



JAEA-Technology

2005-006



JP0650003

HTTRの1次加圧水冷却器の伝熱性能に関する評価

Evaluation of Heat Exchange Performance for
Primary Pressurized Water Cooler in HTTR

柄尾 大輔 中川 繁昭

Daisuke TOCHIO and Shigeaki NAKAGAWA

大洗研究開発センター
高温工学試験研究炉部

Department of HTTR
O-arai Research and Development Center

January 2006

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-
Technology

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に刊行している研究開発報告書です。
本レポートの全部または一部を複写・複製・転載する場合は下記にお問い合わせ下さい。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
Tel.029-282-6387, Fax.029-282-5920

This report was issued subject to the copyright of Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about the copyright and reproduction should be addressed to :

Intellectual Resources Section,
Intellectual Resources Department
2-4, Shirakata-shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, JAPAN
Tel.029-282-6387, Fax.029-282-5920

©日本原子力研究開発機構, Japan Atomic Energy Agency, 2006

HTTR の 1 次加圧水冷却器の伝熱性能に関する評価

日本原子力研究開発機構大洗研究開発センター

高温工学試験研究炉部

柄尾 大輔・中川 繁昭⁺

(2005 年 11 月 25 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主冷却系を構成する加圧水冷却器、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 の条件下で原子炉で発生した 30MW の除熱を行うための伝熱性能を有していなければいけない。

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 1 次加圧水冷却器 (PPWC) について伝熱性能を評価した。また、設計時における PPWC の伝熱性能との比較を行い、PPWC が設計時に要求された伝熱性能を有していることを確認した。

Evaluation of Heat Exchange Performance for Primary Pressurized Water Cooler in HTTR

Daisuke TOCHIO and Shigeaki NAKAGAWA⁺

Department of HTTR
O-arai Research and Development Center
Japan Atomic Energy Agency
O-arai-machi, Higashibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received November 25, 2005)

In High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR), the rated thermal power of 30MW, the generated heat at reactor core is finally dissipated at the air-cooler by way of the heat exchangers of the primary cooling system, such as the primary pressurized water cooler (PPWC) and the intermediate heat exchanger (IHX). The heat exchangers in the primary cooling system are required the heat exchange performance to remove reactor generated heat 30MW under the condition of reactor coolant outlet temperature 850°C / 950°C. Therefore, the heat exchanges are required to satisfy the design criteria of heat exchange performance.

In this report, heat exchange performance data of the rise-to-power-up test and the in-service operation for the PPWC in the main cooling system was evaluated. Moreover, the evaluated values were compared with the design values, and it is confirmed that PPWC has the required heat exchange performance in the design.

Keywords : HTTR, High Temperature Test Operation, 950°C, 30MW, Main Cooling System, Primary Pressurized Water Cooler, Shell and Tube Orifice Baffle Type Helium/Water Heat Exchanger, Heat Exchange Performance

+ Nuclear Applied Heat Technology Division, Nuclear Energy Basic Engineering Research Directorate

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 加圧水冷却設備の概要	3
2.4 1次加圧水冷却器 (PPWC) の概要	3
2.5 1次ヘリウム循環機 (PGC) の概要	4
3. PPWC の熱流動設計手法	5
3.1 概要	5
3.2 伝熱性能評価	5
3.2.1 設計仕様	5
3.2.2 評価式	5
3.2.3 計算モデル	10
3.2.4 伝熱面積計算結果	11
3.3 圧力損失評価	11
3.3.1 設計仕様	11
3.3.2 算出方法	11
3.3.3 圧力損失評価結果	13
4. PPWC 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 PPWC の伝熱性能の評価方法	15
4.4 PPWC の伝熱性能の評価結果	16
4.5 伝熱性能の設計値との比較	18
4.6 熱伝達率の評価及び考察	18
5. 結言	21
謝辞	21
参考文献	21
付録 A PPWC の伝熱設計に関する計算結果	55

付録 B PPWC の流動設計に関する計算結果 75

付録 C PPWC 管内・管外熱伝達率に関する計算結果 105

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 Pressurized Water Cooling System	3
2.4 Outline of the Primary Pressurized Water Cooler (PPWC)	3
2.5 Outline of the Primary Helium Gas Circulator (PGC).....	4
3. Thermal-hydraulic Design Method of the PPWC	5
3.1 Outline	5
3.2 Estimation of Thermal Performance	5
3.2.1 Design Specification.....	5
3.2.2 Estimation Equation.....	5
3.2.3 Estimation Model.....	10
3.2.4 Estimation Result of Heat Transfer Area	11
3.3 Estimation of Pressure Loss.....	11
3.3.1 Design Specification.....	11
3.3.2 Estimation Method of Pressure Loss.....	11
3.3.3 Estimation Result of Pressure Loss	13
4. Evaluation of Heat Exchange Performance for the PPWC	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 PPWC	15
4.4 Evaluation Result of Heat Exchange Performance for the PPWC	16
4.5 Comparison with Design Value	18
4.6 Estimation of Heat Transfer Coefficient and Discussion.....	18
5. Summary.....	21
Acknowledgement.....	21
References.....	21
Appendix A Estimation Result on Thermal Designing for the PPWC	55

Appendix B Estimation Result on Hydraulic Designing for the PPWC.....	75
Appendix C Estimation Result on Heat Transfer Coefficient for In/Ex- Heat Transfer tube of the PPWC	105

1. 緒言

日本原子力研究開発機構（原子力機構）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を目的として原子力機構大洗研究開発センター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 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、過去に獨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 を達成する伝熱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伝熱性能が確保されていなければならない⁸⁾。

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 1 次加圧水冷却器（PPWC : Primary pressurized water cooler）について伝熱性能を評価した。また、設計時における PPWC の伝熱性能との比較を行い、設計時に想定された伝熱性能が確保されていることの確認及び PPWC の伝熱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°Cとなる「定格運転モード」と、原子炉出口冷却材温度が950°C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って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ざかながら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って二重管分岐部で分岐した後に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経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に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 加圧水冷却設備の概要

加圧水冷却設備の設計仕様を Table 2.2 に、概要図を Fig. 2.3 に示す。加圧水冷却設備¹¹⁾は 1 次加圧水冷却器(PPWC)、2 次加圧水冷却器(SPWC)、加圧水加圧器、加圧水空気冷却器(ACL)、加圧水循環ポンプ、加圧水配管等で構成されている。加圧水循環ポンプは予備 1 台を含めて 2 台設置されている。PPWC および SPWC に接続されている配管の原子炉格納容器貫通部外側には各加圧水冷却器出入口に各 1 個ずつ原子炉格納容器隔離弁が設置されている。また、PPWC 出入口配管の格納容器隔離弁外側には、止め弁が各 1 個設置されている。

本設備は PPWC および SPWC に加圧水を循環させることにより 1 次冷却材および 2 次冷却材（ヘリウムガス）を冷却した後、その熱を ACL で大気に放散する設備である。

PPWC、SPWC で受熱した加圧水は、加圧水の圧力を調整する加圧水加圧器に送られる。その後、加圧水は ACL および ACL バイパス配管に分岐される。ACL に流入する加圧水流量は、加圧水温度の制御を目的として空気冷却器出口流量調節弁とバイパス流量調整弁により調整されている。これらの弁は、弁の誤開、誤閉事故を想定した過渡時の各部熱応力を緩和する等の目的で開度が 20~80% に制限されている。

ACL で冷却された加圧水は、ACL とバイパスされた加圧水と合流した後に加圧水循環ポンプで昇圧され、再び PPWC、SPWC に送られる。

加圧水冷却設備は、並列運転時には PPWC および SPWC に加圧水を循環させて 1 次、2 次冷却材の冷却を行う。この際、加圧水は PPWC および SPWC に 2:1 の割合で送られる。一方、単独運転時は PPWC にほぼ全流量の加圧水を循環させて 1 次冷却材の冷却を行う。

加圧水循環ポンプの設計仕様を Table 2.3 に、写真を Fig. 2.4 に示す。

2.4 1 次加圧水冷却器(PPWC) の概要

PPWC はたて置 U 字型のシェルアンドチューブ型ガス-水熱交換器であり、胴部は二重胴構造になっている。Fig. 2.5 に PPWC の構造図、Fig. 2.6 に PPWC 周りに設置された PGC の配置図、Fig. 2.7 に全体図、Table 2.4 に PPWC の設計仕様を示す。

PPWC では高温のヘリウムガスと加圧水を扱うため、従来のシェルアンドチューブ型熱交換器のようにバッフル板を等間隔に設置すると、高温ヘリウムガスの入口部において局所的に熱流束が過大になる恐れがある。そのため、PPWC ではバッフル板の間隔を各段で変更し、局所的に熱流束が過大になるのを防止している。

また、PPWC では単独・並列両運転の除熱を担っており、更に PPWC での除熱量も両運転で

は異なる。そのため、PPWCでは運転モードにより1次冷却材の出口部を変更し、1次冷却材が通る流路を変更することで伝熱面積を変更している。これにより、各運転モードでの除熱量を変更している。

原子炉より出た高温の1次冷却材は二重管内管を通って下部の1次冷却材二重ノズルより流入し、伝熱管外をバッフル板により流れを反転・上昇しながら管内の加圧水により冷却されて、胴上部に設けられた1次冷却材出口ノズルよりPGCに導かれる。PPWCでは単独／並列運転時の除熱量が異なるため、単独運転時には上側に設置された1次冷却材出口ノズルよりPGCに導かれ、並列運転時には中央付近に設置された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、1次冷却材二重ノズルより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、加圧水は下鏡の加圧水入口ノズルより流入し、伝熱管内を流れて加熱され、加圧水出口ノズルより流出する。

2.5 1次ヘリウム循環機（PGC）の概要

PGCの構造図をFig. 2.8、PGCの設計仕様をTable 2.5に示す。

PGCは縦型遠心式動圧ガス軸受型循環機であり、PPWCに3台、IHXに1台設置されている。PGCは全て同じ構造であるが、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。PGC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。

PGCは、1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。

PGC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次冷却材の循環流量を確保している。また、PGCは必要に応じ電気的制動により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PGC及びPPWC用PGCを合計4台運転する。一方、単独運転時にはPPWC用PGC循環機を3台運転する。

3. PPWC の熱流動設計手法

3.1 概要

本章では PPWC を設計する際に行った必要伝熱面積の評価および圧力損失の評価の手法について述べる。なお、設計時における PPWC の設計方針は以下のとおりである。

- ① 単独運転と並列運転における交換熱量の変更は弁開閉による切り替え方式によることとする。
 - ② 伝熱管と胴および伝熱管相互の熱膨張差を吸収する構造とする。
 - ③ 伝熱管は逆 U 字型とする。
 - ④ 1次冷却材及び加圧水の流動により伝熱管に異常な振動が生じない構造とする。
 - ⑤ 原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する部分は、原則として溶接構造とする。
 - ⑥ 供用期間中検査が可能な構造とする。
 - ⑦ PPWC の支持は、配管の熱膨張を吸収するために上部より支持棒で吊り下げる浮動支持方式とする。
 - ⑧ 地震時における振動を抑制するために、PPWC の側部にスナバを設ける。
 - ⑨ 伝熱管に流入する加圧水と、加熱されて伝熱管から流出する加圧水とが混合するのを防止するために水室の中央に水室仕切板を設けて仕切る。
 - ⑩ 確実な除熱を行うために、高温の1次冷却材が流入する入口に受衝板を、下部のスタグナント部は熱遮へい板を、20MW 除熱用ノズル位置のバッフル段部分には熱交換防止スリーブを、また伝熱管上部の U ベント部には U ベント部熱交換防止箱を設ける。
 - ⑪ 伝熱管内の加圧水は、通常運転中のいかなる使用条件においても十分なサブクール度を有し、沸騰しないように設計する。
 - ⑫ ハステロイ XR のサーベイランス試験片が取り付けられる構造とする。

3.2 伝熱性能評価^{10),11)}

3.2.1 設計仕様

Table 3.1 に PPWC の設計仕様値を示す。また、Table 3.2 に PPWC の構造諸元を示す。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。これらの条件を元に伝熱計算が行われた。

3.2.2 評価式

PPWC の設計では、設計仕様に与えられた値、および伝熱面積などの値を仮定して PPWC の熱貫流率の算出を行った後に、PPWC 1 次冷却材出口温度の算出を行い、設計仕様に与えられている PPWC 1 次冷却材出口温度と合致するように設計が行われた。

- 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 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)
 h_i : 管側 (加圧水側) 熱伝達率 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)
 U : 熱貫流率 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)
 λ_t : 伝熱管熱伝導率 ($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$)

PPWCにおける交換熱量は、次式に示すように対流熱伝達による熱交換と、内部断熱材を保持するライナーと伝熱管の間に起こるふく射伝熱による熱交換の和とされている。また、交換熱量は1次冷却材がPPWCで損失した熱量と等しいとされている。これを式で表すと次式のようになる。

- Q_{PPWC} : PPWC における交換熱量 (W)
 Q_U : 対流熱伝達による交換熱量 (W)
 Q_E : ふく射伝熱による交換熱量 (W)
 Q_T : 1 次冷却材が損失した熱量(W)

対流熱伝達による熱交換は次式で与えられる。

$$T_1 = T_{\text{He1}}^{\text{PPWC_OUT}} - T_{\text{Water}}^{\text{PPWC_IN}} \quad \dots \quad (3.5)$$

$$T_2 = T_{\text{He1}}^{\text{PPWC_IN}} - T_{\text{Water}}^{\text{PPWC_OUT}} \quad \dots \quad (3.6)$$

- | | | |
|-------------------------|---|-------------------------------|
| A | : | 伝熱面積 (m^2) |
| Q_U | : | 対流熱伝達による交換熱量 (W) |
| $T_{He1}^{PPWC_IN}$ | : | PPWC 入口 1 次冷却材 (管外流体) 温度 (°C) |
| $T_{He1}^{PPWC_OUT}$ | : | PPWC 出口 1 次冷却材 (管外流体) 温度 (°C) |
| $T_{Water}^{PPWC_IN}$ | : | PPWC 入口 加圧水 (管内流体) 温度 (°C) |
| $T_{Water}^{PPWC_OUT}$ | : | PPWC 出口 加圧水 (管内流体) 温度 (°C) |
| U | : | 熱貫流率 (W / $m^2 \cdot K$) |
| ΔT_L | : | 対数平均温度差 (K) |
| Ψ | : | 温度差補正係数 (-) |

なお、本式中で用いられている温度差補正係数 ψ はFig. 3.1で与えられた値を用いている。なお、

表中で用いられている水等量比 R_A 、温度効率 E_A は次式で与えられる。

$$E_A = \frac{T_{Water}^{PPWC_OUT} - T_{Water}^{PPWC_IN}}{T_{He1}^{PPWC_IN} - T_{Water}^{PPWC_IN}} \dots \quad (3.8)$$

E_A	:	温度效率 (-)
R_A	:	水等量比 (-)
$T_{He1}^{PPWC_IN}$:	PPWC 入口 1 次冷却材 (管外流体) 温度 (°C)
$T_{He1}^{PPWC_OUT}$:	PPWC 出口 1 次冷却材 (管外流体) 温度 (°C)
$T_{Water}^{PPWC_IN}$:	PPWC 入口加压水 (管内流体) 温度 (°C)
$T_{Water}^{PPWC_OUT}$:	PPWC 出口加压水 (管内流体) 温度 (°C)

さらに、ふく射伝熱による熱交換は次式で与えられる。

A_E : ふく射面積 (m^2)
 Q_E : 対流熱伝達による交換熱量 (W)
 T_{He1} : ライナー部ヘリウムガス温度 (K)
 T_{hw} : 伝熱管外側壁面温度 (K)
 ε_{liner} : ライナーの熱放射率 (-)
 ε_{tube} : 伝熱管の熱放射率 (-)

1次冷却材が PPWC で損失した熱量は以下の式で与えられる。

C_p : 1 次冷却材比熱 (J/kg·K)
 G : 1 次冷却材流量 (kg/s)
 Q_T : 1 次冷却材が損失した熱量(W)
 ΔT_{Hei} : PPWC 出入口 1 次冷却材温度差 (K)

次に、Eq.(3.1)中で用いられている伝熱管内・伝熱管外熱伝達率について記述する。

① 胴側（1次冷却材側）の伝熱管外熱伝達率

PPWC はバッフル板の間隔が各段で異なっており、胴側（1 次冷却材側）の伝熱管外熱伝達率

式は従来与えられている式を適用できない。そこで、伝熱管外熱伝達率式は、 $1/2$ スケールモデル供試体による実験結果を用いて熱伝達率の評価が行われた。各段における伝熱管外熱伝達率は以下のように与えられる。

$$Nu_1 = C_1 \cdot C_2 \cdot 0.3290 \cdot Re^{0.8568} \cdot Pr^{0.36} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0.25} \quad \dots \dots \dots \quad (3.12)$$

$$Nu_2 = C_2 \cdot 0.3872 \cdot Re^{0.8205} \cdot Pr^{0.36} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0.25} \quad \dots \dots \dots \quad (3.13)$$

$$Nu_{3,4P} = C_2 \cdot 0.2924 \cdot Re^{0.8551} \cdot Pr^{0.36} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0.25} \quad \dots \dots \dots \quad (3.14)$$

$$Nu_{3,4S} = C_2 \cdot 0.3058 \cdot Re^{0.8391} \cdot Pr^{0.36} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0.25} \quad \dots \dots \dots \quad (3.15)$$

$$Nu_{5S} = C_2 \cdot 0.1308 \cdot Re^{0.7305} \cdot Pr^{0.36} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0.25} \quad \dots \dots \dots \quad (3.16)$$

- B_p : バッフル板間隔 (m)
 C_1 : 受衝板の影響係数($=0.98$) (-)
 C_2 : 管列数の影響係数($=1.022$) (-)
 d_o : 伝熱管外径 (m)
 D_s : 内胴内径 (m)
 G_o : 1次冷却材流量 (kg/s)
 h_o : 伝熱管外熱伝達率 ($W / m^2 \cdot K$)
 N_c : PPWC のシェル中心に最も近い列の伝熱管本数 (-)

Nu : 伝熱管外 Nusselt 数 (-)
 Nu₁ : 1 段目における Nusselt 数 (-)
 Nu₂ : 2 段目における Nusselt 数 (-)
 Nu_{3,4P} : 並列運転時の 3,4 段目における Nusselt 数 (-)
 Nu_{3,4S} : 単独運転時の 3,4 段目における Nusselt 数 (-)
 Nu_{5S} : 単独運転時の 5 段目における Nusselt 数 (-)
 Pr : 1 次冷却材の Prandtl 数 (-)
 Pr_w : 伝熱管外壁表面温度における 1 次冷却材の Prandtl 数 (-)
 Re : Reynolds 数 (-)
 u_o : 1 次冷却材の代表速度 (m/s)
 ρ_o : 1 次冷却材密度 (kg / m³)
 λ_o : 1 次冷却材熱伝導率 (W / m · K)
 ν_o : 1 次冷却材動粘性係数 (m²/s)

② 管側（加圧水側）の伝熱管内熱伝達率

伝熱管内熱伝達率式は以下に示す Sider-Tale¹²⁾の式が用いられている。

$$Nu = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{1/3} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0.14} \quad \dots \dots \dots \quad (3.20)$$

d_i : 伝熱管内径 (m)
 G_i : 加圧水流量 (kg/s)
 h_i : 伝熱管内熱伝達率 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)
 N : 伝熱管本数 (-)
 Nu : 伝熱管内 Nusselt 数 (-)
 Pr : 加圧水 Prandtl 数 (-)
 Pr_w : 伝熱管内壁表面温度における加圧水の Prandtl 数(-)
 Re : Reynolds 数 (-)
 u_i : 加圧水の代表速度 (m/s)

- ρ_i : 加圧水密度 (kg/m^3)
 λ_i : 加圧水熱伝導率 ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)
 ν_i : 加圧水動粘性係数 (m^2/s)

3.2.3 計算モデル

Fig. 3.2 に計算モデルを示す。PPWC を 5 段に分割し、それぞれの段で 1 次冷却材の流れに対して上流側と下流側に分けて、全体では PPWC を合計 10 ブロックに分割して計算する計算モデルが設定されている。各ブロックの物性値は、ブロックの平均温度の値が用いられている。本計算では、1 次冷却材および加圧水の入口温度 ($T_{\text{He1}}^{\text{PPWC_IN}}$ 、 $T_{\text{Water}}^{\text{PPWC_IN}}$)、圧力および流量が与えられた場合に、それぞれの出口温度 ($T_{\text{He1}}^{\text{PPWC_OUT}}$ 、 $T_{\text{Water}}^{\text{PPWC_OUT}}$) を求める流れとなっている。Fig. 3.3 に計算のフローチャートを示す。計算の流れは以下の通りである。

- ① T_{He1}^1 を仮定する。
- ② (1,1) ブロックの対流熱伝達による交換熱量 Q_U 、ふく射伝熱による交換熱量 Q_E 、1 次冷却材が損失した熱量 Q_T を計算する。
- ③ $Q_U + Q_E \neq Q_T$ ならば①に戻る。 $Q_U + Q_E = Q_T$ ならば、 T_{He1}^1 および T_{Water}^1 を確定した後に④に進む。
- ④ PPWC 出口加圧水温度 $T_{\text{Water}}^{\text{PPWC_OUT}}$ を仮定する。
- ⑤ T_{He1}^2 を仮定する。
- ⑥ (1,2) ブロックの Q_U 、 Q_E 、 Q_T を計算する。
- ⑦ $Q_U + Q_E \neq Q_T$ ならば⑤に戻る。 $Q_U + Q_E = Q_T$ ならば、 T_{He1}^2 および T_{Water}^{10} を確定した後に⑧に進む。
- ⑧ 単独運転に対する計算の場合には、⑤～⑦の要領で 1 次冷却材上流側から(2,2)、(2,1)、(3,1)、(3,2)、(4,2)、(4,1)、(5,1)、(5,2) の順序で各ブロックの 1 次冷却材温度 $T_{\text{He1}}^2 \sim T_{\text{He1}}^{\text{PPWC_OUT}}$ および加圧水温度を確定する。
- ⑨ 並列運転に対する計算の場合には、⑤～⑦の要領で 1 次冷却材上流側から(2,2)、(2,1)、(3,1)、(3,2)、(4,2)、(4,1) の順序で各ブロックの 1 次冷却材温度 $T_{\text{He1}}^2 \sim T_{\text{He1}}^8$ および加圧水温度 $T_{\text{Water}}^2 \sim T_{\text{Water}}^9$ を確定する。
- ⑩ $T_{\text{Water}}^5 \neq T_{\text{Water}}^6$ ならば④に戻る。 $T_{\text{Water}}^5 = T_{\text{Water}}^6$ ならば、 $T_{\text{Water}}^{\text{PPWC_OUT}}$ を確定した後に⑪に進む。
- ⑪ 計算終了

PPWC は U 字曲げ伝熱管を用いて加圧水の流れを 2 パスにしていることから、計算中に $T_{\text{Water}}^{\text{PPWC_OUT}}$ の仮定が入れられている。また、各段の評価式が異なることに加えて、1 次冷却材が高温であることからふく射伝熱が考慮されている。これらのことより本計算における計算量が多くなるが、性能評価に与える影響が小さい項目があり、これらの項目を適切に設定あるいは無視することで計算負荷を軽減し、かつ比較的精度良く性能を評価できる簡易計算が可能である。

この計算により算出された $T_{\text{He1}}^{\text{PPWC_IN}}$ 、 $T_{\text{He1}}^{\text{PPWC_OUT}}$ 、 $T_{\text{Water}}^{\text{PPWC_IN}}$ 、 $T_{\text{Water}}^{\text{PPWC_OUT}}$ と設計仕様を比較し、設

計仕様を満足している場合には伝熱面積を確定する。満足していない場合には、伝熱面積を変更して再度計算を行う。

3.2.4 伝熱面積計算結果

Fig. 3.4~Fig.3.7 に各運転モードにおける PPWC に対する伝熱計算の結果を示す。それぞれ、Fig. 3.4 は定格・単独運転、Fig. 3.5 は定格・並列運転、Fig. 3.6 は高温・単独運転、Fig. 3.7 は高温・並列運転に対する結果である。さらに、付録 A の Table A.1~Table A.8 に計算条件および計算結果の詳細値を示す。本解析結果より、PPWC 出口 1 次冷却材温度および PPWC 出口加圧水温度は設計仕様を満足していることが示された。また、本設計より PPWC における必要伝熱面積は単独運転時には 70m^2 、並列運転時には 54m^2 であることが示された。

3.3 壓力損失評価^{10,11)}

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が用いられた。本評価では Table 3.1 に示された PPWC の設計仕様値および Table 3.2 に示された PPWC の構造諸元を用いて計算が行われた。また、温度分布については Fig. 3.3~Fig. 3.7 に示した温度分布解析結果が用いられた。

3.3.2 算出方法

① 1 次冷却材側圧力損失

PPWC の 1 次冷却材側の圧力損失は以下の式で算出されている。

$$\Delta P_{HeI}^E = C_{HeI}^E \cdot \frac{\gamma}{2} \cdot (v^E)^2 \quad \dots \dots \dots \quad (3.24)$$

$$\Delta P_{HeI}^T = \frac{4 \cdot f_s \cdot G_c^2 \cdot N_c^2}{2 \cdot \gamma} \cdot \xi_{\Delta P} \cdot \left(\frac{\mu_w}{\mu} \right)^{0.14} \cdot 2.3 \quad \dots \dots \dots \quad (3.27)$$

$$\Delta P_{He1}^S = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\gamma}{2} \cdot (v^S)^2 \quad \dots \dots \dots \quad (3.29)$$

$\Delta P_{H_2}^E$: 拡大損失 (Pa)

ΔP_{He1}^C	縮流損失 (Pa)
ΔP_{He1}^I	受衝板による損失 (Pa)
ΔP_{He1}^T	伝熱管部損失 (Pa)
ΔP_{He1}^B	バッフル板切欠部損失 (Pa)
ΔP_{He1}^S	二重胴部損失 (Pa)
C_{He1}^E	拡大損失係数 (-)
C_{He1}^C	縮流損失係数 (-)
C_{He1}^I	受衝板損失係数 (-)
D	二重胴部相当直径 (m)
f_s	摩擦係数 (-)
G_c	胴中心の質量速度 (kg/s)
L	二重胴長さ (m)
N_c	管列数 (-)
N_w	バッフル切欠部中の管列数 (-)
γ	比重量 (kg/m ³)
v^C	縮流後の平均流速 (m/s)
v^E	拡大前の平均流速 (m/s)
v^I	受衝板直前の平均流速 (m/s)
v^S	二重胴部の平均流速 (m/s)
v^Z	幾何学平均流速 (m/s)
λ	摩擦係数 (-)
μ	粘性係数 (Pa·s)
μ_w	伝熱管外表面温度における粘性係数 (Pa·s)
ξ_{Δ_p}	胴と管束の隙間を通る流れによる補正係数 (-)

