

JAERI-Tech

JP0450264

2003-097



## HTTRの加圧水空気冷却器の除熱性能に関する評価

2004年1月

柄尾 大輔・中川 繁昭・高田 英治・坂場 成昭・高松 邦吉

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

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Nakagun, Ibarakiken 319-1195, Japan.

## HTTR の加圧水空気冷却器の除熱性能に関する評価

日本原子力研究所大洗研究所高温工学試験研究炉開発部

柄尾 大輔・中川 繁昭・高田 英治・坂場 成昭・高松 邦吉

(2003 年 12 月 2 日受理)

定格熱出力 30 MW の高温工学試験研究炉 (HTTR) では、原子炉で発生した熱を加圧水冷却器、中間熱交換器による熱交換を経て、最終的に加圧水空気冷却器 (ACL) により大気に放散している。従って、ACL の 2 次側の条件となる外気温度は原子炉の除熱に影響を及ぼす運転上重要な因子である。外気温度の経時変化に対しては、冷却材である加圧水及び空気の流量を変化させることにより ACL における冷却材温度を調整して安定な原子炉入口温度制御を可能としている。

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 ACL の除熱性能を評価し、原子炉の除熱の観点から最も厳しい条件となる夏季の外気温度における原子炉の除熱について検討した。その結果、夏季の外気温度の条件においても 30 MW の除熱が可能であることが示された。

## Estimation of Heat Removal Characteristics for Air-cooler in HTTR

Daisuke TOCHIO, Shigeaki NAKAGAWA, Eiji TAKADA,  
Nariaki SAKABA and Kuniyoshi TAKAMATSU

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

(Received December 2, 2003)

In High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) of 30 MW, the generated heat at reactor core is finally dissipated at the air-cooler (ACL) by way of the heat exchangers of the primary pressurized water cooler (PPWC) and the intermediate heat exchanger (IHX). Therefore, air temperature (secondary-side condition at ACL) is important factor for the heat removal performance of the reactor. Coping with air temperature change, stable reactor inlet temperature control is achieved by adjusting ACL coolant temperature with coolant (pressurized water and air) flow rate.

ACL heat removal performance was evaluated based on the previous operation data in rise-to-power test and in-service operation at HTTR. And the heat removal performance at summertime air temperature as the most severe condition was estimated. As the result, it was confirmed that the rated power of 30 MW can be removed at the condition of summertime air-temperature.

Keywords : HTTR, 30 MW-power Operation, Pressurized Water Cooling System, Air-cooler, Overall Heat Transfer Coefficient, Logarithmic Mean Temperature Difference, Reactor Coolability

## 目次

1	緒言 .....	1
2	設備の概要 .....	2
2.1	加圧水冷却設備の概要 .....	2
2.2	加圧水空気冷却器(ACL)の概要 .....	2
3	運転データの計測 .....	3
3.1	計測項目 .....	3
3.2	計測結果 .....	3
4	ACL の除熱性能の評価 .....	5
4.1	評価に用いる 30 MW 運転データの選定 .....	5
4.2	第 2 サイクルの運転データを用いた ACL の除熱性能の評価 .....	5
5	外気温の変化による 30MW 除熱必要加圧水流量の予測評価 .....	8
5.1	評価方法 .....	8
5.2	評価条件 .....	9
5.3	評価結果 .....	9
5.4	評価結果のまとめ .....	11
6	結言 .....	12
	謝辞 .....	12
	参考文献 .....	12
	付録	
A.	ACL の熱交換性能評価に用いた運転データ .....	33
B.	高温試験運転時における加圧水 ACL 入口温度の推算 .....	37
B.1.	1 次加圧水冷却器 (PPWC) の概要 .....	39
B.2.	運転データの計測 .....	39
B.3.	PPWC の熱交換性能評価 .....	39
B.4.	加圧水 PPWC 出口温度 (加圧水 ACL 入口温度) の評価 .....	41

## Contents

1	Introduction .....	1
2	Overview of HTTR Cooling System .....	2
2.1	Overview of Pressurized Water Cooling System.....	2
2.2	Overview of Primary Pressurized Water Air-cooler (ACL) .....	2
3	HTTR Operation Data Measurement.....	3
3.1	Measurement Item.....	3
3.2	Measurement Result .....	3
4	Estimation of ACL Heat Exchange Characteristics .....	5
4.1	Choice of 30 MW Operation Data used in Estimation of Heat Exchange Characteristics.....	5
4.2	Estimation of Heat Exchange Characteristics of Air-cooler using Operation Data at 2nd Operation Cycle.....	5
5	Prediction of Needed Coolant Flow Mass to 30 MW Heat Removal .....	8
5.1	Estimation Method .....	8
5.2	Estimation Condition.....	9
5.3	Estimation Result .....	9
5.4	Conclusion of Estimation Result .....	11
6	Conclusion .....	12
 Acknowledgements .....		12
 References.....		12
 <b>Appendix</b>		
A.	Operation Data used in Estimation of Heat Removal Characteristics for ACL .....	33
B.	Estimation of ACL Primary Coolant Inlet Temperature for High Temperature Test Operation Mode .....	37
B.1.	Overview of Primary Pressurized Water Cooler (PPWC).....	39
B.2.	Operation Data Measurement.....	39
B.3.	Estimation of PPWC Heat Exchange Characteristics .....	39
B.4.	Prediction of ACL Primary Coolant Inlet Temperature for High Temperature Test Operation Mode .....	41

## 1. 緒言

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

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熱出力 30 MW、原子炉入口冷却材温度 395 °C、原子炉出口冷却材温度 850°C／950°C（定格運転時／高温試験運転時）の高温ガス炉である。

HTTR は 1998 年 11 月 10 日に初臨界に達した後、1999 年 9 月から行われた出力上昇試験を経て 2001 年 12 月 7 日に原子炉出力 30 MW、原子炉出口冷却材温度 850°C を達成した。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。今後の運転として、2004 年に 30 MW の高温試験運転が計画されている。

HTTR の冷却設備系統を Fig. 1.1 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 次側部遮へい体を冷却するとともに異常な過渡事故時にも原子炉の残留熱を除去可能と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、原子炉内で発生した熱を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）より大気へと放散するものである。HTTR の運転方法には PPWC で 20 MW、IHX で 10 MW の除熱を行う並列運転と、IHX は使用せずに PPWC のみで 30 MW の除熱を行う単独運転がある。

原子炉で発生した熱を大気へ放散する際に、ACL の 2 次側の条件となる外気温度は原子炉の除熱に影響を及ぼす運転上重要な因子であり、外気温度の変化に対する ACL の除熱性能を評価して、今後行われる高温試験運転および冷却条件が厳しくなる夏季の運転条件に対する ACL の設計裕度を確認しておく必要がある。そこで本報では、HTTR においてこれまで実施してきた出力上昇試験<sup>2)</sup>、供用運転のデータから ACL の除熱性能を評価し、原子炉の除熱の観点から最も厳しい条件となる夏季の外気温度における原子炉の除熱について検討する。

## 2. 設備の概要

### 2.1. 加圧水冷却設備の概要

Table 2.1 に加圧水冷却設備の設計仕様、Fig. 2.1 に加圧水冷却設備の概要図を示す。加圧水冷却設備は 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、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、空気冷却器出口流量調節弁とバイパス流量調整弁によって調整されている。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。

### 2.2. 加圧水空気冷却器 (ACL) の概要

Table 2.2 に ACL の設計仕様を、Fig. 2.2 に ACL 概要図を示す。ACL は PPWC および SPWC において 1 次冷却材および 2 次冷却材(ヘリウムガス)から受け取った熱を大気に放散する設備であり、強制押込通風式のフィン付伝熱管を用いた冷却器(熱交換器)である。ACL の下部には 6 台のファンが設けられており、ファンの上方には 504 本のフィン付き伝熱管群が千鳥配列で設けられている。

PPWC および SPWC より送られてきた加圧水は ACL の入口ヘッダにより 504 本の伝熱管に分配され、伝熱管内を流れていく。この際、加圧水は ACL 下部に設けられたファンにより送風された空気によって冷却され、ACL 出口ヘッダに至る。一方、送風された空気は加圧水より熱を受け取った後に上方へと抜け、大気中へと放散される。空気風量については、ファンブレードの取付け角度を空気圧により変化させることにより調整することができ、ファンブレード角度調整圧が 0 bar の時に最大風量となり、1 bar の時に最小風量となるように設計されている。

### 3. 運転データの計測

### 3.1. 計測項目

ACL の除熱性能を評価するために、過去の運転データを用いる事とした。Table 3.1 及び 3.2 に性能評価に用いた計測点を示す。Table 3.1 は HTTR のプラント計算機より取得した測定点、Table 3.2 は追加で設置した計測機器および現場機器による測定点を示している。Fig. 3.1 及び 3.2 にはこれらの測定点の設置箇所を示している。図中の数字は Table 3.1 及び 3.2 に記された No. に対応している。

### 3.2. 計測結果

収集・整理した過去の運転データを付録 A に示す。測定した出力領域中性子束、加圧水 1 次・2 次 PWC 流量、加圧水空気冷却器加圧水入口・出口温度、加圧水温度に関しては、表示されている時刻から前後 1.5 時間のデータを平均化した値を示している。本節ではこの運転データを用いて、ファンの冷却空気平均風速と除熱に寄与する冷却空気風量の関係を求める。

Table 3.3 に評価に用いた運転データを示す。表中の「上試」は「出力上昇試験」の略である。この評価では、ファン全台の風速が得られている試験データを用いることとし、全ファンの風速の平均値をファンの平均風速とした。また、除熱に寄与した冷却空気流量は以下の手順で求めた。はじめに、加圧水が ACL で失った熱量  $Q_{ACL}^W$  を求める。ここで、加圧水 ACL 入口温度はバイパス前の加圧水温度を用いることとし (Fig. 3.1 計測点 No. 11)、加圧水 ACL 出口温度はバイパス加圧水と合流後の加圧水温度を用いることとした (Fig. 3.1 計測点 No. 13)。

$$Q_{ACL}^W = C_p^W \left( G_{PPWC}^W + G_{SPWC}^W \right) \left( T_{ACL\_IN}^W - T_{ACL\_OUT}^W \right) \dots \quad (3.1)$$

$Q_{ACL}^W$ : ACL での加圧水損失熱量 (W)

$C_p^w$ : 加圧水の定圧比熱 (J/kg·K)

$G_{PPWC}^W$ : 加压水 PPWC 流量 (kg/s)

T<sub>ACL\_IN</sub><sup>w</sup>: 加压水 ACL 入口温度 (°C)

$G_{SPWC}^W$ : 加压水 SPWC 流量 (kg/s)

$T_{ACL\_OUT}^W$ : 加压水 ACL 出口温度 (°C)

水の定圧比熱は圧力にはほとんど依存せず、温度に強く依存する。そこで 0.1 MPa の値を用いることとし<sup>3)</sup>、温度依存性を反映させるためにこれらの値を温度の関数として曲線で近似した。

$$C_p^W = 2.96632 \cdot 10^{-14} \cdot (T_{AVE}^W)^6 - 2.34836 \cdot 10^{-11} \cdot (T_{AVE}^W)^5 + 7.30960 \cdot 10^{-9} \cdot (T_{AVE}^W)^4 \\ - 1.08128 \cdot 10^{-6} \cdot (T_{AVE}^W)^3 + 8.73811 \cdot 10^{-5} \cdot (T_{AVE}^W)^2 - 3.20910 \cdot 10^{-3} \cdot (T_{AVE}^W) + 4.21915 \quad \dots\dots\dots(3.2)$$

$C_p^w$ : 加圧水の定圧比熱 (kJ/kg·K)       $T_{ave}^w$ : ACL における加圧水平均温度 (°C)

この加圧水が失った熱量を空気が全て持ち去った（すなわち、加圧水が ACL で失った熱量は ACL で空気と交換された熱量と等しい）と仮定すると、空気の熱容量の関係より除熱に寄与した空気風量  $G_{REM}^A$  は以下の式で与えられる。

$G_{REM}^A$ : 除熱に寄与した空気風量 (kg/s)       $T_{ACL\_IN}^A$ : 空気 ACL 入口温度 (°C)  
 $C_p^A$ : 空気の定圧比熱 (J/kg · K)       $T_{ACL\_OUT}^A$ : 空気 ACL 出口温度 (°C)

空気の比熱はほぼ一定であり、本評価においては空気の比熱は温度 20°C、圧力 0.1MPa の場合の 1.007 kJ/kg·K を用いることとした<sup>4)</sup>。評価した空気風量を Table 3.3 に併せて示す。評価結果より、除熱に寄与した最大風量は 1914.5 t/h であり、30MW 運転における平均風量は 1498.3 t/h であった。

また、Fig. 3.3 にファン平均風速と除熱に寄与した空気風量の関係を示す。図中のプロット点は過去の運転データより求めたファン平均風速と除熱に寄与した空気風量の関係である。図に示されるようにファン平均風速と除熱に寄与した空気風量の関係については線形性が成り立っておらず、ACL 出口側から入口側への巻込み流等の存在が推察される。

また、Fig. 3.4 にはファンブレード角度調整圧と空気風量の関係を示す。ここに示されている結果は ACL のファンブレード角度調整圧が 6 台全台同じものを参照した。縦軸は空気風量であり、横軸はファンブレード角度調整圧である。

この結果より、ファンブレード角度調整圧が増加するに従って風量が減少することが示された。しかしながら、風速・風量の関係に関してはデータのはらつきが多く、今後更なるデータの蓄積が必要であると考えられる。

#### 4. ACL の除熱性能の評価

#### 4.1. 評価に用いる 30 MW 運転データの選定

本章では過去に行われた 30 MW 運転のデータを用いて ACL の除熱性能を評価することとした。まずははじめに、ACL の評価に用いる運転データの選定を行うこととした。過去の運転において、30 MW まで到達した運転は①出力上昇試験(4) (定格／単独)、②出力上昇試験(4) (定格／並列)、③第 1 サイクル (定格／並列)、④第 2 サイクル (定格／単独)、の 4 ケースがある。ここでは①と④の運転に関して比較を行うこととした。

Fig. 4.1 は出力上昇試験(4)と第 2 サイクルにおける原子炉出口冷却材温度と加圧水 ACL 入口温度の関係を示している。横軸は原子炉出口冷却材温度を示しており、縦軸は加圧水 ACL 入口温度を示している。第 2 サイクル運転では両者の相関曲線は整った曲線を描いているが、出力上昇試験(4)では原子炉出口温度 730°C 付近および 780°C 付近で 700°C 以下の相関曲線とは異なった傾向を示しており、また第 2 サイクル運転とは違った傾向を示している。

そこで、出力上昇試験(4)におけるこの相関の乱れの原因を調べることとした。Fig. 4.2 は出力上昇試験(4)における原子炉出入口冷却材温度、熱出力、核出力および加圧水 ACL 入口温度の時間変化を示している。原子炉出口冷却材温度 730°C 付近において出力上昇後に一旦出力を下げていることにより、原子炉出口冷却材温度と加圧水温度の関係に乱れが生じているものと考えられる。また、原子炉出口冷却材温度 780°C 付近において熱出力校正試験を行っていることにより、原子炉出口冷却材温度と加圧水温度の関係に乱れが生じているものと考えられる。

以上のことより、出力上昇試験(4)のデータを用いて ACL の性能評価を行った場合には、加圧水 ACL 入口温度と原子炉出力（除熱量）の相関が乱れていることにより大きな誤差を生じるものと考えられる。そこで、ACL の除熱性能の評価については第 2 サイクルの結果を用いて行うものとする。

#### 4.2. 第2サイクルの運転データを用いた ACL の除熱性能の評価

ACL の除熱性能の評価は以下の手順で行った。一般的に向流型の熱交換器における交換熱量(除熱量)を評価するには以下の式が用いられる。

$$\Delta T_L = \frac{T_2 - T_1}{\ln(T_2 / T_1)} \dots \quad (4.2)$$

$$T_3 \equiv T_{ACl\_IN}^A - T_{ACl\_OUT}^W \quad \dots \dots \dots \quad (4.4)$$

$Q_{\text{ACI}}$ : 交換熱量 (W)

U: 热通過率 (W/m<sup>2</sup>·K)

$\Delta T_L$ : 対数平均温度差 (°C)      A: 伝熱面積 (m<sup>2</sup>)  
 $T_{ACL\_IN}^A$ : 空気 ACL 入口温度 (°C)       $T_{ACL\_IN}^W$ : 加圧水 ACL 入口温度 (°C)  
 $T_{ACL\_OUT}^A$ : 空気 ACL 出口温度 (°C)       $T_{ACL\_OUT}^W$ : 加圧水 ACL 出口温度 (°C)

Eq. (4.1)中の(熱通過率)×(伝熱面積)（以下、UAと表記する）は熱交換器の特性を表すものであり、ACL除熱性能の評価にはこの値を用いることとした。

また、原子炉で発生した熱量の一部は炉容器冷却系などの他の冷却系により除熱されており、その全てが ACL で除熱されてはいない。そこで、ACL での交換熱量を以下の式で評価することとした。

$$Q_{\text{HEX}} = Q_{\text{ACL}}^{\text{W}} = C_p^{\text{W}} \left( G_{\text{PPWC}}^{\text{W}} + G_{\text{SPWC}}^{\text{W}} \right) \left( T_{\text{ACL\_IN}}^{\text{W}} - T_{\text{ACL\_OUT}}^{\text{W}} \right) \dots \quad (4.5)$$

$$C_p^W = 2.96632 \cdot 10^{-14} \cdot (T_{AVE}^W)^6 - 2.34836 \cdot 10^{-11} \cdot (T_{AVE}^W)^5 + 7.30960 \cdot 10^{-9} \cdot (T_{AVE}^W)^4 \\ - 1.08128 \cdot 10^{-6} \cdot (T_{AVE}^W)^3 + 8.73811 \cdot 10^{-5} \cdot (T_{AVE}^W)^2 - 3.20910 \cdot 10^{-3} \cdot (T_{AVE}^W) + 4.21915 \quad .....(4.6)$$

$$T_{\text{AVE}}^{\text{W}} = \frac{T_{\text{IN}}^{\text{W}} + T_{\text{OUT}}^{\text{W}}}{2} \quad \dots \dots \dots \quad (4.7)$$

$Q_{ACL}^W$ : 加圧水損失熱量 (W)       $C_p^W$ : 加圧水の定圧比熱 (kJ/kg·K)  
 $T_{AVE}^W$ : ACL における加圧水平均温度 (°C)

