特集 新型動力炉

U.D.C. 621.039.524.2.034.36.072-977.001.57

# HENDEL T<sub>2</sub>試験装置の開発 (高温ガス炉用高温機器の開発)

## **Development of HENDEL T2 Test Facility** (Development of High Temperature Components for VHTR)

HENDELは、日本原子力研究所で開発中の多目的高温ガス実験炉の実証試験を目 的とした試験装置である。HENDEL T<sub>2</sub>はHENDEL計画の一環として実験炉炉床構 造物の実証試験を,実機と同一の温度,圧力,雰囲気条件で行なう試験装置であり, 7燃料交換領域の炉床構造物(試験体)及び実機条件を得るためのヒータ、流量調節 装置などの試験装置から構成される。

工藤昭	召雄*	Akio Kudô	
山口	茂**	Shigeru	Yamaguchi

これら試験装置は、最高1,050℃の厳しい高温条件下で使用されるため、性能確認 を行なった上で製作が進められている。

本稿はこれら一連の開発試験成果を報告するとともに, HENDEL T<sub>2</sub>の製作・据 付現状について紹介する。

#### 1 緒 言

日本原子力研究所でVHTR(多目的高温ガス実験炉)の開発 が進められている。HENDEL (Helium Engineering Demonstration Loop: 大型構造機器実証試験ループ)は, VHTRを構成する各種機器の実証試験を行なう実証試験ルー プであり、HENDEL T₂はそのうち炉床構造物の実証試験を 行なう試験装置である。

たっては,日本原子力研究所の指導のもとに部品試験,試作, 実証試験など一連の開発試験を実施し製品の開発を行なった。 これら開発試験の内容及び成果を報告するとともに、合わせ て製品の紹介を行なう。

日立製作所(バブコック日立株式会社を含む。)は、ダイヤグ リッドなどの炉床支持鋼構造物,領域別ヒータ,流量調節装 置などの試験装置及びプラント計装系を担当している。

領域別ヒータ,流量調節装置などは,最高温度1,050℃ゲー ジ圧40kg/cm<sup>2</sup>の高温,高圧ヘリウム下で使用されるため、い ずれも開発要素を多く含んだ製品である。そのため製作に当

#### 2 炉内構造物実証試験部(HENDEL T<sub>2</sub>)の概要

2.1 大型構造機器実証試験ループ(HENDEL)

日本原子力研究所でVHTRの開発が昭和44年以降進められ ている。HENDELは、VHTRを構成する燃料体スタック、炉 床構造物,中間熱交換器,高温配管などの高温機器の実証試 験を,実機と同一の温度,圧力,ヘリウム雰囲気条件で実施 する目的で昭和55年から建設が行なわれてきた。



69

## \* バブコック日立株式会社呉工場 工学博士 \*\* バブコック日立株式会社呉工場

918 日立評論 VOL. 67 No. 11(1985-11)

試験部名称	試 験 内 容
燃料体スタック実証試験部 (T1)	<ol> <li>パ燃料棒,制御棒の伝熱流動試験</li> <li>2.黒鉛ブロックの高温健全性試験</li> </ol>
炉内構造物実証試験部 (T <sub>2</sub> )	<ol> <li>高温プレナム部シール特性試験</li> <li>高温プレナム部混合特性試験</li> <li>炉床部断熱特性試験</li> <li>高温機器健全性試験</li> </ol>
大流量実証試験部 (T <sub>3</sub> )	<ol> <li>1. 炉内流動特性試験</li> <li>2. 大型弁の特性試験</li> </ol>
高温機器実証試験部 (T <sub>4</sub> )	<ol> <li>1.高温機器の伝熱流動試験</li> <li>2.高温機器の健全性確認試験</li> </ol>

表 I HENDEL実証試験部試験内容 実証試験部はT1~T4から成り, VHTRを構成する燃料体スタック, 炉床構造物, 高温機器などの実証試験を行なう。

HENDELは、高温、高圧のヘリウムを試験部に供給する機能をもつマザー+アダプタループ(M+Aループ)とT<sub>1</sub>~T<sub>4</sub>の実証試験部から構成される。HENDELのフローシートを図1に、各実証試験部の試験内容を表1に示す。

 $M+A \mu - \mathcal{T} \mathcal{D} \mathcal{U} T_1$ は昭和58年3月完成し、現在運転中であり、引き続き $T_2$ の製作、据付けが進められている。

2.2 炉内構造物実証試験部(HENDEL T<sub>2</sub>)

