

JAERI-Tech

2005-040



JP0550306



HTTRの中間熱交換器の伝熱性能に関する評価

2005年7月

栃尾 大輔・中川 繁昭

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。

入手の間合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 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, Nakagun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

HTTR の中間熱交換器の伝熱性能に関する評価

日本原子力研究所大洗研究所高温工学試験研究炉開発部

栃尾 大輔・中川 繁昭

(2005年6月8日受理)

定格熱出力 30MW の高温工学試験研究炉 (HTTR) では、原子炉で発生した熱を加圧水冷却器、中間熱交換器による熱交換を経て、最終的に加圧水空気冷却器により大気に放散している。HTTR の主冷却系熱交換器は原子炉出口冷却材温度 850°C / 950°C を達成しつつ原子炉で発生した 30MW の除熱を行わなければならない、主冷却系の熱交換器は設計時に定めた伝熱性能を有していなければならない。

本報では、HTTR においてこれまで実施してきた出力上昇試験、供用運転のデータから、主冷却系に設置されている熱交換器のうちの中間熱交換器 (IHX) について伝熱性能を評価した。また、設計時における IHX の伝熱性能との比較を行い、設計時に用いた IHX 伝熱性能評価手法の妥当性を検討した。

Evaluation of Heat Exchange Performance for Intermediate Heat Exchanger in HTTR

Daisuke TOCHIO and Shigeaki NAKAGAWA

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

(Received June 8, 2005)

In High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) of 30MW, the generated heat at reactor core is finally dissipated at the air-cooler by way of the heat exchangers of the primary pressurized water cooler and the intermediate heat exchanger (IHX). The heat exchangers in the main cooling system of HTTR must satisfy two conditions, that is, achievement of reactor coolant outlet temperature 850°C / 950°C and removal of reactor generated heat. 30MW. Therefore, the heat exchanges have to have the same performance as these in the design.

In this report, heat exchange performance of the IHX in the main cooling system was evaluated with the rise-to-power-up test and the in-service operation data. Moreover, the validity of the IHX thermal-hydraulic design method was confirmed by comparison of evaluated data with designed value.

Keywords : HTTR, High Temperature Test Operation, 950°C, 30MW, Main Cooling System, Intermediate Heat Exchanger, Heat Exchange Performance

目次

1. 緒言.....	1
2. 設備の概要.....	2
2.1 HTTR の概要.....	2
2.2 1次ヘリウム冷却設備の概要.....	2
2.3 2次ヘリウム冷却設備の概要.....	3
2.4 中間熱交換器 (IHX) の概要.....	3
2.5 1次/2次ヘリウム循環機の概要.....	4
3. IHX の熱流動設計.....	5
3.1 概要.....	5
3.1.1 IHX 設置の目的.....	5
3.1.2 IHX の機能条件.....	5
3.1.3 IHX の基本構造方針.....	5
3.2 伝熱面積評価.....	6
3.2.1 設計仕様.....	6
3.2.2 算出方法.....	6
3.2.3 有効伝熱面積評価結果.....	9
3.3 圧力損失評価.....	9
3.3.1 設計仕様.....	9
3.3.2 算出方法.....	9
3.3.3 圧力損失評価結果.....	13
4. IHX の伝熱性能の評価.....	14
4.1 運転データの計測.....	14
4.2 基礎データの整理.....	14
4.3 IHX の伝熱性能の評価方法.....	14
4.4 IHX の伝熱性能の評価結果.....	15
4.5 伝熱性能の設計値との比較.....	16
5. 結言.....	17
謝辞.....	17
参考文献.....	17

Contents

1 . Introduction	1
2 . Outline of the HTTR Facility	2
2.1 Outline of the HTTR Facility	2
2.2 Outline of the Primary Cooling System	2
2.3 Outline of the Secondary Helium Cooling System	3
2.4 Outline of the Intermediate Heat Exchanger (IHX).....	3
2.5 Outline of the Primary/Secondary Helium Gas Circulator.....	4
3 . Thermal-hydraulic Design of the IHX	5
3.1 Outline	5
3.1.1 Purpose of the IHX Installation.....	5
3.1.2 Requirements for the IHX Design	5
3.1.3 Design Consideration for the IHX	5
3.2 Estimation of Heat Transfer Area for the IHX	6
3.2.1 Design Specification.....	6
3.2.2 Estimation Method	6
3.2.3 Estimation Result of Effective Heat Transfer Area for the IHX	9
3.3 Estimation of Coolant Pressure Loss for the IHX	9
3.3.1 Design Specification.....	9
3.3.2 Estimation Method	9
3.3.3 Estimation Result of Coolant Pressure Loss for the IHX	13
4 . Evaluation of Heat Exchange Performance for the IHX.....	14
4.1 Measurement of Operation Data	14
4.2 Compilation of Fundamental Data	14
4.3 Evaluation Method of Heat Exchange Performance for the IHX.....	14
4.4 Evaluation Result of Heat Exchange Performance for the IHX.....	15
4.5 Comparison with Design Value.....	16
5 . Summary.....	17
Acknowledgement	17
References.....	17

1. 緒言

日本原子力研究所(原研)の高温工学試験研究炉(HTTR: High Temperature Engineering Test Reactor)は、高温ガス炉技術基盤の確立と高度化、高温工学に関する先端的基礎研究の実施を主目的として原研大洗研究所に建設された日本初の高温ガス炉である^{1),2)}。

HTTRの基本仕様をTable 1.1に示す。HTTRは燃料に被覆粒子燃料、減速材に黒鉛、冷却材にヘリウムガスを使用する定格熱出力30MW、原子炉入口冷却材温度395°Cの高温ガス炉である。HTTRの運転には、原子炉出口冷却材温度が850°Cまでの定格運転と、950°Cまでの高温試験運転がある。

HTTRは1998年11月10日に初臨界に達した後、1999年9月から出力上昇試験を開始し、2001年12月7日に原子炉出力30MW、原子炉出口冷却材温度850°Cを達成した^{3),4)}。2002年3月6日には定格運転(原子炉冷却材温度850°Cまでの運転)の使用前検査合格証を取得した。2003年3月からは高温ガス炉の安全性を実証する目的で安全性実証試験が行われている^{5),6)}。

さらに、2004年3月31日から原子炉出口冷却材温度が950°Cとなる高温試験運転の出力上昇試験を開始し⁷⁾、2004年4月19日には原子炉出力30MW、原子炉出口冷却材温度950°Cを達成した^{8),9)}。高温ガス炉による冷却材温度については、過去に独国の高温ガス実験炉(AVR)により原子炉圧力容器内において950°Cが達成されているが、HTTRで行われた運転では950°Cの冷却材を原子炉圧力容器外部に取り出したもので、HTTRが世界で初めて成功したものである。その後、2004年6月24日には高温試験運転(原子炉冷却材温度950°Cまでの運転)の使用前検査合格証を取得した。

HTTRの主冷却系に設置されている熱交換器は、原子炉で発生した30MWの熱を除熱しつつ原子炉出口冷却材温度850°C/950°Cを達成する熱交換性能を有していなければならない。すなわち、HTTRの熱交換器は設計時に想定された範囲内の熱交換性能が確保されていない¹⁰⁾。

本報では、これまでに行われた試験運転及び供用運転で得られたデータを用いて主冷却系に設置されている熱交換器のうち中間熱交換器(IHX: Intermediate heat exchanger)について熱交換性能を評価した。また、設計時におけるIHXの熱交換性能との比較を行い、設計時に想定された熱交換性能が確保されていることの確認及びIHXの熱交換性能設計手法の妥当性について検討した。

2. 設備の概要

2.1 HTTR の概要

HTTRの冷却設備系統をFig. 2.1に示す。HTTRの原子炉冷却設備は、通常運転時に原子炉を冷却する主冷却設備、原子炉停止後に原子炉の残留熱を除去する補助冷却設備、原子炉圧力容器の周囲に設置した水冷管により1次遮へい体を冷却するとともに補助冷却設備による炉心の冷却が期待できないような事故時にも原子炉の残留熱を除去する炉容器冷却設備で構成される。主冷却設備は1次冷却設備として中間熱交換器（IHX：Intermediate Heat Exchanger）と1次加圧水冷却器（PPWC：Primary Pressurized Water Cooler）の2種類の熱交換器を並列に配置しており、IHXの2次側に2次冷却設備として2次加圧水冷却器（SPWC：Secondary Pressurized Water Cooler）を配置している。原子炉内で発生した熱は、これらの熱交換器を経由して最終的に加圧水冷却設備に設置されている加圧水空気冷却器（ACL：Air-cooler）より大気へ放散する。

現在、IHXの2次冷却系統は原子炉で発生した熱を大気へと放散する加圧水冷却系統へと接続されているが、将来、ISプロセスによる水素製造設備へと接続することが計画されている。

HTTRの運転には、2つの原子炉出口冷却材温度運転モードと2つの系統的な運転モードがある。原子炉出口冷却材温度運転モードについては、原子炉出力30MWで原子炉出口冷却材温度が850℃となる「定格運転モード」と、原子炉出口冷却材温度が950℃となる「高温試験運転モード」がある。これらの運転モードについては、1次冷却材流量を変化させることで原子炉出口冷却材温度を変化させている。また系統的な運転モードには、原子炉出力30MWの時にPPWCのみで30MWの除熱を行う「単独運転」と、原子炉出力30MWの時に、PPWCで20MW、IHXで10MWの除熱を行う「並列運転」がある。HTTRではこれら2つの運転モードが組み合わされており、運転モードは通常「定格／単独運転モード」等のように呼ばれている。

2.2 1次ヘリウム冷却設備の概要

Table 2.1 に1次ヘリウム冷却設備の設計仕様、Fig. 2.2 に1次ヘリウム冷却設備の概要図を示す。1次ヘリウム冷却設備は、1次冷却材を循環させて炉心を冷却する設備であり、原子炉圧力容器、1次ヘリウム循環機（PGC）、IHX、PPWC、1次ヘリウム配管及び弁類などで構成されており、これらの設備は原子炉格納容器内に設置されている。

単独運転では、炉心で加熱された高温の1次冷却材が全流量、圧力容器に接続する二重管の内管を通してPPWCに送られる。PPWCで加圧水と熱交換して低温となった1次冷却材は、PPWCに接続されている3台の1次ヘリウム循環機に送られる。1次ヘリウム循環機で昇圧された1次冷却材は、各熱交換器の外胴を経由して二重管の内管と外管の間の環状部を通り原子炉圧力容器に還流する。また、単独運転時には二重管の内管からIHX内に至る1次冷却材の自然循環を防止する目的で、PPWCより出た低温の1次冷却材をバイパス配管経由でわずかながらIHXに流入させている。

並列運転では、炉心で加熱された高温の1次冷却材は、圧力容器に接続する二重管の内管を通して二重管分岐部で分岐した後にはPPWC及びIHXに2:1の割合で送られる。PPWCで加圧水と、

IHX で 2 次冷却材（ヘリウム）と熱交換して低温となった 1 次冷却材は、PPWC に 3 台、IHX に 1 台接続されている 1 次ヘリウム循環機に送られる。それぞれの 1 次ヘリウム循環機で昇圧された 1 次冷却材は、各熱交換器の外胴を經由して二重管の内管と外管の間の環状部を通り、二重管分岐部で合流した後原子炉圧力容器に還流する。

なお、PPWC では単独運転と並列運転時において交換熱量が異なるが、PPWC 内の 1 次冷却材が通過する流路を変更して伝熱面積を変えることにより交換熱量を変更している。この際、PPWC から 1 次ヘリウム循環機へと向かう配管には単独運転用と並列運転用がある。

2.3 2 次ヘリウム冷却設備の概要

2 次ヘリウム冷却設備は、並列運転時に動作し、2 次冷却材（ヘリウム）を循環させて 1 次冷却材を冷却する設備であり、2 次ヘリウム循環機（SGC）、IHX、SPWC、2 次ヘリウム配管及び弁類などで構成されている。これらの設備は原子炉格納容器内に設置されている。

Table 2.2 に 2 次ヘリウム冷却設備の設計仕様、Fig. 2.3 に 2 次ヘリウム冷却設備の概要図を示す。中間熱交換器で 1 次冷却材より熱を受け取った高温の 2 次冷却材は、中間熱交換器に接続する二重管の内管を通して SPWC に送られる。SPWC では加圧水と熱交換を行い、低温の 2 次冷却材は SGC に送られる。SGC で昇圧された 2 次冷却材は、SPWC の内胴と外胴の間を經由して二重管の内管と外管の間の環状部を通り、IHX へと還流する。なお、IHX の伝熱管が破損した場合に 1 次冷却材が 2 次冷却システムへ侵入するのを防止する目的で、IHX における 2 次冷却材の圧力は 1 次冷却材の圧力よりも高くなるよう制御されている。

2.4 中間熱交換器（IHX）の概要

IHX の構造図を Fig. 2.4、伝熱管部の写真を Fig. 2.5、IHX の設計仕様を Table 2.3 にそれぞれ示す。IHX はたて置ヘリカルコイル向流型ガス-ガス熱交換器であり、胴部は二重胴構造になっている。二重胴の内胴内側には、ライナにより表面を覆った断熱材が設けられている。IHX には 96 本の伝熱管が設けられており、6 層の積層構造で配置されている。さらに、IHX には伝熱を促進する目的で伝熱促進板が設けられている。伝熱促進板の構造を Fig. 2.6、Fig. 2.7 に示す。伝熱促進板は IHX 内の伝熱管の間に取り付けられている。通常の熱交換器内の伝熱は熱伝達により行われるが、IHX では伝熱促進板が取り付けられていることにより、熱伝達による伝熱に加えて熱ふく射による伝熱も行われている。