第2サイクルの運転データおよびACLの除熱性能の評価結果をTable 4.1に示す。本評価において、対数平均温度差はA~Fの各ファンにおける空気出入口温度およびACLの出入口加圧水温度を用いて評価した後に平均化した値を用いた。

Fig. 4.3 は加圧水 ACL 入口温度と ACL での交換熱量の関係を示している。横軸は加圧水 ACL 入口温度を示しており、縦軸は ACL での交換熱量を示している。この相関について近似式を評価した結果、以下の式を得ることができた。

$Q_{ACL}^W$ : ACL での交換熱量 (MW)       $T_{ACL\_IN}^W$ : 加圧水 ACL 入口温度 (°C)

これは、原子炉熱出力に対する1次ヘリウムの原子炉出入口温度条件を固定した場合にはPPWC、IHX、SPWCからなる熱交換器群全体での伝熱性能(UA)に対して必要となる1次冷却材(ヘリウム)と2次冷却材(加圧水)の対数平均温度差が決まり、また加圧水総流量が一定であることに基づくものである。

Fig. 4.4 は UA と加圧水 ACL 入口温度の関係を示している。縦軸は UA を示しており、横軸は加圧水 ACL 入口温度を示している。Eq. (4.8)に示すように、加圧水 ACL 入口温度は ACL での交

換熱量と一対一に対応しており、このことは、加圧水流量、空気風量が定格条件になるとほぼ一定となり、ACL の除熱性能 (UA) がほぼ一定となることを示している。

## 5. 外気温の変化による 30MW 除熱必要加圧水流量の予測評価

### 5.1. 評価方法

4.2 節で評価した ACL の除熱性能、すなわち UA を用いて、外気温度が変化した場合の ACL の除熱能力を評価することとした。評価は、30 MW 運転で除熱を行うのに必要な加圧水流量を算出することとした。

Fig. 5.1 は 30 MW 運転で除熱を行うのに必要な加圧水流量を算出する手順を示している。手順は以下のとおりである。

- ① 加圧水 ACL 入口温度  $T_{ACL\_IN}^W$ 、空気風量  $G_{ACL}^A$ 、空気 ACL 入口温度  $T_{ACL\_IN}^A$  を入力する。
  - ② 適当な加圧水流量  $G_{ACL}^{W,TMP}$  を入力する。
  - ③ 以下の式より加圧水 ACL 出口温度  $T_{OUT}^W$  を算出する。

$Q_{ACL}$ : 30MW 運転での ACL 交換熱量 (W)       $T_{ACL\_IN}^W$ : 加圧水 ACL 入口温度 (°C)

$C_p^W$ : 加圧水の定圧比熱 (J/kg·K)       $T_{ACL\_OUT}^W$ : 加圧水 ACL 出口温度 (°C)

ここで、30MW運転におけるACL除熱量  $Q_{ACL}$  は前節の Eq. (4.8) より以下のように与えられる。

- ④ ACL 交換熱量、空気 ACL 入口温度、空気風量および以下の式を用いて空気 ACL 出口温度を算出する。

$Q_{ACL}$ : 30MW 運転における除熱量 (W)       $T_{IN}^W$ : 加圧水 ACL 入口温度 (°C)

$C_p^A$ : 空気の定圧比熱 (J/kg·K)       $T_{\text{OUT}}^W$ : 加圧水 ACL 出口温度 (°C)

⑤ ③、④で得られた値、および以下の式を用いて ACL の除熱能力を算出する。

$Q_{ACL}^{HEX}$ : 交換熱量 (W)

A : 伝熱面積 ( $m^2$ )

U: 热通過率 ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ )

$\Delta T_L$ : 对数平均温度差 (°C)

- ⑥ ⑤で求めた  $Q_{ACL}^{HEX}$  を用いて、ACL が加圧水より  $Q_{ACL}^{HEX}$  を奪った分の加圧水流量を算出する。

$$G_{ACL}^{W\_HEX} = \frac{Q_{ACL}^{HEX}}{C_p^W (T_{ACL\_IN}^W - T_{ACL\_OUT}^W)} \quad \dots \dots \dots \quad (5.8)$$

- ⑦ ②で与えた  $G_{ACL}^{W-TMP}$  と⑥で算出した  $G_{ACL}^{W-HEX}$  を比較する。②で与えた  $G_{ACL}^{W-TMP}$  は、ACL で熱量  $Q_{ACL}$  を奪われた加圧水流量を示している。一方、⑥で算出した  $G_{ACL}^{W-HEX}$  は ACL が  $Q_{ACL}^{HEX}$  を奪つた加圧水流量を示している。受け渡した熱量と受け取った熱量の関係より  $Q_{ACL}$  と  $Q_{ACL}^{HEX}$  は釣り合わなければならぬ。すなわち、ACL のヒートバランスが成立する場合には  $G_{ACL}^{W-TMP}$  と  $G_{ACL}^{W-HEX}$  は等しくなければならない。

- ⑧  $G_{\text{ACL}}^{\text{W\_TMP}} \neq G_{\text{ACL}}^{\text{W\_HEX}}$  の場合には  $G_{\text{ACL}}^{\text{W\_TMP}} = G_{\text{ACL}}^{\text{W\_TMP}} + \Delta G_{\text{ACL}}^{\text{W\_TMP}}$  として③から再計算する。

- ⑨  $G_{ACL}^{W\_TMP} = G_{ACL}^{W\_HEX}$  の場合には  $G_{ACL}^{W\_TMP}$  を出力する。

- ⑩ 終了

## 5.2. 評価条件

評価条件を Table 5.1 に示す。条件 1,2 は定格運転、条件 3,4 は高温試験運転に対する評価条件である。また、条件 1,3 は単独運転、条件 2,4 は並列運転に対するものである。それぞれの 30 MW 運転における加圧水 ACL 入口温度は、定格運転については過去の運転データより、高温試験運転については付録 B 「加圧水 ACL 入口温度 (PPWC 出口温度) の推算」より算出した値を用いた。冷却空気風量は過去の運転における平均風量および最大風量および設計仕様風量を用いることとした。これら全ての条件に対して外気温度はそれぞれ 0 - 40°C と変化させることとした。

### 5.3. 評価結果

### 5.3.1. 定格運転に対する評価結果

各々の外気温度に対応する定格／30MW運転時の除熱に必要な加圧水流量の評価結果をFig. 5.2、Fig. 5.3 に示す。Fig. 5.2 は定格／単独運転に対する解析結果であり、Fig. 5.3 は定格／並列運転に対する解析結果である。横軸は外気温度を示しており、縦軸は出力 30 MW 運転で ACL において除熱を行うのに必要な加圧水流量を示している。図中の各線は冷却空気風量の違いを示している。また、図中に示されている太線は運転上の目安としている ACL に流入可能な加圧水流量を示している。

どちらの運転条件においても、外気温度が 30°C以下の条件、出力 30 MW 運転で除熱に必要な

加圧水流量は最大加圧水流量以下となっており、運転可能であるという評価結果が得られた。しかしながら、従来の運転で記録されている風量の平均風量では、場合によっては出力 30MW 運転での除熱が困難となる場合があることも示された。水戸地区の過去の最高気温は 36.6 度であるが、除熱の条件が厳しい単独運転に対しても加圧水流量 500 t/h で 30 MW の除熱が可能であることが示された。

次に、外気温度が 30°C の時に出力 30 MW 運転における除熱に必要な加圧水流量の評価を行った。Fig. 5.4 は、外気温度 30°C における空気風量に対する出力 30 MW 運転での除熱に必要な加圧水流量の関係を示している。図中には単独／並列運転の場合に対する評価結果が示されている。図の横軸は空気風量を示しており、縦軸は 30 MW 除熱に必要な加圧水流量を示している。図中下方に示されている矢印は、Table 3.3 に示したファンブレード角度調整圧と空気風量の関係を示している。

この図より、外気温度 30°C の場合に出力 30MW 運転を成立させるための条件を知ることができる。すなわち、以下に示す条件を同時に満足したときに運転可能となる。

- ① ACL を流れる加圧水流量が最大加圧水流量以下である。
- ② ACL を流れる加圧水流量が評価した必要加圧水流量以上である。
- ③ ACL を流れる空気の風量が過去に測定された空気風量の範囲内にある。

この 3 つの条件を満足した領域（外気温度 30°C の場合の出力 30 MW 運転可能領域）を色付けて示す。この図より、外気温度 30°C の場合に運転を成立させるためには、定格／単独運転では 1530.0 t/h、定格／並列運転では 1330.0 t/h 以上の空気風量が必要であることが示された。すなわち、ファンブレード角度調整圧を全台 0.0 bar に設定した条件ではどちらの運転も可能であるということが示された。

なお、並列運転の場合に裕度が大きくなる理由は、PPWC、SPWC の実効的な UA が単独運転よりも大きく、加圧水 ACL 入口温度が高くなるためである。

### 5.3.2. 高温試験運転に対する評価結果

各々の外気温度に対応する高温／30MW 運転時の除熱に必要な加圧水流量の評価結果を Fig. 5.5、5.6 に示す。Fig. 5.5 は高温／単独運転に対する解析結果であり、Fig. 5.6 は高温／並列運転に対する解析結果である。横軸は外気温度を示しており、縦軸は出力 30 MW 運転における除熱を行うのに必要な加圧水流量を示している。図中の各線は冷却空気風量の違いを示している。また、図中に示されている太線は ACL に流入させることができない加圧水流量を示している。

どちらの運転条件においても単独運転と同様に、外気温度が 30°C 以下の条件、すなわち夏季の平均的な外気温度において出力 30 MW 運転での除熱に必要な加圧水流量は最大加圧水流量以下となっており、運転可能であるという評価結果が得られた。しかしながら、従来の運転で記録されている風量の平均風量では、場合によっては出力 30 MW 運転での除熱が困難となる場合があることも示された。

そこで、外気温度が 30°C の時に出力 30 MW 運転における除熱に必要な空気風量の評価を行った。Fig. 5.7 は、外気温度 30°C における高温運転時の冷却空気風量に対する出力 30 MW 運転で除

熱に必要な加圧水流量の関係を示している。図中には単独／並列運転の場合に対する評価結果が示されている。図の横軸は冷却空気風量を示しており、縦軸は出力 30 MW 運転で除熱に必要な加圧水流量を示している。図中下方に示されている矢印は、Table 3.3 に示したファンブレード角度調整圧と空気風量の関係を示している。

また、外気温度が 30°C の場合に運転可能な領域を色付けして示す。この図より、外気温度が 30°C の場合に運転を成立させるためには、高温／単独運転では 1510.0 t/h、高温／並列運転では 1370.0 t/h 以上の空気風量が必要であることが示された。すなわち、ファンブレード角度調整圧を全台 0.0 bar に設定した条件ではどちらの運転も可能であるということが示された。

#### 5.4. 評価結果のまとめ

本章では、夏季における HTTR の 30 MW 運転が成立するかどうかの評価を行った。その結果、定格／単独・並列運転および高温／単独・並列運転、全ての運転モードに対して出力 30 MW 運転を成立させることができることが評価された。

## 6. 結言

定格熱出力 30 MW の高温工学試験研究炉 (HTTR) では、原子炉で発生した熱を加圧水冷却器、中間熱交換器による熱交換を経て、最終的に加圧水空気冷却器 (ACL) により大気に放散している。従って、ACL の 2 次側の条件となる外気温度は原子炉の除熱に影響を及ぼす運転上重要な因子である。外気温度の経時変化に対しては、冷却材である加圧水及び空気の流量を変化させることにより ACL における冷却材温度を調整して安定な原子炉入口温度制御を可能としている。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 ACL の除熱性能を評価し、原子炉の除熱の観点から最も厳しい条件となる夏季の外気温度における原子炉の除熱について検討した。

はじめに、過去の試験データを用いて ACL の除熱性能を評価した後に、外気温度をパラメータとして高温試験運転の出力 30 MW 運転時の除熱能力を評価した。その結果、夏季の外気温度の条件においても、ファンブレード角度調整圧を 0.0 bar とすることで出力 30 MW 運転を行うことが可能であることを確認した。

## 謝辞

本評価を行うに当たり、藤川 正剛 高温工学試験研究炉開発部長、林 秀行 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、運転データの取得にあたり中澤 利雄 同部次長、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) 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 一試験経過及び結果の概要一」、(2002)
- 3) 西川 兼康 他：「伝熱学」、理工学社、(1982)
- 4) 日本機械学会：「機械工学便覧 A6 熱工学」、丸善、(1985)

Table 1.1 高温工学試験研究炉 (HTTR) の仕様

原子炉熱出力	:	30 MW
燃料	:	UO <sub>2</sub> 被覆粒子
燃料体形式	:	ブロック型
炉心構造材	:	黒鉛
冷却材	:	ヘリウムガス
冷却ループ数	:	1 ループ (加圧水冷却器及び中間熱交換器)

	(定格運転時)	(高温試験運転時)
原子炉入口冷却材温度	: 395 °C	395 °C
原子炉出口冷却材温度	: 850 °C	950 °C

Table 2.1 加圧水冷却設備の設備仕様

ループ数	:	1
熱移送量	:	30 MW
運転圧力	:	約 3.5 MPa
最高使用圧力	:	4.8 MPa
最高使用温度	:	262 °C

Table 2.2 加圧水空気冷却器の設備仕様

型式	:	強制押込通風式フィン付伝熱管型
基数	:	1
交換熱量	:	約 30 MW
最大流量 (加圧水)	:	約 640 t/h
(空気)	:	約 2600 t/h
冷却材温度 (加圧水入口)	:	133～197 °C
(空気入口)	:	-13～40 °C
伝熱管 (外径)	:	25.4 mm
(肉厚)	:	2.9 mm
(本数)	:	504 本
主要材質 (ヘッダー)	:	炭素鋼
(伝熱管)	:	炭素鋼
(フィン)	:	アルミニウム
ファン (型式)	:	軸流ファン (可変ピッチ式)
(台数)	:	6

Table 3.1 プラント計算機によるデータ計測点の一覧

No.	計測点名称	レンジ	PID 番号	TAG No.
1	出力領域中性子束 Ch.1	0 - 120 %	24A003	2411NY012A
2	出力領域中性子束 Ch.2	0 - 120 %	24A004	2411NY012B
3	出力領域中性子束 Ch.3	0 - 120 %	24A005	2411NY012C
4	1 次 PWC 加圧水流量 Ch 1	0 - 800 t/h	13A350	135FD1A
5	1 次 PWC 加圧水流量 Ch 2	0 - 800 t/h	13A351	135FD1B
6	1 次 PWC 加圧水流量 Ch 3	0 - 800 t/h	13A352	135FD1C
7	1 次 PWC 加圧水流量	0 - 800 t/h	13A400	135FD1S12
8	2 次 PWC 加圧水流量 Ch 1	0 - 250 t/h	13A353	135FD2A
9	2 次 PWC 加圧水流量 Ch 2	0 - 250 t/h	13A354	135FD2B
10	2 次 PWC 加圧水流量 Ch 3	0 - 250 t/h	13A355	135FD2C
11	加圧水冷却設備 空気冷却器入口加圧水温度	0 - 300 °C	13A385	135TE3
12	加圧水冷却設備 空気冷却器出口加圧水温度	0 - 300 °C	13A386	135TD4
13	加圧水 温度	0 - 200 °C	13A415	135TD5S2
14	加圧水空気冷却器加圧水流量	0 - 800 t/h	359	135FE3
15	加圧水流量調節弁開度	0 - 100 %	360	135VC1
16	加圧水流量調節バイパス弁開度	0 - 100 %	361	135VC2

Table 3.2 追加設置機器によるデータ計測点の一覧

No.	計測点名称	単位
17	加圧水空気冷却器 ファン A ブレード角度調整圧	bar
18	加圧水空気冷却器 ファン B ブレード角度調整圧	bar
19	加圧水空気冷却器 ファン C ブレード角度調整圧	bar
20	加圧水空気冷却器 ファン D ブレード角度調整圧	bar
21	加圧水空気冷却器 ファン E ブレード角度調整圧	bar
22	加圧水空気冷却器 ファン F ブレード角度調整圧	bar
23	加圧水空気冷却器 ファン A 空気入口温度	℃
24	加圧水空気冷却器 ファン B 空気入口温度	℃
25	加圧水空気冷却器 ファン C 空気入口温度	℃
26	加圧水空気冷却器 ファン D 空気入口温度	℃
27	加圧水空気冷却器 ファン E 空気入口温度	℃
28	加圧水空気冷却器 ファン F 空気入口温度	℃
29	加圧水空気冷却器 ファン A 空気出口温度	℃
30	加圧水空気冷却器 ファン B 空気出口温度	℃
31	加圧水空気冷却器 ファン C 空気出口温度	℃
32	加圧水空気冷却器 ファン D 空気出口温度	℃
33	加圧水空気冷却器 ファン E 空気出口温度	℃
34	加圧水空気冷却器 ファン F 空気出口温度	℃
35	加圧水空気冷却器 ファン A 空気風速	m/s
36	加圧水空気冷却器 ファン B 空気風速	m/s
37	加圧水空気冷却器 ファン C 空気風速	m/s
38	加圧水空気冷却器 ファン D 空気風速	m/s
39	加圧水空気冷却器 ファン E 空気風速	m/s
40	加圧水空気冷却器 ファン F 空気風速	m/s

