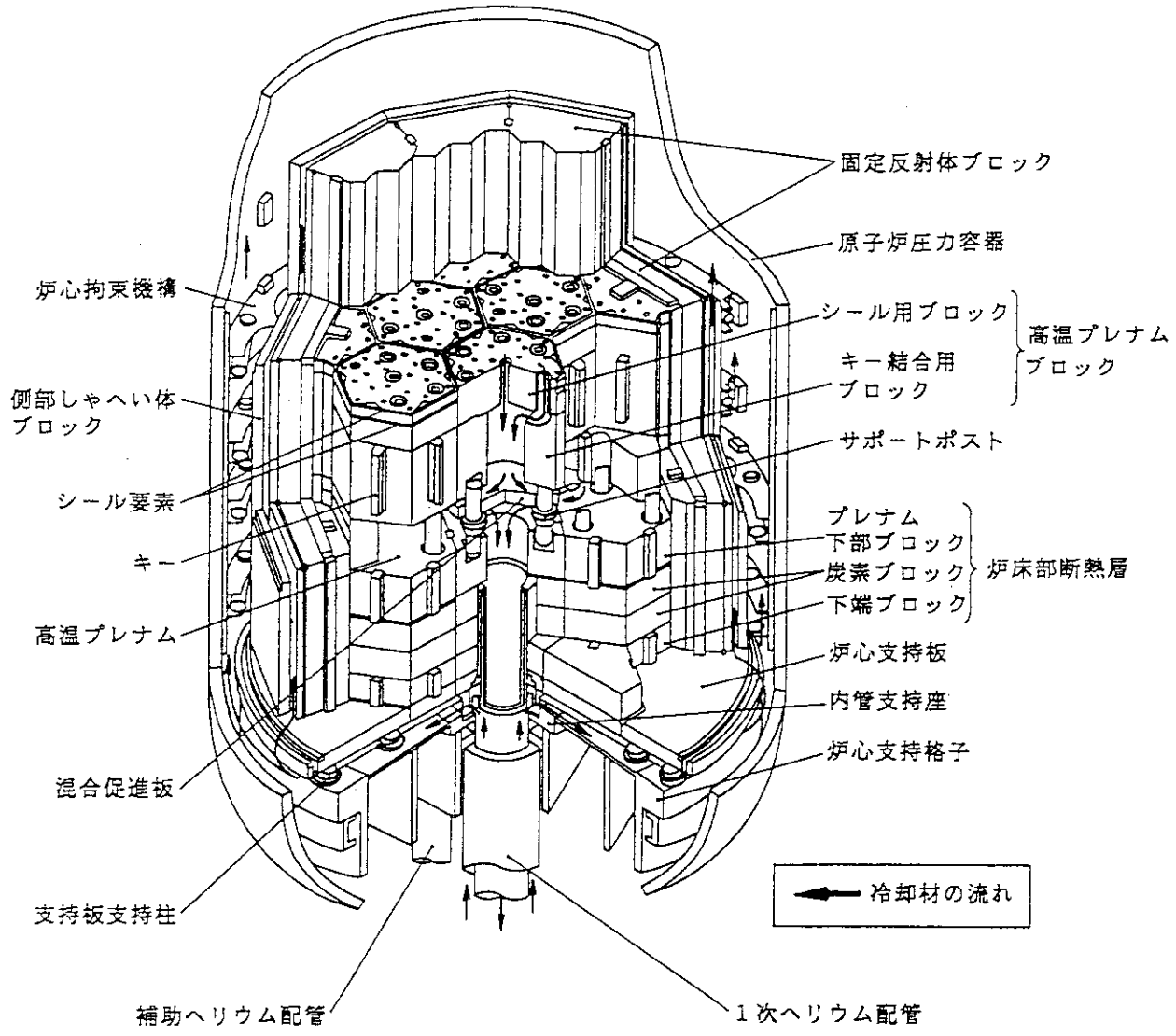



Fig. 2. 2 Schematic view of the HTTR core bottom structure.

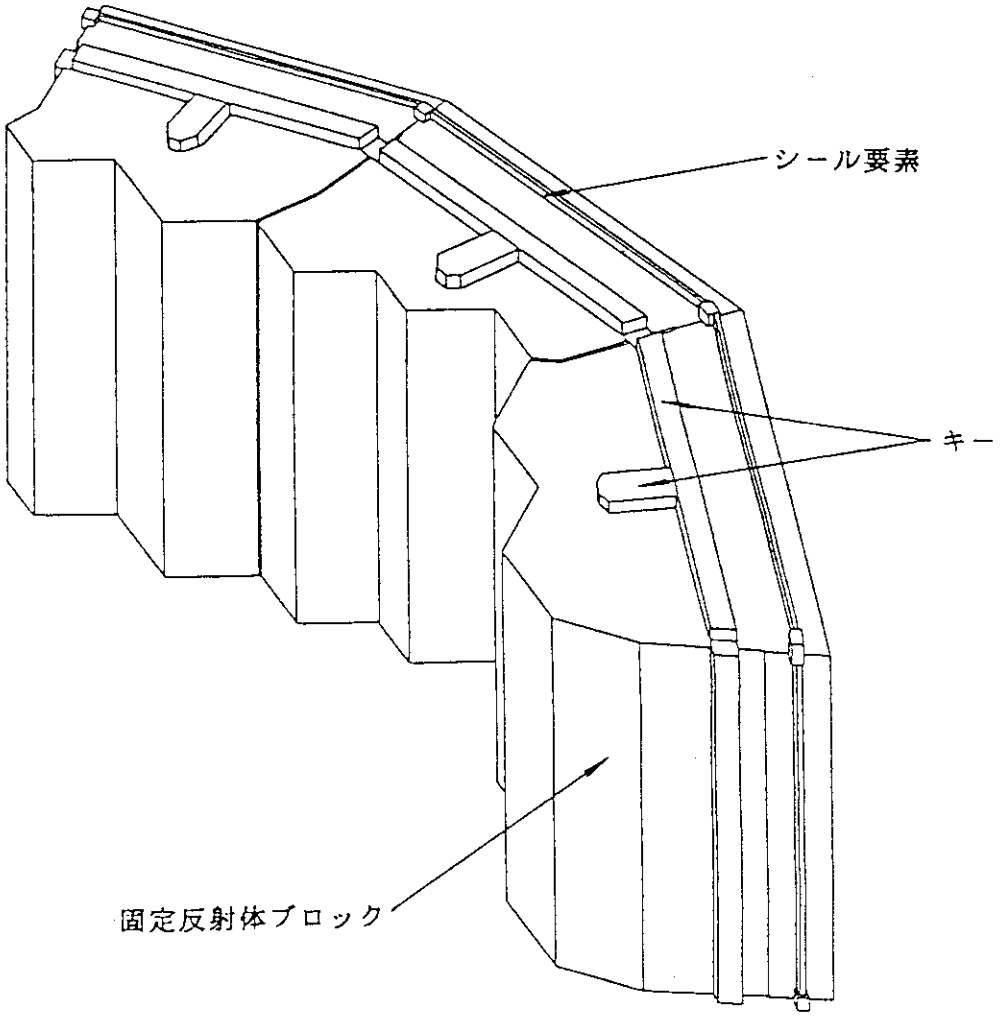



Fig. 2.3(a) Schematic view of permanent reflector blocks. (Core region)

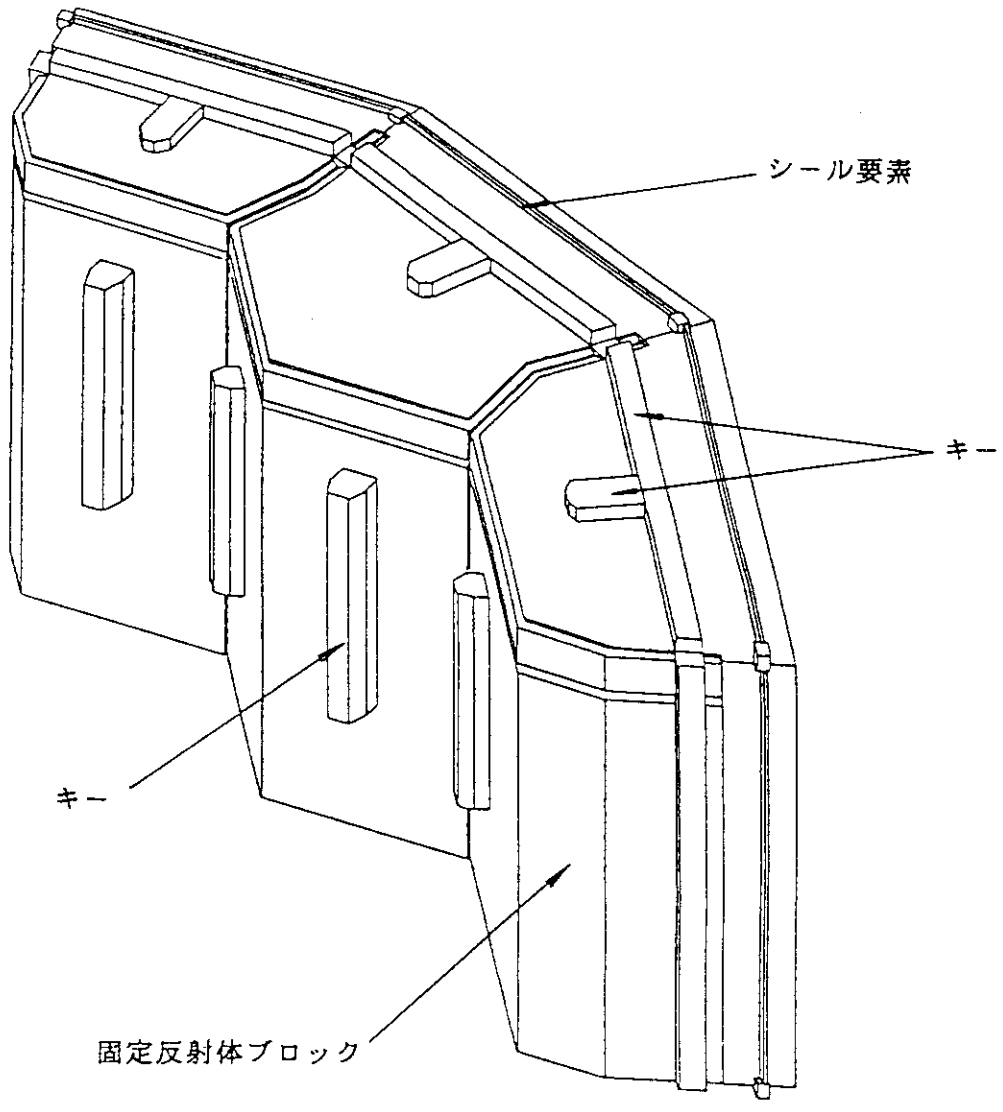



Fig. 2.3(b) Schematic view of permanent reflector blocks. (Core bottom structure)

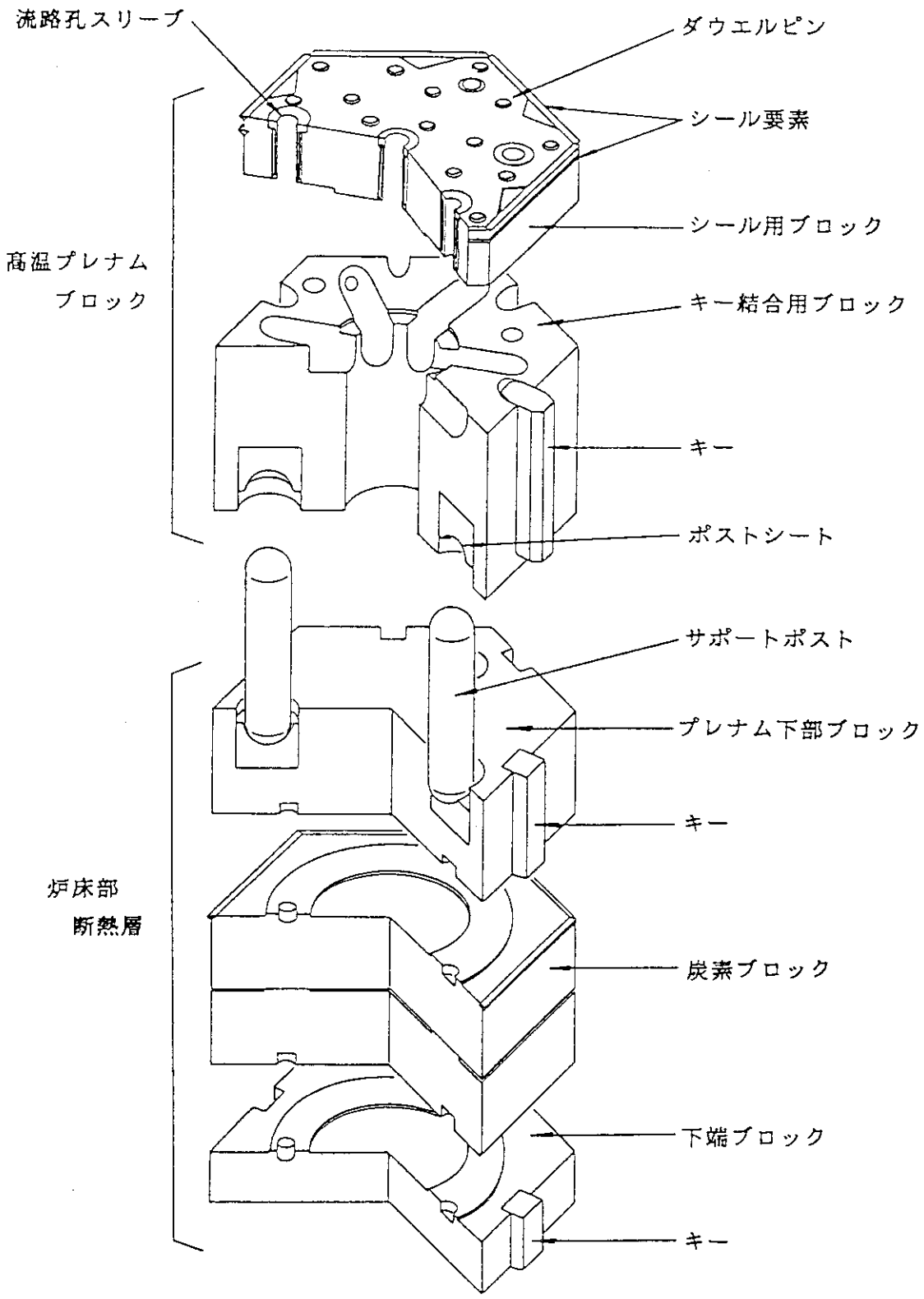



Fig. 2.4(a) Arrangement of graphite blocks in circumferential region of the core bottom structure.

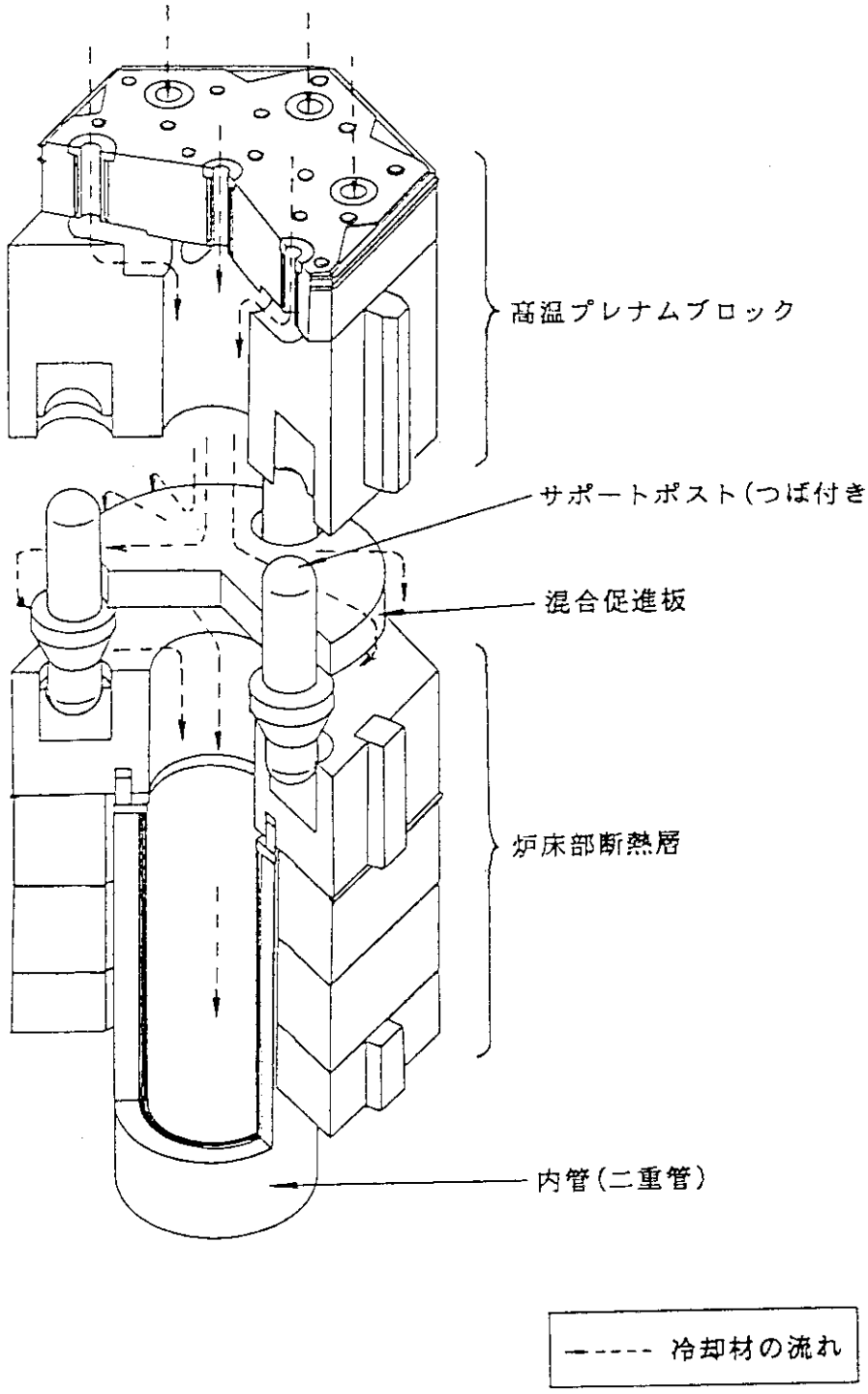



Fig. 2.4(b) Arrangement of graphite blocks in central region of the core bottom structure.

# 3．HENDEL　$T_2$試験部の構造

炉内構造物実証試験部（$T_2$） は、ＨＴＴＲ炉床部構造物の製作・組立性の実証、高温雰囲気下での健全性の実証、並びに冷却材の熱流動試験を行うための試験部で、炉床部構造物の実寸大モデルである試験体と、ヘリウムガスの流量、温度等の試験条件を設定するための試験装置から構成される。$T_2$ 試験部の構造を Fig. 3.1 に示す。

$T_2$ 試験部は、Fig. 3.2 の流路系統図に示すように HENDEL Ｍ＋Ａ ループに接続している。炉床部構造物（試験体）周囲の冷却材の流れは、HTTR と同様に炉床部構造物の内部を高温ヘリウムガスが、外表面を低温ヘリウムガスが流れる。試験部ではこの高温側および低温側ヘリウムガスをそれぞれ独立した２ループで循環させるようにしている。これは、試験部の主要試験の一つである冷却材漏えい試験に対応したもので、高温プレナム内外のヘリウムガスの圧力差を任意に制御するためである。炉床部の固定反射体を経由して高温側へ漏れ込んだ低温のヘリウムガスは、回収ラインを通って低温側ヘリウムガスループへ戻る。

Fig.3.3 は、$T_2$ 試験部の試験体（炉床部構造物）の構造を示したものである。$T_2$試験部の炉床部構造物は、構造、材質、寸法は、前節で述べた HTTR 炉床部構造物とほぼ同じであるが、HTTR の設計が確定する前に試験部の設計および建設が始まったため、HTTR とは若干異なる箇所がある。例えば、炭素ブロックの素材や段数の違い（HTTR の２段に対して、$T_2$ 試験部では４段）や、試験部では側部遮へい体と圧力容器の間にコアバレルを設けているのに対して、HTTR ではこれが撤去されている等である。これらは HTTR の合理化設計により削減されたものである。その他、黒鉛構造物の寸法等に多少の相違があり、HTTR との相違点を Table 3.1 に示す。多少の相違点はあるものの試験体の主要部分は HTTR と同じであり、その試験結果を評価する上で、変更箇所の影響は小さいと考えられる。

炉床部構造物の上部には、各領域間のヘリムガスに温度差を設けるための領域別ヒータ（黒鉛パイプ通電方式）、ヘリウムガス流量の調整および測定のための流量調節装置、流量測定ブロック（黒鉛製、ベンチュリ型）等が各領域ごとに設置されている。

また、$T_2$試験部の圧力容器は、その主要寸法が胴部内径：4,615mm、胴部肉厚：97mm、上鏡から下鏡までの長さ：16,000mm であり、HTTR 原子炉圧力容器の寸法、胴部内径：5,500mm、胴部肉厚：122mm、上鏡から下鏡までの長さ：13,200mm に対して相違があるが、その素材（$2\frac{1}{4}$ Cr － 1 Mo 鋼）は同一であり、また、ヘリウムガスの漏えいを防止するための二重金属Ｏリング及びΩシールの採用等、その構造は HTTR 原子炉圧力容器とほぼ同じである。

Table 3.2 に$T_2$試験部の主要な炉床部構造物、Table 3.3 に炉心拘束バンドの供用期間中における温度域と供用時間を示す。また、これらの表に示した計測点の位置を Fig. 3.4 及び Fig.3.5 に実線の囲みで示す。

Table 3.1 Comparison of graphite block specifications between the HTTR and $T_2$ test section.