炉心で加熱された高温の 1 次冷却材は二重管内管を通して下部の 1 次冷却材二重ノズル内側より流入し、伝熱管の外側を上昇しながら 2 次冷却材（ヘリウムガス）により冷却されて 1 次冷却材出口ノズルより PGC に導かれる。PGC で昇圧された 1 次冷却材は、1 次冷却材入口ノズルより内胴と外胴の間の環状部に流入して胴部を冷却しながら下降し、二重ノズル、二重管外管と内管の間の環状部を経て原子炉圧力容器へと還流する。

一方、胴上部に設けられた二重管外管から流入した低温の 2 次冷却材は、4 本の分配管に分配され、上部の 2 次冷却材入口ノズルに導かれる。2 次冷却材入口ノズルに流入した 2 次冷却材は、低温管板で伝熱管に分配され、伝熱管内を下降しながら加熱されて IHX 下部の高温ヘッダ内に再び集められる。この高温の 2 次冷却材は内筒内を上昇し、IHX 上部の 2 次冷却材二重ノズルより二重管

内管を経てSPWCへと還流する。

単独運転時には、二重管の内管内からIHX内に至る1次冷却材の自然循環を防止する目的でバイパスラインが設けられている。二重管の環状部を流れる低温の1次冷却材の一部は、IHXの二重胴の環状部を経由してIHXの胴部側に設けたバイパスラインへと導かれる。バイパスラインに導かれた1次冷却材はIHXの上部からIHX内へ流入し、ヘリカルコイル伝熱管の外側を下降してゆく。その後、下部の1次冷却材二重ノズルの内側より二重管の内管内へ流入し、1次加圧水冷却器へと還流する。

2.5 1次/2次ヘリウム循環機の概要

1次/2次ヘリウム循環機の構造図をFig. 2.8、1次ヘリウム循環機の設計仕様をTable 2.4に、2次ヘリウム循環機の設計仕様をTable 2.5にそれぞれ示す。

1次/2次ヘリウム循環機は縦型遠心式動圧ガス軸受型循環機であり、1次ヘリウム循環機はPPWCに3台、IHXに1台設置されており、2次ヘリウム循環機はSPWCに1台設置されている。1次/2次ヘリウム循環機は同じ構造であるが、それらの設置系統および設置場所により設備仕様が異なる。1次/2次ヘリウム循環機はインペラ、上部・下部ケーシング、熱遮へい板、電動機、冷却ファン、冷却水ジャケット、フィルタなどで構成されている。

1次/2次ヘリウム循環機は、1次/2次冷却材の系外への漏洩を防止するため、駆動軸及び電動機をケーシング内に組込んだ密閉型となっている。電動機とインペラの主軸は一体構造であり、ジャーナル軸受及びスラスト軸受により支持されている。両軸受は動圧型のガス軸受であり、主軸は高速回転時にはそれぞれの軸受と接触しない構造となっている。さらに、1次/2次冷却材中の微粒子などが軸受に混入するのを抑制するために、上部ケーシング内にはフィルタが設けられている。

1次/2次ヘリウム循環機は、周波数変換器により電動機の回転数を連続的に変えて、運転状態に応じた1次/2次冷却材の循環流量を確保している。また、1次/2次ヘリウム循環機は必要に応じ電氣的制動により10秒以内に停止する構造となっている。

並列運転時にはIHX用及びPPWC用1次ヘリウム循環機を合計4台、及びSPWC用2次ヘリウム循環機を1台運転する。一方、単独運転時にはPPWC用1次ヘリウム循環機を3台運転する。

3. IHX の熱流動設計

3.1 概要

本章では中間熱交換器を設計する際に行った必要伝熱面積評価及び流動評価の手法について述べる⁸⁾。

3.1.1 IHX 設置の目的

原子炉と熱利用系を接続する方法として、原子炉と熱利用系を直接接続する方法と、原子炉と熱利用系の間に中間ループを設ける間接接続が挙げられる。HTTR では中間ループ、すなわち IHX を設けて熱を取り出す間接接続を採用している。中間ループが採用された理由は以下の通りである。

- ① 炉心で発生する核分裂生成物の熱利用系への以降、あるいは熱利用系から原子炉冷却系への水素透過を防止することができる。
- ② 熱利用系の使用状態の変動が直接原子炉に波及しないように緩衝的役割を持たせることができる。
- ③ 1次冷却系の配管破断事故の影響が直接熱利用系に波及しないようにすることができる。
- ④ 熱利用系を原子炉格納容器の外に設置することが可能となる。このことは、大気開放下で使用され、メンテナンスの頻度が多くなると予想される熱利用系の設計に好都合となる。

3.1.2 IHX の機能条件

設計時に IHX に要求された機能条件は以下の通りである。

- ① 30MW 運転時、IHX は約 10MW の交換熱量を有すること。また、30MW 運転時の交換熱量は、伝熱管の汚れ及び所定の伝熱管プラグ（補償用）を考慮しても達成できること。
- ② IHX の原子炉冷却材バウンダリを構成する部分（外胴、伝熱管等）は非延性破壊を防止するとともに、通常運転時、異常な過渡変化時、及び事故時において健全性を確保でき、1次ヘリウム中の放射性物質を2次ヘリウム中及び外部へ放出させないこと。
- ③ IHX の伝熱管と胴及び伝熱管相互の熱膨張差は十分吸収できること。
- ④ IHX の本体支持は浮動支持とすること。
- ⑤ 1次ヘリウム及び2次ヘリウムの流動により、IHX の伝熱管に異常な振動が発生しないようにすること。
- ⑥ 30MW 運転時の IHX における圧力損失を、1次ヘリウム側：10kPa 以下、2次ヘリウム側：60kPa 以下とすること。これらはヘリウム循環機の昇圧能力より決められた条件である。
- ⑦ PPWC 単独運転時における IHX 待機状態で中間熱交換器が加熱しないよう1次冷却材バイパスノズルを設けること。

3.1.3 IHX の基本構造方針

IHX の基本構造は以下の方針に基づき設定された。

- ① IHX の熱交換方式は 1 次冷却材が胴側を、2 次冷却材が管側を流れる交流方式のたて置シェルアンドチューブ型とする。
- ② IHX の伝熱管形式は、輻射体から伝熱管へのふく射伝熱を利用した伝熱促進板を組み合わせたヘリカルコイル型平滑管とする。
- ③ IHX の高温管束集合部は、伝熱管と伝熱管支持材との相対的な熱膨張差を小さくすることが可能なマニホールド形式とする。
- ④ IHX の胴の安全性向上のために、胴内側に沿って熱交換を終えた低温の 1 次ヘリウムを流す外胴強制冷却式構造とする。低温側 1 次ヘリウムの圧力は IHX の PGC で昇圧した後高温側 1 次ヘリウム圧力より高くして外胴冷却を行う。
- ⑤ 高温部管台（1 次冷却材二重ノズル、2 次冷却材二重ノズル）は、熱応力、熱変形を均等に緩和できる構造とするために軸対称位置に設置する。
- ⑥ 製作、組立て後、管束部などの内部構造物を引抜く必要性はないこと、及び熱交換器の小型化、1 次冷却材の漏洩防止などを考慮して本体フランジのない構造とする。
- ⑦ IHX の、自重は上部鏡板に設置するコンスタントハンガで支持する。また、地震時の荷重は胴及び下部鏡板に設置するスナバで支持する。

3.2 伝熱面積評価

3.2.1 設計仕様

設計仕様はプラント全体の熱過渡解析により決定された値が用いられた。Table 3.1 に IHX の設計仕様値を示す。伝熱計算を求めるにあたって、表中に示されたノミナル値 Nom が用いられた。

また、IHX の主要諸元を Table 3.2 に示す。

3.2.2 算出方法

IHX の設計では、設計仕様に与えられた値を用いて IHX の熱貫流率の算出を行った後に、有効伝熱面積が算出された。なお、ここで扱う有効伝熱面積はヘリカルコイル伝熱管部、上部・下部連絡管部とする。

熱貫流率は以下の式で算出している。

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_o} + \frac{d_o}{2\lambda_t} \cdot \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right) + \frac{1}{h_i} \cdot \frac{d_o}{d_i} \dots\dots\dots (3.1)$$

- d_o : 伝熱管外径 (m)
- d_i : 伝熱管内径 (m)
- h_o : 胴側 (1 次冷却材側) 熱伝達率 ($W/m^2 \cdot K$)
- h_i : 管側 (2 次冷却材側) 熱伝達率 ($W/m^2 \cdot K$)
- U : 熱貫流率 ($W/m^2 \cdot K$)

λ_t : 伝熱管熱伝導率 (W/m·K)

次に、Eq.(3.1)で用いられている熱伝達率について記述する。

① 胴側 (1次冷却材側) のヘリカルコイル伝熱管部熱伝達率

胴側 (1次冷却材側) のヘリカルコイル伝熱管部熱伝達率として以下の式が用いられている。

$$h_o = \frac{\lambda_o}{d_o} \cdot Nu_o \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

$$Nu_o = C_o \cdot Re_o^{0.8} \cdot Pr_o^{0.4} \cdot C \quad (800 < Re_o \leq 7000) \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

$$Nu_o = 0.33 \cdot Re_o^{0.6} \cdot Pr_o^{0.3} \cdot C_H \cdot C \quad (7000 < Re_o) \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

$$C = f(F \cdot \eta_t \cdot \eta_c \cdot \eta_\theta \cdot \eta_s \cdot E) \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

- C : 管配列、製作公差などに依存した係数 (-)
- C_H : 管群配列による係数 (-)
- C_o : 伝熱管偏平、偏心を考慮しない基準値による係数 (-)
- d_o : 伝熱管外径 (m)
- E : 輻射伝熱促進効果係数 (-)
- F : 胴側 (1次冷却材側) 熱伝達補正係数 (-)
- h_o : 胴側 (1次冷却材側) 熱伝達率 (W/m²·K)
- Nu_o : 胴側 (1次冷却材側) Nusselt 数 (-)
- Pr_o : 1次冷却材側 Prandtl 数 (-)
- Re_o : 胴側 (1次冷却材側) Reynolds 数 (-)
- η_t : 伝熱管偏平による係数 (-)
- η_c : 伝熱管偏心による係数 (-)
- η_θ : 斜交流による係数 (-)
- η_s : 伝熱管流れ方向ピッチによる係数 (-)
- λ_o : 1次冷却材熱伝導率 (W/m·K)

ここで、Eq. (3.3)はヘリカルコイル形状における基礎研究等を反映させた式^{11),12)}であり、Eq. (3.4)は Fishenden-Saunders の式¹⁰⁾である。

② 胴側 (1次冷却材側) の上部・下部連絡管部熱伝達率

胴側 (1次冷却材側) の上部・下部連絡管部熱伝達率は以下の管群平行流の式¹³⁾が用いられている。

$$h_o = \frac{\lambda_o}{d_o} \cdot Nu_o \dots\dots\dots(3.6)$$

$$Nu_o = 0.023 \cdot Re_d^{0.8} \cdot Pr_o^{1/3} \cdot \left[1 + \left(\frac{d_o}{L} \right) \right] \dots\dots\dots(3.7)$$

- d_o : 等価直径 (m)
- L : 伝熱管平行流部長さ (m)
- h_o : 胴側 (1次冷却材側) 熱伝達率 (W/m²·K)
- Nu_o : 胴側 (1次冷却材側) Nusselt 数 (-)
- Pr_o : 1次冷却材側 Prandtl 数 (-)
- Re_o : 胴側 (1次冷却材側) 等価 Reynolds 数(-)
- λ_o : 1次冷却材熱伝導率 (W/m·K)

③ 管側 (2次冷却材側) ヘリカルコイル伝熱管部熱伝達率

管側 (2次冷却材側) のヘリカルコイル伝熱管部熱伝達率として以下に示す森・中山の式¹⁴⁾が用いられている。

$$h_i = \frac{\lambda_i}{d_i} \cdot Nu_i \dots\dots\dots(3.8)$$

$$Nu_i = 0.0223 \cdot \frac{Pr_i}{Pr_i^{0.6} - 0.057} \cdot Re_i^{5/6} \cdot \left(\frac{d_i}{D_m} \right)^{1/12} \cdot \left\{ 1 + \frac{0.0615}{[Re_i \cdot (d_i/D_m)^{1/4}]^{1/6}} \right\} \cdot (Re_i > 2.0 \times 10^4 \times (d_i/D_m)^{0.32}) \dots\dots\dots(3.9)$$

- D_m : ヘリカルコイル平均曲率径 (m)
- d_i : 伝熱管内径 (m)
- h_i : 管側 (2次冷却材側) 熱伝達率 (W/m²·K)
- Nu_i : 管側 (2次冷却材側) Nusselt 数 (-)
- Pr_i : 2次冷却材側 Prandtl 数 (-)
- Re_i : 管側 (2次冷却材側) Reynolds 数(-)
- λ_i : 2次冷却材熱伝導率 (W/m·K)