② 加压水側压力损失

PPWC の加圧水側の圧力損失は以下の式で算出されている。

$\Delta P_{\text{Water}}^E$: 拡大損失 (Pa)
$\Delta P_{\text{Water}}^C$: 縮流損失 (Pa)
$\Delta P_{\text{Water}}^B$: 伝熱管曲がり部損失 (Pa)
$\Delta P_{\text{Water}}^S$: 伝熱管直管部損失 (Pa)
C_{Water}^B	: 損失係数 (-)
C_{Water}^E	: 拡大損失係数 (-)
C_{Water}^C	: 縮流損失係数 (-)
d_i	: 伝熱管内径 (m)
K	: 粗さの係数 (-)
L	: 伝熱管長さ (m)
γ	: 比重量 (kg/m ³)
v^B	: 伝熱管内の平均流速 (m/s)
v^C	: 縮流後の平均流速 (m/s)
v^E	: 拡大前の平均流速 (m/s)
v^S	: 二重胴部の平均流速 (m/s)
λ	: 摩擦係数 (-)

3.3.3 圧力損失評価結果

Table 3.3 に各運転モードに対する 1 次冷却材側および加圧水側の圧力損失評価結果を示す。さらに、付録 B の Table B.1~Table B.16 に計算条件および計算結果の詳細値を示す。定格・単独運転時の圧力損失が最も大きく、1 次冷却材側で 13kPa、加圧水側で 98kPa であったが、PGC での昇圧に比べて十分小さい値であった。以下に定格・単独運転時の全体圧力損失と PGC の昇圧能力の関係を示す。

$$\begin{aligned}
 & 19\text{kPa} \text{ (原子炉圧力容器内)} \\
 + 13\text{kPa} \text{ (PPWC)} \\
 + 12\text{kPa} \text{ (配管)} \\
 + 31\text{kPa} \text{ (その他、バルブ等)} \\
 = 75\text{kPa} \\
 < 108\text{kPa} \text{ (PGC最大昇圧能力)}
 \end{aligned} \tag{3.35}$$

また、定格・単独運転時の全体圧力損失と加圧水循環ポンプの昇圧能力の関係を以下に示す。

$$\begin{aligned}
 & 98\text{kPa} \text{ (PPWC)} \\
 + 41\text{kPa} \text{ (ACL)} \\
 + 585\text{kPa} \text{ (配管、その他)} \\
 = 724\text{kPa} \\
 < 822\text{kPa} \text{ (加圧水循環ポンプ最大昇圧能力)}
 \end{aligned} \tag{3.36}$$

4. PPWC の伝熱性能の評価

4.1 運転データの計測

Table 4.1 に、PPWC 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、PPWC 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。本評価に用いた運転データは 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)までのものである。この運転期間中の 7:00~7:59 の値を用いて評価を行った。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こととした。

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。

$$T_{He}^{RPV_IN} = \frac{T_{He1}^{(A)OUT} \cdot G_{He1}^{(A)} + T_{He1}^{(B)OUT} \cdot G_{He1}^{(B)} + T_{He1}^{(C)OUT} \cdot G_{He1}^{(C)} + T_{He1}^{IHX_OUT} \cdot G_{He1}^{IHX}}{G_{He1}^{(A)} + G_{He1}^{(B)} + G_{He1}^{(C)} + G_{He1}^{IHX}} \quad \dots \dots \dots (4.1)$$

$T_{H_{c1}}^{\text{RPV_IN}}$: 原子炉入口 冷却材混合平均温度 (°C)

$G_{H_{\alpha}}^{(a)}$: PPWC PGC α 号機 冷却材流量 (α : A~C) (kg/s)

$T_{U-1}^{(\alpha)\text{OUT}}$: PPWC PGC α 号機 冷却材出口温度 (°C)

G_{HX}¹ : IHX PGC 冷却材流量 (kg/s)

T_{IHX_OUT} : IHX PGC 冷却材出口温度 (°C)

また、PPWC に設置されている 3 台の循環機入口における 1 次冷却材温度（PPWC 出口 1 次冷却材温度）はそれぞれ差があり、以下の式により PPWC 出口 1 次冷却材混合平均温度を算出した。

$$T_{He1}^{PPWC_OUT} = \frac{T_{He1}^{(A)IN} \cdot G_{He1}^{(A)} + T_{He1}^{(B)IN} \cdot G_{He1}^{(B)} + T_{He1}^{(C)IN} \cdot G_{He1}^{(C)}}{G_{He1}^{(A)} + G_{He1}^{(B)} + G_{He1}^{(C)}} \quad \dots \quad (4.2)$$

$T_{H_{1,1}}^{PPWC_OUT}$: PPWC 出口 1 次冷却材混合平均温度 (°C)

G_{α} : PPWC PGC α 号機 1 次冷却材流量 ($\alpha : A \sim C$) (kg/s)

T^{(α)IN} : PPWC PGC α 号機入口 1 次冷却材温度 (°C)

さらに、単独運転では PPWC より出た低温の 1 次冷却材の大半は原子炉へと還流するが、一部は IHX における自然循環防止のため IHX へと流入させてている。この IHX に流入した 1 次冷却

材は IHX バイパスラインを通り、二重管内管を通って出ていく（すなわち、並列運転時における IHX 内の 1 次冷却材の流動方向とは逆方向である）。この二重管内管を通って出た低温の 1 次冷却材は、原子炉より出てきた高温の 1 次冷却材と二重管ティ部で合流する。そのため、単独運転時に PPWC に流入する 1 次冷却材温度は原子炉出口 1 次冷却材温度より低くなる。そこで、以下の式により PPWC 入口 1 次冷却材温度を算出することとした。

$$T_{He1}^{PPWC_IN} = \frac{\left(G_{He1}^{(A)} + G_{He1}^{(B)} + G_{He1}^{(C)} - G_{He1}^{\text{By-pass}} \right) \cdot T_{He1}^{\text{RPV_OUT}} + G_{He1}^{\text{By-pass}} \cdot T_{He1}^{\text{By-pass}}}{G_{He1}^{(A)} + G_{He1}^{(B)} + G_{He1}^{(C)}} \quad \dots \dots \dots \quad (4.3)$$

- $T_{He1}^{\text{PPWC_IN}}$: PPWC 入口 1 次冷却材混合平均温度 (°C)
 $G_{He1}^{(\alpha)}$: PPWC PGC α 号機 1 次冷却材流量 ($\alpha : A \sim C$) (kg/s)
 $T_{He1}^{\text{RPV_OUT}}$: 原子炉出口 1 次冷却材温度 (°C)
 $G_{He1}^{\text{By-pass}}$: IHX バイパス 1 次冷却材流量 (kg/s)
 $T_{He1}^{\text{By-pass}}$: IHX バイパス 1 次冷却材温度 (°C)

なお、並列運転時にはバイパス流量がゼロとなるため、この式は単独運転時だけでなく並列運転時にも適用可能である。

4.3 PPWC 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高温試験運転時の PPWC の伝熱性能を評価することとした¹³⁾⁻¹⁵⁾。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。

$$Q = UA\Delta T_L \quad \dots \dots \dots \quad (4.4)$$

- Q : 交換熱量 (W)
 U : 热通過率 (W/m² · K)
 A : 伝熱面積 (m²)
 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 PPWC の伝熱性能を UA で評価することとした。PPWC の UA は Eq.(4.4)を変形した以下の式を用いて算出した。

$$(UA)^{\text{PPWC}} = \frac{Q^{\text{PPWC}}}{\Delta T_L^{\text{PPWC}}} \quad \dots \dots \dots \quad (4.5)$$

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

PPWCに対する対数平均温度差は以下の式で与えられる。

$T_{H1}^{PPWC_IN}$: PPWC 入口 1 次冷却材温度 (Eq.(4.3)参照) (°C)

$T_{H_{1,1}}^{\text{PPWC_OUT}}$: PPWC 出口 1 次冷却材温度 (Eq.(4.2)参照) (°C)

T_{PPWC_IN} : PPWC 入口 加压水温度 (°C)

T_{Water}^{PPWC_OUT} : PPWC 出口 加压水温度 (°C)

また、PPWCでの交換熱量は、PPWCの2次側流体（加圧水）が受け取った熱量とした。

$$Q_{PPWC} = Q_{Water} = C_p^W G_{Water}^{PPWC} (T_{Water_OUT} - T_{Water_IN}) \dots \quad (4.9)$$

$$C_p^W = 2.96632 \cdot 10^{-14} \cdot (T_{\text{Water}}^{\text{Ave}})^6 + 2.34836 \cdot 10^{-11} \cdot (T_{\text{Water}}^{\text{Ave}})^5 + 7.30960 \cdot 10^{-9} \cdot (T_{\text{Water}}^{\text{Ave}})^4 \\ - 1.08128 \cdot 10^{-6} \cdot (T_{\text{Water}}^{\text{Ave}})^3 + 8.73811 \cdot 10^{-5} \cdot (T_{\text{Water}}^{\text{Ave}})^2 + 3.20910 \cdot 10^{-3} \cdot (T_{\text{Water}}^{\text{Ave}}) + 4.21915 \quad (4.10)$$

$$T_{\text{Water}}^{\text{Ave}} = \frac{T_{\text{Water}}^{\text{PPWC_IN}} + T_{\text{Water}}^{\text{PPWC_OUT}}}{2} \quad \dots \dots \dots \quad (4.11)$$

Q_{PPWC} : PPWC における交換熱量 (W)

Q_{PPWC} : PPWC における加圧水受熱量 (W)

C_w^W : PPWC における加圧水平均比熱 (J/kg·K)

G_{PPWC} : PPWC 加压水流量 (t/h)

PPWC_IN : PPWC 入口 - 加压水温度 (°C)

TPPWC_OUT : RRWC 出口 加压水温度 (°C)

TAve : BBWCにおける加圧水平均温度 (°C)

4.1 PBWC の伝熱性能の評価結果

初めに PPWC における交換熱量の評価を行った。Fig. 4.2 には単独運転時の PPWC での交換熱量、Fig. 4.3 には並列運転時の PPWC での交換熱量を示す。交換熱量の整理には以下に示す(炉心 1 次冷却材流量) × (原子炉出入口 1 次冷却材温度差) を用いることとした。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 PPWC における交換熱量は相関があると考えたためである。

G_{HeI}^{Core} : 炉心 1 次冷却材流量 (kg/s)
 T_{HeI}^{RPV-IN} : 原子炉入口 1 次冷却材温度 (Eq.(4.2)参照) (°C)
 $T_{HeI}^{RPV-OUT}$: 原子炉出口 1 次冷却材温度 (°C)

炉心冷却材流量は次式により算出した。

$$G_{He1}^{Core} = G_{He1}^{(A)} + G_{He1}^{(B)} + G_{He1}^{(C)} - G_{He1}^{\text{By-pass}} \quad (\text{単独運転}) \\ = (G_{He1}^{(A)} + G_{He1}^{(B)} + G_{He1}^{(C)} + G_{He1}^{IHX}) \times 1.02 \quad (\text{並列運転}) \quad (4.13)$$

$G_{He1}^{(a)}$: PPWC PGC α 号機 1 次冷却材流量 (α : A~C) (kg/s)
 G_{He1}^{IHX} : IHX PGC 1 次冷却材流量 (kg/s)
 $G_{He1}^{By-pass}$: IHX バイパス 1 次冷却材流量 (kg/s)

並列運転時の炉心 1 次冷却材流量に関して 1 次冷却材流量を 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%多く流れている可能性が示唆されているからである。

どちらの運転においても交換熱量と $G_{He1}^{Core}(T_{He1}^{RPV_OUT} - T_{He1}^{RPV_IN})$ の間には線形的な相関があることが示された。しかし、単独運転と並列運転では、同じ $G_{He1}^{Core}(T_{He1}^{RPV_OUT} - T_{He1}^{RPV_IN})$ に対する交換熱量が異なっていた。これは、単独運転時には炉心での 1 次冷却材除熱量を全量 PPWC で熱交換するのに対し、並列運転時には炉心での 1 次冷却材除熱量を PPWC:IHX=2:1 の割合で熱交換を行うため、炉心での 1 次冷却材除熱量に対する PPWC 交換熱量の割合が異なるためである。

次に、得られた交換熱量を用いて PPWC の UA の評価を行った。Fig. 4.4～Fig. 4.7 に UA を示す。Fig. 4.4 は定格・単独運転時、Fig. 4.5 は定格・並列運転時、Fig. 4.6 は高温・単独運転時、Fig. 4.7 は高温・並列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 1 次冷却材温度で整理した。これは、HTTR では原子炉入口 1 次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、および原子炉入口 1 次冷却材温度は PPWC 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。

どの運転モードについても UA と原子炉入口 1 次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、僅かながらではあるが、運転日数を重ねるにつれて UA が低下していくことが示された。Fig. 4.8 に PT-2-2 の UA を基準とした各運転における UA の差の時間変化を示す。この結果より、現時点における UA は PT-2-2 のものより 2%程度低くなっているが、評価点のばらつきなどを見ると、計測誤差などに起因する誤差範囲内の変化であり、現時点においては、この性能の変化は問題ないと考えられる。この点については、今後、継続的に PPWC の性能を監視し、PPWC の経年変化の影響を評価する予定である。

次に、各運転時に対する UA を比較すると、定格／高温試験運転および単独／並列運転では UA が異なっている。定格／高温試験運転については、各運転によって PPWC に流入する流体の

流速および温度が異なるためであり、また、単独／並列運転については、各運転によって PPWC 内の 1 次冷却材の流路を変更することで PPWC 内での伝熱面積を変えていることによるものである。

なお、Fig. 4.5 の定格／並列運転における UA について、PT-2-2P で 1 点だけ高い UA となっているが、これは熱交換器の性能試験に伴い 1 次冷却材流量を約 10% 増大させたことにより、熱交換性能が増加したことによるものである。

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～Table 4.6 に比較の結果を示す。Table 4.3 は定格／単独運転、Table 4.4 は定格／並列運転、Table 4.5 は定格／単独運転、Table 4.6 は定格／並列運転、に対する比較の結果である。

各運転に対する設計値と評価値の差を見ると、10%程度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 における伝熱性能の許容範囲はプラント成立性の評価より算出された+10%～-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概ね入っているとみなせる。以上のことより、PPWC の伝熱性能は設計時に想定された範囲内の伝熱性能を有していることを確認した。

4.6 熱伝達率の評価及び考察

前節では、設計時の PPWC の伝熱性能と実測より得られた伝熱性能の比較を行い、設置されている PPWC の性能は設計時の範囲内に入っていることを確認した。しかしながら、PPWC の伝熱性能は範囲内の下限値に非常に近い値をとっており、PPWC の設計手法の更なる高度化が可能であると考えられる。

伝熱性能の設計と実測の違いの原因としては、

- ・熱伝達率の見積もりが設計値より少ない。
- ・実際に冷却材流量が設計値より少なく、設計時の熱伝達率が確保されていない。
- ・伝熱管内又は伝熱管外にスケールや酸化皮膜等の熱抵抗を増大させる物体が付着している。

等が挙げられる。

そこで、実測より得られた伝熱性能を基に、管内・管外の熱伝達率を算出することとした¹⁴⁾。ここでは PPWC を等間隔バッフルのシェルアンドチューブ型熱交換器と仮定して、実際に得られたデータを基に管外熱伝達率の算出を行い、設計時の熱伝達率と比較を行うこととした。なお、熱ふく射に関しては、設計時の性能評価よりその寄与が全体の 1%程度であることから、本評価では考慮しないこととした。

① 管内（加圧水側）熱伝達率

管内（加圧水側）の熱伝達率は、算出に実験式を用いていること、水質の管理が行われていることを考慮に入れ、設計時に用いられた Eq. (3.19)～Eq. (3.22)により評価することとした。

② 管外（1 次ヘリウム側）熱伝達率

管外熱伝達率については、Eq. (3.1)を変形した次式を用いて算出した。

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 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)
 h_i : 管側 (加圧水側) 熱伝達率 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)
 U : 熱貫流率 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)
 λ_t : 伝熱管熱伝導率 ($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$)

Eq.(4.14)中の熱貫流率についてはEq.(3.3)を変形した次式を用いて評価した。

$$T_2 = T_{\text{He1}}^{\text{PPWC_IN}} - T_{\text{Water}}^{\text{PPWC_OUT}} \dots \quad (4.18)$$

A	: 伝熱面積 (m^2)
Q_U	: 対流熱伝達による交換熱量 (W)
$T_{He1}^{PPWC_IN}$: PPWC 入口 1 次冷却材 (管外流体) 温度 (°C)
$T_{He1}^{PPWC_OUT}$: PPWC 出口 1 次冷却材 (管外流体) 温度 (°C)
$T_{Water}^{PPWC_IN}$: PPWC 入口 加圧水 (管内流体) 温度 (°C)
$T_{Water}^{PPWC_OUT}$: PPWC 出口 加圧水 (管内流体) 温度 (°C)
U	: 熱貫流率 ($W/m^2 \cdot K$)
ΔT_L	: 対数平均温度差 (K)
Ψ	: 温度差補正係数 (-)

Eq. (4.16)中の温度差補正係数はシェルアンドチューブ型熱交換器の場合、次式で与えられる。

$$\psi = \frac{\sqrt{R_A^2 + 1}}{R_A - 1} \cdot \frac{\ln \left[\frac{1 - E_A}{1 - E_A \cdot R_A} \right]}{\ln \left[\frac{(2/E_A) - 1 - R_A + \sqrt{R_A^2 + 1}}{(2/E_A) - 1 - R_A - \sqrt{R_A^2 + 1}} \right]} \quad \dots \dots \dots \quad (4.19)$$

Ψ	:	温度差補正係数 (-)
E_A	:	温度効率 (-)
R_A	:	水等量比 (-)
$T_{He1}^{PPWC_IN}$:	PPWC 入口 1 次冷却材 (管外流体) 温度 (°C)
$T_{He1}^{PPWC_OUT}$:	PPWC 出口 1 次冷却材 (管外流体) 温度 (°C)
$T_{Water}^{PPWC_IN}$:	PPWC 入口 加压水 (管内流体) 温度 (°C)
$T_{Water}^{PPWC_OUT}$:	PPWC 出口 加压水 (管内流体) 温度 (°C)

これらの式を基に算出した管外・管内熱伝達率の結果を Table 4.7~Table 4.10 に示す。また、詳細な評価結果を付録 C の Table C.1~Table C.8 に示す。

管内熱伝達率の設計値と実測値の差は10%程度であったが、管外熱伝達率の場合には20%程度設計より低くなる結果となった。管内熱伝達率の設計値とのずれについては、設計時より水の温度が低いことに起因するものであると考えられる。一方、管外熱伝達率の設計値とのずれについては、冷却材にヘリウムガスを用いているため、その汚れの影響が少ないことを考えると、設計時に用いた熱伝達率相關式が過大評価をしている可能性が考えられる。

これらのことより、今後、加圧水冷却器の設計手法を高度化するためには、PPWC内のヘリウム流動に関する解析等を行い、管外（ヘリウム側）熱伝達率を再評価する必要があると考えられる。

5. 結言

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1次加圧水冷却器(PPWC)について伝熱性能を評価した。また、設計時におけるPPWCの伝熱性能との比較を行い、設計時に用いたPPWC伝熱性能評価手法の妥当性を検討した。

その結果、PPWCの伝熱性能は設計時に想定された範囲内である(設計値・10%)の伝熱性能を有していることを確認した。しかしながら、PPWCの伝熱性能は設計時に想定された範囲の下限値近くであることから、今後、伝熱性能の監視を行い、伝熱性能の経年変化などの評価を行う必要がある。

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部長、川崎幸三 同部次長、中澤利雄 同部次長、および伊与久達夫 HTTR技術開発室長に御指導、御助言頂きました。また、核熱応用工学ユニット 國富一彦 グループリーダーに貴重なご意見を頂きました。更に、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) 斎藤伸三 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) 栗尾大輔 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).
- (11) 国富一彦 他 : "高温用加圧水冷却器の管外熱伝達相関式の高精度化", 原子力誌, 38, 665 (1996).
- (12) E. N. Sieder and G. E. Tate , Industrial and Engineering Chemistry, 28, 1429 (1936)
- (13) K. Imanishi : private communication
- (14) 西川兼康 他 : "伝熱学", 理工学社 (1982)
- (15) 日本機械学会 : "機械工学便覧 A6 热工学", 丸善 (1985)
- (16) 尾花英明 : "熱交換器設計ハンドブック", 工学図書株式会社 (2000).
- (17) Y. Inagaki et al., "Cooling performance of helium-gas/water coolers in HENDEL", Nucl. Eng. Des., 146, pp.301-309 (1994).

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 : 14.9t/h / 12.2t/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 pressurized water cooling system

Number of loop	1
Heat capacity	30MW
Operation pressure	3.5MPa
Allowable working pressure	4.8MPa
Allowable working temperature	262°C
Pressurized water flow mass rate	(Single-loaded operation) PPWC : 625t/h / 618t/h* (Parallel-loaded operation) PPWC : 413t/h / 410 t/h* SPWC : 216t/h / 208 t/h*

* Rated operation / High temperature test operation

Table 2.3 Major specification of pressurized water circulation pump

Type	Horizontal centrifugal type
Number	2
Pressurized water flow mass rate (maximum)	640t/h
Allowable working pressure	4.8MPa
Allowable working temperature	170°C
Motor power	240kW
Head	822kPa

Table 2.4 Major specification of PPWC

Type	Vertical U-tube type
Heat capacity	(Single-loaded operation) 30MW (Parallel-loaded operation) 20MW
Primary coolant temperature	(Inlet) 850 °C / 950 °C * (Outlet) 395 °C
Primary coolant flow rate	(Single-loaded operation) 45t/h / 37t/h * (Parallel-loaded operation) 30t/h / 24t/h *
Pressurized water temperature	(Inlet) 150 °C (Outlet) 190 °C
Pressurized water flow rate	(Single loaded operation) 640t/h / 630t/h * (Parallel loaded operation) 420t/h
Outer diameter of shell	2.1m
Total height	7.1m
Material of outer and inner shell	Low-alloy steel
Number of heat transfer tube	136
Outer diameter of heat transfer tube	25.4mm
Thickness of heat transfer tube	2.6mm
Material of heat transfer tube	Austenitic stainless steel
Allowable working pressure	4.8MPa (outer shell and heat transfer tube)
Allowable working temperature	(Outer shell) 430 °C (Heat transfer tube) 380 °C

* Rated operation / High temperature test operation

Table 2.5 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)	794kPa	1,080kPa
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 3.1 Design specification of the PPWC

PPWC primary coolant temperature	(Single-loaded operation) Inlet : 843 °C # / 942 °C #* Outlet : 384 °C / 387 °C * (Parallel-loaded operation) Inlet : 850 °C / 950 °C * Outlet : 388 °C / 390 °C *
PPWC primary coolant inlet pressure	4.0MPa
Primary coolant flow mass rate	(Single-loaded operation) 45.2t/h / 37.0t/h * (Parallel-loaded operation) 29.7t/h / 24.3t/h *
PPWC pressurized water temperature	(Single-loaded operation) Inlet : 135 °C / 134 °C * Outlet : 175 °C / 174 °C * (Parallel-loaded operation) Inlet : 135 °C / 133 °C * Outlet : 175 °C / 173 °C *
PPWC pressurized water inlet pressure	3.6MPa
Pressurized water flow mass rate	(Single-loaded operation) 625t/h / 618t/h * (Parallel-loaded operation) 413t/h / 410t/h *
Exchanged heat	(Single-loaded operation) 30MW (Parallel-loaded operation) 20MW

Rated operation / High temperature test operation

This value contains temperature drop by IHX bypass flow

Table 3.2 Structural specification

Shell inner diameter	1600mm
Heat transfer tube	(Specification) JIS G 3463 SUS 321 TB bending U-tube (Outer diameter) 25.4mm (Thickness) 2.86mm (Number) 136
Interval of baffle plate	(1st stage) 1120mm (2nd stage) 640mm (3rd stage) 365mm (4th stage) 365mm (5th stage) 750mm
Heat transfer area	(1st stage) 24.31m ² (2nd stage) 13.89m ² (3rd stage) 7.92m ² (4th stage) 7.92m ² (5th stage) 16.28m ²
Emissivity	(Heat transfer tube) 0.44 (Liner) 0.70

Table 3.3 Pressure drop at the PPWC

Primary coolant	(Single-loaded operation) 12.96kPa/9.04kPa *
	(Parallel-loaded operation) 7.14kPa/4.93kPa *
Pressurized water	(Single-loaded operation) 97.65kPa/95.59kPa *
	(Parallel-loaded operation) 44.57kPa/43.95kPa *

* Rated operation/High temperature test operation

Table 4.1 Measurement item by plant data collecting system

No.	PID No.	Measurement point name	Range	Accuracy
		Measurement equipment		
1	24C031	Power range neutron flux (BV)	0.0~120.0%	1.3×10^{-12} A/nv
		Neutron detector		
2	13A130	Reactor inlet helium temperature D	0~500 °C	0.4 class
		K-type thermocouple		
3	13A131	Reactor outlet helium temperature D	0~1,200 °C	0.4 class
		K-type thermocouple		
4	13A240	PPWC HGC (A) revolution	0~15,000rpm	+200 rpm
		Vibro-meter		
5	13A403	PPWC outlet helium flow mass rate (A)	0.0~17.0t/h	$\pm 0.5\%$
		Orifice/Differential pressure transducer		
6	13A151	PPWC HGC (A) helium inlet temperature	0~500 °C	0.4 class
		K-type thermocouple		
7	13A241	PPWC HGC (B) revolution	0~15,000rpm	+200 rpm
		Vibro-meter		
8	13A404	PPWC outlet helium flow mass rate (B)	0.0~17.0t/h	$\pm 0.5\%$
		Orifice/Differential pressure transducer		
9	13A152	PPWC HGC (B) helium inlet temperature	0~500 °C	0.4 class
		K-type thermocouple		
10	13A154	PPWC helium temperature Ch. 1	0~500 °C	0.15 class
		Pt100-type thermocouple		
	13A155	PPWC helium temperature Ch. 2		
		Pt100-type thermocouple		
11	13A156	PPWC helium temperature Ch. 3		
		Pt100-type thermocouple		
	13A242	PPWC HGC (C) revolution	0~15,000rpm	+200 rpm
		Vibro-meter		
12	13A405	PPWC outlet helium flow mass rate (C)	0.0~17.0t/h	$\pm 0.5\%$
		Orifice/Differential pressure transducer		
13	13A153	PPWC HGC (C) helium inlet temperature	0~500 °C	0.4 class
		K-type thermocouple		
14	13C087	PPWC helium outlet pressure (BV)	0.0~5.0MPa	$\pm 0.5\%$
		Pressure transducer		

