

JAERI-Tech

2005-041



JP0550416



HTTRの加圧水空気冷却器の伝熱性能に関する評価

2005年8月

梶尾 大輔・中川 繁昭

日本原子力研究所

Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

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

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

HTTR の加圧水空気冷却器の伝熱性能に関する評価

日本原子力研究所大洗研究所高温工学試験研究炉開発部

栃尾 大輔・中川 繁昭

(2005年7月1日受理)

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

本報では主冷却系に設置されている熱交換器のうちの加圧水空気冷却器 (ACL) について、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 の伝熱性能の評価および設計値との比較を行い、実際に設置された ACL が設計時に要求された伝熱性能を有していることの確認を行った。

さらに、外気温度に対する出力 100% 時の原子炉の除熱について検討し、ACL 入口における空気温度が 33°C の条件においても、原子炉で発生した熱を除熱する能力を有していることを確認した。

Evaluation of Heat Exchange Performance for Air-cooler in HTTR

Daisuke TOCHIO and Shigeaki NAKAGAWA

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

(Received July 1, 2005)

In High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) of 30MW, 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 and the intermediate heat exchanger. To remove generated heat at reactor core and to hold reactor inlet coolant temperature to specified temperature, heat exchangers in main cooling system of HTTR should have designed heat exchange performance.

In this report, heat exchange performance for ACL in main cooling system is evaluated with previous operation data, and evaluated values are compared with designed value.

Moreover, heat exchange performance at full power operation is estimated for the air temperature. As the result, ACL has heat exchange performance removing generated heat at reactor core under the ACL inlet air temperature of 33°C.

Keywords : HTTR, High Temperature Test Operation, 950°C, 30MW, Main Cooling System, Air-cooler, Heat Exchange Performance

目次

1. 緒言.....	1
2. 設備の概要.....	2
2.1 HTTR の概要.....	2
2.2 加圧水冷却設備の概要.....	2
2.3 加圧水空気冷却器 (ACL) の概要.....	3
3. ACL の熱流動設計.....	4
3.1 概要.....	4
3.2 伝熱面積評価.....	4
3.3 圧力損失評価.....	6
4. ACL の伝熱性能の評価.....	8
4.1 運転データの計測.....	8
4.2 空気風量の評価.....	8
4.3 ACL の伝熱性能の評価方法.....	10
4.4 ACL の伝熱性能の評価結果.....	11
4.5 伝熱性能の設計値との比較.....	12
5. 外気温度に対する ACL の伝熱性能の予測.....	13
5.1 概要.....	13
5.2 評価方法.....	13
5.3 計算手法の検証.....	15
5.4 30MW 除熱時の ACL 加圧水流量の予測.....	16
5.5 原子炉出力に対する加圧水流量の予測.....	16
5.6 更なる安定な除熱性能確保に向けた ACL の改良点の提案.....	17
6. 結言.....	19
謝辞.....	19
参考文献.....	19
付録 A ACL の熱流動設計に関する条件および計算結果.....	51
付録 B 30MW における ACL 加圧水流量の予測 (加圧水温度の影響)	59
付録 C 30MW における ACL 加圧水流量の予測 (空気風量の影響)	69
付録 D 原子炉出力に対する ACL 加圧水流量の予測.....	101

Contents

1 . Introduction	1
2 . Outline of the HTTR Facility	2
2.1 Outline of the HTTR Facility	2
2.2 Outline of the Pressurized Water Cooling System	2
2.3 Outline of the Pressurized Water Air-cooler (ACL)	3
3 . Thermal-hydraulic Design of the ACL	4
3.1 Outline	4
3.2 Estimation of the ACL Heat Transfer Area	4
3.3 Estimation of the ACL Pressure Loss	6
4 . Evaluation of Heat Exchange Performance of the ACL	8
4.1 Measurement of Operation Data	8
4.2 Evaluation of Air Flow Mass Rate	8
4.3 Evaluation Method of Heat Exchange Performance for the ACL	10
4.4 Evaluation Result of Heat Exchange Performance for the ACL	11
4.5 Comparison with Design Value	12
5 . Prediction of Heat Exchange Performance of the ACL for Atmospheric Temperature ...	13
5.1 Outline	13
5.2 Estimation Method	13
5.3 Validation of the Estimation Method	15
5.4 Prediction of ACL Pressurized Water Flow Mass Rate at Reactor Power 30MW	16
5.5 Prediction of ACL Pressurized Water Flow Mass Rate for Reactor Power	16
5.6 Suggestion of Improvement Point for the ACL	17
6 . Summary	19
Acknowledgement	19
Reference	19
Appendix A Estimation Condition and Result of Thermal-hydraulic Design of the ACL	51
Appendix B Prediction of Heat Exchange Performance for the ACL (Pressurized Water Temperature)	59
Appendix C Prediction of Heat Exchange Performance for the ACL (Air Flow Mass Rate)	69
Appendix D Prediction of ACL Pressurized Water Flow Mass Rate for Reactor Power ...	101

1. 緒言

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

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

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

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

HTTRの主冷却系に設置されている熱交換器は、HTTRの設置場所で想定される外気温度の条件下で、原子炉で発生した熱の除熱および原子炉入口冷却材温度を所定の温度に維持しなければならない。つまり、熱交換器の伝熱性能が不十分となれば出力100%に至る前に原子炉入口冷却材温度が395°Cを超えてしまい、機器の健全性が保たれなくなる。一方、伝熱性能が過分となれば、原子炉出口冷却材温度950°Cを達成できなくなる。このことより、主冷却系の熱交換器は設定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。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、原子炉で発生した熱を最終的に大気へ放散する加圧水空気冷却器(ACL: Air-cooler)の伝熱性能を評価し、実際に設置されたACLが設計時に要求された伝熱性能を有していることの確認を行った。

また、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、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、評価したACLの除熱性能を基に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ACLの除熱能力について検討する。

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¹⁰⁾。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。

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

2.2 加圧水冷却設備の概要

加圧水冷却設備の設計仕様をTable 2.1に、概要図をFig. 2.2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で大気へ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 2.2 に、写真を Fig. 2.3 に示す。

2.3 加圧水空気冷却器 (ACL) の概要

ACL の設計仕様を Table 2.3 に、構造図を Fig. 2.4 に、ACL 配管の構造図を Fig. 2.5 に示す。また Fig. 2.6 ~ Fig. 2.11 に ACL の設置箇所、全体および各部の写真を示す。ACL は、原子炉建家の屋上に設置されており、原子炉で発生した熱を大気に放散する設備であり、フィン付伝熱管を用いた強制押込通風式空冷熱交換器である。ACL には千鳥配列となっている 504 本のフィン付伝熱管群が設けられており、その下部には 6 台のファンが設けられている。

PPWC、SPWC より送られてきた高温の加圧水は ACL の入口ヘッダで各伝熱管に分配され、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、空気は加圧水より熱を受けて高温になり、上方へと抜けて大気へと放散される。空気風量については、ファンブレードの角度を変化させることで調整することができる。なお、ファンブレード角度調整圧が 0bar のときにファンブレード角度が最大となり、ACL に送り込む空気風量が最大風量となる一方、1bar のときにはファンブレード角度が最小となり ACL に送り込まれる空気風量は最小風量となるように設計されている。

3. ACL の熱流動設計

3.1 概要

本章では ACL 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^{14)・15)}。なお、設計時に要求された ACL の設計方針は以下のとおりである。

- ① 伝熱管はフィン付水平 U 字管とする。
- ② 伝熱管は、加圧水および空気の流動により異常な振動が生じない構造とする。
- ③ 加圧水のドレンが容易な構造とする。
- ④ 加圧水のだよみがない構造とする。
- ⑤ 鳥などの飛来物が伝熱管群およびファンに衝突しない構造とする。
- ⑥ 風量調整方式は、空気作動によるファンブレード角度の現場調整とする。
- ⑦ 塩害に対して実績のある塗装を施工することとし、伝熱管群の枠組については塩害に対して実績のあるメッキ仕上げとする。なお、伝熱管は雨水が伝熱管に触れないように転造アルミフィンタイプとし、フィン部は塗装しない。
- ⑧ 屋外設置につき、電動機およびファンブレード角度調整機器は屋外仕様とする。
- ⑨ 伝熱面積はプラグ率も含めて 10% の余裕を持たせる。

3.2 伝熱面積評価

Table 3.1 に ACL の設計仕様値を示す。また、ACL の構造諸元を Table 3.2 に示す。

ACL の設計では、設計仕様に与えられた値を基に熱貫流率の算出が行われ、有効伝熱面積が決定されている。以下にその方法について記述する。なお、ここでの有効伝熱面積とはフィンのある部分のみを指す。

熱貫流率は以下の式で算出された。

$$\frac{1}{U} = \alpha \cdot \left(\frac{1}{h_o} + \frac{D_o}{D_i} \cdot \left(\frac{1}{h_i} + r_i \right) + r_w \right) \dots\dots\dots (3.1)$$

- D_o : 伝熱管外径 (m)
- D_i : 伝熱管内径 (m)
- h_o : 空気側熱伝達率 ($W/m^2 \cdot K$)
- h_i : 管内熱伝達率 ($W/m^2 \cdot K$)
- r_i : 管内汚れ係数 ($m^2 \cdot K/W$)
- r_w : 管壁伝熱抵抗 ($m^2 \cdot K/W$)
- U : 熱貫流率 ($W/m^2 \cdot K$)
- α : 伝熱管の管外表面積 (フィン部も含む) と管内表面積の比 (-)

ここで、管内および管外の熱伝達率は以下の式で算出されている。

$$h_i = \frac{Nu_i \cdot \lambda_i}{d_i} \dots\dots\dots (3.2)$$

$$Nu_i = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} \text{ (Dittus-Boelter の式)} \dots\dots\dots (3.3)$$

$$h_o = C_1 \cdot C_2 \cdot (C_3 \cdot G)^{0.5} \dots\dots\dots (3.4)$$

- C_1 : 係数(=4.882) (-)
- C_2 : 係数(=208) (-)
- C_3 : 係数(=0.205) (-)
- d_i : 伝熱管内径 (m)
- G : 空気流量 ($kg/m^2 \cdot K$)
- h_o : 伝熱管外熱伝達率 ($W/m^2 \cdot K$)
- Nu_i : 伝熱管内 Nusselt 数 (-)
- Pr : 加圧水 Prandtl 数 (-)
- Re : Reynolds 数 (-)
- λ_i : 加圧水熱伝導率 ($W/m \cdot K$)

これらの式より算出した熱貫流率を基に、以下の式を用いて有効伝熱面積が算出された。

$$A = \frac{Q}{U \cdot \Delta T_L} \dots\dots\dots (3.5)$$

$$\Delta T_L = \psi \cdot \frac{T_2 - T_1}{\ln(T_2 / T_1)} \dots\dots\dots (3.6)$$

$$T_1 = T_{Water}^{ACL_OUT} - T_{Air}^{ACL_IN} \dots\dots\dots (3.7)$$

$$T_2 = T_{Water}^{ACL_IN} - T_{Air}^{ACL_OUT} \dots\dots\dots (3.8)$$

- A : 伝熱面積 (m^2)
- Q : 交換熱量 (W)
- $T_{Water}^{ACL_IN}$: ACL 入口加圧水温度 ($^{\circ}C$)
- $T_{Water}^{ACL_OUT}$: ACL 出口加圧水温度 ($^{\circ}C$)
- $T_{Air}^{ACL_IN}$: ACL 入口空気温度 ($^{\circ}C$)
- $T_{Air}^{ACL_OUT}$: ACL 出口空気温度 ($^{\circ}C$)
- U : 熱貫流率 ($W/m^2 \cdot K$)
- ΔT_L : 対数平均温度差 ($^{\circ}C$)
- ψ : 温度差補正係数(=0.967) (-)

付録 A に計算に用いた値を示す。これらの式を用いて算出した結果、有効伝熱面積は $18100m^2$

と算出された、裕度を見越して 20590m² とされた。

3.3 圧力損失評価

本評価では Table 3.1 に示された ACL の設計仕様値および Table 3.2 に示された ACL の構造諸元を用いて管内圧力損失が算出された。

管内圧力損失は以下の式で算出された。

$$\Delta P_{\text{Water}}^E = C_{\text{Water}}^E \cdot \frac{\gamma}{2} \cdot (v^E)^2 \quad \dots\dots\dots (3.9)$$

$$\Delta P_{\text{Water}}^C = C_{\text{Water}}^C \cdot \frac{\gamma}{2} \cdot (v^C)^2 \quad \dots\dots\dots (3.10)$$

$$\Delta P_{\text{Water}}^S = \lambda \cdot \frac{L}{d_i} \cdot \frac{\gamma}{2} \cdot (v^S)^2 \quad \dots\dots\dots (3.11)$$

$$\Delta P_{\text{Water}}^B = K \cdot C_{\text{Water}}^B \cdot \frac{\gamma}{2} \cdot (v^B)^2 \quad \dots\dots\dots (3.12)$$

$\Delta P_{\text{Water}}^B$:	管曲がり部損失 (Pa)
$\Delta P_{\text{Water}}^C$:	縮流損失 (Pa)
$\Delta P_{\text{Water}}^E$:	拡大損失 (Pa)
$\Delta P_{\text{Water}}^S$:	直管部損失 (Pa)
C_{Hel}^B	:	損失係数 (-)
C_{Hel}^C	:	縮流損失係数 (-)
C_{Hel}^E	:	拡大損失係数 (-)
d_i	:	二重胴部相当直径 (m)
L	:	管長さ (m)
v^B	:	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	:	管内の平均流速 (m/s)
λ	:	摩擦係数 (-)
γ	:	比重量 (kg/m ³)

計算条件および計算結果を付録 A に示す。圧力損失の評価を行った結果、約 41kPa と評価された。以下に、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示す。

$$\begin{aligned} & 99\text{kPa (PPWC)} \\ + & 41\text{kPa (ACL)} \\ + & 585\text{kPa (配管、その他)} \dots\dots\dots(3.13) \\ = & 725\text{kPa} \\ < & 822\text{kPa (加圧水循環ポンプ最大昇圧能力)} \end{aligned}$$

4. ACL の伝熱性能の評価

4.1 運転データの計測

Table 4.1、Table 4.2 に ACL の性能評価を行うのに用いたデータ点を示す。運転データについては HTTR の運転データ保存管理システムおよび追加設置した計測機器より取得した。さらに、測定点の設置箇所を Fig. 4.1~Fig. 4.3 に示す。図中の数字は Table 4.1、Table 4.2 に記された No. に対応したものである。

また、ACL の伝熱性能の評価を行うのに用いた運転データを Table 4.3 に示す。本評価に用いた運転データは 2003 年 3 月の第 2 サイクル運転から 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 7:00~8:59 の 2 時間の値を平均して評価を行った。これ以降、運転名については表中に記載されている略称で表記する。

4.2 空気風量の評価

ACL では空気により加圧水を冷却しているため、空気風量が伝熱性能に大きく寄与してくる。そこで、除熱に寄与した空気風量をヒートバランスより算出することとした。

ACL で空気が受け取った熱量は、ACL で加圧水が失った熱量として以下の式で算出した。

$$Q_{Air}^{ACL} = Q_{Water}^{ACL} = C_p^{Water} \cdot (G_{Water}^{PPWC} + G_{Water}^{SPWC}) \cdot (T_{Water}^{ACL_IN} - T_{Water}^{ACL_OUT}) \dots\dots\dots (4.1)$$

- Q_{Air}^{ACL} : ACL で空気が受け取った熱量 (W)
- Q_{Water}^{ACL} : ACL で加圧水が失った熱量 (W)
- C_p^{Water} : 水の定圧比熱 (J/kg·K)
- G_{Water}^{PPWC} : PPWC 加圧水流量 (kg/s)
- G_{Water}^{SPWC} : SPWC 加圧水流量 (kg/s)
- $T_{Water}^{ACL_IN}$: ACL-バイパス分岐前加圧水温度 (°C)
- $T_{Water}^{ACL_OUT}$: ACL-バイパス合流後加圧水温度 (°C)

水の定圧比熱は圧力にはほとんど依存せず、温度に強くするため、物性値資料¹⁴⁾を基に温度依存性を持たせた相関式を作成した。

$$C_p^W = 2.96632 \cdot 10^{-14} \cdot (T_{Water}^{AVE})^6 - 2.34836 \cdot 10^{-11} \cdot (T_{Water}^{AVE})^5 + 7.30960 \cdot 10^{-9} \cdot (T_{Water}^{AVE})^4 - 1.08128 \cdot 10^{-6} \cdot (T_{Water}^{AVE})^3 + 8.73811 \cdot 10^{-5} \cdot (T_{Water}^{AVE})^2 - 3.20910 \cdot 10^{-3} \cdot (T_{Water}^{AVE}) + 4.21915 \dots\dots\dots (4.2)$$

$$T_{Water}^{Ave} = \frac{T_{Water}^{ACL_IN} + T_{Water}^{ACL_OUT}}{2} \dots\dots\dots (4.3)$$

- $T_{Water}^{ACL_IN}$: ACL-バイパス分岐前加圧水温度 (°C)

- $T_{Water}^{ACL_OUT}$: ACL-バイパス合流後加圧水温度 (°C)
 T_{Water}^{Ave} : ACLにおける加圧水平均温度 (°C)

ACLに流入した空気がこの熱量を持ち去ったとすると、以下の式より空気風量が算出される。

$$G_{Air}^{ACL} = \frac{Q_{Air}^{ACL}}{C_p^{Air} \cdot (T_{Air}^{ACL_OUT} - T_{Air}^{ACL_IN})} \dots\dots\dots (4.4)$$

- Q_{Air}^{ACL} : ACLで空気が受け取った熱量 (W)
 G_{Air}^{ACL} : ACL空気風量 (kg/s)
 C_p^{Air} : 空気の定圧比熱 (J/kg·K)
 $T_{Air}^{ACL_IN}$: ACL入口空気温度 (°C)
 $T_{Air}^{ACL_OUT}$: ACL出口空気温度 (°C)

空気の定圧比熱に関しても、水の場合と同様に物性値資料¹⁵⁾を基に温度依存性を持たせた相関式を作成した。

$$C_p^{Air} = 2.61891E \times 10^{-13} \cdot (T_{Air}^{AVE})^4 - 7.47428 \times 10^{-10} \cdot (T_{Air}^{AVE})^3 + 6.762563 \times 10^{-7} \cdot (T_{Air}^{AVE})^2 - 9.89496 \times 10^{-6} \cdot (T_{Air}^{AVE}) + 1.00500 \dots\dots\dots (4.5)$$

$$T_{Air}^{AVE} = \frac{T_{Air}^{ACL_IN} + T_{Air}^{ACL_OUT}}{2} \dots\dots\dots (4.6)$$

- C_p^{Air} : 空気の定圧比熱 (J/kg·K)
 $T_{Air}^{ACL_IN}$: ACL入口空気温度 (°C)
 $T_{Air}^{ACL_OUT}$: ACL出口空気温度 (°C)

ファンブレード角度調整圧と空気風量の関係を Fig. 4.4 に示す。ファンブレード角度調整圧が 0bar のときに ACL に送り込まれる空気風量が最大風量となる一方、1bar のときに ACL に送り込まれる空気風量は最小風量となるように設計されているが、この結果でもそのような傾向が示されている。また、同じファンブレード角度調整圧に対して空気風量にばらつきがあるが、これは外気温度の違いによる物性値の違いによるものである。さらに、ファンブレード角度を大きく (ファンブレード角度調整圧を小さく) していくにつれて、空気風量が線形的に増加することが示されたが、0.25bar~0bar の範囲で空気風量はほぼ一定の値に飽和することが示された。0.25bar から 0bar において、ファンブレード角度が変化している一方で空気風量が一定値を取る理由としては、ACL が原子炉建屋に近接して設置されており (Fig. 2.6 参照)、空気を取り入れる開口部が一部制限されていることにより空気風量が飽和するためと考えられる。

なお、本評価内で評価された最大風量は 1856.9t/h (PT-5P、2004/6/20、全台 0bar)、ファンブレード角度調整圧 0bar のときの平均風量は 1720.8t/h、ファンブレード角度調整圧 0bar のと

きの最小風量は 1585.9t/h であった。

4.3 ACL の伝熱性能の評価方法

過去に行われた運転をもとに ACL の伝熱性能を評価することとした¹⁴⁾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。

$$Q = UA\Delta T_L \dots\dots\dots(4.7)$$

- Q : 交換熱量 (W)
- U : 熱通過率 (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 ACL の伝熱性能を UA で評価することとした。ACL の UA は Eq. (4.7) を変形した以下の式を用いて算出した。

$$(UA)^{ACL} = \frac{Q^{ACL}}{\Delta T_L^{ACL}} \dots\dots\dots(4.8)$$

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

ACL に対する対数平均温度差は以下の式で与えられる。

$$\Delta T_L^{ACL} = \frac{T_2 - T_1}{\ln(T_2/T_1)} \dots\dots\dots(4.9)$$

$$T_1 = T_{Water}^{ACL_OUT} - T_{Air}^{ACL_IN} \dots\dots\dots(4.10)$$

$$T_2 = T_{Water}^{ACL_IN} - T_{Air}^{ACL_OUT} \dots\dots\dots(4.11)$$

- T_{Water}^{ACL_IN} : ACL 入口加圧水温度 (°C)
- T_{Water}^{ACL_OUT} : ACL 出口加圧水温度 (°C)
- T_{Air}^{ACL_IN} : ACL 入口空気温度 (°C)
- T_{Air}^{ACL_OUT} : ACL 出口空気温度 (°C)

また、ACL での交換熱量は ACL の 1 次側流体が失った熱量、すなわち加圧水が ACL で失った熱量とした。

$$Q_{Air}^{ACL} = Q_{Water}^{ACL} = C_p^{Water} \cdot (G_{Water}^{PPWC} + G_{Water}^{SPWC}) \cdot (T_{Water}^{ACL_IN} - T_{Water}^{ACL_OUT}) \dots\dots\dots(4.12)$$

$$C_p^W = 2.96632 \cdot 10^{-14} \cdot (T_{Water}^{AVE})^6 - 2.34836 \cdot 10^{-11} \cdot (T_{Water}^{AVE})^5 + 7.30960 \cdot 10^{-9} \cdot (T_{Water}^{AVE})^4 - 1.08128 \cdot 10^{-6} \cdot (T_{Water}^{AVE})^3 + 8.73811 \cdot 10^{-5} \cdot (T_{Water}^{AVE})^2 - 3.20910 \cdot 10^{-3} \cdot (T_{Water}^{AVE}) + 4.21915 \dots (4.13)$$

$$T_{Water}^{Ave} = \frac{T_{Water}^{ACL_IN} + T_{Water}^{ACL_OUT}}{2} \dots (4.14)$$

- Q_{Air}^{ACL} : ACL で空気が受け取った熱量 (W)
- Q_{Water}^{ACL} : ACL で加圧水が失った熱量 (W)
- C_p^{Water} : 水の定圧比熱 (J/kg·K)
- G_{Water}^{PPWC} : PPWC 加圧水流量 (kg/s)
- G_{Water}^{SPWC} : SPWC 加圧水流量 (kg/s)
- $T_{Water}^{ACL_IN}$: ACL-バイパス分岐前加圧水温度 (°C)
- $T_{Water}^{ACL_OUT}$: ACL-バイパス合流後加圧水温度 (°C)
- T_{Water}^{Ave} : ACL における加圧水平均温度 (°C)

4.4 ACL の伝熱性能の評価結果

初めに ACL における交換熱量の評価を行った。Fig. 4.5 には ACL での交換熱量を示す。交換熱量の整理には以下に示す (PPWC 加圧水流量) × (PPWC 出入口加圧水温度差) を用いることとした。この値は PPWC で加圧水が受け取った熱量、すなわち炉心での除熱量を表す指標であり、この値と ACL における交換熱量は相関があるため、この値を採用することとした。

$$G_{Water}^{PPWC} (T_{Water}^{PPWC_OUT} - T_{Water}^{PPWC_IN}) \dots (4.15)$$

- G_{Water}^{PPWC} : PPWC 加圧水流量 (kg/s)
- $T_{Water}^{PPWC_IN}$: PPWC 入口加圧水温度 (°C)
- $T_{Water}^{PPWC_OUT}$: PPWC 出口加圧水温度 (°C)

どの運転においても交換熱量と (PPWC 加圧水流量) × (PPWC 出入口加圧水温度差) 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 (PPWC 加圧水流量) × (PPWC 出入口加圧水温度差) 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、PPWC での加圧水受熱量に対する ACL 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 ACL の UA の評価を行った。Fig. 4.6 に ACL の UA と空気風量の関係を示す。ここで、UA は空気風量で整理した。これは、ACL での除熱量は空気風量を調整することで調整されており、空気風量が伝熱性能に最も寄与すると考えられるからである。図中には UA の設計値を併せて示す。なお、空気風量については Eq. (4.4) より算出した。

どの運転についても UA と空気風量の間には相関があることが示された。データに多少のばらつきがあるが、これは ACL が原子炉建屋に近接して設置されており (Fig. 2.6 参照)、天候などの外環境の変化によるものと推察される。

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 4.4 に比較の結果を示す。

各運転に対する設計値と評価値の差を見ると、5%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~13%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入っている。よって、ACL は 30MW 運転時に所定の除熱を行うことは可能であり、伝熱性能も設計時に想定された範囲内に入っていることが確認された。

5. 外気温度に対する ACL の伝熱性能の予測

5.1 概要

先の章で、ACL は原子炉で発生した 30MW の除熱を行うことが可能であることが示された。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る。設計時の伝熱性能は外気温度 33℃ として評価を行っているが、夏場の外気温度は 35℃ 近傍まで上昇している。そのため、外気温度に対する ACL の除熱性能を評価して、冷却条件が厳しくなる夏季の運転条件に対する ACL の設計裕度を確保しておく必要がある。そこで、夏季の外気温度での 30MW 運転における ACL の除熱能力について検討する。

5.2 評価方法

本評価では、外気温度が変化した場合の ACL の除熱能力、すなわち 30MW 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 30MW 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 ACL 入口加圧水温度 $T_{\text{Water}}^{\text{ACL_IN}}$ 、ACL 入口空気温度 $T_{\text{Air}}^{\text{ACL_IN}}$ 、空気風量 $G_{\text{Air}}^{\text{ACL}}$ を入力する。
- ② PPWC 入口加圧水温度 $T_{\text{Water}}^{\text{PPWC_IN}}$ 、PPWC 出口加圧水温度 $T_{\text{Water}}^{\text{PPWC_OUT}}$ 、PPWC 加圧水流量 $G_{\text{Water}}^{\text{PPWC}}$ を入力し、ACL で加圧水が失った熱量を算出する
- ③ 適当な加圧水流量 $(G_{\text{Water}}^{\text{ACL}})_{\text{TMP}}$ を入力する。
- ④ 以下の式より ACL 出口加圧水温度 $T_{\text{Water}}^{\text{ACL_OUT}}$ を算出する。

$$T_{\text{Water}}^{\text{ACL_OUT}} = T_{\text{Water}}^{\text{ACL_IN}} - \frac{Q_{\text{Water}}^{\text{ACL}}}{(G_{\text{Water}}^{\text{ACL}})_{\text{TMP}} \cdot C_p^{\text{Water}}} \quad \text{.....(5.1)}$$