炉内構造物実証試験部(HENDEL T<sub>2</sub>)の構造図を図2に 示す。HENDEL T<sub>2</sub>は炉床構造物の実証試験を目的とした試 験装置で,実寸大7燃料交換領域(実機19燃料交換領域)の黒 鉛ブロック製炉床構造物,鋼製ダイヤグリッド,コアバレル などから構成される試験体,及び試験体に1,050℃の高温へリ ウムを供給する領域別ヒータ,領域ごとの流量配分,流量測 定を行なう流量調節装置,流量測定ブロック及び高温へリウ ムと低温へりウム間の断熱を図る内部隔壁,圧力容器などの 試験装置から構成される。



領域別ヒータ,流量調節装置,流量測定ブロックなどの試 験装置は,最高温度1,050℃,ゲージ圧40kg/cm<sup>2</sup>の高温,高圧 へリウム下で使用されるため,いずれも開発要素を多く含ん だ製品である。製作に当たっては,部品開発,試作,実証試 験などを実施し,その成果を設計,製作に反映させる手順を 採用した。これら一連の開発試験内容,成果を報告するとと もに製品の紹介を以下に述べる。

3 領域別ヒータの開発

3.1 領域別ヒータ構造及び仕様

領域別ヒータは図2に示すように七つの各燃料交換領域ご とに設置され、中心領域用ヒータモジュール1基と周辺領域 用ヒータモジュール6基で構成される。中心領域用ヒータモ ジュールの構造図を図3に、仕様を表2に示す。

領域別ヒータは、入口温度930℃のヘリウムを最高1,050℃ まで加熱し、試験部に高温ヘリウムを供給する3相交流直接 通電式黒鉛パイプヒータで、ヘリウムは管内を流れる。ヒー タ容量は中心領域730kW、周辺領域365kWである。ヒータエ レメントは黒鉛パイプの製造上の長さ制限から、長さ約900 mm、内径65mm、肉厚6.5mmの等方性黒鉛パイプを3本ねじ 結合した全長2,750mmの黒鉛パイプで、中心領域9本、周辺 領域6本のヒータエレメントをY結線で接続している。ヒータ エレメントは黒鉛管板に絶縁材を介して固定され、タイロッ ドでつり下げられた仕切板で軸方向スライド可能なように支 持されている。 これら黒鉛構造物は、モリブデン合金のリフレクタの内に 挿入され、ヒータ入口部には流量調節装置を設置するための 流量調節箱が取り付けられる。ヘリウムは、流量調節装置に

より各領域別ヒータごとに流量配分が行なわれ、流量調節箱

図 2 HENDEL T<sub>2</sub>構造図 炉内構造物実証試験部(T<sub>2</sub>)は、炉床構造物 (実寸大 7 燃料交換領域)の実証試験を目的とした試験装置である。



ル6基から構成される。

#### HENDEL T<sub>2</sub>試験装置の開発(高温ガス炉用高温機器の開発) 919

表2 領域別ヒータ仕様 領域別ヒータは、中心領域用9本、周辺領域 用6本の黒鉛パイプヒータから構成される。

1	項	目		仕様
形			式	三相交流直接通電式パイプヒータ
数			量	7 基
ヒー	タエレ	メント	材質	黒 鉛
使	用	流	体	ヘリウム
使	用	圧	カ	ゲージ圧40kg/cm <sup>2</sup>
ヒータ入口ヘリウム温度			温度	930°C
ヒータ出口ヘリウム温度		温度	I,050℃	
ヘリウム流量調節範囲		範囲	中心領域0.2~2.0kg/s	
(全流量が4kg/sのとき)		:き)	周辺領域0.09~0.9kg/s	
伝 熱	如 量	中心領域 7 ~ 730kW		
		周辺領域 3 ~ 365kW		

内に入り、ヘリウム管板と黒鉛管板の間を流れ、ヒータエレ メント固定用絶縁材の周囲に設けた3箇所の入口部からヒー タエレメント内に入り加熱される。

#### 3.2 領域別ヒータの開発

領域別ヒータは、入口温度930℃の高温へリウム中で運転さ れる大電流小抵抗の黒鉛ヒータであるため、その開発は黒鉛 ヒータエレメントの接触抵抗を含む各種部品開発を実施し, 部品ごとの機能,健全性を確認後、ヒータエレメント3本か ら成る実寸大試作ヒータを製作し、高温へリウムループによ る実証運転を行ない、性能及び構造健全性の総合確認を行な った。