| 構造物 | | | HTTR | $T_2$ 試験部 | 備考 |
|---|---|---|---|---|---|
| 固定反射体 | | | | | ・段数は、炉心支持板から高温プレナムブロックまでの段数を表し、下から順に第１段、第２段、…と数えることとする。 |
| | 材質 | | 黒鉛（ＰＧＸ） | 黒鉛（ＰＧＸ） | |
| | 数量 | | １２個×２段 | １２個×３段 | |
| | 寸法 | 面間距離 | ４２５０mm | ３５２１mm | |
| | | 高さ | 第１段：１２５０mm<br>第２段：１２００mm | 第１段：８５０mm<br>第２段：８５０mm<br>第３段：１１００mm | |
| シール用高温プレナムブロック | | | | | |
| | 材質 | | 黒鉛（ＰＧＸ） | 黒鉛（ＰＧＸ） | |
| | 数量 | | ７個×１段 | ７個×１段 | |
| | 寸法 | 対辺距離 | ９５３mm | ８８０mm | |
| | | 高さ | ２３０mm | ３３０mm | |
| キー結合用高温プレナムブロック | | | | | |
| | 材質 | | 黒鉛（ＰＧＸ） | 黒鉛（ＰＧＸ） | |
| | 数量 | | ７個×１段 | ７個×１段 | |
| | 寸法 | 対辺距離 | ９５３mm | ８８１mm | |
| | | 高さ | ６７０mm | ５７０mm | |
| サポートポスト | | | | | |
| | 材質 | | 黒鉛（ＩＧ－１１０） | 黒鉛（ＩＧ－１１） | |
| | 数量 | | ２１個 | ２１個 | |
| | 寸法 | 直径 | φ１５０mm | φ１５０mm | |
| | | 高さ | ６００mm | ６００mm | |
| プレナム下部ブロック | | | | | |
| | 材質 | | 黒鉛（ＰＧＸ） | 黒鉛（ＰＧＸ） | |
| | 数量 | | ７個×１段 | ７個×１段 | |
| | 寸法 | 対辺距離 | ９５５mm | ８８１mm | |
| | | 高さ | ３５０mm | ３５０mm | |
| 断熱（炭素）ブロック | | | | | ・段数は、下から順に第１段、第２段、…と数えることとする。<br>・$T_2$ 試験部の断熱ブロック材質は、第１段の周辺領域にＡＳＲ－０ＲＢを使用し、第１段の中心領域及び第２～４段にはＡＳＲ－１ＲＢを使用している。 |
| | 材質 | | 炭素（ＡＳＲ－０ＲＢ） | 炭素（ＡＳＲ－０ＲＢ）<br>炭素（ＡＳＲ－１ＲＢ） | |
| | 数量 | | ７個×２段 | ７個×４段 | |
| | 寸法 | 対辺距離 | 第１段：９５３mm<br>第２段：９５１mm | 第１段：８７８mm<br>第２段：８７８mm<br>第３段：８７８mm<br>第４段：８７８mm | |
| | | 高さ | 第１段：３００mm<br>第２段：３００mm | 第１段：２３７．５mm<br>第２段：２３７．５mm<br>第３段：２３７．５mm<br>第４段：２３７．５mm | |
| 下端ブロック | | | | | |
| | 材質 | | 黒鉛（ＰＧＸ） | 黒鉛（ＰＧＸ） | |
| | 数量 | | ７個×１段 | ７個×１段 | |
| | 寸法 | 対辺距離 | ９５７mm | ８８５mm | |
| | | 高さ | ２００mm | ２００mm | |

Table 3.2 Operation temperature and time of main components in the $T_2$ test section.

| 計測点 | 2TH008 | 2TH016 | 2TH026 | 2TC003 | 2TC015 | 2TC019 | 2TC032 | 2TC036 | 2TM003 | 2TM018 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 温度範囲 ℃以上 ℃未満 | 積算時間 h | 積算時間 h | 積算時間 h | 積算時間 h | 積算時間 h | 積算時間 h | 積算時間 h | 積算時間 h | 積算時間 h | 積算時間 h |
| 1000～ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 900～1000 | 0 | 0 | 542 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 800～ 900 | 0 | 0 | 644 | 194 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 700～ 800 | 0 | 0 | 967 | 751 | 0 | 202 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 600～ 700 | 0 | 0 | 1652 | 766 | 924 | 982 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 500～ 600 | 0 | 0 | 862 | 1710 | 862 | 805 | 1162 | 0 | 0 | 0 |
| 400～ 500 | 1299 | 216 | 1674 | 2110 | 1481 | 2454 | 1653 | 1626 | 1698 | 389 |
| 300～ 400 | 3105 | 3294 | 1879 | 2556 | 3674 | 3143 | 3078 | 2629 | 2746 | 3368 |
| 0～ 300 | 10063 | 10957 | 6247 | 6380 | 7526 | 6881 | 8574 | 10212 | 10023 | 10710 |
| 積算時間合計 | 14467 | 14467 | 14467 | 14467 | 14467 | 14467 | 14467 | 14467 | 14467 | 14467 |

計測点内容
2TH008：側部遮へい体内側ヘリウム温度(第２段、180°方向)
2TH016：側部遮へい体外側ヘリウム温度(第２段、180°方向)
2TH026：中心領域高温プレナムブロック内ヘリウム温度
2TC003：周辺領域高温プレナムブロック温度(270°方向)
2TC015：固定反射体内側温度(第３段、180°方向)
2TC019：周辺領域高温プレナム下部ブロック下面温度(210°方向)
2TC032：固定反射体外側温度(第３段、180°方向)
2TC036：周辺領域下端ブロック上面温度(210°方向)
2TM003：周辺領域炉心支持板上面温度(210°方向)
2TM018：側部遮へい体温度(第２段、180°方向)

Table 3.3 Operation temperature and time of core restraint band in the $T_2$ test section.

| 計測点 | 2TM009 | 2TM010 | 2TM012 | 2TM014 |
|---|---|---|---|---|
| 温度範囲 ℃以上 ℃未満 | 積算時間 h | 積算時間 h | 積算時間 h | 積算時間 h |
| 410～ | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 400～ 410 | 304 | 291 | 227 | 240 |
| 390～ 400 | 2345 | 2338 | 2347 | 2202 |
| 380～ 390 | 114 | 124 | 171 | 324 |
| 370～ 380 | 53 | 68 | 104 | 124 |
| 360～ 370 | 53 | 74 | 80 | 101 |
| 350～ 360 | 70 | 87 | 109 | 72 |
| 300～ 350 | 876 | 836 | 637 | 755 |
| 0～ 300 | 10652 | 10649 | 10792 | 10649 |
| 積算時間合計 | 14467 | 14467 | 14467 | 14467 |

計測点内容 2TM009：炉心拘束機構温度(第２層、15°方向)
2TM010：炉心拘束機構温度(第４層、15°方向)
2TM012：炉心拘束機構温度(第６層、15°方向)
2TM014：炉心拘束機構温度(第８層、15°方向)

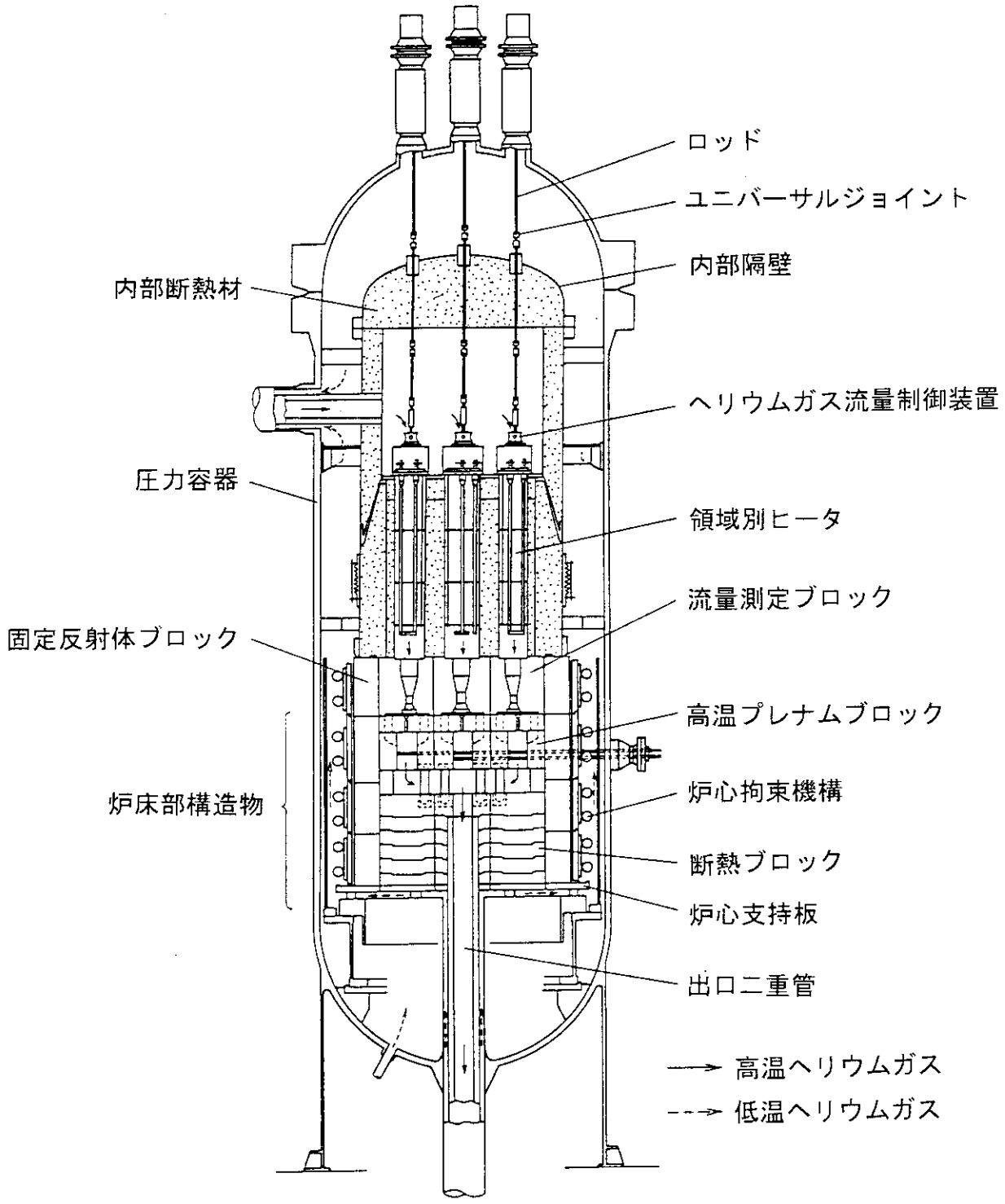



Fig. 3.1 Schematic view of the HENDEL $T_2$ test section.

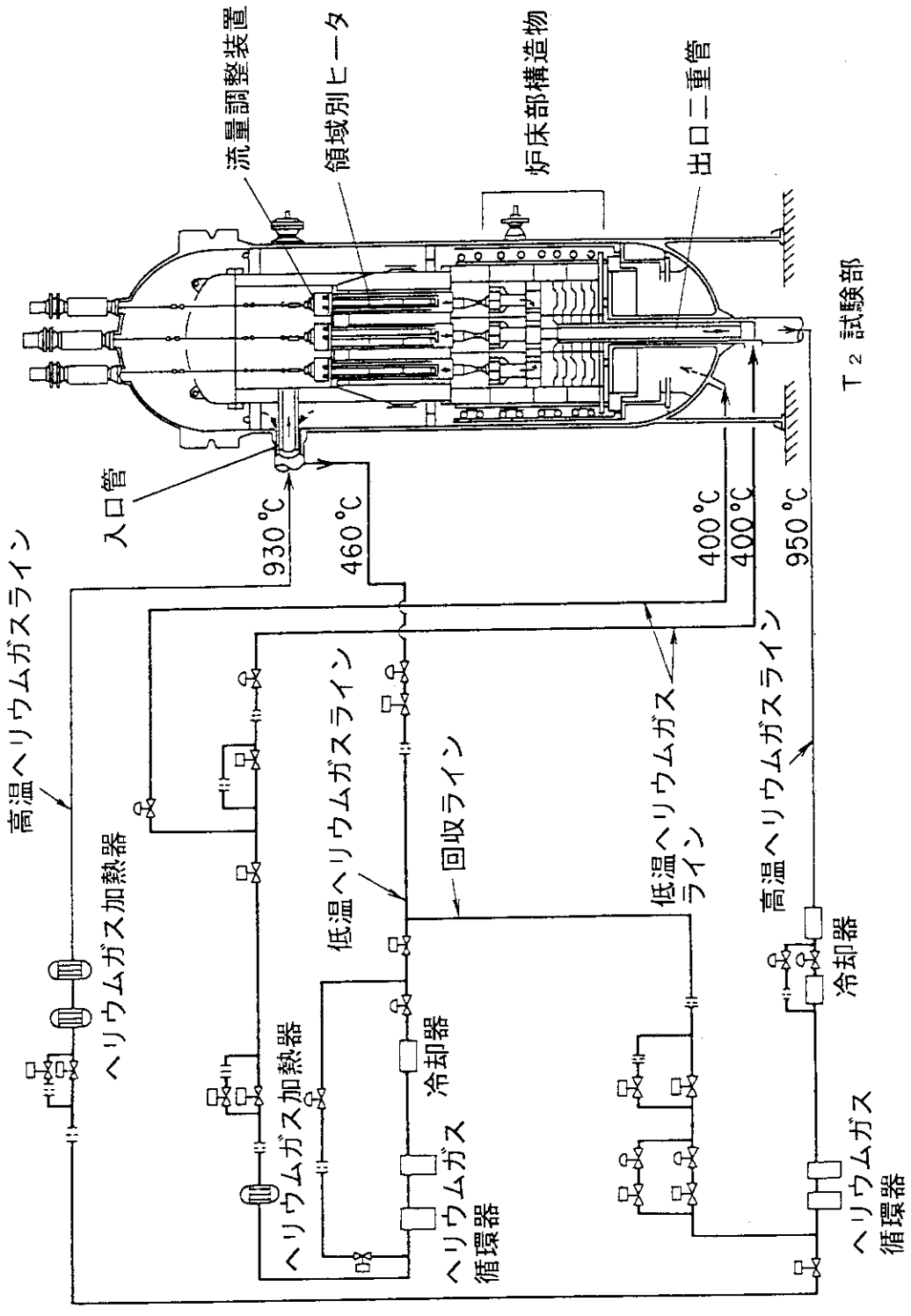



Fig. 3.2 Schematic flow diagram of the HENDEL $T_2$ test section.

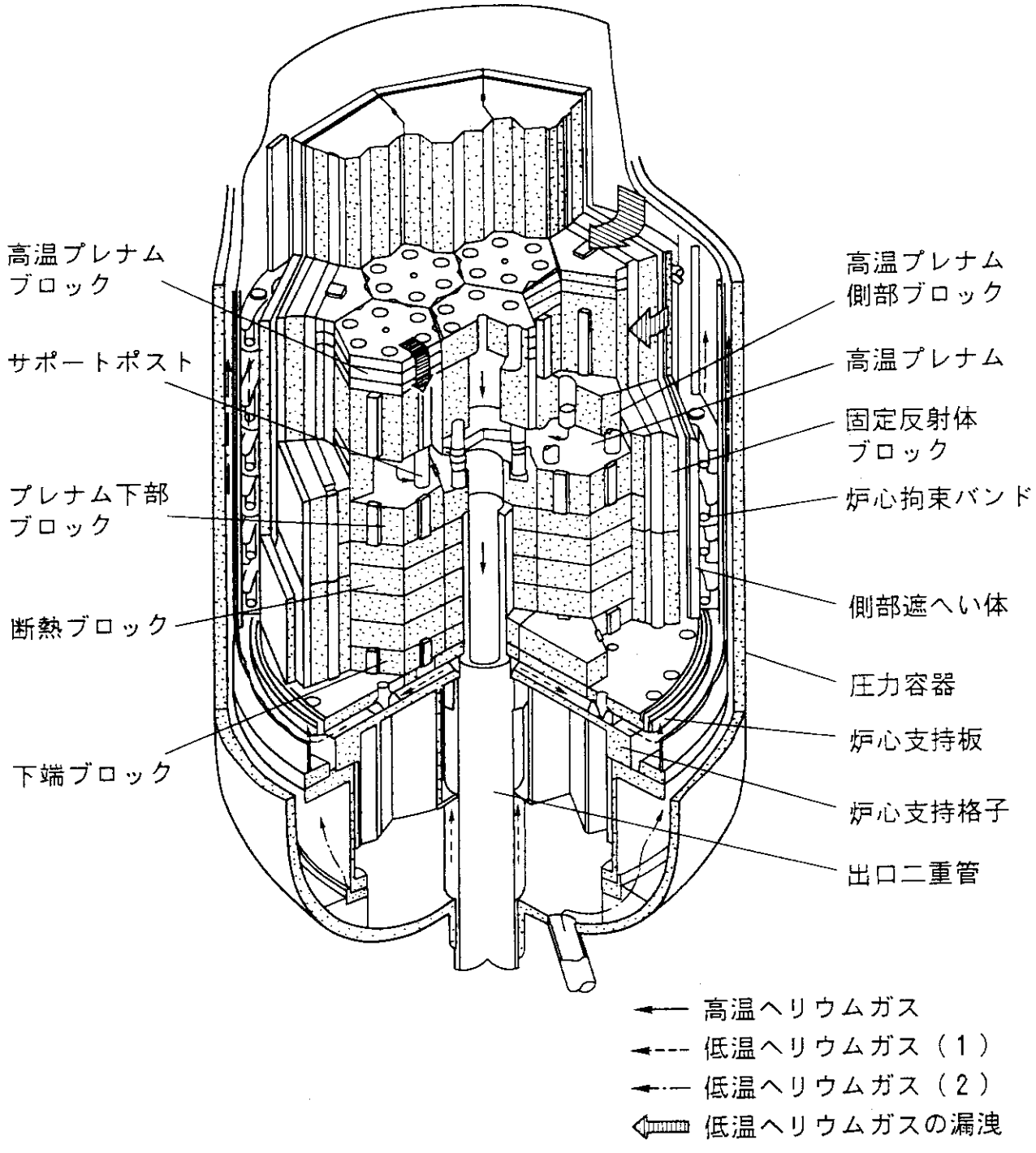



Fig. 3.3 Schematic view of core bottom structure of the HENDEL $T_2$ test section.