- $Q_{\text{Water}}^{\text{ACL}}$: ACL で加圧水が失った熱量 (W)
 C_p^{Water} : 水の定圧比熱 (J/kg·K)
 $(G_{\text{Water}}^{\text{ACL}})_{\text{TMP}}$: ACL 加圧水流量 (計算開始時に任意設定) (kg/s)
 $T_{\text{Water}}^{\text{ACL_IN}}$: ACL 入口加圧水温度 (°C)
 $T_{\text{Water}}^{\text{ACL_OUT}}$: ACL 出口加圧水温度 (°C)

- ⑤ ACL で加圧水が失った熱量、ACL 入口空気温度、空気風量を用いて ACL 出口空気温度を算出する。

$$T_{\text{Air}}^{\text{ACL_OUT}} = T_{\text{Air}}^{\text{ACL_IN}} + \frac{Q_{\text{Water}}^{\text{ACL}}}{G_{\text{Air}}^{\text{ACL}} \cdot C_p^{\text{Air}}} \quad \text{.....(5.2)}$$

- $Q_{\text{Water}}^{\text{ACL}}$: ACL で加圧水が失った熱量(W)
 C_p^{Air} : 水の定圧比熱 (J/kg·K)

G_{Air}^{ACL} : 適当に与えた ACL 加圧水流量 (kg/s)
 $T_{Air}^{ACL_IN}$: ACL 入口空気温度 (°C)
 $T_{Air}^{ACL_OUT}$: ACL 出口空気温度 (°C)

⑥ 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。

$$Q_{EX}^{ACL} = UA\Delta T_L \dots\dots\dots (5.3)$$

$$\Delta T_L = \frac{T_2 - T_1}{\ln(T_2/T_1)} \dots\dots\dots (5.4)$$

$$T_1 = T_{ACL_OUT}^W - T_{ACL_IN}^A \dots\dots\dots (5.5)$$

$$T_2 = T_{ACL_IN}^W - T_{ACL_OUT}^A \dots\dots\dots (5.6)$$

Q_{EX}^{ACL} : ACL での交換熱量 (W)
 U : 熱貫流率 (W/m²·K)
 A : 伝熱面積 (m²)
 ΔT_L : 対数平均温度差 (°C)
 $T_{Air}^{ACL_IN}$: ACL 入口空気温度 (°C)
 $T_{Air}^{ACL_OUT}$: ACL 出口空気温度 (°C)
 $T_{Water}^{ACL_IN}$: ACL 入口加圧水温度 (°C)
 $T_{Water}^{ACL_OUT}$: ACL 出口加圧水温度 (°C)

⑦ ⑤で求めた Q_{EX}^{ACL} を用いて、ACL 加圧水流量を算出する。

$$(G_{Water})_{EX}^{ACL} = \frac{Q_{EX}^{ACL}}{C_p^W(T_{Water}^{ACL_IN} - T_{Water}^{ACL_OUT})} \dots\dots\dots (5.8)$$

Q_{EX}^{ACL} : ACL での交換熱量 (W)
 $(G_{Water})_{EX}^{ACL}$: ACL 交換熱量より求めた加圧水流量 (W/m²·K)
 C_p^W : 水の定圧比熱 (J/kg·K)
 $T_{Water}^{ACL_IN}$: ACL 入口加圧水温度 (°C)
 $T_{Water}^{ACL_OUT}$: ACL 出口加圧水温度 (°C)

⑧ ②で与えた $(G_{Water})_{TMP}^{ACL}$ と⑥で算出した $(G_{Water})_{EX}^{ACL}$ を比較する。②で与えた $(G_{Water})_{TMP}^{ACL}$ は、ACL で熱量 Q_{Water}^{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_{EX}^{ACL} を奪っ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_{Water}^{ACL} と Q_{EX}^{ACL} は釣り合わなければならない。すなわち、ACL のヒートバランスが成立する場合には $(G_{Water}^{ACL})_{TMP}$ と $(G_{Water}^{ACL})_{EX}$ は等しくなければならない。

- ⑨ $(G_{Water}^{ACL})_{TMP} \neq (G_{Water}^{ACL})_{EX}$ の場合は $(G_{Water}^{ACL})_{TMP} = (G_{Water}^{ACL})_{TMP} + \Delta(G_{Water}^{ACL})_{TMP}$ として③から再計算する。
- ⑩ $(G_{Water}^{ACL})_{TMP} = (G_{Water}^{ACL})_{EX}$ の場合には $(G_{Water}^{ACL})_{TMP}$ を出力する。
- ⑪ 終了

5.3 計算手法の検証

初めに、計算結果と実測値の比較を行い、本解析手法の検証を行った。本評価に際して、以下に示すように3条件の空気風量を設定した。

- ① これまでの運転結果より評価されたファンブレード角度調整圧 0bar の時の平均空気風量 1720.8t/h
- ② 6/22 7:00~9:00 の空気風量 1747.9t/h
- ③ これまでの運転結果より評価されたファンブレード角度調整圧 0bar の時の最大空気風量 1856.9t/h

なお、解析における外気温度については、Fig. 5.2 に示す 2004 年 6~8 月の大洗研究所気象塔 (高度 10m) における計測結果を基にして 0~40°C の範囲について計算した。

この条件で評価した 30MW 除熱に必要な加圧水流量と ACL 入口空気温度の関係を Fig. 5.3 に示す。併せて、6/22 (定格出力時) の実測より得られた加圧水流量と ACL 入口空気温度の関係も同図に示す。図中の曲線は①~③の各空気風量に対する ACL 加圧水流量の評価結果であり、プロット点は実測より得られた加圧水流量である。ACL 加圧水流量は最大 600t/h 程度流入可能であるが、500 t/h を超えた場合には ACL での除熱に関して注意を払わなければならない。そのため、加圧水流量の運転上の目安値として ACL 加圧水流量 500t/h の値も図中に併せて示す。本図で用いている ACL 入口空気温度は ACL ファンに流入する際の空気温度であり、必ずしも外気温度と対応するものではない。これは、ACL が原子炉建家に近接して設置されているため (Fig. 2.6 参照)、時折、ACL 出口より出た高温の空気が巻き込まれて入口側より流入する「巻き込み現象」が生じており、巻き込み現象により ACL 入口空気温度は外気温度より高くなる。この高温空気の巻き込み現象は設計時には想定されていない現象である。この巻き込み現象が生じた場合には、外気温度と ACL 入口空気温度の相関が取れず、外気温度での評価が困難であるため、ACL 入口空気温度で評価した。

各空気風量に対する ACL 加圧水流量をみると、空気風量が少なくなるにつれて ACL での除熱能力が減少し、ACL 加圧水流量が多くなっている。次に、実測値を示すプロット点をみると、プロット点は最大空気風量に対する曲線より上側に分布していることが示された。これは、ACL に流入する空気風量は最大空気風量以下であり、この曲線より上側にプロット点が分布しなければならないということと整合が取れている。なお、最大空気風量に対する曲線より下側に分布して

いるプロット点もあるが、巻き込み現象により瞬時的に ACL 入口温度が上昇したために生じたものである。

これらのことより、30MW の除熱を行うのに必要な加圧水流量を本評価手法により予測可能であることを確認した。

5.4 30MW 除熱時の ACL 加圧水流量の予測

過去の運転における実測値を基に、外気温度に対する ACL の除熱性能（すなわち、30MW 除熱に必要な ACL 加圧水流量）について評価を行った。Table 5.1 に計算条件を示す。PPWC 出入口加圧水温度、加圧水流量は ACL での除熱量を算出する際に用いた。

各運転モードに対する 30MW 除熱に必要な加圧水流量と ACL 入口空気温度の関係を Fig. 5.4 ~ Fig.5.7 に示す。Fig. 5.4 は定格・単独運転、Fig. 5.5 は定格・並列運転、Fig. 5.6 は高温・単独運転、Fig. 5.7 は高温・並列運転に対する評価結果を示している。また、付録 B、C に、加圧水温度、空気風量を変化させた条件での評価結果を示す。

ACL に最大の空気風量を流入させた場合に、除熱に必要な加圧水流量が目安流量を下回る ACL 入口空気温度は、定格・単独運転では 39°C、定格・並列運転では 40°C 以上、高温・単独運転では 34°C、高温・並列運転では 33°C であった。Fig. 5.2 の外気温度の経日変化より、夏季の大洗での外気温度は日によっては 35°C 程度まで上昇するが、平均的な気温は 30°C 程度である。このことより、夏季の大洗での平均的な外気温度である ACL 入口温度 30°C において最大空気風量を流入させた場合には 30MW 除熱が可能であることが示された。しかしながら、高温・並列運転において ACL に平均空気風量で流入した場合には、加圧水流量が 500t/h を超えてしまうことも示された。

そこで、ACL 入口空気温度 30°C における 30MW 除熱に必要な空気風量および加圧水流量の評価を行った。各運転モードに対する 30MW 除熱に必要な加圧水流量と ACL 空気風量の関係を Fig. 5.8 ~ Fig.5.11 に示す。Fig. 5.8 は定格・単独運転、Fig. 5.9 は定格・並列運転、Fig. 5.10 は高温・単独運転、Fig. 5.11 は高温・並列運転に対する評価結果を示している。

これらの図中には運転加圧水流量の目安値、実測値より得られた空気風量が示されており、ACL 入口空気温度 30°C での 30MW 運転が成立する条件を読み取ることが可能である。すなわち、以下に示す条件を全て満足したときに運転可能となる

- ① ACL 加圧水流量が運転加圧水流量以下である。
- ② ACL 加圧水流量が評価した ACL 加圧水流量以上である。
- ③ ACL 空気風量が過去に測定された最大空気風量以下である。

これらの条件を満足する領域を図中に色付けして示す。運転モードにより結果が異なり、ACL 入口空気温度 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 1560t/h、定格・並列運転では 1400t/h 以上、高温・単独運転では 1720t/h、定格・並列運転では 1760t/h 以上の空気風量が必要であることが示された。定格運転と高温試験運転で単独／並列時の風量の大小関係が逆になっているのは、ACL での除熱量と加圧水温度の関係に依存するものである。

5.5 原子炉出力に対する加圧水流量の予測

次に、過去の運転における実測値を基に、各原子炉出力に対する ACL の除熱性能（すなわち、原子炉で除熱するのに必要な ACL 加圧水流量）について評価を行った。計算は原子炉出力 30%～100%の範囲について行った。Fig. 5.12~Fig. 5.15 には過去の運転より得られた原子炉出力と PPWC 出入口加圧水温度の関係を示す。Fig. 5.12 は定格・単独運転、Fig. 5.13 は定格・並列運転、Fig. 5.14 は高温・単独運転、Fig. 5.15 は高温・並列運転の実測結果を示している。本評価ではこれらのデータに基づいて原子炉出力と加圧水温度の相関式を作成し、評価を行った。

評価を行う前に、本手法がどの程度の精度を持つか検証を行った。Fig. 5.16 に実測値と評価値の比較を示す。横軸は実測値を示しており、縦軸は評価値を示している。この結果より、定格・単独運転、高温・単独運転については概ね $\pm 10\%$ の範囲で加圧水流量が評価できていることが示された。一方、高温・並列運転については予測値より大きく外れていた。これは、高温・並列運転として参照したデータを取得した時は、高温空気の巻き込みの影響を受けやすい状態となっており、データのばらつきがあったためと考えられる。

以上の評価精度を把握した上で、原子炉出力と加圧水流量の関係について評価を行った。Fig. 5.17~Fig. 5.20 に空気風量 1720t/h のときの原子炉出力と加圧水流量の関係を示す。Fig. 5.17 は定格・単独運転、Fig. 5.18 は定格・並列運転、Fig. 5.19 は高温・単独運転、Fig. 5.20 は高温・並列運転に対する評価結果を示している。また、付録 D に、空気風量を変化させた条件での評価結果を示す。

どの運転モードについても、ACL 入口空気温度が低い時には原子炉出力の上昇とともに ACL 加圧水流量は増加している。一方、ACL 入口空気温度が高くなってくると、定格出力に至る前の中間出力において加圧水流量が極大値を持つ、すなわち、原子炉出力を上げていくと、途中の原子炉出力において ACL では原子炉で発生した熱を除熱しにくい状態となることが示された。

5.6 更なる安定な除熱性能確保に向けた ACL の改良点の提案

先の節では、ACL の除熱能力について評価を行ったが、現在設置されている ACL に更に改良を加えることで、更なる除熱能力の向上が見込まれる。ここでは、実際の運転により得られた経験を基に、更なる安定な運転を行うための ACL の改良点について列挙する。具体的な事例は以下の通りである。

・高温空気の巻き込み

現在設置されている ACL では、風向により高温空気の巻き込みが断続的に生じており、ACL 空気入口温度が外気温度より高くなる現象を誘発している。また、巻き込みが断続的に生じていることにより、ACL での除熱性能に微小な変動が断続的に生じている。現在、設置されている ACL には高温空気の巻き込みを目的として遮風板が設けられているが、高温空気の巻き込みを防止するためには、例えばチムニーのような高温空気を ACL より離れた地点へ誘導するような設備を設けることなどが挙げられる。

・空気流入側開口面積

現在、ACL は機器の配置の関係で原子炉建家屋上に設置されている (Fig. 2.6 参照)。このため、開口部分の一面が制限されており、開口面積が設計で想定した値より小さくなっている。このことにより、実際の最大空気風量が設計値より小さくなっている (Fig. 4.4

参照)。そのため、開口面積をできる限り大きく確保する必要があるが、現在の ACL には入口側に遮風板が設置されており、その開口面積を一部制限している。そこで、開口面積を確保するための改良点として、遮風板をルーバータイプに変更し、空気風量が得られるように、適宜、開閉できる構造とする、ことが挙げられる。

これらの改善点に対して最適な改良を行えるようにするために、今後、更なるデータの蓄積を行うこととする。

6. 結言

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

本報では主冷却系に設置されている熱交換器のうちの加圧水空気冷却器 (ACL) について、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伝熱性能の評価を行った。さらに設計時における伝熱性能との比較を行った。その結果、ACL は設計時に想定された伝熱性能にほぼ近い値を示しており、設計時に想定された伝熱性能が確保されていることを確認した。

また、外気温度に対する ACL の除熱能力について検討した。この評価では、空気風量、加圧水温度および原子炉出力をパラメータとして評価を行った。その結果、ACL 入口における空気温度が 33℃ の条件においてもファンブレード角度調整圧を最大とすることで出力 100% の運転を行うことが可能であることを確認した。

謝辞

本評価を行うにあたり、小森芳廣 高温工学試験研究炉開発部長、川崎幸三 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) 齋藤伸三 他：“高温工学試験研究炉の設計と研究開発”，原子力誌, 32, 847（1990）.
- (3) 藤川正剛 他：“HTTR（高温工学試験研究炉）の出力上昇試験”，原子力誌, 1, 361（2002）.
- (4) 中川繁昭 他：JAERI-Tech 2002-069, “高温工学試験研究炉の出力上昇試験 —試験経過及び結果の概要—”（2002）
- (5) Y. Tachibana et al.：“Plan for first phase of safety demonstration tests of the High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR)”, Nucl. Eng. Des., 224, 179（2003）.

- (6) N. Sakaba et al. : "Safety Demonstration Test Plan of HTTR – Overall Program and Result of Coolant Flow Reduction Test", Proc. of GLOBAL 2003, New Orleans, Nov. 16-20, 2003, p.293 (2003).
- (7) 坂場成昭 他 : JAERI-Tech 2003-043, "HTTR 高温試験運転の出力上昇試験計画" (2003).
- (8) 高松邦吉 他 : JAERI-Tech 2004-063, "高温工学試験研究炉の出力上昇試験 (高温試験運転) - 試験方法及び結果の概要 -" (2004)
- (9) S. Fujikawa et al., "Achievement of Reactor-Outlet Coolant Temperature of 950°C in HTTR", Nucl. Sci. Tech., 41, 12, pp.1245-1254 (2004).
- (10) S. Saito et al. : JAERI 1332, "Design of High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR)" (1994).
- (11) 栃尾大輔 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).
- (12) 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).
- (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 熱工学", 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).

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 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 2.2 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 2.3 Major specification of ACL

Type	Forced-draft air-cooled type with fin tube	
Heat capacity	30MW	
Allowable working pressure	4.8MPa	
Allowable working temperature	262 °C	
Pressurized water flow mass rate (maximum)	640t/h	
Air flow mass rate (maximum)	2600t/h	
Air inlet temperature	40 °C	
Air inlet temperature	80 °C	
Heat transfer tube	(Outer diameter)	25.4mm
	(Thickness)	2.77mm
Material	(Heat transfer tube)	Carbon steel
	(Fin)	Aluminum
	(Header)	Carbon steel
Fan type	Axial-flow variable pitch fan	
Number of fan	6	

Table 3.1 Design specification of the ACL

Exchanged heat	29,988kW
ACL inlet pressurized water temperature	133 °C
ACL outlet pressurized water temperature	91 °C
Pressurized water flow mass rate	606t/h
ACL inlet air temperature	33 °C
ACL outlet air temperature	82.4 °C
Flow mass rate	2,178t/h

Table 3.2 Structural specification of the ACL

Heat transfer tube	(Material)	SA210 Gr.A1 (equivalent to STB 410)
	(Outer diameter)	25.4mm
	(Thickness)	2.77mm
	(Number)	504
Flow path arrangement	(Arrangement)	Triangle arrangement
	(Pitch)	66.7mm

Table 4.1 Measurement item by plant data collecting system

No.	PID No.	Measurement point name
1	24C031	Power range neutron flux (BV)
2	13A130	Reactor inlet helium temperature (wide-range, D)
3	13A131	Reactor outlet helium temperature (wide-range, D)
4	13A414	Reactor inlet helium temperature (bulk)
5	13A440	Reactor inlet helium temperature control system target value
6	13A370~372	PPWC inlet pressurized water temperature 1~3
7	13A376~378	PPWC outlet pressurized water temperature A~C
8	13A350~352	PPWC pressurized water flow mass rate 1~3
9	13A400	PPWC pressurized water flow mass rate
10	13A373~375	SPWC inlet pressurized water temperature 1~3
11	13A380~382	SPWC outlet pressurized water temperature A~C
12	13A353~355	SPWC pressurized water flow mass rate 1~3
13	13A356	PPWC inlet pressurized water pressure
14	13A357	SPWC inlet pressurized water pressure
15	13A358	Pressurized water pressurizer pressure
16	13A359	Pressurized water pressurizer water level
17	13A385	ACL inlet pressurized water temperature
18	13A386	ACL outlet pressurized water temperature
19	13A415	Pressurized water temperature
20	13A442	Pressurized water temperature control system target value
21	13A443	Pressurized water temperature control system control value
22	359	ACL pressurized water flow mass rate
23	360	Pressurized water flow mass rate control valve opening
24	361	Pressurized water flow mass rate control by-pass valve opening

Table 4.2 Measurement item by temporary measurement system

No.	Measurement point name
25	ACL fan A blade angle adjusting pressure
26	ACL fan B blade angle adjusting pressure
27	ACL fan C blade angle adjusting pressure
28	ACL fan D blade angle adjusting pressure
29	ACL fan E blade angle adjusting pressure
30	ACL fan F blade angle adjusting pressure
31	ACL fan A inlet air temperature
32	ACL fan B inlet air temperature
33	ACL fan C inlet air temperature
34	ACL fan D inlet air temperature
35	ACL fan E inlet air temperature
36	ACL fan F inlet air temperature
37	ACL fan A outlet air temperature
38	ACL fan B outlet air temperature
39	ACL fan C outlet air temperature
40	ACL fan D outlet air temperature
41	ACL fan E outlet air temperature
42	ACL fan F outlet air temperature
43	ACL fan A air flow rate
44	ACL fan B air flow rate
45	ACL fan C air flow rate
46	ACL fan D air flow rate
47	ACL fan E air flow rate
48	ACL fan F air flow rate

Table 4.3 Operation data

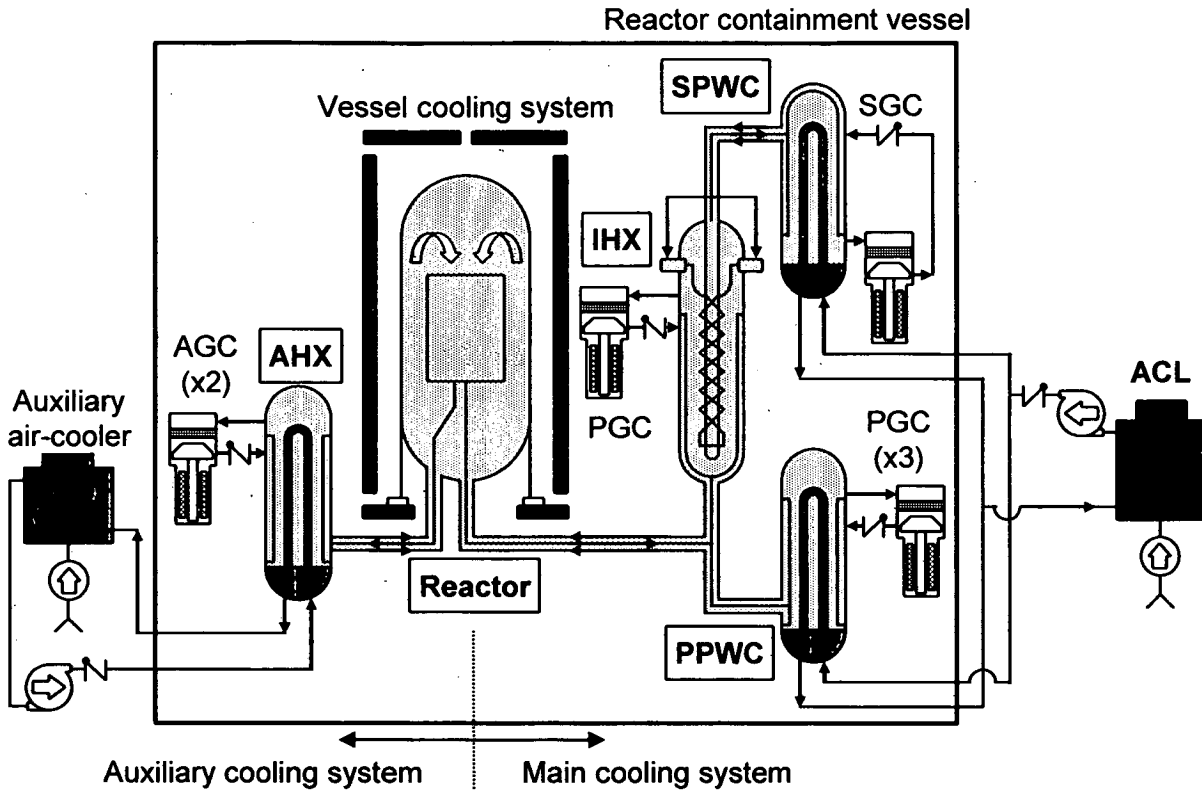
Operation name		Operation mode	Date
In-service operation (1)	RP-1	Rated / Parallel	2003/5/31~6/17
In-service operation (2)	RS-2	Rated / Single	2003/2/13~3/14
In-service operation (3)	RP-3	Rated / Parallel	2003/5/16~5/21
In-service operation (4)	RS-4	Rated / Single	2003/8/8~8/11
In-service operation (5)	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 4.4 Comparison of designed UA with evaluated UA

	Designed	Evaluated (PT-5P, 2004.6.19)
Exchanged heat (kW)	29,988	29,099
ACL inlet pressurized water temperature (°C)	133	137
ACL outlet pressurized water temperature (°C)	91	78
Pressurized water flow mass rate (t/h)	606	417.6
ACL inlet air temperature (°C)	33	25
ACL outlet air temperature (°C)	82	81
Air flow mass rate (t/h)	2,178	1,846
UA (kW/K)	553.1	530.2
Difference (%)	95.8	

Table 5.1 Calculation condition for the ACL heat removal performance

Operation mode	Rated operation		High temperature test operation	
	Single	Parallel	Single	Parallel
Operation name	RS-5	RP-1	PT-5S	PT-5P
Date	2004.2.16	2002.6.10	2004.4.23	2004.6.22
Exchanged heat at ACL	28,070	28,890	28,016	29,269
PPWC pressurized water				
Flow mass rate (t/h)	626	415	618	410
Inlet temperature (°C)	106	118	100	104
Outlet temperature (°C)	145	156	140	143
ACL air inlet temperature (°C)	0 ~ 40			
ACL air flow mass rate (t/h)	1,585.9			
	1,720.8			
	1,856.9			