Table 3.3 試験データおよびファン平均風速、除熱に寄与した空気流量

試験 名	運転 モード	日時	原子炉 出力 (MW)	ファン			加圧水			除熱に 寄与した	
				ブレード 角度調整	平均 風速 (m/s)	平均空氣 温度(°C)	流量 (t/h)	温度 (°C)	損失 熱量 (MW)	空氣流量 (t/h)	
			庄力(bar)	入口	出口	合計	入口	出口			
上試 (1)	定／単	2000/5/16 17:10	8.9	0.51	3.19	23	44603.9	82	49	9.0	1543.3
		2000/5/17 12:45	9.0	0.50	3.19	26	43606.6	97	47	8.4	1840.8
		2000/5/17 13:20	8.8	0.50	4.51	28	44607.0	99	48	8.5	1896.2
		2000/5/17 14:45	8.8	—	4.97	27	40607.2	101	55	8.6	2395.7
		2000/5/17 18:00	8.9	0.50	5.03	25	47605.8	93	53	9.1	1499.3
上試 (2)-1	定／単	2000/7/7 12:00	15.0	0.49	3.42	35	69605.2	96	73	14.5	1561.4
		2000/7/7 17:30	15.0	0.00	4.42	37	61605.1	97	63	14.4	2248.8
上試 (2)-2	定／単	2001/1/30 8:50	8.8	0.75	1.52	2	60603.4	87	54	8.7	569.4
		2001/2/4 15:00	20.1	0.50	4.05	11	50604.8	110	55	19.4	1823.8
	定／並	2001/2/23 10:00	20.0	0.48	3.87	21	66607.9	115	71	20.1	1646.9
上試 (3)	高／単	2001/4/17 10:00	9.2	0.50	3.60	25	46596.0	82	47	9.0	1624.4
		2001/4/22 10:00	15.1	0.00	5.35	21	50596.4	93	48	14.6	1908.6
上試 (4)	高／並	2001/5/2 9:00	20.2	0.00	5.37	24	64597.7	107	61	19.3	1757.8
		2001/5/26 10:00	15.1	0.00	5.05	28	50602.6	90	53	14.5	2379.6
		2001/6/3 10:00	20.2	0.00	6.83	24	61602.7	99	56	19.3	1914.5
	定／単	2001/10/30 10:00	20.2	0.49	5.27	18	70605.7	110	56.9	18.8	1322.4
		2001/12/13 9:30	29.8	—	5.49	5	64610.5	145	43.3	27.7	1700.5
	定／並	2001/12/13 14:20	29.8	0.00	5.13	7	68610.6	145	45.8	27.7	1659.1
		2002/2/1 9:40	20.1	—	1.80	7	87614.6	117	62.9	20.0	915.5
		2002/3/1 14:00	29.8	0.50	2.46	9	91620.4	159	69.2	28.3	1255.6

Table 4.1 第2サイクル運転のデータを用いた ACL の除熱性能の評価（2003年）

日時	原子炉			加圧水					ACL 空気		UA (MW/m <sup>2</sup> )	
	出力 (MW)	温度(℃)		温度(℃)			交換 熱量 (MW)	流量 (t/h)	温度(℃)			
		入口	出口	ACL 入口	ACL 出口	合流 後			入口	出口		
2/14	9.0	180	319	87	59	75	8.9	279.0	1	71	457.3	0.282
2/15	11.9	211	394	91	60	75	11.7	328.0	2	70	620.4	0.327
2/16	15.0	241	471	97	63	76	14.7	372.4	7	71	822.6	0.381
2/17	18.0	272	548	105	59	81	17.5	330.3	3	72	903.9	0.407
2/18	21.0	303	625	115	63	87	20.3	337.6	3	75	1001.1	0.417
2/19	24.0	333	699	126	69	94	23.1	349.0	4	81	1071.6	0.430
2/20	27.0	364	771	137	69	102	25.7	325.1	8	80	1285.2	0.435
2/21	27.9	373	793	140	64	104	26.4	296.2	6	78	1313.4	0.437
2/22	27.8	371	790	137	60	101	26.5	292.0	3	76	1301.0	0.451
2/23	27.8	371	790	137	74	101	26.5	357.0	8	82	1279.4	0.444
2/24	28.0	374	795	139	68	103	26.6	317.7	6	79	1296.3	0.437
2/25	28.0	374	795	140	54	103	26.6	266.7	1	74	1310.7	0.448
2/26	28.0	374	796	139	56	103	26.5	272.9	2	74	1321.4	0.446
2/27	28.0	374	795	140	64	104	26.4	298.8	6	78	1313.8	0.444
2/28	28.0	374	795	139	59	103	26.5	280.8	3	75	1315.6	0.443
3/1	28.0	374	795	140	56	103	26.5	269.0	2	73	1352.8	0.444
3/2	28.0	374	795	140	72	104	26.5	331.5	12	83	1348.9	0.457
3/3	28.0	374	795	140	54	104	26.5	265.5	6	71	1440.7	0.457
3/4	29.6	390	834	147	62	110	27.7	277.9	7	79	1377.2	0.452
3/5	29.8	392	838	148	46	110	27.9	232.2	1	67	1512.1	0.458
3/6	29.8	392	839	148	48	110	27.9	238.5	2	68	1512.2	0.457
3/7	28.1	374	796	140	61	104	26.5	288.2	9	73	1490.4	0.446
3/8	23.6	327	686	124	47	93	22.6	253.7	9	63	1493.7	0.467
3/9	19.1	281	572	107	37	82	18.4	225.9	7	55	1378.3	0.453
3/10	15.2	241	473	96	45	76	14.7	249.0	3	58	954.2	0.372
3/11	15.2	241	473	96	42	76	14.7	235.5	2	54	1031.0	0.359
3/12	15.2	242	473	97	64	76	14.8	402.5	2	73	740.5	0.378
3/13	12.2	211	397	89	61	73	12.0	359.2	4	69	651.7	0.342
3/14	9.2	180	322	85	58	72	9.1	303.2	3	70	486.2	0.304

Table 5.1 評価条件

原子炉 出力(MW)	外気温度 (°C)	運転 モード		加圧水 ACL 入口温度(°C)	冷却空気風量(t/h)	Case No.
30.0	0 - 40	定格	単独	148	1498.3 (実測平均値) 1914.5 (実測最大値) 2178.0 (設計仕様値)	1
			並列	157		2
		高温	単独	148		3
			並列	156		4

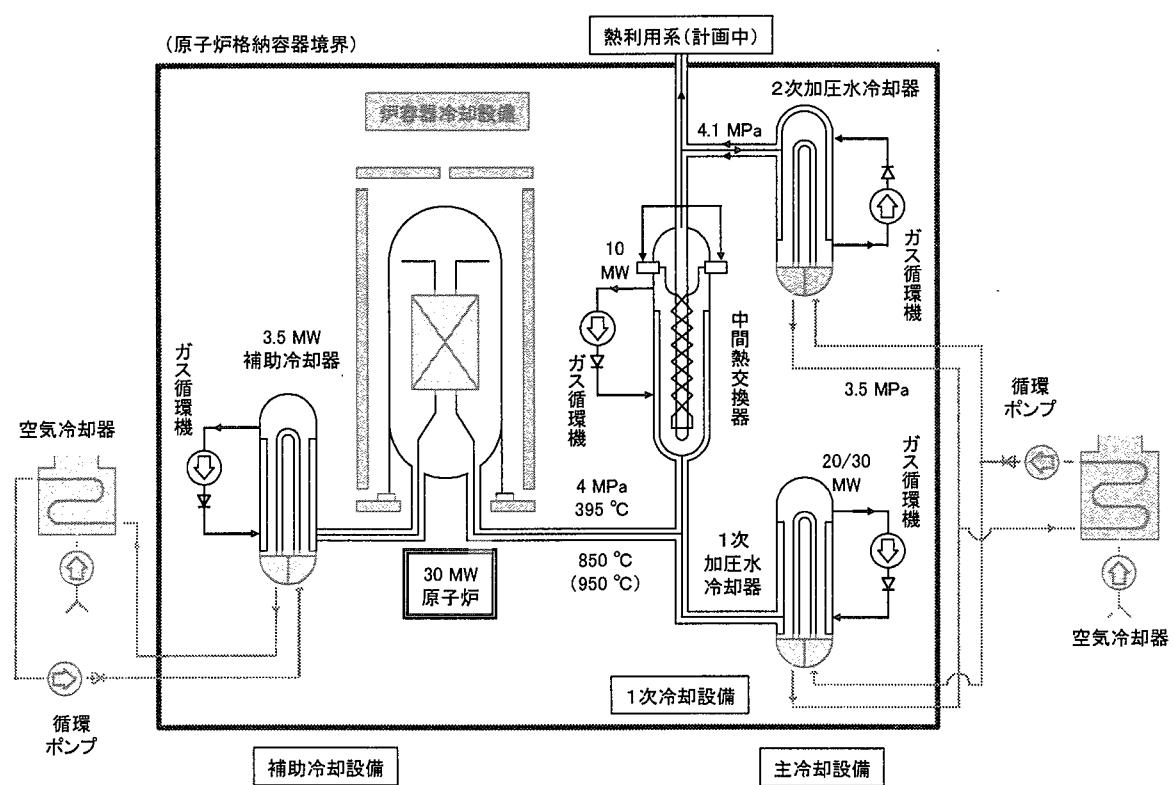


Fig. 1.1 HTTR の冷却系統

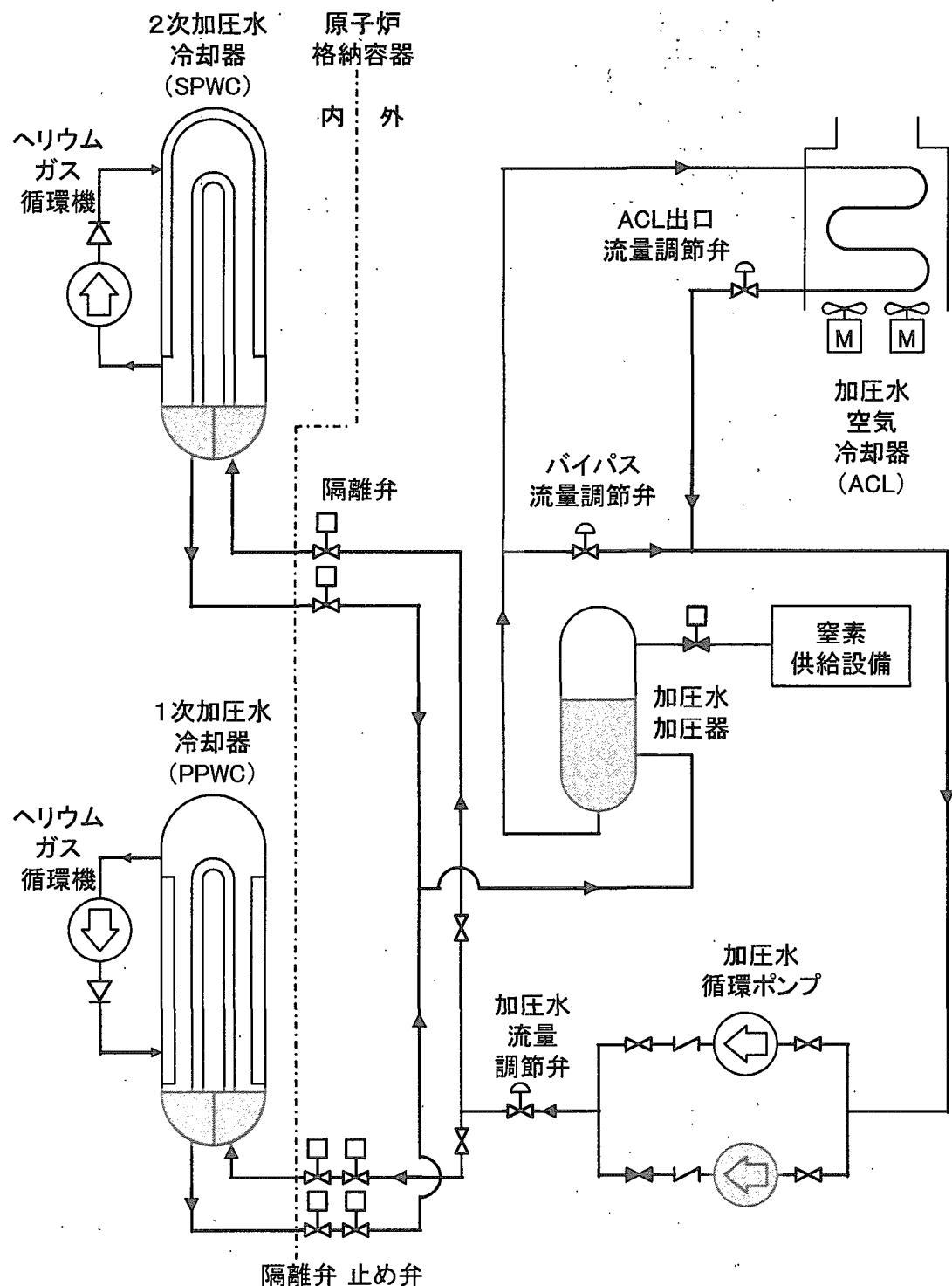


Fig. 2.1 加圧水冷却設備の概要

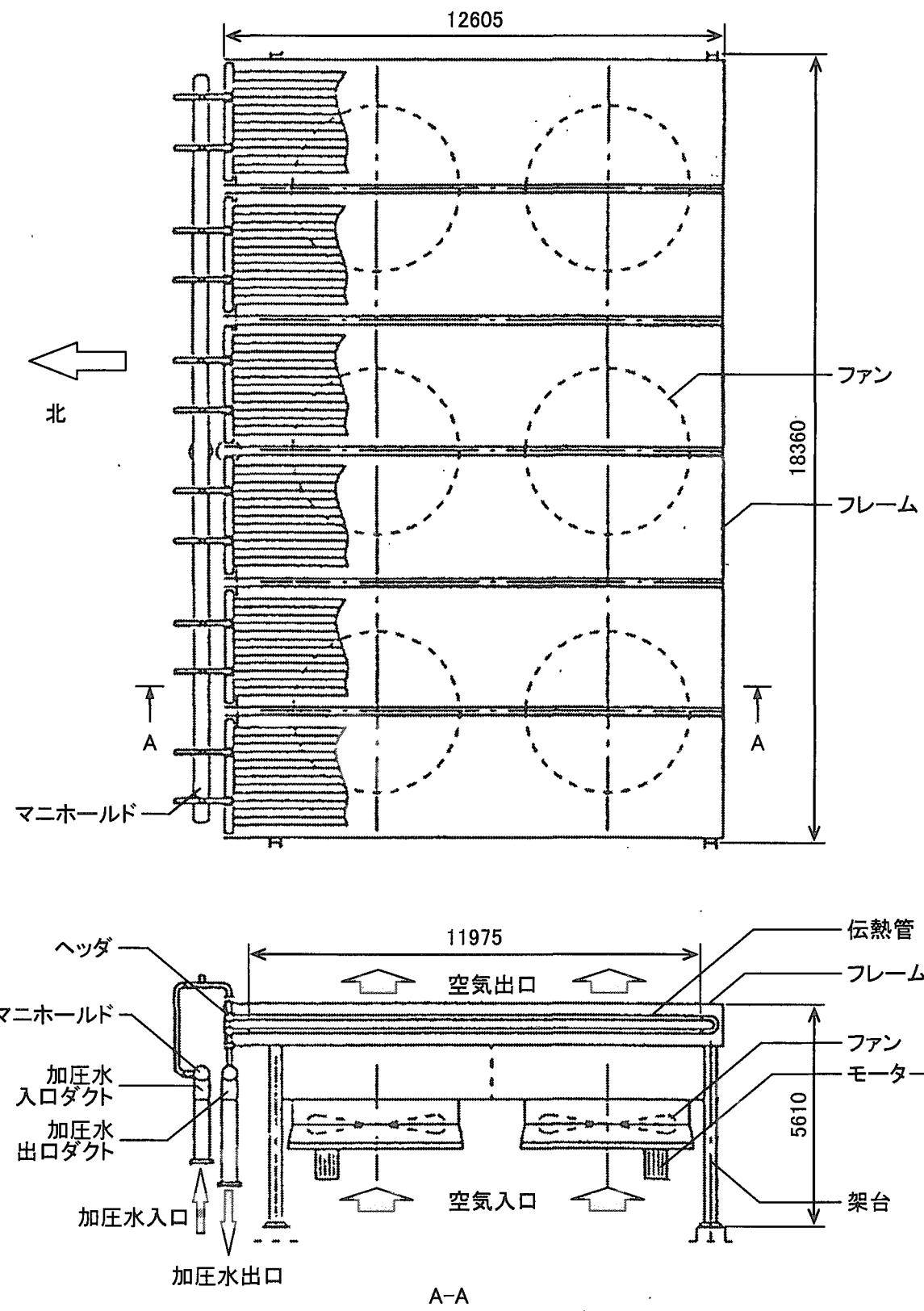


Fig. 2.2 加圧水空気冷却器の概要図

(単位:mm)