部品開発は図4に示す5項目に関し実施した。その主な内 容を以下に述べる。ヒータエレメントの接続部及び中性点連 結板との接触抵抗に関しては、 ヘリウム雰囲気中で常温から 300℃まで測定を実施した。その結果,接触抵抗は負荷電流の 増加及び温度上昇とともに低下し、1,300℃で0.03mΩと小さ く使用上支障のないことを確認し, 接続部構造, 接触面圧な どの設計・製作にこれら試験結果を反映した。ヒータエレメ ント間の出口ヘリウム温度のアンバランスを防止する試験で は、ヒータエレメント間のフローアンバランスを抑えるため、 流量調節装置からのジェットの方向, ヒータエレメントのへ

部品R&D

実証運転試験



図5 領域別ヒータフローアンバランス試験結果 各ヒータエレメ ント間のフローアンバランスは、入口部に図に示す形状の開口部を設けること で、±3%以下に抑えることが可能になった。



図6 試作ヒータ構造 試作ヒータは,実寸大3本の 黒鉛パイプヒータから構成さ れる。写真は加熱器に組み込 むため, つり上げられた状態 の試作ヒータを示す。

71

リウム入口部の開口形状,方位に関し試験を行ない,図5に 示すようにフローアンバランスは±3%以下であることを確 認した。試験結果を基に実機開口形状、開口方位などを決定 した。熱電対耐環境性及び取付方法試験では、ヒータエレメ



注:略語説明 R&D(Research and Development) W/WRe(タングステン・タングステンレニウム)

図4 領域別ヒータ開発試験フローチャート 領域別ヒータは、部 品R&D及び試作ヒータによる実証運転を行ない開発を進めた。

ント表面温度測定用W/WRe(タングステン・タングステンレ ニウム)熱電対に関し、1,300℃ヘリウム雰囲気で1,000時間の 熱起電力特性の測定を実施しドリフトの定量的確認を行なっ た。その他ヒータエレメントの流体振動、電極貫通部シール 性, リード線伸縮性などの確認試験を実施した。 部品開発試験の成果を反映し、ヒータエレメント3本から 構成される実寸大試作ヒータの設計・製作を行ない高温ヘリ

920 日立評論 VOL. 67 No. 11(1985-11)







図8 高温ヘリウムループ構造 架台上左側が再 生熱交換器,右側が加熱器で,左隅に冷却器が設置されている。

ウムループに組み込み実証運転を実施した。試作ヒータの構通する駆動ロッドによりディスクを回転させるため、各駆動

ウムルークに組み込み美証運転を美心した。武作ビークの構造を図6に、高温へリウムループのフローシートを図7に、 構造を図8に示す。

高温へリウムループは, 試作ヒータの実証運転及び高温機 器開発試験を目的に, 昭和59年10月に完成した最高温度 1,050℃, へリウム流量80g/s, ゲージ圧40kg/cm<sup>2</sup>のヘリウム ループで, 試作ヒータを組み込んだ加熱器, 再生熱交換器, 冷却器, 循環機及び純化系から構成されている。加熱器の電 極貫通部及び電極冷却設備は, HENDEL T<sub>2</sub>と同一構造を採 用している。

実証運転は昭和59年12月から昭和60年5月まで,試作ヒー タ出口温度1,050℃運転550時間,延べ1,200時間の運転を完了 した。その間,昭和59年3月,6月に2回の開放点検を実施 し,外観・寸法検査,抵抗・絶縁検査を行なったが,ヒータ エレメントの酸化,寸法変化は認められず,抵抗,絶縁値も 据付け時とほぼ同じであり,健全性が確認された。性能に関 しても,ヒータエレメント温度は設計値とほぼ等しく,所定 の性能を満足していることを確認した。

#### 4 流量調節装置の開発

4.1 流量調節装置の構造,仕様

流量調節装置は各領域別ヒータの流量調節箱の上部に設置 され,領域別ヒータに供給するヘリウムの流量配分を行なう 装置で,流量調節部,駆動ロッド及び駆動部から構成される。 流量調節装置の構造図を図9に,仕様を表3に示す。

通常のバルブに用いられているステムの上下動による流量 調節方式では,運転時駆動ロッドの熱膨脹により開度を一定 に保持することが不可能なため,本流量調節装置ではディス 通りる駆動ロットによりアイスアを回転させるため, 各駆動 ロッドは, 熱膨脹差, 据付公差などにより生じる偏心に対し ても回転力の伝達が可能なように, ユニバーサルジョイント により接続されている。