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

Fig. 2.1 The HTTR cooling system

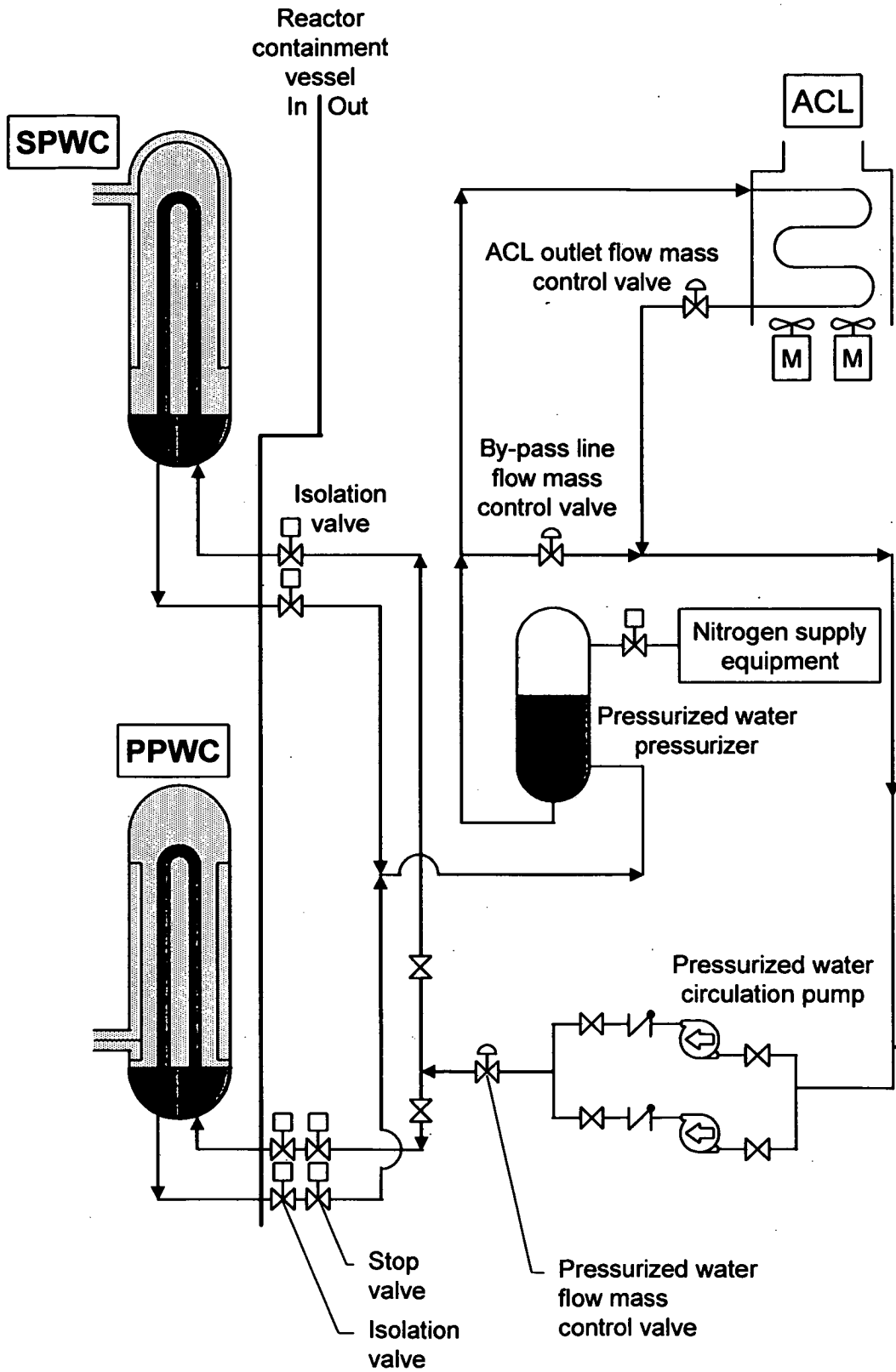


Fig. 2.2 The HTTR pressurized water cooling system

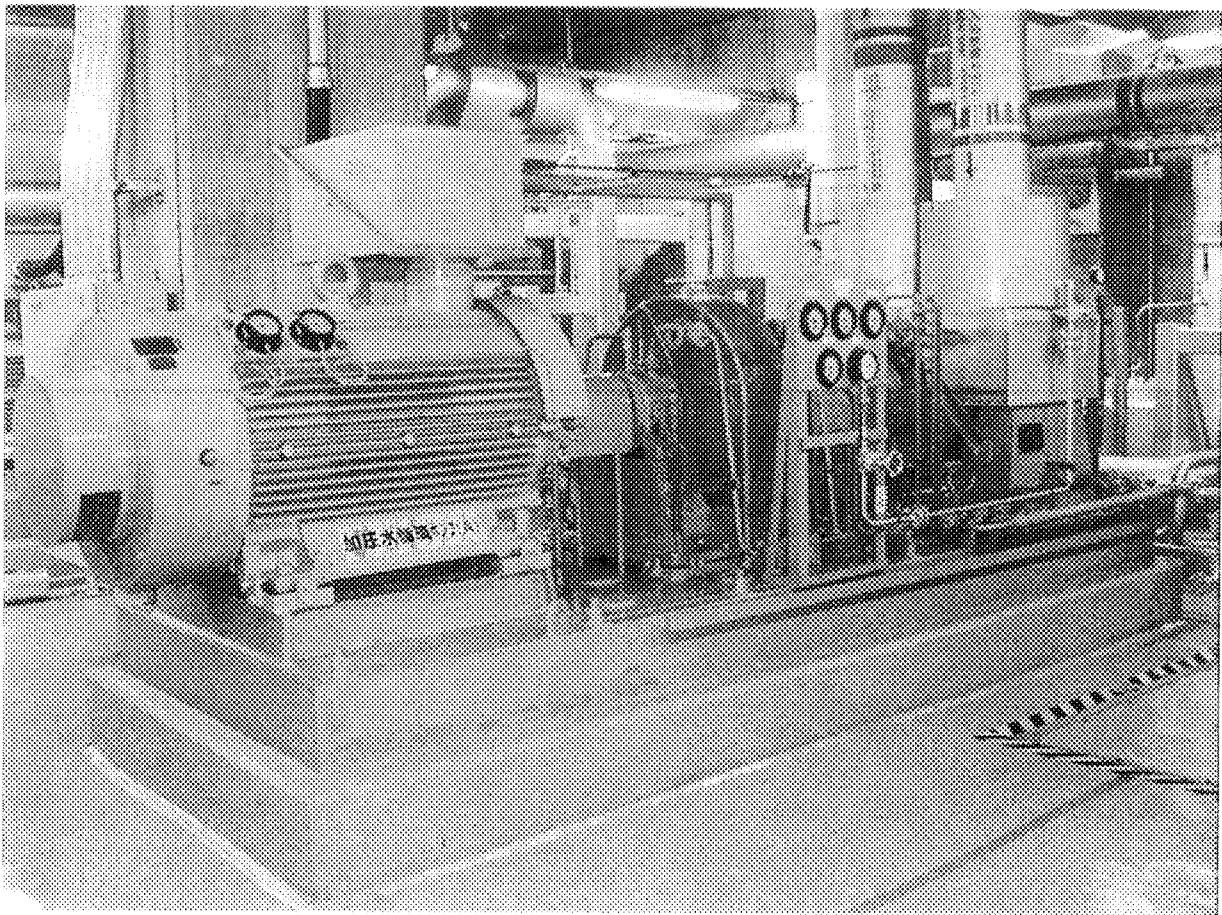


Fig. 2.3 The pressurized water circulation pump

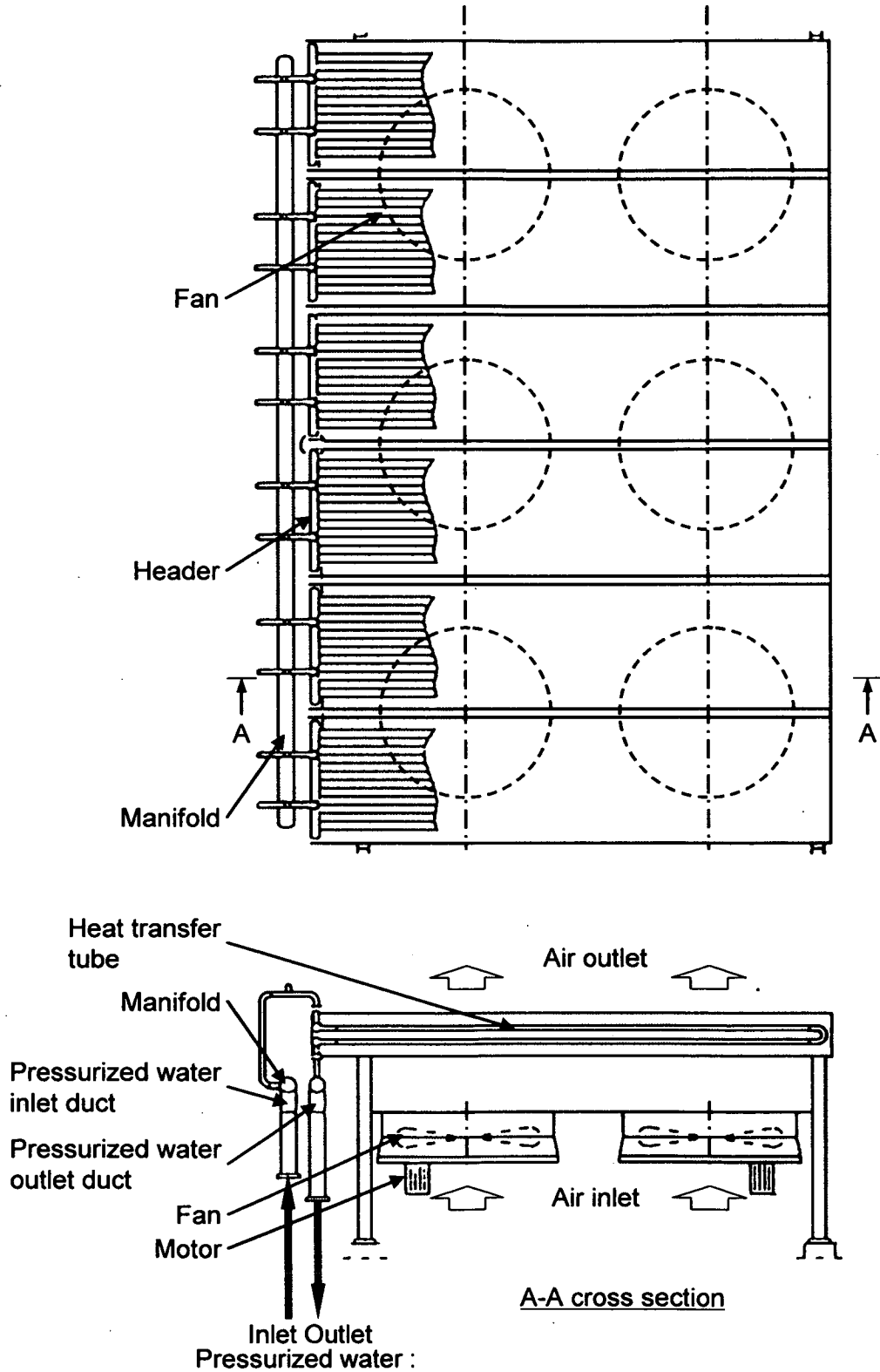


Fig. 2.4 Structural diagram of the ACL

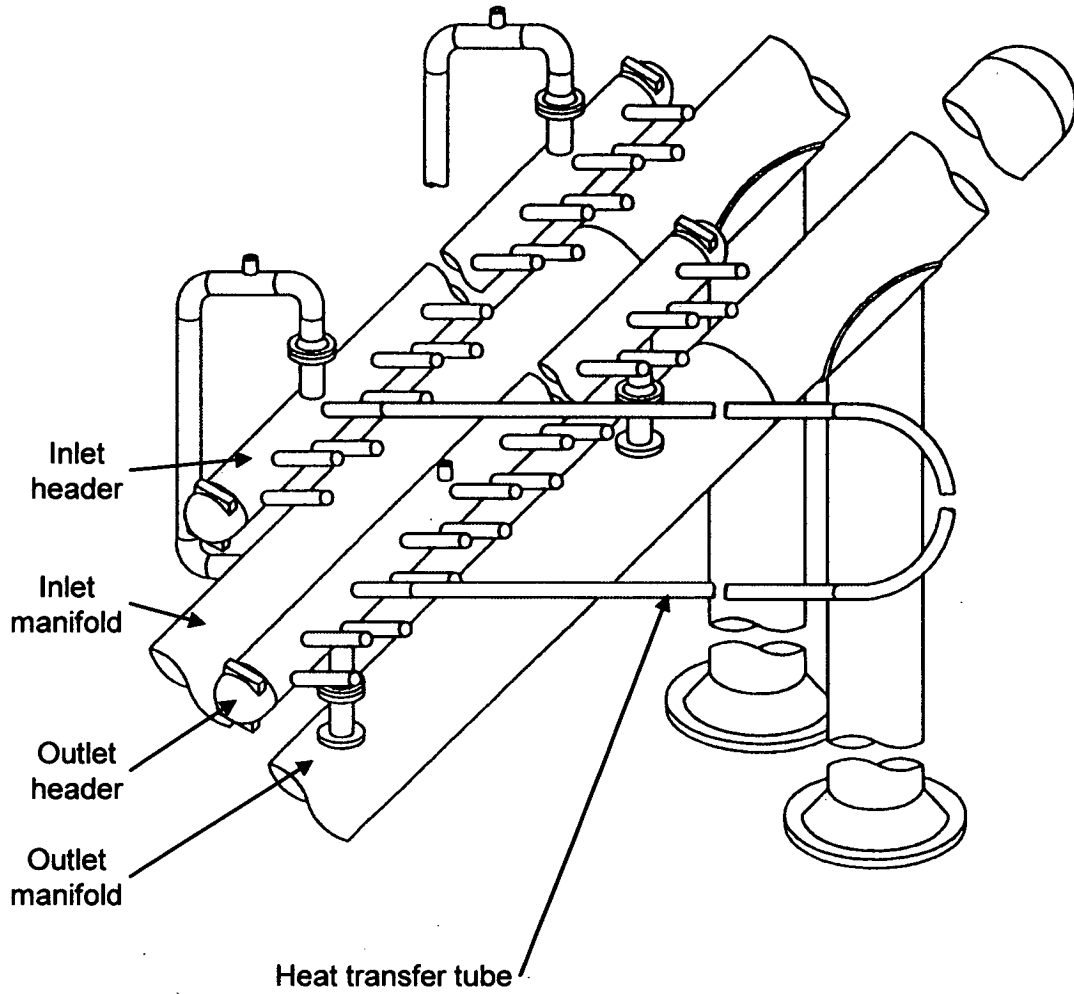


Fig. 2.5 Structural diagram of the ACL manifold, header and heat transfer tube

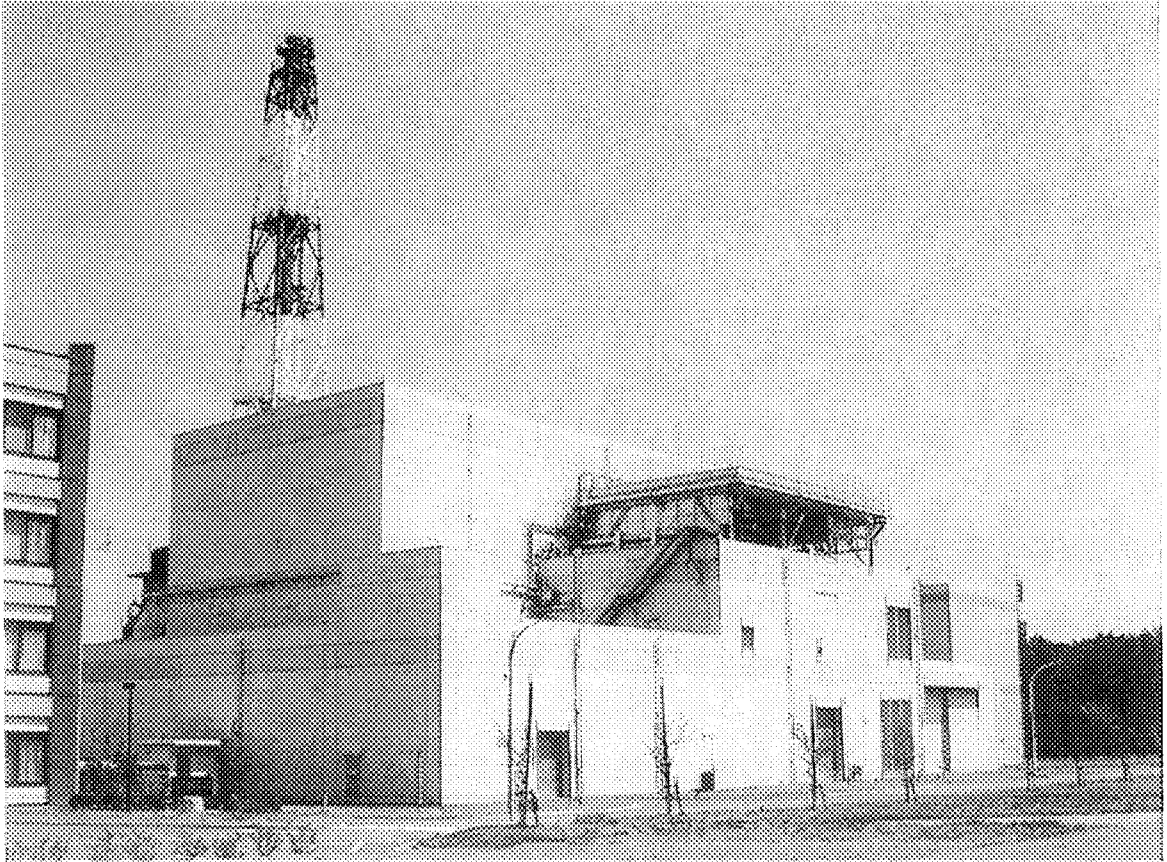


Fig. 2.6 Overall view of the HTTR reactor building

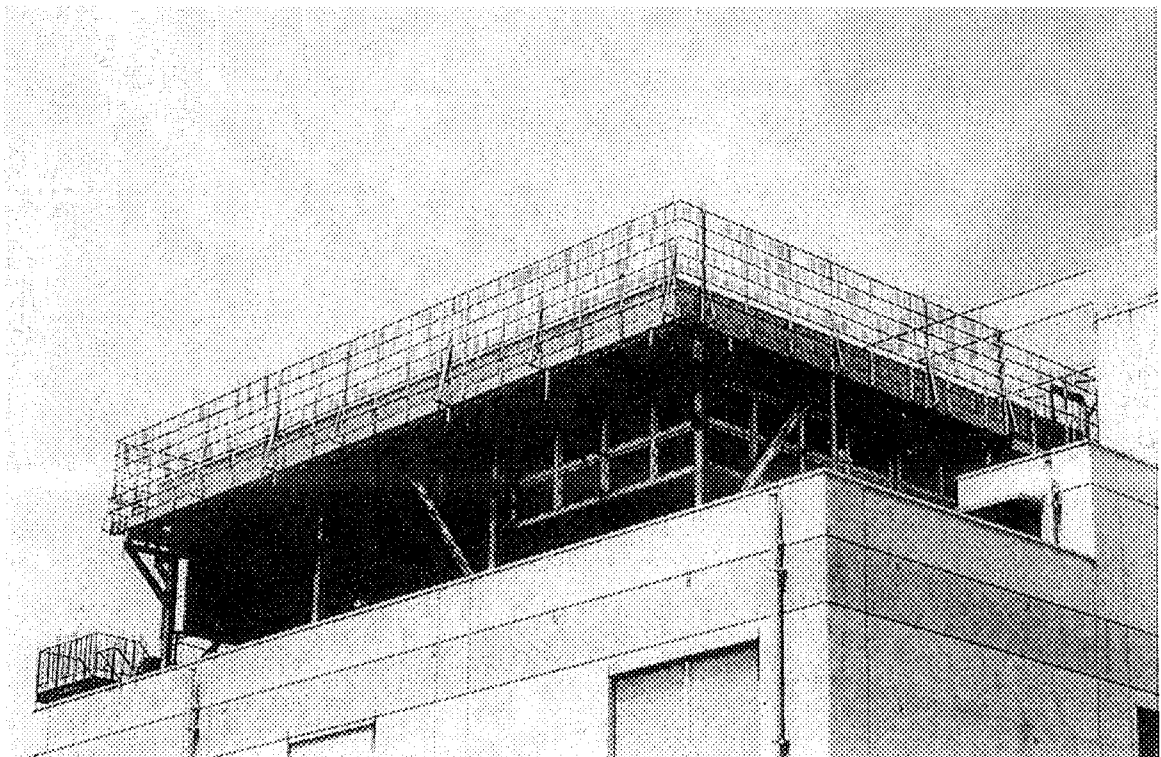


Fig. 2.7 Overall view of the ACL

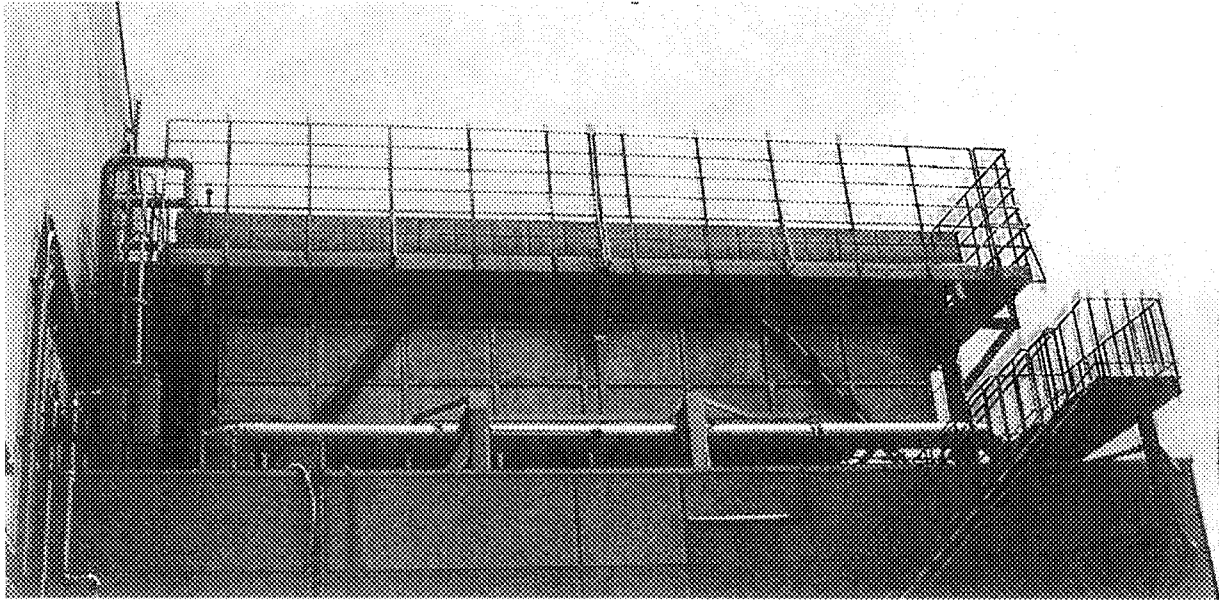


Fig. 2.8 Side-view of the ACL

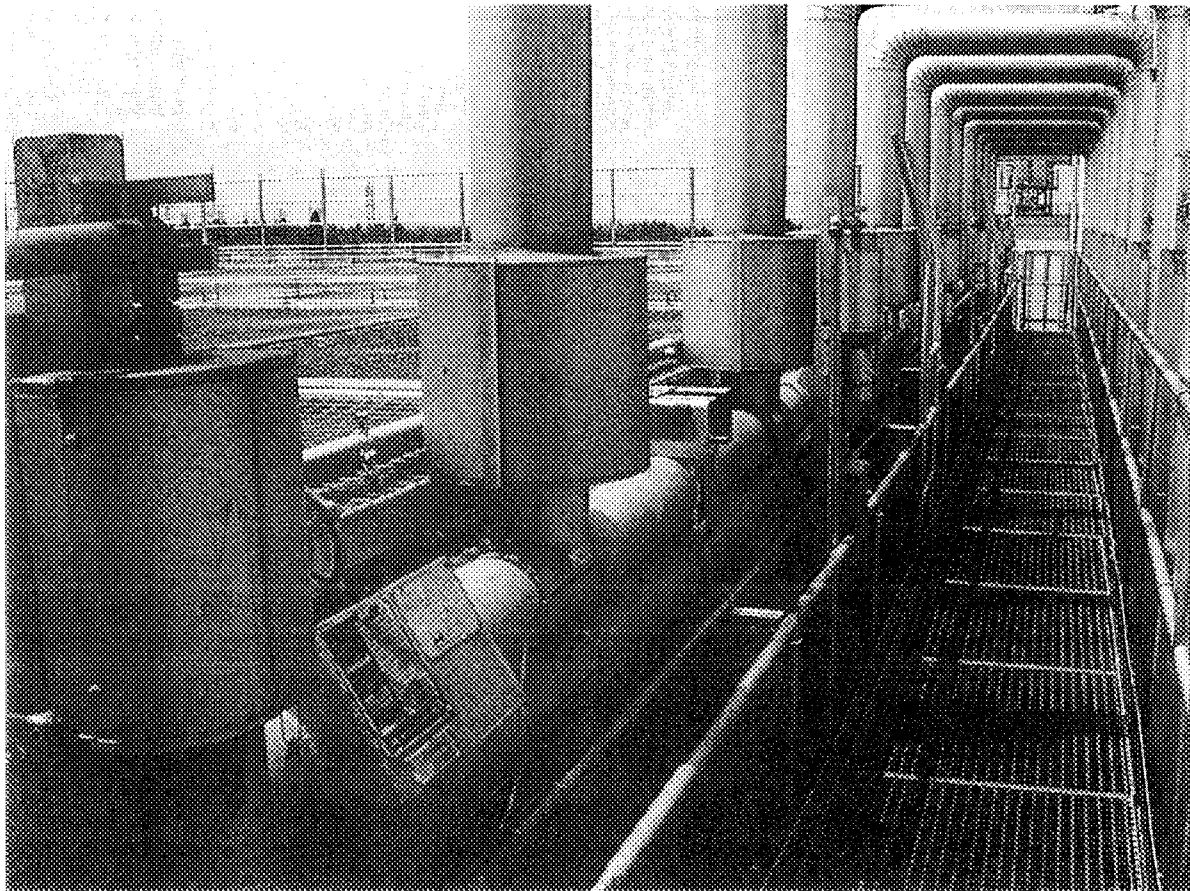


Fig. 2.9 Upper and lower hot header

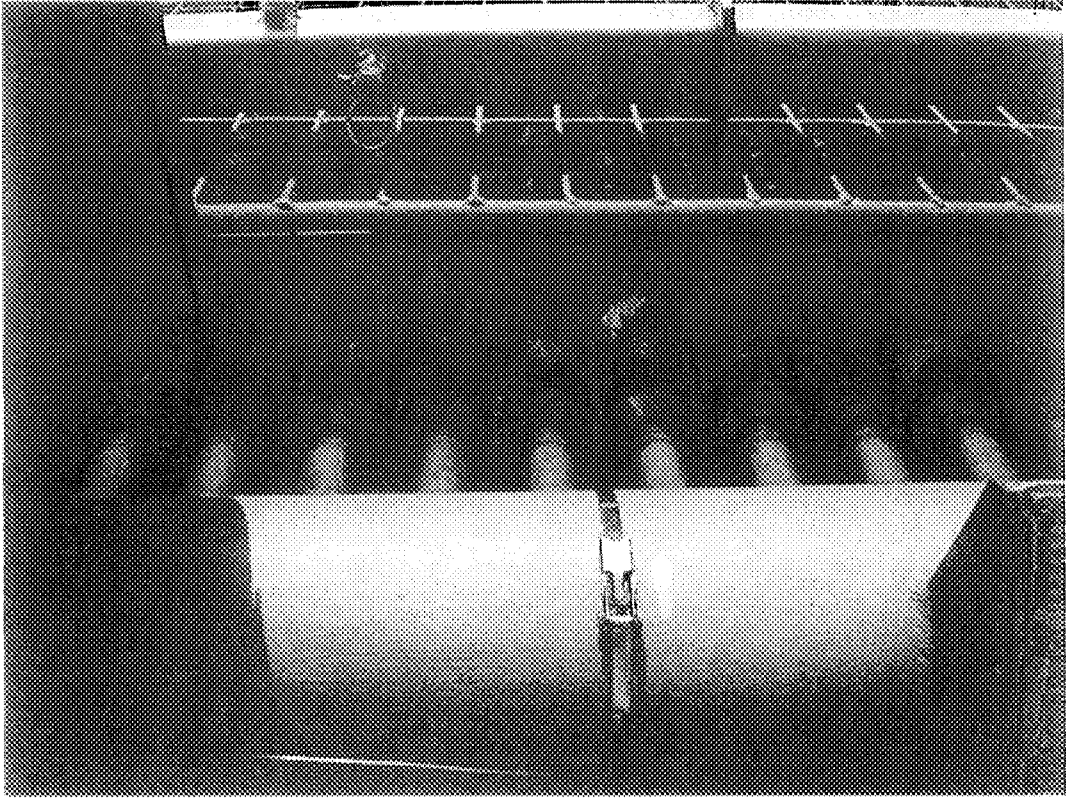


Fig 2.10 Header and heat transfer fin tube

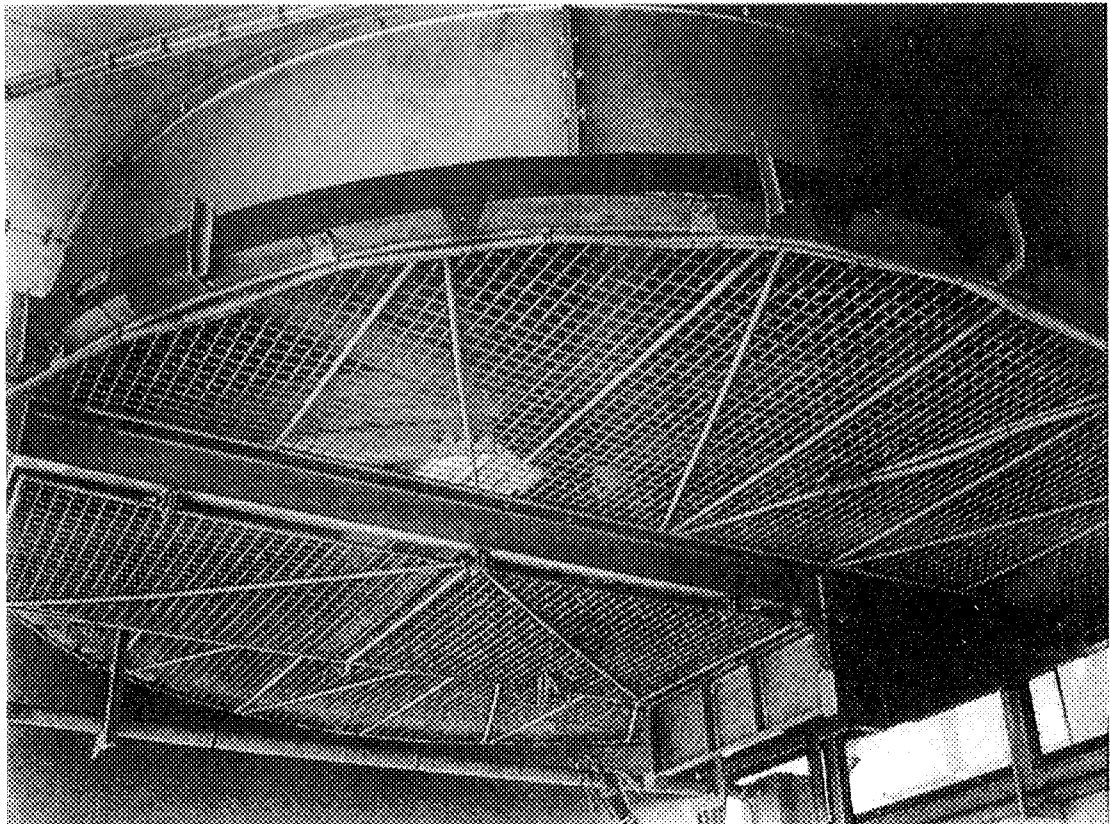


Fig. 2.11 ACL fan

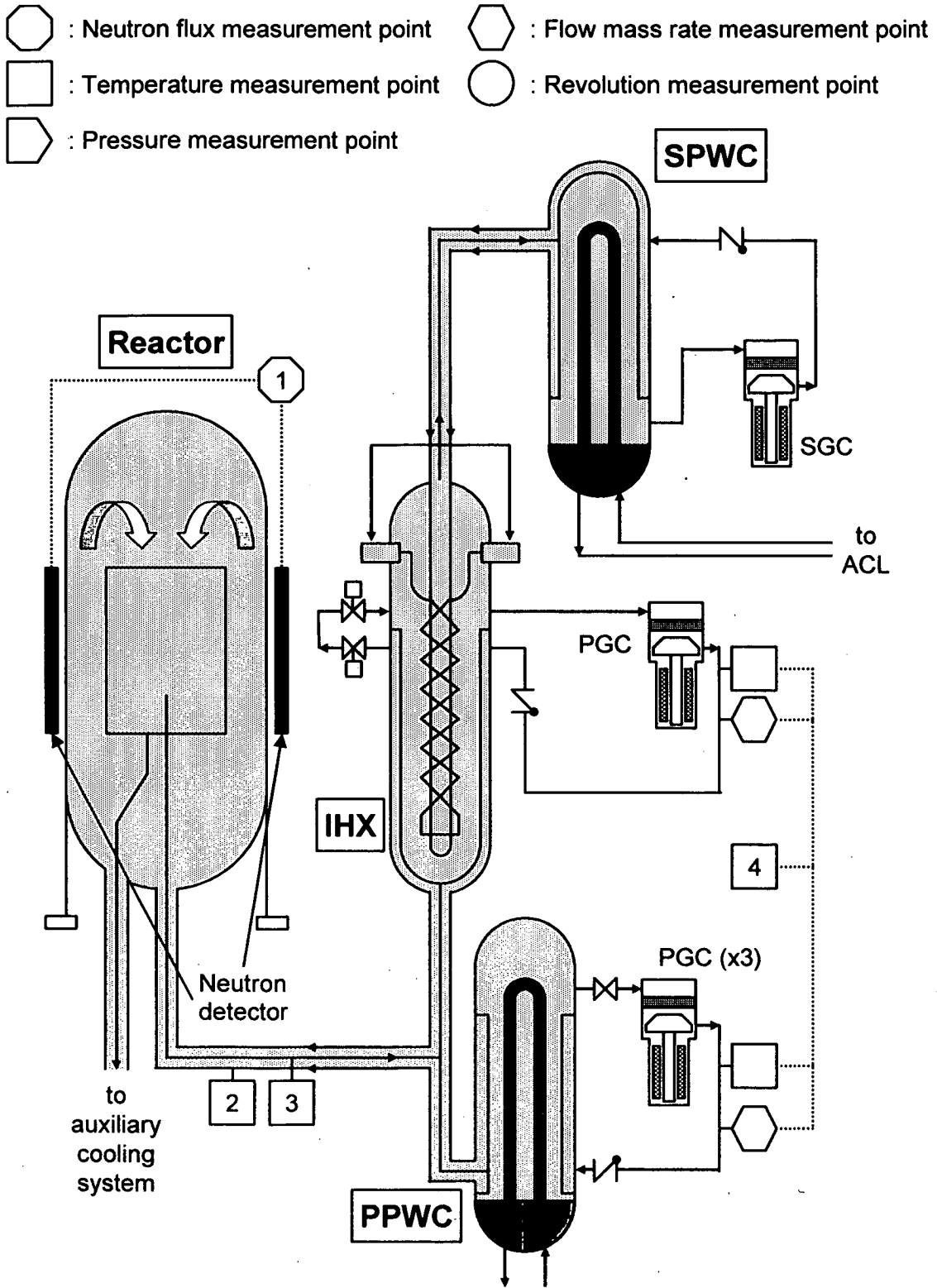