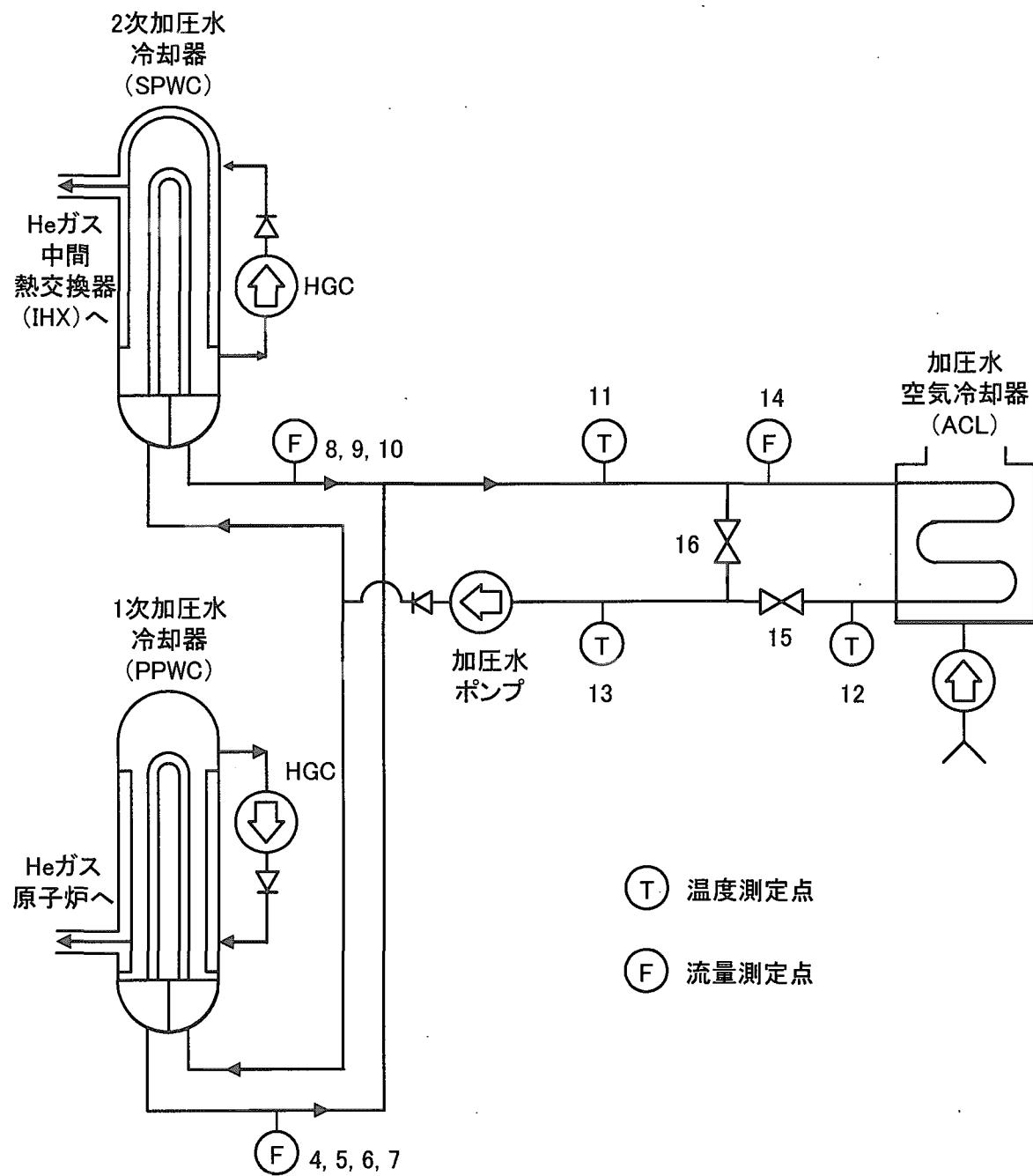


Fig. 3.1 加圧水冷却系統における測定点

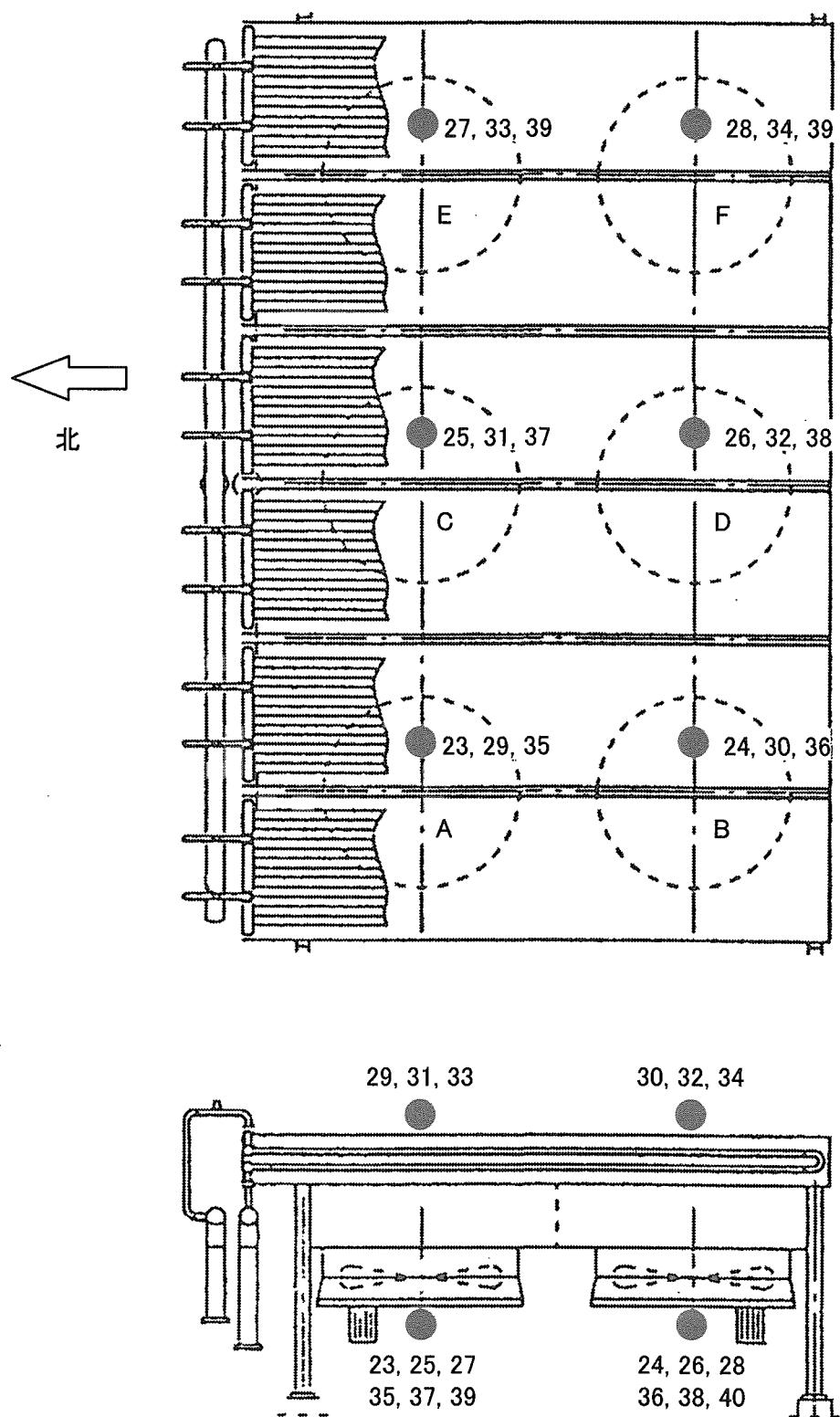


Fig. 3.2 加圧水空気冷却器における測定点

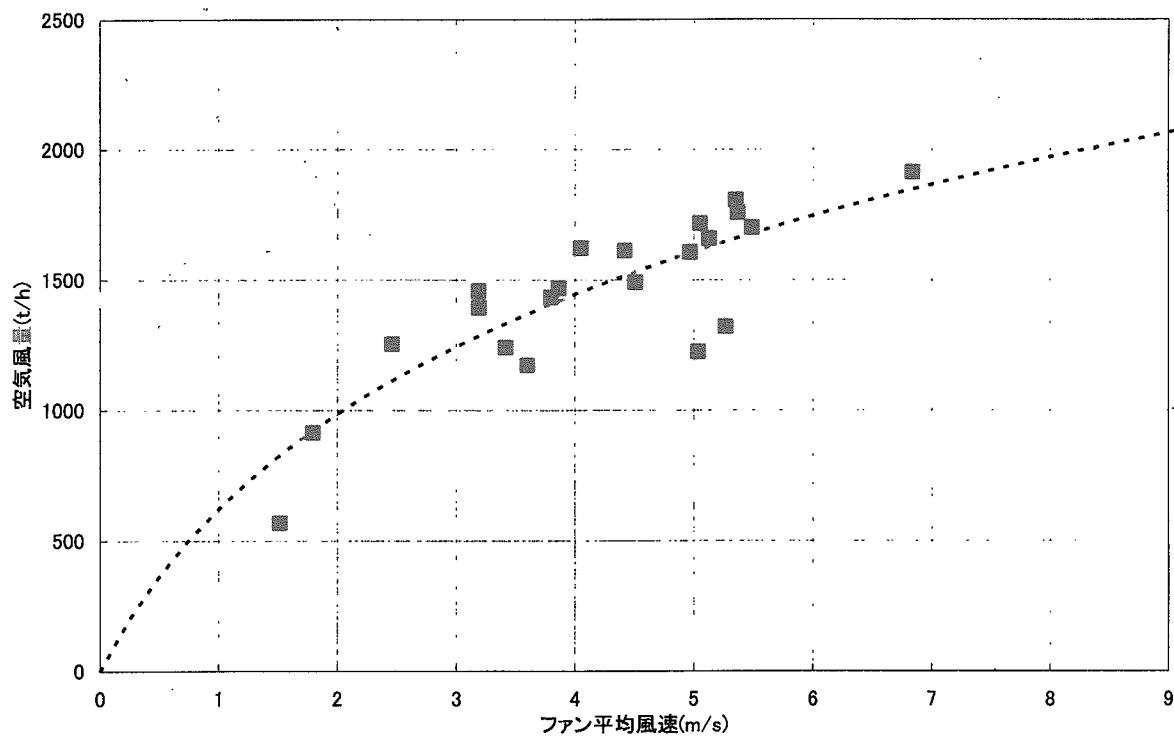


Fig. 3.3 除熱に寄与した冷却空気風量とファン平均風速の関係

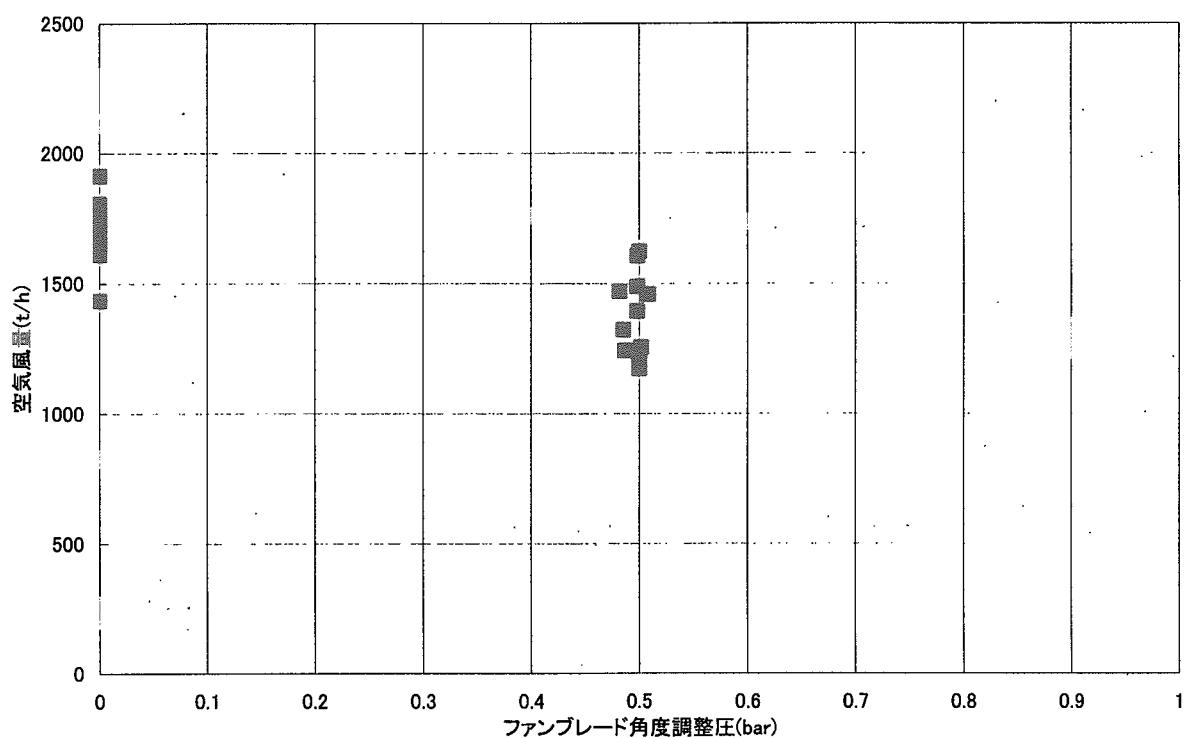


Fig. 3.4 ファンブレード角度調整圧と冷却空気風量の関係

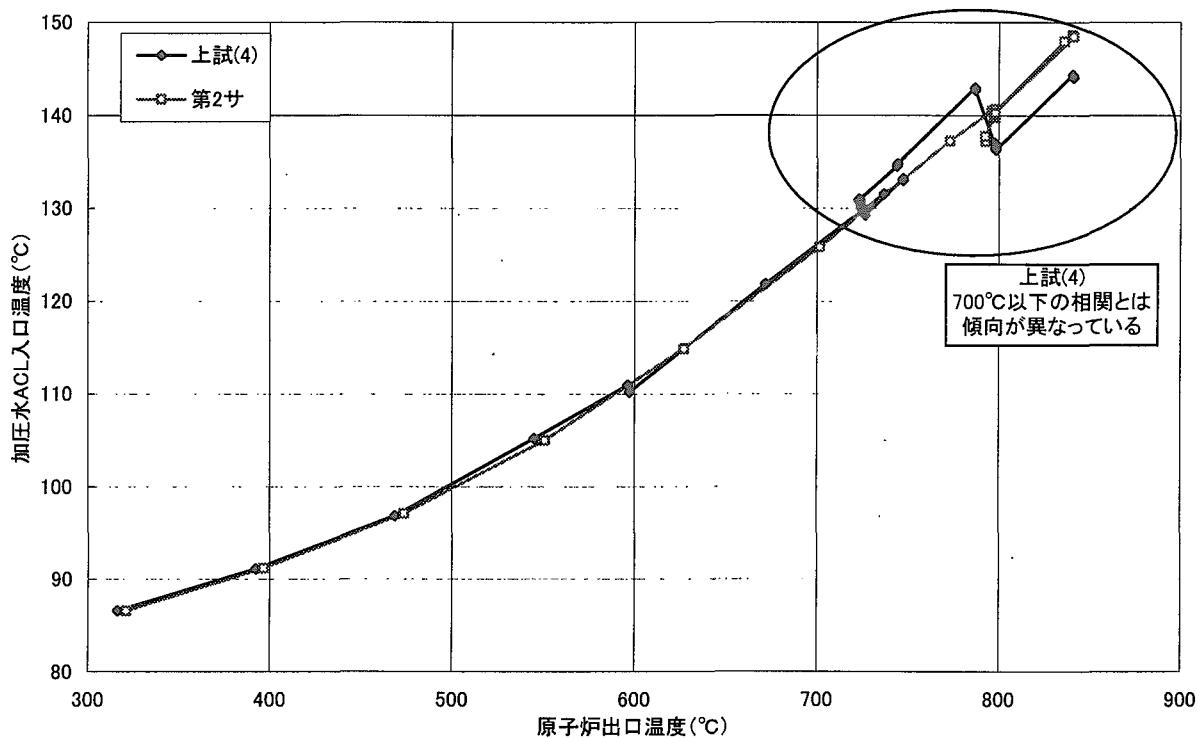


Fig. 4.1 上試(4)と第2サイクルにおける原子炉出口温度と加圧水 ACL 入口温度の関係

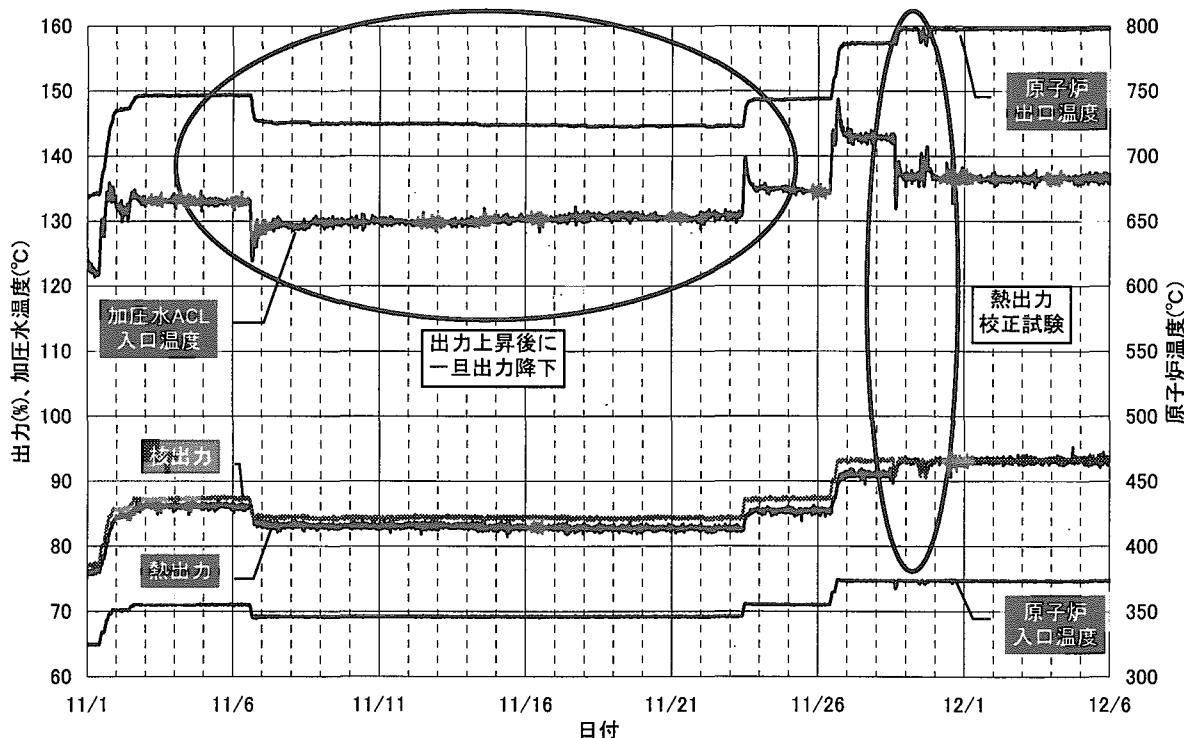


Fig. 4.2 上試(4)における各データの時間変化

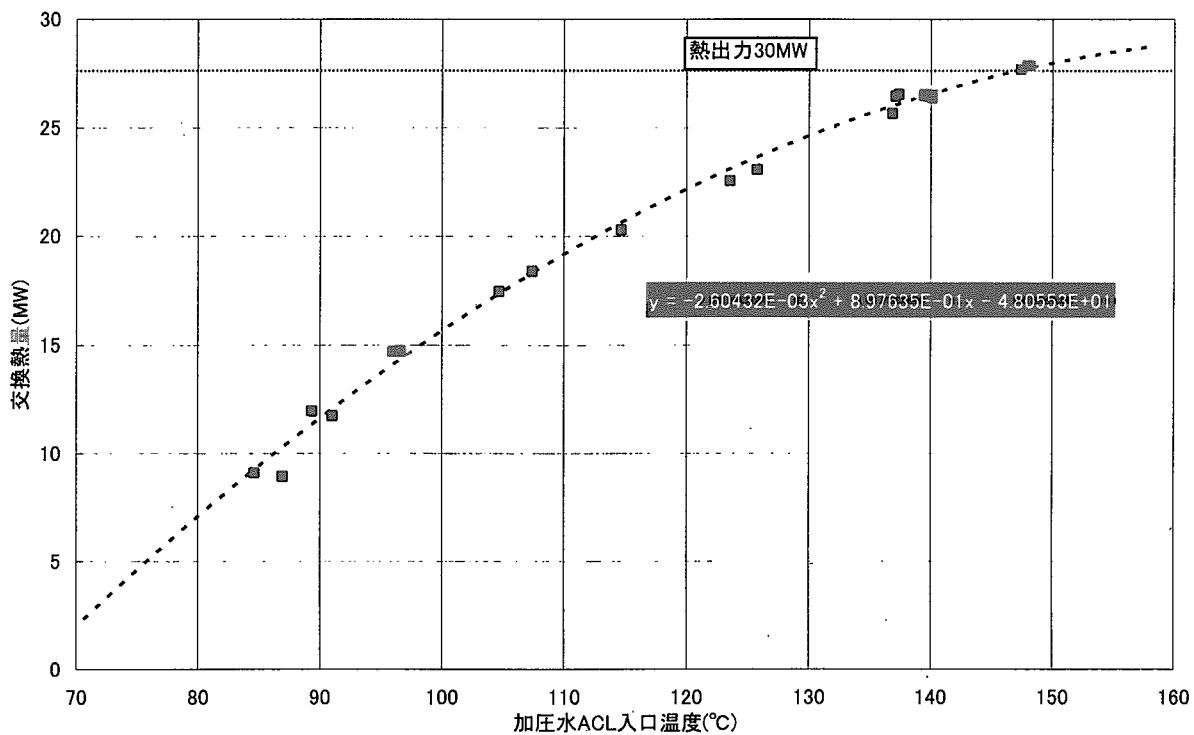


Fig. 4.3 ACL における交換熱量と加圧水 ACL 入口温度の関係

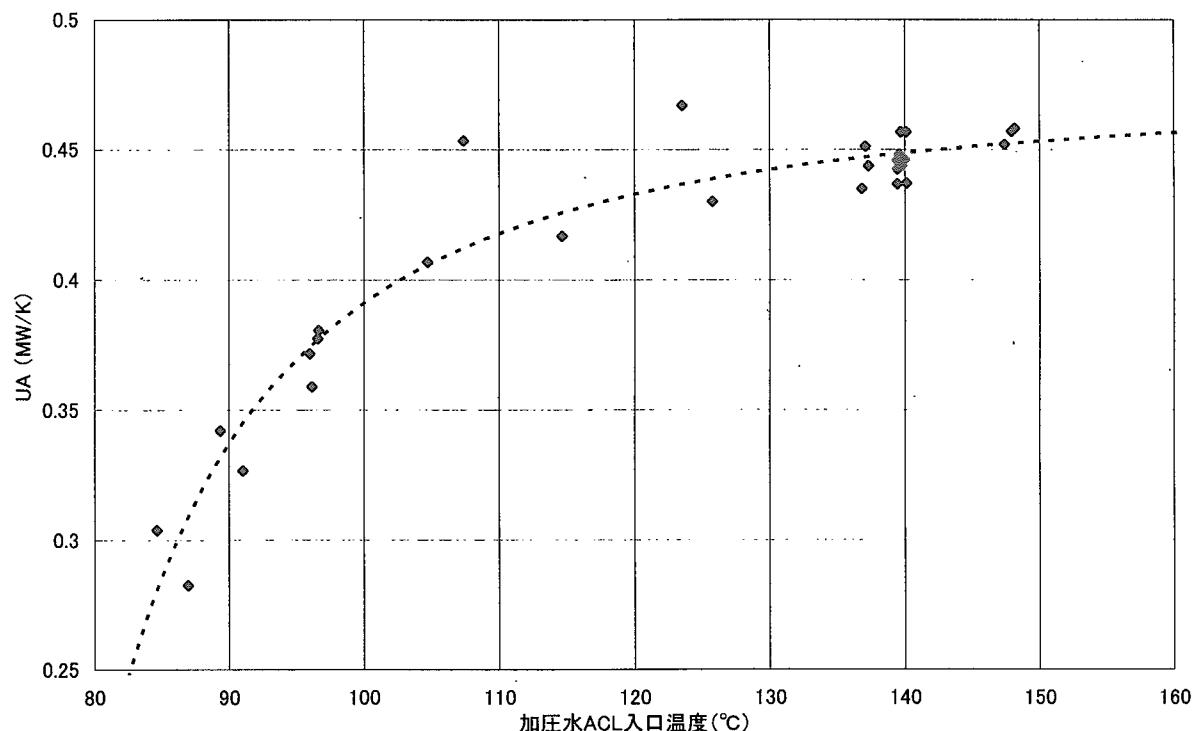


Fig. 4.4 UA と加圧水 ACL 入口温度の関係

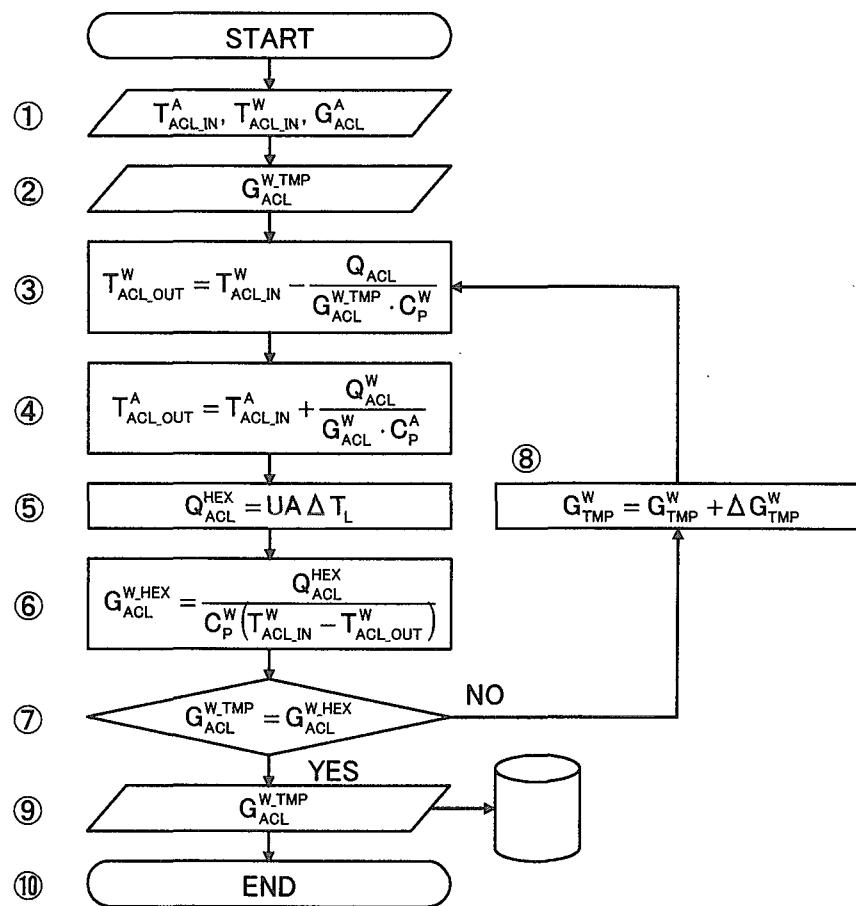


Fig. 5.1 必要加圧水流量の計算フローチャート

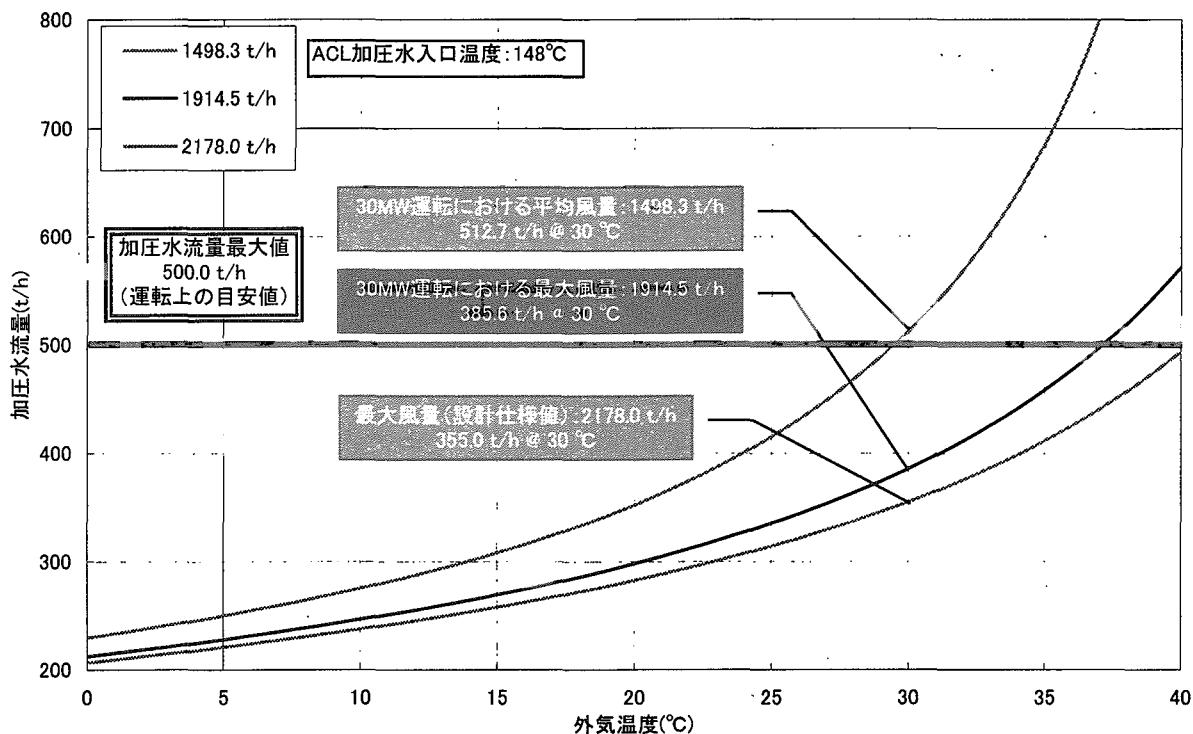


Fig. 5.2 外気温が変化した場合の 30MW 除熱に必要な加圧水流量（定格／単独運転）

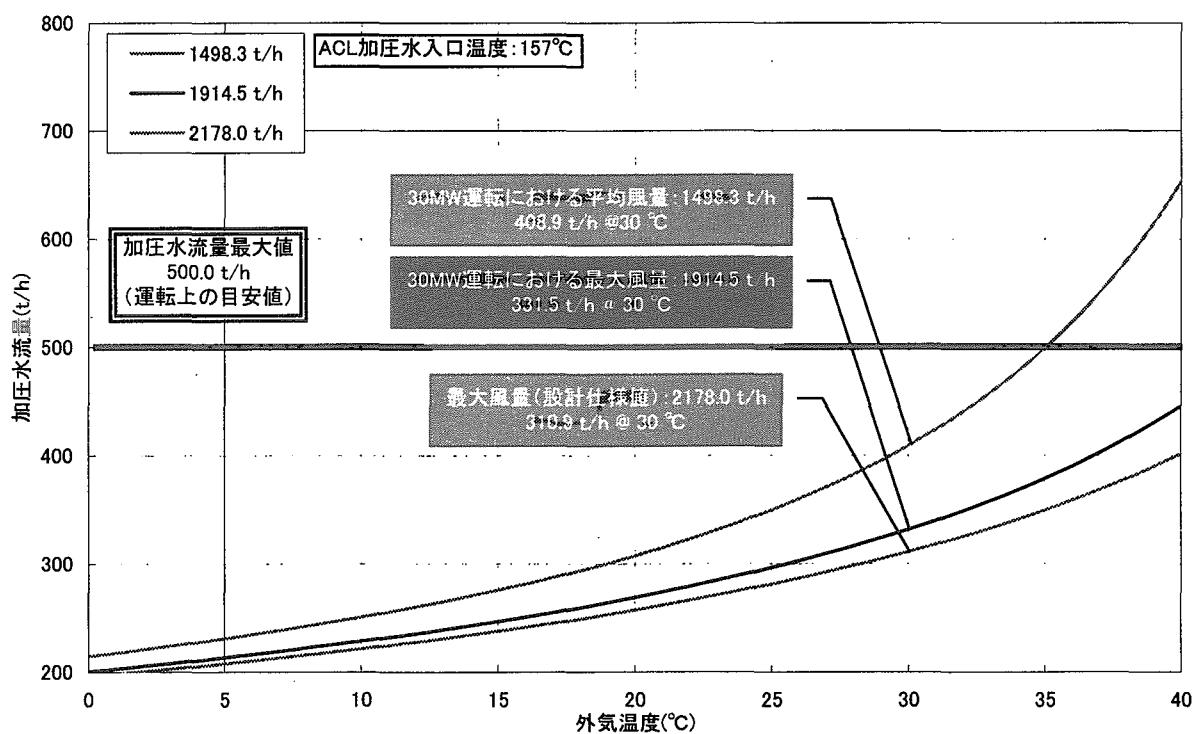


Fig. 5.3 外気温が変化した場合の 30MW 除熱に必要な加圧水流量（定格／並列運転）

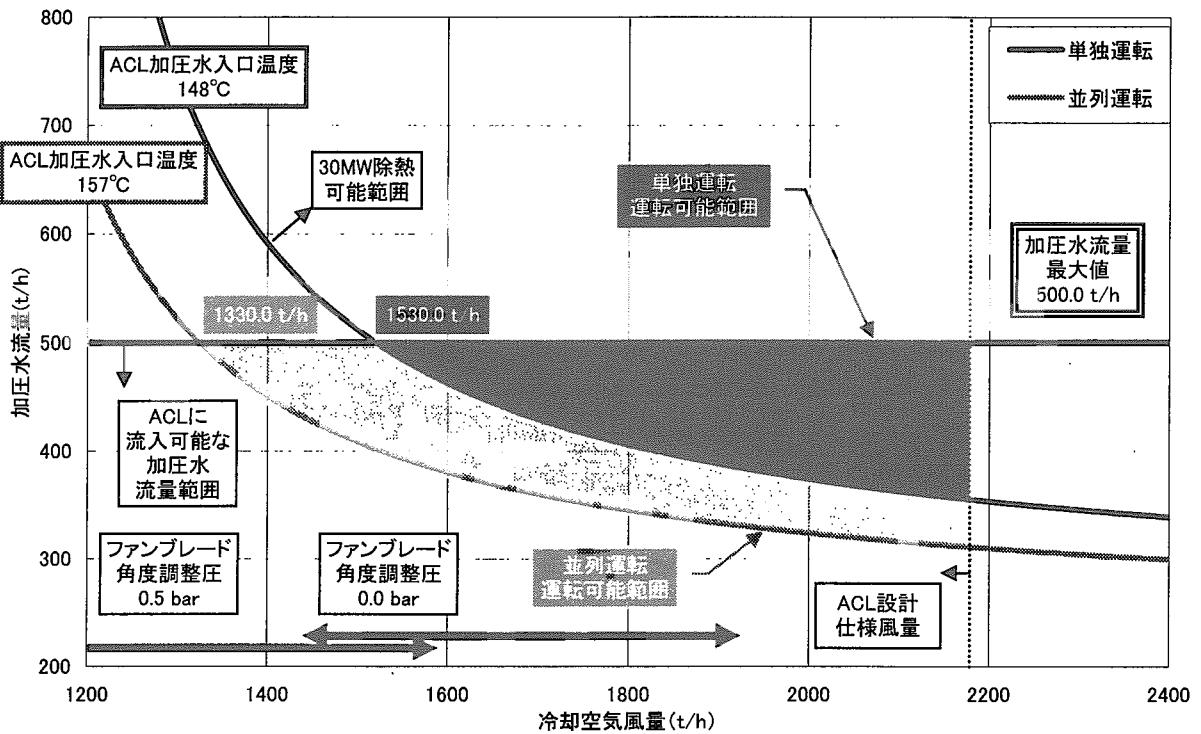


Fig. 5.4 外気温度 30°C の場合の定格運転可能範囲の評価結果

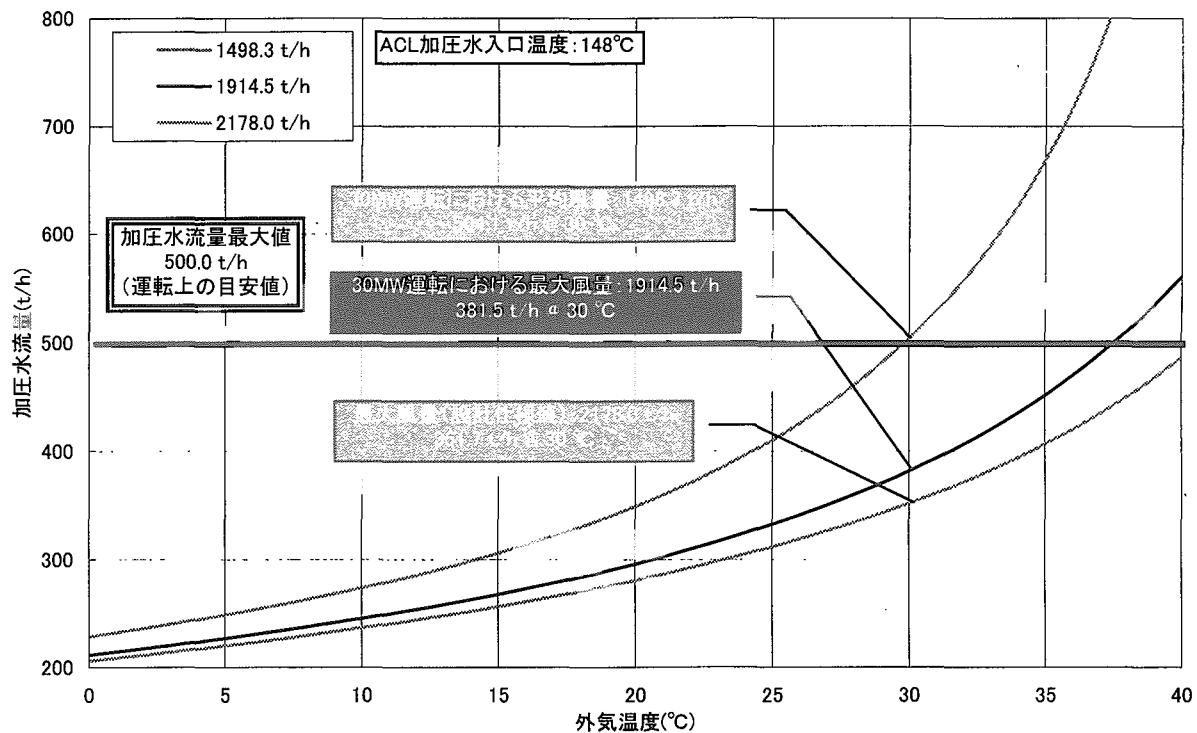


Fig. 5.5 外気温が変化した場合の 30MW 除熱に必要な加圧水流量（高温／単独運転）

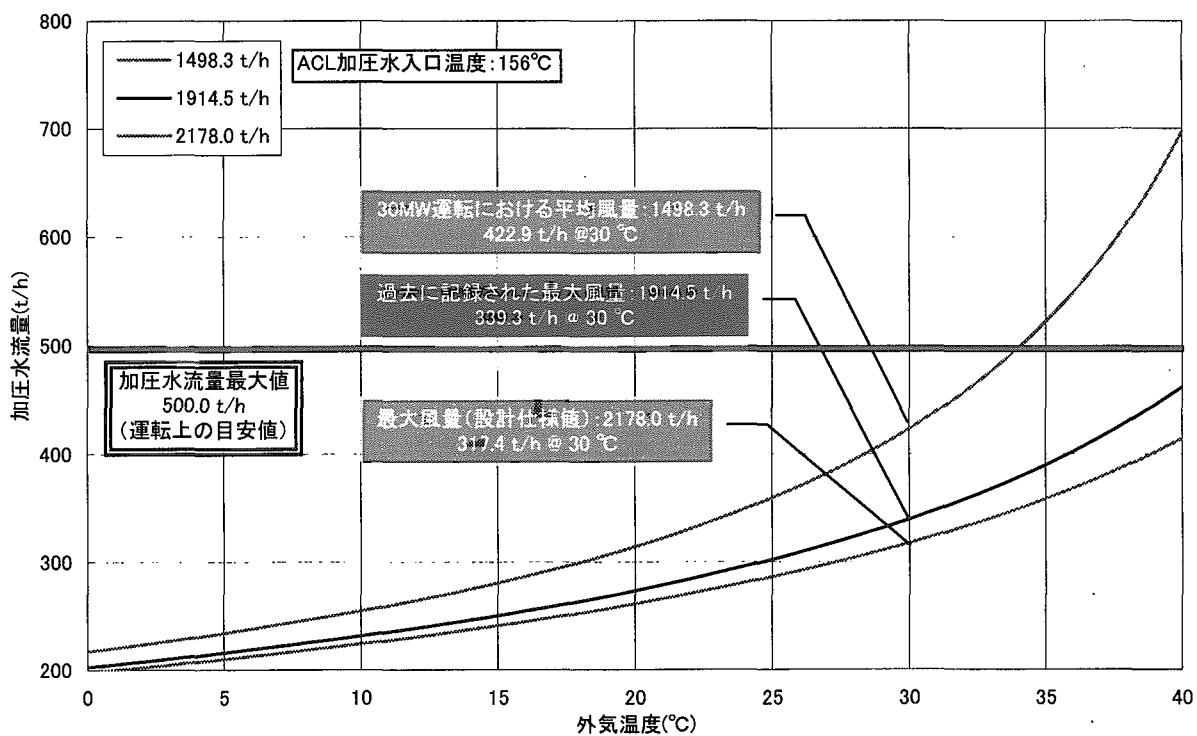


Fig. 5.6 外気温が変化した場合の 30MW 除熱に必要な加圧水流量（高温／並列運転）

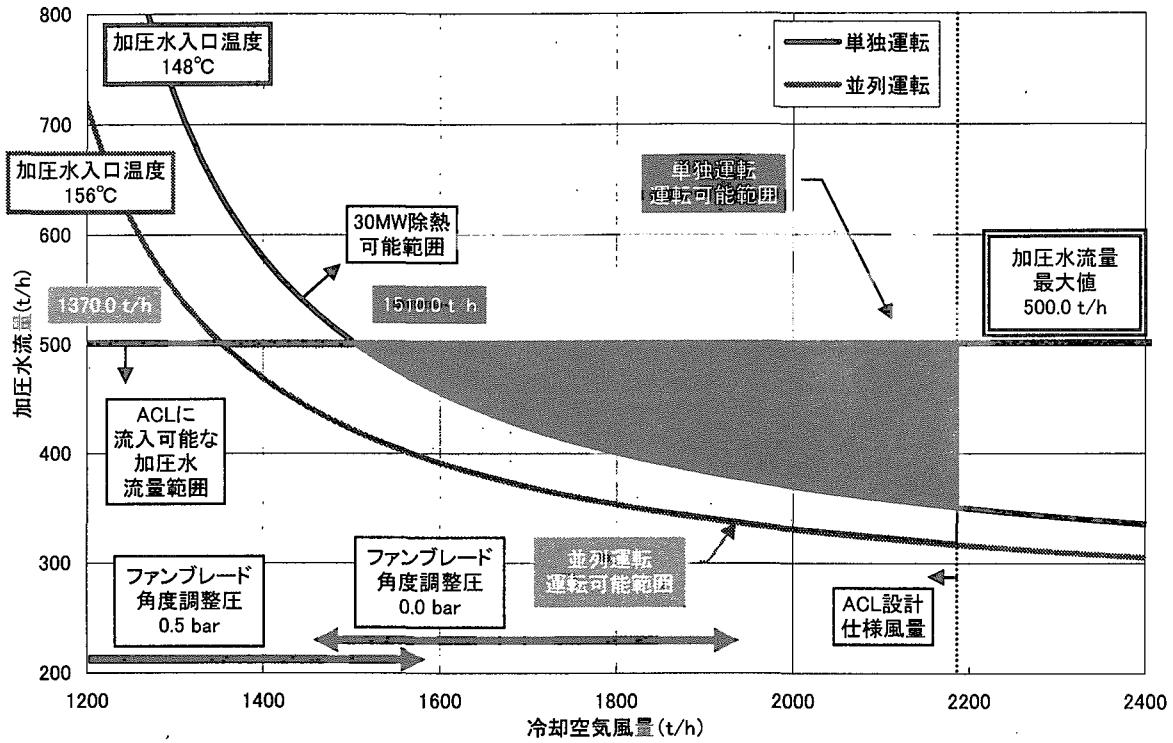


Fig. 5.7 外気温度 30°Cの場合の高温試験運転可能範囲の評価結果

## 付録 A ACL の熱交換性能評価に用いた運転データ

This is a blank page.



付録 B 高温試験運転時における加圧水 ACL 入口温度の推算

This is a blank page.

本付録では、過去のデータより評価した1次加圧水冷却器（以下、PPWCと表記する）の性能を用いて高温試験運転・単独／並列運転の出力30MW運転時の加圧水PPWC出口温度、すなわちACL加圧水入口温度の推算を行った。なお、本評価では単独運転・並列運転に対して評価を行っており、2次加圧水冷却器（以下、SPWCと表記する）を用いた運転のデータも採用しているが、両冷却器の加圧水出口温度はほぼ等しいためここではPPWCを対象とした。

### B.1. 1次加圧水冷却器(PPWC)の概要

PPWCの構造図をFig. B.1、PPWCの設備仕様をTable B.1に示す。PPWCはたて置逆U字管型であり、胴部は二重胴構造になっている。胴下部の二重ノズルの内側から流入した1次冷却材であるヘリウムは、管外をバッフル板により流れを反転して上昇しながら管内の加圧水により冷却されて、胴上部の1次冷却材出口ノズルより1次ヘリウム循環機に導かれる。1次ヘリウム循環機で昇圧された1次冷却材は、1次冷却材入口ノズルにより内胴と外胴の間の環状部に流入して胴部を冷却しながら下降し、二重ノズルの環状部を経て原子炉圧力容器に還流する。加圧水は下鏡の加圧水ノズルより流入し、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。

### B.2. 運転データの計測

Table B.2は、PPWCの性能評価を行うのに用いたデータ点を示している。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、Fig. B.2にはこれらの測定点の設置箇所を示している。図中の数字はTable B.2に記されたNo.に対応したものである。

### B.3. PPWCの熱交換性能評価

#### B.3.1. 出力上昇試験(3)の結果を用いた評価

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の熱交換性能を評価することとした。Table B.3には評価に用いた試験データの日時を示す。試験データは高温試験運転モードで原子炉出力20WMまで上昇させたである出力上昇試験(3)の結果を用いることとした。

はじめに、PPWC出口におけるHe混合平均温度を算出することとした。これは、PPWCに設置されているHe循環機3台のそれぞれの出口におけるHe温度が異なることによるものである。PPWC出口におけるHe混合平均温度 $T_{BULK}$ の算出には以下の式を用いた。

$$T_{BULK} = \frac{T_{OUT}^{HGC(A)} \cdot G^{HGC(A)} + T_{OUT}^{HGC(B)} \cdot G^{HGC(B)} + T_{OUT}^{HGC(C)} \cdot G^{HGC(C)}}{G^{HGC(A)} + G^{HGC(B)} + G^{HGC(C)}} \quad \dots \dots \dots \quad (B.1)$$