④ 管側 (2次冷却材側) の上部・下部連絡管部熱伝達率

管側 (2次冷却材側) の上部・下部連絡管部熱伝達率は以下の基礎研究等を反映させた Colburn の式¹⁵⁾が用いられている。

$$h_i = \frac{\lambda_i}{d_i} \cdot Nu_i \dots\dots\dots(3.10)$$

$$Nu_i = 0.021 \cdot Re_i^{0.8} \cdot Pr_i^{1/3} \dots\dots\dots(3.11)$$

- d_i : 伝熱管内径 (m)
- h_i : 管側 (2次冷却材側) 熱伝達率 (W/m²·K)
- Nu_i : 管側 (2次冷却材側) Nusselt 数 (-)
- Pr_i : 2次冷却材側 Prandtl 数 (-)
- Re_i : 管側 (2次冷却材側) Reynolds 数(-)
- λ_i : 2次冷却材熱伝導率 (W/m·K)

3.2.3 有効伝熱面積評価結果

伝熱面積を算出した結果を Table 3.3 に示す。設計上の必要伝熱面積は 222m² に対して、製作時の伝熱面積は 244m² であり、その時のヘリカルコイル伝熱管部平均高さは 4.87m であった。また、

3.3 圧力損失評価

3.3.1 設計仕様

設計仕様はプラント全体の熱過渡解析により決定された値を用いる。本評価では Table 3.1 に示された IHX の設計仕様値を用いた。なお、ノミナル値 Nom は伝熱面積 222m² を算出する際に用いた条件であり、最大値 Max は 2次冷却材流量が最大となり、2次冷却材側の圧力損失が最大になると考えられる状態である。

3.3.2 算出方法

IHX の圧力損失は以下の式で算出された。

$$\Delta P = \Delta P_f + \Delta P_o + \Delta P_a \dots\dots\dots(3.12)$$

- ΔP : 圧力損失 (Pa)
- ΔP_f : 摩擦損失 (Pa)
- ΔP_o : 拡大・縮小損失 (Pa)
- ΔP_a : 加速損失 (Pa)

次に、Eq.(3.1)で用いられている各圧力損失について記述する。

① 胴側 (1次冷却材側) 圧力損失 (ヘリカルコイル伝熱管及び下部連絡管の一部)

胴側 (1次冷却材側) のヘリカルコイル伝熱管及び下部連絡管の一部の圧力損失として以下の式を用いている。

$$\Delta P_f = 4 \cdot C_f \cdot \eta \cdot \frac{\gamma_0}{2} \cdot v_0^2 \dots\dots\dots (3.13)$$

$$\Delta P_e = C_e \cdot \frac{\gamma_0}{2} \cdot v_0^2 \dots\dots\dots (3.14)$$

- C_f : 管配列、Reynolds 数などに依存した係数 (-)
- C_e : 拡大・縮小損失係数 (-)
- v_0 : 1 次冷却材流速 (m/s)
- : 拡大・縮小損失を求める場合
- : 拡大 拡大前流速
- : 縮小 縮小後流速
- γ_0 : 1 次冷却材比重量 (kg/m³)
- η : 流れ方向管列数 (-)
- ΔP_f : 摩擦損失 (Pa)
- ΔP_e : 拡大・縮小損失 (Pa)

② 胴側 (1 次冷却材側) 圧力損失 (上部連絡管及び下部連絡管の一部)

胴側 (1 次冷却材側) 上部連絡管及び下部連絡管の一部の圧力損失は以下の式が用いられている。

$$\Delta P_f = 0.184 \cdot Re_d^{-1/5} \cdot \frac{L}{d_e} \cdot \frac{\gamma_0}{2} \cdot v_0^2 \dots\dots\dots (3.15)$$

$$\Delta P_e = C_e \cdot \frac{\gamma_0}{2} \cdot v_0^2 \dots\dots\dots (3.16)$$

- C_e : 拡大・縮小損失係数 (-)
- d_e : 等価直径 (m)
- L : 流路長さ (m)
- Re_d : 等価レイノルズ数 (-)
- v_0 : 1 次冷却材流速 (m/s)
- : 拡大・縮小損失を求める場合
- : 拡大: 拡大前流速
- : 縮小: 縮小後流速
- γ_0 : 1 次冷却材比重量 (kg/m³)
- ΔP_f : 摩擦損失 (Pa)
- ΔP_e : 拡大・縮小損失 (Pa)

③ 胴側（1次冷却材側）圧力損失（アニュラス部）

胴側（1次冷却材側）上アニュラス部の圧力損失は以下の式が用いられている。

$$\Delta P_f = f \cdot \frac{L}{d_e} \cdot \frac{\gamma_0}{2} \cdot v_0^2 \dots\dots\dots(3.17)$$

$$\Delta P_e = C_e \cdot \frac{\gamma_0}{2} \cdot v_0^2 \dots\dots\dots(3.18)$$

- C_e : 拡大・縮小損失係数 (-)
- d_e : 等価直径 (m)
- f : アニュラス部摩擦係数 (-)
- L : 流路長さ (m)
- Re_d : 等価レイノルズ数 (-)
- v_0 : 1次冷却材流速 (m/s)
- 拡大・縮小損失を求める場合
- 拡大 : 拡大前流速
- 縮小 : 縮小後流速
- γ_0 : 1次冷却材比重量 (kg/m³)
- ΔP_f : 摩擦損失 (Pa)
- ΔP_e : 拡大・縮小損失 (Pa)

④ 管側（2次冷却材側）圧力損失（ヘリカルコイル伝熱管部）

管側（2次冷却材側）のヘリカルコイル伝熱管部の圧力損失として以下の式が用いられている。

$$\Delta P_f = f \cdot \frac{L}{d_i} \cdot \exp\left(\frac{\pi d_i}{R_m}\right) \cdot \frac{\gamma_i}{2} \cdot v_i^2 \dots\dots\dots(3.19)$$

$$\Delta P_a = \gamma_{i2} v_{i2}^2 - \gamma_{i1} v_{i1}^2 \dots\dots\dots(3.20)$$

- d_i : 伝熱管内径 (m)
- f : 管内摩擦係数 (-)
- L : 流路長さ (m)
- R_m : ヘリカルコイル曲率半径 (m)
- v_i : 2次冷却材流速 (m/s)
- v_{i1} : 2次冷却材上流側流速 (m/s)
- v_{i2} : 2次冷却材下流側流速 (m/s)
- γ_i : 2次冷却材比重量 (kg/m³)
- γ_{i1} : 2次冷却材上流側比重量 (kg/m³)

- γ_{i2} : 2次冷却材下流側比重量 (kg/m³)
- ΔP_f : 摩擦損失 (Pa)
- ΔP_a : 加速損失 (Pa)

⑤ 管側 (2次冷却材側) 圧力損失 (上部・下部連絡管部)

管側 (2次冷却材側) の上部・下部連絡管部の圧力損失として以下の式が用いられている。

$$\Delta P_f = f \cdot \frac{L}{d_i} \cdot \frac{\gamma_i}{2} \cdot v_i^2 \dots\dots\dots(3.21)$$

$$\Delta P_e = C_e \cdot \frac{\gamma_i}{2} \cdot v_i^2 \dots\dots\dots(3.22)$$

$$\Delta P_a = \gamma_{i2} v_{i2}^2 - \gamma_{i1} v_{i1}^2 \dots\dots\dots(3.23)$$

- C_e : 拡大・縮小損失係数 (-)
- d_i : 上部・下部連絡管内径 (m)
- f : 管内摩擦係数 (-)
- L : 流路長さ (m)
- R_m : ヘリカルコイル曲率半径 (m)
- v_i : 2次冷却材流速 (m/s)
 拡大・縮小損失を求める場合
 拡大: 拡大前流速
 縮小: 縮小後流速
- v_{i1} : 2次冷却材上流側流速 (m/s)
- v_{i2} : 2次冷却材下流側流速 (m/s)
- γ_i : 2次冷却材比重量 (kg/m³)
- γ_{i1} : 2次冷却材上流側比重量 (kg/m³)
- γ_{i2} : 2次冷却材下流側比重量 (kg/m³)
- ΔP_f : 摩擦損失 (Pa)
- ΔP_e : 拡大・縮小損失 (Pa)
- ΔP_a : 加速損失 (Pa)

⑥ 管側 (2次冷却材側) 圧力損失 (内筒内部)

管側 (2次冷却材側) の上部・下部連絡管部の圧力損失として以下の式が用いられている。

$$\Delta P_f = f \cdot \frac{L}{d_i} \cdot \frac{\gamma_i}{2} \cdot v_i^2 \dots\dots\dots(3.24)$$

d_i	:	内筒内径 (m)
f	:	内筒内側ライナー摩擦係数 (-)
L	:	流路長さ (m)
R_m	:	ヘリカルコイル曲率半径 (m)
v_i	:	2次冷却材流速 (m/s)
		拡大・縮小損失を求める場合
		拡大：拡大前流速
		縮小：縮小後流速
γ_i	:	2次冷却材比重量 (kg/m^3)
ΔP_f	:	摩擦損失 (Pa)

3.3.3 圧力損失評価結果

定格運転及び高温試験運転時の1次冷却材側の圧力損失評価結果を Table 3.4(1)及び Table 3.4(2)に示す。どちらの運転モードに対しても機能条件として要求された圧力損失 (10kPa 以下) が満足されることが示された。以下に、定格・並列運転時の全体圧力損失と1次ヘリウム循環機の昇圧能力の関係を示す。

$$\begin{aligned}
 & 19\text{kPa (原子炉圧力容器内)} \\
 & + 9\text{kPa (IH)} \\
 & + 15\text{kPa (配管)} \\
 & + 18\text{kPa (その他、バルブ等)} \\
 & = 61\text{kPa} \\
 & < 79\text{kPa (1次ヘリウム循環機最大昇圧能力)}
 \end{aligned} \tag{3.25}$$

さらに、定格運転時の Max、Nom、Min に対する及び2次冷却材側の圧力損失評価結果を Table 3.5に、高温試験運転時の Max、Nom、Min に対する及び2次冷却材側の圧力損失評価結果を Table 3.6に示す。どちらの運転モードに対しても、Nom 条件においては機能条件として要求された圧力損失 (60kPa 以下) が満足されることが示された。以下に、定格・並列運転時の全体圧力損失と2次ヘリウム循環機の昇圧能力の関係を示す。

$$\begin{aligned}
 & 50\text{kPa (IH)} \\
 & + 6\text{kPa (SPWC)} \\
 & + 7\text{kPa (配管)} \\
 & + 14\text{kPa (その他)} \\
 & = 77\text{kPa} \\
 & < 108\text{kPa (2次ヘリウム循環機最大昇圧能力)}
 \end{aligned} \tag{3.26}$$

4. IHX の伝熱性能の評価

4.1 運転データの計測

Table 4.1 に、IHX の性能評価を行うのに用いたデータ点を示す。運転データは HTTR の運転データ保存管理システムに保存されたデータをデータダウンシステムにより取得した。さらに、測定点の設置箇所を Fig. 4.1 に示す。図中の数字は Table 4.1 に記された No. に対応したものである。

また、IHX の伝熱性能の評価を行うのに用いた運転データを Table 4.2 に示す。本評価では、2000 年 4 月の出力上昇試験(1)から 2004 年 7 月の出力上昇試験(5)までの運転期間中の出力が安定している 7:00~7:59 の 1 時間の値を平均して評価を行った。これ以降、運転名については表中に記載されている略称で表記する。

4.2 基礎データの整理

現在、HTTR では原子炉入口冷却材温度を原子炉出力に対応させた目標値に制御している。この原子炉入口 1 次冷却材温度は、以下の式により原子炉入口冷却材混合平均温度を算出した。

$$T_{\text{He}}^{\text{RPV_IN}} = \frac{T_{\text{He}}^{(\text{A})\text{OUT}} \cdot G_{\text{He}}^{(\text{A})} + T_{\text{He}}^{(\text{B})\text{OUT}} \cdot G_{\text{He}}^{(\text{B})} + T_{\text{He}}^{(\text{C})\text{OUT}} \cdot G_{\text{He}}^{(\text{C})} + T_{\text{He}}^{\text{IHX_OUT}} \cdot G_{\text{He}}^{\text{IHX}}}{G_{\text{He}}^{(\text{A})} + G_{\text{He}}^{(\text{B})} + G_{\text{He}}^{(\text{C})} + G_{\text{He}}^{\text{IHX}}} \dots\dots\dots (4.1)$$

$T_{\text{He}}^{\text{RPV_IN}}$:	原子炉入口 冷却材混合平均温度 (°C)
$G_{\text{He}}^{(\alpha)}$:	PPWC PGC α 号機 冷却材流量 (α : A~C) (kg/s)
$T_{\text{He}}^{(\alpha)\text{OUT}}$:	PPWC PGC α 号機 冷却材出口温度 (°C)
$G_{\text{He}}^{\text{IHX}}$:	IHX PGC 冷却材流量 (kg/s)
$T_{\text{He}}^{\text{IHX_OUT}}$:	IHX PGC 冷却材出口温度 (°C)

4.3 IHX の伝熱性能の評価方法

本節では、過去に行われた運転をもとに定格運転時及び高温試験運転時の IHX の伝熱性能を評価することとした^{16)・18)}。一般的に、熱交換器における交換熱量の評価には以下の式が用いられる。

$$Q = UA\Delta T_L \dots\dots\dots (4.2)$$

Q	:	交換熱量 (W)
U	:	熱通過率 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)
A	:	伝熱面積 (m^2)
ΔT_L	:	対数平均温度差 (°C)