Fig. 4.1 Measurement point in the primary / secondary helium cooling system

- ◇ : Valve opening measurement point
- : Temperature measurement point
- ▱ : Pressure measurement point
- ⬡ : Flow mass rate measurement point
- ⊕ : Water level measurement point

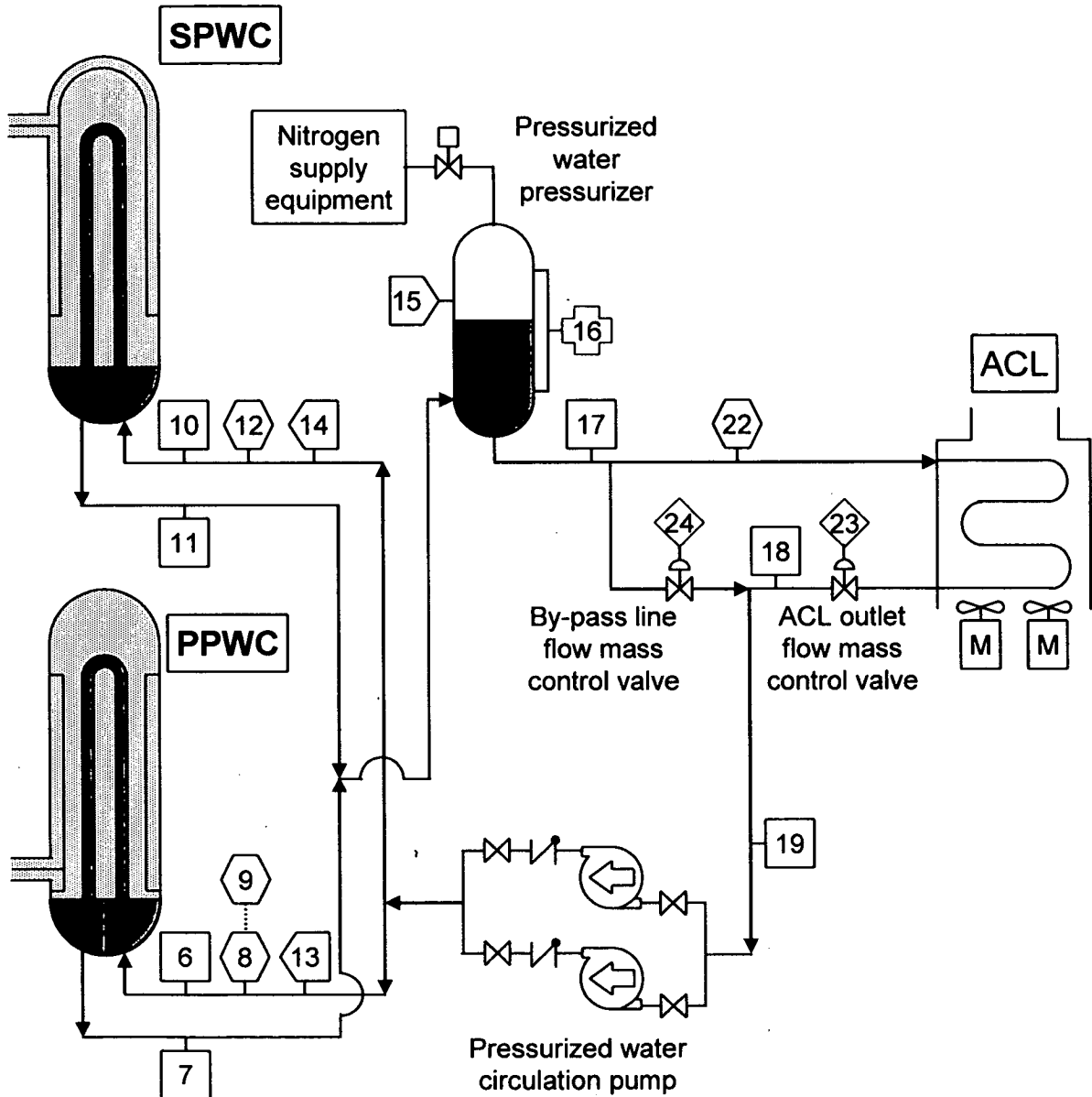


Fig. 4.2 Measurement point in the pressurized water cooling system

□ : Temperature measurement point ⬡ : Flow rate measurement point

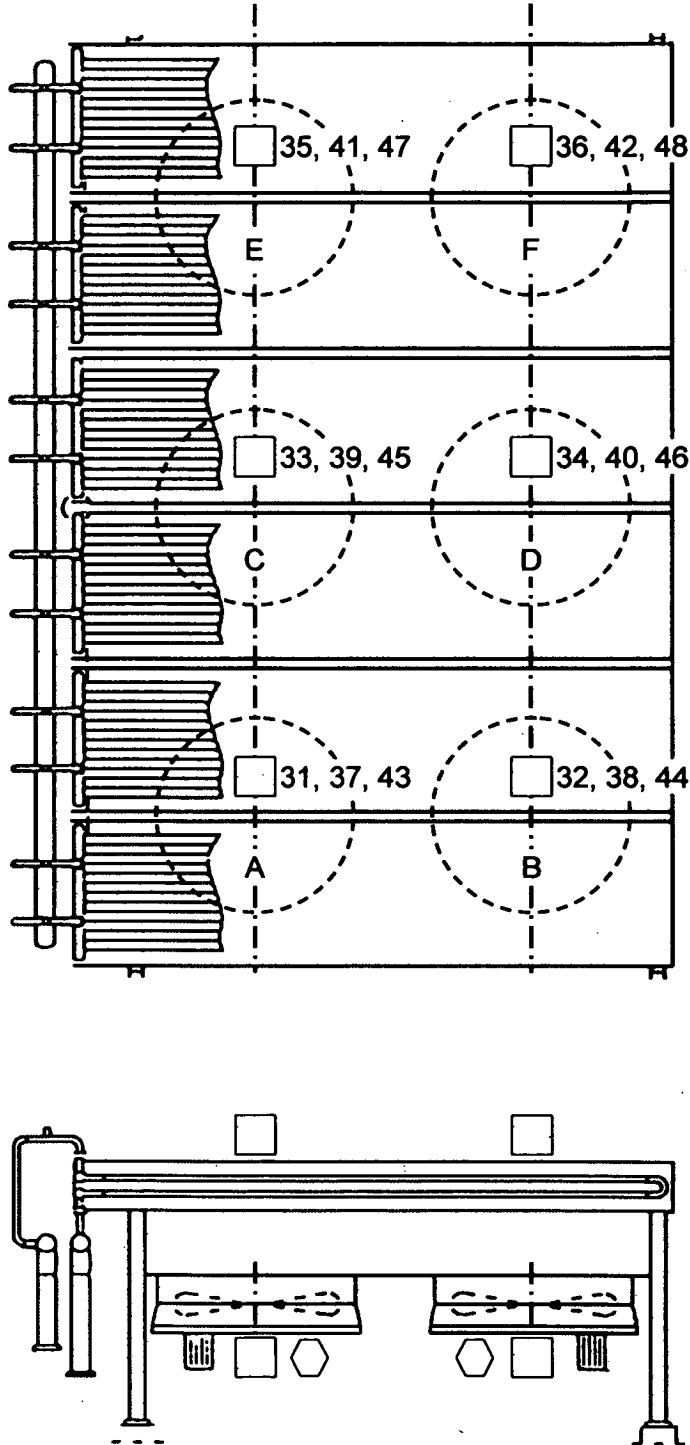


Fig. 4.3 Measurement point at the ACL

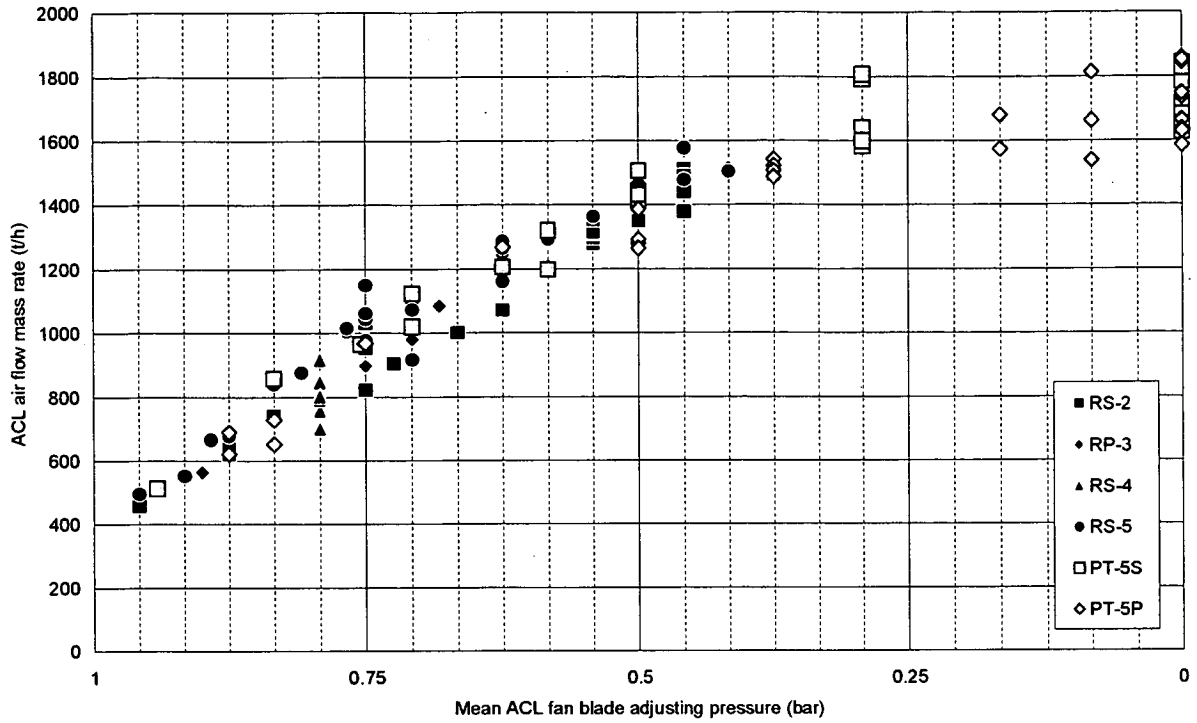


Fig. 4.4 Relationship between G_{Air}^{ACL} and mean fan blade adjusting pressure

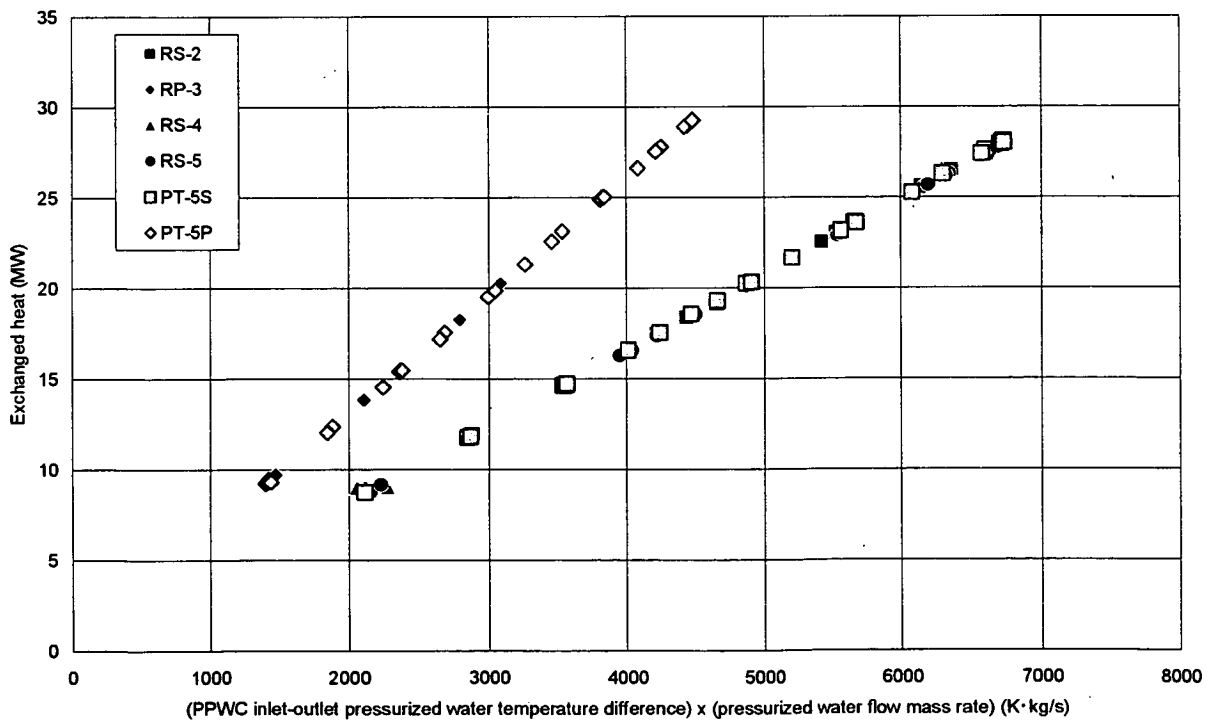


Fig. 4.5 Relationship between Q^{ACL} and $G_{Water}^{PPWC}(T_{Water}^{PPWC_OUT} - T_{Water}^{PPWC_IN})$

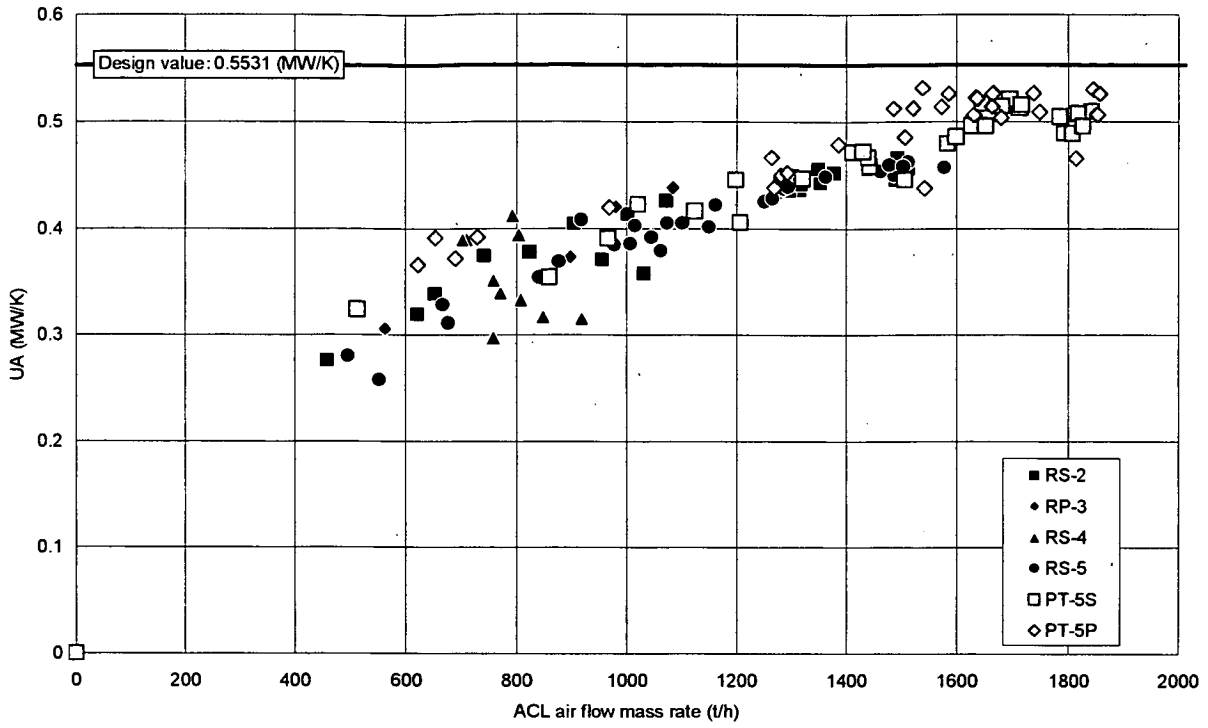


Fig. 4.6 Relationship between $(UA)^{ACL}$ and G_{Air}^{ACL}

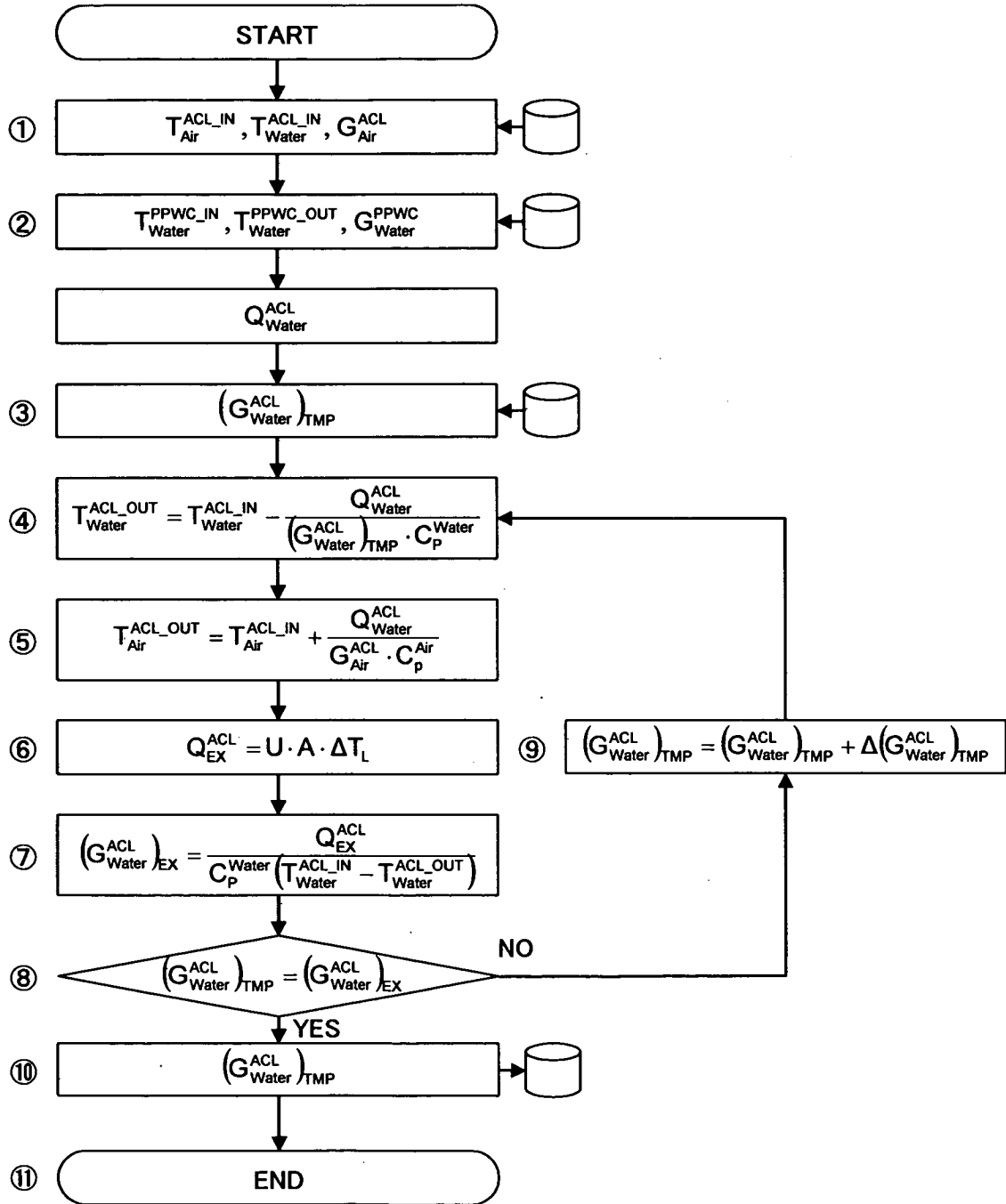


Fig. 5.1 Flowchart of heat removal performance calculation.