$T_{BULK}$ : He PPWC出口混合平均温度 (°C)       $G^{HGC(\alpha)}$ :  $\alpha$ 号機におけるHe流量 (kg/s)

$T_{OUT}^{HGC(\alpha)}$ :  $\alpha$ 号機におけるHe出口温度 (°C)

出力上昇試験(3)時に循環機出口温度が得られているのはB号機のみである。そこでA、C号機に対する出口温度は、それぞれの入口温度にB号機の出入口温度差を加えた値を採用することとし

た。これらの評価結果を Table B.4、Table B.5 に示す。Table B.4 は単独運転に対する結果であり、Table B.5 は並列運転に対する結果である。

次に PPWC の熱交換性能の評価を行うこととした。一般的に熱交換器における交換熱量（除熱量）を評価するには以下の式が用いられる。

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

ここで、対数平均温度差は以下の式で与えられる。

$T_{PPWC\_IN}^{\text{He}}$ : He PPWC 入口温度 (°C)       $T_{PPWC\_IN}^W$ : 加压水 PPWC 入口温度 (°C)  
 $T_{PPWC\_OUT}^{\text{He}}$ : He PPWC 出口温度 (°C)       $T_{PPWC\_OUT}^W$ : 加压水 PPWC 出口温度 (°C)

Eq. (B.2)中の(熱通過率)×(伝熱面積)（以下、UAと表記する）は熱交換器の性能を表わすものであり、PPWCに対してこの値の評価を行って熱交換性能を評価することとした。PPWCでの交換熱量は以下の式で評価した。

$Q_{PPWC}^W$  : PPWC 交換熱量 (W)       $C_p^W$  : 加圧水の比熱 (J/kg·K)  
 $G_{PPWC}^W$  : 加圧水 PPWC 流量 (kg/s)       $T_{ave}^W$  : 加圧水 PPWC 平均温度 (°C)

このようにして得られた UA の評価結果を Table B.6、Table B.7 に示す。また、Fig. B.3、Fig. B.4 は UA と He PPWC 出口温度との相関を示したものである。Fig. B.3 は単独運転に対する相関であり、Fig. B.4 は並列運転に対する相関である。横軸は原子炉入口温度を示しており、縦軸は UA を

示している。また、図中のプロット点は評価結果を示している。これらの図より、最小二乗法により近似式を求め、以下の式を得ることができた。

$$UA = \begin{cases} -1.08216 \times 10^{-5} \cdot T_{BULK}^2 + 3.66718 \times 10^{-2} \cdot T_{BULK} + 44.4899 & (\text{単独運転}) \\ 2.89960 \times 10^{-6} \cdot T_{BULK}^2 + 2.05406 \times 10^{-2} \cdot T_{BULK} + 30.7466 & (\text{並列運転}) \end{cases} \quad \dots \dots \dots \quad (B.9)$$

UA: PPWC の(熱通過率)×(伝熱面積) (kW/K) T<sub>BULK</sub>: He PPWC 出口温度 (°C)

Fig. B.5、Fig. B.6 は PPWC における交換熱量と He PPWC 出入口温度差の関係を示している。Fig. B.5 は単独運転に対する結果であり、Fig. B.6 は並列運転に対する結果である。横軸は原子炉出力を示しており、縦軸は加圧水が PPWC で得た熱量を示している。図中のプロット点は評価結果を示している。この結果から、以下の近似式を得ることができた。

$$\Delta T^{\text{He}} = T_{\text{PPWC\_IN}}^{\text{He}} - T_{\text{PPWC\_OUT}}^{\text{He}}$$

$Q_{PPWC}^W$ : PPWC での交換熱量(MW)       $\Delta T^{He}$ : He PPWC 出入口温度差(MW)

#### B.4. 加圧水 PPWC 出口温度（加圧水 ACL 入口温度）の評価

次に、先の節で評価した PPWC の熱交換性能を用いて高温試験運転の 30 MW 運転時の加圧水 ACL 入口温度を評価することとした。Fig. B.7 は 30 MW 運転で除熱を行うのに必要な加圧水 ACL 入口温度を算出するプログラムのフローチャートを示している。手順は以下のとおりである。

- ① He PPWC 入口温度  $T_{PPWC\_IN}^{He}$ 、He PPWC 出口温度  $T_{PPWC\_OUT}^{He}$ 、PPWC 加压水流量  $G_{PPWC}^W$ 、原子炉出力  $Q_{REA}$  を入力する。
  - ② 適当な加压水 PPWC 出口温度  $T_{PPWC\_OUT}^{W\_TMP}$  を入力する。
  - ③ 以下の式より加压水 PPWC 入口温度  $T_{PPWC\_IN}^W$  を算出する。

$$T_{PPWC\_IN}^W = T_{PPWC\_OUT}^W - \frac{Q_{PPWC}^W}{G_{PPWC}^W C_p^W} \quad \dots \dots \dots \quad (B.11)$$

$$Q_{PPWC}^W : PPWC \text{ で加圧水が得た熱量 (W)} \quad T_{PPWC\_IN}^W : \text{ 加圧水 PPWC 入口温度 (°C)}$$

$$C_p^W : \text{ 加圧水の定圧比熱 (J / kg · K)} \quad T_{PPWC\_OUT}^{W\_TMP} : \text{ 加圧水 PPWC 出口温度 (暫定値) (°C)}$$