15	13A243	IHX HGC revolution Vibro-meter	0~15,000rpm	+200 rpm
16	13A401	IHX helium outlet flow mass rate Orifice/Differential pressure transducer	0.0~17.0t/h	± 0.5%
17	13A083	IHX by-pass helium flow mass rate Orifice/Differential pressure transducer	0.0~1.0t/h	± 0.5%
18	13A132	IHX by-pass helium temperature K-type thermocouple	0~500 °C	0.4 class
19	13A161	IHX HGC inlet temperature K-type thermocouple	0~500 °C	0.4 class
20	13A166	IHX helium outlet coolant temperature Ch. 1 Pt100-type thermocouple	0~500 °C	0.15 class
	13A167	IHX helium outlet coolant temperature Ch. 2 Pt100-type thermocouple		
	13A168	IHX helium outlet coolant temperature Ch. 3 Pt100-type thermocouple		
	13A356	PPWC pressurized water inlet pressure Pressure transducer		± 0.5%
22	13A410	Primary coolant/Pressurized water differential pressure Differential pressure transducer	0.0~1.0MPa	± 0.5%
23	13A370	PPWC pressurized water inlet temperature Ch.1 Pt100-type thermocouple	50~170 °C	0.15 class
	13A371	PPWC pressurized water inlet temperature Ch.2 Pt100-type thermocouple		
	13A372	PPWC pressurized water inlet temperature Ch.3 Pt100-type thermocouple		
	13A376	PPWC pressurized water outlet temperature (A) 0.15 class	90~210 °C	0.15 class
24	13A377	PPWC pressurized water outlet temperature (B) 0.15 class		
	13A378	PPWC pressurized water outlet temperature (C) 0.15 class		
	13A400	PPWC pressurized water flow mass rate Orifice/Differential pressure transducer	0.0~800.0t/h	± 0.2%

26	13A350	PPWC pressurized water flow mass rate Ch.1	0.0~800.0t/h	$\pm 0.2\%$
		Orifice/Differential pressure transducer		
	13A351	PPWC pressurized water flow mass rate Ch.2		
		Orifice/Differential pressure transducer		
	13A352	PPWC pressurized water flow mass rate Ch.3		
		Orifice/Differential pressure transducer		

Table 4.2 Operation date

Operation name		Operation mode	Date
Rise-to-power test (1)	PT-1S	Rated / Single	2000/4/29~5/8, 5/11~5/26
	PT-1P	Rated / Parallel	2000/5/30~6/6
Rise-to-power test (2)-1	PT-2-1S	Rated / Single	2000/7/3~7/8
Rise-to-power test (2)-2	PT-2-2S	Rated / Single	2001/1/29~2/12
	PT-2-2P	Rated / Parallel	2001/2/16~3/1
Rise-to-power test (3)	PT-3S	High temperature / Single	2001/4/14~5/7
	PT-3P	High temperature / Parallel	2001/5/11~5/16, 5/21~6/8
Rise-to-power test (4)	PT-4S	Rated / Single	2001/10/23~12/14
	PT-4P	Rated / Parallel	2002/1/25~3/6
In-service operation (1)	RP-1	Rated / Parallel	2002/5/30~6/17
	RS-1	Rated / Single	2002/6/21~7/1
In-service operation (2)	RS-2	Rated / Single	2003/2/13~3/14
In-service operation (3)	RP-3	Rated / Parallel	2003/5/16~5/21
In-service operation (4)	RS-4	Rated / Single	2003/8/8~8/11
In-service operation (5)	RS-5	Rated / Single	2004/2/3~2/25, 2/29~3/5
Rise-to-power test (5)	PT-5S	High temperature / Single	2004/3/31~5/1
	PT-5P	High temperature / Parallel	2004/6/2~7/2

Table 4.3 Comparison of designed UA with evaluated UA (Rated / Single)

	Designed	Evaluated (RS-5, 2004.2.16)
Exchanged heat	30,028kW	28,740kW
PPWC primary coolant temperature	(Inlet)	843°C
	(Outlet)	384°C
Primary coolant flow mass rate	45.2t/h	45.2t/h
PPWC pressurized water temperature	(Inlet)	135°C
	(Outlet)	175°C
Pressurized water flow mass rate	625t/h	626t/h
UA	70.72kW/K	62.85kW/K
Difference		88.9%

Table 4.4 Comparison of designed UA with evaluated UA (Rated / Parallel)

	Designed	Evaluated (RP-1, 2002.6.10)
Exchanged heat	19,842kW	18,986kW
PPWC primary coolant temperature	(Inlet)	850°C
	(Outlet)	388°C
Primary coolant flow mass rate	29.7t/h	29.7t/h
PPWC pressurized water temperature	(Inlet)	135°C
	(Outlet)	175°C
Pressurized water flow mass rate	413t/h	415t/h
UA	46.14kW/K	43.40kW/K
Difference		94.1%

Table 4.5 Comparison of designed UA with Evaluated UA (High temperature / Single)

	Designed	Evaluated (PT-5S, 2004.4.23)
Exchanged heat	29,671kW	28,605kW
PPWC primary coolant temperature	(Inlet)	942 °C
	(Outlet)	387 °C
Primary coolant flow mass rate	37.0t/h	37.0t/h
PPWC pressurized water temperature	(Inlet)	134 °C
	(Outlet)	174 °C
Pressurized water flow mass rate	618t/h	618t/h
UA	63.97kW/K	57.15kW/K
Difference	89.3%	

Table 4.6 Comparison of designed UA with Evaluated UA (High temperature / Parallel)

	Designed	Evaluated (PT-5P, 2004.6.22)
Exchanged heat	19,671kW	19,058kW
PPWC primary coolant temperature	(Inlet)	950 °C
	(Outlet)	390 °C
Primary coolant flow mass rate	24.3t/h	24.1t/h
PPWC pressurized water temperature	(Inlet)	133 °C
	(Outlet)	173 °C
Pressurized water flow mass rate	410t/h	410t/h
UA	41.85kW/K	38.32kW/k
Difference	91.6%	

Table 4.7 Comparison of designed heat transfer coefficient with evaluated one (Rated / Single)

	Designed	Single-loaded (RS-5, 2004/2/16)	Difference
In-tube	29,099 W/m ² · K	25,677 W/m ² · K	-11.8%
Ex-tube	1,329 W/m ² · K	1,041 W/m ² · K	-21.7%

Table 4.8 Comparison of designed heat transfer coefficient with evaluated one (Rated / Parallel)

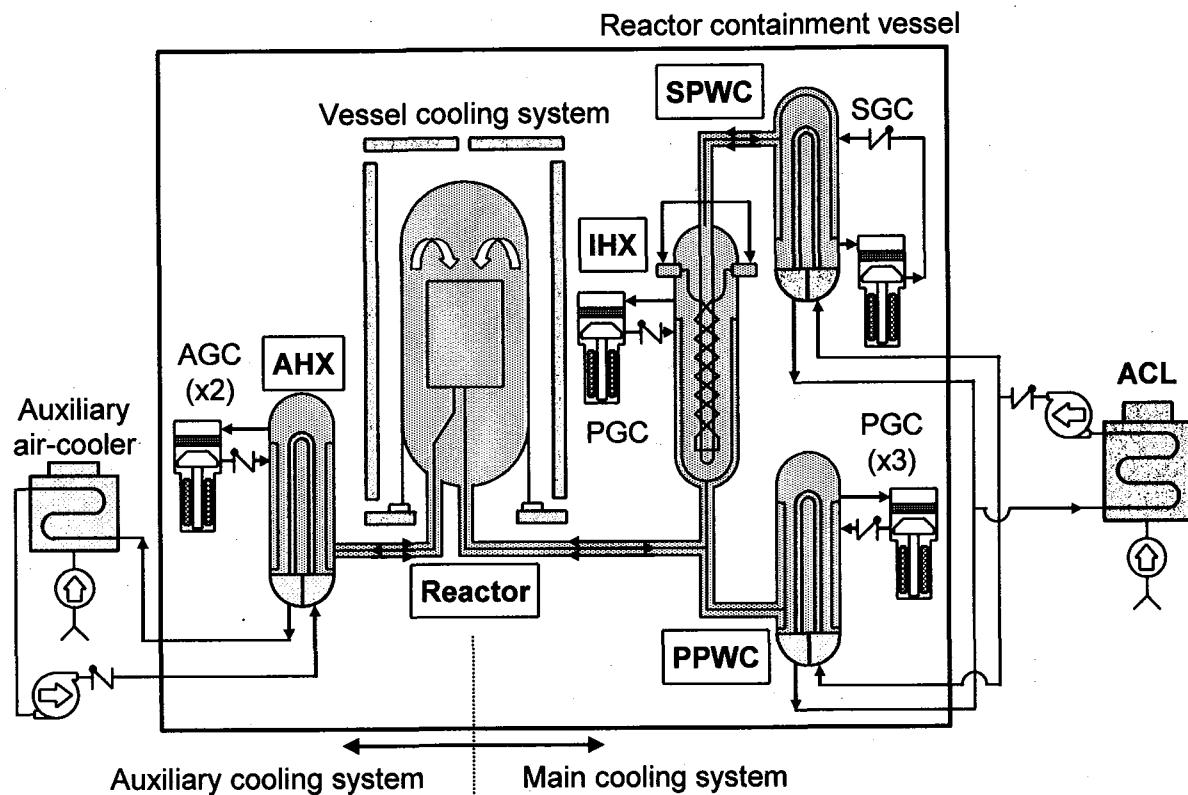
	Designed	Parallel-loaded (RP-1, 2002/6/10)	Difference
In-tube	20,949 W/m ² · K	19,343 W/m ² · K	-7.7%
Ex-tube	1,102 W/m ² · K	906 W/m ² · K	-17.8%

Table 4.9 Comparison of designed heat transfer coefficient with evaluated one (High temperature / Single)

	Designed	Single-loaded (PT-5S, 2004/4/23)	Difference
In-tube	28,765 W/m ² · K	24,761 W/m ² · K	-13.9%
Ex-tube	1,175 W/m ² · K	933 W/m ² · K	-20.6%

Table 4.10 Comparison of designed heat transfer coefficient with evaluated one (High temperature / Parallel)

	Designed	Parallel-loaded (PT-5P, 2004/6/22)	Difference
In-tube	20,715 W/m ² · K	18,137 W/m ² · K	-12.4%
Ex-tube	976 W/m ² · K	787 W/m ² · K	-19.4%