本式中の (熱通過率) × (伝熱面積) (以下、UA と表記する) は熱交換器の伝熱性能を表すものであり、各種熱交換器に固有のものである。そこで、本報では IHX の伝熱性能を UA で評価した。

IHX の UA は Eq.(4.2)を変形した以下の式を用いて算出した。

$$(UA)^{IHx} = \frac{Q^{IHx}}{\Delta T_L^{IHx}} \dots\dots\dots (4.3)$$

- (UA)^{IHX} : IHX の UA (W/K)
- Q^{IHX} : IHX における交換熱量 (W)
- ΔT_L^{IHX} : IHX に対する対数平均温度差 (°C)

IHX に対する対数平均温度差は以下の式で与えられる。

$$\Delta T_L^{IHx} = \frac{T_2 - T_1}{\ln(T_2/T_1)} \dots\dots\dots (4.4)$$

$$T_1 = T_{He1}^{IHx_OUT} - T_{He2}^{IHx_IN} \dots\dots\dots (4.5)$$

$$T_2 = T_{He1}^{IHx_IN} - T_{He2}^{IHx_OUT} \dots\dots\dots (4.6)$$

- T_{He1}^{IHX_IN} : IHX 入口 1 次冷却材温度 (°C)
- T_{He1}^{IHX_OUT} : IHX 出口 1 次冷却材温度 (Eq.(4.1)参照) (°C)
- T_{He2}^{IHX_IN} : IHX 入口 2 次冷却材温度 (°C)
- T_{He2}^{IHX_OUT} : IHX 出口 2 次冷却材温度 (°C)

また、IHX での交換熱量は IHX の 2 次側流体が受け取った熱量、すなわち 2 次冷却材が IHX で受け取った熱量とした。

$$Q^{IHx} = Q_{He2}^{IHx} = C_P^{He} G_{He2}^{IHx} (T_{He2}^{IHx_OUT} - T_{He2}^{IHx_IN}) \dots\dots\dots (4.7)$$

- Q^{IHX} : IHX における交換熱量 (W)
- Q_{He2}^{IHX} : IHX における 2 次冷却材受熱量 (W)
- C_P^{He} : IHX における 2 次冷却材比熱 (J/kgK)
- G_{He2}^{IHX} : IHX 2 次冷却材流量 (t/h)
- T_{He2}^{IHX_IN} : IHX 入口 2 次冷却材温度 (°C)
- T_{He2}^{IHX_OUT} : IHX 出口 2 次冷却材温度 (°C)

4.4 IHX の伝熱性能の評価結果

初めに IHX における交換熱量の評価を行った。Fig. 4.2 に交換熱量の評価結果を示す。交換熱量の整理には以下に示す (炉心 1 次冷却材流量) × (1 次冷却材原子炉出入口温度差) を用いた。この値は炉心で 1 次冷却材が受け取った熱量、すなわち炉心での除熱量を表す指標であり、この値と IHX における交換熱量は相関があるため、この値を採用した。

$$G_{\text{Hel}}^{\text{Core}} (T_{\text{Hel}}^{\text{RPV-OUT}} - T_{\text{Hel}}^{\text{RPV-IN}}) \dots\dots\dots (4.8)$$

- $G_{\text{Hel}}^{\text{Core}}$: 炉心 1 次冷却材流量 (kg/s)
 $T_{\text{Hel}}^{\text{RPV-IN}}$: 原子炉入口 1 次冷却材温度 (Eq. (4.1)参照) (°C)
 $T_{\text{Hel}}^{\text{RPV-OUT}}$: 原子炉出口 1 次冷却材温度 (°C)

炉心 1 次冷却材流量は次式により算出した。

$$G_{\text{Hel}}^{\text{Core}} = (G_{\text{Hel}}^{(\text{A})} + G_{\text{Hel}}^{(\text{B})} + G_{\text{Hel}}^{(\text{C})} + G_{\text{Hel}}^{\text{IHX}}) \times 1.02 \dots\dots\dots (4.9)$$

- $G_{\text{Hel}}^{\text{Core}}$ 炉心 1 次冷却材流量 (kg/s)
 $G_{\text{Hel}}^{(\alpha)}$ PPWC PGC α 号機 1 次冷却材流量 (kg/s)
 $G_{\text{Hel}}^{\text{IHX}}$ IHX PGC 1 次冷却材流量 (kg/s)

炉心 1 次冷却材流量に関して流量を 2%増加させているのは、炉心差圧やヒートバランス等の観点から、並列運転時には炉心 1 次冷却材流量が 2%多く流れていることが判明したためである。定格運転及び高温試験運転における交換熱量と $G_{\text{Hel}}^{\text{Core}} (T_{\text{Hel}}^{\text{RPV-OUT}} - T_{\text{Hel}}^{\text{RPV-IN}})$ の間には線形的な相関があることが示され、同じ $G_{\text{Hel}}^{\text{Core}} (T_{\text{Hel}}^{\text{RPV-OUT}} - T_{\text{Hel}}^{\text{RPV-IN}})$ に対する交換熱量はほぼ同じ値となることが示された。

次に、得られた交換熱量を用いて IHX の UA の評価を行った。Fig. 4.3、Fig. 4.4 に UA を示す。Fig. 4.3 は定格運転時、Fig. 4.4 は高温試験運転時における伝熱性能を示している。なお、UA は原子炉入口冷却材温度で整理した。これは、HTTR では原子炉入口冷却材温度を原子炉出力に対応させた目標値に制御していること、及び、原子炉入口 1 次冷却材温度は IHX の 1 次側流体の戻り温度であること等の理由により、UA と原子炉入口 1 次冷却材温度は密接な関係があると考えられるからである。図中には各運転モードに対する UA の設計値を併せて示す。

どちらの運転モードについても UA と原子炉入口冷却材温度の間には比例関係があることが示された。また、全運転を通して UA の値にほぼ変化はなかった。

4.5 伝熱性能の設計値との比較

次に、設計時に想定した伝熱性能と実測より得られた伝熱性能の比較を行った。Table 4.3(1)、Table 4.3(2)に比較の結果を示す。Table 4.3(1)は定格運転に対する比較の結果であり、Table 4.3(2)は高温試験運転に対する比較の結果である。

設計値と評価値の差は、定格運転では約-9%、高温試験運転では-3%程度であり、それぞれ設計時の性能より低くなっている。設計時に想定された出力 30MW における IHX の伝熱性能の許容範囲は+8%~10%であり、本報において算出された伝熱性能は設計時の範囲内にあることを確認した。

よって、IHX の伝熱性能は設計時に想定された伝熱性能が確保されている事を確認した。また、設計時に用いた IHX の伝熱性能評価手法が概ね妥当であることを確認した。

5. 結言

定格熱出力 30MW の高温工学試験研究炉 (HTTR) では、原子炉で発生した熱を加圧水冷却器、中間熱交換器による熱交換を経て、最終的に加圧水空気冷却器により大気に放散している。HTTR の主冷却系熱交換器は原子炉出口冷却材温度 850°C / 950°C を達成しつつ原子炉で発生した 30MW の除熱を行わなければならない、主冷却系の熱交換器は設計時に定めた伝熱性能を有していなければならない。

本報では、HTTR においてこれまで実施してきた出力上昇試験、供用運転のデータから、主冷却系に設置されている熱交換器のうちの中間熱交換器 (IHX) について伝熱性能を評価した。また、設計時における IHX の伝熱性能との比較を行い、設計時に用いた IHX 伝熱性能評価手法の妥当性を検討した。

その結果、運転データより評価した IHX の伝熱性能は設計時に想定された伝熱性能にほぼ近い値を示しており、設計時に想定された許容範囲内の伝熱性能が確保されていることを確認した。

謝辞

本評価を行うにあたり、小森芳廣高温工学試験研究炉開発部長、中澤利雄同部次長、川崎幸三同部次長、及び伊与久達夫 HTTR 技術開発室長に御指導、御助言頂きました。また、運転データの取得にあたり HTTR 試験室各位にご協力をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本原子力研究所：“日本原子力研究所大洗研究所設置変更許可申請書（完本）〔別冊 3 HTTR〕”（2001）
- 2) 齋藤伸三 他：“高温工学試験研究炉の設計と研究開発”，原子力誌, 32, 847（1990）.
- 3) 藤川正剛 他：“HTTR（高温工学試験研究炉）の出力上昇試験”，原子力誌, 1, 361（2002）.
- 4) 中川繁昭 他：JAERI-Tech 2002-069, “高温工学試験研究炉の出力上昇試験 —試験経過及び結果の概要—”（2002）
- 5) Y. Tachibana et al.：“Plan for first phase of safety demonstration tests of the High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR)”, Nucl. Eng. Des., 224, 179（2003）.
- 6) N. Sakaba et al.：“Safety Demonstration Test Plan of HTTR - Overall Program and Result of Coolant Flow Reduction Test”, Proc. of GLOBAL 2003, New Orleans, Nov. 16-20, 2003, p.293 (2003).

- 7) 坂場成昭 他：JAERI-Tech 2003-043, “HTTR 高温試験運転の出力上昇試験計画” (2003).
- 8) 高松邦吉 他：JAERI-Tech 2004-063, “高温工学試験研究炉の出力上昇試験 (高温試験運転) - 試験方法及び結果の概要 - ” (2004)
- 9) S. Fujikawa et al., “Achievement of Reactor-Outlet Coolant Temperature of 950°C in HTTR”, Nucl. Sci. Tech., 41, 12, pp.1245-1254 (2004).
- 10) 馬場治 他：JAERI-M 85-182, “多目的高温ガス炉中間熱交換器設計の現状と課題” (1985).
- 11) 森康夫他：“固体ふく射を利用した伝熱特性向上法の研究 (第 1 報)“, 日本機械学会論文集, 408 (1977).
- 12) 森康夫他：“固体ふく射を利用した伝熱特性向上法の研究 (第 2 報)“, 日本機械学会論文集, 408 (1980).
- 13) 日本機械学会：“伝熱工学資料 第 3 版“, 日本機械学会 (1977)
- 14) 森康夫他：“高負荷加熱による管内伝熱性能の劣化に関する研究“, 日本機械学会論文集, 45, (1979).
- 15) A. P. Colburn, A. I. Ch. E, 29, p174 (1933)
- 16) 梶尾大輔 他：JAERI-Tech 2003-097, “HTTR の加圧水空気冷却器の除熱性能に関する評価 “ (2003).
- 17) 西川兼康 他：“伝熱学“, 理工学社 (1982)
- 18) 日本機械学会：“機械工学便覧 A6 熱工学“, 丸善 (1985)

Table 1.1 Major specification of the HTTR

Thermal power	30MW
Fuel	Uranium dioxide (UO ₂)
²³⁵ U enrichment	3~10% (average 6%)
Fuel assembly type	Pin-in-block type
Core structure material	Graphite
Core height	2.9m
Core diameter	2.3m
Number of main cooling loop	1
Coolant	Helium
Primary coolant pressure	4.0MPa
Reactor inlet coolant temperature	395°C
Reactor outlet coolant temperature	850°C / 950°C *

* Rated operation / High temperature test operation

Table 2.1 Major specification of the primary cooling system

Primary coolant	Helium gas
Number of loop	1
Heat capacity	30MW
Primary coolant flow rate	(Single-loaded operation) PPWC : 45.2t/h/37.0t/h* (Parallel-loaded operation) PPWC : 29.7t/h/24.3t/h* IHX : 14.9 t/h/12.2 t/h*
Operation pressure	4.0MPa
Reactor inlet coolant temperature	395 °C
Reactor outlet coolant temperature	850 °C / 950 °C *
Allowable working pressure	4.8MPa
Allowable working temperature	(Cold-side helium) 430 °C (Hot-side helium) 955 °C

* Rated operation/High temperature test operation

Table 2.2 Major specification of the secondary helium cooling system

Secondary coolant	Helium gas
Number of loop	1
Heat capacity	10MW
Secondary coolant flow mass rate	12.8t/h/10.8t/h*
Operation pressure	4.1 MPa
IHX inlet coolant temperature	250 °C / 240 °C *
IHX outlet coolant temperature	780 °C / 870 °C *
Allowable working pressure	5.1MPa
Allowable working temperature	(Cold-side helium) 350 °C (Hot-side helium) 930 °C

* Rated operation/High temperature test operation

Table 2.3 Major specification of the IHX

Type	Vertical helically coiled counter flow type
Number	1
Heat capacity	10MW
Primary coolant flow mass rate	15t/h/12t/h*
IHX primary coolant temperature	(Inlet) 850°C / 950°C* (Outlet) 390°C
Secondary coolant flow mass rate	14t/h/12t/h*
IHX secondary coolant temperature	(Inlet) 300°C (Outlet) 775°C / 860°C*
Number of heat transfer tube	96
Heat transfer tube outer diameter	31.8mm
Heat transfer tube thickness	3.5mm
Heat transfer tube material	Hastelloy XR
Hot header and hot duct material	Hastelloy XR
Shell outer diameter	2.0m
Total height	11.0m
Outer and inner-shell material	Low-alloy steel
Allowable working pressure	(Outer shell) 4.8MPa (Heat transfer tube) 0.3MPa**
Allowable working temperature	(Outer shell) 430°C (Heat transfer tube) 955°C