ここで、PPWCにおいて加圧水が得た熱量  $Q_{\text{PPWC}}^{\text{W}}$  は Eq. (B.10)より以下のように与えられる。

$$Q_{PPWC}^W = \begin{cases} 0.0519632 \cdot \Delta T^{He} + 0.102816 & (\text{単独運転}) \\ 0.0350708 \cdot \Delta T^{He} + 0.0452686 & (\text{並列運転}) \end{cases} \quad (\text{B.12})$$

$$\Delta T^{He} = T_{PPWC\_IN}^{He} - T_{PPWC\_OUT}^{He}$$

$Q_{PPWC}^W$ : PPWC における交換熱量 (MW)       $\Delta T^{He}$ : He PPWC 出入口温度差 (°C)

④ 以下の式を用いて PPWC の除熱能力を算出する。

$$Q_{PPWC}^{HEX} = UA\Delta T_L \quad (\text{B.13})$$

$$\Delta T_L = \frac{T_2 - T_1}{\ln(T_2 / T_1)} \quad (\text{B.14})$$

$$T_1 = T_{PPWC\_IN}^{He} - T_{PPWC\_OUT}^{W\_TMP} \quad (\text{B.15})$$

$$T_2 = T_{PPWC\_OUT}^{He} - T_{PPWC\_IN}^W \quad (\text{B.16})$$

$$UA = \begin{cases} -1.08216 \times 10^{-5} \cdot T_{BULK}^2 + 3.66718 \times 10^{-2} \cdot T_{BULK} + 44.4899 & (\text{単独運転}) \\ 2.89960 \times 10^{-6} \cdot T_{BULK}^2 + 2.05406 \times 10^{-2} \cdot T_{BULK} + 30.7466 & (\text{並列運転}) \end{cases} \quad (\text{B.17})$$

$T_{BULK}$ : He PPWC 出口温度 (°C)      UA: PPWC の(熱通過率)×(伝熱面積) (kW / K)  
 $Q_{PPWC}^{HEX}$ : 交換熱量 (除熱量) (W)       $\Delta T_L$ : 対数平均温度差 (°C)

⑤ ⑥で求めた  $Q_{PPWC}^{HEX}$  を用いて、加圧水 PPWC 出口温度  $T_{PPWC\_OUT}^{W\_HEX}$  を算出する。

$$T_{PPWC\_OUT}^{W\_HEX} = T_{PPWC\_IN}^W + \frac{Q_{PPWC}^{HEX}}{G_{PPWC}^W C_p^W} \quad (\text{B.18})$$

⑥ ②で与えた  $T_{PPWC\_OUT}^{W\_TMP}$  と⑥で算出した  $T_{PPWC\_OUT}^{W\_HEX}$  を比較する。②で与えて③で計算した  $T_{PPWC\_OUT}^{W\_TMP}$  は PPWC で  $Q_{PPWC}^W$  を受け取った際の加圧水 PPWC 出口温度を示している。一方、⑤で算出した  $T_{PPWC\_OUT}^{W\_HEX}$  は PPWC で  $Q_{PPWC}^{HEX}$  が交換された際の加圧水 PPWC 出口温度を示している。これら両者は同じ温度とならなければならない。

⑦  $T_{PPWC\_OUT}^{W\_TMP} \neq T_{PPWC\_OUT}^{W\_HEX}$  の場合には  $T_{PPWC\_OUT}^{W\_TMP} = T_{PPWC\_OUT}^{W\_TMP} + \Delta T_{PPWC\_OUT}^{W\_TMP}$  として③から再計算する。

⑧  $T_{PPWC\_OUT}^{W\_TMP} = T_{PPWC\_OUT}^{W\_HEX}$  の場合には  $T_{PPWC\_OUT}^{W\_TMP}$  を  $T_{PPWC\_OUT}^W$  として出力する。

⑨ 終了

高温試験運転の 30 MW 運転時における加圧水 PPWC 出口温度を評価するにあたって設定した条件ならびに評価結果を Table B.8 に示す。ここで、加圧水 PPWC 流量は過去の実績の平均値を用いることとした。

その結果、洗浄前については高温／単独運転時の加圧水 PPWC 出口温度は 148 °C、高温／並列運転時の加圧水 PPWC 出口温度は 156 °C と推算された。

Table B.1 PPWC の設備仕様

形式	:	たて置U字管型
基数	:	1
胴部外径	:	約 2.1 m
全高	:	約 7.1 m
伝熱管寸法 (外径)	:	約 25.4 mm
(厚さ)	:	約 2.6 mm
材料 (外胴及び内胴)	:	低合金鋼
(伝熱管)	:	オーステナイト系ステンレス鋼
(管板)	:	低合金鋼
最高使用圧力 (外胴)	:	48 kg/cm <sup>2</sup> G
(伝熱管)	:	48 kg/cm <sup>2</sup> G
最高使用温度 (外胴)	:	430 °C
(伝熱管)	:	380 °C
除熱容量 (単独運転時)	:	約 30 MW
(並列運転時)	:	約 20 MW
1 次冷却材流量 (単独運転時)	(定格運転時)	(高温試験運転時)
(並列運転時)	:	約 45 t/h 約 37 t/h
1 次冷却材温度 (入口温度)	:	約 850 °C 約 950 °C
(出口温度)	:	約 395 °C 約 395 °C
加圧水流量 (単独運転時)	:	約 640 t/h 約 630 t/h
(並列運転時)	:	約 420 t/h 約 420 t/h
加圧水温度 (入口温度)	:	約 135 °C 約 135 °C
(出口温度)	:	約 175 °C 約 175 °C