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

Fig. 2.1 The HTTR cooling system

Reactor containment vessel

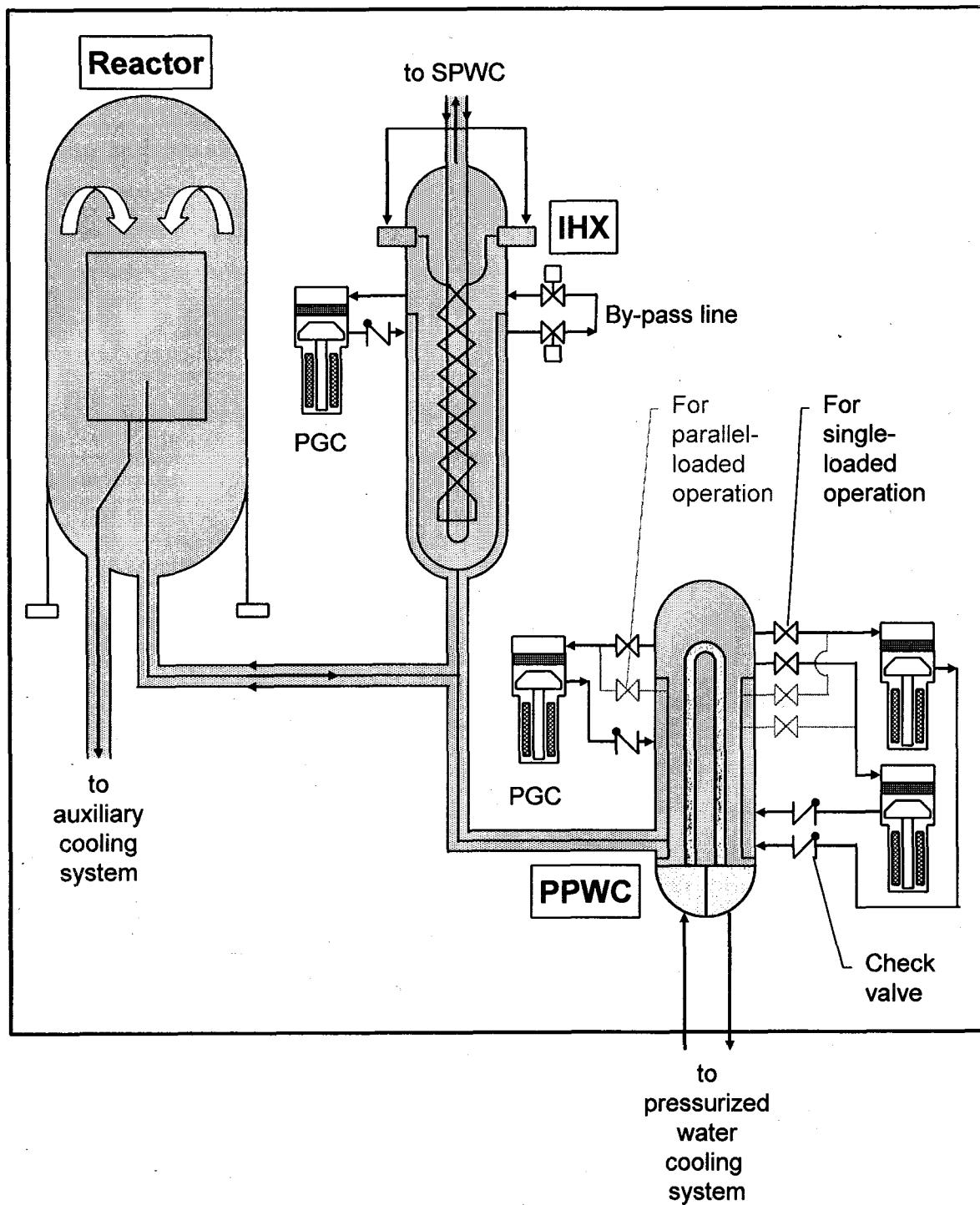


Fig. 2.2 The HTTR primary cooling system

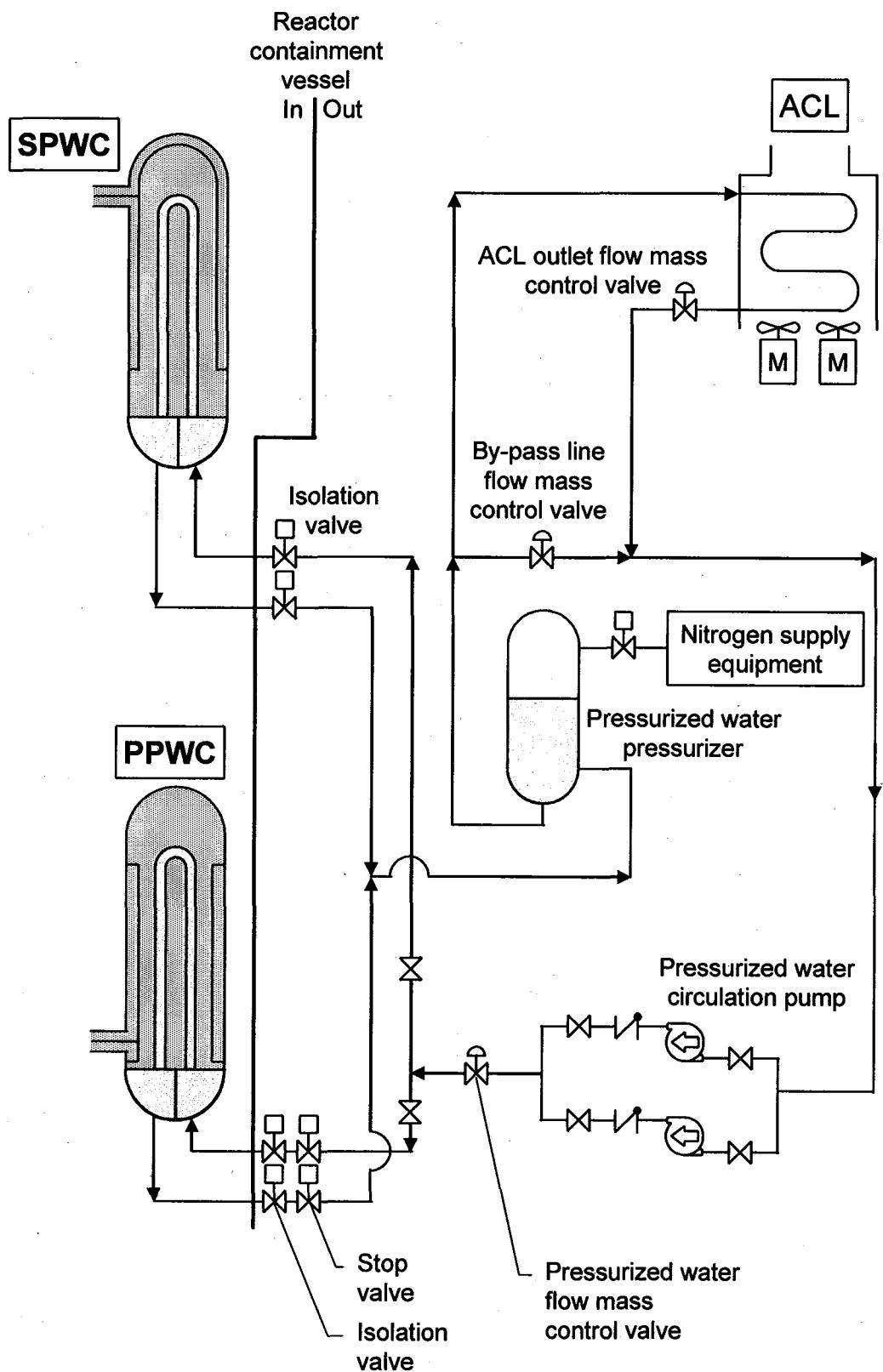


Fig. 2.3 The HTTR pressurized water cooling system

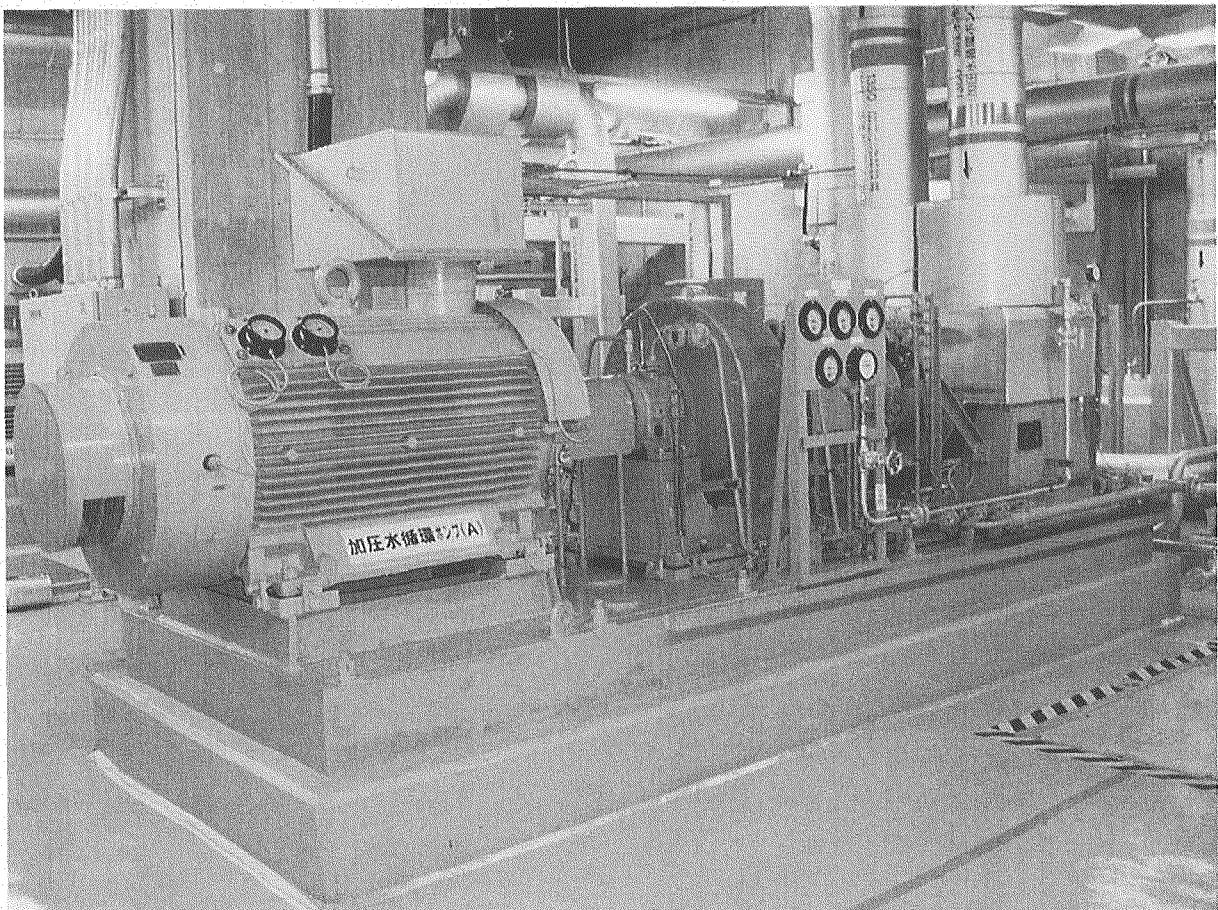


Fig. 2.4 The pressurized water circulation pump

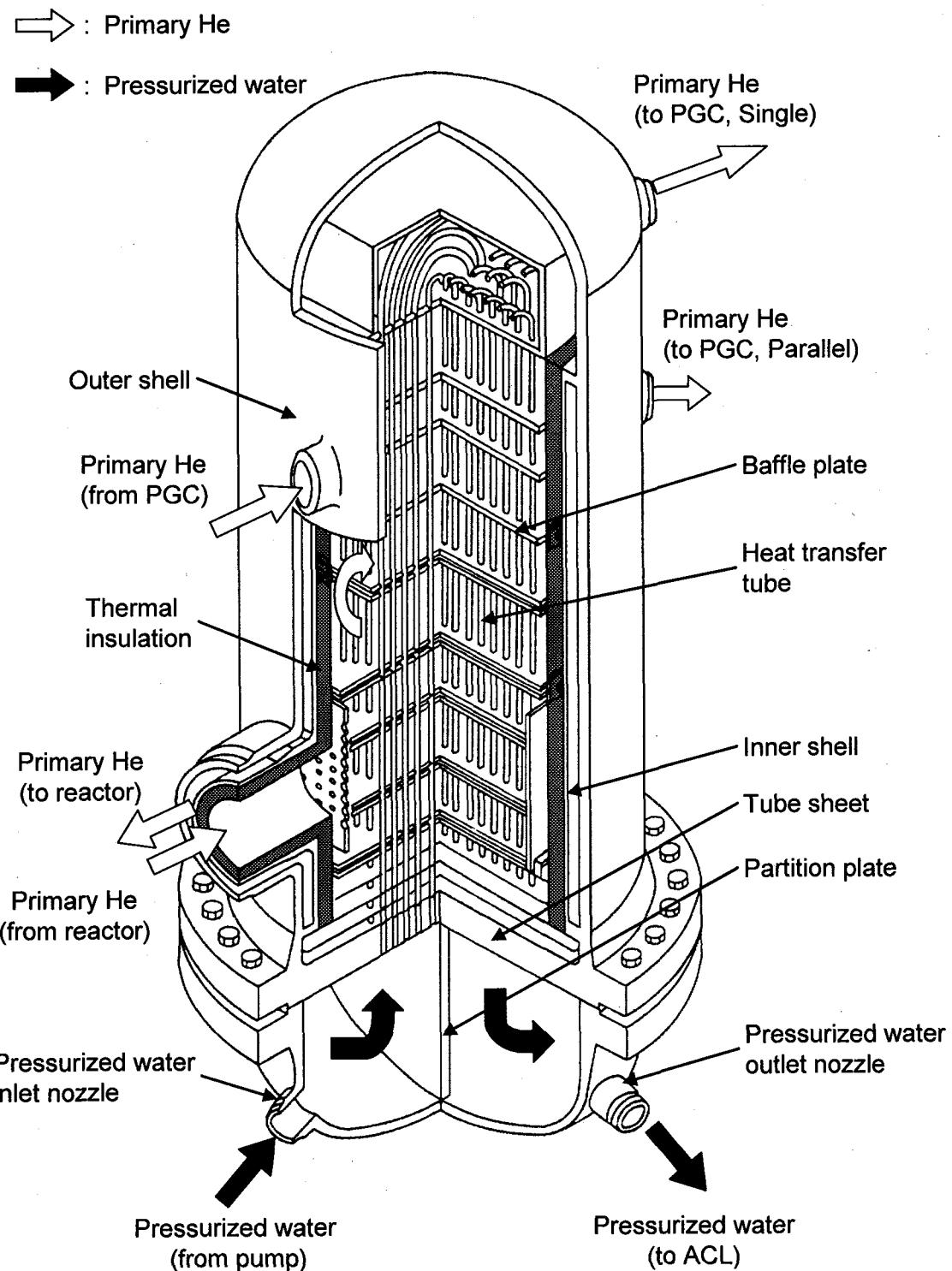


Fig. 2.5 Structural diagram of the PPWC

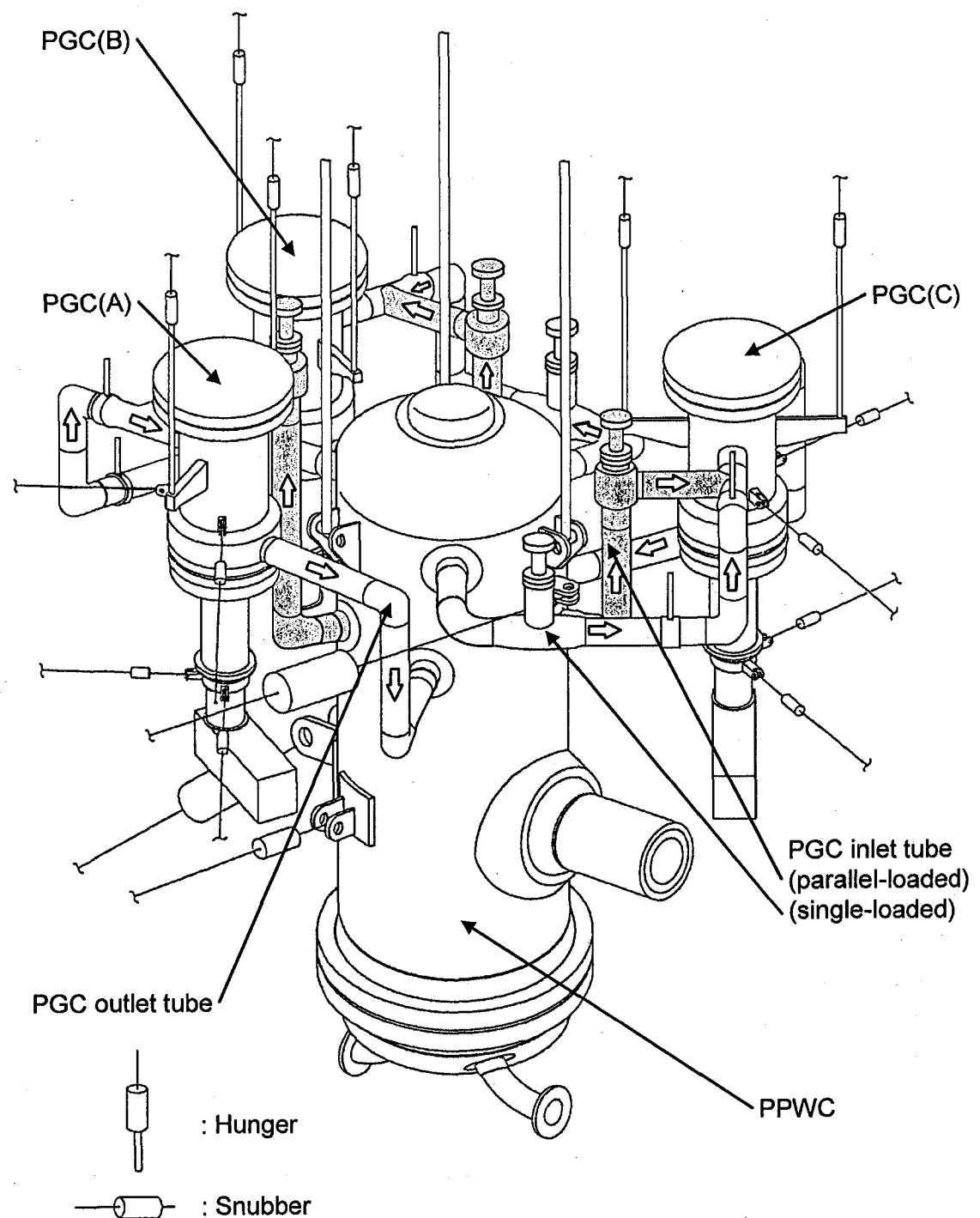


Fig. 2.6 Arrangement of the PGC around the PPWC

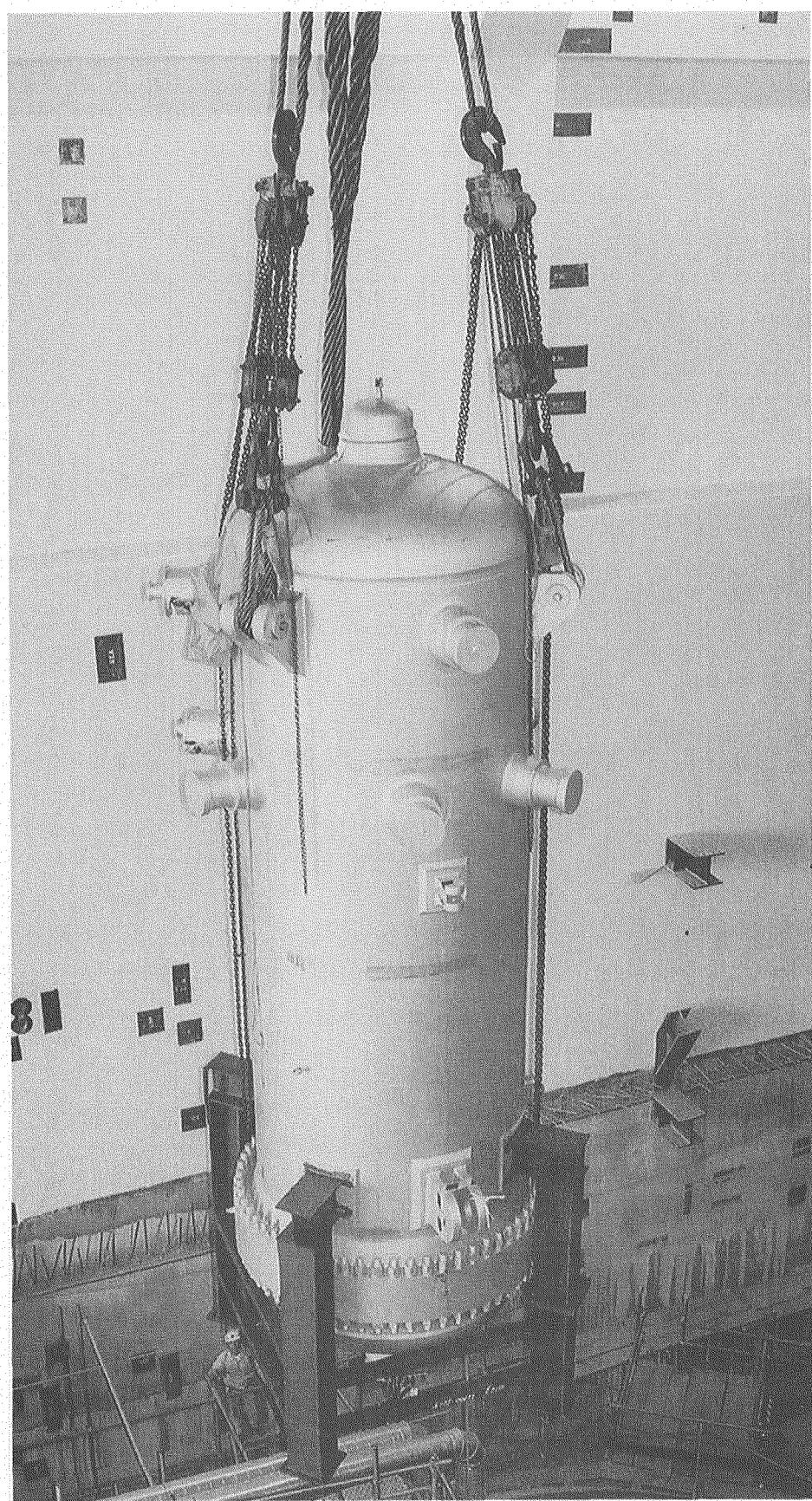


Fig. 2.7 Overall view of the PPWC

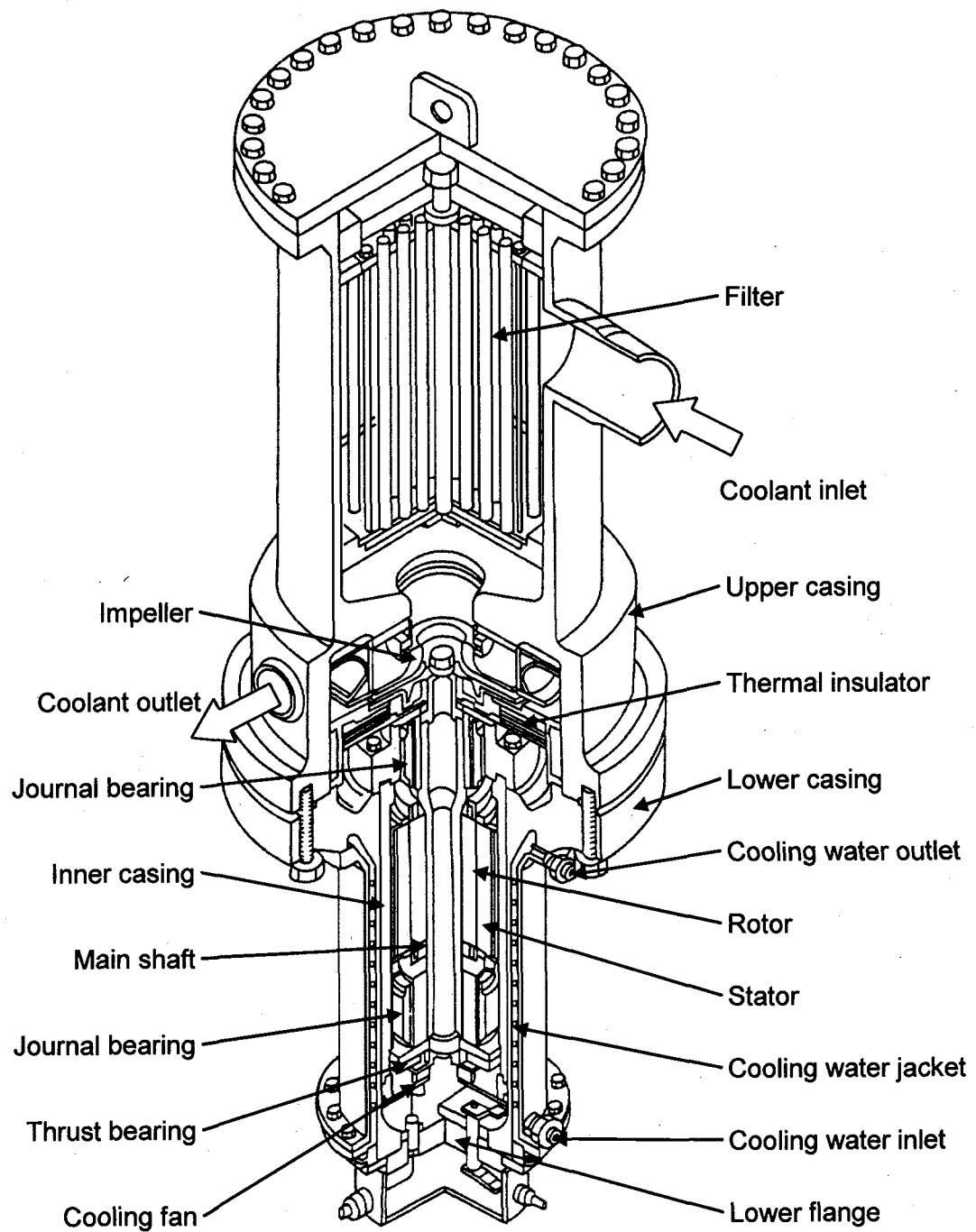


Fig. 2.8 Structural diagram of the primary helium gas circulator

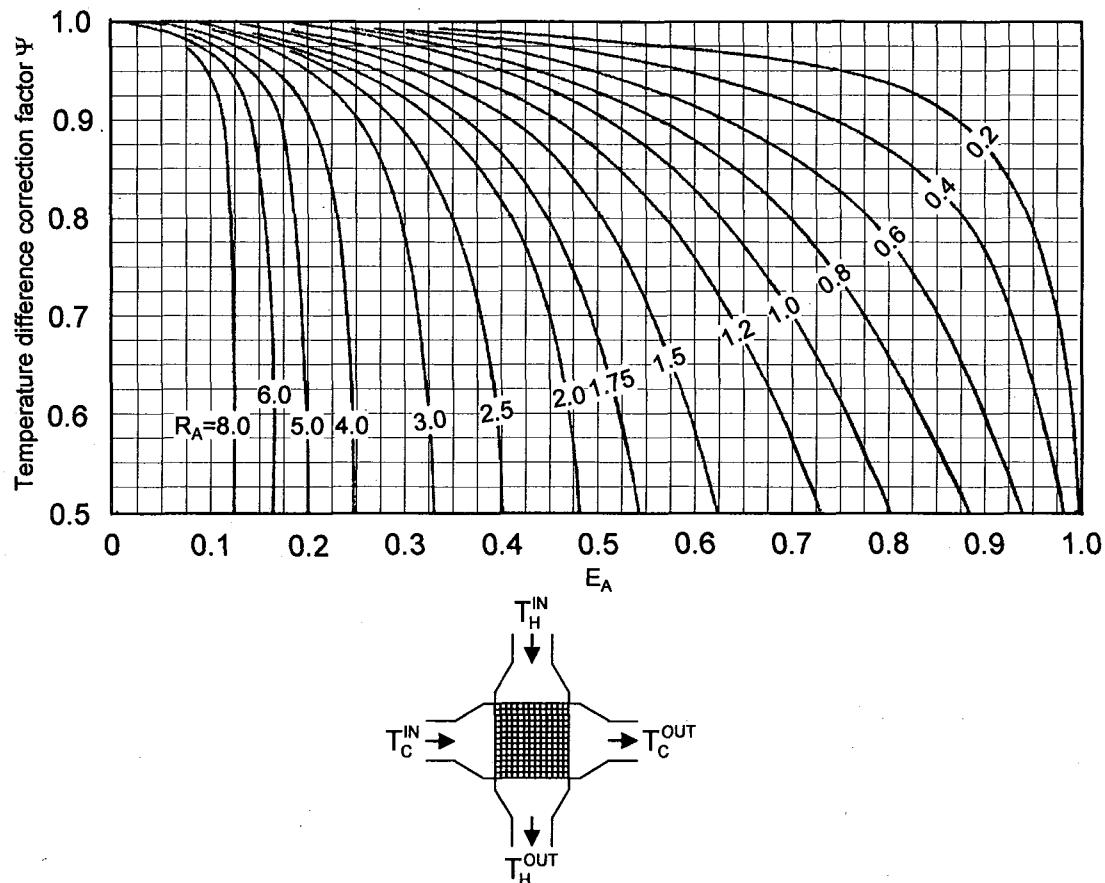


Fig. 3.1 Temperature difference correction factor

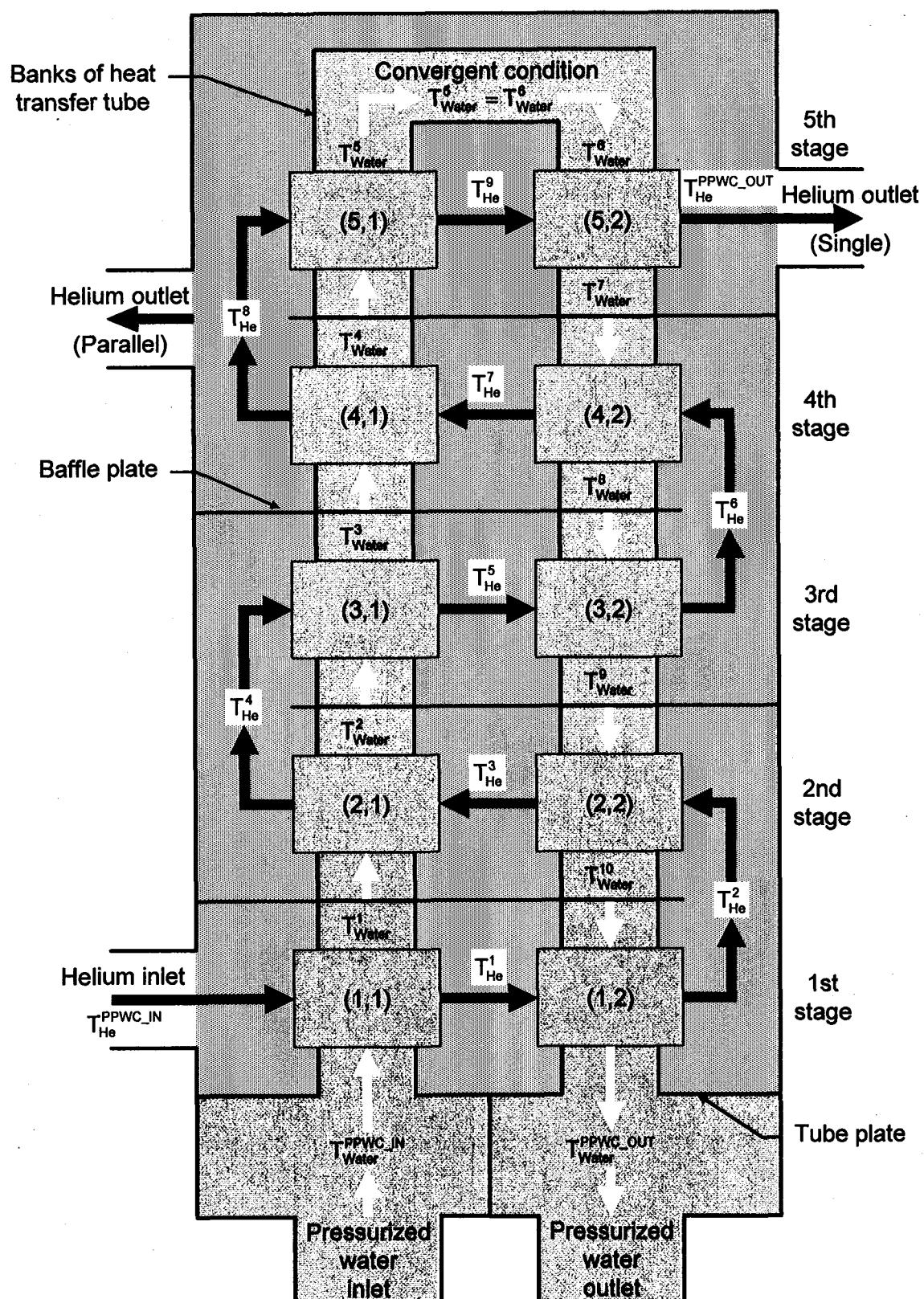


Fig. 3.2 Estimation model of heat exchange performance for the PPWC

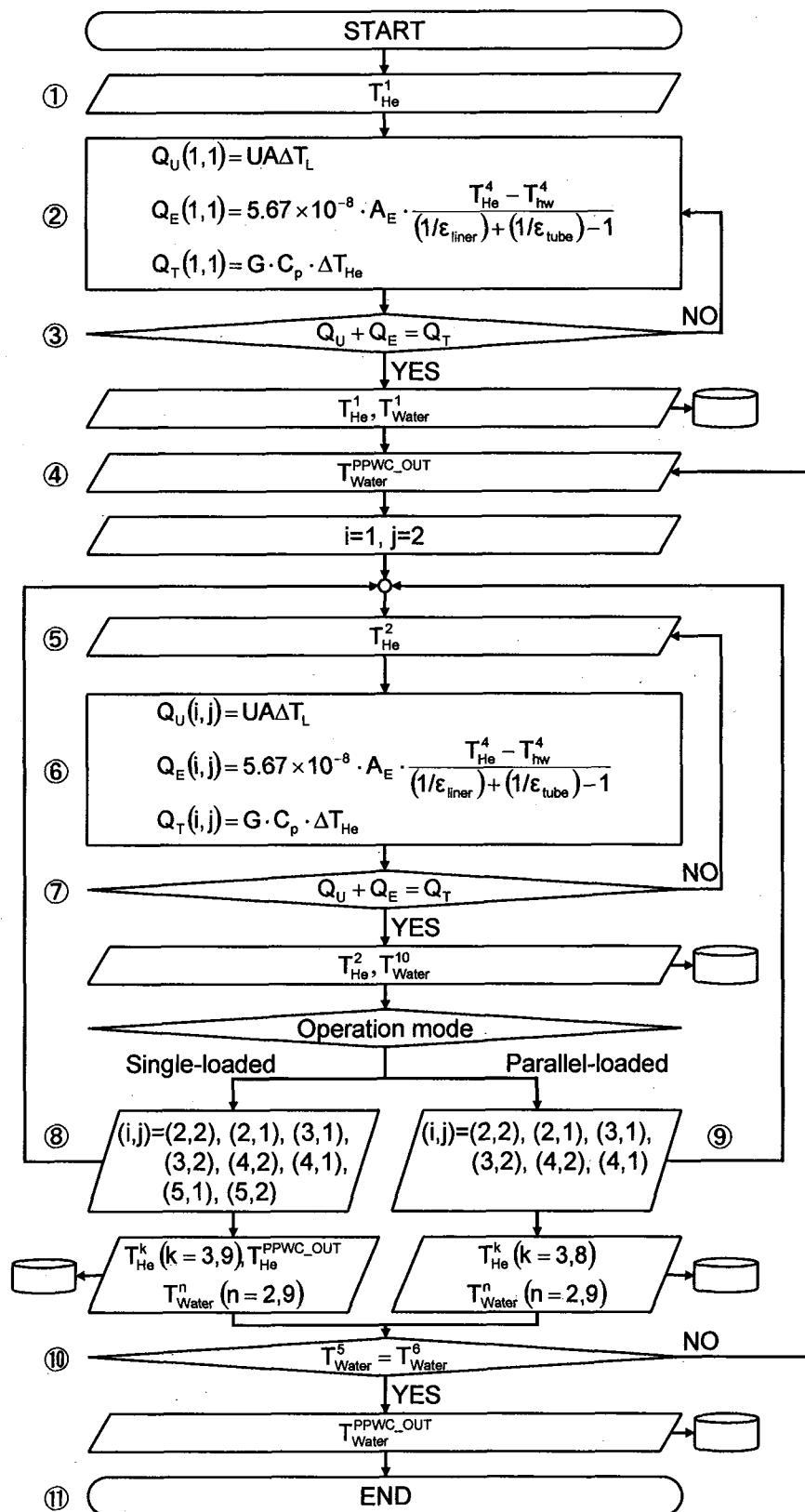


Fig. 3.3 Flowchart of heat exchange performance estimation

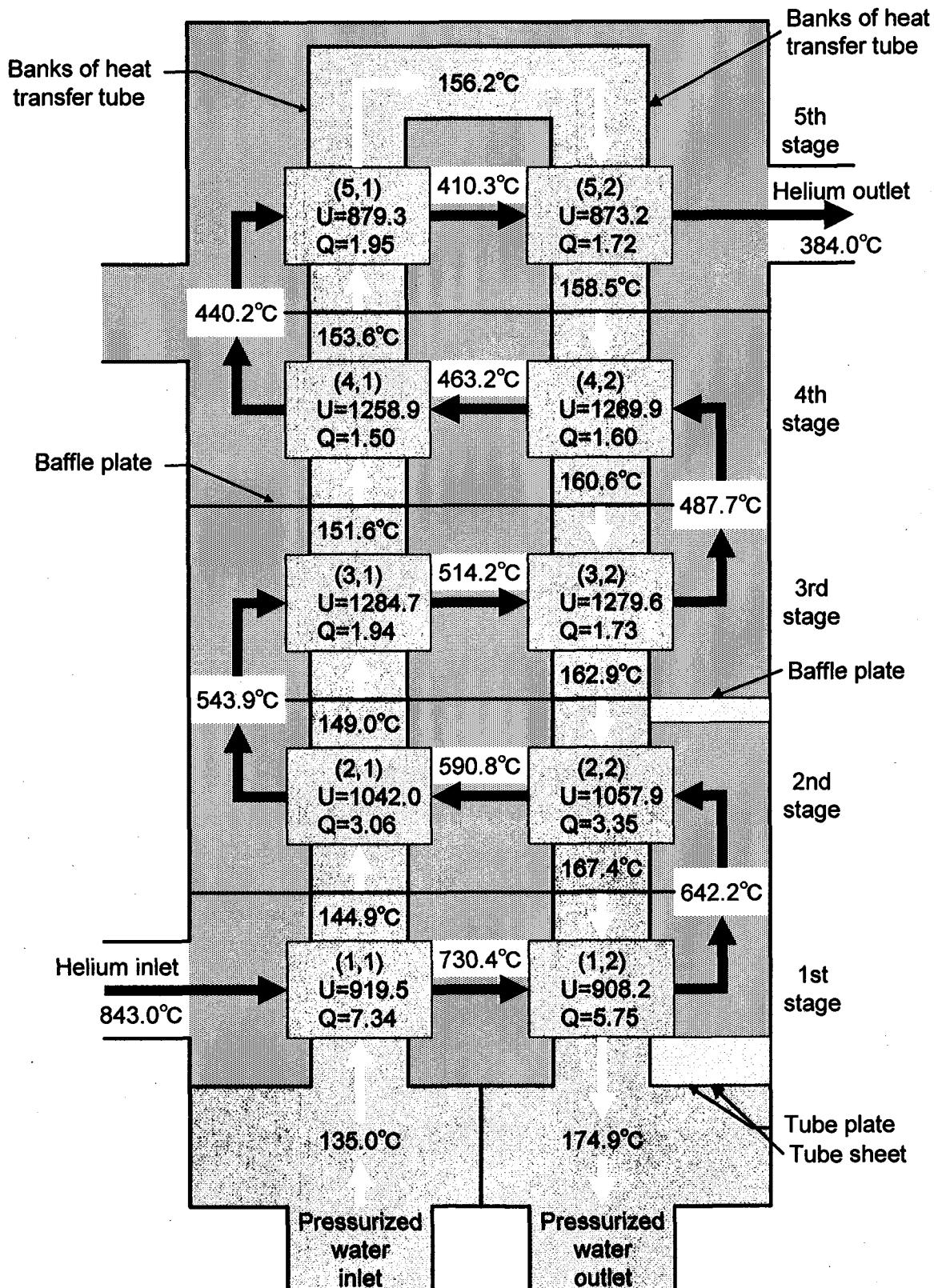
U : Heat transmission coefficient ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$) Q : Exchanged Heat (MW)

Fig. 3.4 Estimation result of heat exchange performance (Rated / Single)

U : Heat transmission coefficient ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)

Q : Exchanged Heat (MW)