* Rated operation / High temperature test operation

** Differential pressure

Table 2.4 Major specification of the primary gas circulator

	IHX PGC	PPWC PGC
Type	Vertical centrifugal/gas bearing type	
Number	1	3
Flow mass rate (maximum)	15t/h for 1 PGC	15t/h for 1 PGC
Head (maximum)	79kPa	108kPa
Allowable working pressure	4.8MPaG	4.8MPaG
Allowable working temperature	430 °C	430 °C
Filter type	Sintering material	
Motor type	Cage type induction motor	
Motor power	190kW	260kW
Number of revolutions	3,000-12,000rpm	3,000-12,000rpm
Frequency converter type	Thyristor-converter	
Material	(Casing)	Low-alloy steel
	(Main shaft)	Low-alloy steel
	(Filter)	Stainless steel

Table 2.5 Major specification of the secondary gas circulator

Type	Vertical centrifugal/gas bearing type
Number	1
Flow mass rate (maximum)	15t/h
Head (maximum)	108kPa
Allowable working pressure	4.8MPaG
Allowable working temperature	430 °C
Filter type	Sintering material
Motor type	Cage type induction motor
Motor power	190kW
Number of revolutions	3,000-12,000rpm
Frequency converter type	Thyristor-converter
Material	(Casing) Low-alloy steel
	(Main shaft) Low-alloy steel
	(Filter) Stainless steel

Table 3.1 Design specification of the IHX

IHX primary coolant temperature	(Inlet) 850 °C / 950 °C (Outlet) 387 °C / 389 °C
IHX primary coolant flow mass rate	14.9t/h / 12.2t/h
IHX secondary coolant temperature	(Inlet) Max : 284 °C / 287 °C Nom : 244 °C / 273 °C Min : 187 °C / 187 °C (Outlet) Max : 744 °C / 822 °C Nom : 782 °C / 869 °C Min : 810 °C / 900 °C
Secondary coolant flow mass rate	Max : 15.0t/h / 12.8t/h Nom : 12.82t/h / 10.82t/h Min : 11.1t/h / 9.6t/h

* Rated operation / High temperature test operation

Table 3.2 Major specification of the IHX

Heat transfer tube material	(Material) Hastelloy XR (Outer diameter) 31.8mm (Thickness) 3.5mm (Number) 96 (Pitch) Axial direction : 47mm Radial direction : 47mm (Layer) 6 layer
Inner shell inner diameter	1352mm
Center tube outer diameter	798mm
Heat transfer enhancement plate thickness	5mm

Table 3.3 Estimation result of heat transfer area for the IHX

	Heat transfer tube	Connection tube		Overall	
		Upper	Lower		
Exchanged heat (kW)	9,535	326	81	9,942	
Heat transfer coefficient ($W/m^2 \cdot K$)*	(Primary)	708	125	99	-
	(Secondary)	1,546	1,198	1,314	-
Heat transmission coefficient ⁽¹⁾ ($W/m^2 \cdot K$)	477	121	135	-	
Logarithmic mean temperature difference (K)	93	134	67	-	
Designed heat transfer area (m^2)	215	20	9	244	
Required minimum heat transfer area (m^2)**	-	-	-	222	

* Mean value shows arithmetic mean value at both end of each area.

** Required minimum heat transfer area is estimated by dividing of designed heat transfer area with 1.1 conveniently.

Table 3.4(1) Estimation result of primary coolant pressure loss for the IHX (Rated operation)

	Annulus	Heat transfer tube	Connection tube		Overall
			Upper	Lower	
Friction loss ΔP_f (kPa)	2.3	3.9	0.0	0.8	7.1
Enlargement-contraction loss ΔP_e (kPa)	1.9	-	0.1	0.2	2.2
Pressure loss ΔP (kPa)*	4.2	3.9	0.1	1.0	9.3

* $\Delta P = \Delta P_f + \Delta P_e$

Table 3.4(2) Estimation result of primary coolant pressure loss (High temperature test operation)

	Annulus	Heat transfer tube	Connection tube		Overall
			Upper	Lower	
Friction loss ΔP_f (kPa)	1.6	2.8	0.0	0.6	5.0
Enlargement-contraction loss ΔP_e (kPa)	1.4	-	0.0	0.1	1.5
Pressure loss ΔP (kPa)*	3.0	2.8	0.0	0.7	6.5

* $\Delta P = \Delta P_f + \Delta P_e$

Table 3.5(1) Estimation result of secondary coolant pressure loss for the IHX (rated operation, Max)

	Heat transfer tube	Connection tube		Annulus	Overall
		Upper	Lower		
Friction loss ΔP_f (kPa)	1.2	47.0	4.2	6.7	59.1
Enlargement-contraction loss ΔP_e (kPa)	-	-	1.5	2.8	4.3
Acceleration loss ΔP_a (kPa)	0.0	2.5	0.0	0.0	2.5
Pressure loss ΔP (kPa)*	1.2	5.7	49.6	9.5	66.0

$$* \quad \Delta P = \Delta P_f + \Delta P_e$$

Table 3.5(2) Estimation result of secondary coolant pressure loss for the IHX (rated operation, Nom)

	Heat transfer tube	Connection tube		Annulus	Overall
		Upper	Lower		
Friction loss ΔP_f (kPa)	1.0	35.9	2.9	4.9	44.7
Enlargement-contraction loss ΔP_e (kPa)	-	-	1.1	2.2	3.2
Acceleration loss ΔP_a (kPa)	0.0	2.2	0.0	0.0	2.2
Pressure loss ΔP (kPa)*	1.0	4.0	38.0	7.1	50.1

$$* \quad \Delta P = \Delta P_f + \Delta P_e$$

Table 3.5(3) Estimation result of secondary coolant pressure loss for the IHX (rated operation, Min)

	Heat transfer tube	Connection tube		Annulus	Overall
		Upper	Lower		
Friction loss ΔP_f (kPa)	0.7	27.8	2.1	4.0	34.6
Enlargement-contraction loss ΔP_e (kPa)	-	-	0.7	1.7	2.4
Acceleration loss ΔP_a (kPa)	0.0	1.8	0.1	0.0	1.9
Pressure loss ΔP (kPa)*	0.7	2.8	29.6	5.7	38.8

$$* \quad \Delta P = \Delta P_f + \Delta P_e$$

Table 3.6(1) Estimation result of secondary coolant pressure loss for the IHX (high temperature test operation, Max)

	Heat transfer tube	Connection tube		Annulus	Overall
		Upper	Lower		
Friction loss ΔP_f (kPa)	37.5	3.1	5.3	1.0	46.9
Enlargement-contraction loss ΔP_e (kPa)	-	1.1	2.3	-	3.3
Acceleration loss ΔP_a (kPa)	2.3	0.1	0.0	0.0	2.4
Pressure loss ΔP (kPa)*	4.3	39.8	7.5	1.0	52.6

$$* \quad \Delta P = \Delta P_f + \Delta P_e$$

Table 3.6(2) Estimation result of secondary coolant pressure loss for the IHX (high temperature test operation, Nom)

	Heat transfer tube	Connection tube		Annulus	Overall
		Upper	Lower		
Friction loss ΔP_f (kPa)	28.2	2.2	4.0	0.7	35.1
Enlargement-contraction loss ΔP_e (kPa)	-	0.7	1.7	-	2.4
Acceleration loss ΔP_a (kPa)	1.8	0.1	0.0	0.0	1.9
Pressure loss ΔP (kPa)*	2.9	30.0	5.7	0.7	39.3

$$* \quad \Delta P = \Delta P_f + \Delta P_e$$

Table 3.6(3) Estimation result of secondary coolant pressure loss for the IHX (high temperature test operation, Min)

	Heat transfer tube	Connection tube		Annulus	Overall
		Upper	Lower		
Friction loss ΔP_f (kPa)	23.0	1.6	3.3	0.6	28.5
Enlargement-contraction loss ΔP_e (kPa)	-	0.5	1.4	-	1.9
Acceleration loss ΔP_a (kPa)	1.6	0.1	0.0	0.0	1.7
Pressure loss ΔP (kPa)*	2.2	24.6	4.7	0.6	32.0

$$* \quad \Delta P = \Delta P_f + \Delta P_e$$

Table 4.1 Measurement item by plant data collecting system

No.	PID No.	Measurement point name
1	24C031	Power range neutron flux (BV)
2	13A130	Reactor inlet helium temperature (wide-range, D)
3	13A131	Reactor outlet helium temperature (wide-range, D)
4	13A240	PPWC HGC (A) revolution
5	13A403	PPWC outlet helium flow mass rate (A)
6	13A151	PPWC HGC (A) helium inlet temperature
7	13A241	PPWC HGC (B) revolution
8	13A404	PPWC outlet helium flow mass rate (B)
9	13A152	PPWC HGC (B) helium inlet temperature
10	13A154~156	PPWC helium temperature Ch. 1~3
11	13A242	PPWC HGC (C) revolution
12	13A405	PPWC outlet helium flow mass rate (C)
13	13A153	PPWC HGC (C) inlet helium temperature
14	13A243	IHX HGC revolution
15	13A401	IHX outlet helium flow mass rate
16	13A161	IHX HGC inlet temperature
17	13A166~168	IHX outlet helium coolant temperature Ch. 1~3
18	13C086	IHX outlet helium pressure
19	13A411	SPWC outlet helium pressure
20	13A413	Primary-secondary pressure difference
21	13A311	Secondary helium IHX inlet temperature
22	13A312	Secondary helium IHX outlet temperature
23	13A300~302	Secondary helium flow mass rate

Table 4.2 Operation data used in the evaluation of heat exchange performance for the IHX

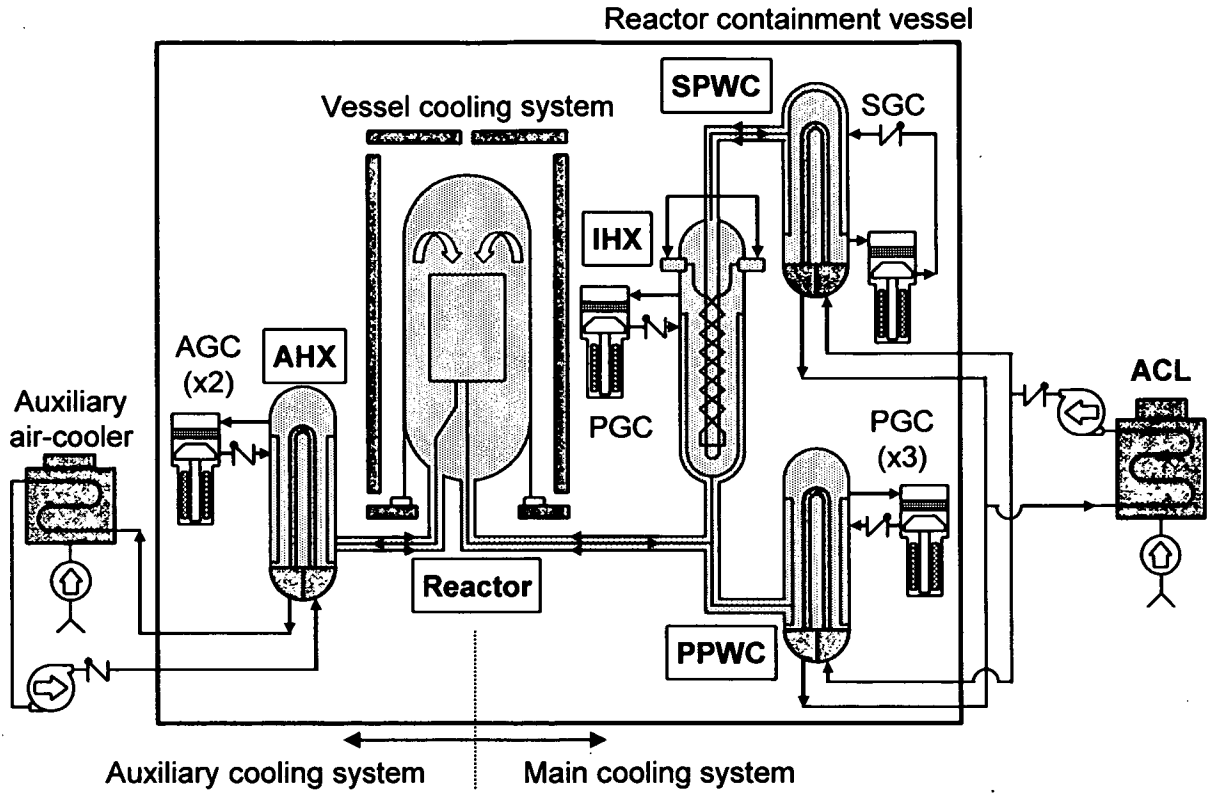
Operation name		Operation mode	Date
Rise-to-power test (1)	PT-1P	Rated / Parallel	2000/5/30~6/6
Rise-to-power test (2)-2	PT-2-2P	Rated / Parallel	2001/2/16~3/1
Rise-to-power test (3)	PT-3P	High temperature / Parallel	2001/5/11~5/16, 5/21~6/8
Rise-to-power test (4)	PT-4P	Rated / Parallel	2002/1/25~3/6
In-service operation (1)	RP-1	Rated / Parallel	2002/5/30~6/17
In-service operation (3)	RP-3	Rated / Parallel	2003/5/16~5/21
Rise-to-power test (5)	PT-5P	High temperature / Parallel	2004/6/2~7/2

Table 4.3(1) Comparison between design value and evaluation one (Rated operation)