Table B.2 プラント計算機によるデータ計測点の一覧

No.	計測点名称	レンジ	PID 番号	TAG No.
1	原子炉出力領域中性子束 Ch. 1 原子炉出力領域中性子束 Ch. 2 原子炉出力領域中性子束 Ch. 3 入口温度 出口冷却材(D) ワイドレンジ温度	0 - 120.0 %	24A003	2411NY012A
2		0 - 120.0 %	24A004	2411NY012B
3		0 - 120.0 %	24A005	2411NY012C
4		150 - 450 °C	13A414	133TD4S2
5		0 - 1200 °C	13A131	133TT1D
6	加圧水流量	0 - 800 t/h	13A400	135FD1S12
7	加圧水入口温度 Ch. 1	50 - 170 °C	13A370	135TD6A
8	加圧水入口温度 Ch. 2	50 - 170 °C	13A371	135TD6B
9	加圧水入口温度 Ch. 3	50 - 170 °C	13A372	135TD6C
10	加圧水出口(A) 温度	90 - 210 °C	13A376	135TE1A
11	加圧水出口(B) 温度	90 - 210 °C	13A377	135TE1B
12	加圧水出口(C) 温度	90 - 210 °C	13A378	135TE1C
13	PPWC HGC(A) 回転数 He 流量(A)	0 - 15000 rpm	13A240	133SD1AA1
14		0 - 17.00 t/h	13A403	133FD1A2
15		0 - 500 °C	13A151	133TE2A
16	HGC(B) 回転数 He 流量(B) 入口温度 He 温度 Ch. 1 He 温度 Ch. 2 He 温度 Ch. 3	0 - 15000 rpm	13A241	133SD1BA1
17		0 - 17.00 t/h	13A404	133FD1B2
18		0 - 500 °C	13A152	133TE2B
19		0 - 500 °C	13A154	133TD3BA
20		0 - 500 °C	13A155	133TD3BB
21		0 - 500 °C	13A156	133TD3BC
22	HGC(C) 回転数 He 流量(C)	0 - 15000 rpm	13A242	133SD1CA1
23		0 - 17.00 t/h	13A405	133FD1C2
24		0 - 500 °C	13A153	133TE2C
25	IHX HGC 回転数 出口 He 流量 HGC 入口温度 出口 1 次冷却材温度 Ch. 1 出口 1 次冷却材温度 Ch. 2 出口 1 次冷却材温度 Ch. 3	0 - 15000 rpm	13A243	133SD2A1
26		0 - 17.00 t/h	13A401	133FD2S2
27		0 - 500 °C	13A161	133TE5
28		0 - 500 °C	13A166	133TD6A
29		0 - 500 °C	13A167	133TD6B
30		0 - 500 °C	13A168	133TD6C

Table B.3 評価に用いた試験データ (時刻は全て 7:00 ~ 8:00 である)

試験名	運転モード	Case No.	日付	試験名	運転モード	Case No.	日付
出力上昇試験 (3)	高温 ／ 単独	S-1	2001/4/16	出力上昇試験 (3)	高温 ／ 並列	P-1	2001/5/13
		S-2	2001/4/17			P-2	2001/5/14
		S-3	2001/4/18			P-3	2001/5/15
		S-4	2001/4/19			P-4	2001/5/24
		S-5	2001/4/20			P-5	2001/5/25
		S-6	2001/4/21			P-6	2001/5/26
		S-7	2001/4/22			P-7	2001/5/27
		S-8	2001/4/23			P-8	2001/5/28
		S-9	2001/4/24			P-9	2001/5/29
		S-10	2001/4/25			P-10	2001/5/30
		S-11	2001/4/26			P-11	2001/5/31
		S-12	2001/4/27			P-12	2001/6/1
		S-13	2001/4/28			P-13	2001/6/2
		S-14	2001/4/29			P-14	2001/6/3
		S-15	2001/4/30			P-15	2001/6/4
		S-16	2001/5/1			P-16	2001/6/5
		S-17	2001/5/2			P-17	2001/6/6
		S-18	2001/5/3			P-18	2001/6/7
						P-19	2001/6/8

Table B.4 PPWC 出口における He 混合平均温度の算出（高温／単独運転）

Case No.	HGC(A)			HGC(B)			HGC(C)			混合 平均 温度 (°C)	
	流量 (t/h)	温度(°C)		流量 (t/h)	温度(°C)		温度 差 (°C)	流量 (t/h)	温度(°C)		
		入口	出口		入口	出口			入口	出口	
S-1	12.3	183	185	12.3	180	182	2	12.3	181	183	183
S-2	12.3	181	183	12.3	178	180	2	12.3	178	180	181
S-3	12.3	181	183	12.3	178	180	2	12.3	178	180	181
S-4	12.3	211	214	12.3	208	210	2	12.3	209	211	212
S-5	12.3	243	245	12.3	238	241	3	12.3	239	242	243
S-6	12.3	242	245	12.3	238	241	3	12.3	239	242	243
S-7	12.3	243	245	12.3	238	241	3	12.3	239	242	243
S-8	12.3	243	246	12.3	238	241	3	12.3	239	242	243
S-9	12.3	274	277	12.3	269	272	3	12.3	269	272	274
S-10	12.3	295	297	12.3	289	291	3	12.3	290	292	294
S-11	12.3	295	297	12.3	289	291	3	12.3	289	292	294
S-12	12.3	295	297	12.3	289	291	3	12.3	289	292	294
S-13	12.3	295	297	12.3	289	292	3	12.3	290	292	294
S-14	12.3	295	297	12.3	289	292	3	12.3	290	292	294
S-15	12.3	295	298	12.3	289	292	3	12.3	290	292	294
S-16	12.3	295	297	12.3	289	291	3	12.3	289	292	294
S-17	12.3	295	297	12.3	289	291	3	12.3	289	292	294
S-18	12.3	295	297	12.3	289	291	3	12.3	290	292	294

Table B.5 PPWC 出口における He 混合平均温度の算出（高温／並列運転）

Case No.	HGC(A)			HGC(B)			HGC(C)			混合 平均 温度 (°C)	
	流量 (t/h)	温度(°C)		流量 (t/h)	温度(°C)		温度 差 (°C)	流量 (t/h)	温度(°C)		
	入 口	出 口		入 口	出 口			入 口	出 口		
P-1	8.1	169	170	8.1	174	175	1	8.1	184	185	177
P-2	8.1	169	170	8.1	174	175	1	8.1	184	185	177
P-3	8.1	169	170	8.1	174	175	1	8.1	184	185	177
P-4	8.1	222	223	8.1	230	232	2	8.1	245	247	235
P-5	8.1	222	223	8.1	230	232	2	8.1	245	247	235
P-6	8.1	222	223	8.1	230	232	2	8.1	245	247	234
P-7	8.1	222	223	8.1	230	232	2	8.1	245	247	234
P-8	8.1	247	249	8.1	257	259	2	8.1	276	277	262
P-9	8.1	265	266	8.1	276	278	2	8.1	297	298	281
P-10	8.1	264	266	8.1	276	277	2	8.1	296	298	281
P-11	8.1	264	266	8.1	276	277	2	8.1	296	298	281
P-12	8.1	264	266	8.1	276	278	2	8.1	296	298	281
P-13	8.1	264	266	8.1	276	278	2	8.1	297	298	281
P-14	8.1	264	266	8.1	276	277	2	8.1	296	298	281
P-15	8.1	265	266	8.1	276	278	2	8.1	297	298	281
P-16	8.1	247	249	8.1	257	259	2	8.1	276	278	262
P-17	8.1	221	223	8.1	230	232	2	8.1	245	247	234
P-18	8.1	195	196	8.1	202	204	1	8.1	214	215	206
P-19	8.1	168	169	8.1	174	175	1	8.1	183	184	177

Table B.6 高温／単独運転時の PPWC の UA の評価結果

Case No.	原子炉			加圧水 PPWC			He PPWC 出口温度 (°C)	加圧水 受熱量 (MW)	対数平均 温度差 (°C)	UA (kW/K)				
	出力 (MW)	温度(°C)		流量 (t/h)	温度(°C)									
		入口	出口		入口	出口								
S-1	9.2	183	363	618.0	69	82	183	9.4	185	50.8				
S-2	9.1	181	355	618.1	70	83	181	9.1	180	50.8				
S-3	9.2	181	355	617.9	70	82	181	9.1	180	50.8				
S-4	12.0	211	436	618.0	72	89	212	11.8	228	51.8				
S-5	15.0	242	525	617.9	74	94	243	14.8	280	52.7				
S-6	15.0	241	526	618.0	73	93	243	14.8	281	52.8				
S-7	15.1	241	526	618.0	72	93	243	14.9	282	52.8				
S-8	15.1	241	527	618.1	72	93	243	14.9	282	52.7				
S-9	18.0	272	611	617.9	77	102	274	17.6	328	53.7				
S-10	20.1	293	668	618.0	80	107	294	19.6	360	54.3				
S-11	20.1	293	670	617.9	79	106	294	19.6	361	54.3				
S-12	20.2	293	670	618.0	79	106	294	19.6	362	54.3				
S-13	20.2	293	670	618.0	79	106	294	19.6	361	54.3				
S-14	20.2	293	669	618.1	79	106	294	19.6	361	54.3				
S-15	20.2	293	669	618.0	79	107	294	19.6	361	54.3				
S-16	20.2	293	669	618.0	79	106	294	19.6	361	54.3				
S-17	20.2	293	669	618.0	79	107	294	19.6	361	54.4				
S-18	20.2	293	668	618.0	80	107	294	19.6	360	54.3				
平均				618.0										

Table B.7 高温／並列運転時の PPWC の UA の評価結果

Case No.	原子炉			加圧水 PPWC			He PPWC 出口温度 (°C)	加圧水 受熱量 (MW)	対数平均 温度差 (°C)	UA (kW/K)				
	出力 (MW)	温度(°C)		流量 (t/h)	温度(°C)									
		入口	出口		入口	出口								
P-1	9.0	180	343	410.0	72	84	177	5.9	171	34.5				
P-2	9.1	180	345	410.0	71	83	177	5.9	173	34.4				
P-3	9.1	180	344	410.0	72	84	177	5.9	171	34.4				
P-4	15.0	241	509	410.0	71	91	235	9.7	271	35.8				
P-5	15.0	241	509	410.0	71	91	235	9.7	272	35.7				
P-6	15.1	241	510	410.0	70	90	234	9.7	273	35.7				
P-7	15.1	241	511	410.1	70	90	234	9.7	273	35.6				
P-8	18.0	272	592	410.0	71	95	262	11.6	320	36.3				
P-9	20.0	293	647	410.1	73	100	281	12.9	351	36.7				
P-10	20.1	293	649	410.0	71	98	281	13.0	353	36.8				
P-11	20.1	293	648	410.0	72	99	281	13.0	352	36.8				
P-12	20.2	293	649	410.1	72	99	281	13.0	352	36.8				
P-13	20.2	293	649	410.0	72	99	281	13.0	352	36.7				
P-14	20.2	293	649	410.0	72	99	281	12.9	352	36.7				
P-15	20.1	293	647	409.9	73	100	281	12.9	351	36.7				
P-16	18.2	272	593	410.0	70	95	262	11.7	321	36.3				
P-17	15.2	242	511	410.1	69	89	234	9.8	274	35.8				
P-18	12.2	211	428	410.0	69	86	206	7.9	224	35.1				
P-19	9.2	180	345	410.1	70	83	177	6.0	173	34.5				
平均				410.0										

Table B.8 高温試験運転時の加圧水出口温度の推算条件および推算結果

	原子炉 出力(MW)	原子炉入口 温度(°C)	原子炉出口 温度(°C)	加圧水 PPWC 流量 (t/h)	加圧水 PPWC 出口温度(°C)
単独運転	30.0	395	940	618.0	148
並列運転	30.0	395	940	410.0	156