#### 4.2 流量調節装置の開発

流量調節装置の開度設定は400℃以下で実施するが、運転時 には内部隔壁内部の駆動ロッド、ユニバーサルジョイント及



クを回転させ、ディスクとシートに設けた扇形開口部の面積 を変化させ流量調節を行なう方式を採用している。駆動ロッ ドの熱膨脹は四角断面をもつディスクロッドをユニバーサル ジョイントのスライダの四角い孔を貫通させ、スライドによ り軸方向熱膨脹差を吸収し、回転力はディスクへ伝達可能な 構造となっている。 駆動部は圧力容器外に設置され、圧力容器、内部隔壁を貫

## 図 9 流量調節装置構造図 流量調節は、ディスクとシートに設けた扇 形開口部の面積を変化させ行なう。

#### HENDEL T2試験装置の開発(高温ガス炉用高温機器の開発) 921

仕 様 項 目 950℃(弁座部) 設 計 温 度 設 ゲージ圧45kg/cm<sup>2</sup> 計 圧 カ 体 流 ヘリウムガス 中心領域 0.2~2.0kg/s 流量調節範囲 0.09 - 0.9 kg/s周辺領域 弁 座 前 後 差 圧  $0.1 \text{kg/cm}^2$ 

流量制御は,7燃料交換領域個別に実施可能

流量調節装置仕様

表 3

である。

び流量調節部は930℃の高温へリウム中に設置された状態とな る。そのため、これらコンポーネントに関しては耐焼付き性、 耐摩耗性に優れた材料の選定、及び表面処理方法の確立が必 要となる。またユニバーサルジョイント部でのがたの開度設 定に及ぼす影響に関しても確認を行なう必要がある。そのた め、流量調節装置の開発は、図10に示す開発試験フローチャ ートに示すように材料選定を含めた部品開発、<sup>1</sup>/<sub>3</sub>スケールモ デルによる高温作動試験を実施し、性能及び健全性の確認を 行なった。

材料選定試験では、肉盛合金、焼結合金、セラミック、肉 盛合金及びハステロイXにセラミックコーティングを施したも のなど20種類以上の材料を組み合わせ、950℃の高温へリウム 中での焼付け試験、450℃での摩耗試験を実施した。その結果、 高温部材としてハステロイXにジルコニアコーティングを施し たものを選定した。また部分モデルによる流動特性試験を実 施し、ディスク及びシートの開口部形状を決定した。 部品開発試験結果を反映して<sup>1</sup>/<sub>3</sub>スケールモデルの流量調節 装置を試作し、温度、雰囲気条件を実機を考慮し、試験条件 として950℃で600時間保持、450℃で500回の全閉全開を行な う実証運転を実施した。実証運転後分解検査を行ない、融着、 焼付き摩耗、コーティングのはく離が生じていないことを確 認した。実証運転中でのディスク、シート間からのへりウム リークに関しても0.02g/s以下であり、使用上支障のないこと の確認を行なった。



図11 流量調節装置開度特性試験結果 → スケールモデルによる開度 特性試験結果を示す。

遅れは一定で再現性があり,あらかじめ遅れを見込み制御プ

また、ユニバーサルジョイントのがたが開度に及ぼす影響 について、駆動部の回転角とディスクの回転角の測定を行なった。その結果、図11に示すように、 $\frac{1}{3}$ スケールモデルでは 駆動部の回転に対しディスクは約14度遅れ追従するが、この

部品R&D

実証運転試験



ログラムを作成することで実用上支障のないことを確認した。

## 5 シール機構及び流量測定ブロックの開発

#### 5.1 シール機構の開発

炉床黒鉛構造物は図12に示すように周方向12分割,高さ方向4段の固定反射体と呼ばれる黒鉛ブロックで囲まれている。 固定反射体の外面を流れる低温へリウムは,固定反射体内面 を流れる高温へリウムに比べ最大0.3kg/cm<sup>2</sup>圧力が高く,固定



図10 流量調節装置開発試験フローチャート 流量調節装置は弁座 定反射 材の選定から始め、 テスケールモデル弁の試作、実証運転と開発を進めた。 ってい

シール機構上面 (b) シール材断面構造

図12 シール機構構造図 シール機構は,最高900℃の使用条件下で固 定反射体の段差を吸収するため,セラミックファイバーを主体とした構成となっている。

922 日立評論 VOL. 67 No. 11(1985-11)