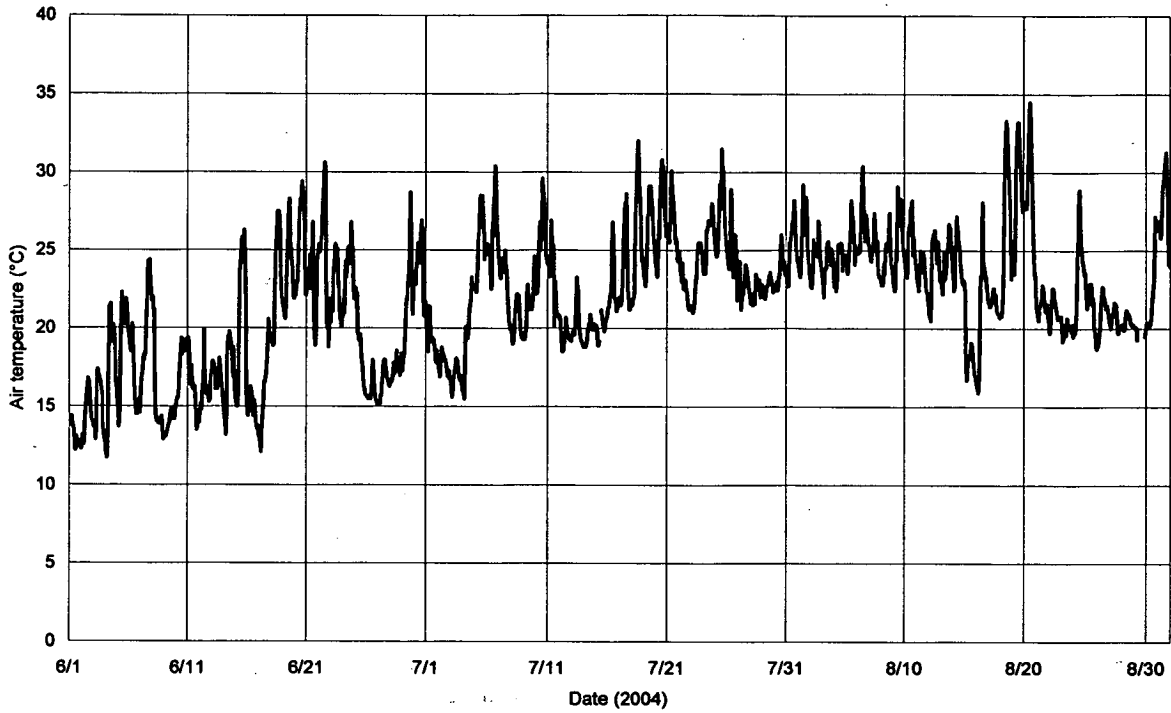


Fig. 5.2 Time variation of air temperature

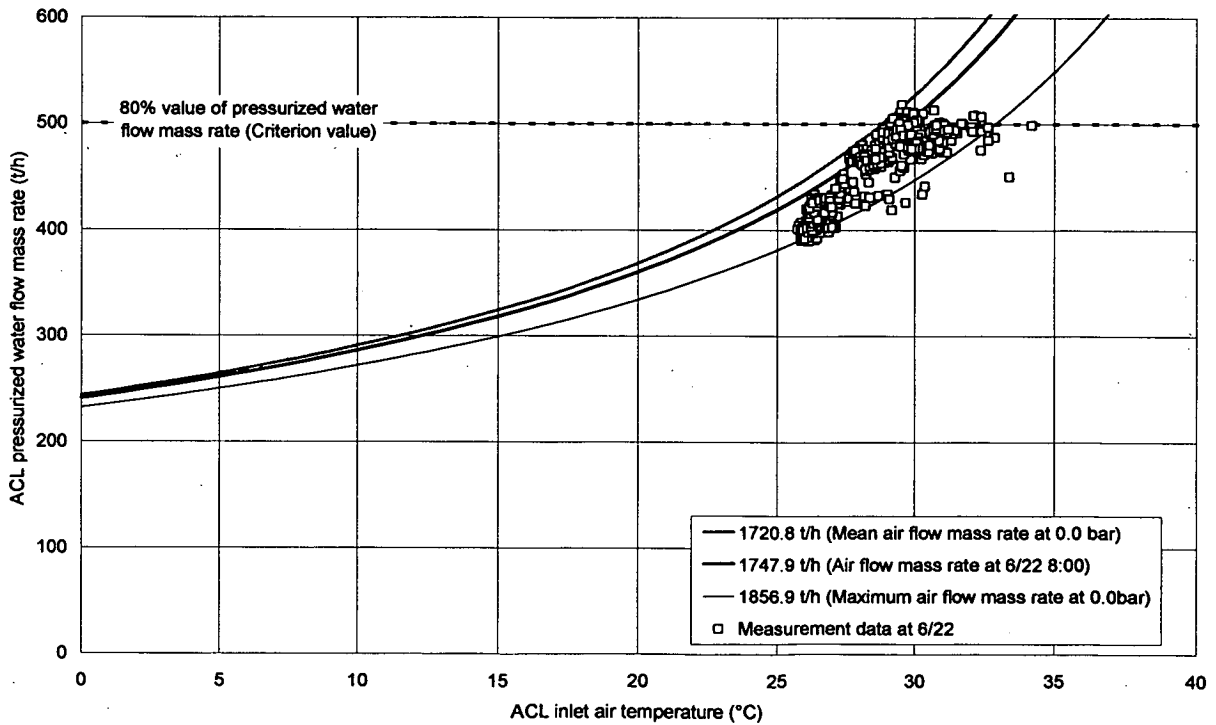


Fig. 5.3 Estimation and measurement of G_{Water}^{ACL}

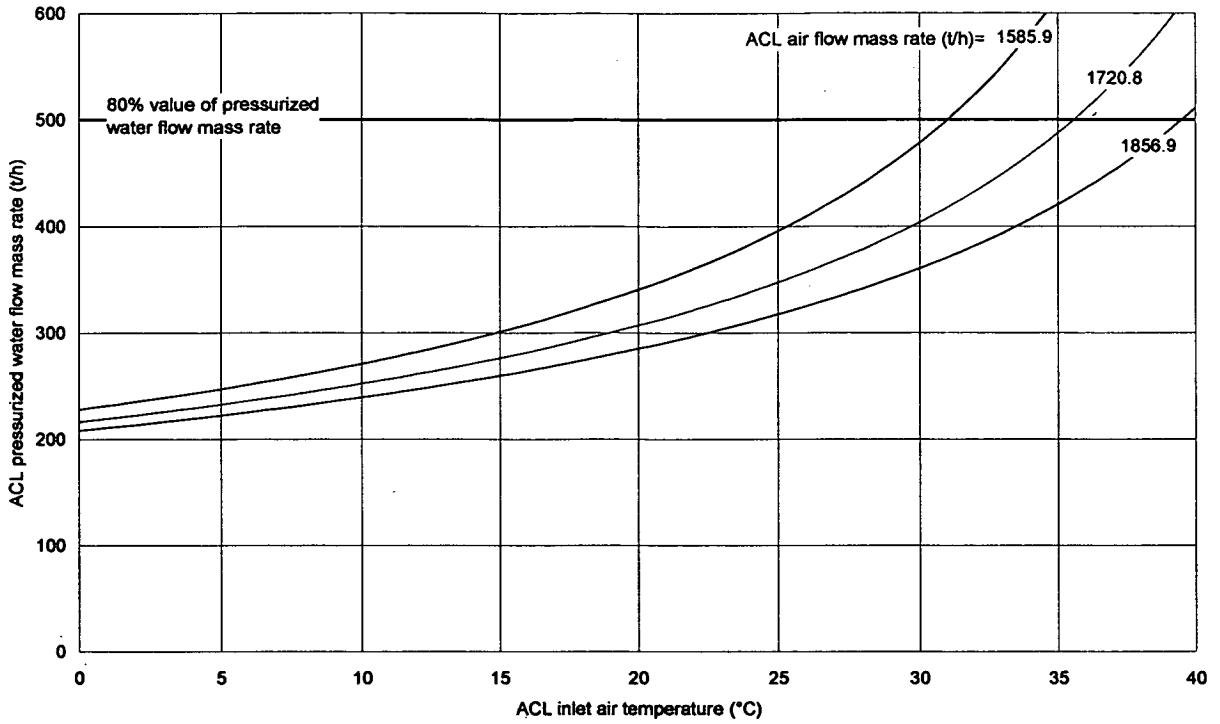


Fig. 5.4 Relationship between $T_{Air}^{ACL_IN}$ and G_{Water}^{ACL} (Rated operation / single-loaded)

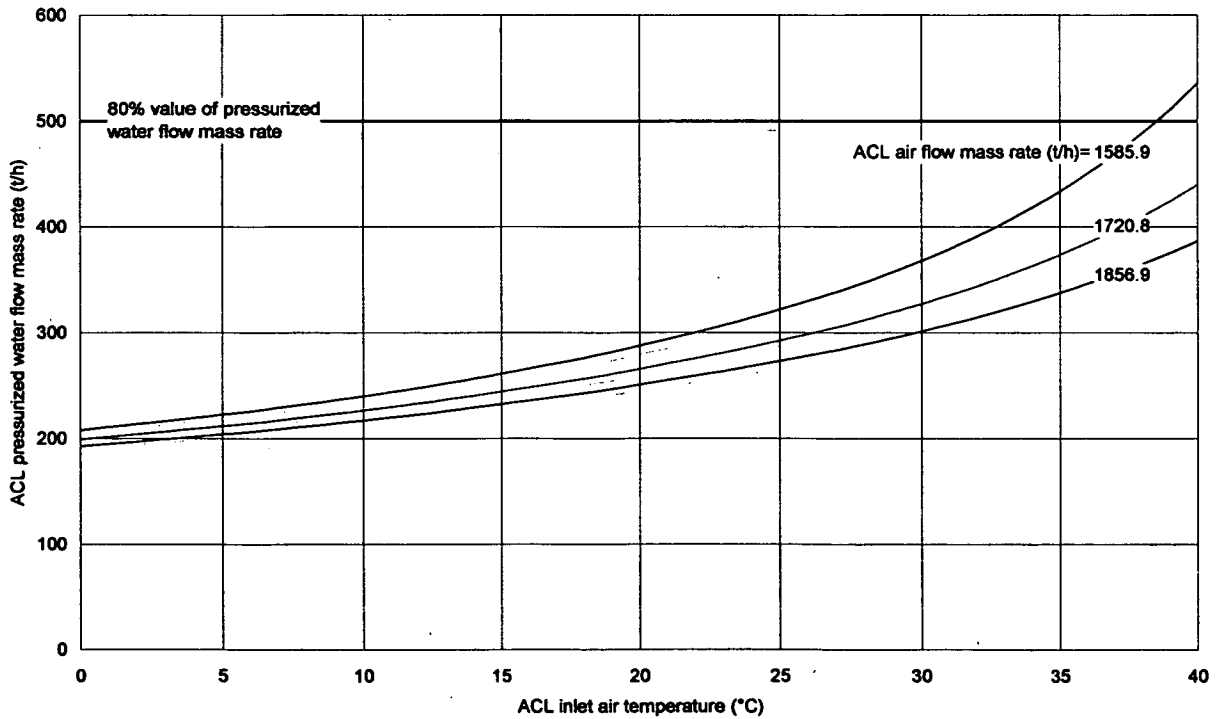


Fig. 5.5 Relationship between $T_{Air}^{ACL_IN}$ and G_{Water}^{ACL} (Rated operation / parallel-load)

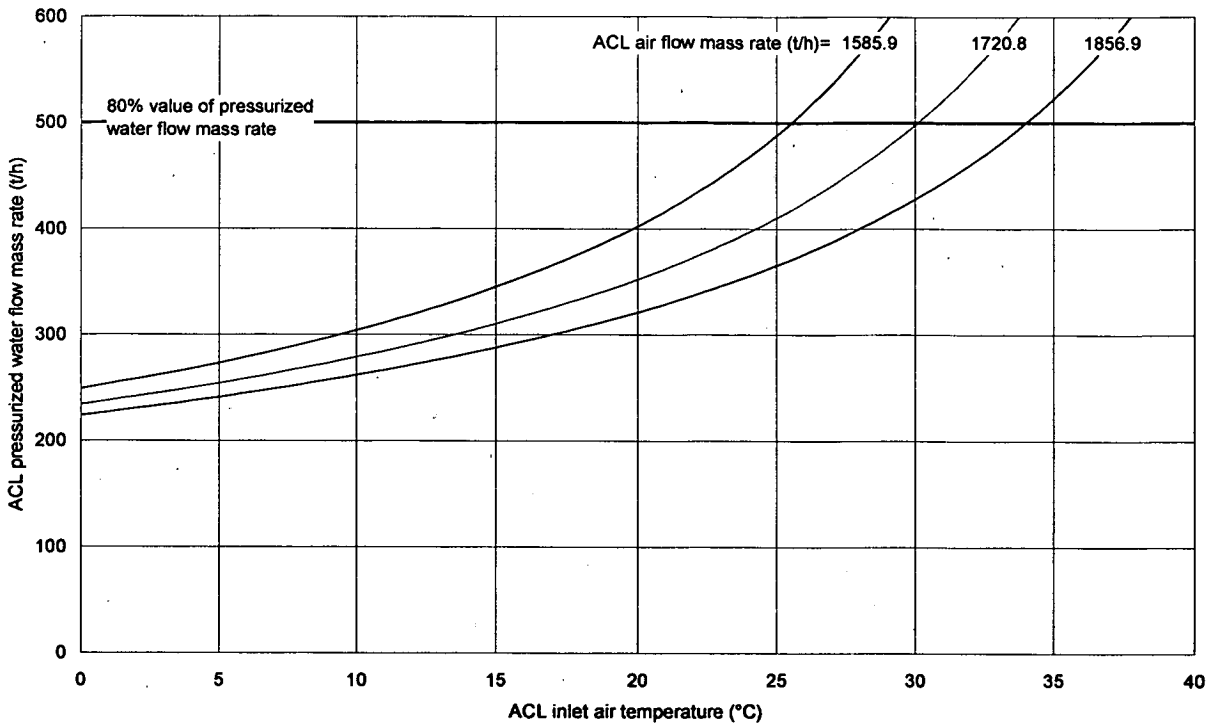


Fig. 5.6 Relationship between T_{Air}^{ACL-IN} and G_{Water}^{ACL} (High temperature test operation / single-loaded)

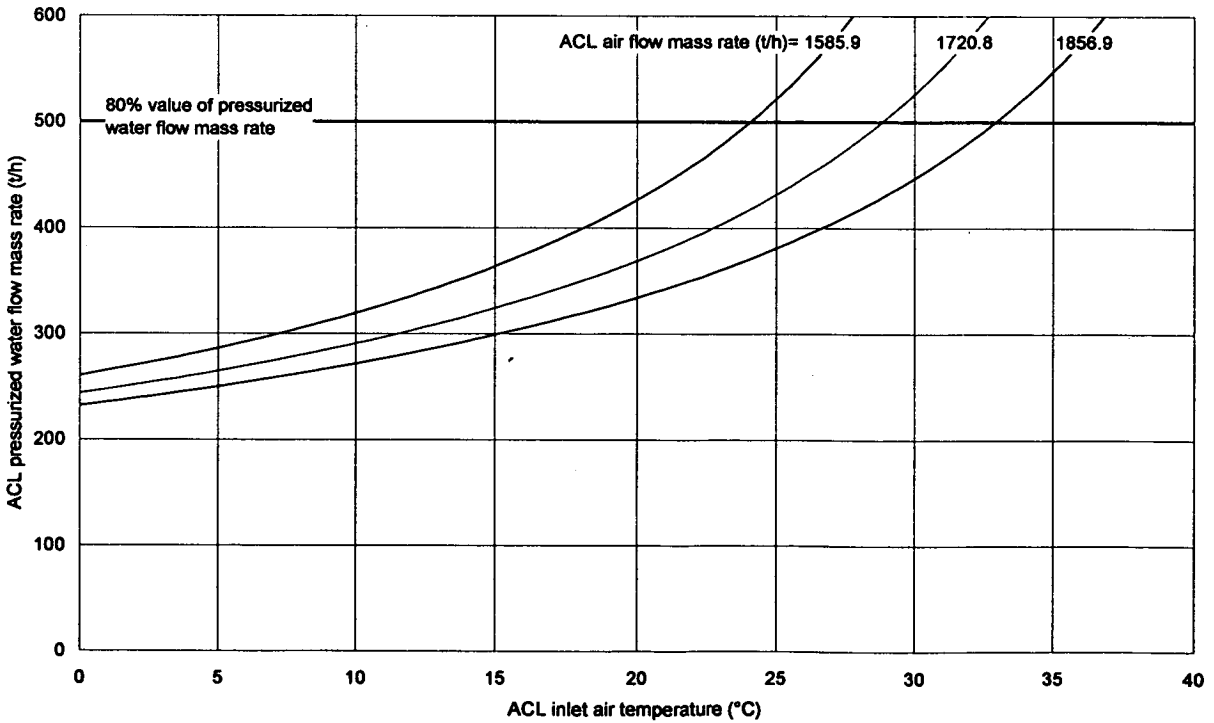


Fig. 5.7 Relationship between T_{Air}^{ACL-IN} and G_{Water}^{ACL} (High temperature test operation / parallel-loaded)

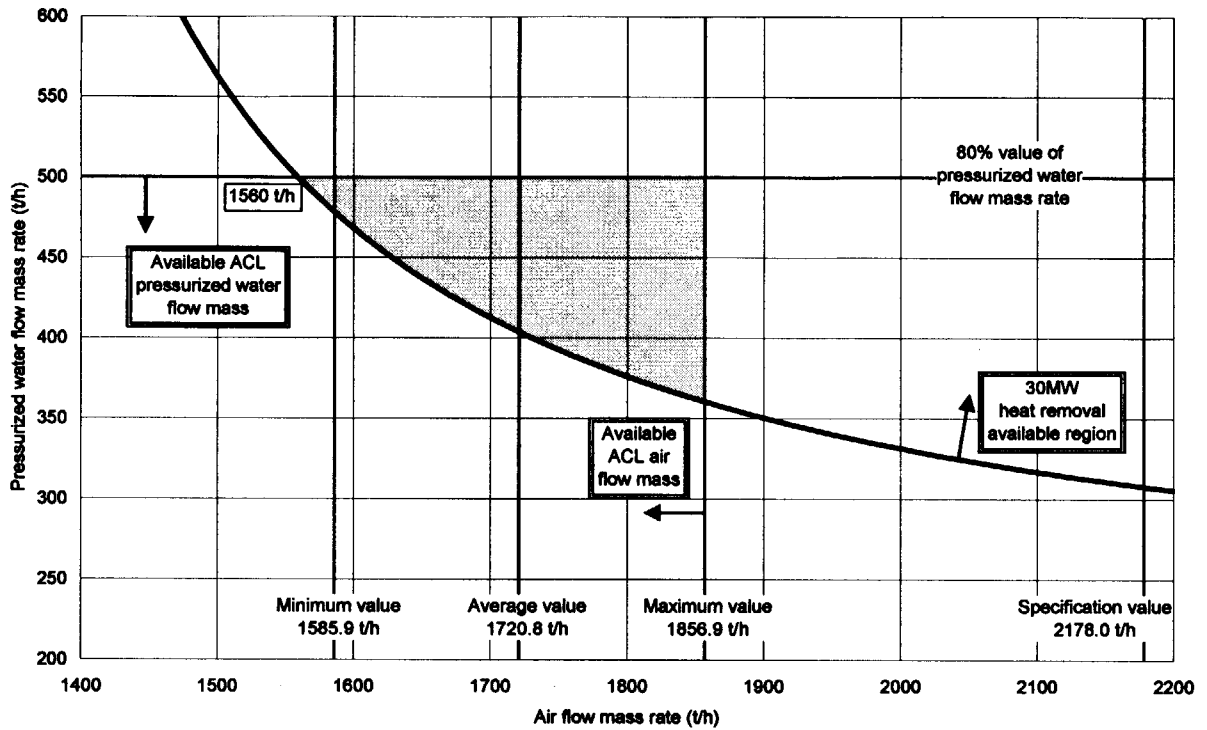


Fig. 5.8 Available region of full power operation at $T_{Air}^{ACL,IN} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ (Rated operation / single-loaded)

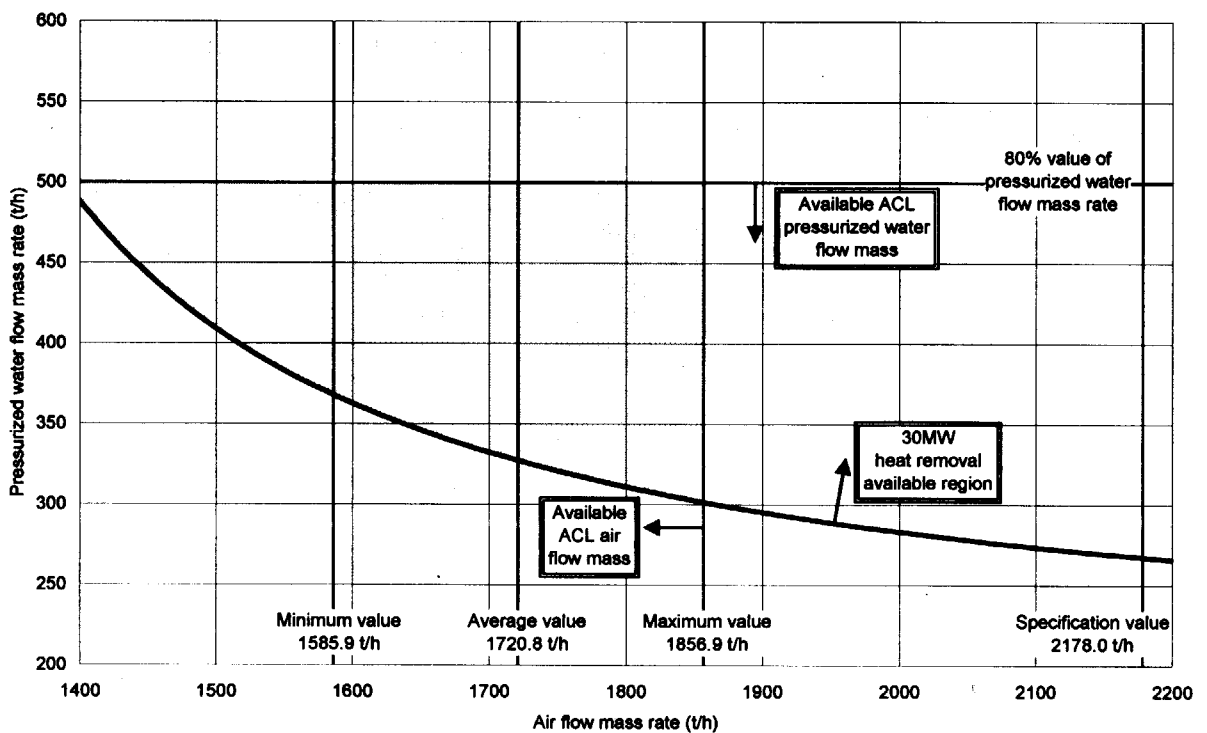


Fig. 5.9 Available region of full power operation at $T_{Air}^{ACL,IN} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ (Rated operation / parallel-loaded)

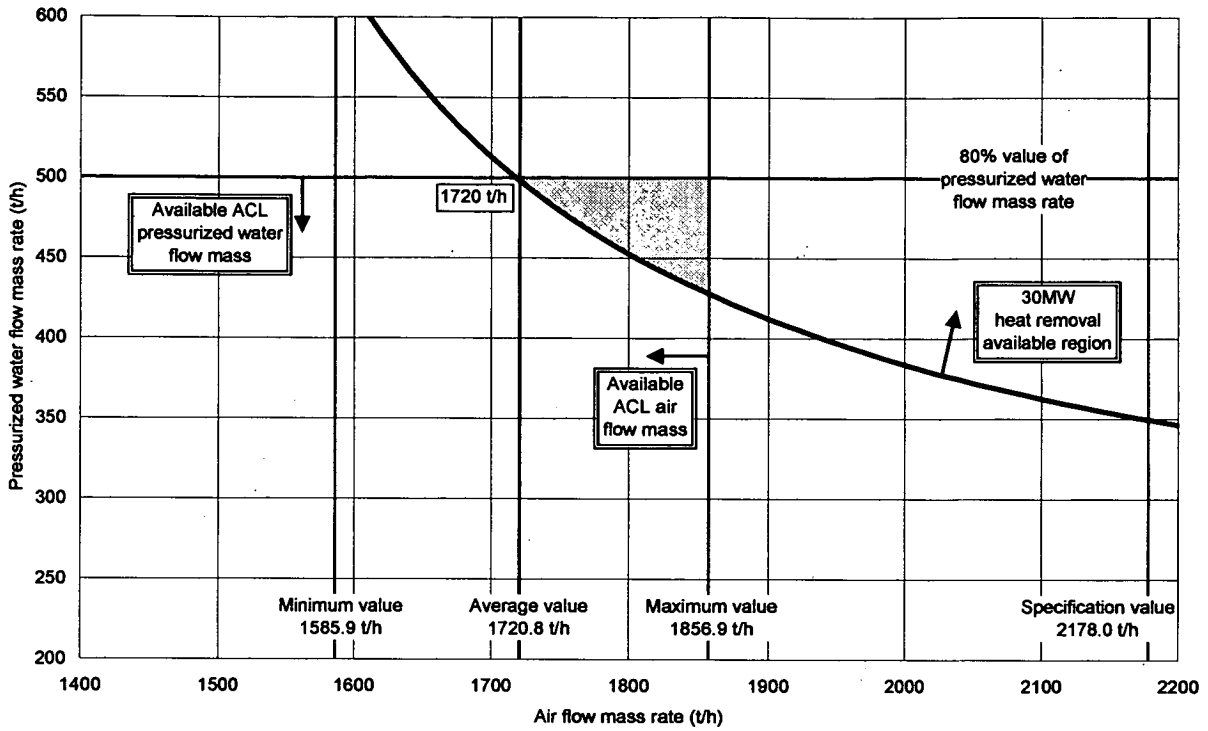


Fig. 5.10 Available region of full power operation at $T_{Air}^{ACL,IN} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (High temperature test operation / single-loaded)