		Design	Evaluation (PT-4P, 2002.2.28)
Exchanged heat		9,942kW	9,319kW
IHX primary coolant temperature	(Inlet)	850°C	829°C
	(Outlet)	387°C	383°C
Primary coolant flow mass rate		14.9t/h	14.9 t/h
IHX secondary coolant temperature	(Inlet)	244°C	249°C
	(Outlet)	782°C	751°C
Secondary coolant flow mass rate		12.82t/h	12.92t/h
UA		98.53kW/K	90.54kW/K
Difference		-8.9%	

Table 4.3(2) Comparison between design value and evaluation one (High temperature test operation)

		Design	Evaluation (PT-5P, 2004.6.24)
Exchanged heat		9,942kW	9,672kW
IHX primary coolant temperature	(Inlet)	950°C	939°C
	(Outlet)	389°C	394°C
Primary coolant flow mass rate		12.2 t/h	12.44 t/h
IHX secondary coolant temperature	(Inlet)	237°C	239°C
	(Outlet)	869°C	859°C
Secondary coolant flow mass rate		10.82 t/h	10.81t/h
UA		88.14kW/K	84.99kW/K
Difference		-3.6%	



- IHX : Intermediate heat exchanger
- PPWC : Primary pressurized water cooler
- PGC : Primary gas circulator
- SPWC : Secondary pressurized water cooler
- SGC : Secondary gas circulator
- AHX : Auxiliary heat exchanger
- AGC : Auxiliary gas circulator

Fig. 2.1 The HTTR cooling system

Reactor containment vessel

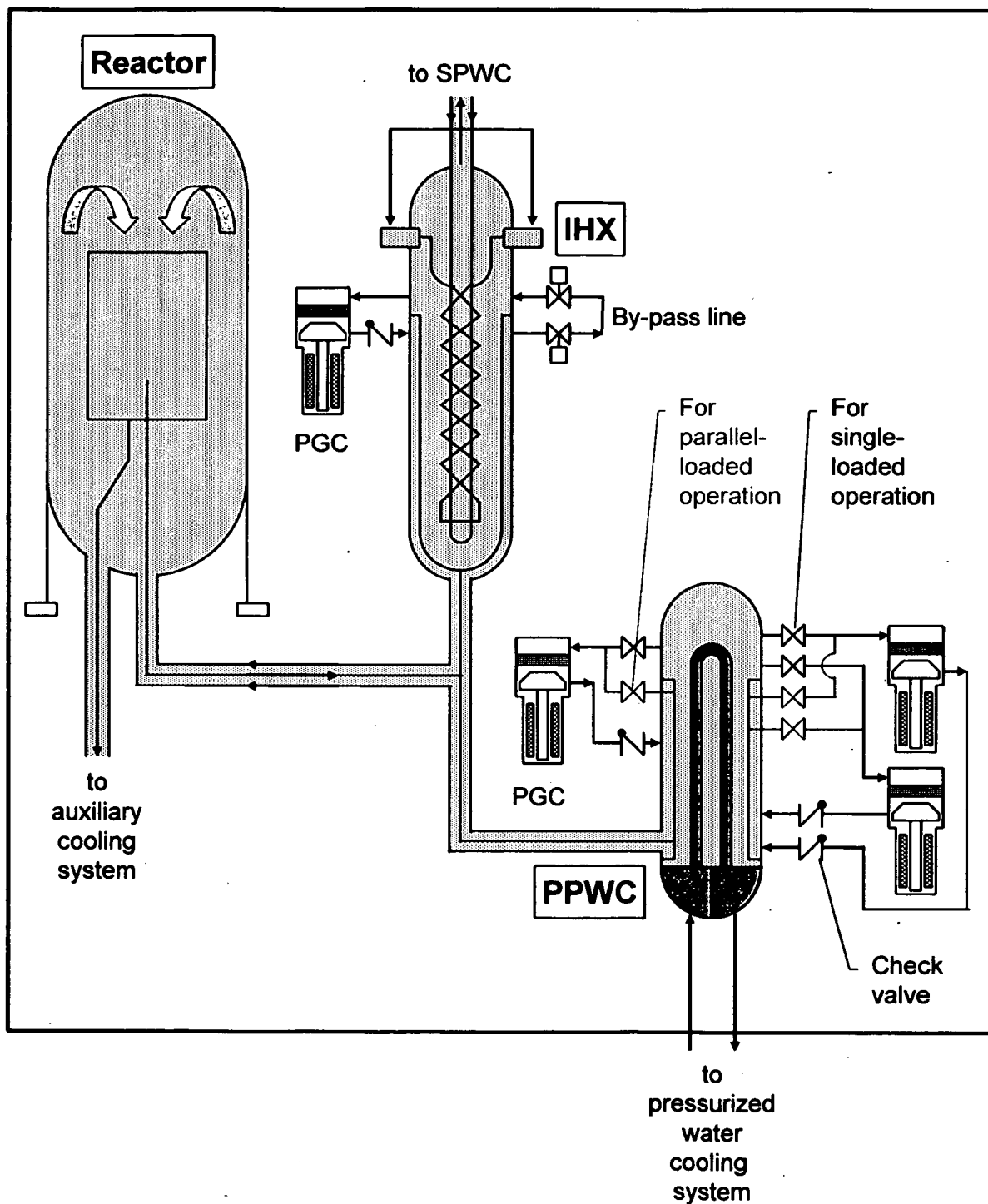


Fig. 2.2 The HTTR primary cooling system

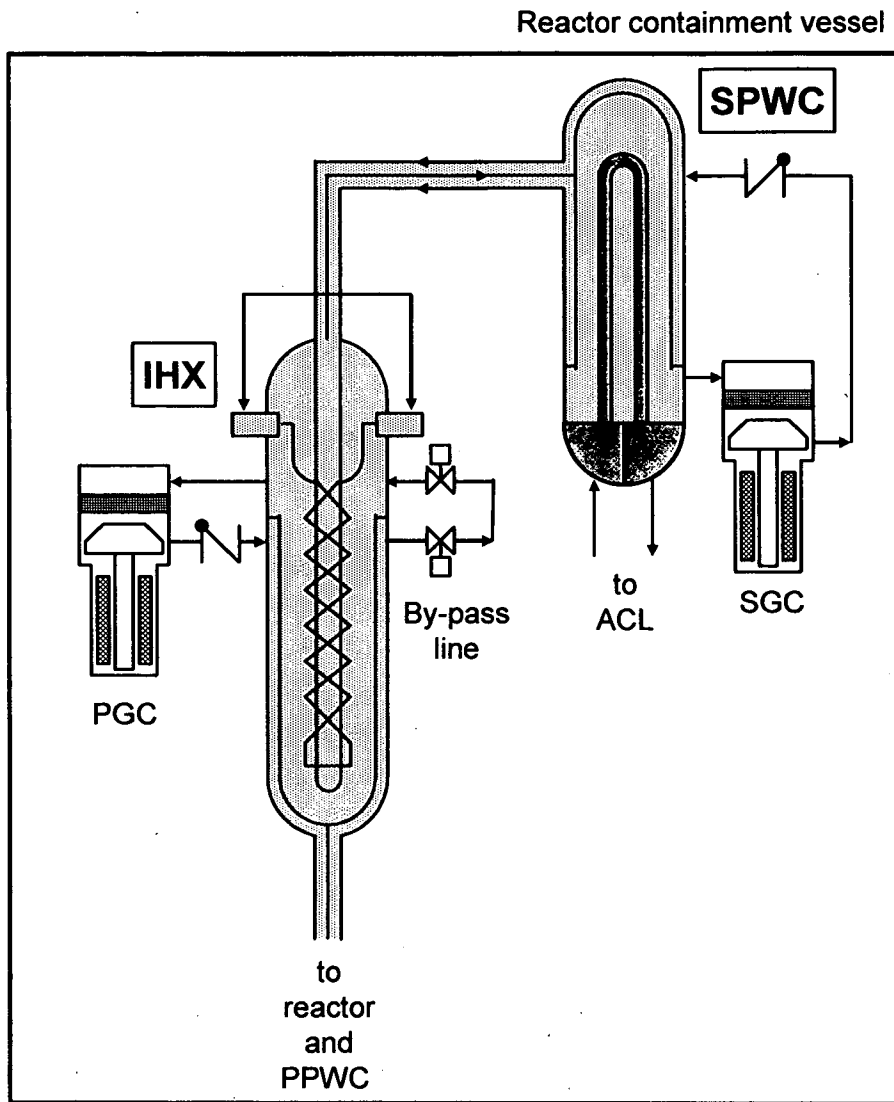


Fig. 2.3 The HTTR secondary helium cooling system

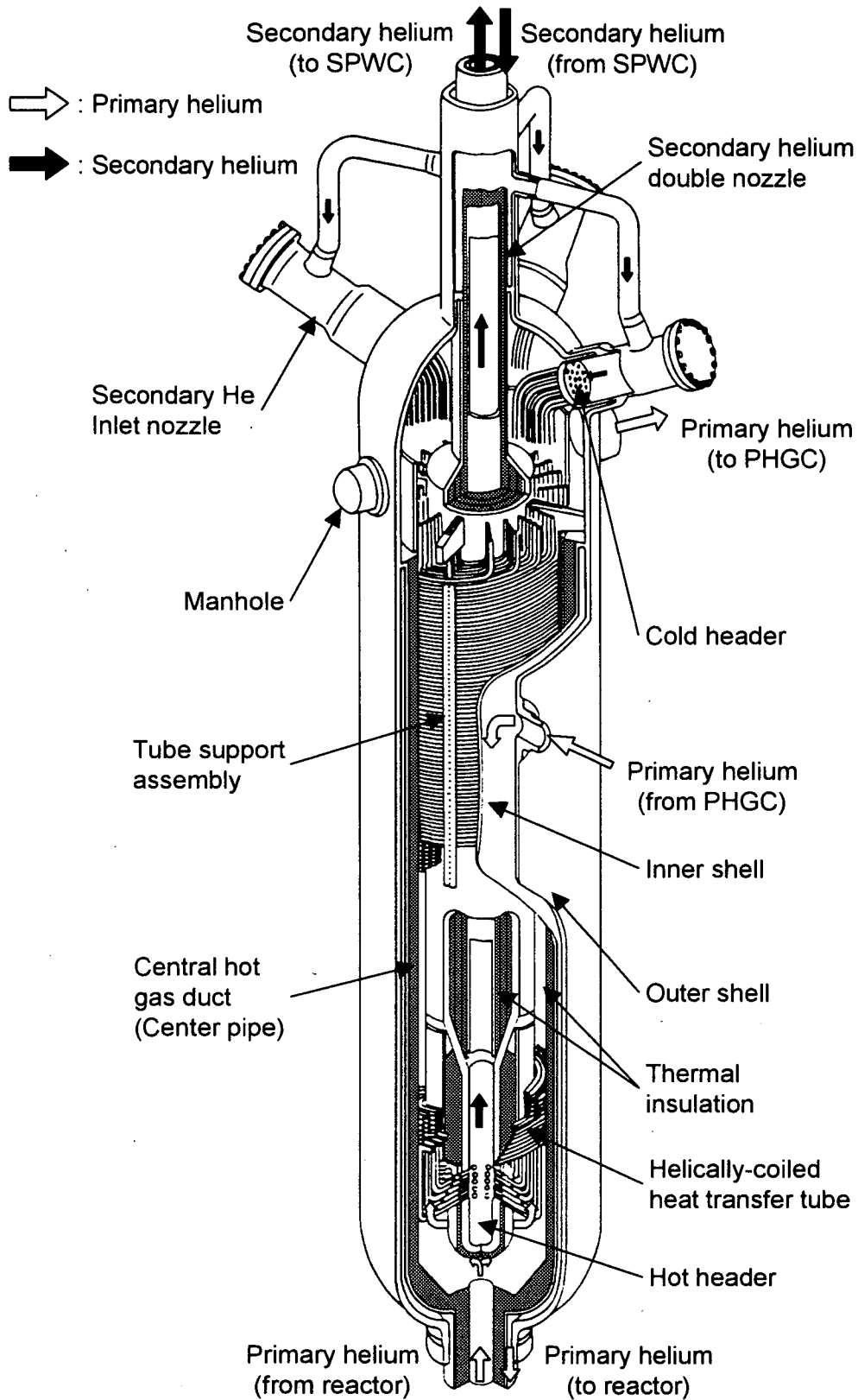


Fig. 2.4 Structural diagram of the intermediate heat exchanger (IHx)