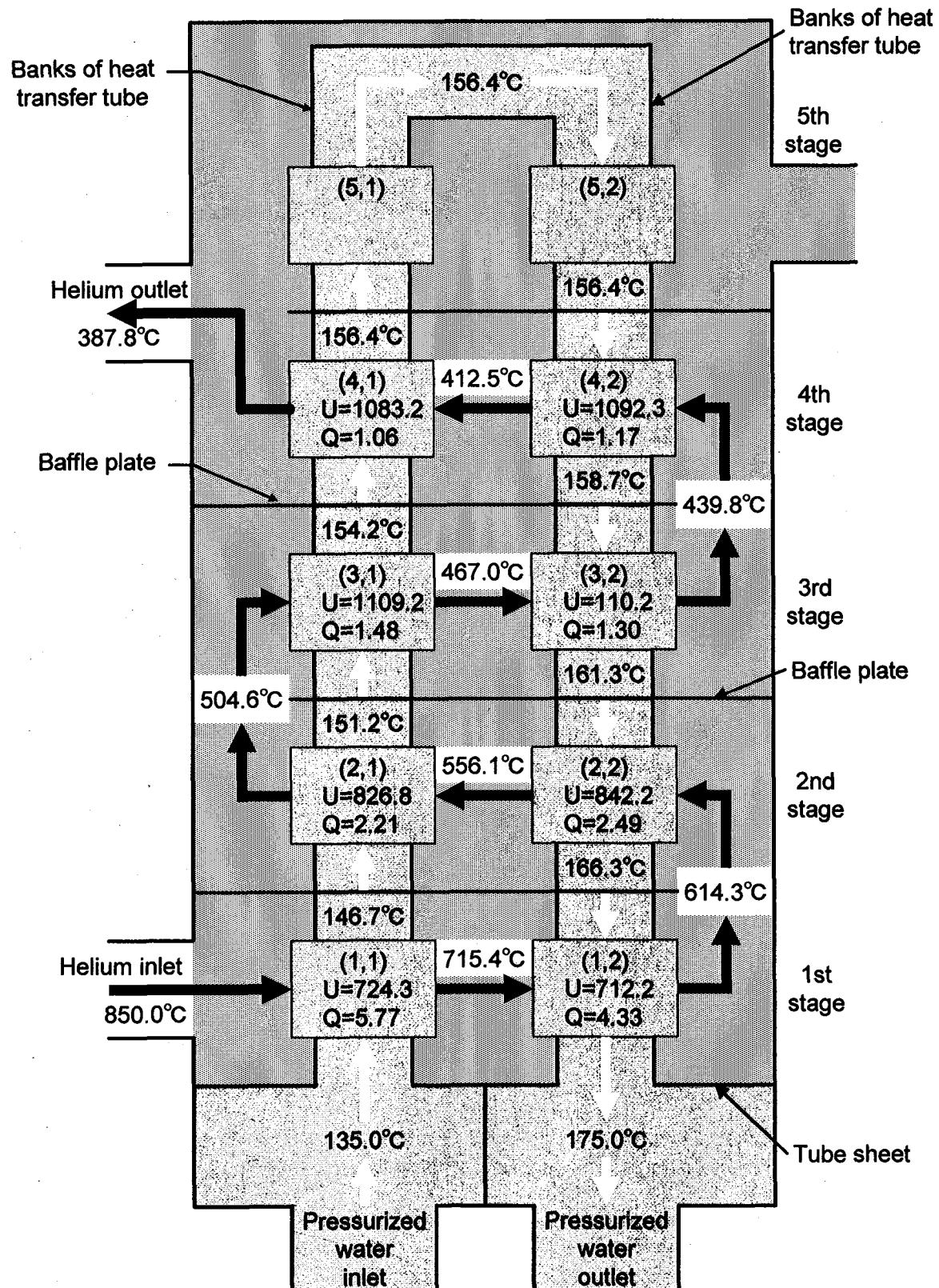


Fig. 3.5 Estimation result of heat exchange performance (Rated / Parallel)

U : Heat transmission coefficient ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)

Q : Exchanged Heat (MW)

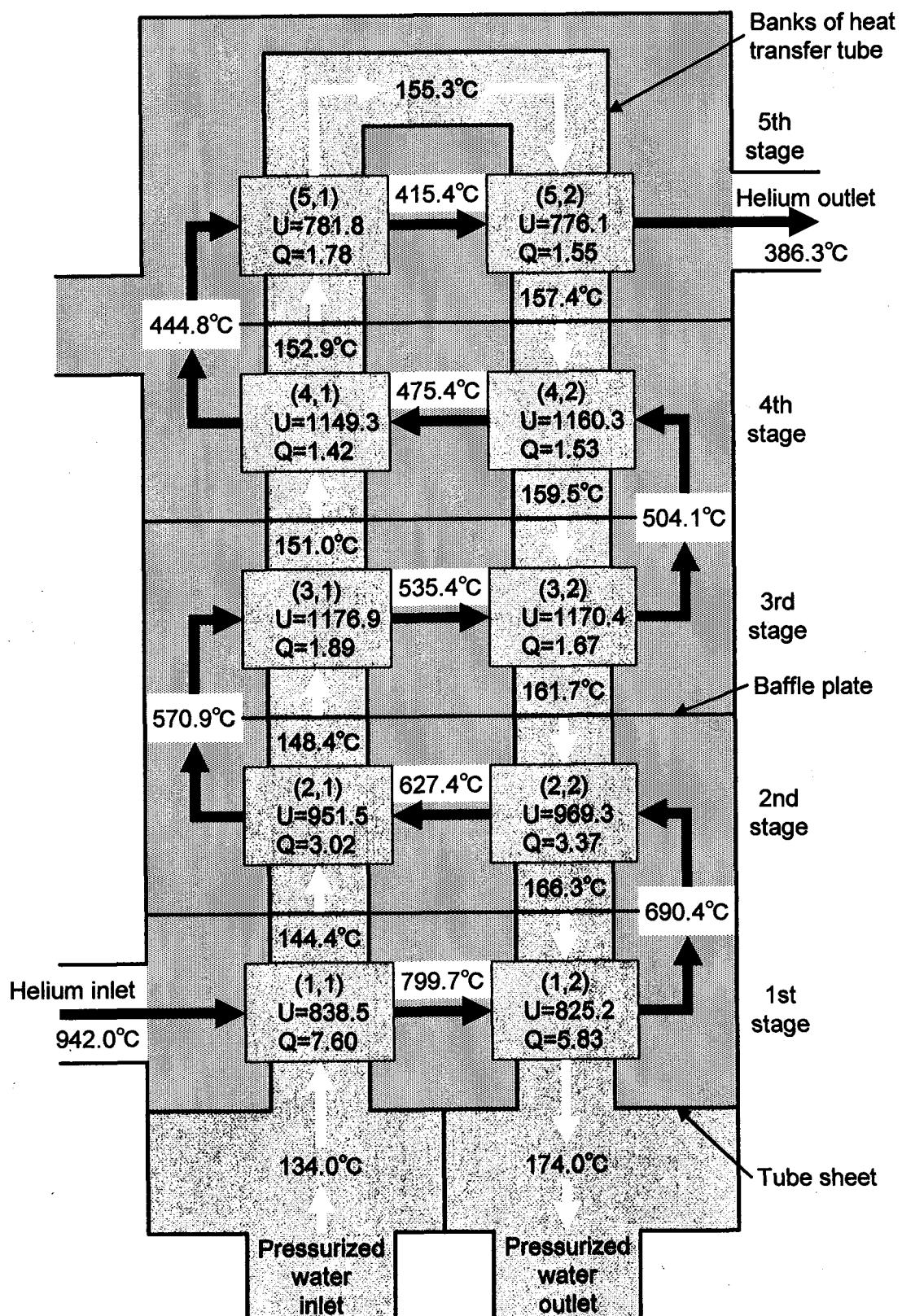


Fig. 3.6 Estimation result of heat exchange performance (High temperature / Single)

U : Heat transmission coefficient ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)

Q : Exchanged Heat (MW)

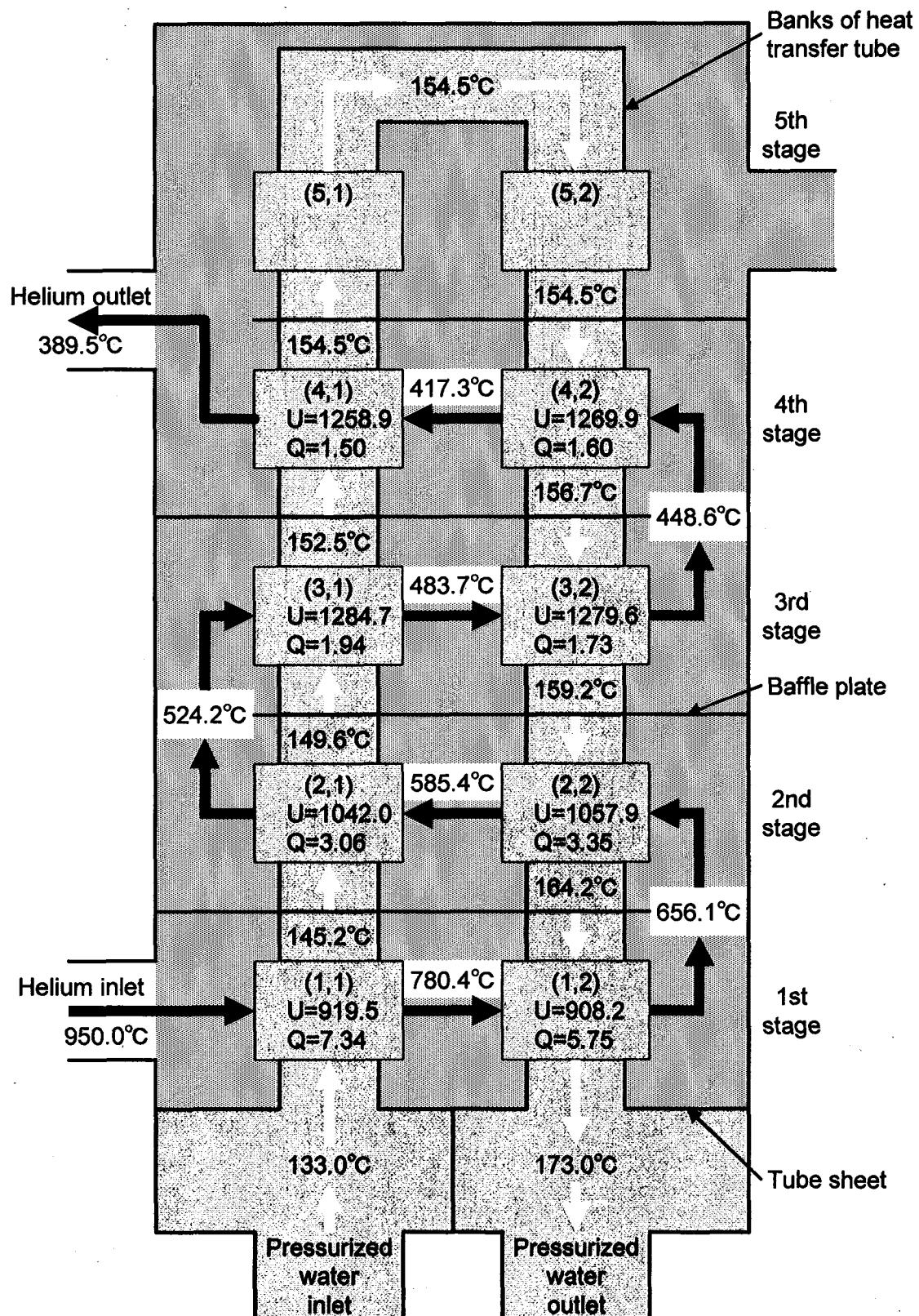


Fig. 3.7 Estimation result of heat exchange performance (High temperature / Parallel)

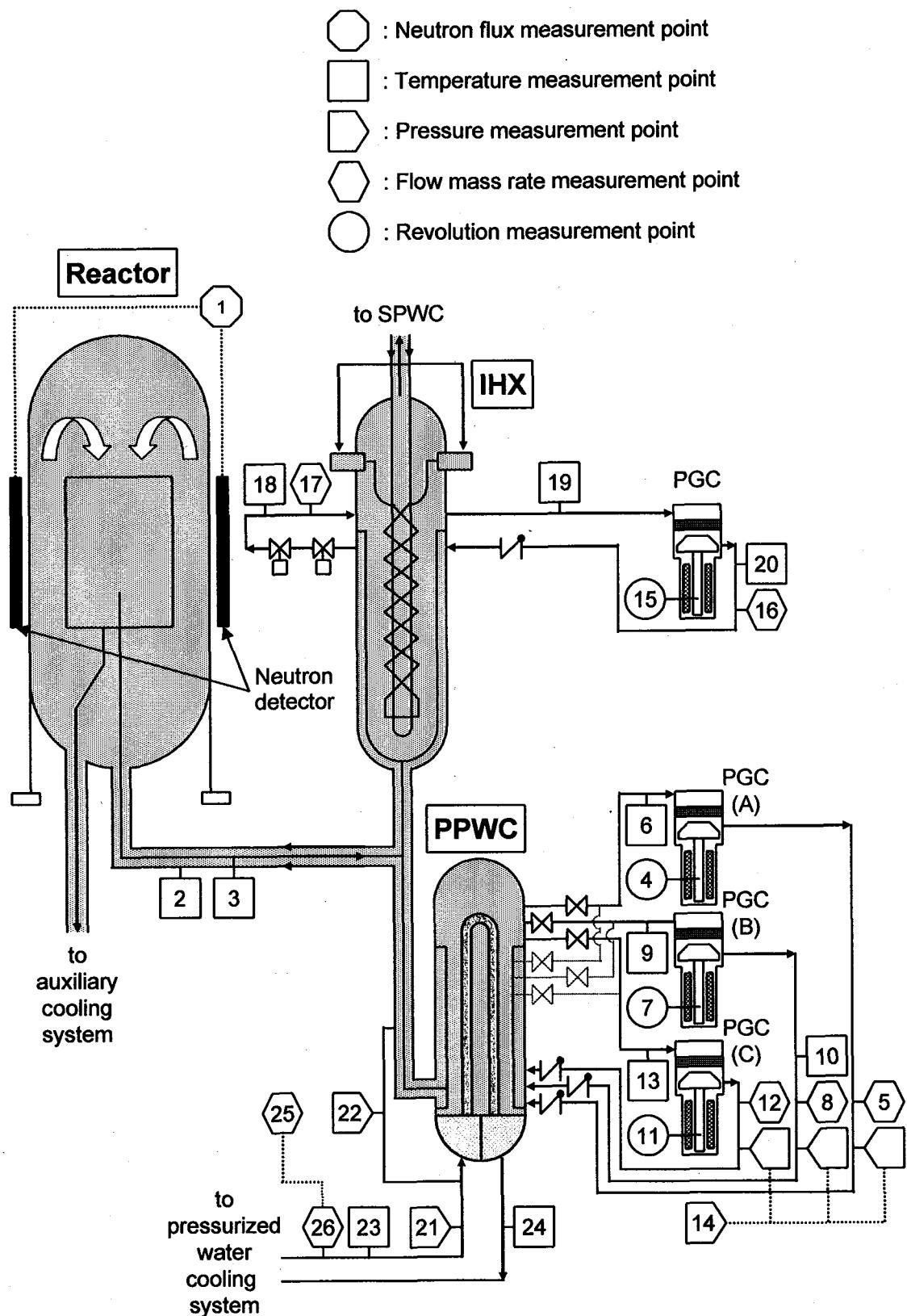


Fig. 4.1 Measurement point

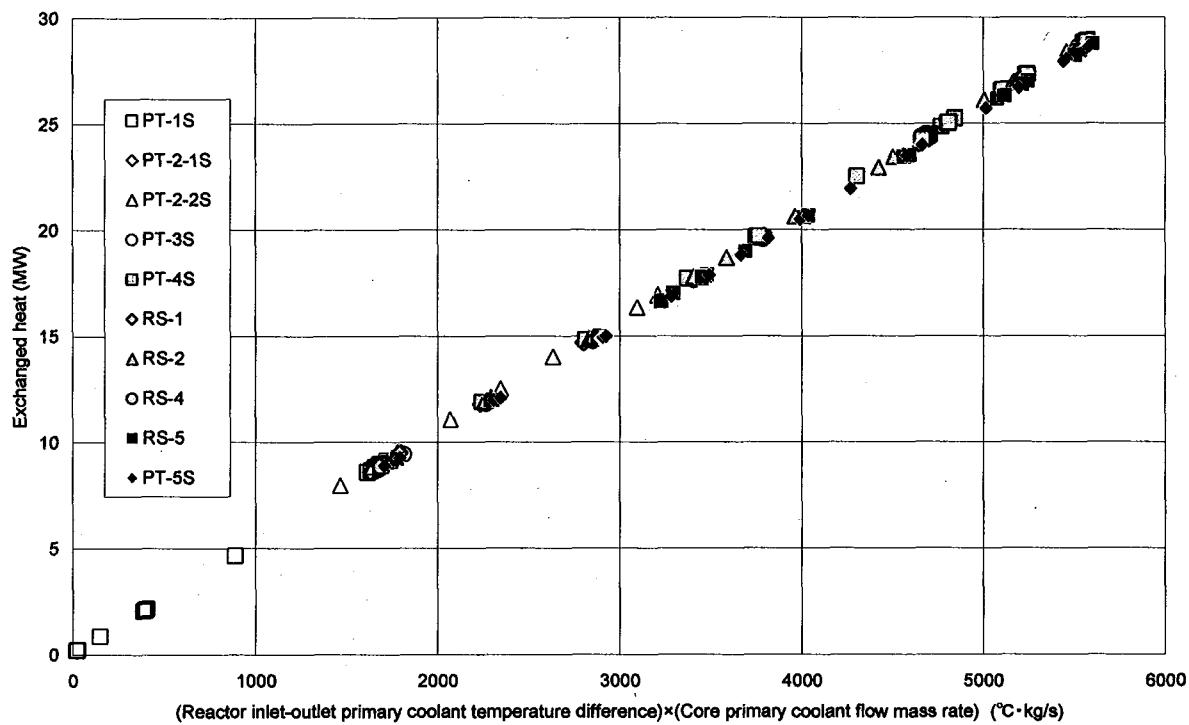


Fig. 4.2 Relationship between exchanged heat and $G_{He}^{Core}(T_{He}^{RPV_OUT} - T_{He}^{RPV_IN})$ (Single)

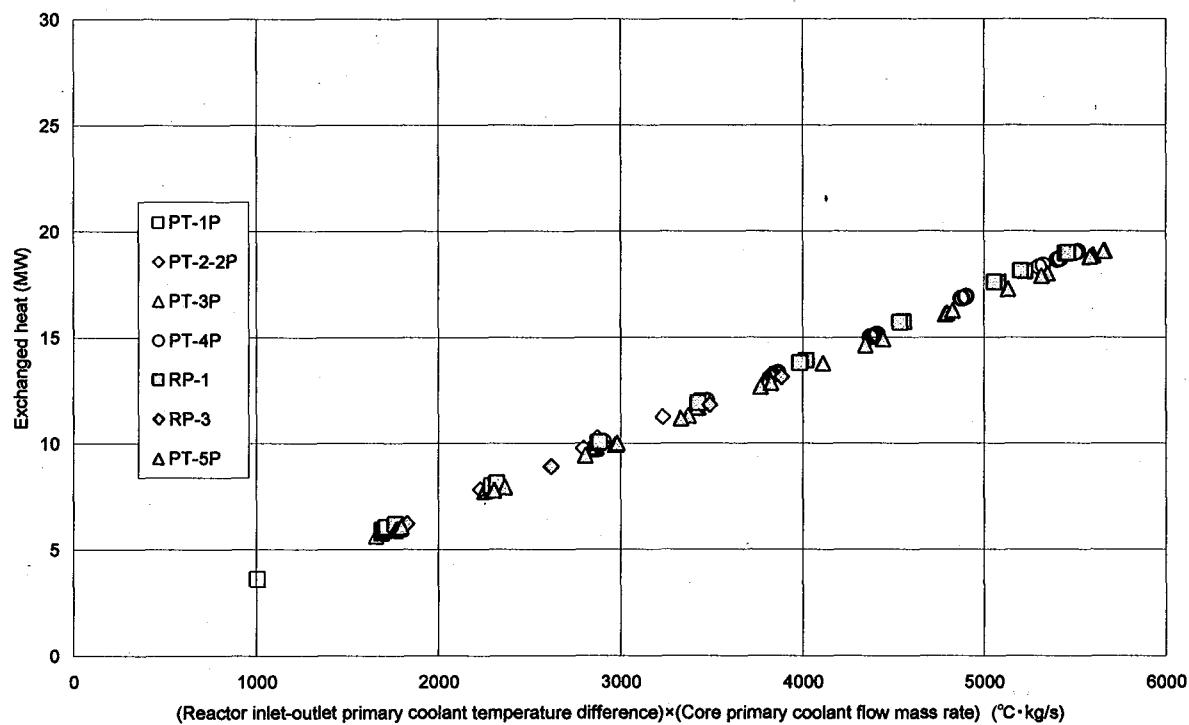


Fig. 4.3 Relationship between exchanged heat and $G_{He}^{Core}(T_{He}^{RPV_OUT} - T_{He}^{RPV_IN})$ (Parallel)

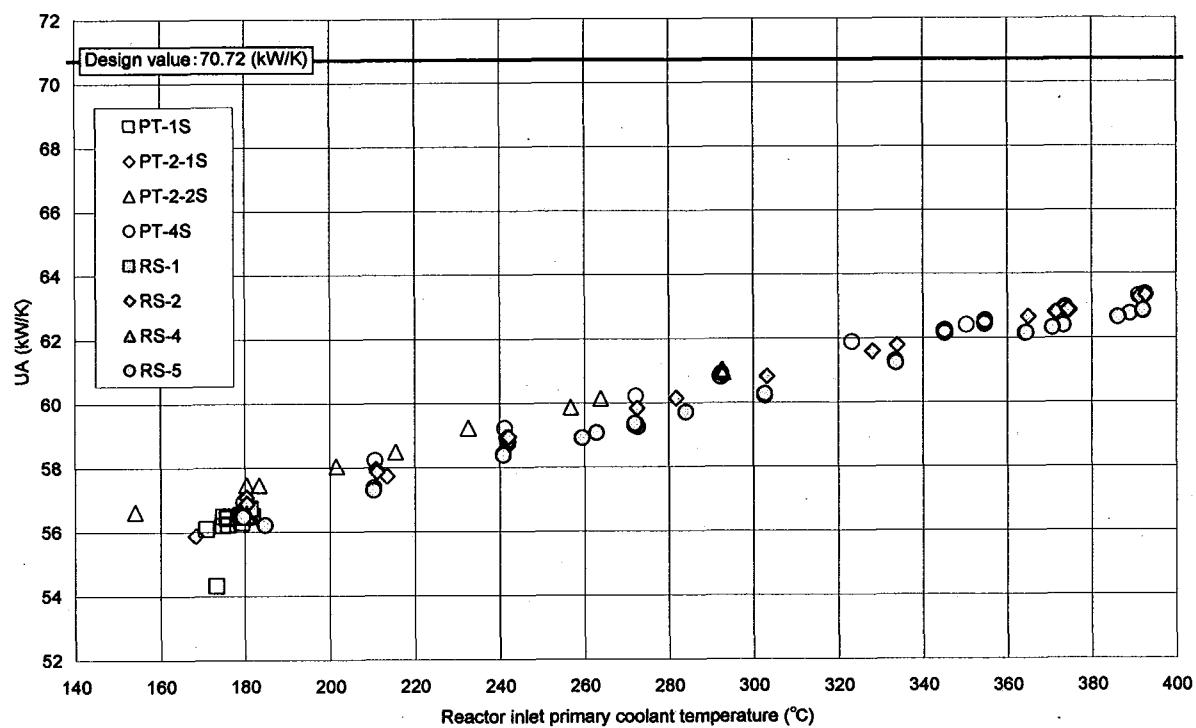


Fig. 4.4 Relationship between $(UA)^{PPWC}$ and reactor inlet coolant temperature (Rated / Single)

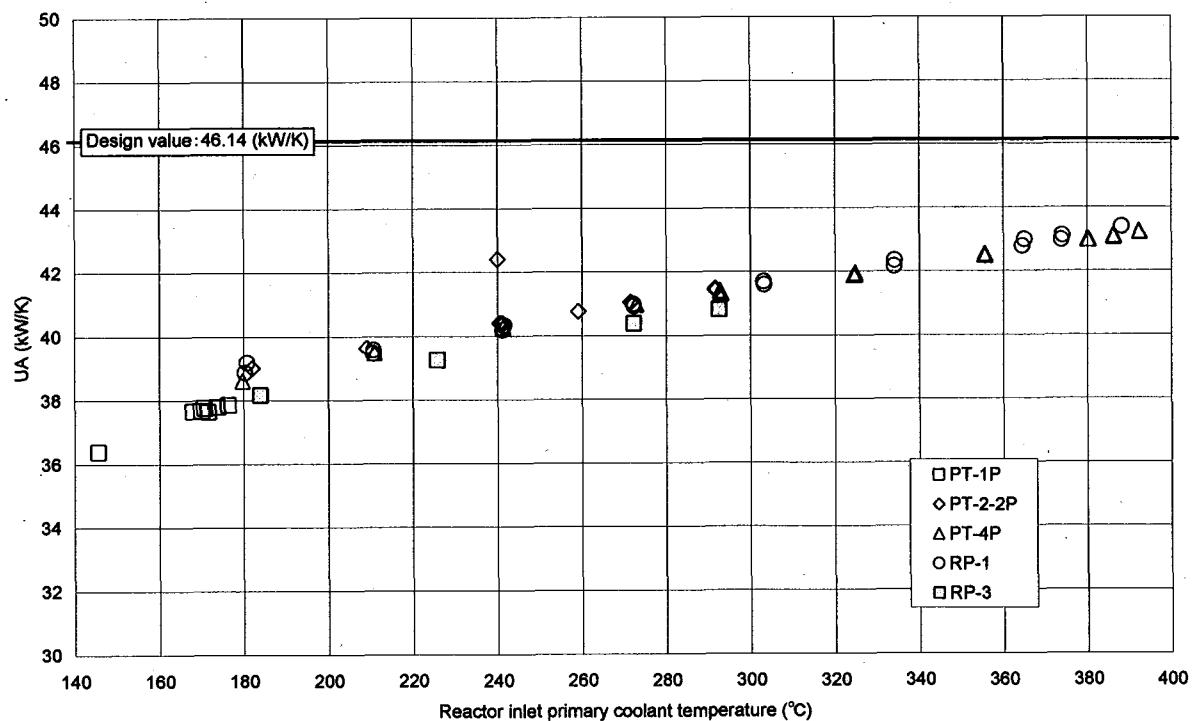


Fig. 4.5 Relationship between $(UA)^{PPWC}$ and reactor inlet coolant temperature (Rated / Parallel)