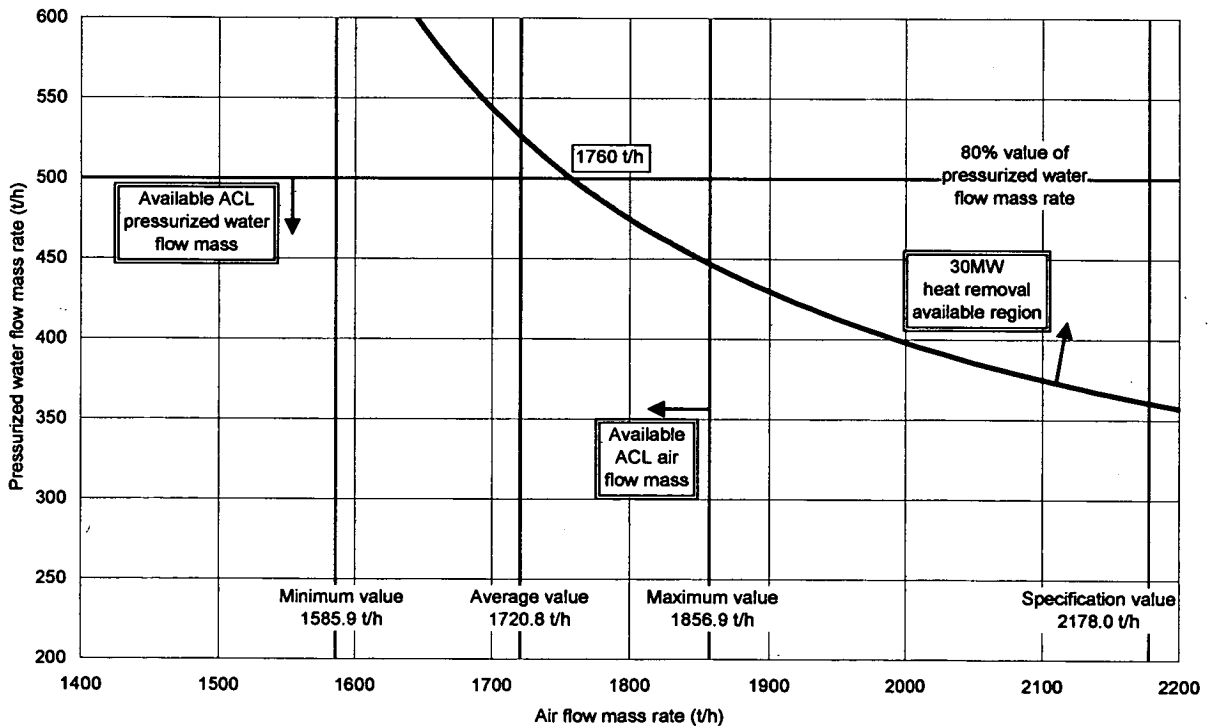


Fig. 5.11 Available region of full power operation at $T_{Air}^{ACL,IN} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (High temperature test operation / parallel-loaded)

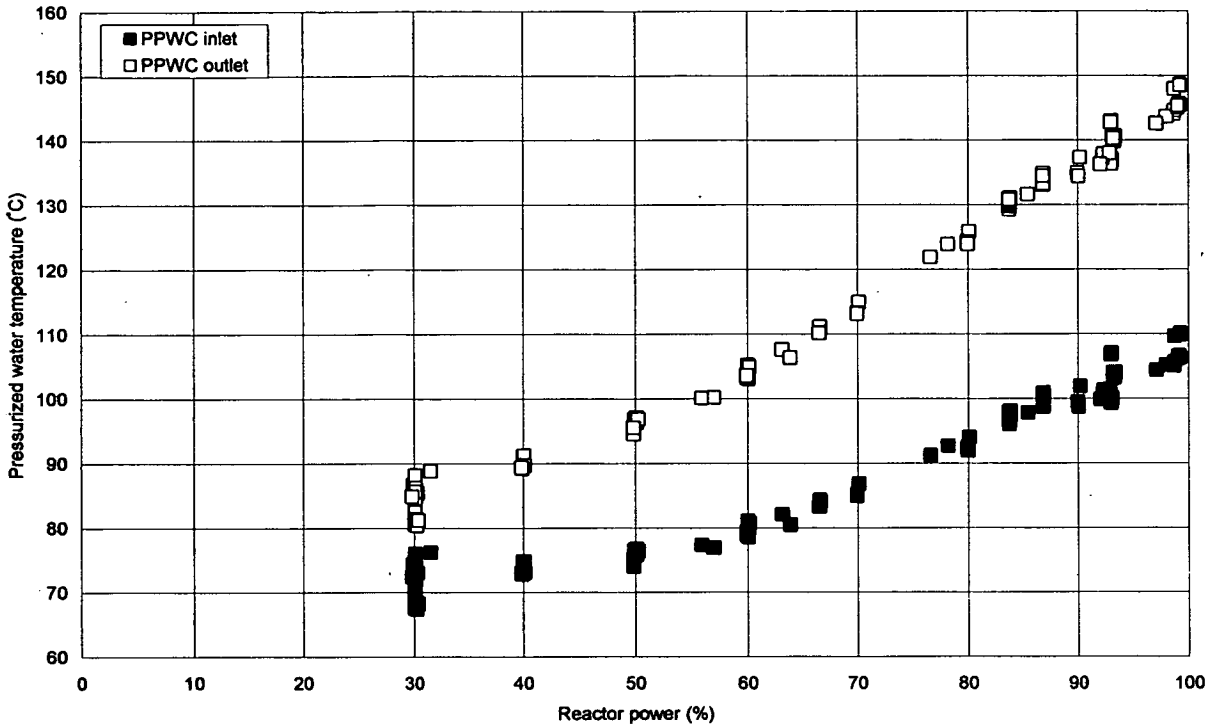


Fig. 5.12 Relationship between reactor power and $T_{Water}^{PPWC_IN} / T_{Water}^{PPWC_OUT}$ (Rated operation / single-loaded)

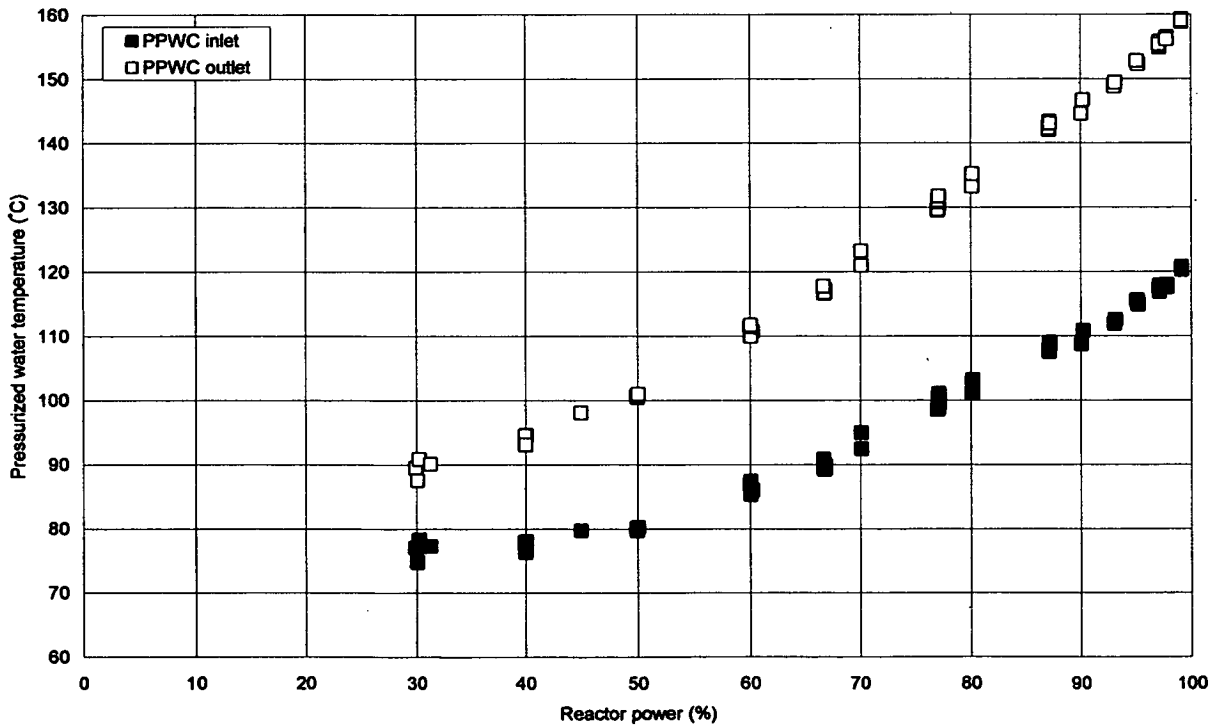


Fig. 5.13 Relationship between reactor power and $T_{Water}^{PPWC_IN} / T_{Water}^{PPWC_OUT}$ (Rated operation / parallel-loaded)

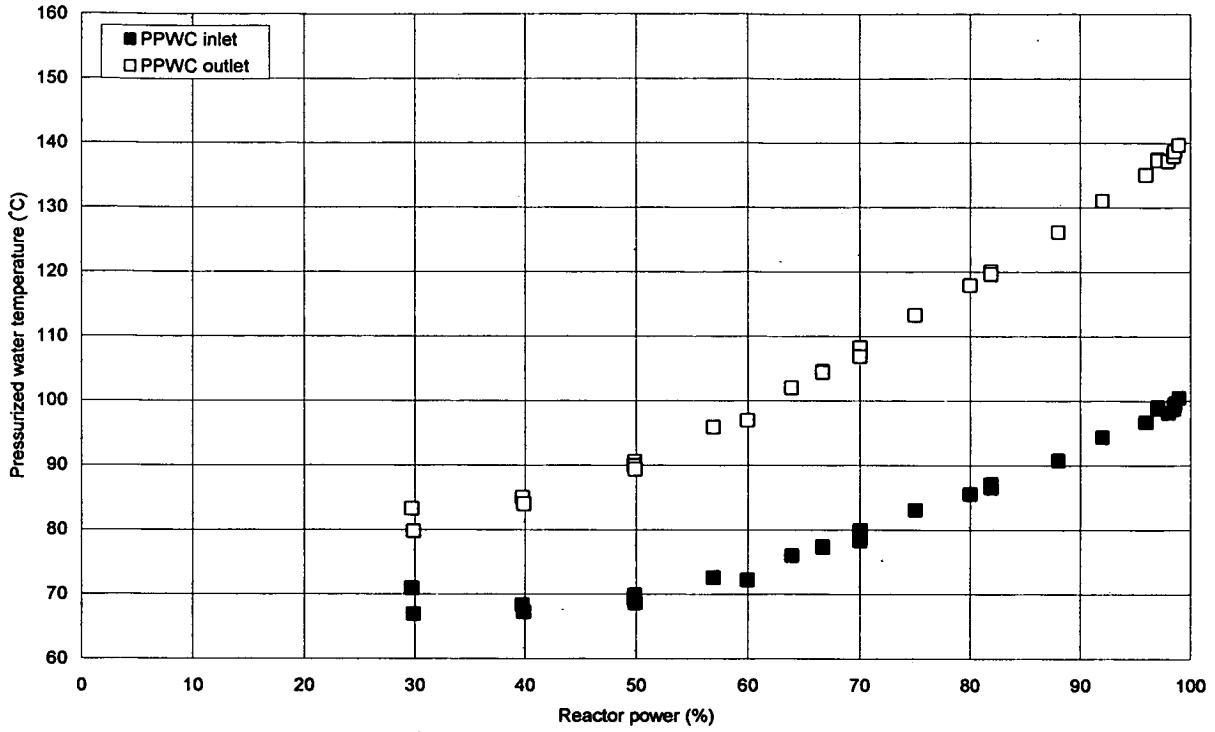


Fig. 5.14 Relationship between reactor power and $T_{Water}^{PPWC_IN} / T_{Water}^{PPWC_OUT}$ (High temperature test operation / single-loaded)

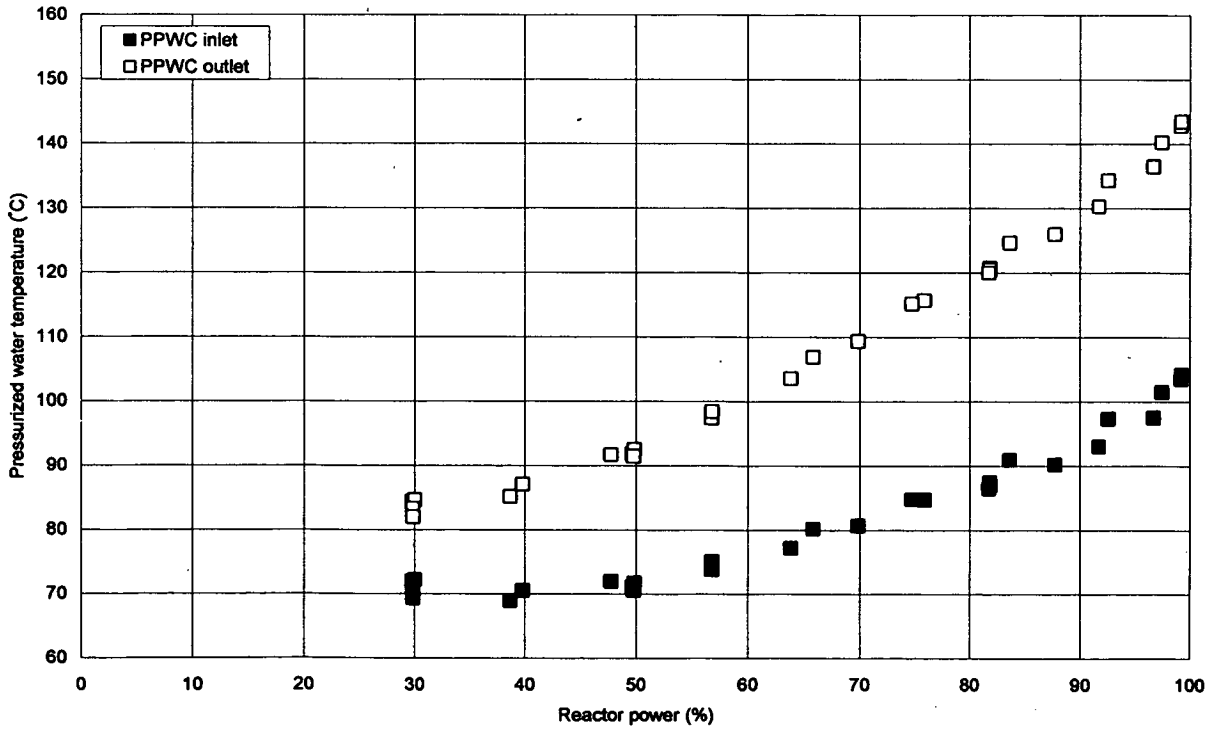


Fig. 5.15 Relationship between reactor power and $T_{Water}^{PPWC_IN} / T_{Water}^{PPWC_OUT}$ (High temperature test operation / parallel-loaded)

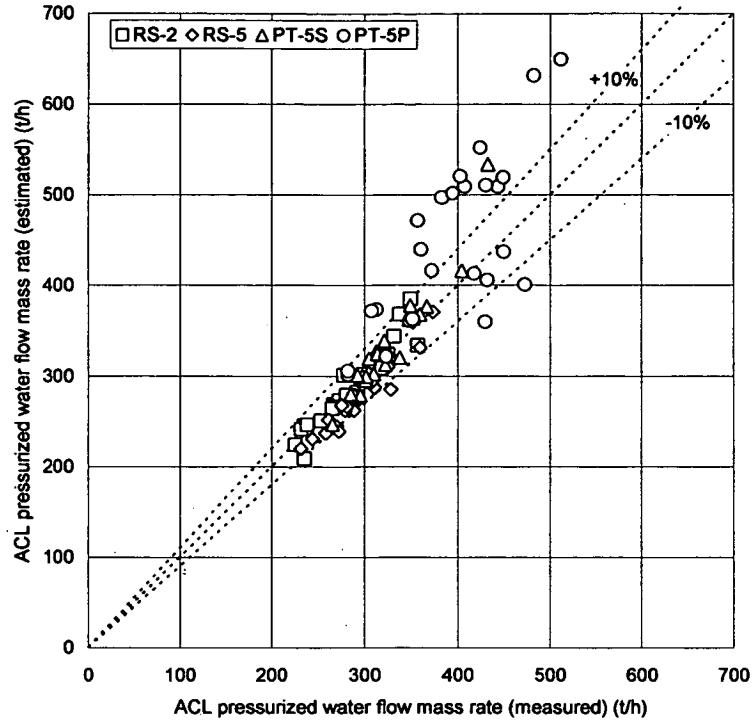


Fig. 5.16 Comparison of estimated G_{Water}^{ACL} with measured one.

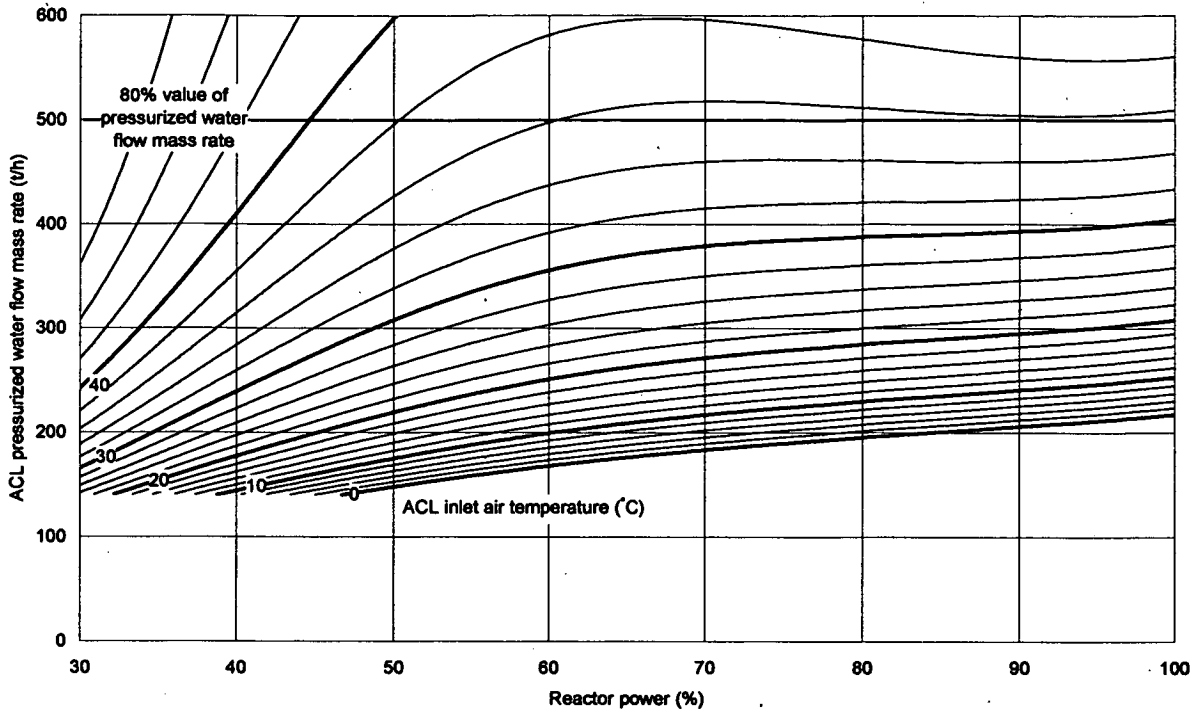


Fig. 5.17 Relationship between reactor power and $G_{\text{Water}}^{\text{ACL}}$ (Rated operation / single-loaded)

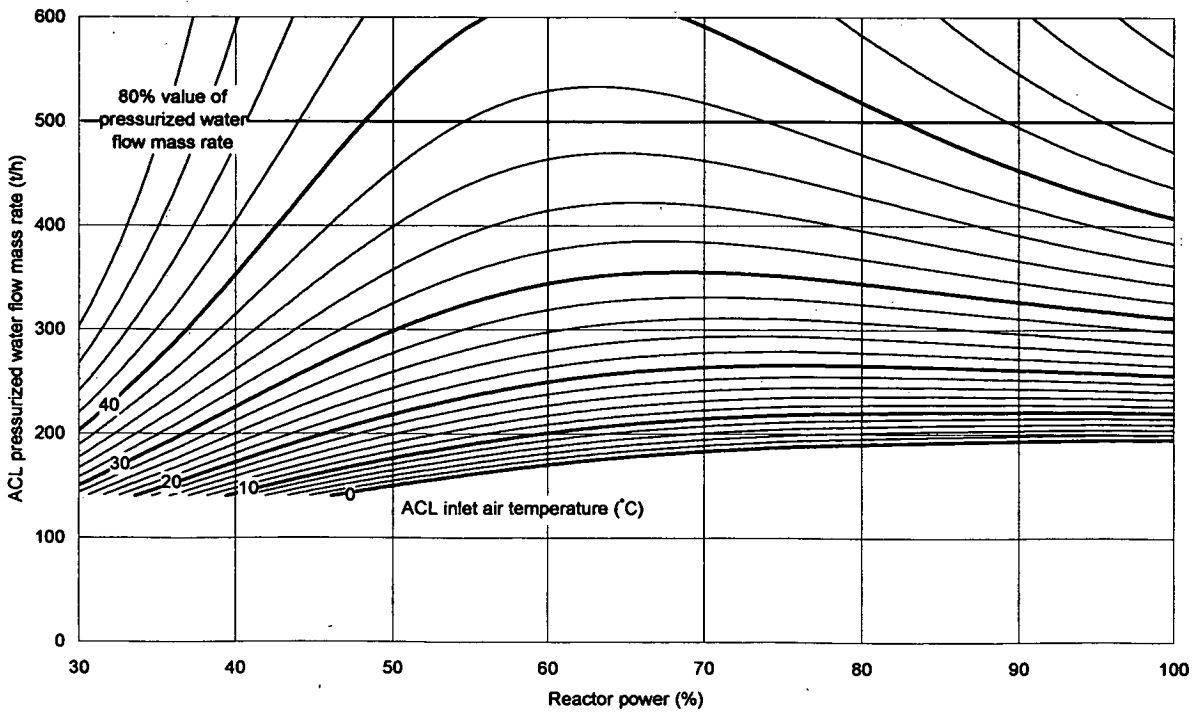


Fig. 5.18 Relationship between reactor power and $G_{\text{Water}}^{\text{ACL}}$ (Rated operation / parallel-loaded)

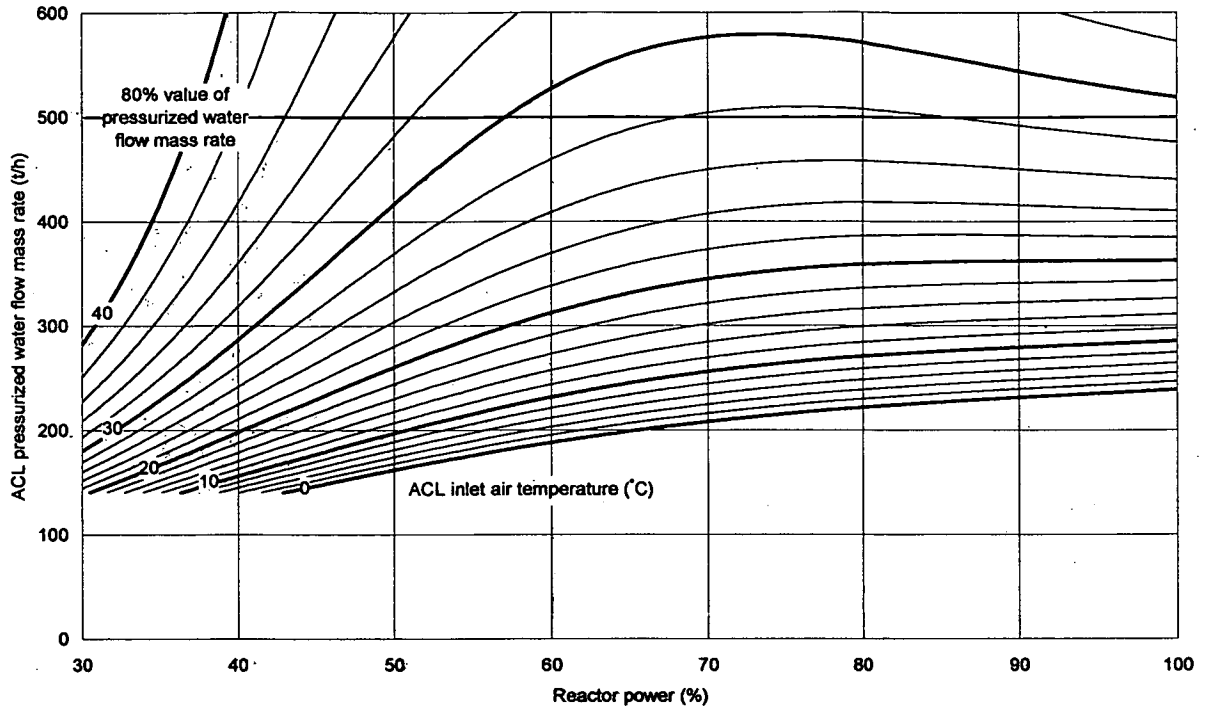


Fig. 5.19 Relationship between reactor power and G_{Water}^{ACL} (High temperature test operation / single-loaded)

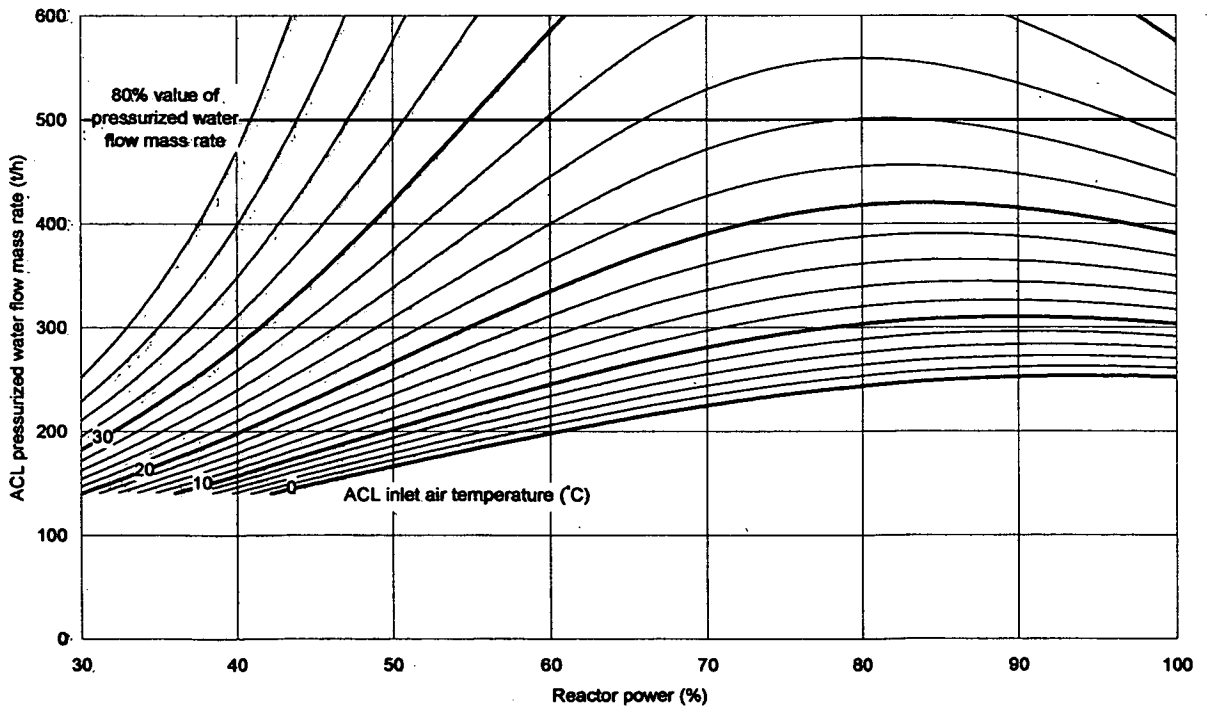


Fig. 5.20 Relationship between reactor power and G_{Water}^{ACL} (High temperature test operation / parallel-loaded)

付録 A ACL の熱流動設計に関する条件および計算結果

This is a blank page.