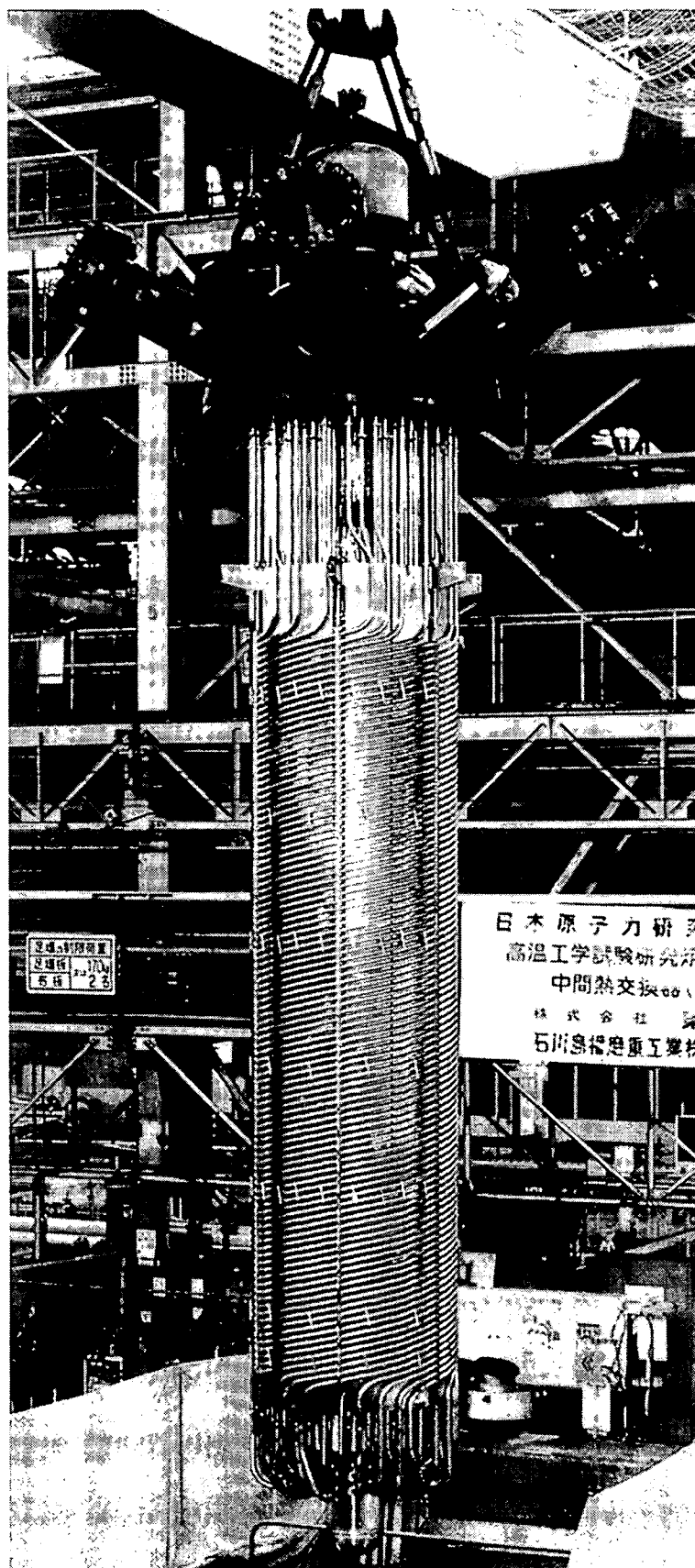


Fig. 2.5 Internal structure of the IHX

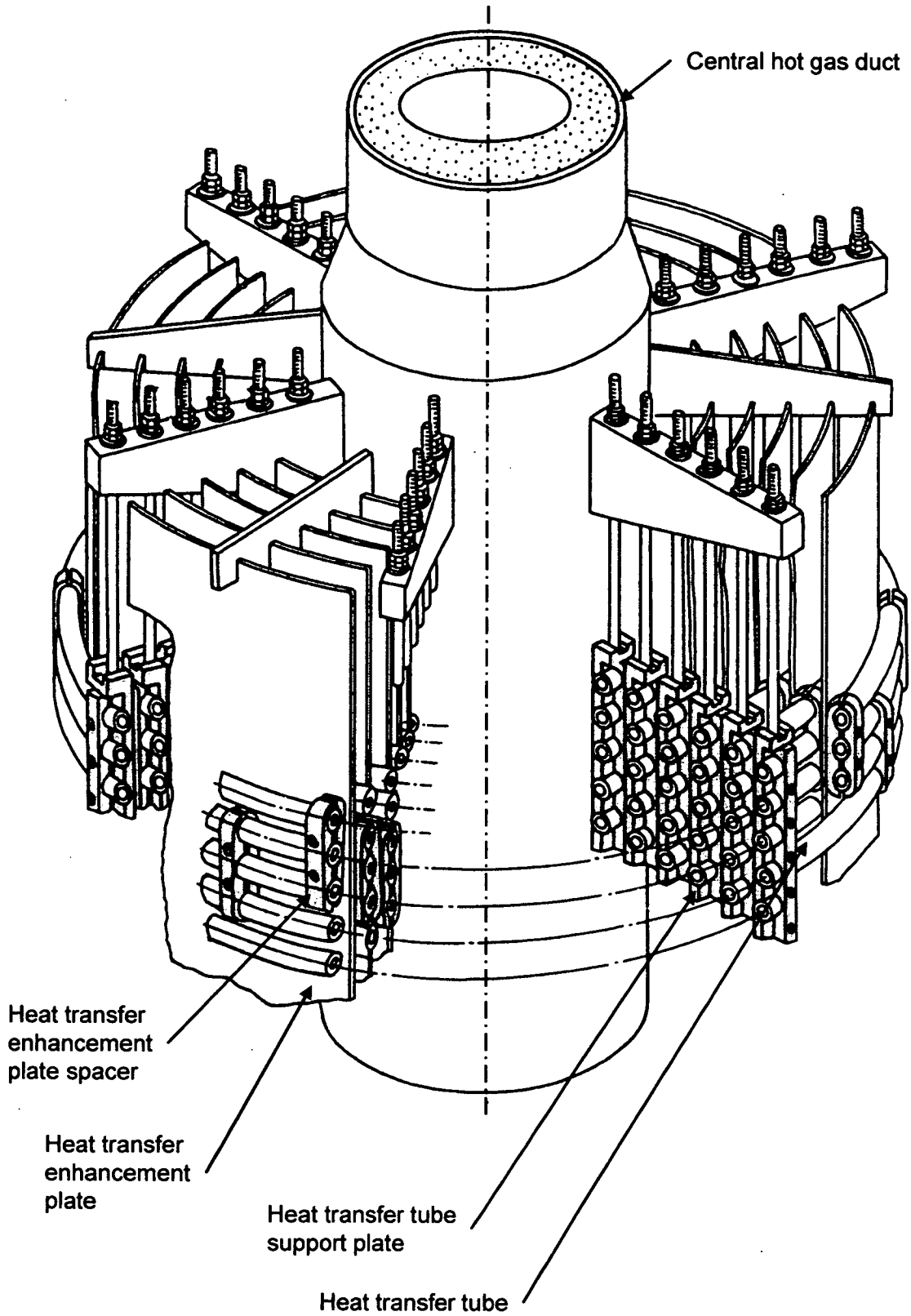


Fig. 2.6 Structural diagram of the heat transfer tube (3-D view)

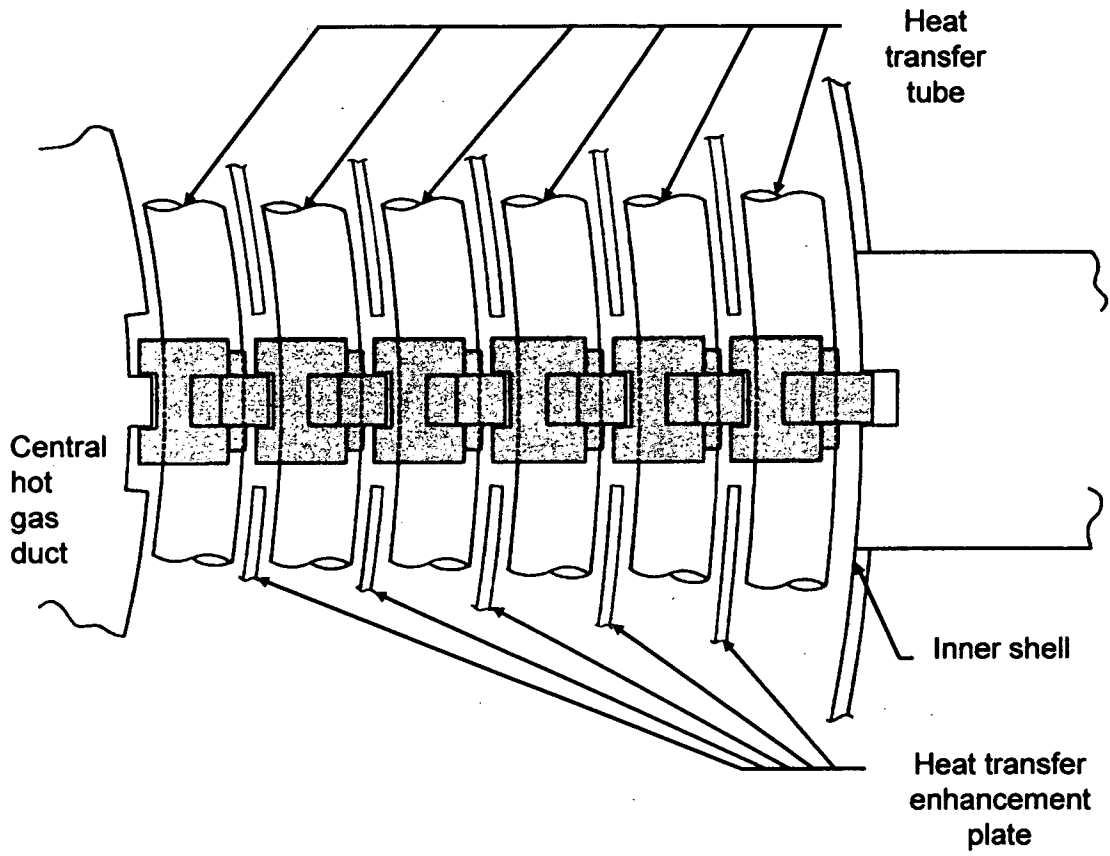


Fig. 2.7 Structural diagram of the heat transfer tube (cross section view)

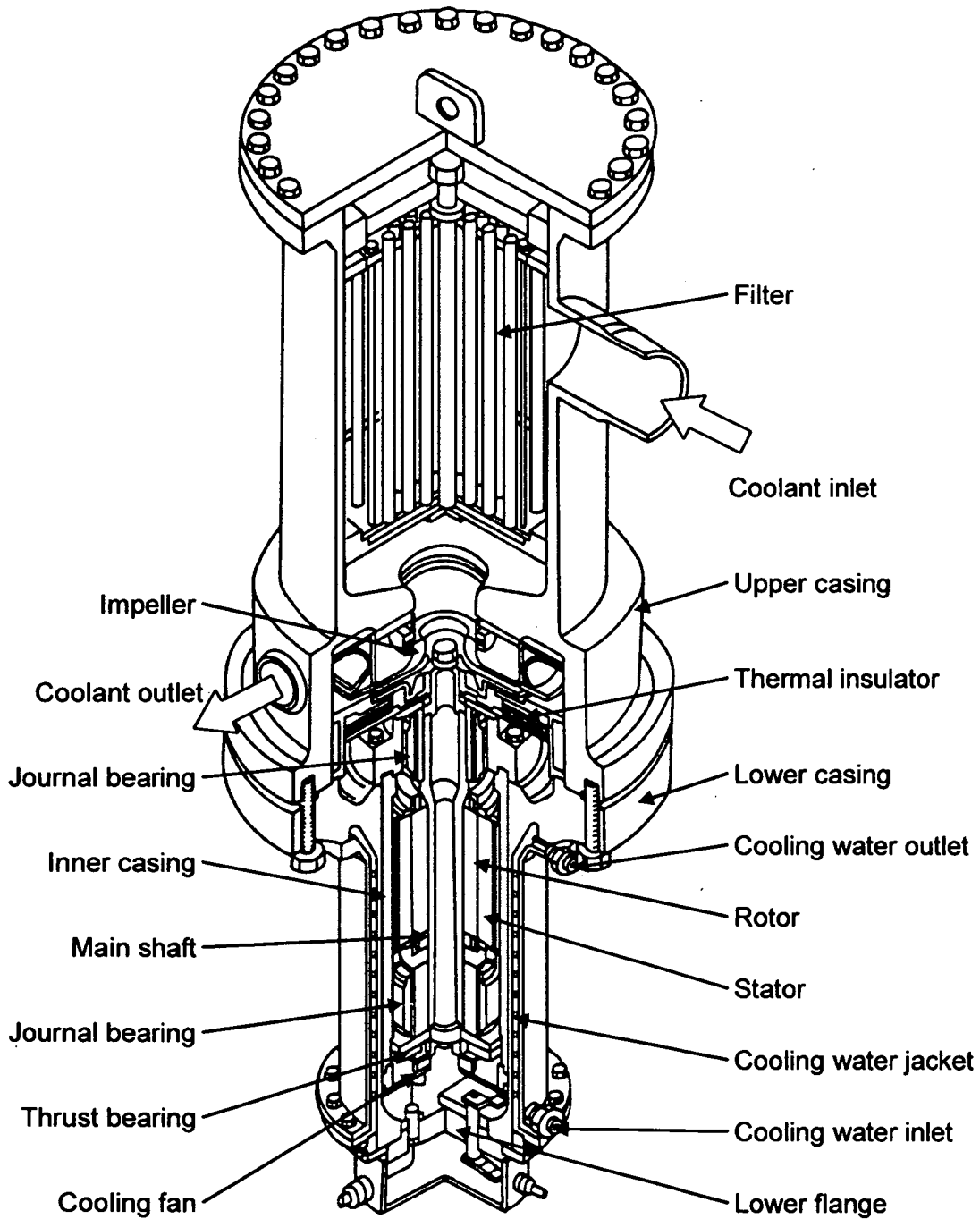


Fig. 2.8 Structural diagram of the primary/secondary helium gas circulator

- ⬡ : Neutron flux measurement point
- ⬢ : Flow mass rate measurement point
- : Temperature measurement point
- : Revolution measurement point
- ◡ : Pressure measurement point