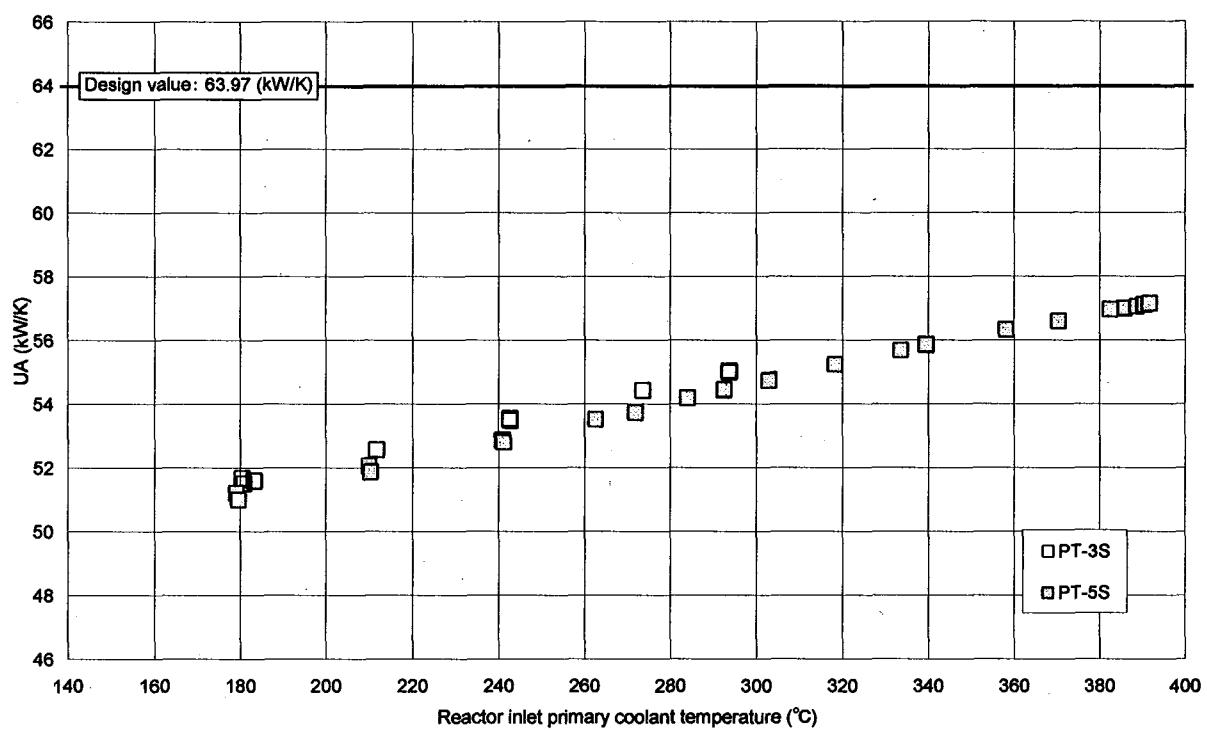


Fig. 4.6 Relationship between $(UA)^{PPWC}$ and reactor inlet coolant temperature (High temperature / Single)

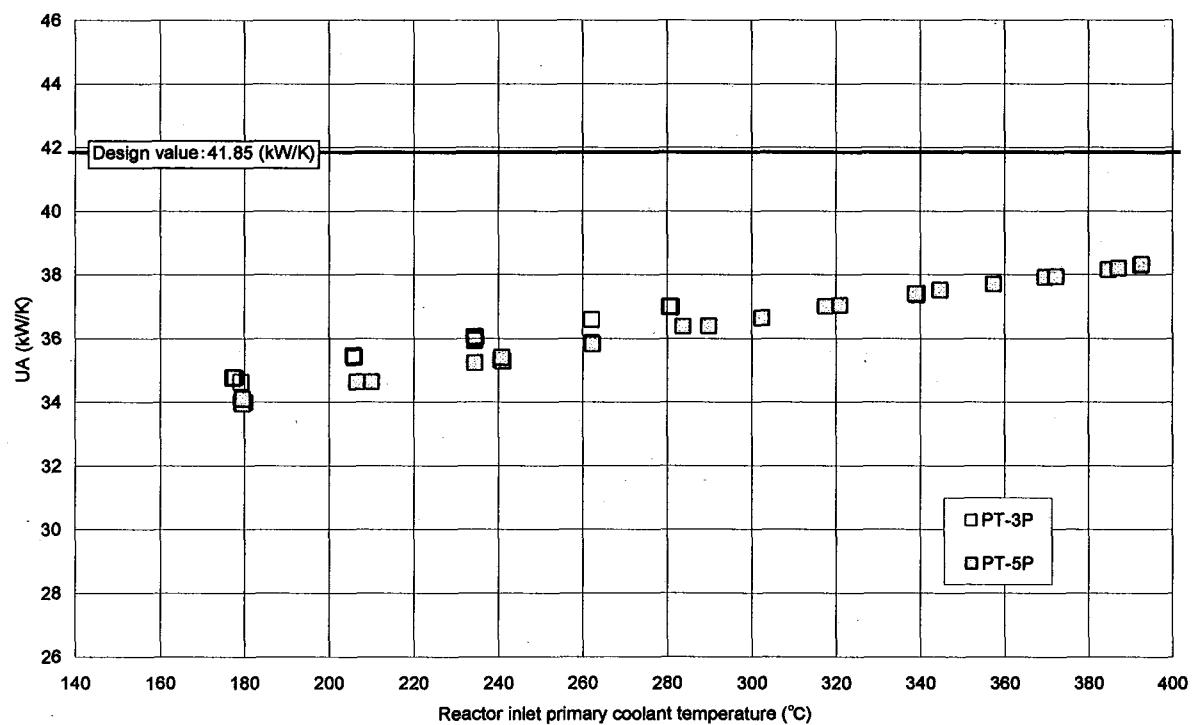


Fig. 4.7 Relationship between $(UA)^{PPWC}$ and reactor inlet coolant temperature (High temperature / Parallel)

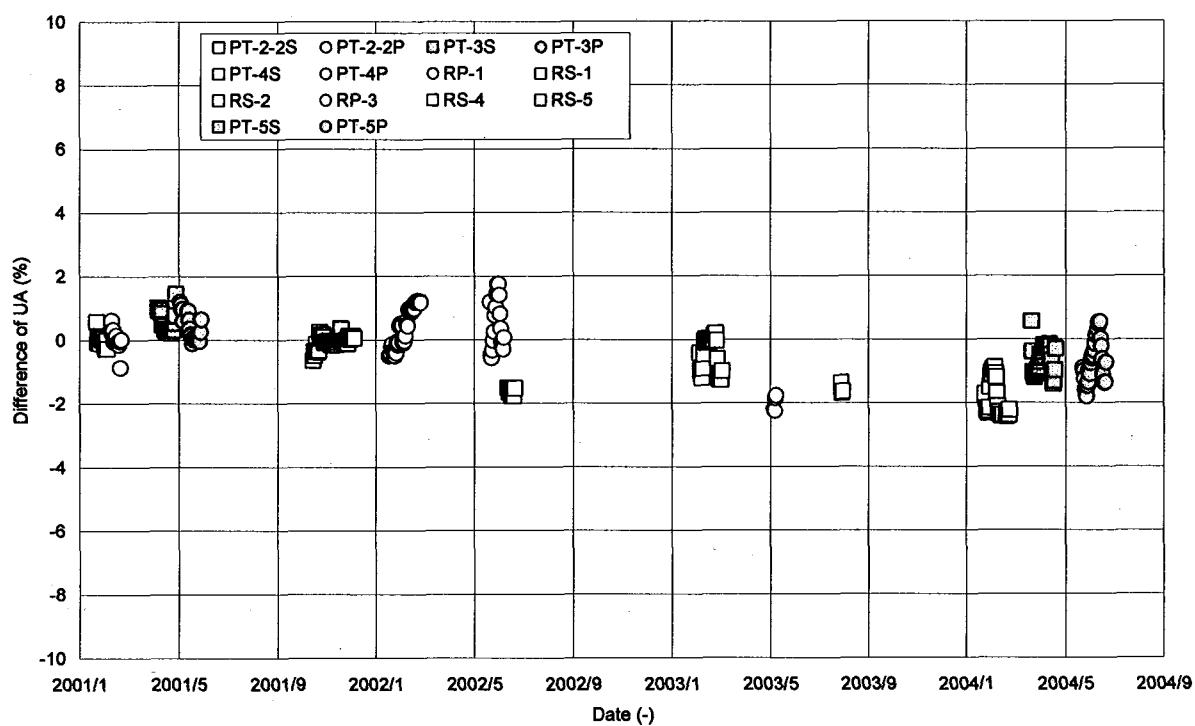


Fig. 4.8 Difference of UA (normalized with PT-2-2 data)

付録 A PPWC の伝熱設計に関する計算結果

This is a blank page.

Table list in Appendix A

Table A.1	Design condition for the PPWC (Rated / Single)	59
Table A.2	Estimation result of heat transfer performance for the PPWC (Rated / Single)	61
Table A.3	Design condition for the PPWC (Rated / Parallel)	63
Table A.4	Estimation result of heat transfer performance for the PPWC (Rated / Parallel)	65
Table A.5	Design condition for the PPWC (High temperature / Single)	67
Table A.6	Estimation result of heat transfer performance for the PPWC (High temperature / Single)	69
Table A.7	Design condition for the PPWC (High temperature / Parallel)	71
Table A.8	Estimation result of heat transfer performance for the PPWC (High temperature / Parallel)	73

This is a blank page.

Table A.1 Design condition for the PPWC (Rated / Single)

Exchanged heat	29.94MW
PPWC primary coolant temperature	(Inlet) 843 °C (Outlet) 384 °C
PPWC primary coolant flow mass rate	12.56kg/s
PPWC primary coolant inlet pressure	3.92MPaG
PPWC pressurized water temperature	(Inlet) 135 °C (Outlet) 175 °C
PPWC pressurized water flow mass rate	173.6kg/s
PPWC pressurized water inlet pressure	3.51MPaG
Heat transfer area	70.3m ²
Effective length of heat transfer tube	3.24m
Number of heat transfer tube	136
Heat transfer tube inner diameter	25.4mm
Heat transfer tube outer diameter	19.68mm
Tube pitch	(flow direction) 25mm (transverse direction) 86.6mm
U-tube bending radius	64mm
Emmisivity	(Hasterroy XR) 0.700 (SUS 312 TB) 0.440
Correction factor for tube column	0.0 m ² · s · K / J
Banks of heat transfer tube width	175 mm
Number of tubes at center	18
Baffle notching rate	30.000 % 25.232 %
Correction factor for tube column	1.022
Inner shell diameter	1600mm
Allowable tube wall temperature	(Inner) 191 °C (Outer) 277 °C
Allowable tube inner-outer wall temperature difference	109 °C
Pressure drop	(primary helium) 13.0kPa (pressurized water) 97.7kPa
Tube inner flow rate	4.50 m/s

This is a blank page.

Table A.2 Estimation result of heat transfer performance for the PPWC (Rated / Single)

		(1,1)		(1,2)		(2,1)		(2,2)		(3,1)		(3,2)		(4,1)		(4,2)		(5,1)			
Primary coolant	Inlet / Outlet temperature (°C)	843.0	730.4	730.4	642.2	590.8	543.9	642.2	590.8	543.9	514.2	514.2	487.7	463.2	440.2	487.7	463.2	440.2	410.3	410.3	
	Specific weight (kg/m³)	1.820		2.010		2.292		2.166		2.401		2.487		2.655		2.571		2.755		2.869	
	Specific heat (kJ/kg·K)	5.193																			
	Thermal conductivity(W/m·K)	0.374		0.350		0.321		0.333		0.311		0.303		0.289		0.296		0.282		0.274	
	Kinematic viscosity coefficient (×10⁻⁶ m²/s)	25.5		21.6		17.3		19.0		16.0		15.1		13.5		14.2		12.7		11.8	
	Prandtl number (-)	0.645		0.642		0.641		0.642		0.641		0.642		0.643		0.642		0.644		0.644	
	Flow passage area (m²)	1.280				0.731				0.417				0.417				0.857			
	Flow rate (m/s)	5.389		4.881		7.490		7.925		12.538		12.102		11.338		11.706		5.318		5.106	
	Reynolds number (-)	5369		5747		11010		10590		19920		20410		21340		20880		10650		10950	
	Nusselt number (-)	77		81		106		103		145		148		152		150		97		99	
Pressurized water	Heat transfer coefficient (W/m²·K)	1164		1139		1367		1387		1817		1801		1770		1785		1104		1095	
	Inlet / Outlet temperature (°C)	135.0	144.9	167.4	174.9	114.9	149.0	162.9	167.4	149.0	151.6	160.6	162.9	151.6	153.6	158.5	160.6	153.6	156.2	156.2	158.5
	Specific weight (kg/m³)	927.747		897.738		921.245		903.868		918.130		907.302		915.992		909.518		913.850		911.571	
	Specific heat (kJ/kg·K)	4.278		4.368		4.296		4.346		4.304		4.335		4.310		4.327		4.316		4.322	
	Thermal conductivity (W/m·K)	0.690		0.682		0.689		0.685		0.688		0.686		0.688		0.686		0.688		0.687	
	Kinematic viscosity coefficient (×10⁻⁶ m²/s)	0.211		0.176		0.202		0.182		0.198		0.185		0.195		0.187		0.192		0.190	
	Prandtl number (-)	1.214		1.012		1.158		1.042		1.134		1.061		1.118		1.073		1.103		1.087	
	Flow passage area (×10⁻³ m²)	41.37																			
	Flow rate (m/s)	4.523		4.674		4.555		4.643		4.571		4.625		4.581		4.614		4.592		4.603	
	Reynolds number (-)	422000		522600		446000		503300		455400		492400		462800		485300		470200		478200	
Heat transfer tube	Nusselt number (-)	795		877		810		861		820		850		824		843		827		833	
	Heat transfer coefficient (W/m²·K)	27851		30411		28353		29939		28694		29629		28802		29416		28881		29068	
	Thermal conductivity (W/m·K)	17.77		17.91		17.59		17.86		17.71		17.75		17.56		17.67		17.35		17.33	
	In-tube fluid temperature (°C)	139.9		171.1		146.9		165.1		150.3		161.8		152.6		159.6		154.9		157.3	
	In-tube wall temperature (°C)	167.7		191.1		166.9		185.8		172.3		180.7		169.5		177.2		165.6		166.7	
	Ex-tube wall temperature (°C)	276.9		276.3		247.9		272.9		261.6		260.2		239.2		251.0		210.2		206.0	
Overall	Ex-tube fluid temperature (°C)	786.7																			

Table A.3 Design condition for the PPWC (Rated / Parallel)

Exchanged heat	19.81MW
PPWC primary coolant temperature	(Inlet) 850 °C (Outlet) 388 °C
PPWC primary coolant flow mass rate	8.25kg/s
PPWC primary coolant inlet pressure	3.92MPaG
PPWC pressurized water temperature	(Inlet) 135 °C (Outlet) 175 °C
PPWC pressurized water flow mass rate	114.7kg/s
PPWC pressurized water inlet pressure	3.47MPaG
Heat transfer area	54.0m ²
Effective length of heat transfer tube	2.49m
Number of heat transfer tube	136
Heat transfer tube inner diameter	25.4mm
Heat transfer tube outer diameter	19.68mm
Tube pitch	(flow direction) 25mm (transverse direction) 86.6mm
U-tube bending radius	64 mm
Emmisivity	(Hasterroy XR) 0.700 (SUS 312 TB) 0.440
Correction factor for tube column	0.0 m ² · s · K / J
Banks of heat transfer tube width	175mm
Number of tubes at center	18
Baffle notching rate	(Height) 30.000% (Area) 25.232%
Correction factor for heat transfer tube	1.022
Inner shell diameter	1600mm
Allowable tube wall temperature	(Inner) 192 °C (Outer) 257 °C
Allowable tube inner-outer wall temperature difference	86 °C
Pressure drop	(primary coolant) 7.1kPa (pressurized water) 44.6kPa
Tube inner flow rate	2.98m/s

This is a blank page.

Table A.4 Estimation result of heat transfer performance for the PPWC (Rated / Parallel)

		(1,1)		(1,2)		(2,1)		(2,2)		(3,1)		(3,2)		(4,1)		(4,2)		(5,1)		(5,2)	
Primary coolant	Inlet / Outlet temperature (°C)	850.0	715.4	715.4	614.3	556.1	504.6	614.3	556.1	504.6	470.0	470.0	439.8	412.5	387.8	439.8	412.5	—	—	—	—
	Specific weight (kg/m³)		1.827		2.055		2.397		2.245		253.160		2.643		2.546		2.751	—	—	—	—
	Specific heat (kJ/kg·K)																				
	Thermal conductivity(W/m·K)		0.373		0.345		0.311		0.325		0.299		0.290		0.275		0.282	—	—	—	—
	Kinematic viscosity coefficient (×10⁻⁶ m²/s)		25.3		20.8		16.0		17.9		14.6		13.6		11.9		12.7	—	—	—	—
	Prandtl number (-)		0.645		0.642		0.641		0.641		0.642		0.643		0.644		0.644	—	—	—	—
	Flow passage area (m²)		1.280		0.731		0.417		0.417		0.417		0.417		0.417		0.417		—		
	Flow rate (m/s)		3.528		3.136		4.706		5.025		7.813		7.482		6.924		7.189	—	—	—	—
	Reynolds number (-)		3537		3835		7457		7129		13570		13980		14740		14370	—	—	—	—
	Nusselt number (-)		59		62		83		81		127		129		134		132	—	—	—	—
	Heat transfer coefficient (W/m²·K)		883		860		1040		1059		1525		1509		1480		1494	—	—	—	—
Pressurized water	Inlet / Outlet temperature (°C)	135.0	146.7	166.3	175.0	146.7	151.2	161.3	166.3	151.2	154.2	158.7	161.3	154.2	156.4	156.4	158.7	—	—	—	—
	Specific weight (kg/m³)		926.890		898.232		919.348		905.198		915.873		909.081		913.488		911.392	—	—	—	—
	Specific heat (kJ/kg·K)		4.281		4.366		4.301		4.342		4.310		4.328		4.317		4.322	—	—	—	—
	Thermal conductivity (W/m·K)		0.690		0.683		0.689		0.685		0.688		0.686		0.687		0.687	—	—	—	—
	Kinematic viscosity coefficient (×10⁻⁶ m²/s)		0.210		0.176		0.199		0.183		0.195		0.187		0.192		0.189	—	—	—	—
	Prandtl number (-)		1.206		1.014		1.143		1.049		1.117		1.070		1.100		1.086	—	—	—	—
	Flow passage area (×10⁻³ m²)																				
	Flow rate (m/s)		2.991		3.087		3.016		3.063		3.027		3.050		3.035		3.042	—	—	—	—
	Reynolds number (-)		280800		344300		298100		329800		306100		321600		311500		316400	—	—	—	—
	Nusselt number (-)		573		629		585		615		594		607		597		602	—	—	—	—
	Heat transfer coefficient (W/m²·K)		20087		21813		20485		21422		20767		21172		20838		20999	—	—	—	—
Heat transfer tube	Thermal conductivity (W/m·K)		17.67		17.79		17.48		17.72		17.63		17.62		17.46		17.54	—	—	—	—
	In-tube fluid temperature (°C)		140.9		170.7		149.0		163.8		152.7		160.0		155.3		157.5	—	—	—	—
	In-tube wall temperature (°C)		171.0		191.6		169.0		185.3		175.9		179.9		171.8		175.6	—	—	—	—
	Ex-tube wall temperature (°C)		257.0		256.2		227.7		250.6		244.4		239.9		221.1		230.1	—	—	—	—
	Ex-tube fluid temperature (°C)		782.7		664.9		530.3		585.2		487.3		454.9		400.1		426.1	—	—	—	—
	In-tube scale-layer surface temperature (°C)		171.0		191.6		169.0		185.3		175.9		179.9		171.8		175.6	—	—	—	—
Overall	Heat transmission coefficient (m²·K/W)		7.2		712.2		826.8		842.2		1109.2		1102.0		1083.2		1092.3	—	—	—	—
	Temperature effectiveness (-)		0.186		0.183		0.126		0.128		0.098		0.097		0.095		0.096	—	—	—	—
	Heat transfer area (m²)		12.15		12.15		6.95		6.95		3.96		3.96		3.96		3.96	—	—	—	—
	Total exchanged heat (kW)		5766		4334		2209		2492		1480		1295		1057		1170	—	—	—	—
	Heat transfer / Heat radiation(kW)		5699		67		4310		24		2201		8		2478		14		1476		4

Table A.5 Design condition for the PPWC (High temperature / Single)

Exchanged heat	29.67MW
PPWC primary coolant temperature	(Inlet) 942 °C (Outlet) 386 °C
PPWC primary coolant flow mass rate	10.28kg/s
PPWC primary coolant inlet pressure	3.92MPaG
PPWC pressurized water temperature	(Inlet) 134 °C (Outlet) 174 °C
PPWC pressurized water flow mass rate	171.7kg/s
PPWC pressurized water inlet pressure	3.51MPaG
Heat transfer area	70.3m ²
Effective length of heat transfer tube	3.24m
Number of heat transfer tube	136
Heat transfer tube inner diameter	25.4mm
Heat transfer tube outer diameter	19.68mm
Tube pitch	(flow direction) 25mm (transverse direction) 86.6mm
U-tube bending radius	64 mm
Emmisivity	(Hasterroy XR) 0.700 (SUS 312 TB) 0.440
Correction factor for tube column	0.0 m ² · s · K / J
Banks of heat transfer tube width	175mm
Number of tubes at center	18
Baffle notching rate	(Height) 30.000% (Area) 25.232%
Correction factor for heat transfer tube	1.022
Inner shell diameter	1600 mm
Allowable tube wall temperature	(Inner) 191 °C (Outer) 281 °C
Allowable tube inner-outer wall temperature difference	112 °C
Pressure drop	(primary coolant) 9.0kPa (pressurized water) 95.5kPa
Tube inner flow rate	4.45m/s

This is a blank page.

Table A.6 Estimation result of heat transfer performance for the PPWC (High temperature / Single)

		(1,1)		(1,2)		(2,1)		(2,2)		(3,1)		(3,2)		(4,1)		(4,2)		(5,1)		(5,2)	
Primary coolant	Inlet / Outlet temperature (°C)	942.0	799.7	799.7	690.4	627.4	570.9	690.4	627.4	570.9	535.4	535.4	504.1	475.4	448.8	504.1	475.4	448.8	415.4	415.4	386.3
	Specific weight (kg/m³)	1.687		1.894		2.209		2.068		2.331		2.429		2.618		2.524		2.728		2.853	
	Specific heat (kJ/kg·K)	5.193																			
	Thermal conductivity(W/m·K)	0.392		0.364		0.329		0.344		0.317		0.308		0.292		0.300		0.284		0.275	
	Kinematic viscosity coefficient (×10⁻⁶ m²/s)	29.0		23.8		18.4		20.6		16.8		15.7		13.8		14.7		12.9		12.0	
	Prandtl number (-)	0.648		0.644		0.641		0.642		0.641		0.642		0.643		0.642		0.643		0.644	
	Flow passage area (m²)	1.280				0.731				0.417				0.417				0.857			
	Flow rate (m/s)	4.760		4.239		6.361		6.794		10.570		10.146		9.413		9.764		4.396		4.203	
	Reynolds number (-)	4171		4517		8785		8397000		15980		16440		17300		16870		8662		8932	
	Nusselt number (-)	66		69		92		90		126		129		133		131		84		86	
	Heat transfer coefficient (W/m²·K)	1038		1012		1219		1240		1610		1594		1563		1578		955		947	
Pressurized water	Inlet / Outlet temperature (°C)	134.0	144.4	166.3	174.0	144.4	148.4	161.7	166.3	148.4	151.0	159.5	161.7	151.0	152.9	157.4	159.5	152.9	155.3	155.3	157.4
	Specific weight (kg/m³)	928.398				898.750				921.756				905.022				918.663			
	Specific heat (kJ/kg·K)	4.276		4.364		4.294		4.342		4.303		4.330		4.308		4.325		4.314		4.319	
	Thermal conductivity (W/m·K)	0.690		0.683		0.689		0.685		0.689		0.686		0.688		0.687		0.688		0.687	
	Kinematic viscosity coefficient (×10⁻⁶ m²/s)	0.212		0.177		0.202		0.183		0.198		0.186		0.196		0.188		0.193		0.191	
	Prandtl number (-)	1.221		1.017		1.163		1.048		1.138		1.067		1.122		1.080		1.018		1.093	
	Flow passage area (×10⁻³ m²)	41.37																			
	Flow rate (m/s)	4.470		4.617		4.502		4.585		4.517		4.568		4.527		4.557		4.537		4.548	
	Reynolds number (-)	414900		513700		437900		494100		448500		483300		455700		476400		462600		469800	
	Nusselt number (-)	786		867		801		850		811		839		814		833		817		822	
	Heat transfer coefficient (W/m²·K)	27554		30070		28049		29585		28382		29261		28476		29053		28539		28710	
Heat transfer tube	Thermal conductivity (W/m·K)	17.80		17.91		17.58		17.85		17.68		17.72		17.52		17.64		17.30		17.28	
	In-tube fluid temperature (°C)	139.2		170.2		146.4		164.0		149.7		160.6		152.0		158.5		154.1		156.4	
	In-tube wall temperature (°C)	168.1		190.6		166.3		185.0		171.4		179.2		168.2		175.6		164.0		164.9	

Table A.7 Design condition for the PPWC (High temperature / Parallel)

Exchanged heat	19.65MW
PPWC primary coolant temperature	(Inlet) 950°C (Outlet) 389°C
PPWC primary coolant flow mass rate	6.75kg/s
PPWC primary coolant inlet pressure	3.92MPaG
PPWC pressurized water temperature	(Inlet) 133°C (Outlet) 173°C
PPWC pressurized water flow mass rate	114.7kg/s
PPWC pressurized water inlet pressure	3.47MPaG
Heat transfer area	54.0m ²
Effective length of heat transfer tube	2.49m
Number of heat transfer tube	136
Heat transfer tube inner diameter	25.4mm
Heat transfer tube outer diameter	19.68mm
Tube pitch	(flow direction) 25mm (transverse direction) 86.6mm
U-tube bending radius	64 mm
Emmisivity	(Hasterroy XR) 0.700 (SUS 312 TB) 0.440
Correction factor for tube column	0.0 m ² · s · K / J
Banks of heat transfer tube width	175mm
Number of tubes at center	18
Baffle notching rate	(Height) 30.000% (Area) 25.232%
Correction factor for heat transfer tube	1.022
Inner shell diameter	1600mm
Allowable tube wall temperature	(Inner) 190°C (Outer) 259°C
Allowable tube inner-outer wall temperature difference	88°C
Pressure drop	(primary coolant) 4.9kPa (pressurized water) 43.9kPa
Tube inner flow rate	2.95m/s

This is a blank page.