反射体のブロック間隙間から低温へリウムの漏れが生じる。 HENDEL T<sub>2</sub>の主要試験項目の一つにこのヘリウム漏れ量の 測定がある。

固定反射体の上部には、高温へリウムと低温へリウム間の 断熱を目的とし, 内部隔壁が据え付けられる。上述した試験 目的から,固定反射体と内部隔壁間の低温へリウム漏れ量を 極力抑える必要がある。しかし,固定反射体は黒鉛ブロック の積層構造のため,最上面は加工,据付公差及び熱膨脹率の 不均一のためブロック間段差(最大3.4mm)が生じる。また, 内部隔壁と固定反射体の間には,運転時熱膨脹差に起因し, 半径方向に10mmの変位も発生する。そのため固定反射体と内 部隔壁間のシール機構には, 段差及び半径方向熱膨脹差を吸 収し、かつ最高900℃の使用条件でシール性が優れていること (許容漏れ量25g/s)が要求される。

シール機構の構造図を図12に示す。シール機構はシール材、 固定反射体ブロック間段差吸収用セラミックファイバー及び シール材の変形防止用黒鉛キーから構成される。内部隔壁の 下端にはリング状のインコロイ800H製シールリングを設ける。 半径方向変位は、黒鉛キー及びシール材上をシールリングを スライドさせることにより吸収を図る。シール材は高温での 復元力が大きなカオウール1,400Sの内部に透過流低減のため 金属はくを配置し、周囲をセラミッククロスで覆った構造で ある〔図12(b)〕。



図15 実寸大部分モデル試験装置及び試験条件 実寸大,周方向是 のシール材によるシール試験装置で、シール材寸法は幅180mm、長さ1,000mm である。

るシール性確認試験を実施する予定である。

#### 5.2 流量測定ブロックの開発

シール性能の確認は図13に示す開発フローチャートに従っ て実施中であり,現在実寸大部分モデル試験が完了し漏れ量 は図14に示すようにブロック間段差5mmでも17g/s以下で許 容値25g/sを満足していることを確認した。実寸大部分モデル 試験装置を図15に示す。今後実寸大フルスケールモデルによ



図13 シール機構開発試験フローチャート シール機構は、透過率 測定試験から始め、実寸大部分モデル試験ではシール性能の改善を重ね、図12 に示す構造を決定した。



流量測定ブロックは図2に示すように、領域別ヒータの下部 に設置され、各領域ごとのヘリウム流量を測定する黒鉛製ベン チュリーである。流量測定ブロックは高さが約1,000mmに制 約されているため、ストレート部を短くせざるを得ず、かつ 流量測定ブロックを出たヘリウムが炉床黒鉛ブロックに衝突 する構造となっている。また据付公差,熱膨脹差により流量 測定ブロックと領域別ヒータは,水平方向及び垂直方向に各々 40mm, 50mmの変位が生じる。これら構造及び変位が流量測 定に及ぼす影響を確認するため、領域別ヒータ、炉床黒鉛ブ ロックを含めた実寸大モデルにより,流量特性試験を実施し た。その結果、ベンチュリーのストレート部が短く、かつ領 域別ヒータとの水平方向及び高さ方向の変位が生じるにもか かわらず、流量測定精度は±2%の誤差でJIS規定のフローノ ズルによる測定結果と一致することを確認した。

#### 6 結 言

HENDEL T<sub>2</sub>の試験装置のうち,主要なコンポーネントで ある領域別ヒータ,流量調節装置,シール機構及び流量測定 ブロックの開発で, 部品試験, 試作, 実証試験など一連の開 発試験を実施し、ほぼHENDEL T2での使用見通しを得るこ とができた。シール機構に関しては、早急にフルスケールモ デルによる試験を完了し、シール性能の最終確認を行なう予 定である。

最後に,開発試験に当たり御指導いただいた日本原子力研 究所東海研究所高温工学部の前部長,岡本芳三工学博士及び 同現部長,佐野川好母工学博士をはじめ同所前HENDEL開発 試験室室長,田中利幸氏及び現HENDEL開発試験室室長の河 村 洋工学博士に対し深く感謝申し上げる。

図14 シール機構シール特性試験結果 シール性能は,固定反射体に 段差が生じた場合でも、許容リーク量の約号である。

## 参考文献

- 青地,外:大型構造機器実証試験ループ(HENDEL)の設計調 1) 查, JAERI-M 7371(1977)
- 菱田,外:大型構造機器実証試験装置(HENDEL)による高温 (2)配管の断熱性能試験, JAERI-M 83-180(1983) 戸根、外:HENDELのメイクアップ系および精製系の基本設 3) 計, JAERI-M 8309(1979)