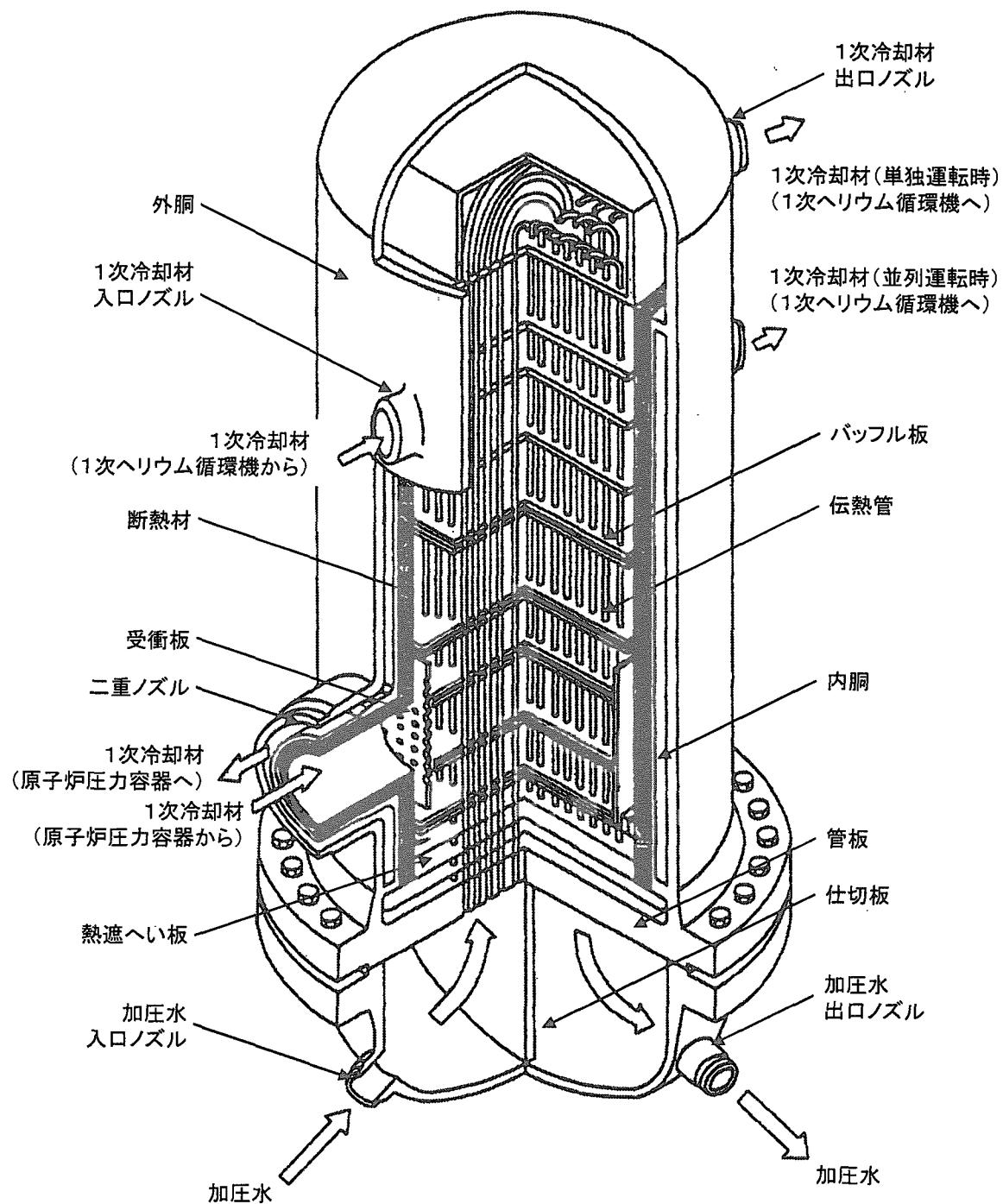


Fig. B.1 PPWC 構造説明図

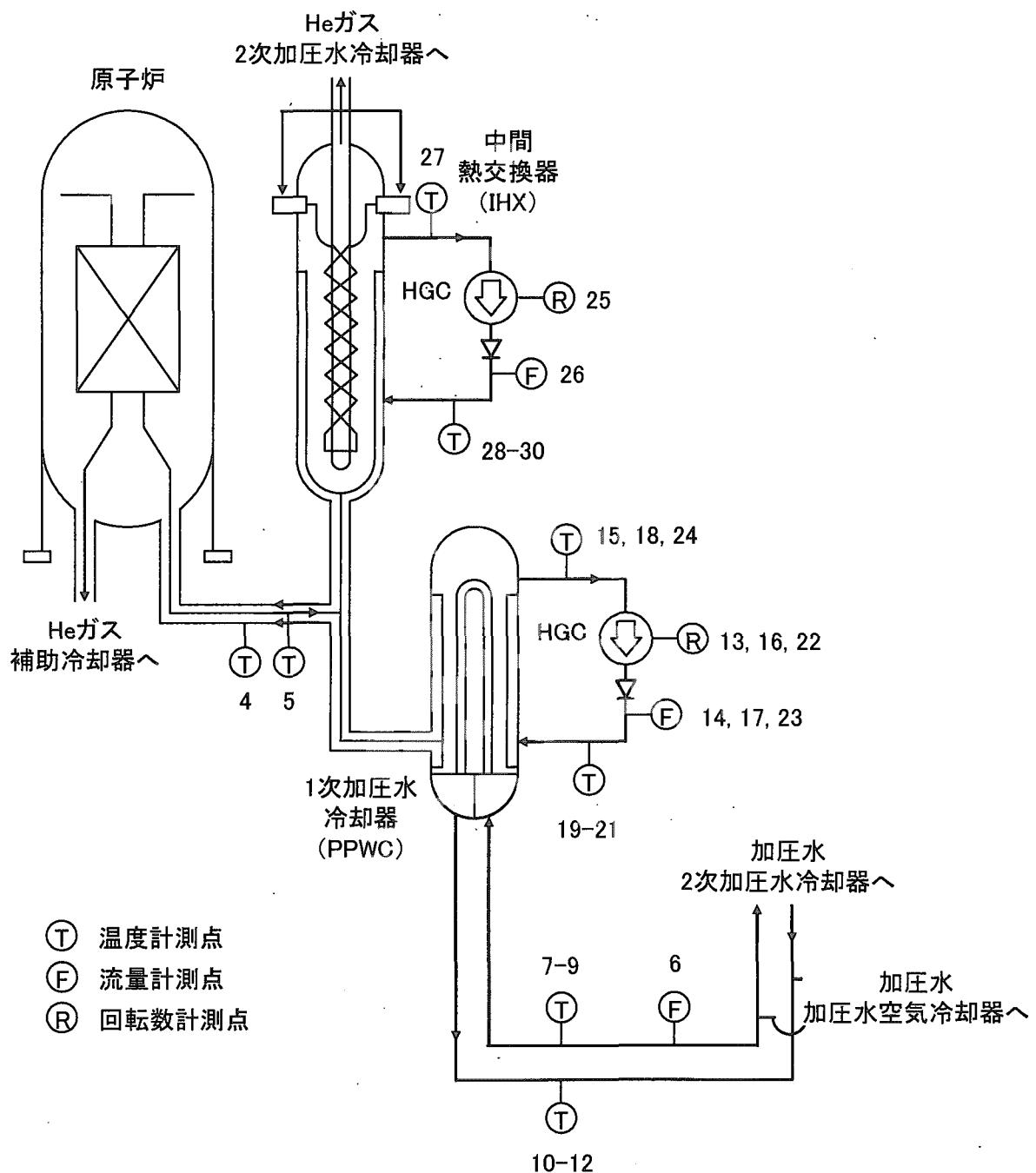


Fig. B.2 PPWC 性能評価に用いたデータの計測点

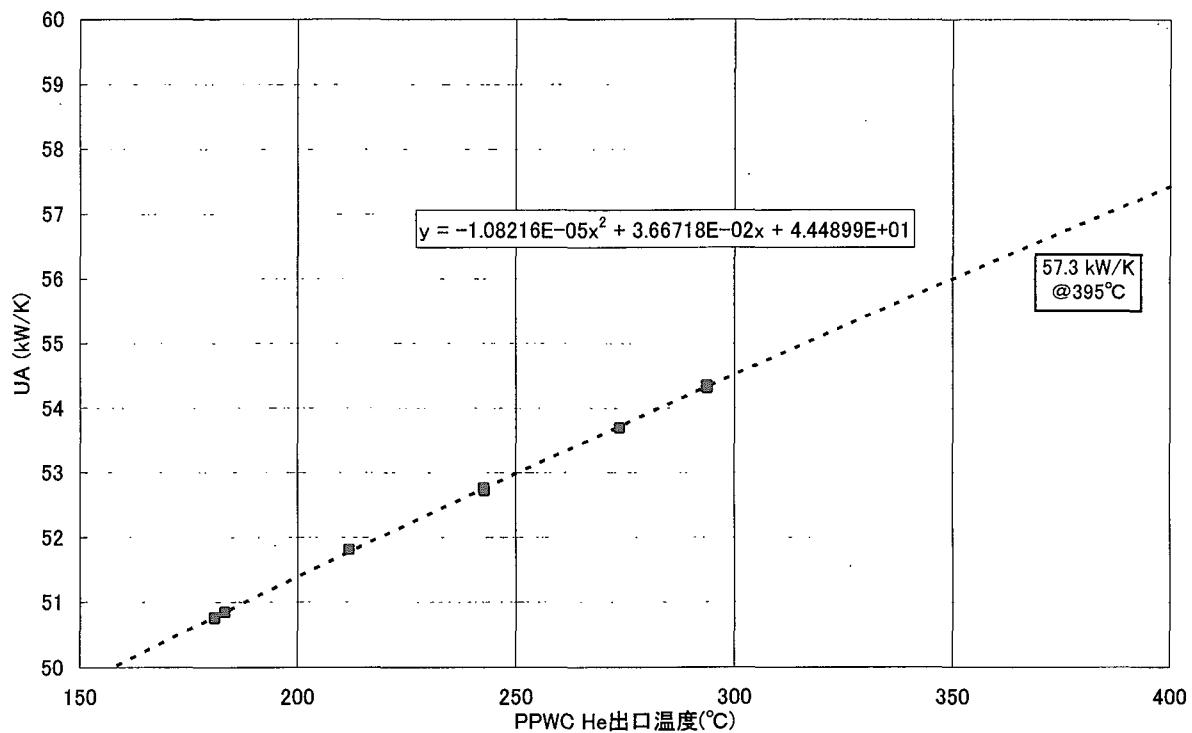


Fig. B.3 PPWC の UA と He PPWC 出口温度の関係（高温／単独運転）

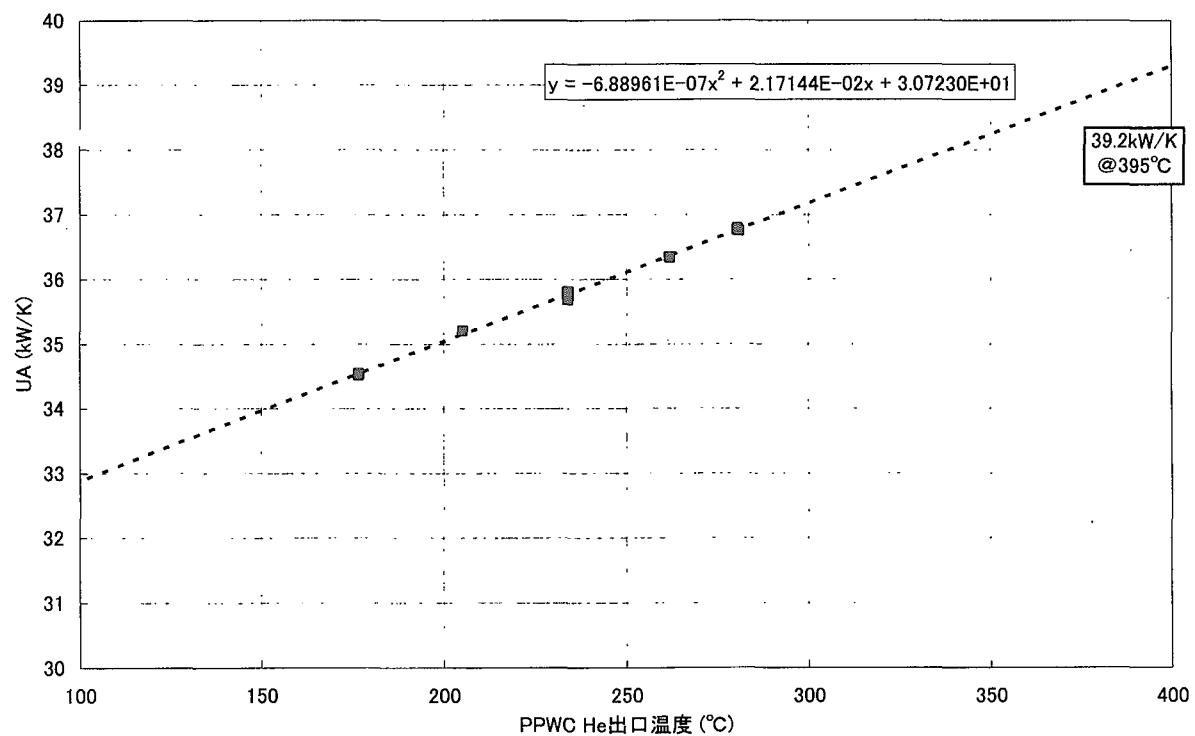


Fig. B.4 PPWC の UA と He PPWC 出口温度の関係（高温／並列運転）

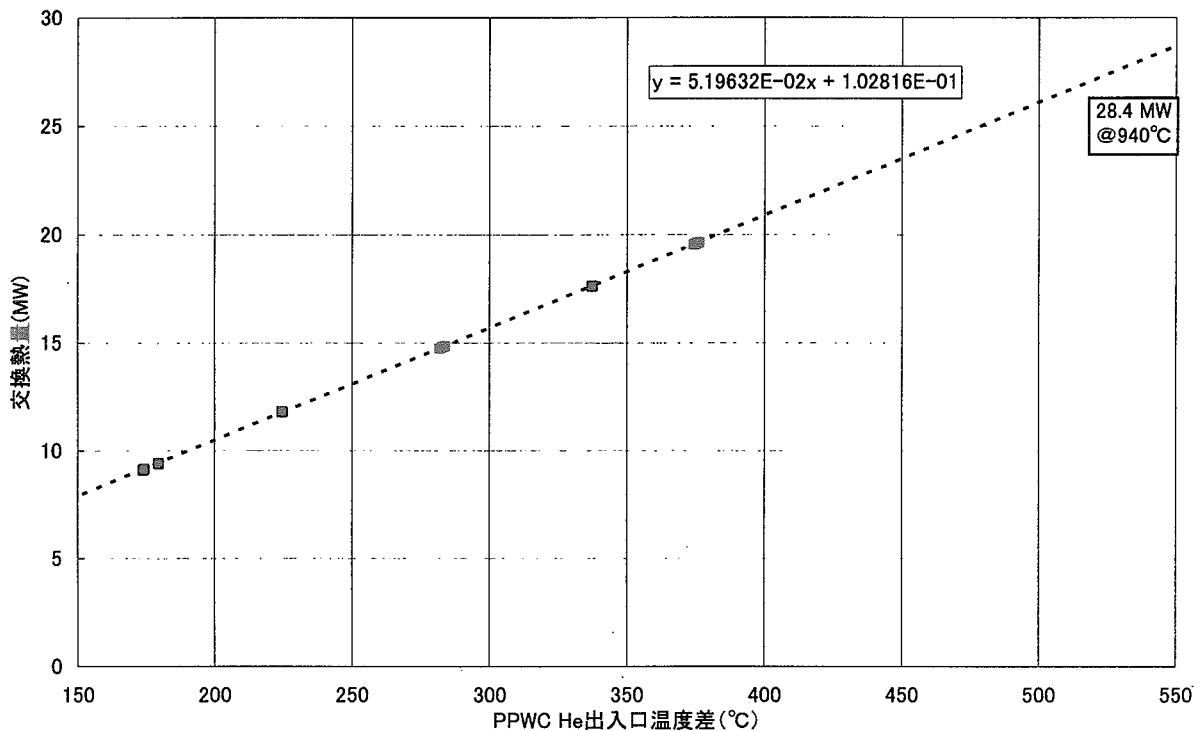


Fig. B.5 PPWC における交換熱量と He PPWC 出入口温度差の関係（高温／単独運転）

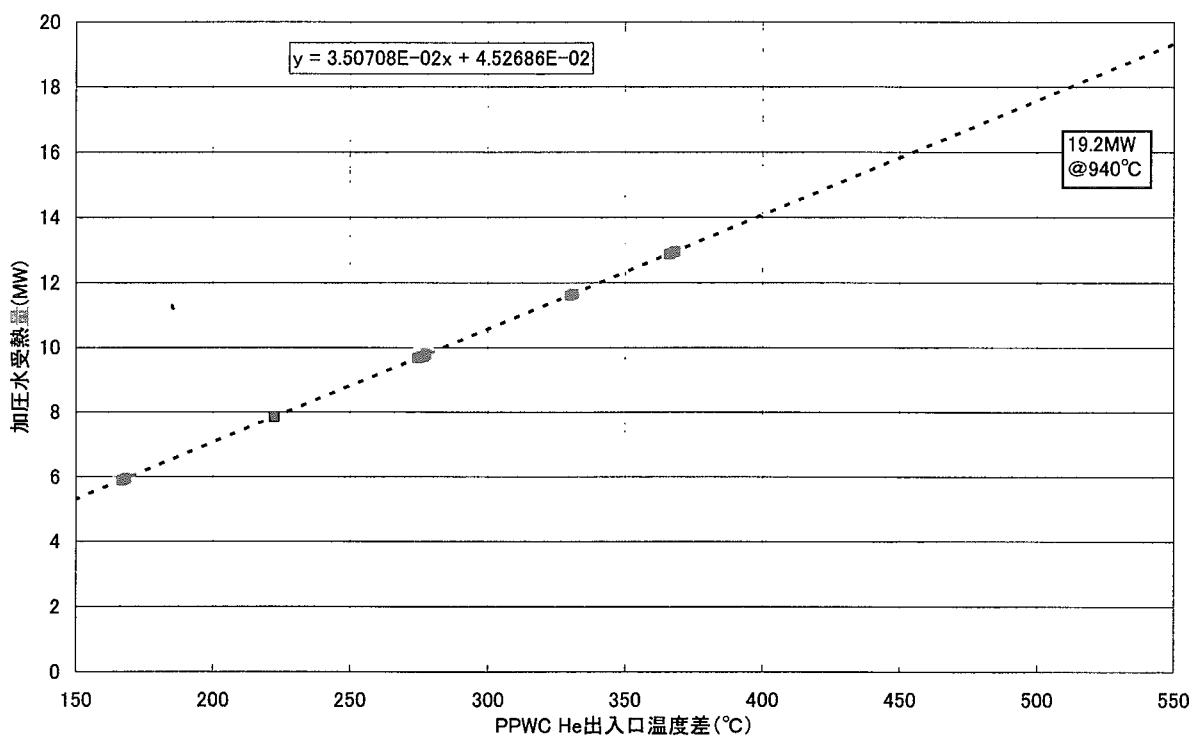


Fig. B.6 PPWC における交換熱量と He PPWC 出入口温度差の関係（高温／並列運転）

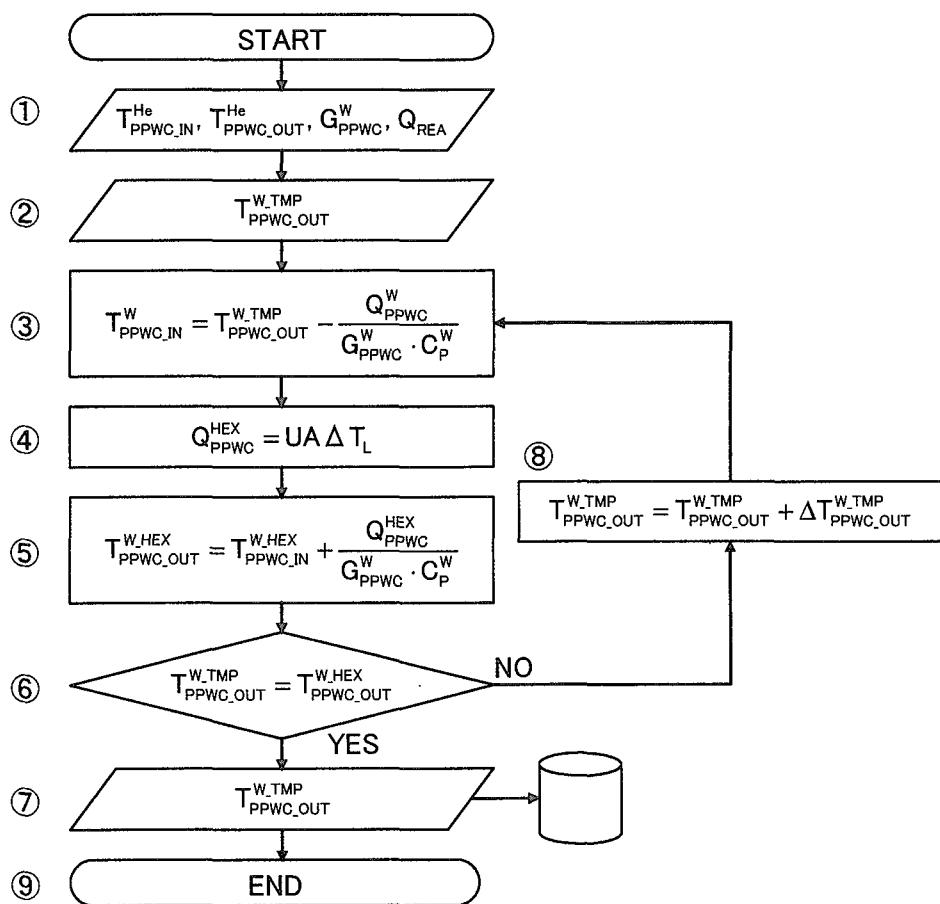


Fig. B.7 加圧水 PPWC 出口温度解析プログラムのフローチャート

This is a blank page.

# 国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

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

表3 固有の名称をもつSI組立単位

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

表2 SIと併用される単位

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

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

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

(注)

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

## 換算表

力	N( $=10^5 \text{ dyn}$ )	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ポアズ)} (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)} (\text{cm}^2/\text{s})$$

圧力	MPa( $=10 \text{ bar}$ )	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
力	1	10.1972	9.86923	$7.50062 \times 10^3$	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	$1.33322 \times 10^{-4}$	$1.35951 \times 10^{-3}$	$1.31579 \times 10^{-3}$	1	$1.93368 \times 10^{-2}$
	$6.89476 \times 10^{-3}$	$7.03070 \times 10^{-2}$	$6.80460 \times 10^{-2}$	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J( $=10^7 \text{ erg}$ )	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)
1	0.101972	$2.77778 \times 10^{-7}$	0.238889	$9.47813 \times 10^{-4}$	0.737562	6.24150 $\times 10^{18}$		= 4.184 J(熱化学)
9.80665	1	$2.72407 \times 10^{-6}$	2.34270	$9.29487 \times 10^{-3}$	7.23301	$6.12082 \times 10^{19}$		= 4.1855 J(15 °C)
$3.6 \times 10^6$	$3.67098 \times 10^5$	1	$8.59999 \times 10^5$	3412.13	$2.65522 \times 10^6$	$2.24694 \times 10^{25}$		= 4.1868 J(国際蒸気表)
4.18605	0.426858	$1.16279 \times 10^{-6}$	1	$3.96759 \times 10^{-3}$	3.08747	$2.61272 \times 10^{19}$	仕事率 1 PS(仏馬力)	
1055.06	107.586	$2.93072 \times 10^{-4}$	252.042	1	778.172	$6.58515 \times 10^{21}$	= 75 kgf·m/s	
1.35582	0.138255	$3.76616 \times 10^{-7}$	0.323890	$1.28506 \times 10^{-3}$	1	$8.46233 \times 10^{18}$	= 735.499 W	
$1.60218 \times 10^{-19}$	$1.63377 \times 10^{-20}$	$4.45050 \times 10^{-26}$	$3.82743 \times 10^{-20}$	$1.51857 \times 10^{-22}$	$1.18171 \times 10^{-19}$	1		

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
1	$2.70270 \times 10^{-11}$	1		1	100
$3.7 \times 10^{10}$				0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	$2.58 \times 10^{-4}$	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

(86年12月26日現在)

日立の加圧水空気冷却器の除熱性能に関する評価



古紙配合率100%  
白色度70%の再生紙を使用しています