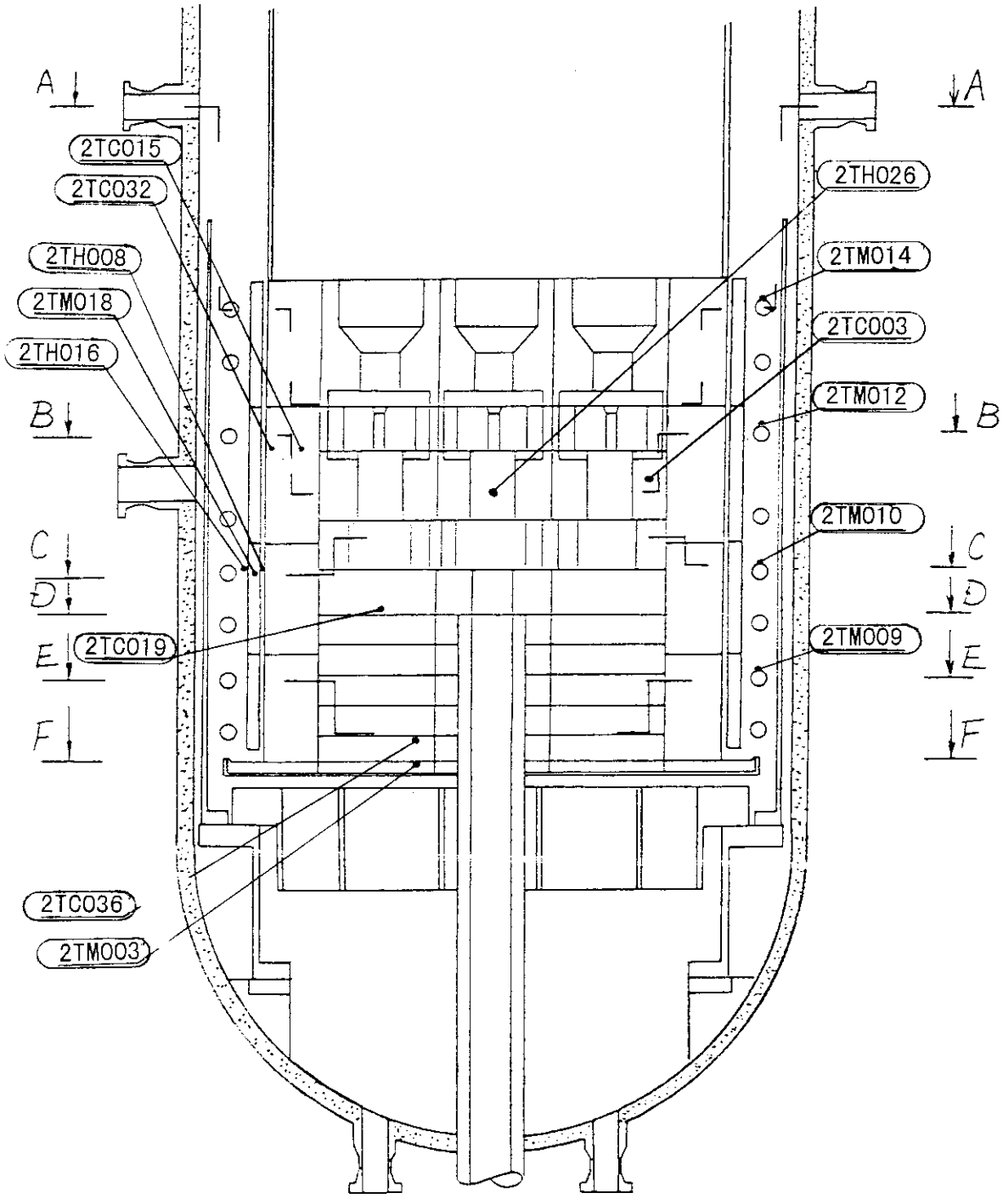
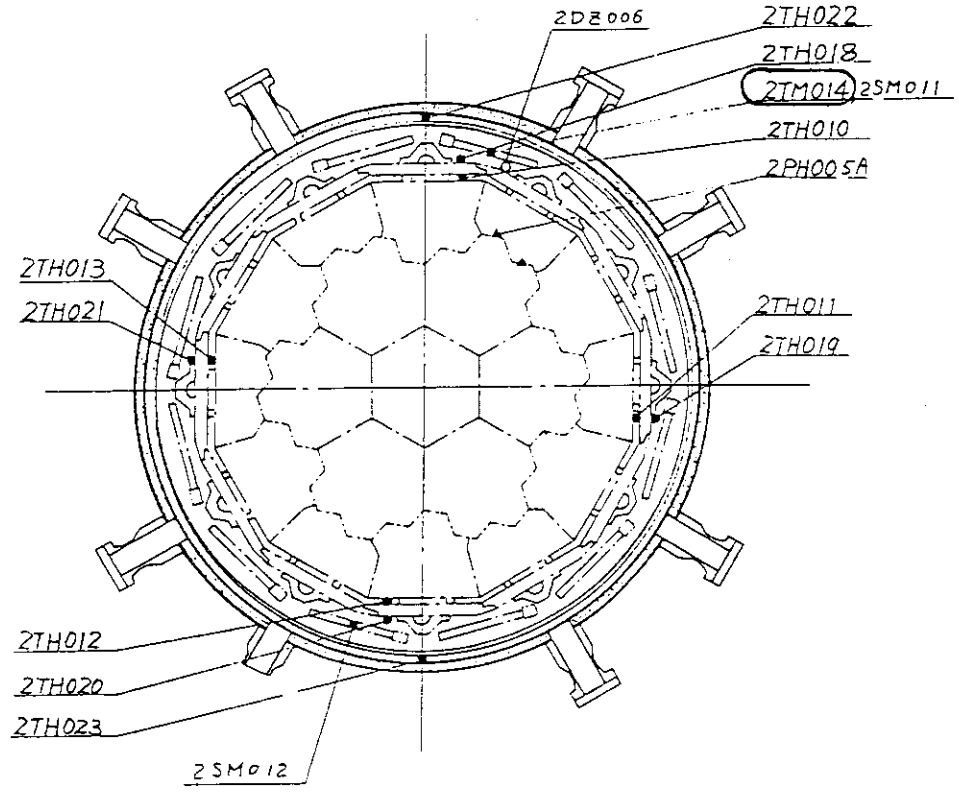
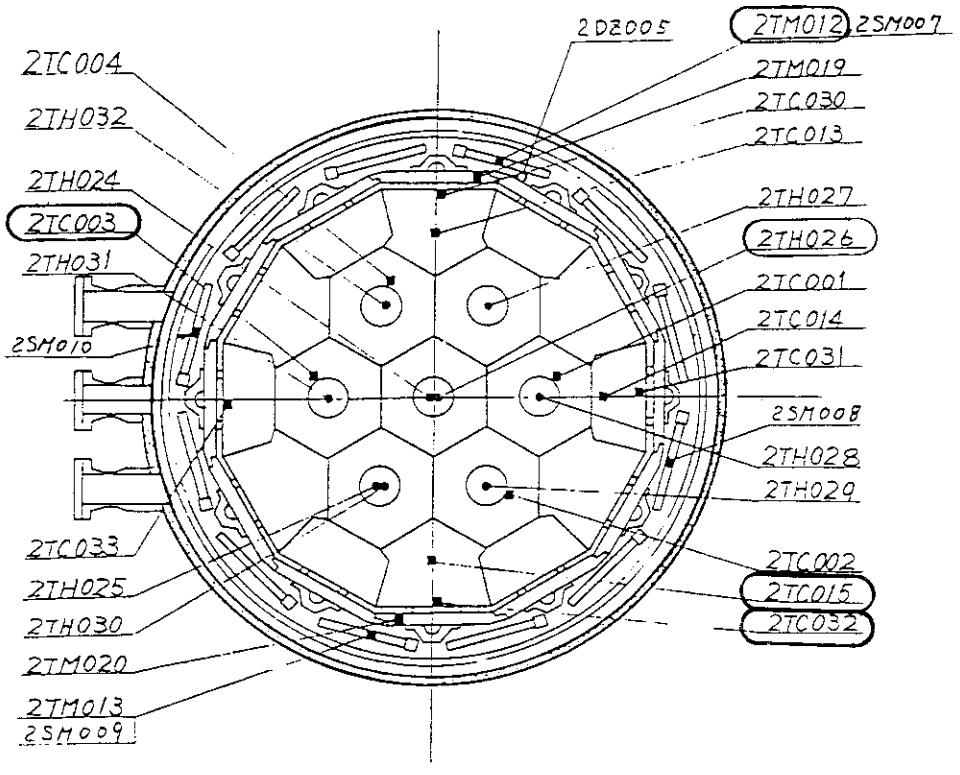



Fig. 3.4 Temperature measuring position in the $T_2$ test section.
( Sectional view )

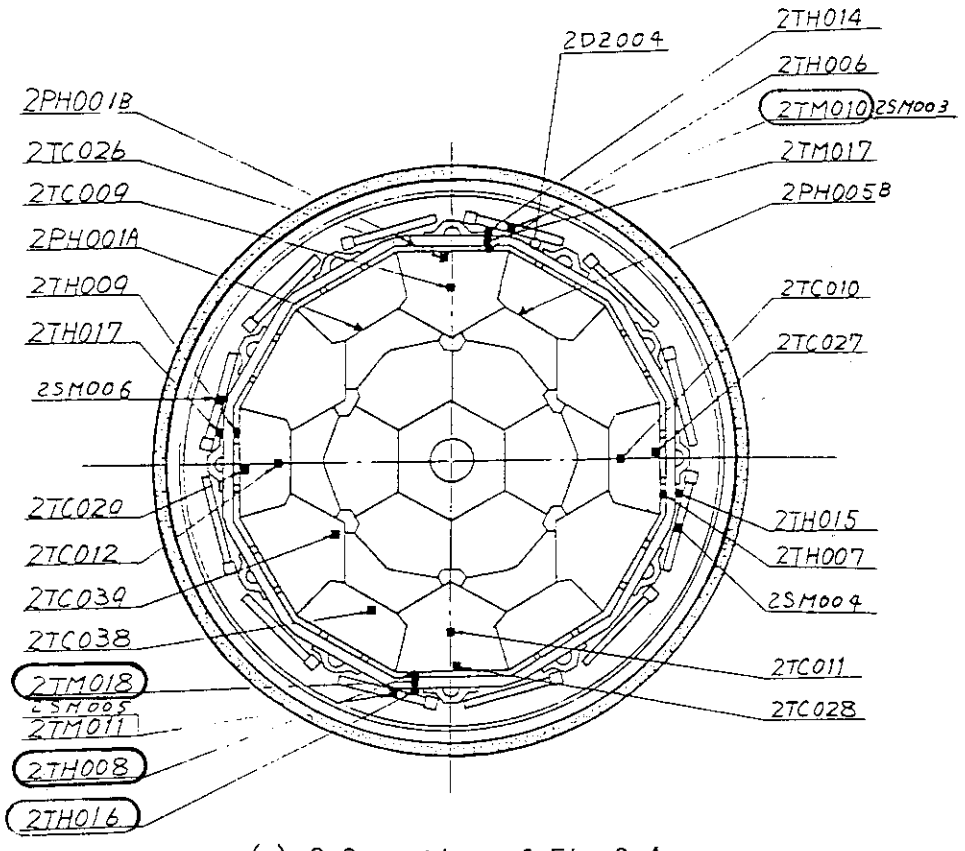



(a) A-A section of Fig. 3.4

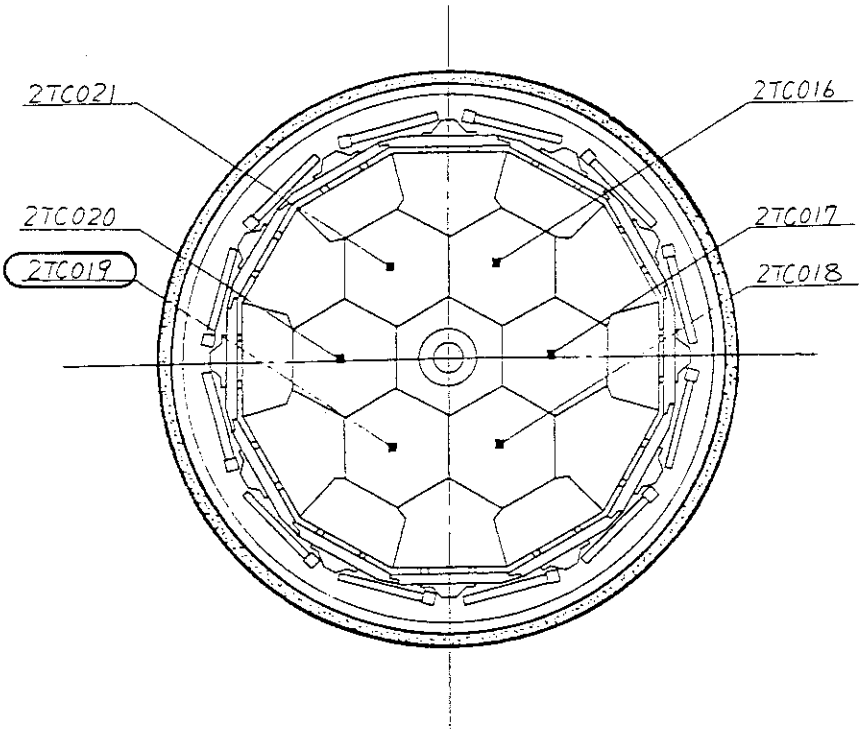



(b) B-B section of Fig. 3.4

Fig. 3.5-1 Temperature measuring position in the T2 test section. ( Plane view )

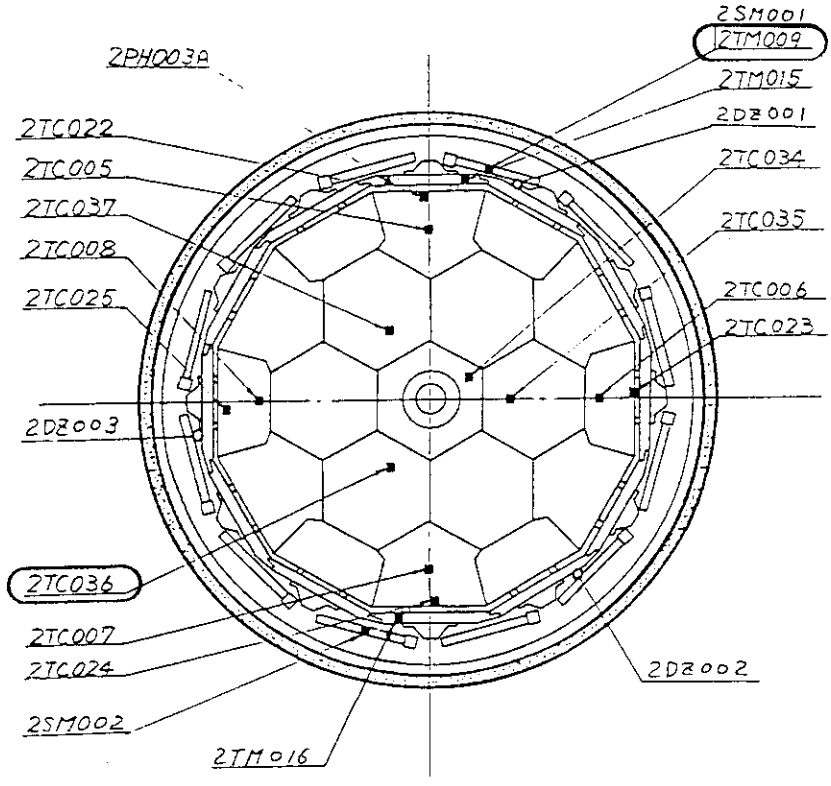



(c) C-C section of Fig. 3.4

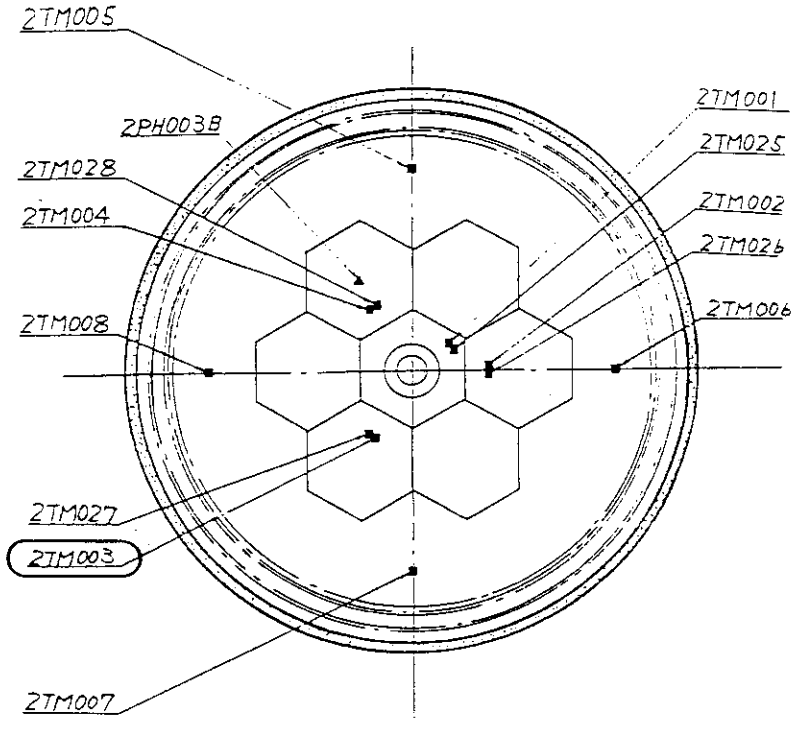



(d) D-D section of Fig. 3.4

Fig. 3.5-2 Temperature measuring position in the $T_2$ test section. ( Plane view )




(e) E-E section of Fig. 3.4




(f) F-F section of Fig. 3.4

Fig. 3.5-3 Temperature measuring position in the $T_2$ test section. ( Plane view )

# 4．検査項目と方法

## 4．1　検査項目

炉床部構造物の機能は、炉心構造物が適切な配列になるように支持することであり、炉床部構造物に異常が生じた場合には HTTR において、i) 原子炉出口の冷却材温度の低下（定格運転時で 850 ℃以下、高温運転時で 950 ℃以下）、ii) 燃料温度の上昇（高温運転時で 1495 ℃以上）等の異常が生じる可能性がある。特に燃料温度の上昇は、燃料からの FP 放出量を急増させることから、HTTR の運転・保守に重大な支障となるものである。上記の i) 及び ii) の事象は、ともに燃料を流れる冷却材の有効流量の減少によるものであり、これは以下の事象に起因する。

a) 燃料ブロック間の冷却材のクロスフロー、隙間流れの増加。

b) 固定反射体ブロック間の隙間を流れる低温冷却材の漏えい量の増加。

上記の a) について炉床部構造物に起因する要因は、炉床部構造物の配列のズレであり、特にシール用高温ブロック上面における隣接したブロック間での過大な段差は、燃料ブロックのカラム間配列を傾ける等の大きな影響を与える。これらは黒鉛構造物（特に、サポートポスト）の破損、断熱用炭素ブロックの圧縮クリープによる寸法変化、黒鉛構造物支持している炉心支持板の傾き等に起因する。

また、上記の b) について炉床部構造物に起因する要因は、固定反射体ブロック間の隙間の拡大であり、これらは固定反射体ブロックの破損、固定反射体ブッロクの配置のズレ、炉心拘束バンドの固定反射体ブロック締付力の低下等による。

このため、HTTR では黒鉛構造物の状態（破損の有無）を定期的に監視するためのテレビカメラによる目視検査[7,8]、黒鉛構造物の破損の原因となる腐食等を調べるためのサーベイランス試験[7]等の ISI を計画している。

そこで、目視検査における監視位置及び時期、サーベイランス試験片の取出し時期等の ISI 計画の策定に反映するとともに、ISI では検知できない炉床部構造物の配置のズレ、炉心拘束バンドの締付力の変化等を明らかにするために、$T_2$ 試験部の解体では以下の検査を実施することとした。

①黒鉛構造物の破損状況の目視検査

②黒鉛構造物の腐食状況の目視検査

③固定反射体ブロック間の面間距離の測定（炉床部構造物の配置のズレの確認）

④シール結合用高温ブロック上面における隣接したブロック間での段差の測定（炉床部構造物の配置のズレの確認）

⑤炉心支持板の水平度の測定（炉床部構造物の配置のズレの確認）

⑥固定反射体ブロック間の隙間の測定

⑦炉心拘束バンドの締付力の測定

ＨＴＴＲに生じる事象、その要因となる炉床部構造物の異常、異常の有無を確認するために行った検査及び試験の関係を Fig. 4.1 に示す。

また、圧力容器についても、HTTR の安全性を実証する上で重要と思われる以下の項目につい

て検査を実施した。

⑧圧力容器フランジのシール部（二重Oリング、オメガシール）の目視検査

4．2 検査方法

(1) 目視検査

解体作業の各段階で、炉床部黒鉛構造物の全部品について目視検査を行い、割れ、欠け、ひび等の破損の有無、腐食の状況等を調べた。また、解体時の作業状況並びに主要構造物の状態については、ビデオ及び写真により記録した。

(2) 寸法検査

① 固定反射体ブロックの面間距離

固定反射体ブロックは、各段に12個配置され、その配置形状は、例えばTable 6.1に示す断面図のように12角形を形成する。面間距離とは、向かい合った固定反射体ブロックの外辺間の距離であり、これを測定することにより、固定反射体ブロックの配置のズレ、並びに隣接した固定反射体ブロック間の隙間の拡がり等の有無を確認できる。測定はインサイドマイクロメータを用いて炉心拘束機構を設置した状態で行い、据付時の測定結果と比較した。

② シール用高温ブロック上面における隣接したブロック間での段差

シール用高温プレナムブロックの上面において、隙間ゲージとストレートエッジ（直定規）を用いて、隣接したシール用高温プレナムブロック間及びシール用高温プレナムブロックと固定反射体ブロック間の段差を測定し、据付時の測定結果と比較した。

③ 炉心支持板上面の水平度

炉心支持板の上面において、水準器とストレートエッジを用いて測定し、据付時の測定結果と比較した。

④固定反射体ブロック間の隙間

固定反射体は、炉心拘束機構の締め付け力によって、隣接するブロックが面で接触し、且つ、その面圧が均一に分布するように設計されている。据え付け時における接触状況の検査はブロック間の隙間（ブロックの上面部に現れる隙間）の有無を調べ、隙間が0.2mm以下であることをもって接触状態の健全性を担保した。隙間の測定は、据付時と同様に隙間ゲージ（最小板厚0.03mm）を用いて行い、据付時の測定結果と比較した。

(3) 炉心拘束バンドの締付力

固定反射体を締付けている炉心拘束バンドは、供用中に最高で約400℃の温度に曝されるために応力リラクセーションが生じて締付力が低下する可能性がある。このため、据付時と同様の方法で締付力の測定を行った。測定には据付時に使用した油圧ユニット（専用ジャッキ付き）、締付力測定装置（ロードセル方式）及びライナーを用いた。測定方法をFig. 4.2に示す。最初に、12個の専用油圧ジャッキの裏面（ラムが出る面の反対側の面）にロードセルを各々2個接着剤で取り付け、側部遮へい体と拘束機構のバンド支えとの間に挿入した。同時に、バンド支え側に当て板を挿入した。この当て板は油圧ジャッキからの力をバンド支えに伝達する部品である。その後、油圧ユニットを運転し、油圧ジャッキのラムを駆動してバンドを押し広げた。ラムが押し出ることにより、当て板と油圧ジャッキとの間に隙間が出来るので、その隙間にライナー（荷重ライナ

ーと調整ライナー）を挿入し、同時にスペーサを取り除いた。その後、油圧ジャッキのラムを引き込み、油圧による荷重負荷を止めた。この状態で締付力を測定した。

$T_2$試験部では、炉心拘束バンドは固定反射体ブロック１段当たりに２層設置しており、測定は、固定反射体ブロックの第２段及び第３段に設置した炉心拘束バンド（最下層から数えて第３層～第６層）について実施した。

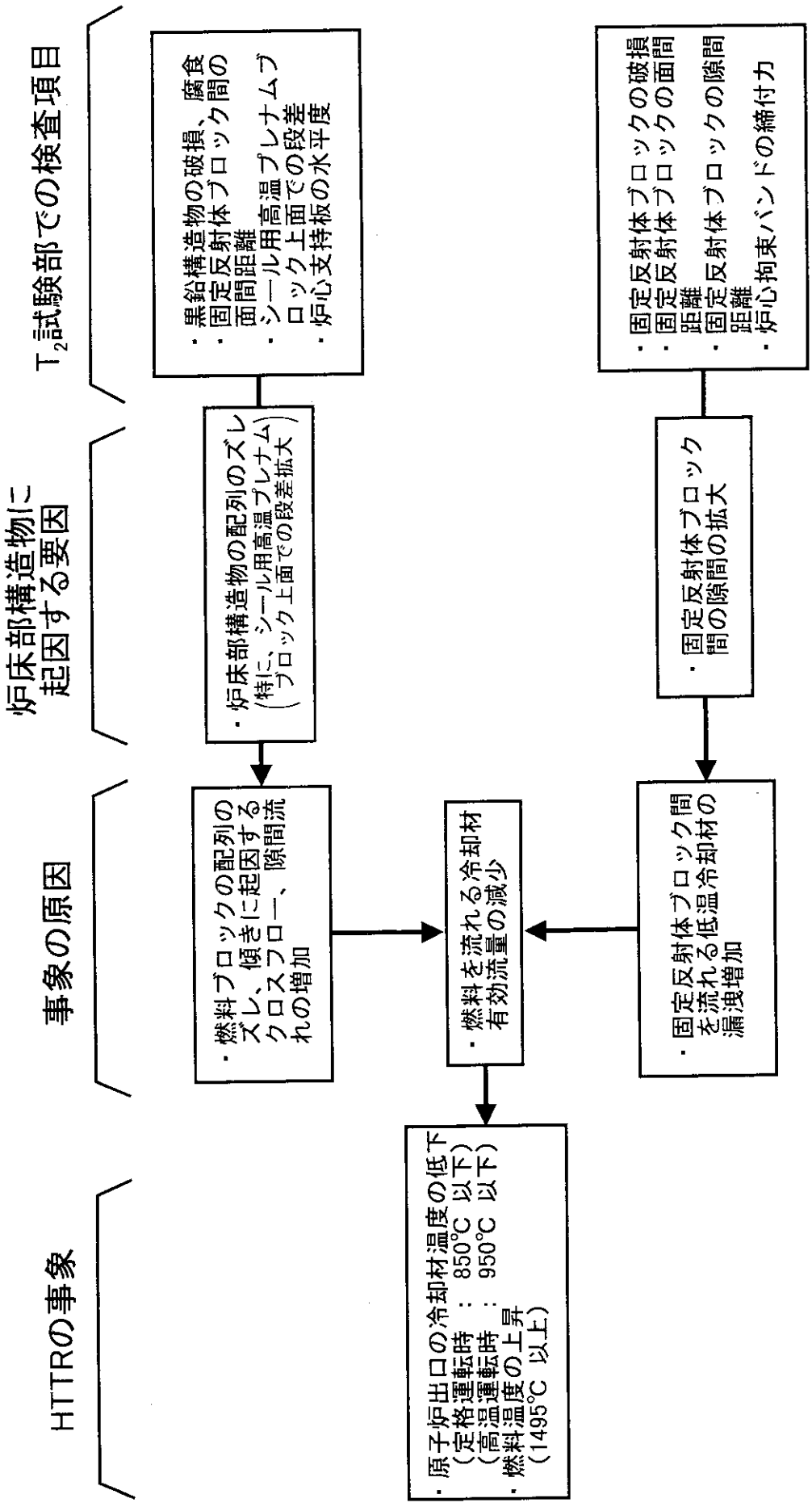



Fig. 4.1 Relation between events of the HTTR and failure of the core bottom structure, and inspection items at dismantlement of the $T_2$ test section.