Table A.8 Estimation result of heat transfer performance for the PPWC (High temperature / Parallel)

		(1,1)		(1,2)		(2,1)		(2,2)		(3,1)		(3,2)		(4,1)		(4,2)		(5,1)			
Primary coolant	Inlet / Outlet temperature (°C)	950.0	780.4	780.4	656.1	585.4	524.2	656.1	585.4	524.2	483.7	483.7	448.6	417.3	389.5	448.6	417.3	—	—	—	—
	Specific weight (kg/m³)	1.695		1.945		2.327		2.156		2.478		2.604		2.843		2.725		—		—	
	Specific heat (kJ/kg·K)	5.193																			
	Thermal conductivity (W/m·K)	0.391		0.358		0.318		0.334		0.304		0.293		0.276		0.284		—		—	
	Kinematic viscosity coefficient ($\times 10^{-6}$ m²/s)	28.7		22.8		16.9		19.2		15.2		13.9		12.0		12.9		—		—	
	Prandtl number (-)	0.648		0.643		0.641		0.642		0.642		0.643		0.644		0.643		—		—	
	Flow passage area (m²)	1.280				0.731				0.417				0.417				—			
	Flow rate (m/s)	3.111		2.711		3.967		4.281		6.531		6.216		5.693		5.939		—		—	
	Reynolds number (-)	2749		3021		5978		5674		10940		11320		12020		11680		—		—	
	Nusselt number (-)	50		53		72		70		110		113		117		115		—		—	
	Heat transfer coefficient (W/m²·K)	786		763		926		945		1344		1328		1299		1313		—		—	
Pressurized water	Inlet / Outlet temperature (°C)	133.0	145.2	164.2	173.0	145.2	149.6	159.2	164.2	149.6	152.5	156.7	159.2	152.5	154.5	154.5	156.7	—	—	—	—
	Specific weight (kg/m³)	928.458		900.311		920.819		907.348		917.432		910.996		915.160		913.193		—		—	
	Specific heat (kJ/kg·K)	4.276		4.359		4.297		4.334		4.306		4.323		4.312		4.317		—		—	
	Thermal conductivity (W/m·K)	0.690		0.683		0.689		0.686		0.688		0.687		0.688		0.687		—		—	
	Kinematic viscosity coefficient ($\times 10^{-6}$ m²/s)	0.212		0.178		0.201		0.185		0.197		0.189		0.194		0.191		—		—	
	Prandtl number (-)	1.221		1.024		1.155		1.061		1.129		1.083		1.112		1.098		—		—	
	Flow passage area ($\times 10^{-3}$ m²)	41.37																		—	
	Flow rate (m/s)	2.965		3.058		2.990		3.034		3.001		3.022		3.008		3.015		—		—	
	Reynolds number (-)	275100		337600		292700		323000		300400		315000		305500		310000		—		—	
	Nusselt number (-)	567		621		579		608		587		599		589		594		—		—	
	Heat transfer coefficient (W/m²·K)	19870		21577		20262		21176		20535		20919		20593		20749		—		—	
Heat transfer tube	Thermal conductivity (W/m·K)	17.68		17.77		17.45		17.69		17.58		17.57		17.40		17.48		—		—	
	In-tube fluid temperature (°C)	139.1		168.6		147.4		161.7		151.0		158.0		153.5		155.6		—		—	
	In-tube wall temperature (°C)	170.4		189.9		167.0		183.3		173.5		177.1		168.9		172.8		—		—	
	Ex-tube wall temperature (°C)	258.6		254.9		224.2															

付録B PPWCの流動設計に関する計算結果

This is a blank page.

Table list in Appendix B

Table B.1	Estimation condition of pressure drop estimation for pressurized water (Rated / Single)	79
Table B.2	Estimation result of pressure drop for pressurized water (Rated / Single)	81
Table B.3	Estimation condition of pressure drop estimation for primary helium (Rated / Single)	82
Table B.4	Estimation result of pressure drop for helium (Rated / Single)	85
Table B.5	Estimation condition of pressure drop estimation for pressurized water (Rated / Parallel)	86
Table B.6	Estimation result of pressure drop for pressurized water (Rated / Parallel).....	88
Table B.7	Estimation condition of pressure drop estimation for primary helium (Rated / Parallel)	89
Table B.8	Estimation result of pressure drop for helium (Rated / Parallel)	91
Table B.9	Estimation condition of pressure drop estimation for pressurized water (High temperature / Single)	92
Table B.10	Estimation result of pressure drop for pressurized water (High temperature / Single)	94
Table B.11	Estimation condition of pressure drop estimation for primary helium (High temperature / Single)	95
Table B.12	Estimation result of pressure drop for helium (High temperature / Single)	98
Table B.13	Estimation condition of pressure drop estimation for pressurized water (High temperature / Parallel).....	99
Table B.14	Estimation result of pressure drop for pressurized water (High temperature / Parallel).....	101
Table B.15	Estimation condition of pressure drop estimation for primary helium (High temperature, Parallel).....	102
Table B.16	Estimation result of pressure drop for helium (High temperature / Parallel).....	104

This is a blank page.

Table B.1 Estimation condition of pressure drop estimation for pressurized water (Rated / Single)

Part	Estimation condition			
Pressurized water inlet nozzle (Inner diameter=245mm)	Enlargement loss coefficient	C_{Water}^E	1.0	
	Specific weight	γ	931.93kg/m ³	
	Flow rate	v^E	3.95m/s	
Heat transfer tube inlet	Contraction coefficient	C_{Water}^C	0.5	
	Specific weight	γ	931.93kg/m ³	
	Flow rate	v^C	4.52m/s	
Tube sheet → Baffle 1st stage (Tube length L=1240mm)	Inlet	Friction factor	λ	0.01447
		Specific weight	γ	931.93kg/m ³
		Flow rate	v^S	4.52m/s
	Outlet	Friction factor	λ	0.01406
		Specific weight	γ	893.87kg/m ³
		Flow rate	v^S	4.67m/s
Straight heat transfer tube 1st stage (Tube length L=1120mm)	Inlet	Friction factor	λ	0.1447
		Specific weight	γ	927.75kg/m ³
		Flow rate	v^S	4.52m/s
	Outlet	Friction factor	λ	0.1406
		Specific weight	γ	897.74kg/m ³
		Flow rate	v^S	4.67m/s
Straight heat transfer tube 2nd stage (Tube length L=640mm)	Inlet	Friction factor	λ	0.01438
		Specific weight	γ	921.25kg/m ³
		Flow rate	v^S	4.56m/s
	Outlet	Friction factor	λ	0.01415
		Specific weight	γ	903.87kg/m ³
		Flow rate	v^S	4.64m/s
Straight heat transfer tube 3rd stage (Tube length L=365mm)	Inlet	Friction factor	λ	0.01433
		Specific weight	γ	918.13kg/m ³
		Flow rate	v^S	4.57m/s
	Outlet	Friction factor	λ	0.01420
		Specific weight	γ	907.30kg/m ³
		Flow rate	v^S	4.63m/s
Straight heat transfer tube 4th stage (Tube length L=365mm)	Inlet	Friction factor	λ	0.01429
		Specific weight	γ	915.99kg/m ³
		Flow rate	v^S	4.58m/s

	Outlet	Friction factor	λ	0.01420
		Specific weight	γ	909.52kg/m ³
		Flow rate	v^s	4.61m/s
Straight heat transfer tube 5th stage (Tube length L=750mm)	Inlet	Friction factor	λ	0.01429
		Specific weight	γ	913.85kg/m ³
		Flow rate	v^s	4.59m/s
	Outlet	Friction factor	λ	0.01424
		Specific weight	γ	911.57kg/m ³
		Flow rate	v^s	4.60m/s
Takeoff connection for 20MW (Tube length L=240mm)	Inlet	Friction factor	λ	0.01430
		Specific weight	γ	915.06kg/m ³
		Flow rate	v^s	4.58m/s
	Outlet	Friction factor	λ	0.01420
		Specific weight	γ	910.51kg/m ³
		Flow rate	v^s	4.60m/s
Baffle last stage → U tube bending part (Distance=110mm)		Friction factor	λ	0.01430
		Heat transfer tube length	L	110mm
		Specific weight	γ	912.64kg/m ³
		Flow rate	v^s	4.59m/s
U tube bending part		Roughness coefficient	K	1.0
		Loss factor	C_{Water}^B	0.467
		Specific weight	γ	912.64kg/m ³
		Flow rate	v^B	4.60m/s
Heat transfer tube outlet		Enlargement loss coefficient	C_{Water}^E	1.0
		Specific weight	γ	893.87kg/m ³
		Flow rate	v^E	4.67m/s
Pressurized water outlet nozzle (Inner diameter=245mm)		Contraction coefficient	C_{Water}^C	0.5
		Specific weight	γ	893.87kg/m ³
		Flow rate	v^C	4.12m/s

Table B.2 Estimation result of pressure drop for pressurized water (Rated / Single)

Part		Pressure drop			
Pressurized water inlet nozzle		$\Delta P_{\text{Water}}^E$		7.28kPa	
Heat transfer tube inlet		$\Delta P_{\text{Water}}^C$		4.77kPa	
Tube sheet → Baffle 1st stage	Inlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	8.65kPa	17.34kPa	
	Outlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	8.69kPa		
Straight heat transfer tube	1st stage	Inlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	7.81kPa	
		Outlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	7.85kPa	
	2nd stage	Inlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	4.47kPa	
		Outlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	4.48kPa	
	3rd stage	Inlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	2.55kPa	
		Outlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	2.56kPa	
	4th stage	Inlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	2.55kPa	
		Outlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	2.55kPa	
	5th stage	Inlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	5.25kPa	
		Outlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	5.24kPa	
Takeoff connection for 20MW	Inlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	1.67kPa	3.35kPa	
	Outlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	1.68kPa		
Baffle last stage → U tube bending part		$\Delta P_{\text{Water}}^S$	1.54kPa		
U tube bending part		$\Delta P_{\text{Water}}^B$	4.51kPa		
Heat transfer tube outlet		$\Delta P_{\text{Water}}^E$	9.77kPa		
Pressurized water outlet nozzle		$\Delta P_{\text{Water}}^C$	3.79kPa		
Total pressure drop		ΔP_{Water}	97.65 Pa		

Table B.3 Estimation condition of pressure drop estimation for primary helium (Rated / Single)

Part	Estimation condition		
Double-piping nozzle (Inner tube) (Inner diameter=245mm)	Enlargement loss coefficient	C_{He}^E	1.0
	Specific weight	γ	1.729kg/m ³
	Flow rate	v^E	45.66m/s
Impingement baffle	Loss factor	C_{He}^I	20.0
	Specific weight	γ	1.729kg/m ³
	Flow rate	v^I	5.31m/s
Heat transfer tube 1st stage	Friction factor	f_s	0.1108
	Flow mass rate	G_c	9.81 kg / m ² · s
	Tube column	N_c	16
	Specific weight	γ	1.915kg/m ³
	Correction factor	$\xi\Delta P$	0.7226
	Viscosity coefficient	$\mu \times 10^{-5}$	2.353 Pa · s
	Viscosity coefficient*	$\mu_w \times 10^{-5}$	0.851 Pa · s
Heat transfer tube 2nd stage	Friction factor	f_s	0.0985
	Flow mass rate	G_c	17.17 kg / m ² · s
	Tube column	N_c	16
	Specific weight	γ	2.229kg/m ³
	Correction factor	$\xi\Delta P$	0.7226
	Viscosity coefficient	$\mu \times 10^{-5}$	1.815 Pa · s
	Viscosity coefficient*	$\mu_w \times 10^{-5}$	0.810 Pa · s
Heat transfer tube 3rd stage	Friction factor	f_s	0.0882
	Flow mass rate	G_c	30.10 kg / m ² · s
	Tube column	N_c	16
	Specific weight	γ	2.444kg/m ³
	Correction factor	$\xi\Delta P$	0.7226
	Viscosity coefficient	$\mu \times 10^{-5}$	1.552 Pa · s
	Viscosity coefficient*	$\mu_w \times 10^{-5}$	0.811 Pa · s
Heat transfer tube 4th stage	Friction factor	f_s	0.0875
	Flow mass rate	G_c	30.10 kg / m ² · s
	Tube column	N_c	16
	Specific weight	γ	2.613kg/m ³
	Correction factor	$\xi\Delta P$	0.7226
	Viscosity coefficient	$\mu \times 10^{-5}$	1.387 Pa · s

	Viscosity coefficient*	$\mu_w \times 10^{-5}$	0.772 Pa·s
Heat transfer tube 5th stage	Friction factor	f_s	0.0985
	Flow mass rate	G_c	14.65 kg/m ² ·s
	Tube column	N_c	16
	Specific weight	γ	2.812 kg/m ³
	Correction factor	$\xi \Delta P$	0.7226
	Viscosity coefficient	$\mu \times 10^{-5}$	1.226 Pa·s
	Viscosity coefficient*	$\mu_w \times 10^{-5}$	0.682 Pa·s
Segmental baffle 1st stage	Tubes in segment part	N_w	0
	Specific weight	γ	2.010 kg/m ³
	Flow rate	v^z	7.75 m/s
Segmental baffle 2nd stage	Tubes in segment part	N_w	0
	Specific weight	γ	2.292 kg/m ³
	Flow rate	v^z	8.99 m/s
Segmental baffle 3rd stage	Tubes in segment part	N_w	0
	Specific weight	γ	2.487 kg/m ³
	Flow rate	v^z	10.97 m/s
Segmental baffle 4th stage	Tubes in segment part	N_w	0
	Specific weight	γ	2.655 kg/m ³
	Flow rate	v^z	10.28 m/s
Segmental baffle 5th stage	Tubes in segment part	N_w	0
	Specific weight	γ	2.869 kg/m ³
	Flow rate	v^z	6.64 m/s
Primary helium outlet nozzle	Contraction coefficient	C_{He}^C	0.5
	Specific weight	γ	2.926 kg/m ³
	Flow rate	v^C	37.63 m/s
Primary helium inlet nozzle	Enlargement loss coefficient	C_{He}^E	1.0
	Specific weight	γ	2.926 kg/m ³
	Flow rate	v^E	37.63 m/s
Double-shell	Friction factor	λ	0.0186
	Double-shell length	L	3705 mm
	Equivalent diameter	D	190 mm
	Specific weight	γ	2.926 kg/m ³
	Flow rate	v^S	7.43 m/s
Double-piping nozzle (Outer tube)	Contraction coefficient	C_{Water}^C	0.5
	Specific weight	γ	2.926 kg/m ³

	Flow rate	v^c	34.85m/s
--	-----------	-------	----------

* At tube outer wall temperature

Table B.4 Estimation result of pressure drop for helium (Rated / Single)

Part	Pressure drop	
Double-piping nozzle (Inner tube)	1.80 kPa	
Impingement baffle	0.49 kPa	
Heat transfer tube	1st stage	0.26 kPa
	2nd stage	0.62 kPa
	3rd stage	1.59 kPa
	4th stage	1.49 kPa
	5th stage	0.37 kPa
Segmental baffle	1st stage	0.28 kPa
	2nd stage	0.43 kPa
	3rd stage	0.69 kPa
	4th stage	0.65 kPa
	5th stage	0.29 kPa
Primary helium outlet nozzle	1.04 kPa	
Primary helium inlet nozzle	2.07 kPa	
Double-shell	0.03 kPa	
Double-piping nozzle (Outer tube)	0.89 kPa	
Total	12.96 kPa	

Table B.5 Estimation condition of pressure drop estimation for pressurized water (Rated / Parallel)

Part	Estimation condition			
Pressurized water inlet nozzle (Inner diameter=245mm)	Enlargement loss coefficient	C_{Water}^E	1.0	
	Specific weight	γ	931.93kg/m ³	
	Flow rate	v^E	2.61m/s	
Heat transfer tube inlet	Contraction coefficient	C_{Water}^C	0.5	
	Specific weight	γ	931.93kg/m ³	
	Flow rate	v^C	2.99m/s	
Tube sheet → Baffle 1st stage (Tube length L=1240mm)	Inlet	Friction factor	λ	0.01537
		Specific weight	γ	931.93kg/m ³
		Flow rate	v^S	2.99m/s
	Outlet	Friction factor	λ	0.1429
		Specific weight	γ	893.82kg/m ³
		Flow rate	v^S	3.09m/s
Straight heat transfer tube 1st stage (Tube length L=1120mm)	Inlet	Friction factor	λ	0.01537
		Specific weight	γ	926.89kg/m ³
		Flow rate	v^S	2.66m/s
	Outlet	Friction factor	λ	0.01492
		Specific weight	γ	898.23kg/m ³
		Flow rate	v^S	3.09m/s
Straight heat transfer tube 2nd stage (Tube length L=640mm)	Inlet	Friction factor	λ	0.01523
		Specific weight	γ	919.35kg/m ³
		Flow rate	v^S	3.02m/s
	Outlet	Friction factor	λ	0.1501
		Specific weight	γ	905.20kg/m ³
		Flow rate	v^S	3.06m/s
Straight heat transfer tube 3rd stage (Tube length L=365mm)	Inlet	Friction factor	λ	0.01519
		Specific weight	γ	915.87kg/m ³
		Flow rate	v^S	3.03m/s
	Outlet	Friction factor	λ	0.1505
		Specific weight	γ	909.08kg/m ³
		Flow rate	v^S	3.05m/s
Straight heat transfer tube 4th stage (Tube length L=365mm)	Inlet	Friction factor	λ	0.01514
		Specific weight	γ	913.49kg/m ³
		Flow rate	v^S	3.04m/s

	Outlet	Friction factor	λ	0.01510	
		Specific weight	γ	911.39kg/m ³	
		Flow rate	v^s	3.04 m/s	
Takeoff connection for 20MW (Tube length L=240mm)		Friction factor	λ	0.01510	
		Specific weight	γ	912.50kg/m ³	
		Flow rate	v^s	3.04m/s	
Straight heat transfer tube 5th stage (Tube length L=750mm)		Friction factor	λ	0.01510	
		Specific weight	γ	912.50kg/m ³	
		Flow rate	v^s	3.04m/s	
Baffle last stage → U tube bending part (Distance=110mm)		Friction factor	λ	0.0151	
		Heat transfer tube length	L	110mm	
		Specific weight	γ	912.50kg/m ³	
		Flow rate	v^s	3.04m/s	
U tube bending part		Roughness coefficient	K	1.0	
		Loss factor	C_{Water}^B	0.501	
		Specific weight	γ	912.50kg/m ³	
		Flow rate	v^B	3.04m/s	
Heat transfer tube outlet		Enlargement loss coefficient	C_{Water}^E	1.0	
		Specific weight	γ	893.82kg/m ³	
		Flow rate	v^E	3.09m/s	
Pressurized water outlet nozzle (Inner diameter=245mm)		Contraction coefficient	C_{Water}^C	0.5	
		Specific weight	γ	893.82kg/m ³	
		Flow rate	v^C	2.72m/s	

Table B.6 Estimation result of pressure drop for pressurized water (Rated / Parallel)

Part	Pressure drop (kPa)			
Pressurized water inlet nozzle	$\Delta P_{\text{Water}}^E$		3.18kPa	
Heat transfer tube inlet	$\Delta P_{\text{Water}}^C$		2.08kPa	
Tube sheet → Baffle 1st stage	Inlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	4.02kPa	
	Outlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	4.02kPa	
Straight heat transfer tube	1st stage	Inlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	3.63kPa
	1st stage	Outlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	3.63kPa
	2nd stage	Inlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	2.07kPa
	2nd stage	Outlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	2.07kPa
Straight heat transfer tube	3rd stage	Inlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	1.18kPa
	3rd stage	Outlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	1.18kPa
	4th stage	Inlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	1.18kPa
	4th stage	Outlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	1.18kPa
Takeoff connection for 20MW	$\Delta P_{\text{Water}}^S$		4.85kPa	
Straight heat transfer tube (5th stage)	$\Delta P_{\text{Water}}^S$		1.55kPa	
Baffle last stage → U tube bending part	$\Delta P_{\text{Water}}^S$		0.71kPa	
U tube bending part	$\Delta P_{\text{Water}}^B$		2.11kPa	
Heat transfer tube outlet	$\Delta P_{\text{Water}}^E$		4.26kPa	
Pressurized water outlet nozzle	$\Delta P_{\text{Water}}^C$		1.66kPa	
Total pressure drop	ΔP_{Water}		44.57kPa	

Table B.7 Estimation condition of pressure drop estimation for primary helium (Rated / Parallel)

Part	Estimation condition		
Double-piping nozzle (Inner tube) (Inner diameter =245mm)	Enlargement loss coefficient	C_{He}^E	1.0
	Specific weight	γ	1.718kg/m ³
	Flow rate	v^E	30.19m/s
Impingement baffle	Loss factor	C_{He}^I	20.0
	Specific weight	γ	1.718kg/m ³
	Flow rate	v^I	3.51m/s
Heat transfer tube 1st stage	Friction factor	f_s	0.1191
	Flow mass rate	G_c	6.45 kg / m ² · s
	Tube column	N_c	16
	Specific weight	γ	1.941kg/m ³
	Correction factor	$\xi \Delta P$	0.7226
	Viscosity coefficient	$\mu \times 10^{-5}$	2.305 Pa · s
	Viscosity coefficient*	$\mu_w \times 10^{-5}$	0.800 Pa · s
Heat transfer tube 2nd stage	Friction factor	f_s	0.1056
	Flow mass rate	G_c	11.28 kg / m ² · s
	Tube column	N_c	16
	Specific weight	γ	2.321kg/m ³
	Correction factor	$\xi \Delta P$	0.7226
	Viscosity coefficient	$\mu \times 10^{-5}$	1.697 Pa · s
	Viscosity coefficient*	$\mu_w \times 10^{-5}$	0.757 Pa · s
Heat transfer tube 3rd stage	Friction factor	f_s	0.0944
	Flow mass rate	G_c	19.78 kg / m ² · s
	Tube column	N_c	16
	Specific weight	γ	2.587kg/m ³
	Correction factor	$\xi \Delta P$	0.7226
	Viscosity coefficient	$\mu \times 10^{-5}$	1.411 Pa · s
	Viscosity coefficient*	$\mu_w \times 10^{-5}$	0.764 Pa · s
Heat transfer tube 4th stage	Friction factor	f_s	0.0935
	Flow mass rate	G_c	19.78 kg / m ² · s
	Tube column	N_c	16
	Specific weight	γ	2.804kg/m ³
	Correction factor	$\xi \Delta P$	0.7226
	Viscosity coefficient	$\mu \times 10^{-5}$	1.232 Pa · s

	Viscosity coefficient*	$\mu_w \times 10^{-5}$	0.724 Pa·s
Takeoff connection for 20MW	Friction factor	f_s	0.0939
	Flow mass rate	G_c	12.53 kg/m ² ·s
	Tube column	N_c	16
	Specific weight	γ	2.909 kg/m ³
	Correction factor	ξ_{AP}	0.7022
	Viscosity coefficient	$\mu \times 10^{-5}$	1.157 Pa·s
	Viscosity coefficient*	$\mu_w \times 10^{-5}$	1.099 Pa·s
Segmental baffle 1st stage	Tubes in segment part	N_w	0
	Specific weight	γ	2.055 kg/m ³
	Flow rate	v^z	4.98 m/s
Segmental baffle 2nd stage	Tubes in segment part	N_w	0
	Specific weight	γ	2.397 kg/m ³
	Flow rate	v^z	5.65 m/s
Segmental baffle 3rd stage	Tubes in segment part	N_w	0
	Specific weight	γ	2.643 kg/m ³
	Flow rate	v^z	6.79 m/s
Segmental baffle 4th stage	Tubes in segment part	N_w	0
	Specific weight	γ	2.856 kg/m ³
	Flow rate	v^z	6.28 m/s
Primary helium outlet nozzle	Contraction coefficient	C_{He}^C	0.5
	Specific weight	γ	2.909 kg/m ³
	Flow rate	v^C	52.79 m/s
Primary helium inlet nozzle	Enlargement loss coefficient	C_{He}^E	1.0
	Specific weight	γ	2.909 kg/m ³
	Flow rate	v^E	24.87 m/s
Double-shell	Friction factor	λ	0.199
	Double-shell length	L	3705 mm
	Equivalent diameter	D	0.19 mm
	Specific weight	γ	2.909 kg/m ³
	Flow rate	v^S	4.91 m/s
Double-piping nozzle (Outer tube)	Contraction coefficient	C_{Water}^C	0.5
	Specific weight	γ	2.909 kg/m ³
	Flow rate	v^C	23.03 m/s

* At tube outer wall temperature

Table B.8 Estimation result of pressure drop for helium (Rated / Parallel)

Part	Pressure drop
Double-piping nozzle (Inner tube)	0.78kPa
Impingement baffle	0.21kPa
Heat transfer tube	1st stage
	0.12kPa
	2nd stage
	0.27kPa
	3rd stage
	0.70kPa
	4th stage
	0.64kPa
Takeoff connection for 20MW	0.26kPa
Segmental baffle	1st stage
	0.12kPa
	2nd stage
	0.18kPa
	3rd stage
	0.28kPa
	4th stage
	0.26kPa
Primary helium outlet nozzle	2.03kPa
Primary helium inlet nozzle	0.90kPa
Double-shell	0.01kPa
Double-piping nozzle (Outer tube)	0.39kPa
Total	7.14kPa

Table B.9 Estimation condition of pressure drop estimation for pressurized water (High temperature / Single)

Part		Estimation condition		
Pressurized water inlet nozzle (Inner diameter=245mm)		Enlargement loss coefficient	C_{Water}^E	1.0
		Specific weight	γ	932.77kg/m ³
		Flow rate	v^E	3.90m/s
Heat transfer tube inlet		Contraction coefficient	C_{Water}^C	0.5
		Specific weight	γ	932.77kg/m ³
		Flow rate	v^C	4.47m/s
Tube sheet → Baffle 1st stage (Tube length L=1240mm)	Inlet	Friction factor	λ	0.01451
		Specific weight	γ	932.77kg/m ³
		Flow rate	v^S	4.47m/s
	Outlet	Friction factor	λ	0.01411
		Specific weight	γ	894.78kg/m ³
		Flow rate	v^S	4.62m/s
Straight heat transfer tube 1st stage (Tube length L=1120mm)	Inlet	Friction factor	λ	0.01451
		Specific weight	γ	928.40kg/m ³
		Flow rate	v^S	4.47m/s
	Outlet	Friction factor	λ	0.01411
		Specific weight	γ	898.75kg/m ³
		Flow rate	v^S	4.62m/s
Straight heat transfer tube 2nd stage (Tube length L=640mm)	Inlet	Friction factor	λ	0.01442
		Specific weight	γ	921.76kg/m ³
		Flow rate	v^S	4.50m/s
	Outlet	Friction factor	λ	0.01420
		Specific weight	γ	905.02kg/m ³
		Flow rate	v^S	4.59m/s
Straight heat transfer tube 3rd stage (Tube length L=365mm)	Inlet	Friction factor	λ	0.01438
		Specific weight	γ	918.66kg/m ³
		Flow rate	v^S	4.52m/s
	Outlet	Friction factor	λ	0.01420
		Specific weight	γ	908.47kg/m ³
		Flow rate	v^S	4.57m/s
Straight heat transfer tube 4th stage (Tube length L=365mm)	Inlet	Friction factor	λ	0.01433
		Specific weight	γ	916.58kg/m ³
		Flow rate	v^S	4.53m/s