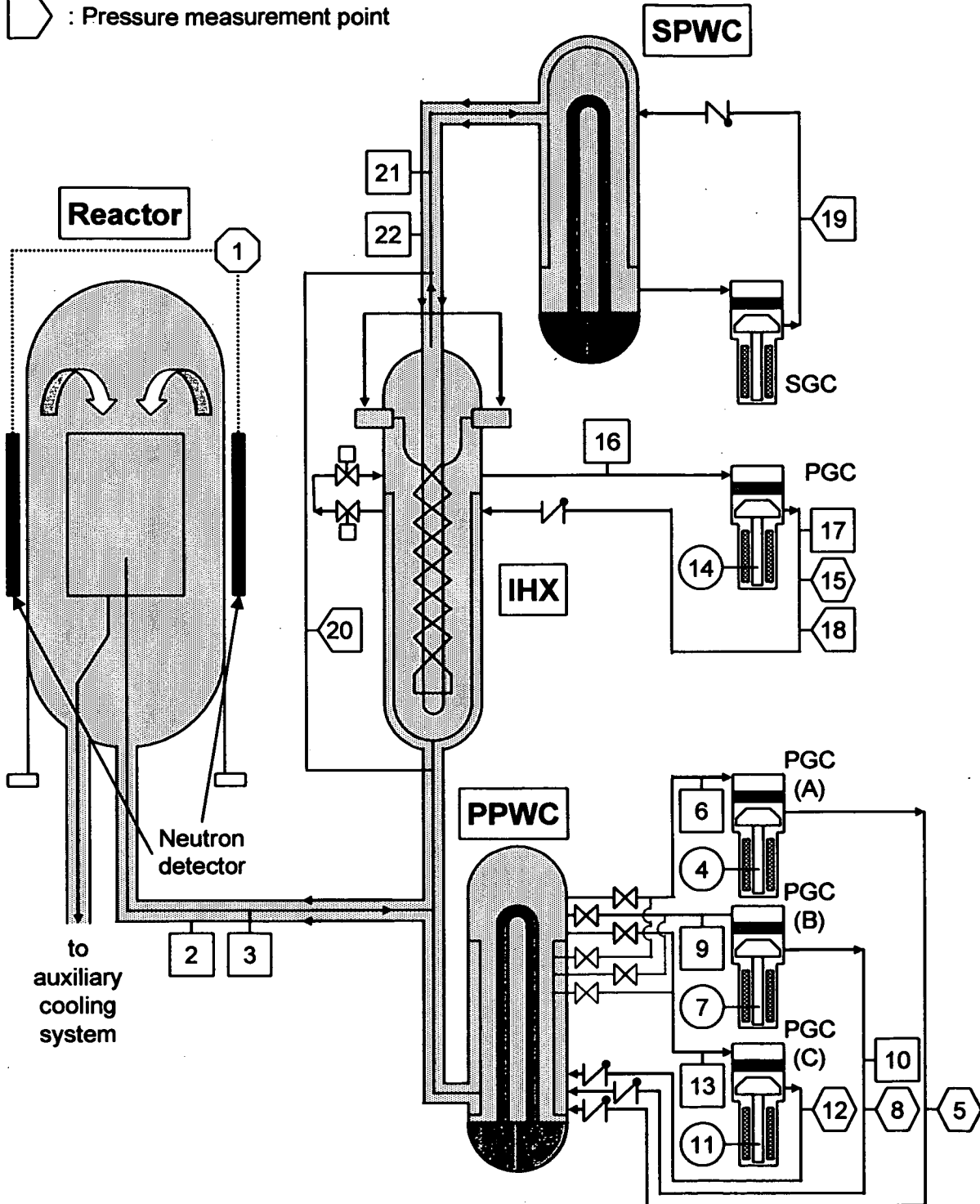


Fig. 4.1 Measurement point

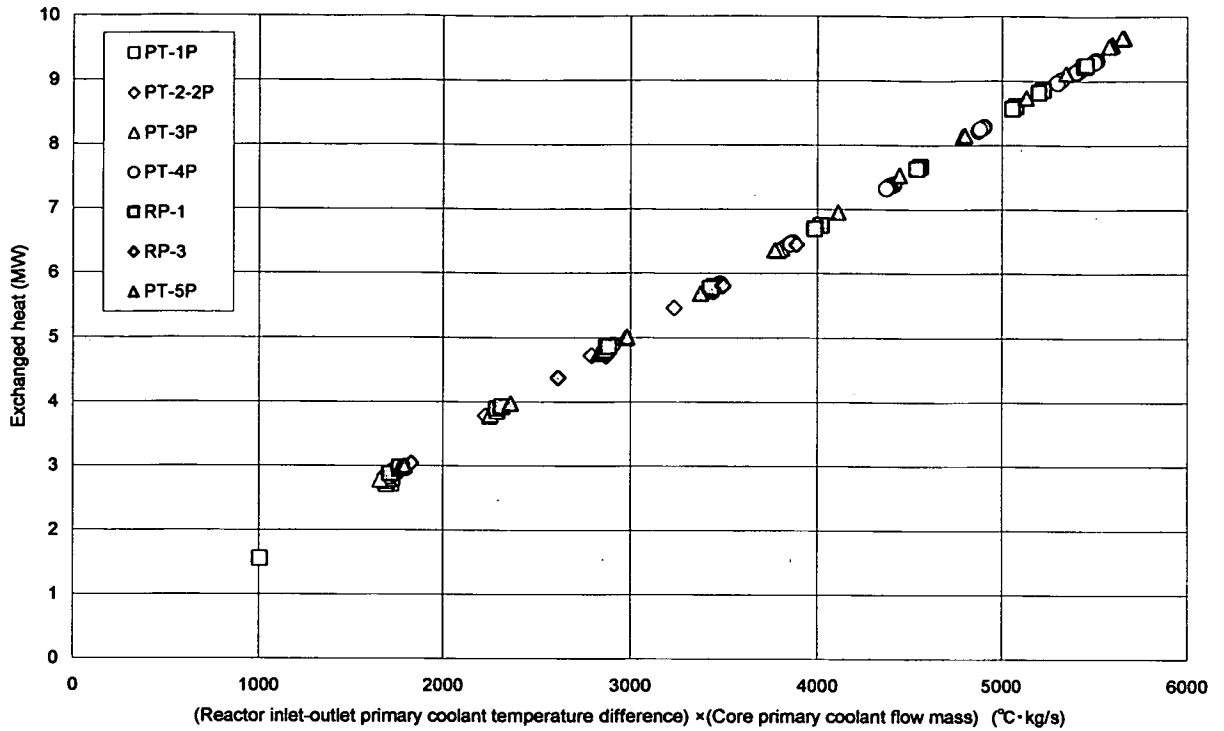


Fig. 4.2 Relationship between exchanged heat and $G_{He}^{Core} (T_{He}^{RPV_OUT} - T_{He}^{RPV_IN})$

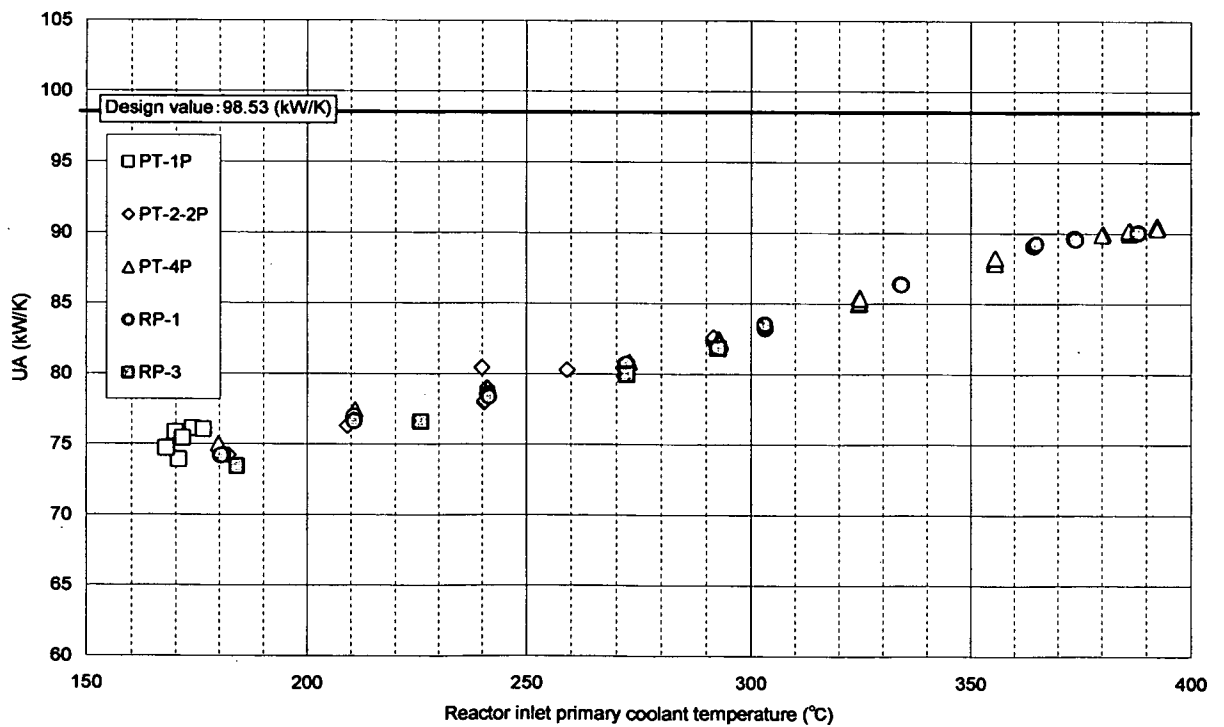


Fig. 4.3 Relationship between $(UA)^{IHX}$ and reactor inlet coolant temperature (Rated operation)

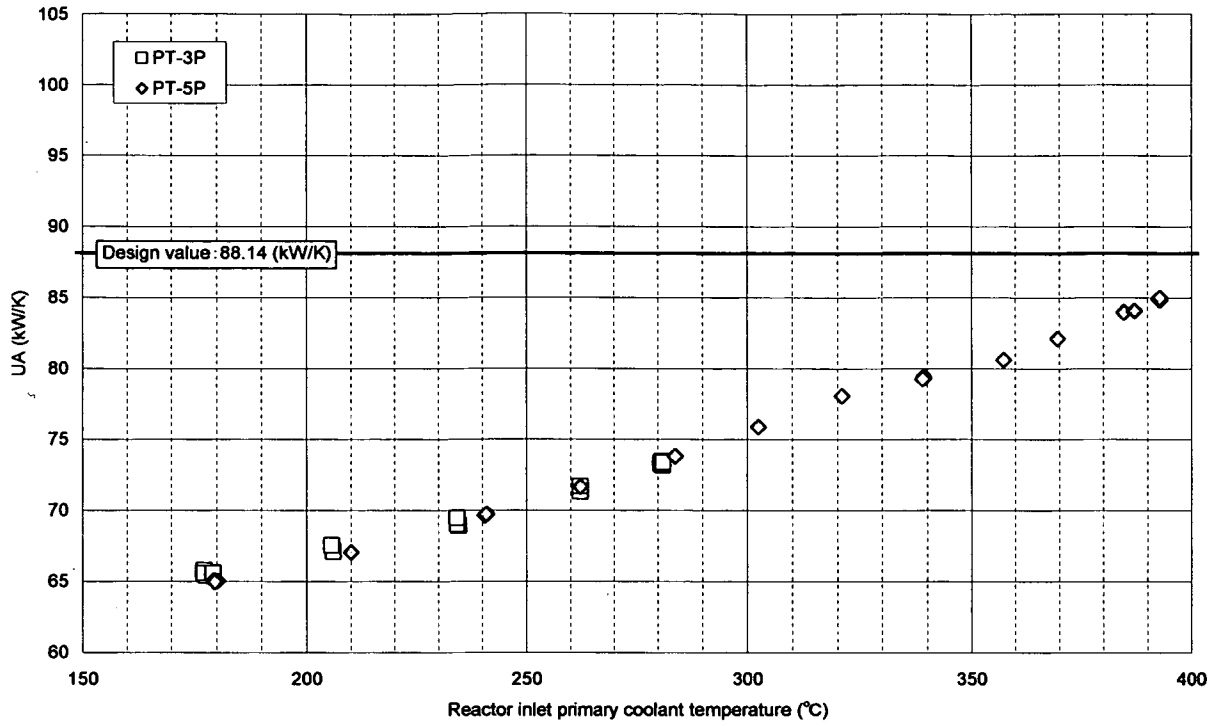


Fig. 4.4 Relationship between $(UA)^{IHX}$ and reactor inlet coolant temperature (High temperature test operation)

This is a blank page.

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ	b
バ	bar
ガ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラ	rad
レ	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
1 b = 100 fm² = 10⁻²⁸ m²
1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局 1985年刊行による。ただし, 1 eV および 1 uの値は CODATA の1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクトールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- bar は, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N (=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg (Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1

1 cal = 4.18605 J (計量法)
= 4.184 J (熱化学)
= 4.1855 J (15 °C)
= 4.1868 J (国際蒸気表)
仕事率 1 PS (仏馬力)
= 75 kgf·m/s
= 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

HTTRの中間熱交換器の伝熱性能に関する評価



古紙配合率100%
白色度70%の再生紙を使用しています