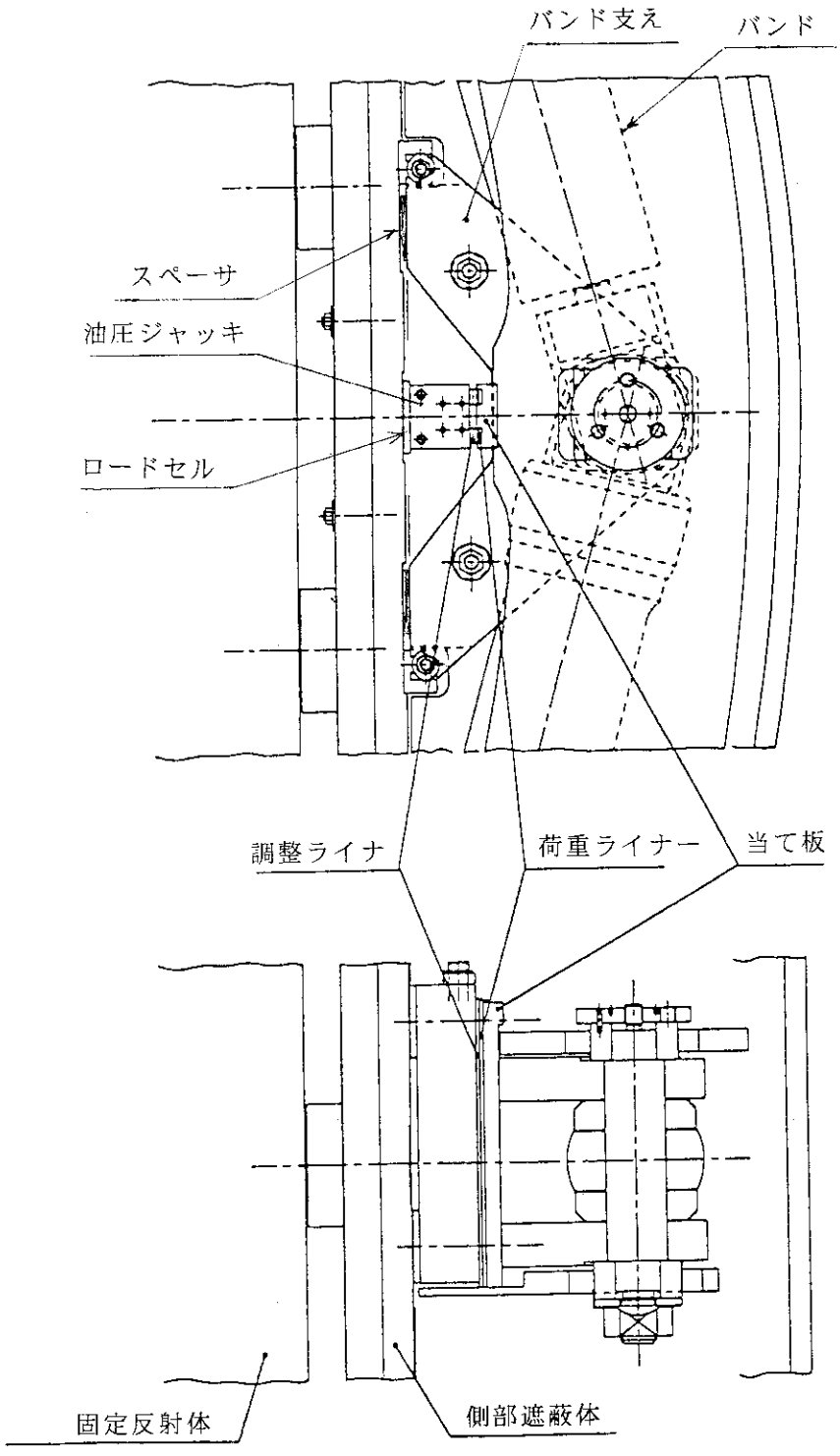



Fig. 4.2 Measurement method of restraint force of core restraint bands.

# 5．解体作業

解体作業における手順を以下に述べる。ここで黒鉛構造物のうち、固定反射体ブロック及び炭素ブロックは４段の積層構造になっている。そこで、最下段を第１段とし、以下、上部へ向かうにつれて第２段、第３段、第４段（最上段）とした。また、炉心拘束バンドは、固定反射体ブロック１段当たり２層の計８層が設置されており、最下層を第１層、最上層を第８層とした。

圧力容器の上部フランジは 60 本の植込みボルト（直径 5.5 ㌅，約 140mm）で締付けられている（Photo 5.1 参照)。上鏡は植込みボルトにねじこんだナットを緩めて取り外すが、Photo 5.2 に示すように、ボルトとナットにはかなりのさびが見られ、緩める過程でかじりを起こす可能性があった。そこで、60 本のボルトを溶断して取り外すことにした。溶断作業後のボルトの切断状況を Photo 5.3 に示す。ボルトを切断した後、フランジのシール溶接部（オメガシール）を溶断した（Photo 5.4 参照)。その後、上鏡をクレーンで吊り上げて取り外した。Photo 5.5 に上部フランジのＯリングが挿入された面の状況を示す。

Fig. 3.1 に示すように、炉床部構造物の上部には、内部隔壁と領域別ヒータが設置されている。このため、炉床部構造物の解体を行う前に、これらの内部構造物を取り外した。Photo 5.6 に内部隔壁の蓋を取り外した時の内部の様子を示す。内部の構造物は耐熱合金製であるが、目視による検査では、変色は見られたものの、変形等の不具合は認められなかった。次に、炉床部構造物への人のアクセスを容易にし、解体と検査作業の能率を上げるため、内部隔壁の目視検査後、圧力容器の胴部を溶断した。Photo 5.7 は胴部の切断後、領域別ヒータを内蔵した状態で内部隔壁を取り外す準備をしている様子を示す。

Photo 5.8 に内部隔壁を取り除いた直後の炉床部構造物の上部を示す。７個のプレナム入口流量測定ブロックとシール材が観察される。これらの部品は、目視観察をしたかぎりでは健全なものであった。その後、プレナム入口流量測定ブロックをこのブロック専用の特殊吊り治具で取り外し、固定反射体の面間寸法の測定（Photo 5.9 参照）及び固定反射体間の隙間の測定を行った。

第４段上層（第８層）の炉心拘束機構の取り外しは、油圧ユニット（Photo 5.10)を設置し、12 個の専用油圧ジャッキを側部遮へい体と炉心拘束バンドのバンド支えの間に挿入し(Photo 5.11)、油圧を加えながらスペーサを引き抜き、炉心拘束バンドを緩めた。炉心拘束バンドを緩めた後、炉心拘束機構全体を専用の吊り具を用いて取り外した。Photo 5.12 に炉心拘束機構を吊り上げた状態を示す。第４段の上層（第８層）と下層（第７層）の炉心拘束機構を取り除いた後、側部遮へい体、固定反射体の順で解体を行った。

第３段から第１段までの解体は第４段で行った解体とほぼ同様の方法で行った。すなわち、外側の炉心拘束機構を取り外し、各黒鉛ブロックの位置決めを行っている黒鉛製のキー及び固定反射体ブロック間に挿入されている黒鉛製のシール片を取り除いた後、側部遮へい体、固定反射体、及び内部の黒鉛（炭素）ブロックの順で解体を行った。第３段と第２段の固定反射体ブロックに設置されている炉心拘束機構については、炉心拘束バンドの締付力の測定を行った。

Photo 5.13 に第３段の解体を行う前の炉床部の様子を示す。炉心拘束機構を取り除いた後、側部遮へい体を吊り上げている様子を Photo 5.14 に示す。その後、固定反射体ブロックを取り除き

(Photo 5.15 参照)、内側の高温プレナムブロックの解体を行った。Photo 5.16 で、上部のブロックはシール用高温プレナムブロックであり、下部のブロックはキー結合用高温プレナムブロックである。サポートポストはキー結合用高温プレナムブロックを支えている。Photo 5.17 にキー結合用高温プレナムブロックを取り除いた後のサポートポストの様子を、Photo 5.18 及び Photo 5.19 にサポートポストとシートの接触面の様子を示す。

サポートポストを取り外した後、第２段の炉心拘束機構、側部遮へい体、固定反射体、炭素ブロックの順で解体を行った。Photo 5.20 に炭素ブロックの様子を示す。写真で、中央のブロックが炭素ブロック（銘柄：ASR-1RB）であり、その上のブロックがプレナム下部ブロックである。

Photo 5.21 に第１段の解体を行う前の炉床部の様子を示す。写真で、ブロック群は上から２層目の炭素ブロックである。この段の解体も炉心拘束機構、側部遮へい体、固定反射体、炭素ブロックの順で行った。Photo 5.22 と Photo 5.23 に周辺領域部の炉心支持板を示す。環状に塗られた侵炭防止用セラミックコーテング（$ZrO_2$）が観察される。その後、全ての炭素ブロックを取り除いた後、炉心支持板を取り外し、その下に設置されているシールプレートを観察した。Photo 5.24 にシールプレートの状況を示す。

また、供用後の材料試験等を目的として、以下に記す黒鉛ブロック、高温配管等を取り出し、保管した。

①固定反射体（第３段）：１体
②シール用高温プレナムブロック：中心領域　１体
③キー結合用高温プレナムブロック：中心領域　１体
④サポートポスト：２本
⑤サポートポスト用シート：５個
⑥炭素ブロック（ASR-1RB）：第４段（最上段）の中心及び周辺領域　各１体
⑦炭素ブロック（ASR-0RB）：第１段（最下段）の周辺領域　２体
⑧炉心支持板：周辺領域　１枚
⑨黒鉛製キー：１式
⑩側部遮蔽体（第２段）：１体
⑪拘束機構用バンド：第３層（固定反射体第２段の下層）　２本
⑫圧力容器上部フランジ部：１$m^2$（溶断により切り出し）
⑬圧力容器上部フランジ用Ｏリング：２ｍ（金鋸により切り出し）
⑭出口側高温配管：３ｍ（溶断により切り出し）

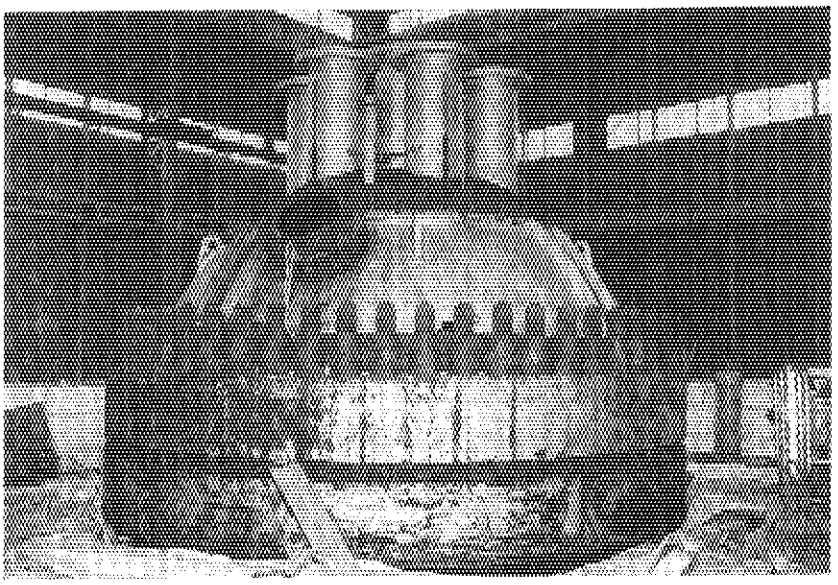


Photo 5.1 Upper flange of pressure vessel.

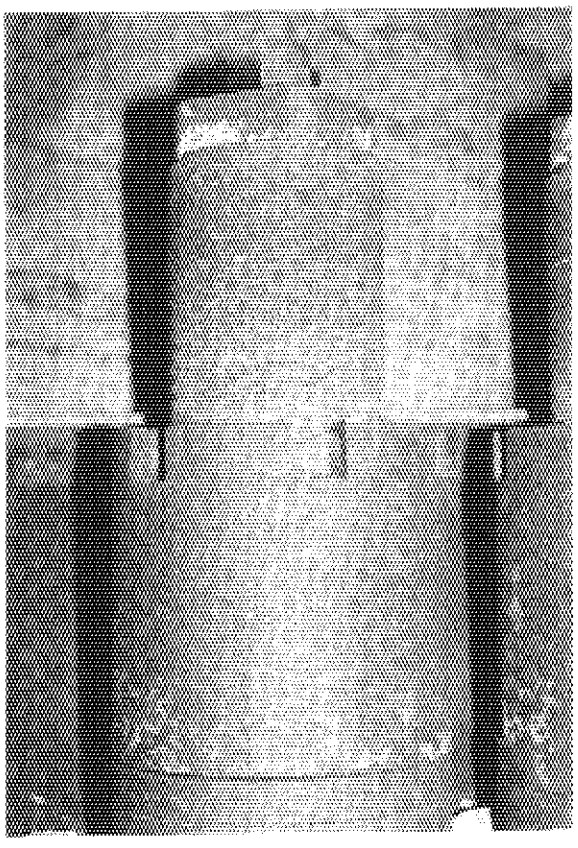


Photo 5.2 Stud bolts and nuts of upper flange.

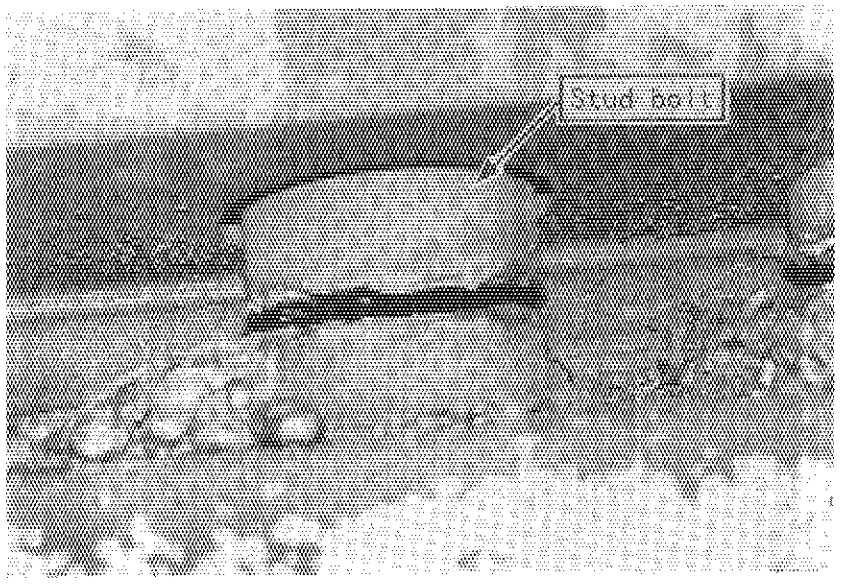



Photo 5.3 Condition of cutting stud bolts.

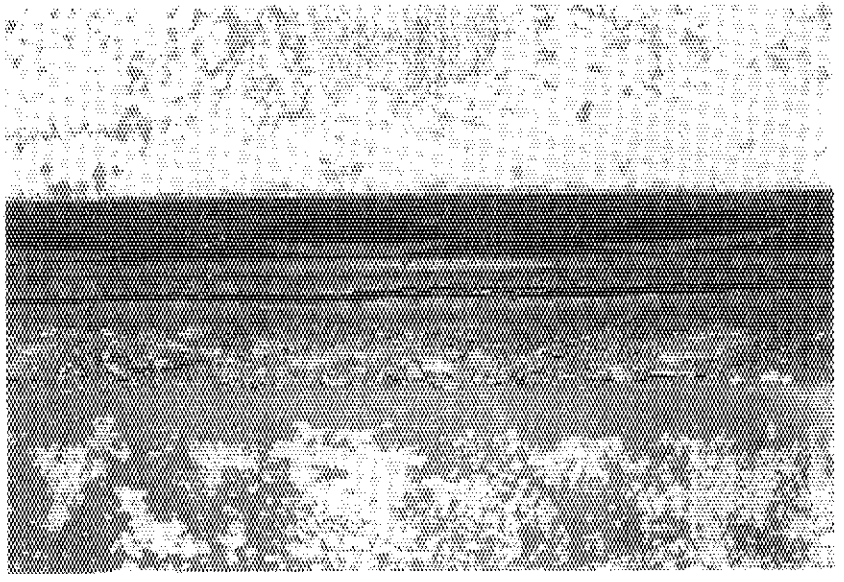



Photo 5.4 Condition of cutting Ω-seal.

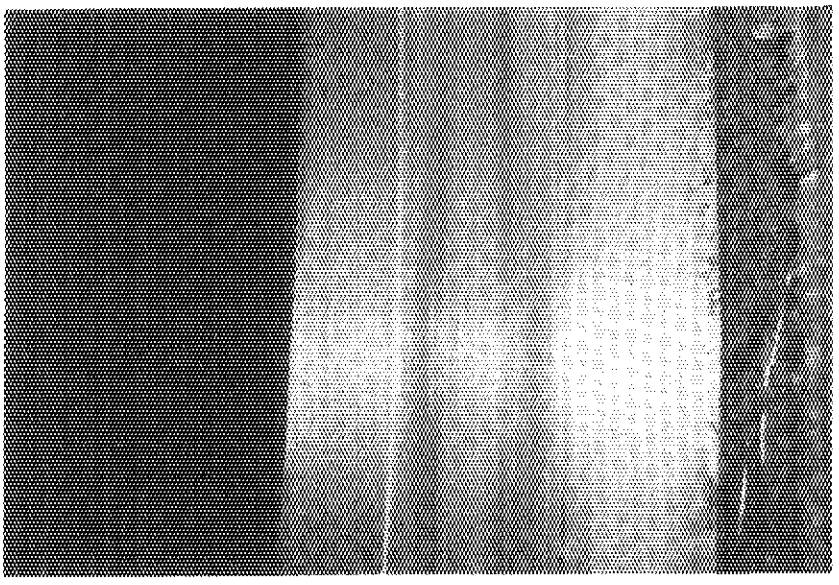


Photo 5.5 Surface of groove for O-ring of upper flange.

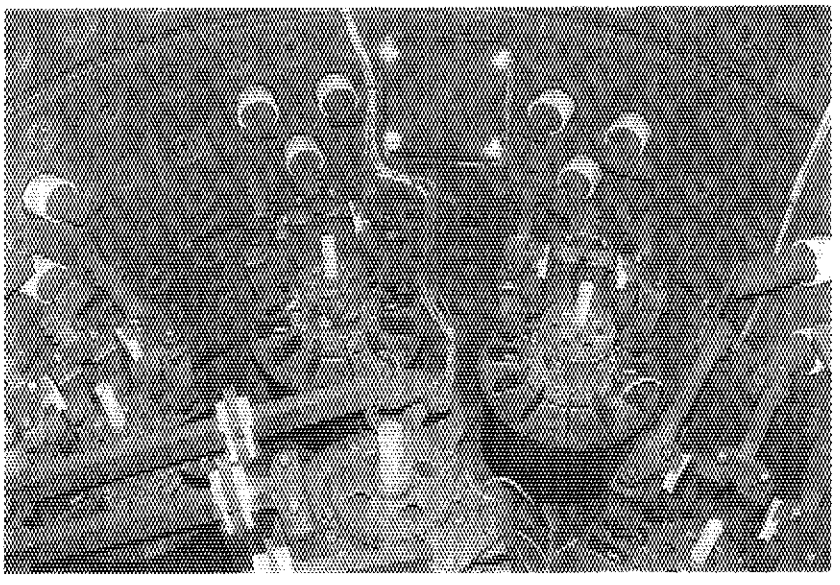


Photo 5.6 Top view of flow regulators in inner vessel.