	Outlet	Friction factor	λ	0.01424
		Specific weight	γ	910.53kg/m ³
		Flow rate	v^s	4.56m/s
Straight heat transfer tube 5th stage (Tube length L=750mm)	Inlet	Friction factor	λ	0.01429
		Specific weight	γ	914.57kg/m ³
		Flow rate	v^s	4.54m/s
	Outlet	Friction factor	λ	0.01429
		Specific weight	γ	912.47kg/m ³
		Flow rate	v^s	4.55m/s
Takeoff connection for 20MW (Tube length L=240mm)	Inlet	Friction factor	λ	0.01430
		Specific weight	γ	915.69kg/m ³
		Flow rate	v^s	4.53m/s
	Outlet	Friction factor	λ	0.0143
		Specific weight	γ	911.49kg/m ³
		Flow rate	v^s	4.55m/s
Baffle last stage → U tube bending part (Distance=110mm)		Friction factor	λ	0.0143
		Heat transfer tube length	L	110mm
		Specific weight	γ	913.45kg/m ³
		Flow rate	v^s	4.54m/s
		Roughness coefficient	K	1.0
U tube bending part		Loss factor	C_{Water}^B	0.469
		Specific weight	γ	913.45kg/m ³
		Flow rate	v^B	4.54m/s
		Enlargement loss coefficient	C_{Water}^E	1.0
Heat transfer tube outlet		Specific weight	γ	894.78kg/m ³
		Flow rate	v^E	4.62m/s
		Contraction coefficient	C_{Water}^C	0.5
Pressurized water outlet nozzle (Inner diameter=245mm)		Specific weight	γ	894.78kg/m ³
		Flow rate	v^C	4.07m/s

Table B.10 Estimation result of pressure drop for pressurized water (High temperature / Single)

Part		Pressure drop		
Pressurized water inlet nozzle			$\Delta P_{\text{Water}}^E$	7.11kPa
Heat transfer tube inlet			$\Delta P_{\text{Water}}^C$	4.66kPa
Tube sheet → Baffle 1st stage	Inlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	8.48kPa	17.00kPa
	Outlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	8.52kPa	
Straight heat transfer tube	1st stage	Inlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	7.66kPa
		Outlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	7.69kPa
	2nd stage	Inlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	4.38kPa
		Outlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	4.39kPa
	3rd stage	Inlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	2.50kPa
		Outlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	2.50kPa
	4th stage	Inlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	2.50kPa
		Outlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	2.50kPa
	5th stage	Inlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	5.13kPa
		Outlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	5.14kPa
Takeoff connection for 20MW	Inlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	1.64kPa	3.28kPa
	Outlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	1.64kPa	
Baffle last stage → U tube bending part			$\Delta P_{\text{Water}}^S$	1.50kPa
U tube bending part			$\Delta P_{\text{Water}}^B$	4.42kPa
Heat transfer tube outlet			$\Delta P_{\text{Water}}^E$	9.54kPa
Pressurized water outlet nozzle			$\Delta P_{\text{Water}}^C$	3.70kPa
Total pressure drop			ΔP_{Water}	95.59kPa

Table B.11 Estimation condition of pressure drop estimation for primary helium (High temperature / Single)

Part	Estimation condition		
Double-piping nozzle (Inner tube) (Inner diameter=245mm)	Enlargement loss coefficient	C_{He}^E	1.0
	Specific weight	γ	1.589kg/m ³
	Flow rate	v^E	40.68m/s
Impingement baffle	Loss factor	C_{He}^I	20.0
	Specific weight	γ	1.589kg/m ³
	Flow rate	v^I	4.73m/s
Heat transfer tube 1st stage	Friction factor	f_s	0.1157
	Flow mass rate	G_c	8.03 kg / m ² · s
	Tube column	N_c	16
	Specific weight	γ	1.791kg/m ³
	Correction factor	$\xi \Delta P$	0.7226
	Viscosity coefficient	$\mu \times 10^{-5}$	2.641 Pa · s
	Viscosity coefficient*	$\mu_w \times 10^{-5}$	0.856 Pa · s
Heat transfer tube 2nd stage	Friction factor	f_s	0.1026
	Flow mass rate	G_c	14.05 kg / m ² · s
	Tube column	N_c	16
	Specific weight	γ	2.139kg/m ³
	Correction factor	$\xi \Delta P$	0.7226
	Viscosity coefficient	$\mu \times 10^{-5}$	1.947 Pa · s
	Viscosity coefficient*	$\mu_w \times 10^{-5}$	0.807 Pa · s
Heat transfer tube 3rd stage	Friction factor	f_s	0.0917
	Flow mass rate	G_c	24.64 kg / m ² · s
	Tube column	N_c	16
	Specific weight	γ	2.380kg/m ³
	Correction factor	$\xi \Delta P$	0.7226
	Viscosity coefficient	$\mu \times 10^{-5}$	1.624 Pa · s
	Viscosity coefficient*	$\mu_w \times 10^{-5}$	0.802 Pa · s
Heat transfer tube 4th stage	Friction factor	f_s	0.0909
	Flow mass rate	G_c	24.64 kg / m ² · s
	Tube column	N_c	16
	Specific weight	γ	2.571kg/m ³
	Correction factor	$\xi \Delta P$	0.7226
	Viscosity coefficient	$\mu \times 10^{-5}$	1.426 Pa · s

	Viscosity coefficient*	$\mu_w \times 10^{-5}$	0.760 Pa·s
Heat transfer tube 5th stage	Friction factor	f_s	0.1021
	Flow mass rate	G_c	11.99 kg/m ² ·s
	Tube column	N_c	16
	Specific weight	γ	2.791 kg/m ³
	Correction factor	$\xi \Delta P$	0.7226
	Viscosity coefficient	$\mu \times 10^{-5}$	1.242 Pa·s
	Viscosity coefficient*	$\mu_w \times 10^{-5}$	0.670 Pa·s
Segmental baffle 1st stage	Tubes in segment part	N_w	0
	Specific weight	γ	1.894 kg/m ³
	Flow rate	v^z	6.73 m/s
Segmental baffle 2nd stage	Tubes in segment part	N_w	0
	Specific weight	γ	2.209 kg/m ³
	Flow rate	v^z	7.64 m/s
Segmental baffle 3rd stage	Tubes in segment part	N_w	0
	Specific weight	γ	2.429 kg/m ³
	Flow rate	v^z	9.20 m/s
Segmental baffle 4th stage	Tubes in segment part	N_w	0
	Specific weight	γ	2.618 kg/m ³
	Flow rate	v^z	8.54 m/s
Segmental baffle 5th stage	Tubes in segment part	N_w	0
	Specific weight	γ	2.853 kg/m ³
	Flow rate	v^z	5.46 m/s
Primary helium outlet nozzle	Contraction coefficient	C_{He}^C	0.5
	Specific weight	γ	2.916 kg/m ³
	Flow rate	v^C	30.91 m/s
Primary helium inlet nozzle	Enlargement loss coefficient	C_{He}^E	1.0
	Specific weight	γ	2.916 kg/m ³
	Flow rate	v^E	30.91 m/s
Double-shell	Friction factor	λ	0.0192
	Double-shell length	L	3705 mm
	Equivalent diameter	D	190 mm
	Specific weight	γ	2.916 kg/m ³
	Flow rate	v^S	6.10 m/s
Double-piping nozzle (Outer tube)	Contraction coefficient	C_{Water}^C	0.5
	Specific weight	γ	2.916 kg/m ³

	Flow rate	v^c	28.63m/s
--	-----------	-------	----------

* At tube outer wall temperature

Table B.12 Estimation result of pressure drop for helium (High temperature / Single)

Part	Pressure drop	
Double-piping nozzle (Inner tube)	1.31kPa	
Impingement baffle	0.36kPa	
Heat transfer tube	1st stage	0.19kPa
	2nd stage	0.45kPa
	3rd stage	1.13kPa
	4th stage	1.04kPa
	5th stage	0.26kPa
Segmental baffle	1st stage	0.20kPa
	2nd stage	0.30kPa
	3rd stage	0.47kPa
	4th stage	0.44kPa
	5th stage	0.20kPa
Primary helium outlet nozzle	0.70kPa	
Primary helium inlet nozzle	1.39kPa	
Double-shell	0.02kPa	
Double-piping nozzle (Outer tube)	0.60kPa	
Total	9.04kPa	

Table B.13 Estimation condition of pressure drop estimation for pressurized water (High temperature / Parallel)

Part	Estimation condition			
Pressurized water inlet nozzle (Inner diameter =245mm)	Enlargement loss coefficient	C_{Water}^E	1.0	
	Specific weight	γ	933.62kg/m ³	
	Flow rate	v^E	2.59m/s	
Heat transfer tube inlet	Contraction coefficient	C_{Water}^C	0.5	
	Specific weight	γ	933.62kg/m ³	
	Flow rate	v^C	2.97m/s	
Tube sheet → Baffle 1st stage (Tube length L=1240mm)	Inlet	Friction factor	λ	0.01541
		Specific weight	γ	933.62kg/m ³
		Flow rate	v^S	2.97m/s
	Outlet	Friction factor	λ	0.01496
		Specific weight	γ	895.83kg/m ³
		Flow rate	v^S	3.06m/s
Straight heat transfer tube 1st stage (Tube length L=1120mm)	Inlet	Friction factor	λ	0.01541
		Specific weight	γ	928.46kg/m ³
		Flow rate	v^S	2.97m/s
	Outlet	Friction factor	λ	0.01496
		Specific weight	γ	900.31kg/m ³
		Flow rate	v^S	3.06m/s
Straight heat transfer tube 2nd stage (Tube length L=640mm)	Inlet	Friction factor	λ	0.01528
		Specific weight	γ	920.82kg/m ³
		Flow rate	v^S	2.99m/s
	Outlet	Friction factor	λ	0.01505
		Specific weight	γ	907.35kg/m ³
		Flow rate	v^S	3.03m/s
Straight heat transfer tube 3rd stage (Tube length L=365mm)	Inlet	Friction factor	λ	0.01519
		Specific weight	γ	917.43kg/m ³
		Flow rate	v^S	3.00m/s
	Outlet	Friction factor	λ	0.01510
		Specific weight	γ	911.00kg/m ³
		Flow rate	v^S	3.02m/s
Straight heat transfer tube 4th stage (Tube length L=365mm)	Inlet	Friction factor	λ	0.01519
		Specific weight	γ	915.16kg/m ³
		Flow rate	v^S	3.01m/s

	Outlet	Friction factor	λ	0.01514
		Specific weight	γ	913.19kg/m ³
		Flow rate	v^s	3.01m/s
Takeoff connection for 20MW (Tube length L=240mm)		Friction factor	λ	0.0152
		Specific weight	γ	914.24kg/m ³
		Flow rate	v^s	3.01m/s
Straight heat transfer tube 5th stage (Tube length L=750mm)		Friction factor	λ	0.152
		Specific weight	γ	914.24kg/m ³
		Flow rate	v^s	3.01m/s
Baffle last stage → U tube bending part (Distance=110mm)		Friction factor	λ	0.0152
		Heat transfer tube length	L	110mm
		Specific weight	γ	914.24kg/m ³
		Flow rate	v^s	3.01m/s
U tube bending part		Roughness coefficient	K	1.0
		Loss factor	C_{Water}^B	0.503
		Specific weight	γ	914.24kg/m ³
		Flow rate	v^B	3.01m/s
Heat transfer tube outlet		Enlargement loss coefficient	C_{Water}^E	1.0
		Specific weight	γ	895.83kg/m ³
		Flow rate	v^E	3.06m/s
Pressurized water outlet nozzle (Inner diameter=245mm)		Contraction coefficient	C_{Water}^C	0.5
		Specific weight	γ	895.83kg/m ³
		Flow rate	v^C	2.70m/s

Table B.14 Estimation result of pressure drop for pressurized water (High temperature / Parallel)

Part	Pressure drop		
Pressurized water inlet nozzle	$\Delta P_{\text{Water}}^E$		3.13kPa
Heat transfer tube inlet	$\Delta P_{\text{Water}}^C$		2.05kPa
Tube sheet → Baffle 1st stage	Inlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	3.96kPa
	Outlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	3.97kPa
Straight heat transfer tube	Inlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	3.58kPa
	Outlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	3.58kPa
	Inlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	2.04kPa
	Outlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	2.04kPa
1st stage	Inlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	1.16kPa
	Outlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	1.17kPa
	Inlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	1.17kPa
	Outlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	1.17kPa
2nd stage	Inlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	7.16kPa
	Outlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	4.09kPa
	Inlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	2.33kPa
	Outlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	2.33kPa
3rd stage	Inlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	4.79kPa
	Outlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	1.53kPa
	Inlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	0.70kPa
	Outlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	2.09kPa
4th stage	Inlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	4.19kPa
	Outlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	1.63kPa
	Inlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	43.95kPa
	Outlet	$\Delta P_{\text{Water}}^S$	
Takeoff connection for 20MW	$\Delta P_{\text{Water}}^S$		
Straight heat transfer tube (5th stage)	$\Delta P_{\text{Water}}^S$		
Baffle last stage → U tube bending part	$\Delta P_{\text{Water}}^S$		
U tube bending part	$\Delta P_{\text{Water}}^B$		
Heat transfer tube outlet	$\Delta P_{\text{Water}}^E$		
Pressurized water outlet nozzle	$\Delta P_{\text{Water}}^C$		
Total pressure drop	ΔP_{Water}		

Table B.15 Estimation condition of pressure drop estimation for primary helium (High temperature, Parallel)

Part	Estimation condition		
Double-piping nozzle (Inner tube) (Inner diameter=245mm)	Enlargement loss coefficient	C_{He}^E	1.0
	Specific weight	γ	1.578kg/m ³
	Flow rate	v^E	26.89m/s
Impingement baffle	Loss factor	C_{He}^I	20.0
	Specific weight	γ	1.578kg/m ³
	Flow rate	v^I	3.13m/s
Heat transfer tube 1st stage	Friction factor	f_s	0.1244
	Flow mass rate	G_c	5.27 kg / m ² · s
	Tube column	N_c	16
	Specific weight	γ	1.820kg/m ³
	Correction factor	$\xi\Delta P$	0.7226
	Viscosity coefficient	$\mu \times 10^{-5}$	2.577 Pa · s
	Viscosity coefficient*	$\mu_w \times 10^{-5}$	0.800 Pa · s
Heat transfer tube 2nd stage	Friction factor	f_s	0.1098
	Flow mass rate	G_c	9.23 kg / m ² · s
	Tube column	N_c	16
	Specific weight	γ	2.241kg/m ³
	Correction factor	$\xi\Delta P$	0.7226
	Viscosity coefficient	$\mu \times 10^{-5}$	1.801 Pa · s
	Viscosity coefficient*	$\mu_w \times 10^{-5}$	0.750 Pa · s
Heat transfer tube 3rd stage	Friction factor	f_s	0.0980
	Flow mass rate	G_c	16.18 kg / m ² · s
	Tube column	N_c	16
	Specific weight	γ	2.541kg/m ³
	Correction factor	$\xi\Delta P$	0.7226
	Viscosity coefficient	$\mu \times 10^{-5}$	1.455 Pa · s
	Viscosity coefficient*	$\mu_w \times 10^{-5}$	0.751 Pa · s
Heat transfer tube 4th stage	Friction factor	f_s	0.09609
	Flow mass rate	G_c	16.18 kg / m ² · s
	Tube column	N_c	16
	Specific weight	γ	2.784kg/m ³
	Correction factor	$\xi\Delta P$	0.7226
	Viscosity coefficient	$\mu \times 10^{-5}$	1.247 Pa · s

	Viscosity coefficient*	$\mu_w \times 10^{-5}$	0.709 Pa·s
Takeoff connection for 20MW	Friction factor	f_s	0.0973
	Flow mass rate	G_c	10.24 kg/m ² ·s
	Tube column	N_c	16
	Specific weight	γ	2.902 kg/m ³
	Correction factor	$\xi_{\Delta P}$	0.7022
	Viscosity coefficient	$\mu \times 10^{-5}$	1.162 Pa·s
	Viscosity coefficient*	$\mu_w \times 10^{-5}$	1.104 Pa·s
Segmental baffle 1st stage	Tubes in segment part	N_w	0
	Specific weight	γ	1.945 kg/m ³
	Flow rate	v^z	4.31 m/s
Segmental baffle 2nd stage	Tubes in segment part	N_w	0
	Specific weight	γ	2.327 kg/m ³
	Flow rate	v^z	4.76 m/s
Segmental baffle 3rd stage	Tubes in segment part	N_w	0
	Specific weight	γ	2.603 kg/m ³
	Flow rate	v^z	5.64 m/s
Segmental baffle 4th stage	Tubes in segment part	N_w	0
	Specific weight	γ	2.843 kg/m ³
	Flow rate	v^z	5.16 m/s
Primary helium outlet nozzle	Contraction coefficient	C_{He}^C	0.5
	Specific weight	γ	2.902 kg/m ³
	Flow rate	v^C	43.30 m/s
Primary helium inlet nozzle	Enlargement loss coefficient	C_{He}^E	1.0
	Specific weight	γ	2.902 kg/m ³
	Flow rate	v^E	20.40 m/s
Double-shell	Friction factor	λ	0.0207
	Double-shell length	L	3705 mm
	Equivalent diameter	D	190 mm
	Specific weight	γ	2.902 kg/m ³
	Flow rate	v^S	4.03 m/s
Double-piping nozzle (Outer tube)	Contraction coefficient	C_{Water}^C	0.5
	Specific weight	γ	2.902 kg/m ³
	Flow rate	v^C	18.89 m/s

* At tube outer wall temperature

Table B.16 Estimation result of pressure drop for helium (High temperature / Parallel)

Part	Pressure drop	
Double-piping nozzle (Inner tube)	0.57kPa	
Impingement baffle	0.15kPa	
Heat transfer tube	1st stage	0.09kPa
	2nd stage	0.20kPa
	3rd stage	0.49kPa
	4th stage	0.45kPa
Takeoff connection for 20MW	0.18kPa	
Segmental baffle	1st stage	0.08kPa
	2nd stage	0.12kPa
	3rd stage	0.19kPa
	4th stage	0.17kPa
Primary helium outlet nozzle	1.36kPa	
Primary helium inlet nozzle	0.60kPa	
Double-shell	0.01kPa	
Double-piping nozzle (Outer tube)	0.26kPa	
Total	4.93kPa	

付録 C PPWC 管内・管外熱伝達率に関する計算結果

This is a blank page.

Table list in Appendix C

Table C.1	Evaluation result of in-tube heat transfer coefficient (Rated / Single)	109
Table C.2	Evaluation result of ex-tube heat transfer coefficient (Rated / Single)	110
Table C.3	Evaluation result of in-tube heat transfer coefficient (Rated / Parallel).....	111
Table C.4	Evaluation result of ex-tube heat transfer coefficient (Rated operation).....	112
Table C.5	Evaluation result of in-tube heat transfer coefficient (High temperature / Single)	113
Table C.6	Evaluation result of ex-tube heat transfer coefficient (High temperature / Single)	114
Table C.7	Evaluation result of in-tube heat transfer coefficient (High temperature / Parallel).....	115
Table C.8	Evaluation result of ex-tube heat transfer coefficient (High temperature / Parallel).....	116

This is a blank page.

Table C.1 Evaluation result of in-tube heat transfer coefficient (Rated / Single)

	Evaluated RS-5 (2004/2/16)	Designed
Pressurized water mean temperature	126 °C	
Pressurized water density	939.3 kg/m ³	
Number of heat transfer tube	136	
Heat transfer tube inner diameter	19.68 mm	
In-tube pressurized water flow rate	4.47 m/s	
Pressurized water dynamic viscosity coefficient	0.2320×10^{-6} m ² /s	
Reynolds number	379,419	
Prandtl number	1.37	
Nusselt number	736.8	
Pressurized water thermal conductivity	0.686 W/m · K	
Evaluated in-tube heat transfer coefficient	25677 W/m ² · K	29099 W/m ² · K
Difference		-11.8%

Table C.2 Evaluation result of ex-tube heat transfer coefficient (Rated / Single)

	Evaluated RS-5 (2004/2/16)	Designed
Primary helium inlet / outlet temperature	837°C / 389°C	
Pressurized water inlet / outlet temperature	106°C / 145°C	
Exchanged heat	28,740kW	
Logarithmic mean temperature difference	457K	
Evaluated UA	62.85kW/K	
Water equivalent of primary helium	65.22kW/K	
Water equivalent of pressurized water	738.6kW/K	
Water equivalent ratio	11.33	
Temperature effectiveness	0.05318	
Temperature difference correction factor	0.9860	
Corrected UA	63.74kW/K	
Corrected U	910.6 W/m ² · K	
Heat transfer tube thermal conductivity	17.29 W/m · K	
Heat transfer tube inner diameter	19.68mm	
Heat transfer tube outer diameter	25.40mm	
Evaluated ex-tube heat transfer coefficient	1041 W/m ² · K	1329 W/m ² · K
Difference	-21.7%	

Table C.3 Evaluation result of in-tube heat transfer coefficient (Rated / Parallel)

	Evaluated (RP-1, 2002/6/10)	Designed
Pressurized water mean temperature	137 °C	
Pressurized water density	930.0 kg/m ³	
Number of heat transfer tube	136	
Heat transfer tube inner diameter	19.68 mm	
In-tube pressurized water flow rate	2.99 m/s	
Pressurized water dynamic viscosity coefficient	$0.2132 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	
Reynolds number	276,294	
Prandtl number	1.27	
Nusselt number	554.6	
Pressurized water thermal conductivity	0.6864 W/m · K	
Evaluated in-tube heat transfer coefficient	19,343 W/m ² · K	20,949 W/m ² · K
Difference	-	-7.7%

Table C.4 Evaluation result of ex-tube heat transfer coefficient (Rated / Parallel)

	Evaluated (RP-1, 2002/6/10)	Designed
Primary helium inlet / outlet temperature	837 °C / 389 °C	
Pressurized water inlet / outlet temperature	106 °C / 145 °C	
Exchanged heat	18,986kW	
Logarithmic mean temperature difference	437 °C	
Evaluated UA	43.40kW/K	
Water equivalent of primary helium	42.83kW/K	
Water equivalent of pressurized water	490.7kW/K	
Water equivalent ratio	11.46	
Temperature effectiveness	0.05485	
Temperature difference correction factor	0.9839	
Corrected UA	44.11kW/K	
Corrected U	816.8 W/m ² · K	
Heat transfer tube thermal conductivity	17.29 W/m · K	
Heat transfer tube inner diameter	19.68mm	
Heat transfer tube outer diameter	25.40mm	
Evaluated ex-tube heat transfer coefficient	906 W/m ² · K	1102 W/m ² · K
Difference		-17.8%

Table C.5 Evaluation result of in-tube heat transfer coefficient (High temperature / Single)

	Evaluated (PT-5S, 2004/4/23)	Designed
Pressurized water mean temperature	120 °C	
Pressurized water density	944.1kg/m ³	
Number of heat transfer tube	136	
Heat transfer tube inner diameter	19.68mm	
In-tube pressurized water flow rate	4.40m/s	
Pressurized water dynamic viscosity coefficient	0.2441×10^{-6} m ² /s	
Reynolds number	348,970	
Prandtl number	1.45	
Nusselt number	711.4	
Pressurized water thermal conductivity	0.6848 W/m · K	
Evaluated in-tube heat transfer coefficient	24,761 W/m ² · K	28,765 W/m ² · K
Difference		-13.9%

Table C.6 Evaluation result of ex-tube heat transfer coefficient (High temperature / Single)

	Evaluated (PT-5S, 2004/4/23)	Designed
Primary helium inlet / outlet temperature	837°C / 389°C	
Pressurized water inlet / outlet temperature	106°C / 145°C	
Exchanged heat	28,605kW	
Logarithmic mean temperature difference	501°C	
Evaluated UA	57.15kW/K	
Water equivalent of primary helium	53.40kW/K	
Water equivalent of pressurized water	728.6kW/K	
Water equivalent ratio	13.64	
Temperature effectiveness	0.04710	
Temperature difference correction factor	0.9855	
Corrected UA	57.99kW/K	
Corrected U	828.43 W/m ² · K	
Heat transfer tube thermal conductivity	17.29 W/m · K	
Heat transfer tube inner diameter	19.68mm	
Heat transfer tube outer diameter	25.40mm	
Evaluated ex-tube heat transfer coefficient	933 W/m ² · K	1175 W/m ² · K
Difference	-	20.6%

Table C.7 Evaluation result of in-tube heat transfer coefficient (High temperature / Parallel)

	Evaluated (PT-5P, 2004/6/22)	Designed
Pressurized water mean temperature	124 °C	
Pressurized water density	941.2 kg/m ³	
Number of heat transfer tube	136	
Heat transfer tube inner diameter	19.68 mm	
In-tube pressurized water flow rate	2.93 m/s	
Pressurized water dynamic viscosity coefficient	0.2365×10^{-6} m ² /s	
Reynolds number	243,619	
Prandtl number	1.40	
Nusselt number	520.6	
Pressurized water thermal conductivity	0.6855 W/m · K	
Evaluated in-tube heat transfer coefficient	18,137 W/m ² · K	20,715 W/m ² · K
Difference	-	12.4%

Table C.8 Evaluation result of ex-tube heat transfer coefficient (High temperature / Parallel)

	Evaluated (PT-5P, 2004/6/22)	Designed
Primary helium inlet / outlet temperature	837°C / 389°C	
Pressurized water inlet / outlet temperature	106°C / 145°C	
Exchanged heat	19,058kW	
Logarithmic mean temperature difference	497°C	
Evaluated UA	38.32kW/K	
Water equivalent of primary helium	34.70kW/K	
Water equivalent of pressurized water	484.01kW/K	
Water equivalent ratio	13.95	
Temperature effectiveness	0.04708	
Temperature difference correction factor	0.9846	
Corrected UA	38.92kW/K	
Corrected U	720.7 W/m ² · K	
Heat transfer tube thermal conductivity	17.29 W/m · K	
Heat transfer tube inner diameter	19.68mm	
Heat transfer tube outer diameter	25.40mm	
Evaluated ex-tube heat transfer coefficient	787 W/m ² · K	976 W/m ² · K
Difference	-19.4%	