Table lists in Appendix A

Table A.1	Design condition for ACL.....	54
Table A.2	Estimation result of heat transfer area for ACL.....	54
Table A.3	Pressure drop design condition for ACL	55
Table A.4	Estimation result of pressure drop for ACL	58

Table A.1 Design condition for ACL

Air flow mass rate	G	3.27 kg/m ² ·s
Pressurized water thermal conductivity	λ_i	0.69 W/m·K
Pressurized water Reynolds number	Re	83,500
Pressurized water Prandtl number	Pr	1.58
Heat transfer tube inner / outer surface area ratio	α	21.5
Thermal resistance of heat transfer tube	r_i	0.00017 m·K/W
Tube wall scale factor	r_w	0.00006 m·K/W

Table A.2 Estimation result of heat transfer area for ACL

Ex-tube heat transfer coefficient (Air)	h_o	966 W/m ² ·K
In-tube heat transfer coefficient (Pressurized water)	h_i	8,228 W/m ² ·K
Logarithmic mean temperature difference	ΔT_L	52.4 K
Heat transmission coefficient	U	31.6 W/m ² ·K
Heat transfer area	A	18,095 m ²

Table A.3 Pressure drop design condition for ACL

Part	Condition		
Pressurized water tube	Temperature		133 °C
	Equation		(3.11)
	Friction factor	λ	0.014
	Tube length	L	1800 mm
	Specific weight	γ	933.4 kg/m ³
	Flow rate	v^S	3.5 m/s
Pressurized water inlet nozzle	Temperature		133 °C
	Equation		(3.9)
	Enlargement loss coefficient	C_{Water}^E	1.0
	Specific weight	γ	933.4 kg/m ³
	Flow rate	v^E	3.54 m/s
Manifold tube (straight)	Temperature		133 °C
	Equation		(3.11)
	Friction factor	λ	0.013
	Tube length	L	9200 mm
	Specific weight	γ	933.4 kg/m ³
	Flow rate	v^S	1.2 m/s
Header connection tube inlet	Temperature		133 °C
	Equation		(3.10)
	Contraction coefficient	C_{Water}^C	0.5
	Specific weight	γ	933.4 kg/m ³
	Flow rate	v^C	2.0 m/s
Header connection tube	Temperature		133 °C
	Equation		(3.11)
	Friction factor	λ	0.017
	Tube length	L	4700 mm
	Specific weight	γ	933.4 kg/m ³
	Flow rate	v^S	2.0 m/s
Header connection tube (bending, 3 part)	Temperature		133 °C
	Equation		(3.12)
	Roughness coefficient	K	1.1
	Loss factor	C_{Water}^B	0.2
	Specific weight	γ	933.4 kg/m ³
	Flow rate	v^B	2.0 m/s

Part	Condition		
Header connection tube inlet nozzle (inlet side)	Temperature		133 °C
	Equation		(3.10)
	Contraction coefficient	C_{Water}^C	1.0
	Specific weight	γ	933.4 kg/m ³
	Flow rate	v^E	2.0 m/s
Header tube (straight)	Temperature		133 °C
	Equation		(3.11)
	Friction factor	λ	0.016
	Tube length	L	1500 mm
	Specific weight	γ	933.4 kg/m ³
	Flow rate	v^S	1.8 m/s
Heat transfer tube inlet	Temperature		133 °C
	Equation		(3.10)
	Contraction coefficient	C_{Water}^C	0.5
	Specific weight	γ	933.4 kg/m ³
	Flow rate	v^C	1.1 m/s
Heat transfer tube (straight)	Temperature		112 °C
	Equation		(3.11)
	Friction factor	λ	0.026
	Tube length	L	24100 mm
	Specific weight	γ	950.8 kg/m ³
	Flow rate	v^S	1.1 m/s
Heat transfer tube (bending)	Temperature		112 °C
	Equation		(3.12)
	Roughness coefficient	K	2.4
	Loss factor	C_{Water}^B	0.007
	Specific weight	γ	950.8 kg/m ³
	Flow rate	v^B	1.1 m/s
Heat transfer tube outlet	Temperature		91 °C
	Equation		(3.9)
	Enlargement loss coefficient	C_{Water}^E	1.0
	Specific weight	γ	966.0 kg/m ³
	Flow rate	v^E	1.1 m/s

Part	Condition		
Header tube (straight)	Temperature		91 °C
	Equation		(3.11)
	Friction factor	λ	0.016
	Tube length	L	3,060mm
	Specific weight	γ	966.0kg/m ³
	Flow rate	v^S	1.8m/s
Header outlet	Temperature		91 °C
	Equation		(3.10)
	Contraction coefficient	C_{Water}^C	0.5
	Specific weight	γ	966.0kg/m ³
	Flow rate	v^C	2.0m/s
Header connection tube	Temperature		91 °C
	Equation		(3.11)
	Friction factor	λ	0.0175
	Tube length	L	1,000mm
	Specific weight	γ	966.0kg/m ³
	Flow rate	v^S	2.0m/s
Manifold inlet	Temperature		91 °C
	Equation		(3.9)
	Enlargement loss coefficient	C_{Water}^E	1.0
	Specific weight	γ	966.0kg/m ³
	Flow rate	v^E	2.0m/s
Manifold	Temperature		91 °C
	Equation		(3.11)
	Friction factor	λ	0.014
	Tube length	L	9,200mm
	Specific weight	γ	966.0kg/m ³
	Flow rate	v^S	1.2m/s
Manifold outlet	Temperature		91 °C
	Equation		(3.10)
	Contraction coefficient	C_{Water}^C	0.5
	Specific weight	γ	966.0kg/m ³
	Flow rate	v^C	3.4m/s

Part	Condition		
Pressurized water outlet	Temperature		91°C
	Equation		(3.11)
	Friction factor	λ	0.014
	Tube length	L	2,400mm
	Specific weight	γ	966.0kg/m ³
	Flow rate	v^S	3.4m/s

Table A.4 Estimation result of pressure drop for ACL

Part		Pressure drop (kPa)
Pressurized water tube	ΔP_{Water}^S	0.59
Pressurized water inlet nozzle	ΔP_{Water}^E	5.88
Manifold tube (straight)	ΔP_{Water}^S	0.29
Header connection tube inlet	ΔP_{Water}^C	0.98
Header connection tube	ΔP_{Water}^S	1.57
Header connection tube (bending)	ΔP_{Water}^B	1.27
Header connection tube inlet nozzle (inlet side)	ΔP_{Water}^E	1.96
Header tube (straight)	ΔP_{Water}^S	0.29
Heat transfer tube inlet	ΔP_{Water}^C	0.29
Heat transfer tube (straight)	ΔP_{Water}^S	19.21
Heat transfer tube (bending)	ΔP_{Water}^B	0.01
Heat transfer tube outlet	ΔP_{Water}^E	0.59
Header tube (straight)	ΔP_{Water}^S	0.29
Header outlet	ΔP_{Water}^C	0.98
Header connection tube	ΔP_{Water}^S	0.29
Manifold inlet	ΔP_{Water}^E	1.96
Manifold	ΔP_{Water}^S	0.29
Manifold outlet	ΔP_{Water}^C	2.84
Pressurized water outlet	ΔP_{Water}^S	0.78
Total	ΔP_{Water}	40.36

付録 B 30MW における ACL 加圧水流量の予測 (加圧水温度の影響)

This is a blank page.

Figures list in Appendix B

Fig. B.1	Rated operation / single-loaded, $G_{\text{Air}}^{\text{ACL}} = 1585.9 \text{ t/h}$	62
Fig. B.2	Rated operation / parallel-loaded, $G_{\text{Air}}^{\text{ACL}} = 1585.9 \text{ t/h}$	62
Fig. B.3	High temperature test operation / single-loaded, $G_{\text{Air}}^{\text{ACL}} = 1585.9 \text{ t/h}$	63
Fig. B.4	High temperature test operation / parallel-loaded, $G_{\text{Air}}^{\text{ACL}} = 1585.9 \text{ t/h}$	63
Fig. B.5	Rated operation / single-loaded, $G_{\text{Air}}^{\text{ACL}} = 1720.8 \text{ t/h}$	64
Fig. B.6	Rated operation / parallel-loaded, $G_{\text{Air}}^{\text{ACL}} = 1720.8 \text{ t/h}$	64
Fig. B.7	High temperature test operation / single-loaded, $G_{\text{Air}}^{\text{ACL}} = 1720.8 \text{ t/h}$	65
Fig. B.8	High temperature test operation / parallel-loaded, $G_{\text{Air}}^{\text{ACL}} = 1720.8 \text{ t/h}$	65
Fig. B.9	Rated operation / single-loaded, $G_{\text{Air}}^{\text{ACL}} = 1856.9 \text{ t/h}$	66
Fig. B.10	$G_{\text{Air}}^{\text{ACL}} =$ Rated operation / parallel-loaded, 1856.9 t/h	66
Fig. B.11	High temperature test operation / single-loaded, $G_{\text{Air}}^{\text{ACL}} = 1856.9 \text{ t/h}$	67
Fig. B.12	High temperature test operation / parallel-loaded, $G_{\text{Air}}^{\text{ACL}} = 1856.9 \text{ t/h}$	67

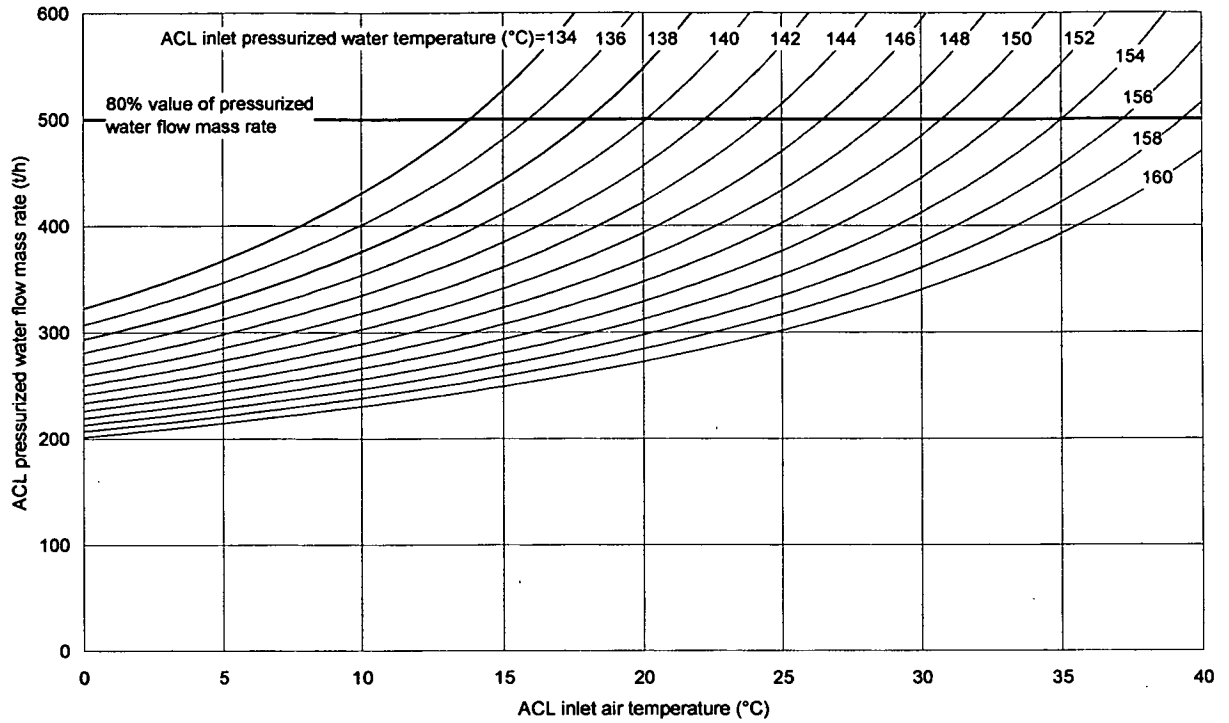


Fig. B.1 Rated operation / single-loaded, $G_{Air}^{ACL} = 1585.9 \text{ t/h}$

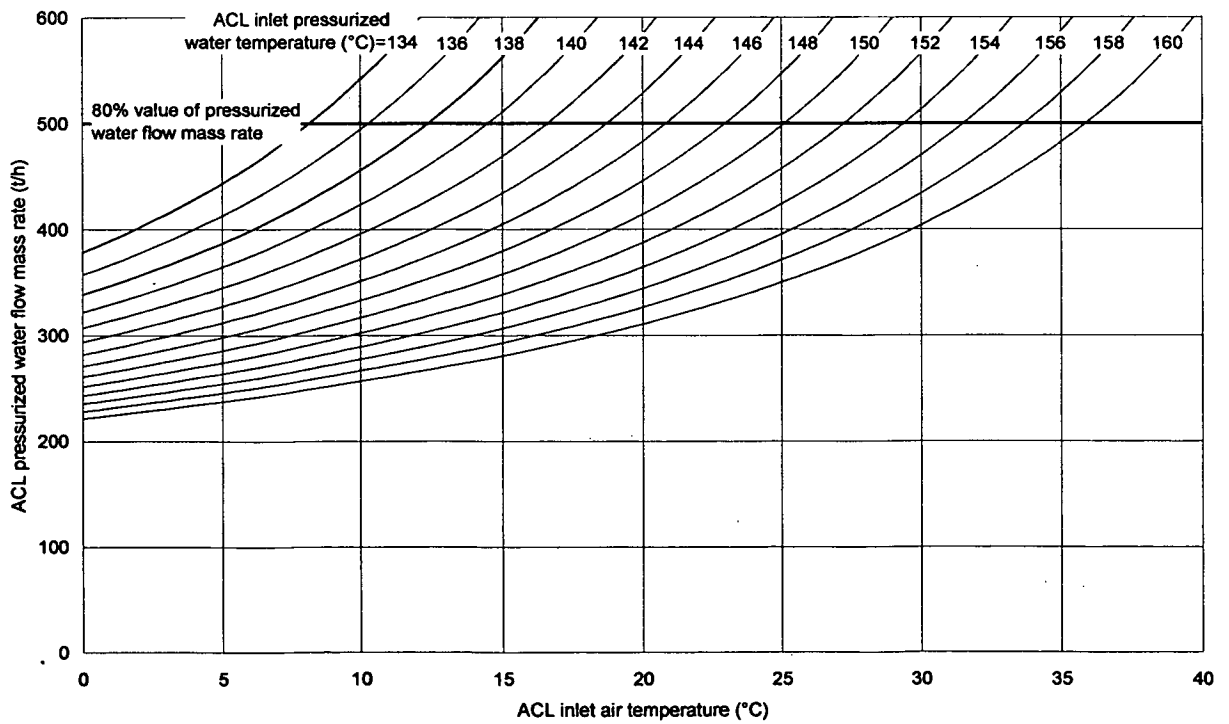


Fig. B.2 Rated operation / parallel-loaded, $G_{Air}^{ACL} = 1585.9 \text{ t/h}$

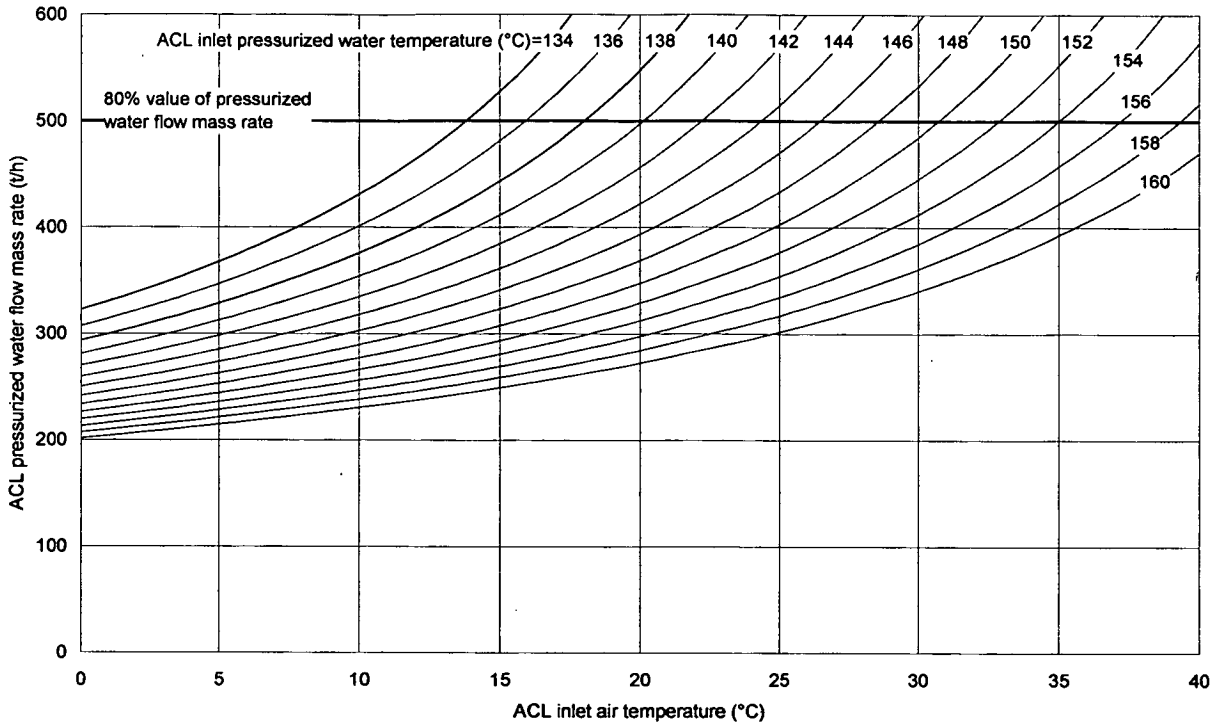


Fig. B.3 High temperature test operation / single-loaded, $G_{Air}^{ACL} = 1585.9 \text{ t/h}$

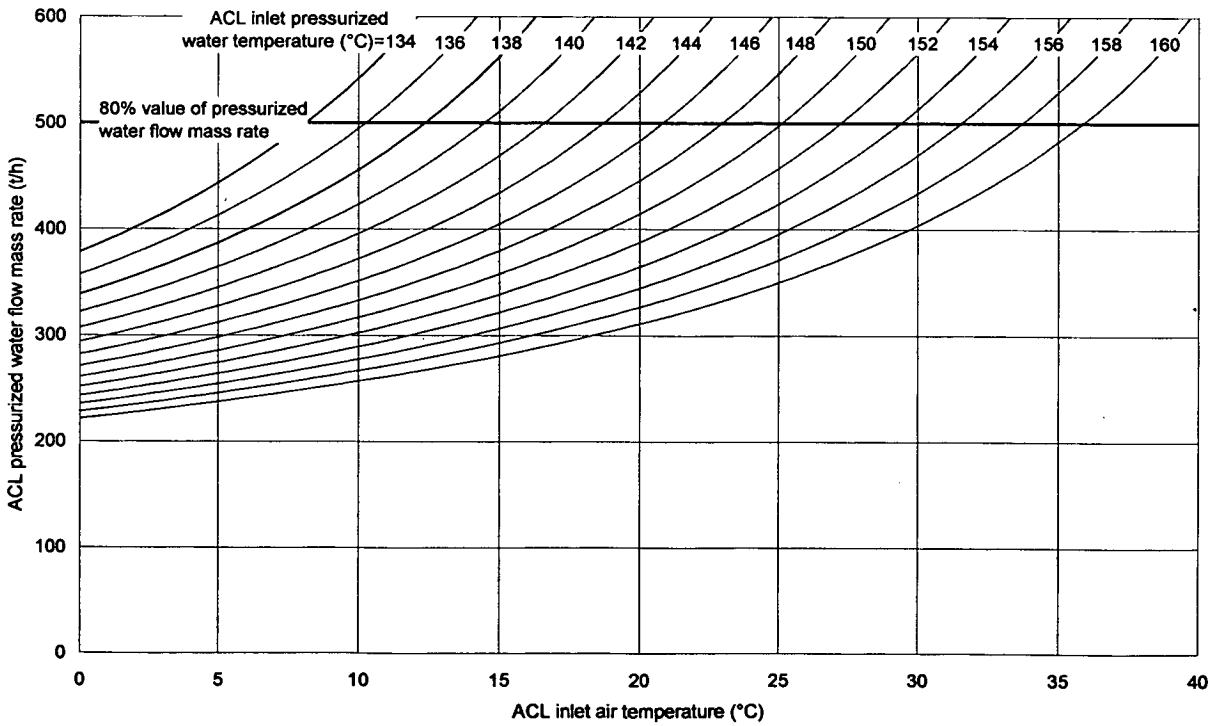


Fig. B.4 High temperature test operation / parallel-loaded, $G_{Air}^{ACL} = 1585.9 \text{ t/h}$