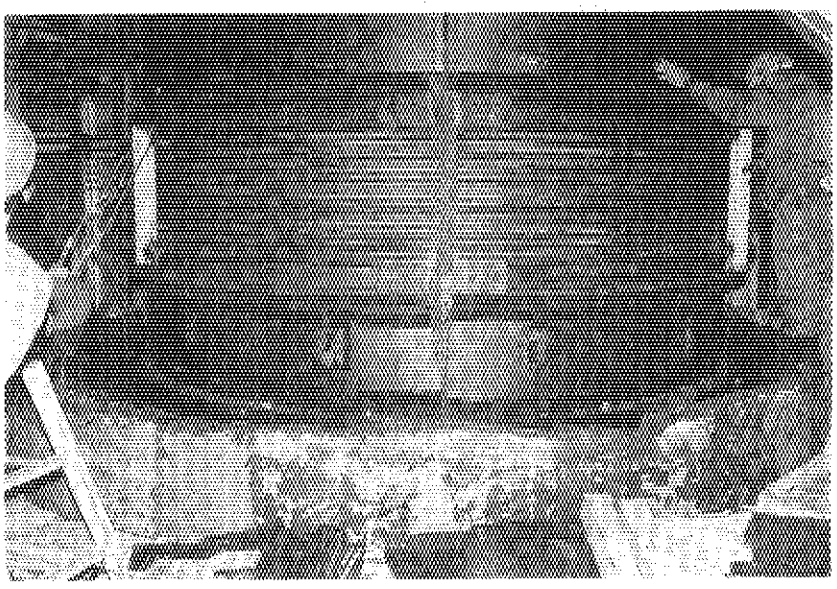


Photo 5.7 Overview of inner vessel.

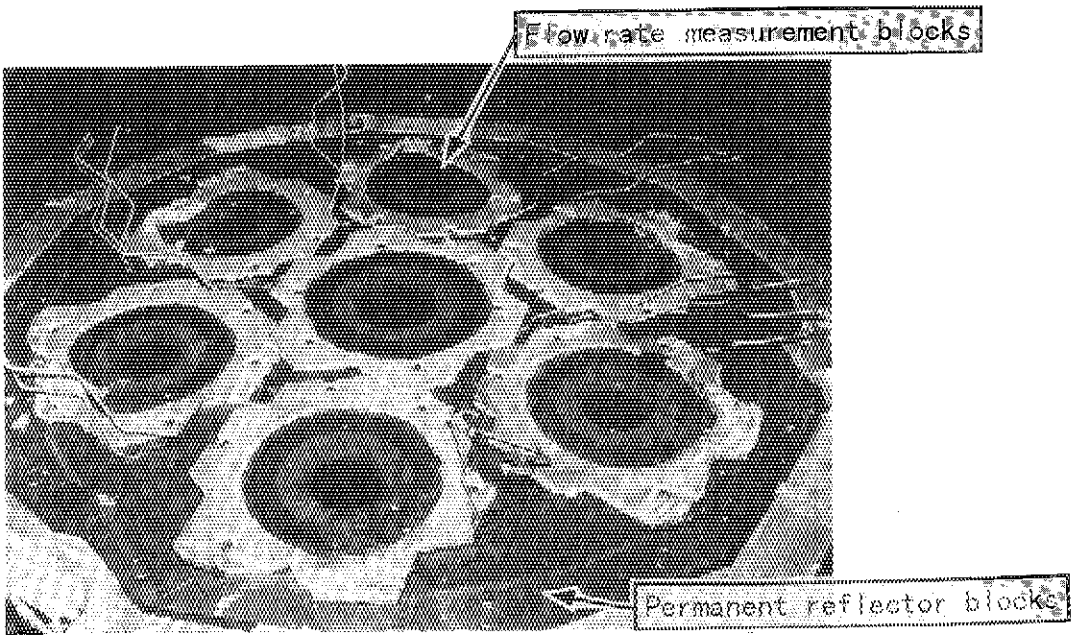



Photo 5.8 Top view of fourth-stage permanent reflector blocks and flow rate measurement blocks.

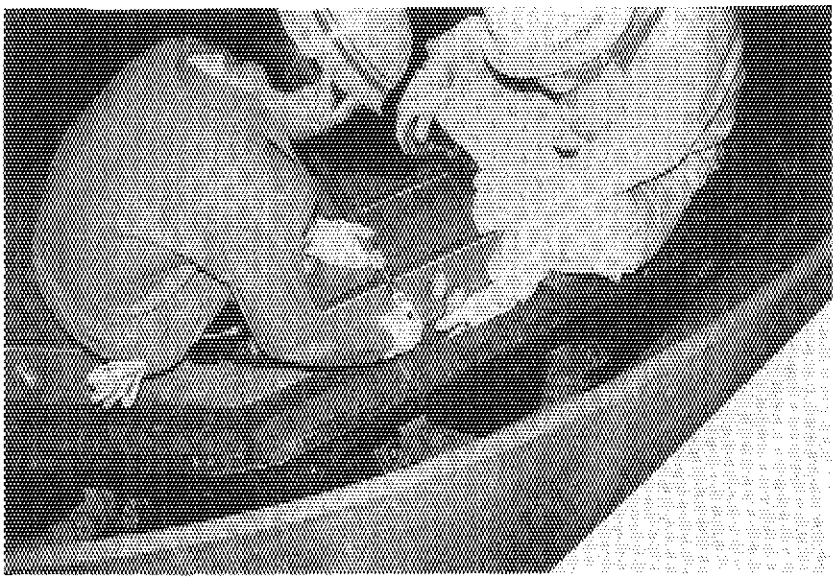


Photo 5.9 Measurement of distance between fourth-stage face-to-face permanent reflector blocks.

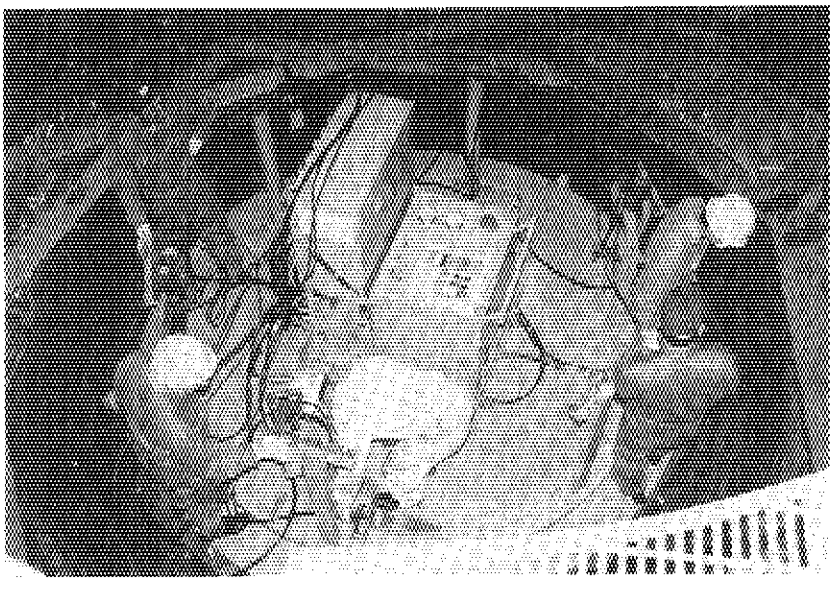


Photo 5.10 Oil pressure unit for removal of core restraint band.

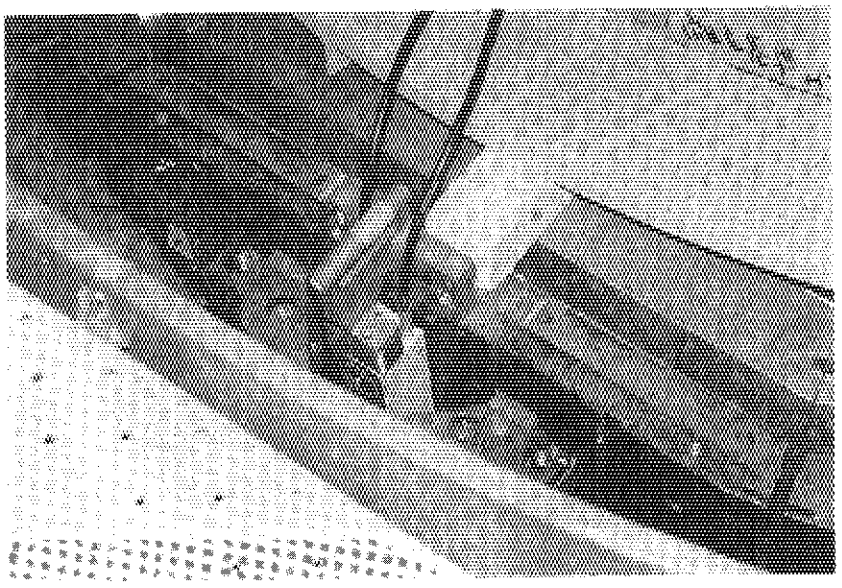


Photo 5.11 Jack part of oil pressure unit.

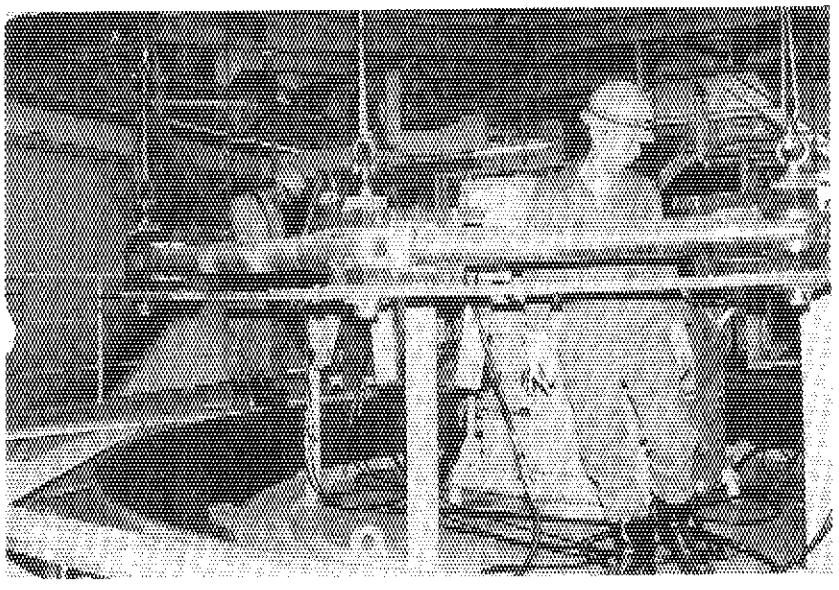


Photo 5.12 Overview of core restraint band.

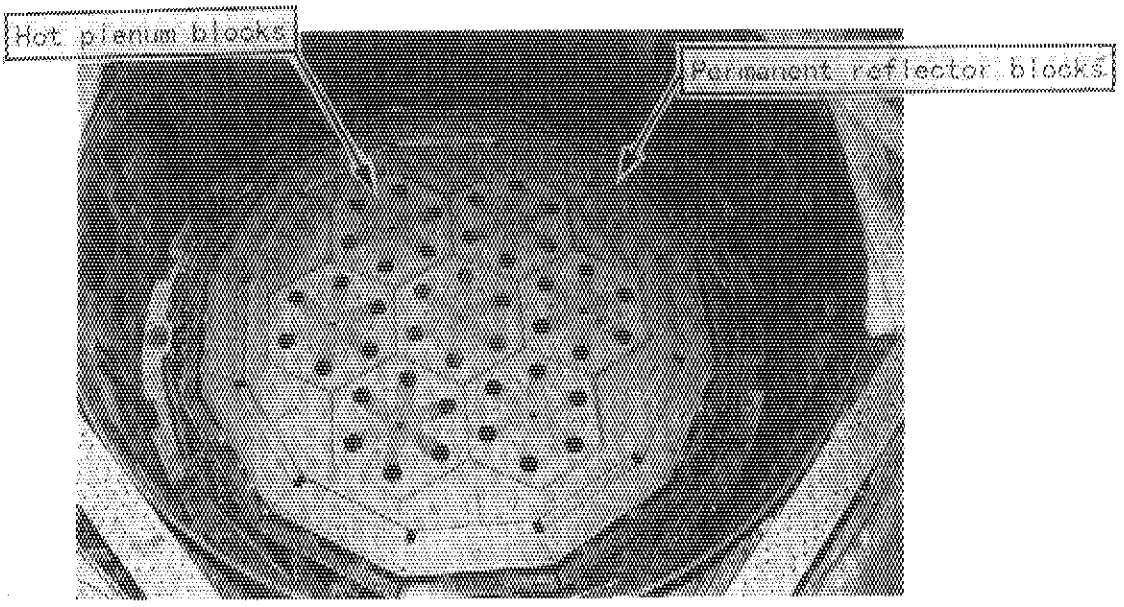



Photo 5.13 Top view of third-stage permanent reflector blocks and hot plenum blocks.

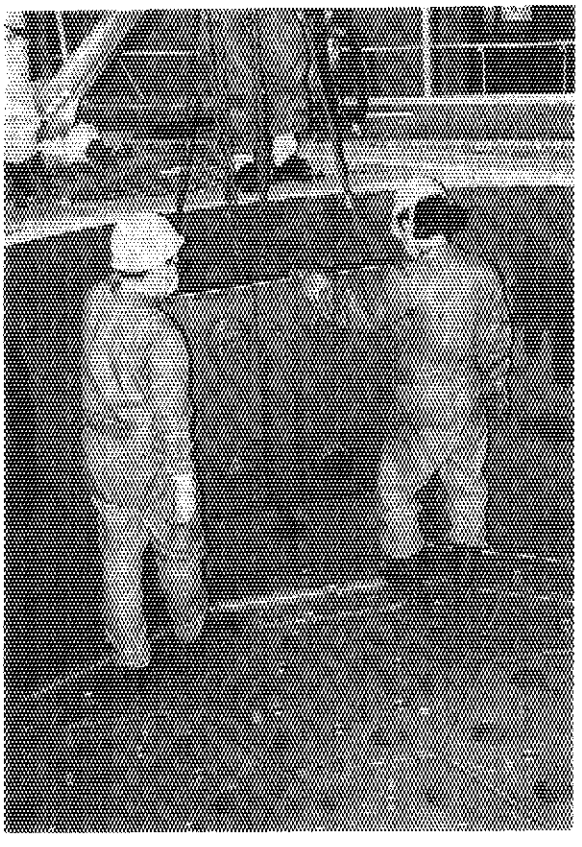


Photo 5.14 Lift of third-stage shelter panel.

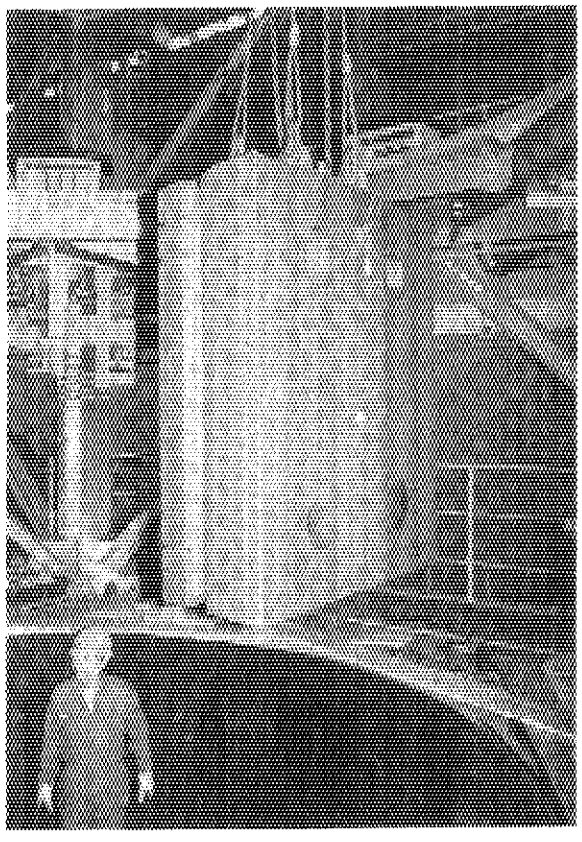


Photo 5.15 Lift of third-stage permanent reflector block.

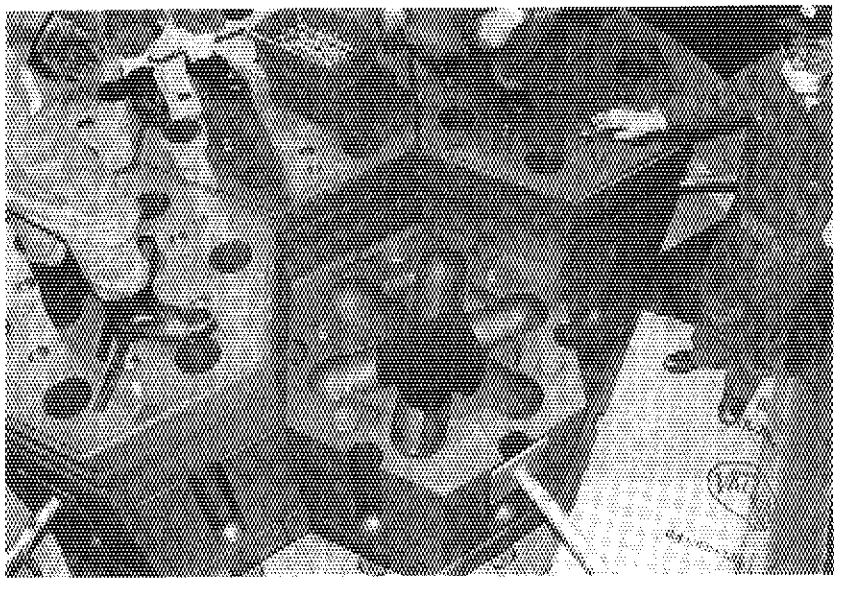


Photo 5.16 Overview of hot plenum block.

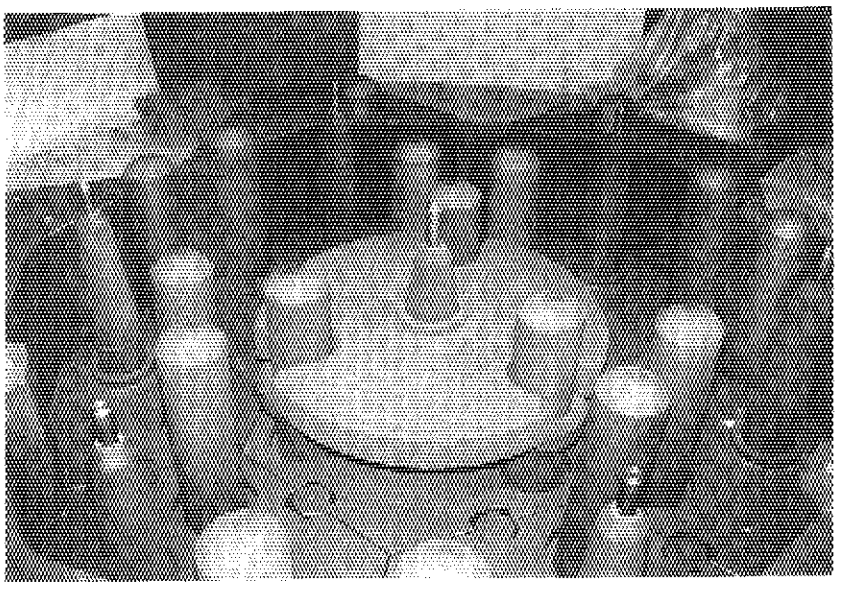


Photo 5.17 Arrangement of support posts and mixing promoter.

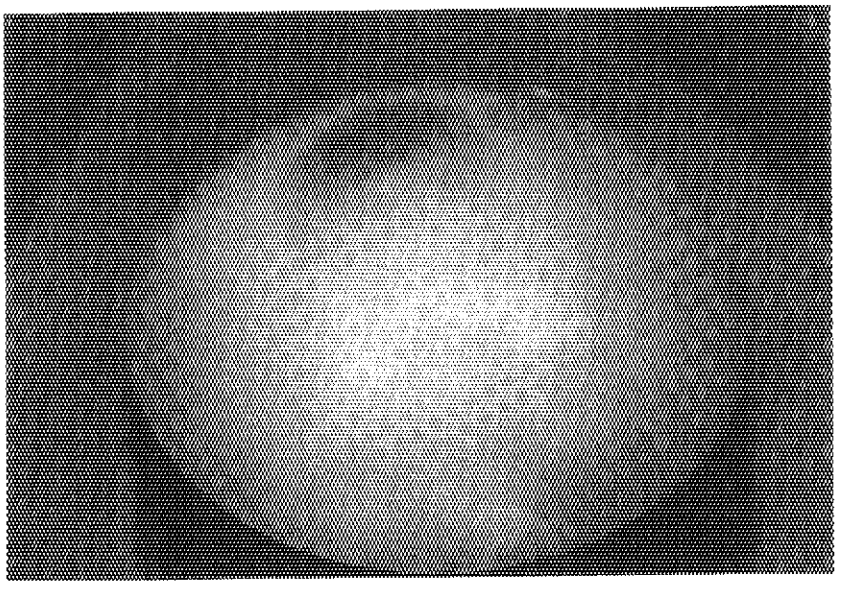


Photo 5.18 Contact surface of support post.

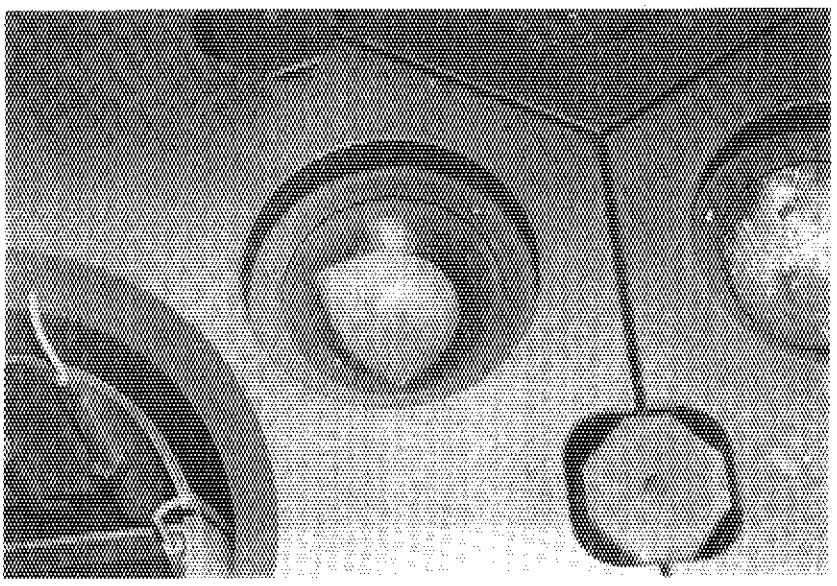


Photo 5.19 Contact surface of lower post seat.

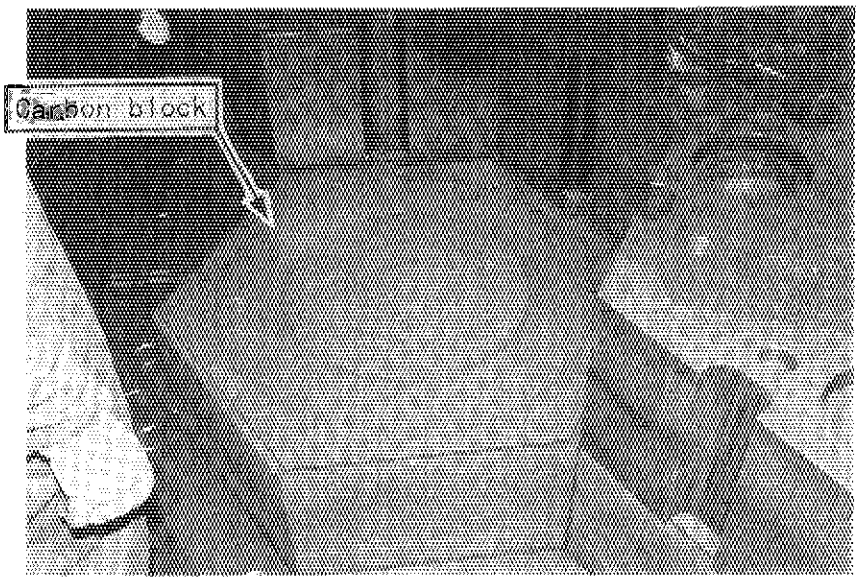



Photo 5.20 Fourth-stage carbon block. (circumferencial region)

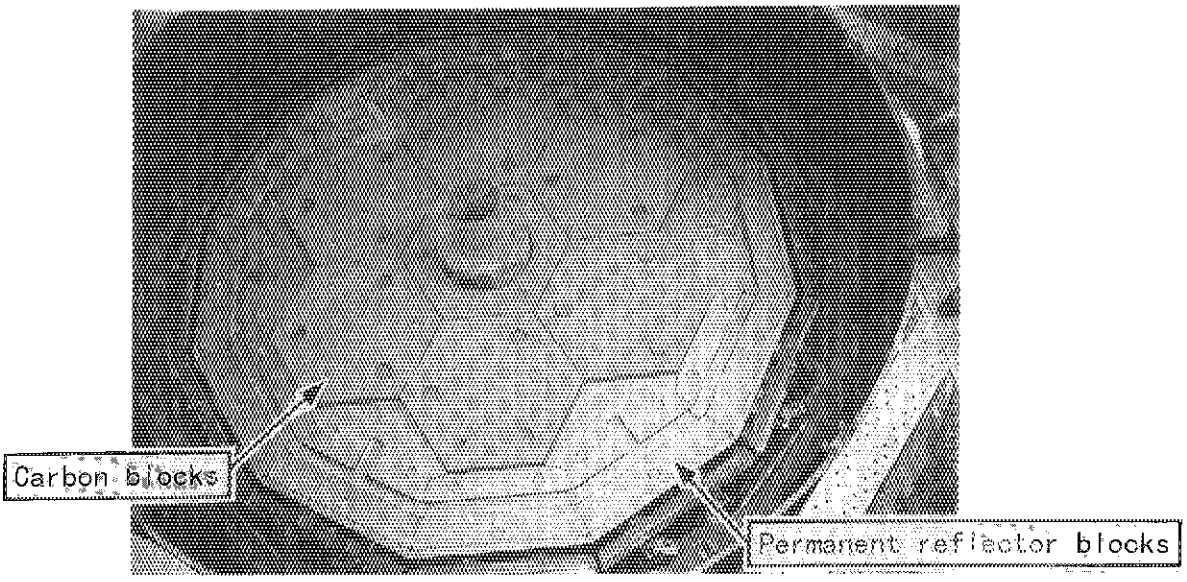



Photo 5.21 Top view of first-stage permanent reflector blocks and third-stage carbon blocks.

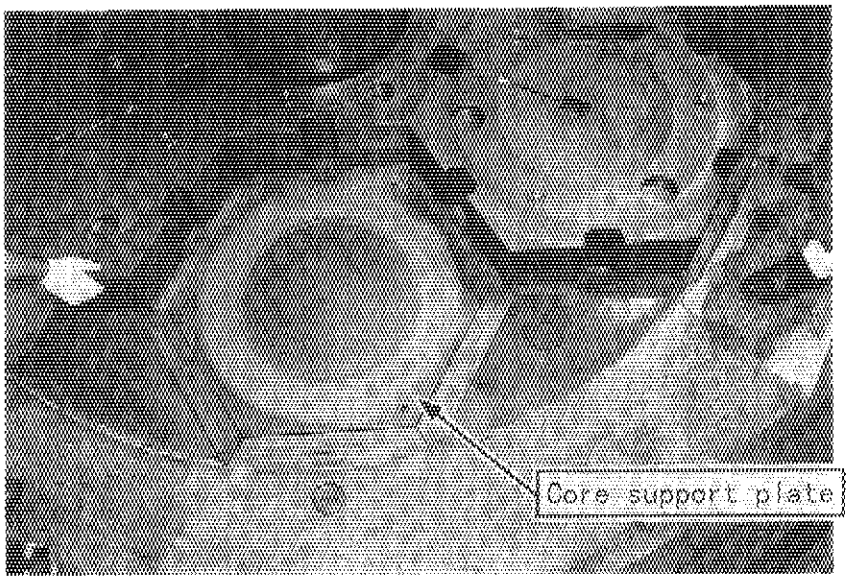



Photo 5.22 Core support plate. (circumferencial region)

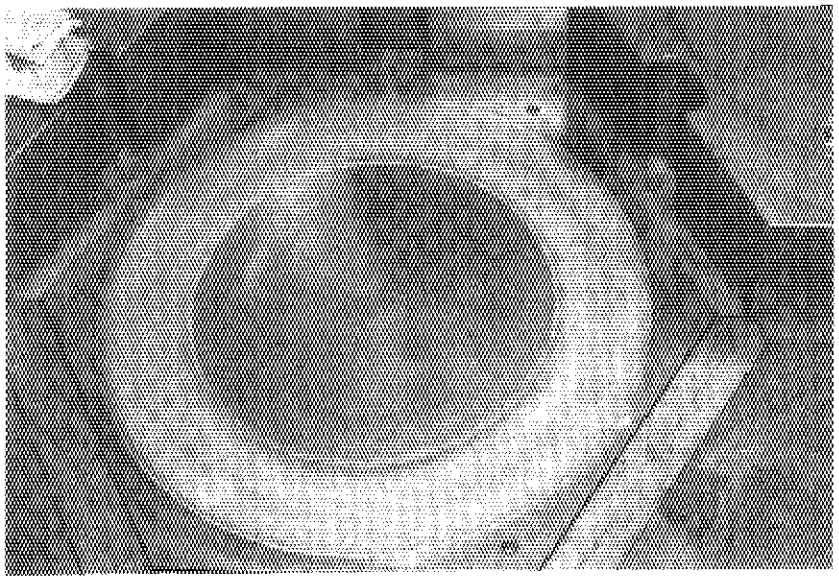


Photo 5.23 Core support plate. (circumferencial region)

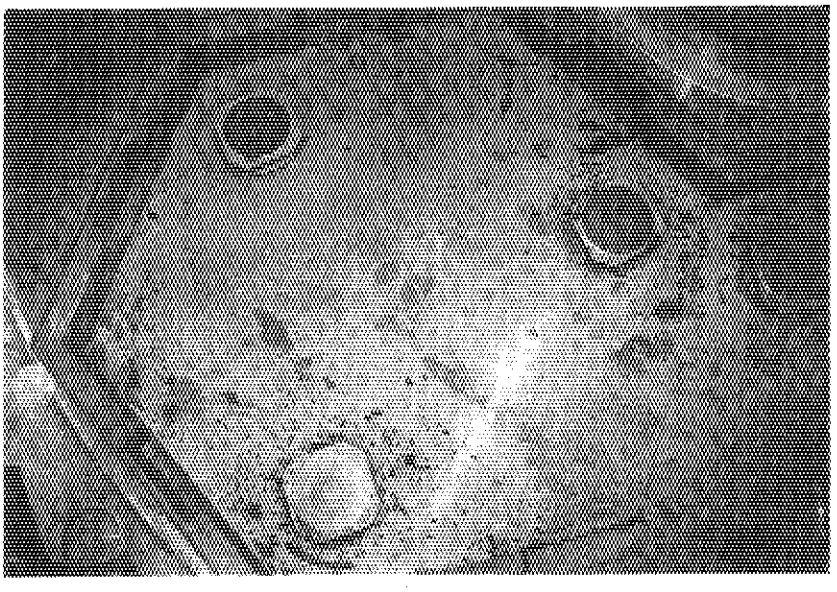


Photo 5.24 Overview of seal plate.

# 6．検査結果と考察

## 6．1 炉床部構造物

### 6．1．1 目視検査

全ての黒鉛ブロックについて割れ、欠け、ひび等の破損はなく、キーやシール片等の構造物についても破損は生じていなかった。サポートポストについては、キー結合用高温プレナムブロックを取り除いてもPhoto 5.17に示すように自立していた。また、シートと接触していた部分は、Photo 5.18に示すように接触の痕が見られ、肉眼で判断するかぎり、フレッチング（磨耗）による減りは観察されず、球面が維持されているものと考えられる。シート部の曲面も接触痕を除けば健全であった（Photo 5.19 参照）。炉心拘束機構、炉心支持板等の金属構造物についても破損はなく、炉心支持板の侵炭防止用セラミックコーテング（$ZrO_2$）部に剥離等の異常は見られなかった（Photo 5.23 参照）。

高温プレナムブロックの流路、サポートポスト表面等のヘリウムガスが流れる部分については、黒色粉末が薄く付着しているのが観測されており、この黒色粉末は磁性を有していることから、Cの他にFeが含まれているものと予想される。Cについては、ヘリウムガス中の水分による黒鉛構造物の腐食と考えられ、高温部で水蒸気との反応によりCOが発生し、このCOが低温部でBoudouard反応によりCと$CO_2$に分離したものと考えられる[9]。また、鉄が発生するメカニズムとしては、以下のことが考えられる[10]。圧力容器や内部隔壁に発生した赤さび（$Fe_2O_3$）がヘリウムガス中の不純物であるCO、$H_2$のような還元ガスと反応し$Fe_3O_4$を生成する。生成した$Fe_3O_4$は、さらにCO、$H_2$と反応して$\alpha$-Feとなり、$\alpha$-Feが吸炭反応により$Fe_3C$となる。$Fe_3C$は熱力学的に不安定であるために時間とともにFeとCに分解する。$\alpha$-Feや分解したFeは微粒子であるため、ヘリウムガス中に分散したものと考えられる。この黒色粉末については、成分分析を実施する予定である。

黒鉛ブロックの腐食については、シール用高温プレナムブロック上面の流路部で観測された。Photo 5.14で放射状に変色している部分である。サポートポストの表面に付着した黒色粉末を刷毛で取り除くと光沢面が現れるのに対し、シール用高温プレナムブロックのこの部分では黒色粉末を取り除いても光沢面が現れず、しかも他の部分と比較して変色していることから腐食が起こっていると考えられる。ただし、触れても段差を感ずる程のものではないことから、腐食は微小であると考えられる。

### 6．1．2 寸法検査

(1) 固定反射体ブロックの面間距離

第4段（最上段）、第3段、第2段の順で面間距離を測定した。その結果をTable 6.1 ～ Table 6.3に示す。なお、第1段（最下段）については、Photo 5.21に示すように中央に出口管の上部構造が突起状に固定されていることから測定ができなかった。測定結果は、設計値 3521 ± 4mm に対して＋ 1.1 ～－ 0.8mm のバラツキであり、据付時の面間距離に対しての変化量も＋ 0.62 ～－ 0.18mm と微小であり、固定反射体ブロックの配列は正常に維持されていると考えられる。

(2) シール用高温ブロック上面における隣接したブロック間での段差

測定結果を Table 6.4 に示す。表の下図が測定位置を示したものであり、矢印は据付時における隣接した黒鉛ブロック間の段差の高低関係を示す。また、表中の解体時におけるマイナス値は、据付時に比較して高低が逆になっていることを表している。測定結果で0は、最小板厚の隙間ゲージ（0.03mm）が挿入できなかった段差を示している。測定結果は、設計許容段差 1.8mm に対して 0.7mm 以下であり、また、据付時の段差 0.8mm に対してほとんど差が見られないことから、健全性は確保されていると考えられる。

(3) 炉心支持板上面の水平度

Table 6.5 に水平度の測定結果を示すしたもので、傾斜の度合を底辺１ｍに対する高さを mm で表している。表の下図が測定位置を示したものであり、矢印は据付時における炉心支持板の水平度の高低関係を示す。また、表中の解体時におけるマイナス値は、据付時に比較して高低が逆になっていることを表している。測定結果は、設計許容値 0.67mm に対して 0.08mm 以下であり、また、据付時の水平度に対してほとんど差が見られないことから、炉床部構造物を水平に支持するという炉心支持板の機能は確保されていたと考えられる。

(4) 固定反射体ブロック間の隙間

第４段から第１段までの隙間の測定値を Table 6.6 ～ Table 6.9 に示す。隙間は、隙間ゲージで測定しており、最小肉厚（0.03mm）の隙間ゲージが挿入できない場合には、隙間を 0 と表示した。表に示すように、供用前後での隙間はともに 0.03mm 以下であり、低温ヘリウムガスの漏えいを増加させるような固定反射体間のギャップの拡がりは生じていなかったと考えられる。

### ６．１．３ 炉心拘束バンドの締付力の測定

第６層～第３層の炉心拘束バンドの締付力の測定結果を Table 6.10 ～ 6.13 に示す。全ての炉心拘束バンドにおいて、締付力は据付時に比較して低下しており、しかも周方向の締付力のバラツキが大きくなっている。第６層では据付時の締付力に対して平均で約 23 ％の減少であり、周方向の締付力のバラツキは平均値に対して－ 6.7 ～＋ 9.1 ％である。同様に、第５層では据付時の締付力に対して平均で約 19 ％の減少、周方向のバラツキは平均値に対して－ 5.6 ～＋ 12.6 ％、第４層では据付時の締付力に対して平均で約 20 ％の減少、周方向のバラツキが平均値に対して－ 9.9 ～＋ 14.8 ％、第３層では据付時の締付力に対して平均で約 22 ％の減少、周方向のバラツキが平均値に対して－ 8.1 ～＋ 4.7 ％となっている。

炉心拘束バンドは、引張力がかかった状態で約 400 ℃の温度雰囲気にさらされたことから、この締付力低下の原因として、部材（SUH 616）のリラクセーションが考えられるが、リラクセーションの評価については、炉心拘束バンドの設計手法の妥当性を検証するため、Table 3.3 に示す温度履歴を基に数値解析による検討を進めている。また、数値解析によりリラクセーションの影響が確認された場合には、部材のクリープ試験についても実施する計画である。

炉心拘束バンドの締付力の低下は生じていたが、６．１.２項に述べた寸法検査により、固定反射体ブロック間の隙間に異常が認められないことから、固定反射体ブロックの低温ヘリウムガスの漏えいに対するシール機能は確保されていると考えられる。

## ６．２　圧力容器

圧力容器については目視検査のみを行った。容器の外面は耐熱塗料がはがれた個所にさびが見られたが、さびの厚さは薄く強度的な支障にはならないものであった。上部フランジの植込ボルトとナットは耐熱塗料が塗られてないため、さびが全面に出ていた（Photo 5.2 参照）。容器の内面は全般的に黒みがかったさびが観察された。ただし、上部フランジのＯリングが挿入された面にはさびは観察されず、据え付け時の機械加工面をそのまま保持していた（Photo 5.5 参照）。Ｏリングは２本挿入されたが、Ｏリングの表面は銀メッキのはく離等の不具合は観察されなかった。

Table 6.1 Distance between fourth-stage face-to-face permanent reflector blocks.

単位 mm

| 測定箇所 | 第4段 固定反射体 面間寸法 (A1) | | | 備 考 |
|---|---|---|---|---|
| 測定寸法 | 設計許容寸法：3521±4 | | | |
| | 据付時 | 解体時 | 変化量 | |
| 0° - 180° | 3520.83 | 3520.75 | -0.08 | |
| 30° 210° | 3521.15 | 3521.20 | +0.05 | |
| 60° - 240° | 3520.51 | 3520.80 | +0.29 | |
| 90° - 270° | 3521.38 | 3521.20 | -0.18 | |
| 120° - 300° | 3520.43 | 3520.70 | +0.27 | |
| 150° - 330° | 3521.35 | 3521.60 | +0.25 | |
| 寸法バラツキ | 3521 +0.38 -0.57 | 3521 +0.60 -0.30 | — | |

検査器具：インサイドマイクロメータ
注 1) 変化量＝(解体時の寸法)－(据付時の寸法)

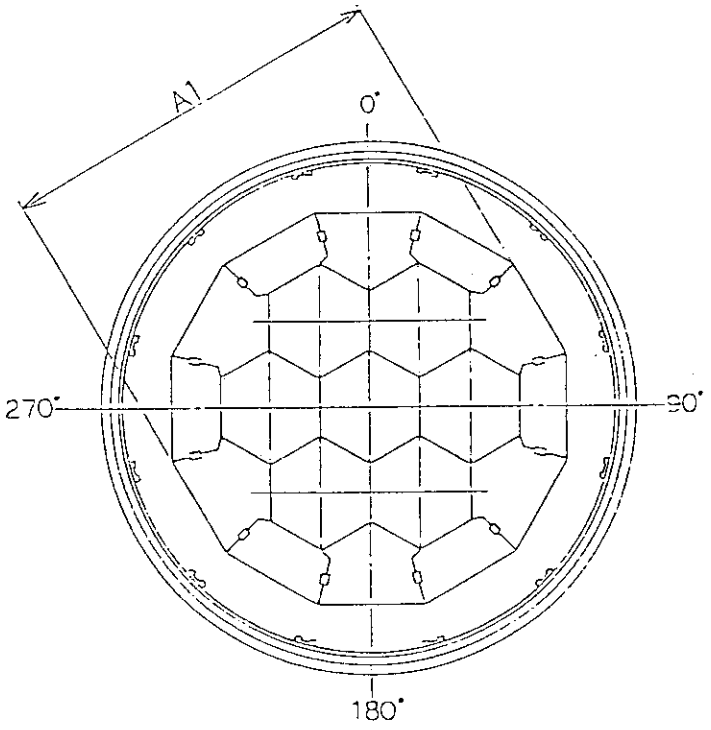


Table 6.2 Distance between third-stage face-to-face permanent reflector blocks.

単位 mm

| 測定箇所 | 第３段 固定反射体 面間寸法（Ｅ１） | | | 備　考 |
|---|---|---|---|---|
| 測定寸法 | 設計許容寸法：3521±4 | | | |
| | 据付時 | 解体時 | 変化量 | |
| 0° - 180° | 3520.90 | 3521.40 | -0.50 | |
| 30° - 210° | 3521.00 | 3521.60 | +0.60 | |
| 60° - 240° | 3520.78 | 3521.40 | +0.62 | |
| 90° - 270° | 3521.45 | 3521.80 | +0.35 | |
| 120° - 300° | 3520.90 | 3521.40 | +0.50 | |
| 150° - 330° | 3521.87 | 3522.10 | +0.23 | |
| 寸法バラツキ | 3521 +0.87 -0.22 | 3521 +1.10 +0.40 | － | |

検査器具：インサイドマイクロメータ
注 1） 変化量＝(解体時の寸法)－(据付時の寸法)

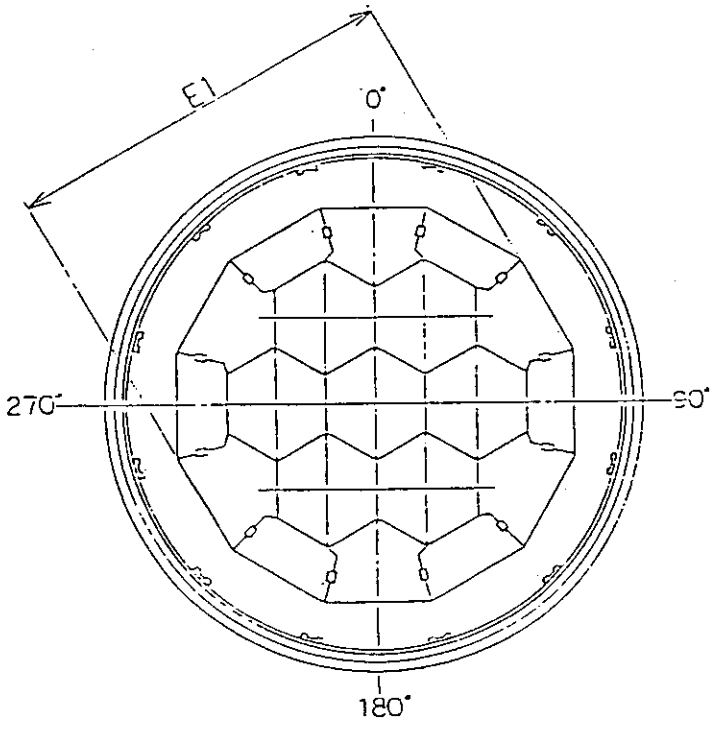


Table 6.3 Distance between second-stage face-to-face permanent reflector blocks.

単位 mm

| 測定箇所 | 第２段 固定反射体 面間寸法（Ｄ１） | | | 備　考 |
|---|---|---|---|---|
| 測定寸法 | 設計許容寸法：3521±4 | | | |
| | 据付時 | 解体時 | 変化量 | |
| 0° - 180° | 3520.82 | 3521.10 | +0.28 | |
| 30° - 210° | 3521.15 | 3521.40 | +0.25 | |
| 60° - 240° | 3520.72 | 3520.80 | +0.08 | |
| 90° - 270° | 3520.25 | 3520.20 | -0.05 | |
| 120° - 300° | 3520.00 | 3520.30 | +0.30 | |
| 150° - 330° | 3521.07 | 3521.20 | +0.13 | |
| 寸法バラツキ | 3521 +0.15 -1.00 | 3521 +0.40 -0.80 | -- | |

検査器具：インサイドマイクロメータ
注 1） 変化量＝(解体時の寸法)－(据付時の寸法)

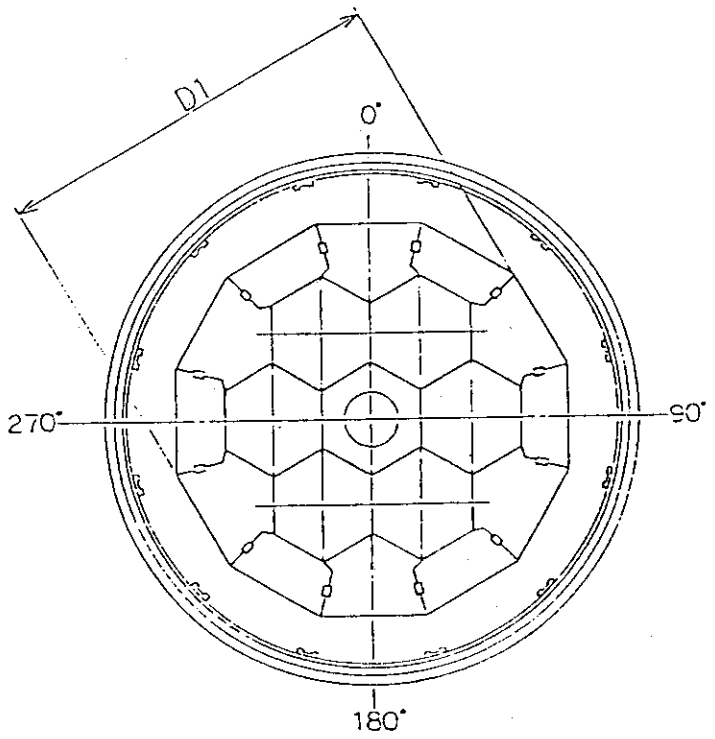


Table 6.4 Level difference among adjacent hot plenum blocks.

単位 mm

| 測定箇所 | シール用高温プレナムブロック間段差(E9) | | | 備考 |
|---|---|---|---|---|
| 測定寸法 | 設計許容段差：1.8 | | | 参考値 |
| (1～15) | 据付時 | 解体時 | 変化量 | |
| 1 | 0 | 0.06 | 0.06 | |
| 2 | 0.20 | 0.30 | 0.10 | |
| 3 | 0.10 | -0.10 | 0.20 | |
| 4 | 0.10 | 0.20 | 0.10 | |
| 5 | 0 | 0.08 | 0.08 | |
| 6 | 0 | 0.15 | 0.15 | |
| 7 | 0.20 | 0.09 | 0.11 | |
| 8 | 0.60 | 0.50 | 0.10 | |
| 9 | 0.20 | 0.25 | 0.05 | |
| 10 | 0.15 | 0.08 | 0.07 | |
| 11 | 0 | 0.04 | 0.04 | |
| 12 | 0.10 | 0.15 | 0.05 | |
| 13 | 0.40 | 0.15 | 0.25 | |
| 14 | 0.45 | -0.03 | 0.48 | |
| 15 | 0.20 | -0.03 | 0.23 | |

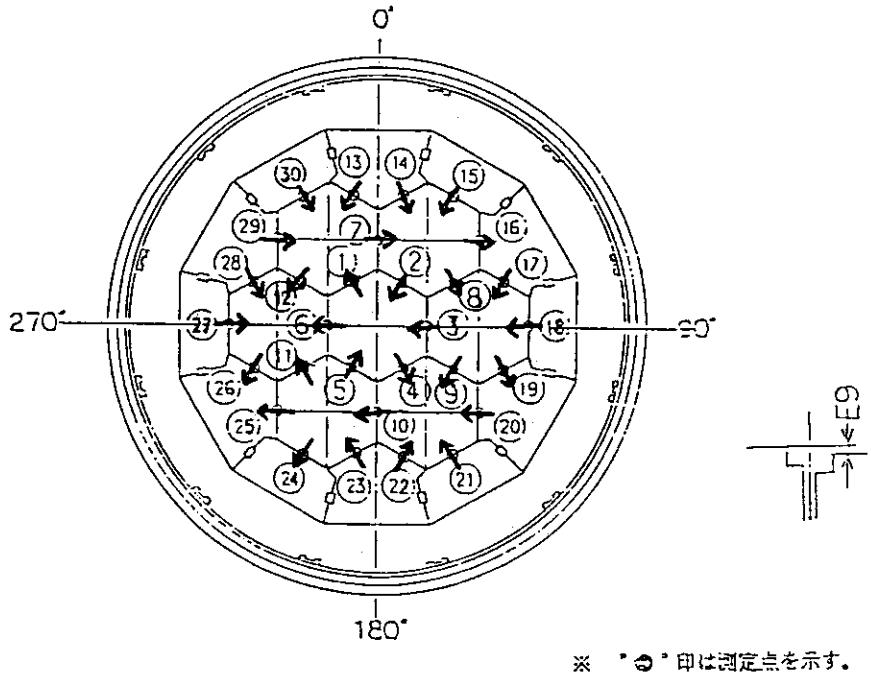
| 測定箇所 | シール用高温プレナムブロック間段差(E9) | | | 備考 |
|---|---|---|---|---|
| 測定寸法 | 設計許容段差：1.8 | | | 参考値 |
| (16～30) | 据付時 | 解体時 | 変化量 | |
| 16 | 0.10 | 0.20 | 0.10 | |
| 17 | 0.30 | 0.05 | 0.25 | |
| 18 | 0.10 | 0 | 0.10 | |
| 19 | 0.10 | 0.40 | 0.30 | |
| 20 | 0.10 | 0 | 0.10 | |
| 21 | 0.10 | -0.20 | 0.30 | |
| 22 | 0.50 | 0.04 | 0.46 | |
| 23 | 0.80 | 0.45 | 0.35 | |
| 24 | 0 | 0.20 | 0.20 | |
| 25 | 0.30 | 0.30 | 0 | |
| 26 | 0.10 | 0.15 | 0.05 | |
| 27 | 0.10 | -0.15 | 0.25 | |
| 28 | 0.40 | 0 | 0.40 | |
| 29 | 0.40 | 0.20 | 0.20 | |
| 30 | 0.20 | 0.35 | 0.15 | |
| 段差バラツキ | 0-0.80<br>-0.00 | 0+0.50<br>-0.20 | | |

検査器具：すきまゲージ、ストレートエッジ

注 1） 据付時における段差の方向は、下図における矢印で示しており、高←低 の方向となる。また、解体時におけるマイナス(-)の値は、高低の方向が据付時の逆であることを示している。

注 2） 変化量＝|(解体時の寸法)－(据付時の寸法)|

注 3） 3/100mm厚ゲージが入らない場合、0(ゼロ)とした。




※ "◎" 印は測定点を示す。

Table 6.5 Levelness of core support plates.

単位 mm

| 測定箇所 | 炉心支持板上面水平度 | | | 備　考 |
|---|---|---|---|---|
| 測定寸法 | 設計許容水平度：0.67 | | | |
| (1～19) | 据付時 | 解体時 | 変化量 | |
| 1 | 0.04 | 0.01 | 0.03 | |
| 2 | 0.03 | 0 | 0.03 | |
| 3 | 0.04 | 0 | 0.04 | |
| 4 | 0.08 | 0.04 | 0.04 | |
| 5 | 0.20 | 0.03 | 0.17 | |
| 6 | 0.04 | -0.02 | 0.06 | |
| 7 | 0.14 | 0.06 | 0.08 | |
| 8 | 0.16 | 0.06 | 0.10 | |
| 9 | 0.12 | 0.03 | 0.09 | |
| 10 | 0.04 | 0.04 | 0 | |
| 11 | 0.03 | 0.05 | 0.02 | |
| 12 | 0.01 | -0.01 | 0.02 | |
| 13 | 0.07 | -0.01 | 0.08 | |
| 14 | 0.02 | 0.03 | 0.01 | |
| 15 | 0 | 0 | 0 | |
| 16 | 0.14 | 0.02 | 0.12 | |
| 17 | 0.14 | 0.05 | 0.09 | |
| 18 | 0.06 | -0.02 | 0.08 | |
| 19 | 0.05 | 0.05 | 0 | |

| 測定箇所 | 炉心支持板上面水平度 | | | 備　考 |
|---|---|---|---|---|
| 測定寸法 | 設計許容水平度：0.67 | | | |
| (20～37) | 据付時 | 解体時 | 変化量 | |
| 20 | 0.01 | -0.02 | 0.03 | |
| 21 | 0.10 | 0.04 | 0.06 | |
| 22 | 0.06 | 0.02 | 0.04 | |
| 23 | 0.16 | 0.03 | 0.13 | |
| 24 | 0.05 | -0.04 | 0.09 | |
| 25 | 0.08 | 0.02 | 0.06 | |
| 26 | 0.14 | -0.04 | 0.18 | |
| 27 | 0.12 | 0.03 | 0.09 | |
| 28 | 0.20 | 0.07 | 0.13 | |
| 29 | 0.02 | 0.04 | 0.02 | |
| 30 | 0.04 | -0.08 | 0.12 | |
| 31 | 0.14 | 0.04 | 0.10 | |
| 32 | 0.14 | 0.06 | 0.08 | |
| 33 | 0.02 | 0.03 | 0.01 | |
| 34 | 0.13 | 0.04 | 0.09 | |
| 35 | 0.06 | 0.04 | 0.02 | |
| 36 | 0.20 | -0.04 | 0.24 | |
| 37 | 0.08 | -0.03 | 0.11 | |
| | | | | |
| 水平度<br>バラツキ | 0-0.20<br>-0.00 | 0+0.07<br>-0.08 | — | |

検査器具：水準器、ストレートエッジ

注　1）　水平度（傾き）は、1mあたりの高さの変位量をmmで示した。

注　2）　据付時における傾きの方向は、下図の三角記号で示しており、高◺低 の方向となる。また、解体時におけるマイナス(-)の値は、高低の方向が据付時の逆であることを示している。

注　3）　変化量＝|(解体時の寸法)－(据付時の寸法)|

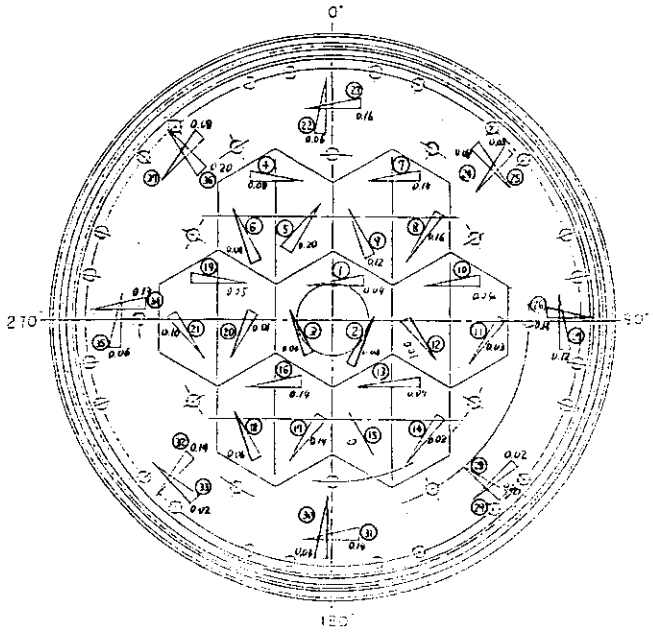


Table 6.6 Gap of adjacent fourth-stage permanent reflector blocks.

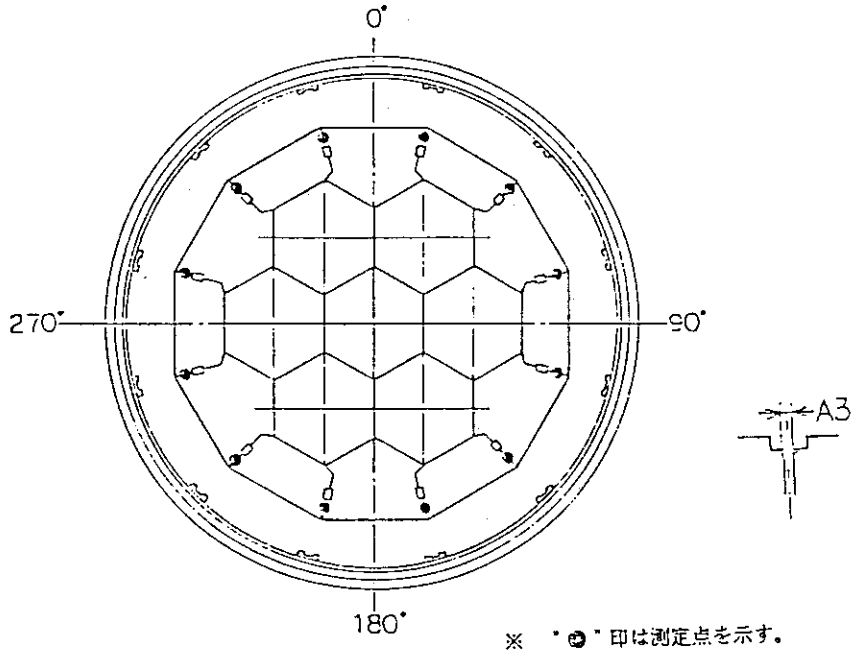
単位 mm

| 測定箇所 | 第４段 固定反射体間ギャップ（Ａ３） | | | 備　考 |
|---|---|---|---|---|
| 測定寸法 | 設計許容寸法：0.2 | | | |
| | 据付時 | 解体時 | 変化量 | |
| 15° | 0 | 0 | 0 | |
| 45° | 0 | 0 | 0 | |
| 75° | 0 | 0 | 0 | |
| 105° | 0 | 0 | 0 | |
| 135° | 0 | 0 | 0 | |
| 165° | 0 | 0 | 0 | |
| 195° | 0 | 0 | 0 | |
| 225° | 0 | 0 | 0 | |
| 255° | 0 | 0 | 0 | |
| 285° | 0 | 0 | 0 | |
| 315° | 0 | 0 | 0 | |
| 345° | 0 | 0 | 0 | |

検査器具：すきまゲージ

注　１）　変化量＝（解体時の寸法）－（据付時の寸法）

注　２）　3/100mm厚ゲージが入らない場合、0(ゼロ)とした。



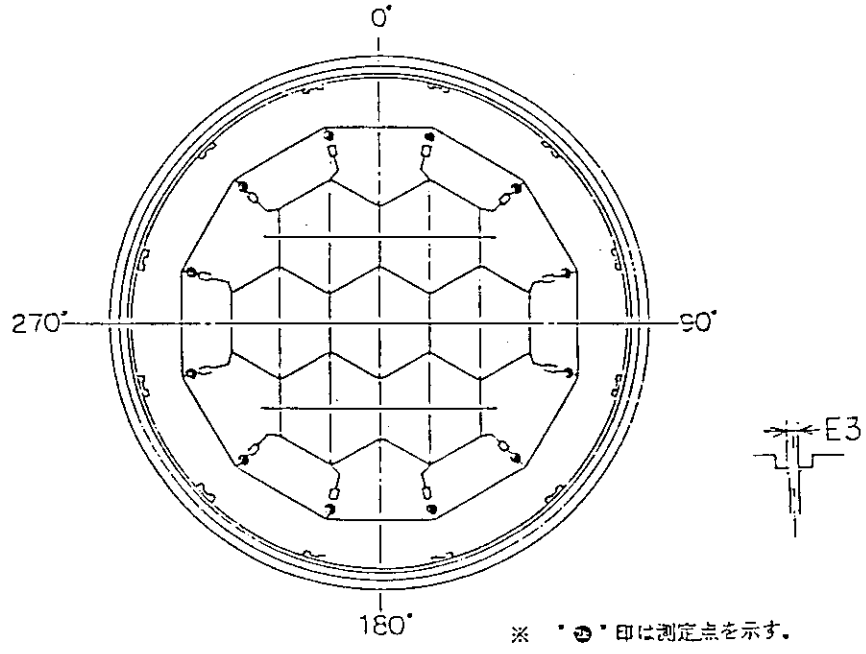

※　"●"印は測定点を示す。

Table 6.7 Gap of adjacent third-stage permanent reflector blocks.

単位 mm

| 測定箇所 | 第３段 固定反射体間ギャップ（Ｅ３） | | | 備　考 |
|---|---|---|---|---|
| 測定寸法 | 設計許容寸法：0.2 | | | |
| | 据付時 | 解体時 | 変化量 | |
| 15° | 0 | 0 | 0 | |
| 45° | 0 | 0 | 0 | |
| 75° | 0 | 0 | 0 | |
| 105° | 0 | 0 | 0 | |
| 135° | 0 | 0 | 0 | |
| 165° | 0 | 0 | 0 | |
| 195° | 0 | 0 | 0 | |
| 225° | 0 | 0 | 0 | |
| 255° | 0 | 0 | 0 | |
| 285° | 0 | 0 | 0 | |
| 315° | 0 | 0 | 0 | |
| 345° | 0 | 0 | 0 | |

検査器具：すきまゲージ
注 １） 変化量＝(解体時の寸法)－(据付時の寸法)
注 ２） 3/100mm厚ゲージが入らない場合、0(ゼロ)とした。



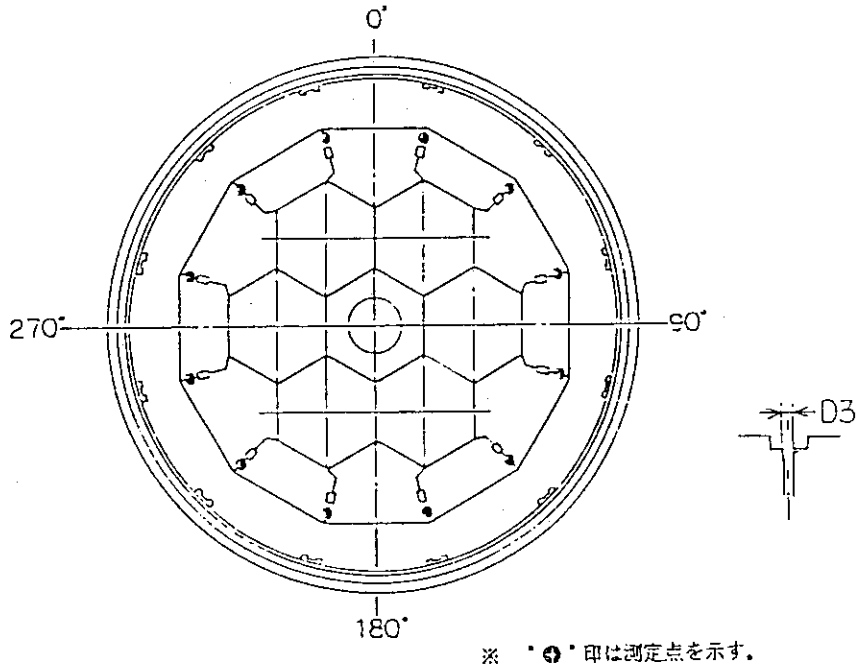

※ "◎" 印は測定点を示す。

Table 6.8 Gap of adjacent second-stage permanent reflector blocks.

単位 mm

| 測定箇所 | 第２段 固定反射体間ギャップ（Ｄ３） | | | 備　考 |
|---|---|---|---|---|
| 測定寸法 | 設計許容寸法：0.2 | | | |
| | 据付時 | 解体時 | 変化量 | |
| 15° | 0 | 0 | 0 | |
| 45° | 0 | 0 | 0 | |
| 75° | 0 | 0 | 0 | |
| 105° | 0 | 0 | 0 | |
| 135° | 0 | 0 | 0 | |
| 165° | 0 | 0 | 0 | |
| 195° | 0 | 0 | 0 | |
| 225° | 0 | 0 | 0 | |
| 255° | 0 | 0 | 0 | |
| 285° | 0 | 0 | 0 | |
| 315° | 0 | 0 | 0 | |
| 345° | 0 | 0 | 0 | |

検査器具：すきまゲージ
注　１）　変化量＝(解体時の寸法)－(据付時の寸法)
注　２）　3/100mm厚ゲージが入らない場合、0(ゼロ)とした。



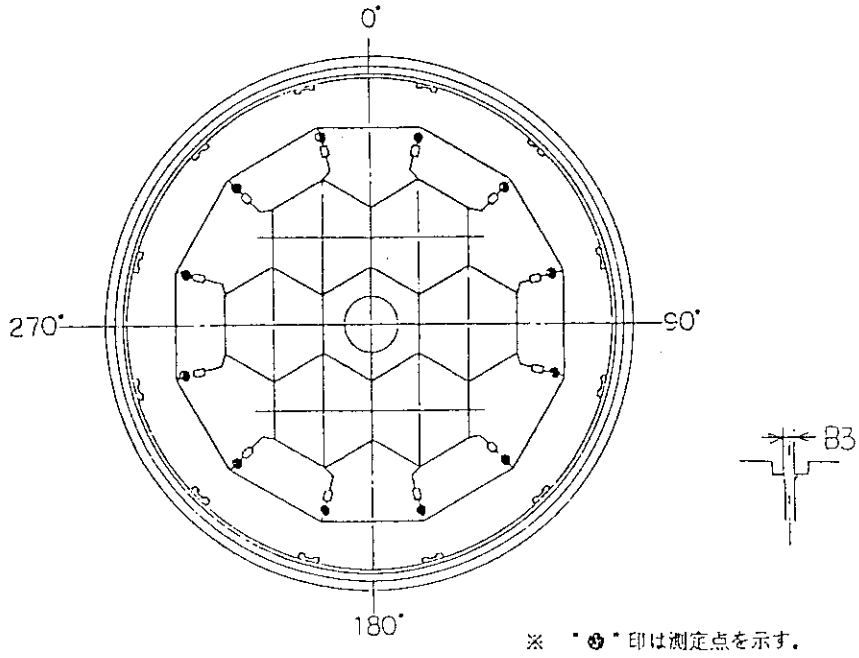

※　"●"印は測定点を示す。

Table 6.9 Gap of adjacent first-stage permanent reflector blocks.

単位 mm

| 測定箇所 | 第１段 固定反射体間ギャップ（Ｂ３） | | | 備　考 |
|---|---|---|---|---|
| 測定寸法 | 設計許容寸法：0.2 | | | |
| | 据付時 | 解体時 | 変化量 | |
| 15° | 0 | 0 | 0 | |
| 45° | 0 | 0 | 0 | |
| 75° | 0 | 0 | 0 | |
| 105° | 0 | 0 | 0 | |
| 135° | 0 | 0 | 0 | |
| 165° | 0 | 0 | 0 | |
| 195° | 0 | 0 | 0 | |
| 225° | 0 | 0 | 0 | |
| 255° | 0 | 0 | 0 | |
| 285° | 0 | 0 | 0 | |
| 315° | 0 | 0 | 0 | |
| 345° | 0 | 0 | 0 | |

検査器具：すきまゲージ
注 １） 変化量＝(解体時の寸法)－(据付時の寸法)
注 ２） 3/100mm厚ゲージが入らない場合、0(ゼロ)とした。




※ "⊗" 印は測定点を示す。

Table 6.10 Restraint force of sixth-stage core restraint bands.

単位 ton

| 固定反射体 第3段 上層（第6層）拘束機構締付力 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 据付時 | 解体時 | 変化量 | 備　考 |
| 0° | 2.853 | 2.205 | -0.648 | |
| 30° | 2.889 | 2.374 | -0.515 | |
| 60° | 2.870 | 2.455 | -0.415 | |
| 90° | 2.915 | 2.337 | -0.578 | |
| 120° | 2.928 | 2.269 | -0.659 | |
| 150° | 2.983 | 2.295 | -0.688 | |
| 180° | 2.931 | 2.173 | -0.758 | |
| 210° | 2.924 | 2.103 | -0.821 | |
| 240° | 3.008 | 2.198 | -0.810 | |
| 270° | 2.883 | 2.257 | -0.626 | |
| 300° | 2.919 | 2.099 | -0.820 | |
| 330° | 2.914 | 2.230 | -0.684 | |
| 全周平均 | 2.918 | 2.250 | -0.669 | |

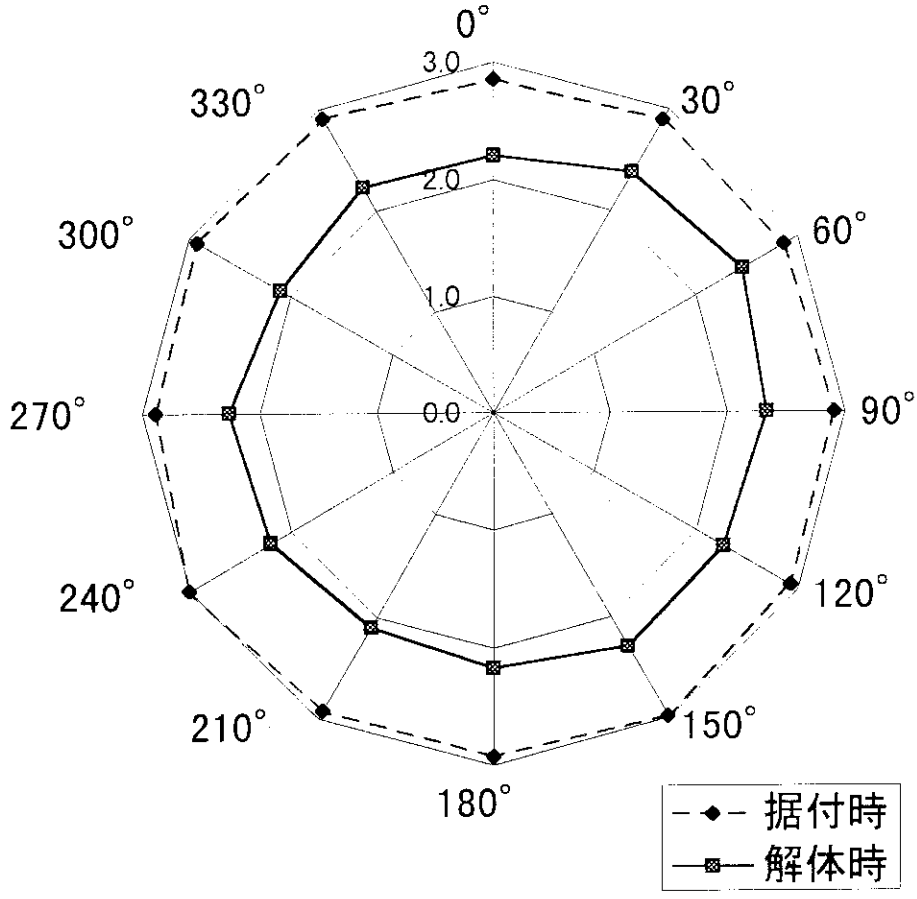


Table 6.11 Restraint force of fifth-stage core restraint bands.

単位 ton

| 固定反射体 第3段 下層（第5層）拘束機構締付力 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 据付時 | 解体時 | 変化量 | 備　考 |
| 0° | 2.866 | 2.414 | -0.452 | |
| 30° | 2.911 | 2.677 | -0.234 | |
| 60° | 2.931 | 2.322 | -0.609 | |
| 90° | 2.943 | 2.341 | -0.602 | |
| 120° | 3.011 | 2.407 | -0.604 | |
| 150° | 2.954 | 2.456 | -0.498 | |
| 180° | 2.961 | 2.301 | -0.660 | |
| 210° | 2.881 | 2.354 | -0.527 | |
| 240° | 2.879 | 2.246 | -0.633 | |
| 270° | 2.885 | 2.245 | -0.640 | |
| 300° | 2.909 | 2.348 | -0.561 | |
| 330° | 2.915 | 2.423 | -0.492 | |
| 全周平均 | 2.921 | 2.378 | -0.543 | |

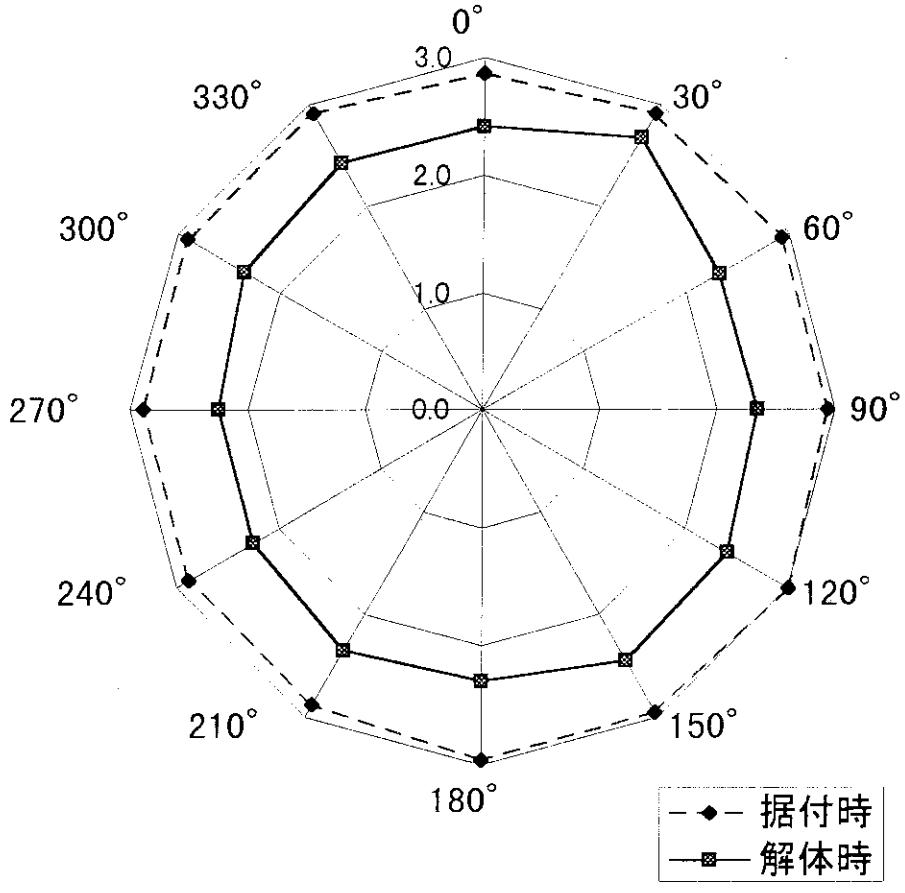


Table 6.12 Restraint force of fourth-stage core restraint bands.

単位 ton

| 固定反射体 第2段 上層（第4層）拘束機構締付力 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 据付時 | 解体時 | 変化量 | 備　考 |
| 0° | 2.881 | 2.125 | -0.756 | |
| 30° | 2.809 | 2.621 | -0.188 | |
| 60° | 2.785 | 2.379 | -0.406 | |
| 90° | 2.811 | 2.382 | -0.429 | |
| 120° | 2.819 | 2.225 | -0.594 | |
| 150° | 2.883 | 2.385 | -0.498 | |
| 180° | 2.904 | 2.163 | -0.741 | |
| 210° | 2.951 | 2.209 | -0.742 | |
| 240° | 2.901 | 2.186 | -0.715 | |
| 270° | 2.914 | 2.058 | -0.856 | |
| 300° | 2.895 | 2.450 | -0.445 | |
| 330° | 2.878 | 2.220 | -0.658 | |
| 全周平均 | 2.869 | 2.284 | -0.586 | |

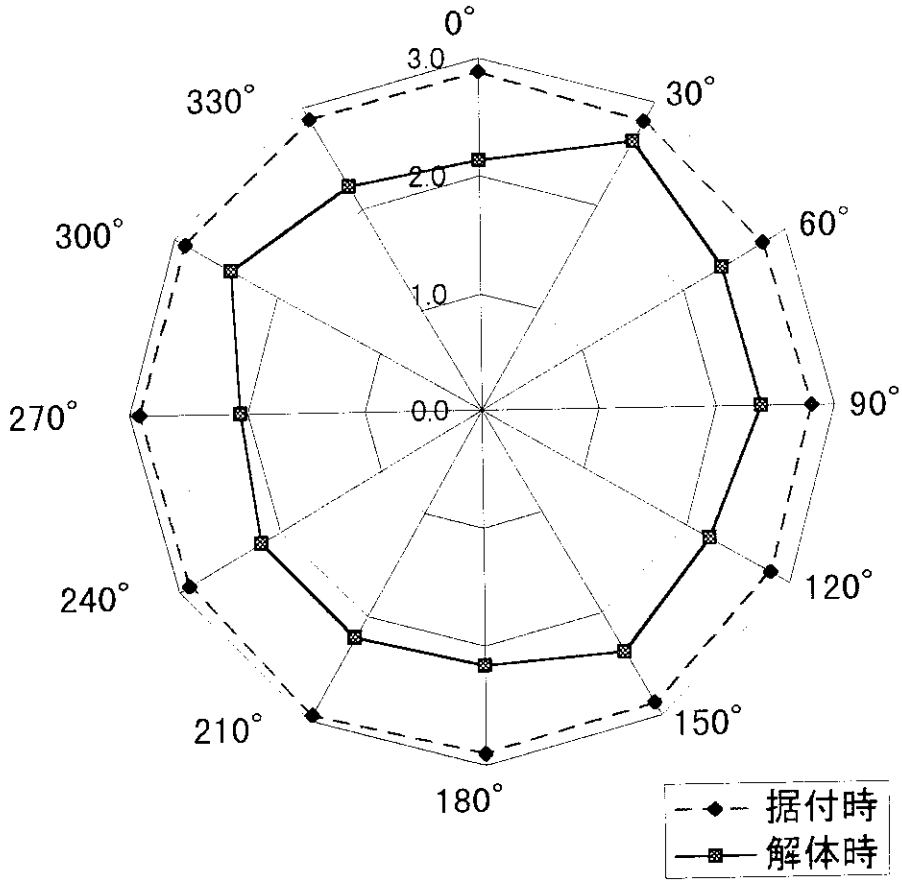
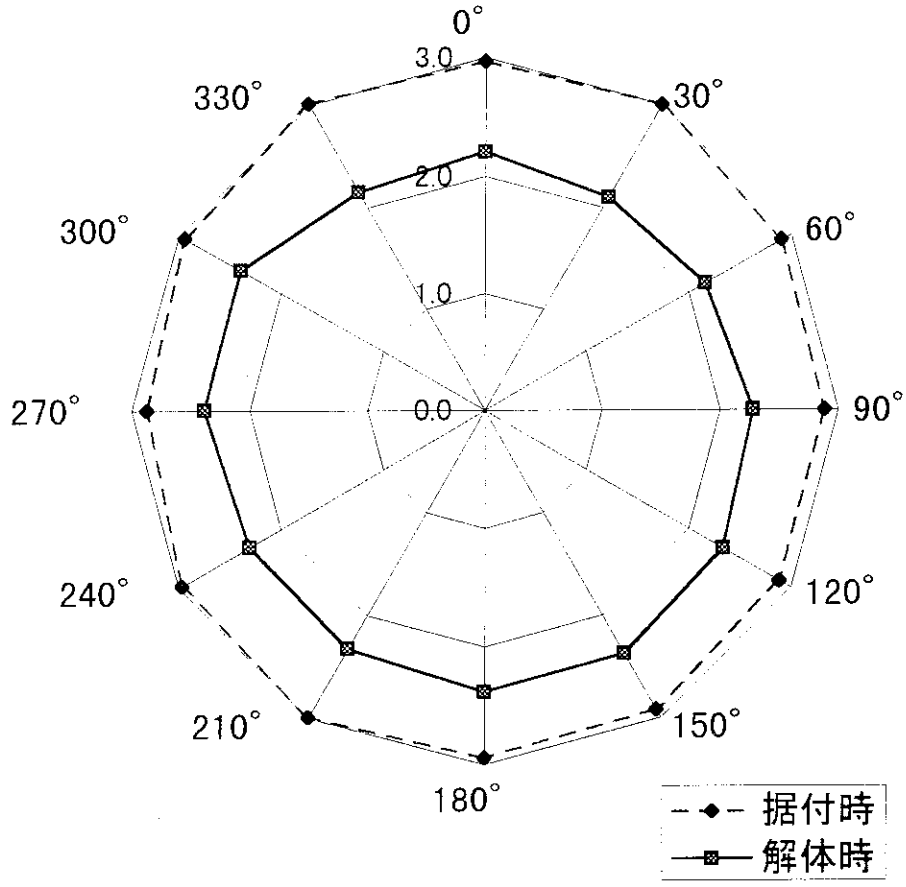


Table 6.13 Restraint force of third-stage core restraint bands.

単位 ton

| 固定反射体 第2段 下層（第3層）拘束機構締付力 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 据付時 | 解体時 | 変化量 | 備　考 |
| 0° | 2.965 | 2.204 | −0.761 | |
| 30° | 2.999 | 2.099 | −0.900 | |
| 60° | 2.910 | 2.165 | −0.745 | |
| 90° | 2.888 | 2.282 | −0.606 | |
| 120° | 2.888 | 2.338 | −0.550 | |
| 150° | 2.923 | 2.377 | −0.546 | |
| 180° | 2.946 | 2.381 | −0.565 | |
| 210° | 2.993 | 2.325 | −0.668 | |
| 240° | 2.965 | 2.306 | −0.659 | |
| 270° | 2.871 | 2.380 | −0.491 | |
| 300° | 2.946 | 2.391 | −0.555 | |
| 330° | 3.011 | 2.152 | −0.859 | |
| 全周平均 | 2.942 | 2.283 | −0.659 | |



# 7．まとめ

$T_2$試験部を解体して各種の検査を行い、以下の結果を得た。

(1) 目視検査の結果、全ての黒鉛構造物（キー、シール要素、炭素ブロックを含む）及び金属構造物について割れ、欠け、ひび等の破損は生じていなかった。また、黒鉛構造物の腐食については、シール用高温プレナムブロックの流路部に微少な腐食痕が見られたのみで、他の黒鉛構造物は全て健全な外観を呈していた。しかし、ヘリウムガスの流路部に沿って黒色粉末が薄く付着しているのが観察された。この黒色粉末は磁性を有することから、C と Fe の混合物であると推察される。

(2) 固定反射体ブロックの面間距離、固定反射体ブロック間の隙間、シール用高温プレナムブロック間上面における隣接したブロック間での段差及び炉心支持板上面の水平度の寸法検査の結果、これらの計測値は据付時の寸法とほぼ同じであった。このことから、炉床部構造物の配列にズレはなく、上記 (1) の結果と構造健全性は確保されていたと考えられる。

(3) 4層の炉心拘束バンドについて締付力の測定を行い、据付時の値に比べて 19 %～23 %減少していることを確認した。

上記 (1) ～ (2) の結果より、炉床部黒鉛構造物の健全性が確認でき、黒鉛構造物の構造設計、製作・組立の妥当性を実証することができた。炉心拘束バンドの締付力が低下については、部材のリラクセーションが主要原因と考えられることから、数値解析による評価を進める予定である。圧力容器については目視検査を行い、ヘリウムガスの漏えいを防止するための二重金属 O リング、オメガシール等に性能劣化の原因となる異常は生じていなかった。

# 謝　辞

解体検査に関しては、富士電機（株）、（株）日立製作所の協力を得た。また、東海研究所の工作課の高 勇氏には解体検査に必要な治具の設計及び製作をして頂いた。さらに、本報告書をまとめるに当たり、核熱利用研究部の宮本喜晟部長、塩沢周策次長及び中性子科学研究センターターゲット開発室の日野竜太郎室長から貴重な助言を頂いた。ここに記して謝意を表します。

# 7．まとめ

$T_2$試験部を解体して各種の検査を行い、以下の結果を得た。

(1) 目視検査の結果、全ての黒鉛構造物（キー、シール要素、炭素ブロックを含む）及び金属構造物について割れ、欠け、ひび等の破損は生じていなかった。また、黒鉛構造物の腐食については、シール用高温プレナムブロックの流路部に微少な腐食痕が見られたのみで、他の黒鉛構造物は全て健全な外観を呈していた。しかし、ヘリウムガスの流路部に沿って黒色粉末が薄く付着しているのが観察された。この黒色粉末は磁性を有することから、C と Fe の混合物であると推察される。

(2) 固定反射体ブロックの面間距離、固定反射体ブロック間の隙間、シール用高温プレナムブロック間上面における隣接したブロック間での段差及び炉心支持板上面の水平度の寸法検査の結果、これらの計測値は据付時の寸法とほぼ同じであった。このことから、炉床部構造物の配列にズレはなく、上記(1)の結果と構造健全性は確保されていたと考えられる。

(3) 4層の炉心拘束バンドについて締付力の測定を行い、据付時の値に比べて19％～23％減少していることを確認した。

上記(1)～(2)の結果より、炉床部黒鉛構造物の健全性が確認でき、黒鉛構造物の構造設計、製作・組立の妥当性を実証することができた。炉心拘束バンドの締付力が低下については、部材のリラクセーションが主要原因と考えられることから、数値解析による評価を進める予定である。圧力容器については目視検査を行い、ヘリウムガスの漏えいを防止するための二重金属Oリング、オメガシール等に性能劣化の原因となる異常は生じていなかった。

# 謝　辞

解体検査に関しては、富士電機（株）、（株）日立製作所の協力を得た。また、東海研究所の工作課の高 勇氏には解体検査に必要な治具の設計及び製作をして頂いた。さらに、本報告書をまとめるに当たり、核熱利用研究部の宮本喜晟部長、塩沢周策次長及び中性子科学研究センターターゲット開発室の日野竜太郎室長から貴重な助言を頂いた。ここに記して謝意を表します。

# 参考文献

(1) 日本原子力研究所, "高温工学試験研究の現状," (1996).
(2) 斎藤, "高温ガス炉の特徴と開発の経緯," 原子力工業, Vol. 36 (1990) 20-24.
(3) 数土, "海外における高温ガス炉の開発状況," 原子力工業, Vol. 36 (1990) 25-32.
(4) 国富, 稲垣, 井岡, 近藤, 根小屋, 宮本, 秋定, 山口, "炉内構造物実証試験部 (HENDEL $T_2$) の建設, (Ⅰ) 試験部の概要と試験体", 原子力誌, Vol. 30 (1988) 333-342.
(5) 稲垣, 国富, 井岡, 近藤, 林, 宮本, 烏谷, 山口, "炉内構造物実証試験部 (HENDEL $T_2$) の建設, (Ⅱ) 試験装置と開発試験", 原子力誌, Vol. 30 (1988) 427-433.
(6) 宮本, 日野, 稲垣, 高瀬, 井岡, 高田, 鈴木, 国富, 丸山, 近藤, "大型構造機器実証試験ループ (HENDEL) の試験部による高温ガス炉用燃料体・炉内構造物の実証試験," JAERI 1333 (1995).
(7) 稲垣, 伊与久, 豊田, 佐藤, 塩沢, "高温工学試験研究炉 (HTTR) 炉心支持黒鉛構造物の健全性," JAERI-M 90-020 (1990).
(8) 丸山, 伊与久, 稲垣, 塩沢, 増馬, 三木, "HTTR 炉心支持黒鉛構造物の目視検査技術の開発,", 原子力誌, Vol. 38 (1996) 601-608.
(9) 奥山, 横田, "HENDEL におけるカーボン輸送現象と不純物濃度特性," 原子力誌, Vol. 30 (1988) 1119-1126.
(10) 近藤, 深谷, 私信