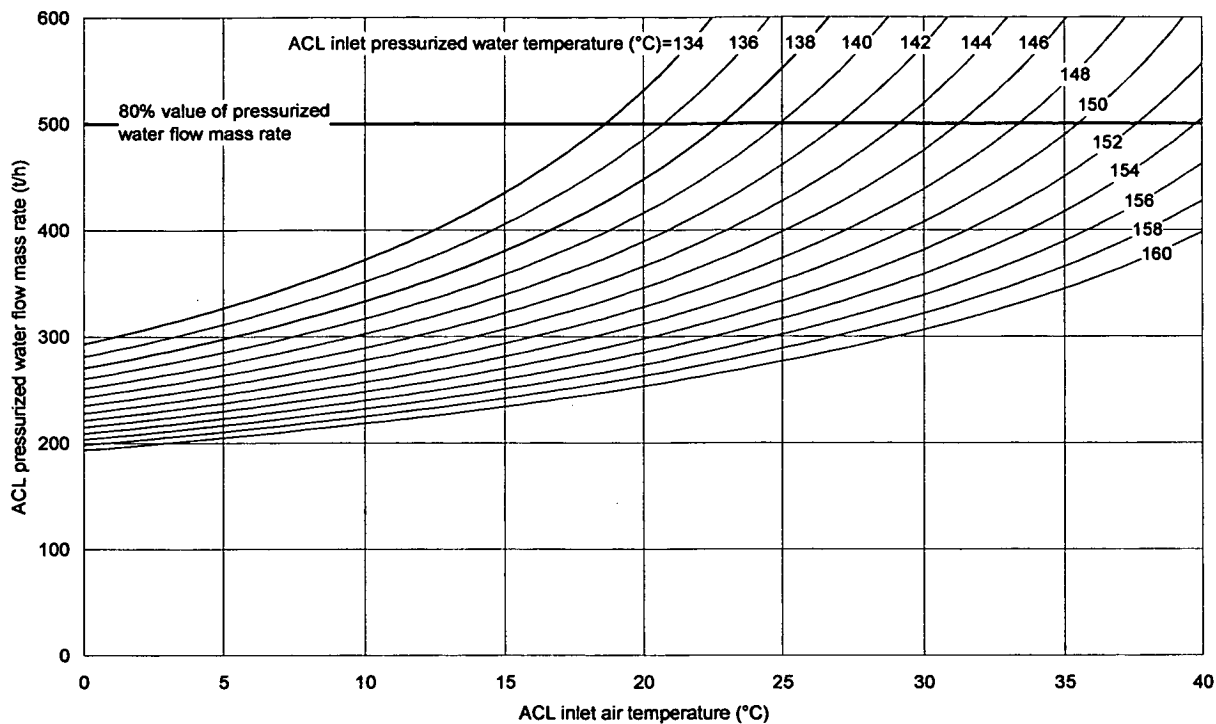


Fig. B.5 Rated operation / single-loaded, $G_{Air}^{ACL} = 1720.8$ t/h

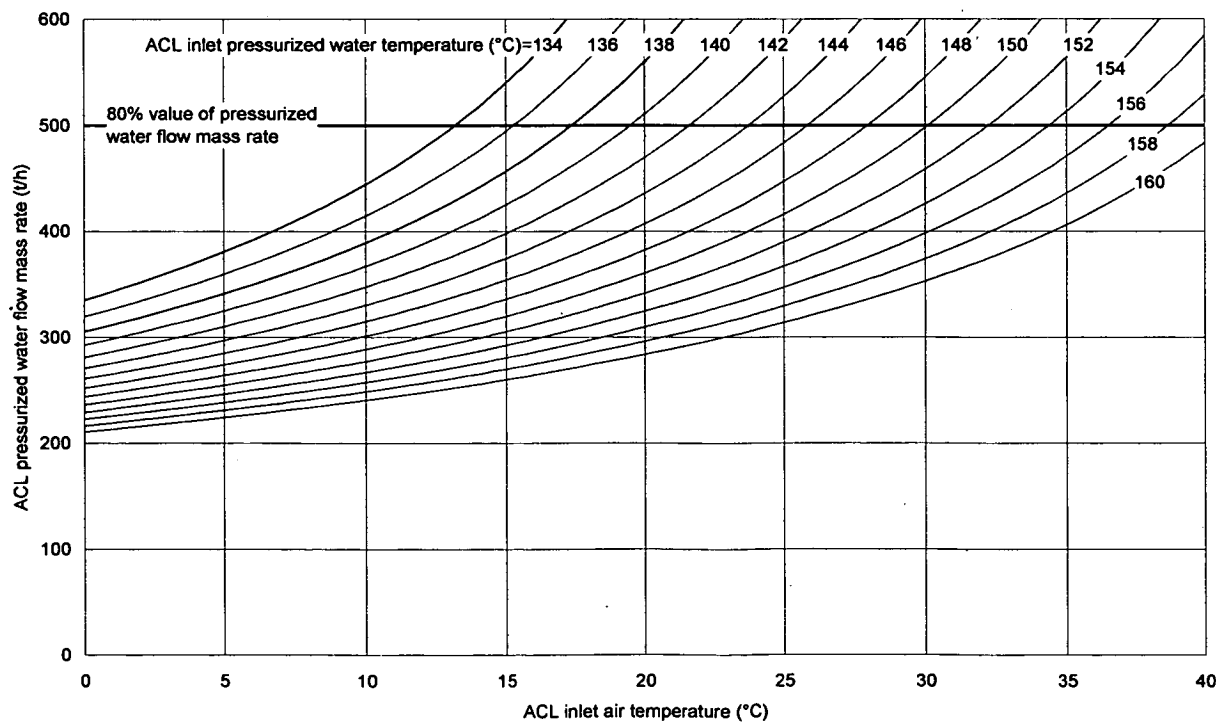


Fig. B.6 Rated operation / parallel-loaded, $G_{Air}^{ACL} = 1720.8$ t/h

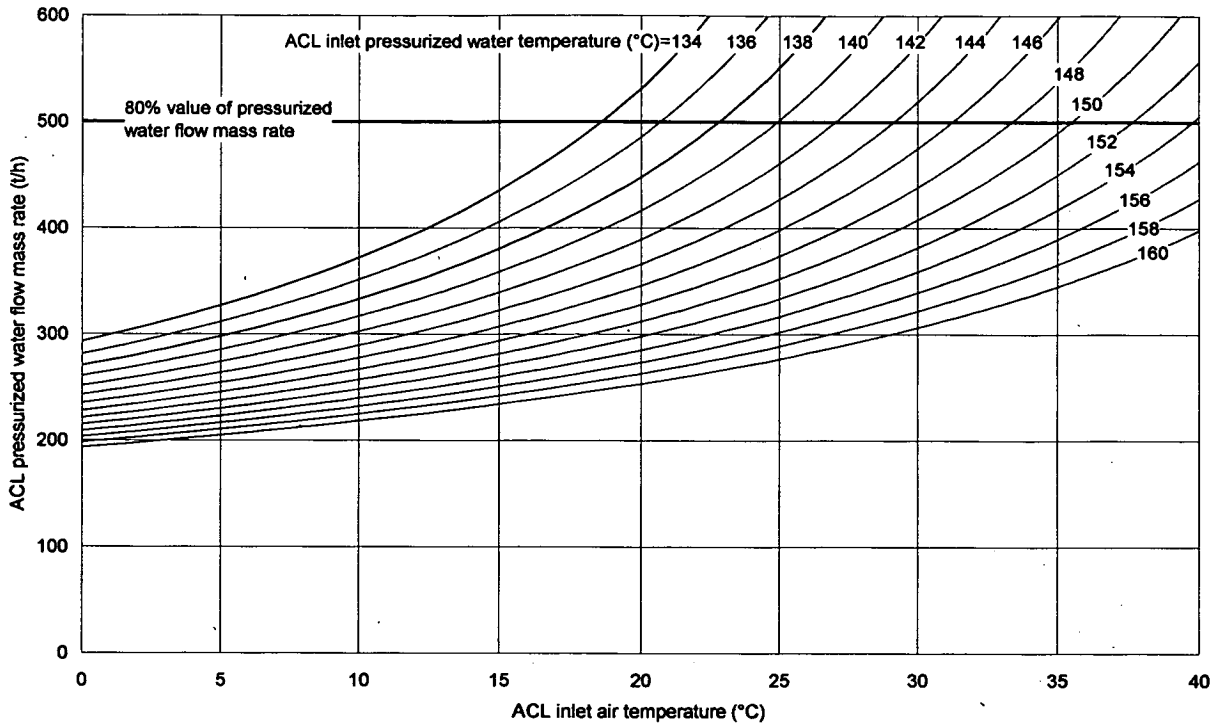


Fig. B.7 High temperature test operation / single-loaded, $G_{Air}^{ACL} = 1720.8$ t/h

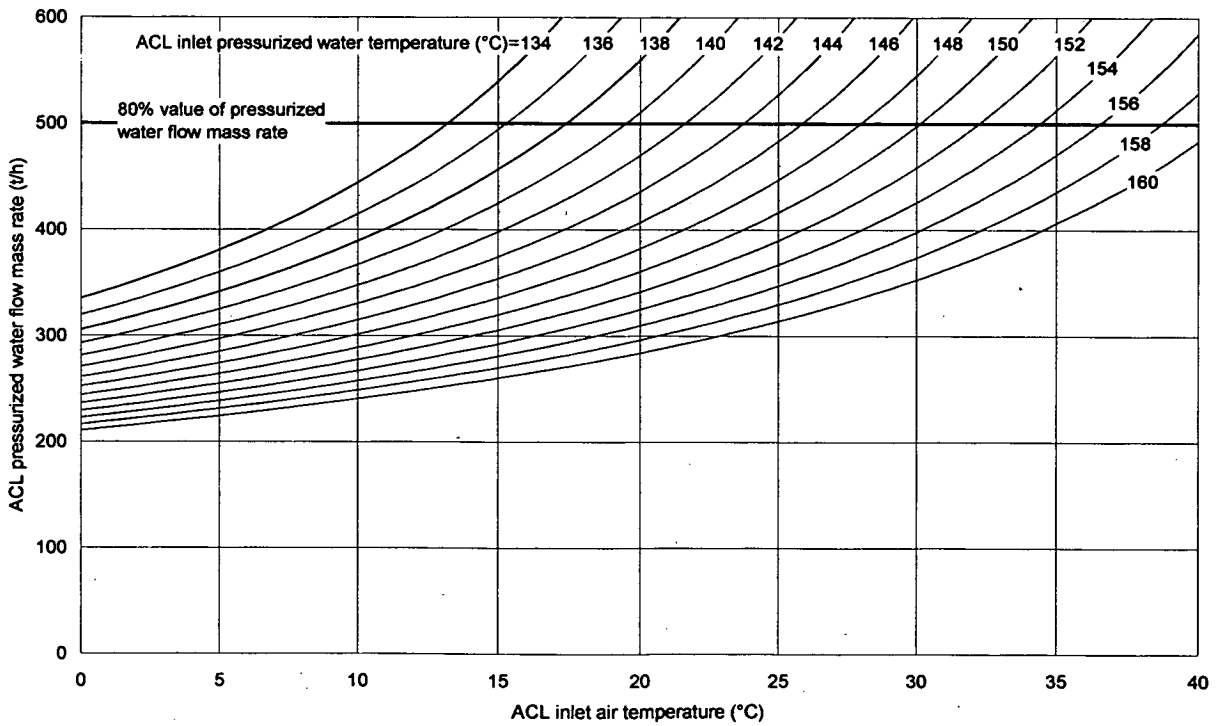


Fig. B.8 High temperature test operation / parallel-loaded, $G_{Air}^{ACL} = 1720.8$ t/h

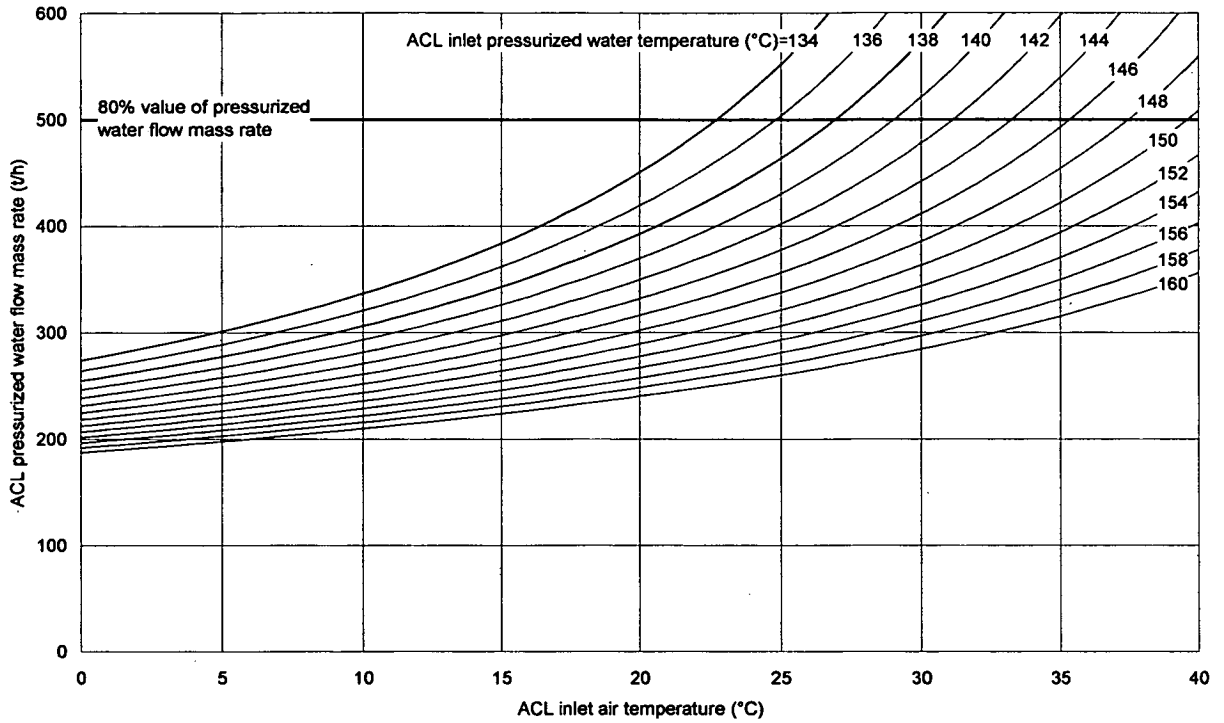


Fig. B.9 Rated operation / single-loaded, $G_{Air}^{ACL} = 1856.9$ t/h

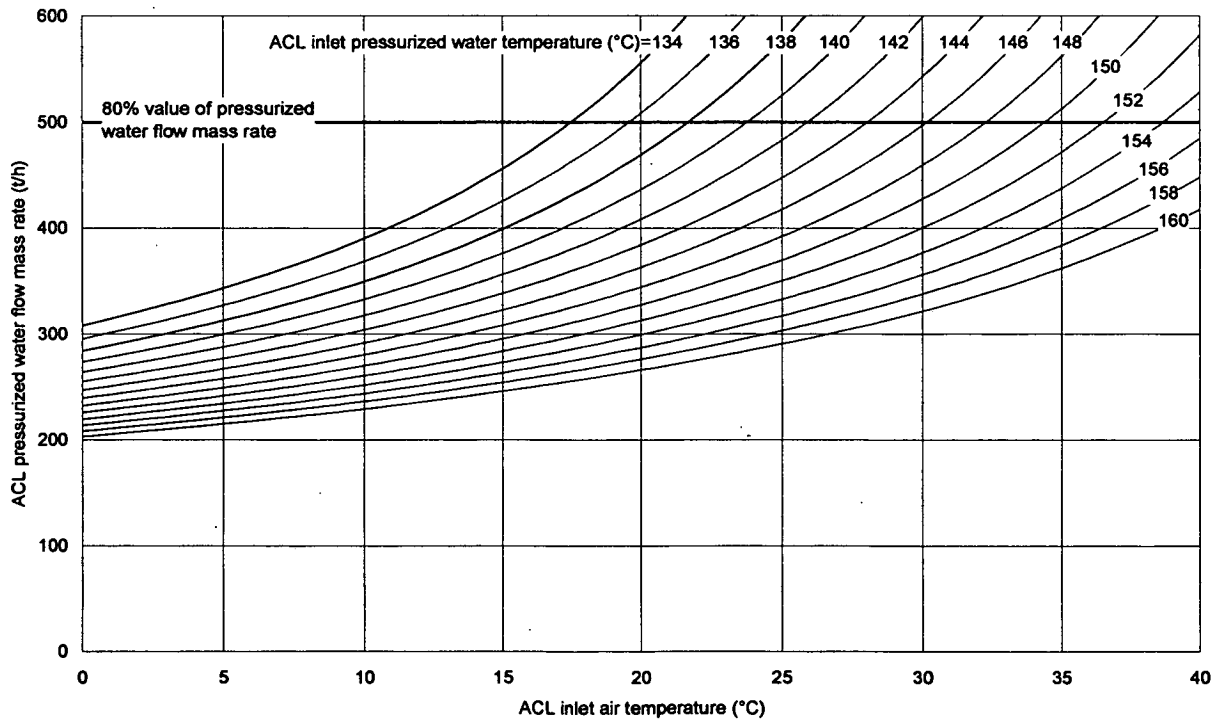


Fig. B.10 $G_{Air}^{ACL} =$ Rated operation / parallel-loaded, 1856.9 t/h

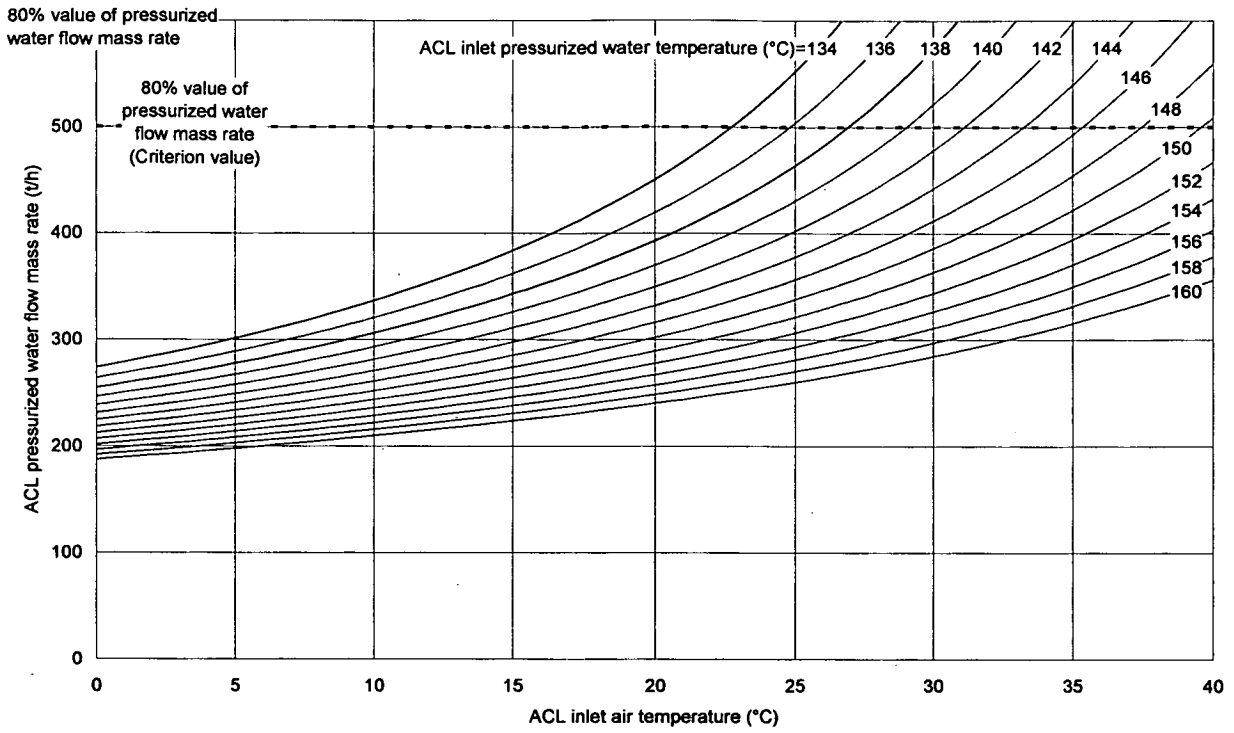


Fig. B.11 High temperature test operation / single-loaded, $G_{Air}^{ACL} = 1856.9$ t/h

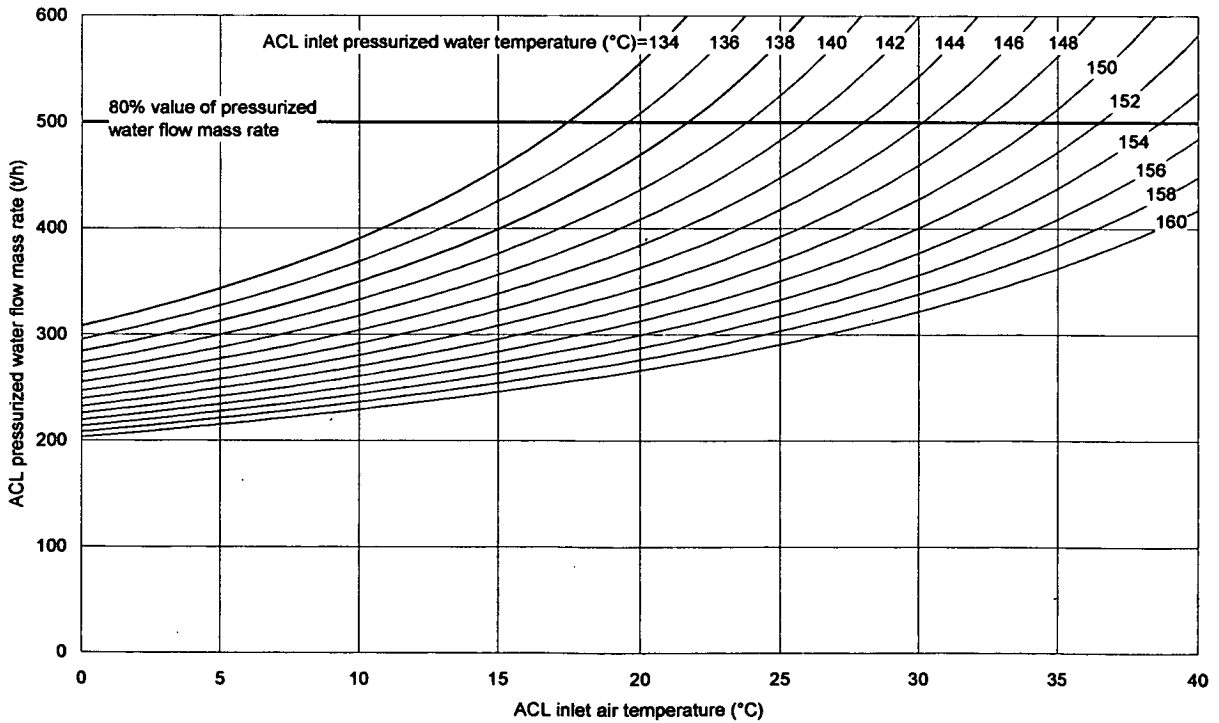


Fig. B.12 High temperature test operation / parallel-loaded, $G_{Air}^{ACL} = 1856.9$ t/h

This is a blank page.

付録 C 30MW における ACL 加圧水流量の予測 (空気風量の影響)

This is a blank page.

Figures list in Appendix C

Fig. C.1	Rated operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 134$ °C	73
Fig. C.2	Rated operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 136$ °C	73
Fig. C.3	Rated operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 138$ °C	74
Fig. C.4	Rated operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 140$ °C	74
Fig. C.5	Rated operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 142$ °C	75
Fig. C.6	Rated operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 144$ °C	75
Fig. C.7	Rated operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 146$ °C	76
Fig. C.8	Rated operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 148$ °C	76
Fig. C.9	Rated operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 150$ °C	77
Fig. C.10	Rated operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 152$ °C	77
Fig. C.11	Rated operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 154$ °C	78
Fig. C.12	Rated operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 156$ °C	78
Fig. C.13	Rated operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 158$ °C	79
Fig. C.14	Rated operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 160$ °C	79
Fig. C.15	Rated operation / parallel-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 134$ °C	80
Fig. C.16	Rated operation / parallel-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 136$ °C	80
Fig. C.17	Rated operation / parallel-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 138$ °C	81
Fig. C.18	Rated operation / parallel-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 140$ °C	81
Fig. C.19	Rated operation / parallel-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 142$ °C	82
Fig. C.20	Rated operation / parallel-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 144$ °C	82
Fig. C.21	Rated operation / parallel-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 146$ °C	83
Fig. C.22	Rated operation / parallel-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 148$ °C	83
Fig. C.23	Rated operation / parallel-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 150$ °C	84
Fig. C.24	Rated operation / parallel-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 152$ °C	84
Fig. C.25	Rated operation / parallel-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 154$ °C	85
Fig. C.26	Rated operation / parallel-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 156$ °C	85
Fig. C.27	Rated operation / parallel-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 158$ °C	86
Fig. C.28	Rated operation / parallel-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 160$ °C	86
Fig. C.29	High temperature test operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 134$ °C	87
Fig. C.30	High temperature test operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 136$ °C	87
Fig. C.31	High temperature test operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 138$ °C	88
Fig. C.32	High temperature test operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 140$ °C	88
Fig. C.33	High temperature test operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 142$ °C	89
Fig. C.34	High temperature test operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 144$ °C	89
Fig. C.35	High temperature test operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 146$ °C	90

Fig. C.36	High temperature test operation / single-loaded,	$T_{\text{Water}}^{\text{ACL_IN}} = 148$ °C	90
Fig. C.37	High temperature test operation / single-loaded,	$T_{\text{Water}}^{\text{ACL_IN}} = 150$ °C	91
Fig. C.38	High temperature test operation / single-loaded,	$T_{\text{Water}}^{\text{ACL_IN}} = 152$ °C	91
Fig. C.39	High temperature test operation / single-loaded,	$T_{\text{Water}}^{\text{ACL_IN}} = 154$ °C	92
Fig. C.40	High temperature test operation / single-loaded,	$T_{\text{Water}}^{\text{ACL_IN}} = 156$ °C	92
Fig. C.41	High temperature test operation / single-loaded,	$T_{\text{Water}}^{\text{ACL_IN}} = 158$ °C	93
Fig. C.42	High temperature test operation / single-loaded,	$T_{\text{Water}}^{\text{ACL_IN}} = 160$ °C	93
Fig. C.43	High temperature test operation / parallel-loaded,	$T_{\text{Water}}^{\text{ACL_IN}} = 134$ °C	94
Fig. C.44	High temperature test operation / parallel-loaded,	$T_{\text{Water}}^{\text{ACL_IN}} = 136$ °C	94
Fig. C.45	High temperature test operation / parallel-loaded,	$T_{\text{Water}}^{\text{ACL_IN}} = 138$ °C	95
Fig. C.46	High temperature test operation / parallel-loaded,	$T_{\text{Water}}^{\text{ACL_IN}} = 140$ °C	95
Fig. C.47	High temperature test operation / parallel-loaded,	$T_{\text{Water}}^{\text{ACL_IN}} = 142$ °C	96
Fig. C.48	High temperature test operation / parallel-loaded,	$T_{\text{Water}}^{\text{ACL_IN}} = 144$ °C	96
Fig. C.49	High temperature test operation / parallel-loaded,	$T_{\text{Water}}^{\text{ACL_IN}} = 146$ °C	97
Fig. C.50	High temperature test operation / parallel-loaded,	$T_{\text{Water}}^{\text{ACL_IN}} = 148$ °C	97
Fig. C.51	High temperature test operation / parallel-loaded,	$T_{\text{Water}}^{\text{ACL_IN}} = 150$ °C	98
Fig. C.52	High temperature test operation / parallel-loaded,	$T_{\text{Water}}^{\text{ACL_IN}} = 152$ °C	98
Fig. C.53	High temperature test operation / parallel-loaded,	$T_{\text{Water}}^{\text{ACL_IN}} = 154$ °C	99
Fig. C.54	High temperature test operation / parallel-loaded,	$T_{\text{Water}}^{\text{ACL_IN}} = 156$ °C	99
Fig. C.55	High temperature test operation / parallel-loaded,	$T_{\text{Water}}^{\text{ACL_IN}} = 158$ °C	100
Fig. C.56	High temperature test operation / parallel-loaded,	$T_{\text{Water}}^{\text{ACL_IN}} = 160$ °C	100

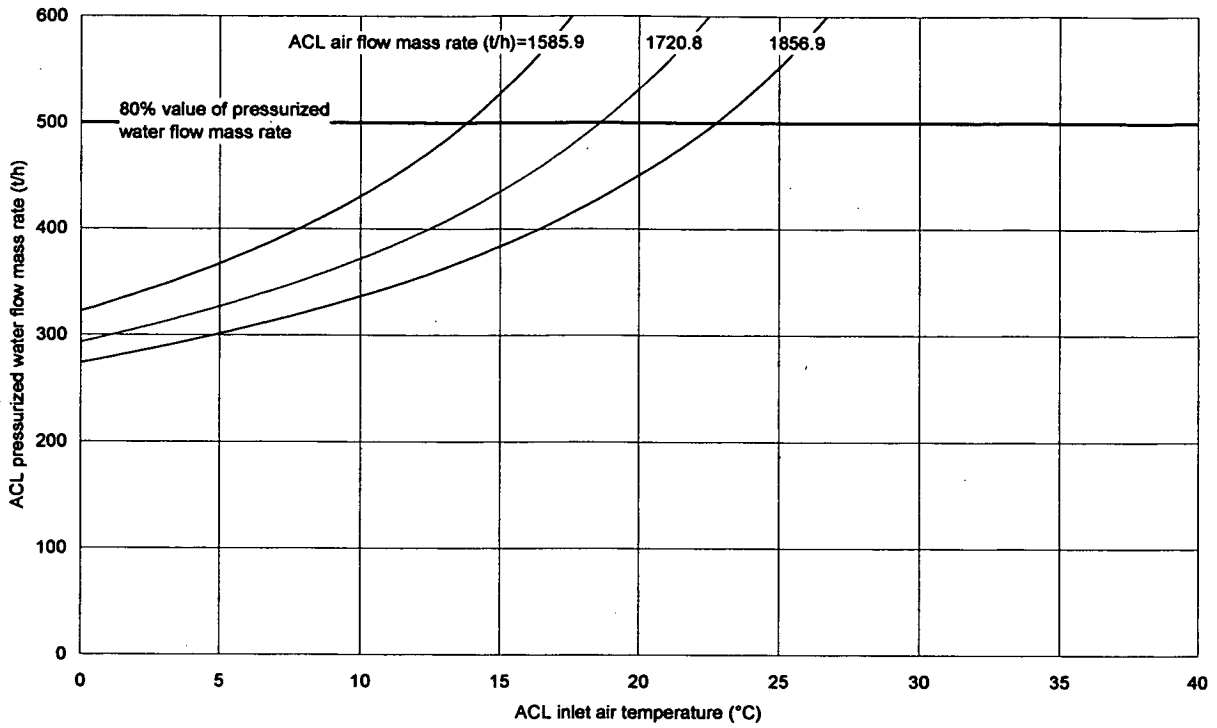


Fig. C.1 Rated operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN}=134\text{ }^{\circ}\text{C}$

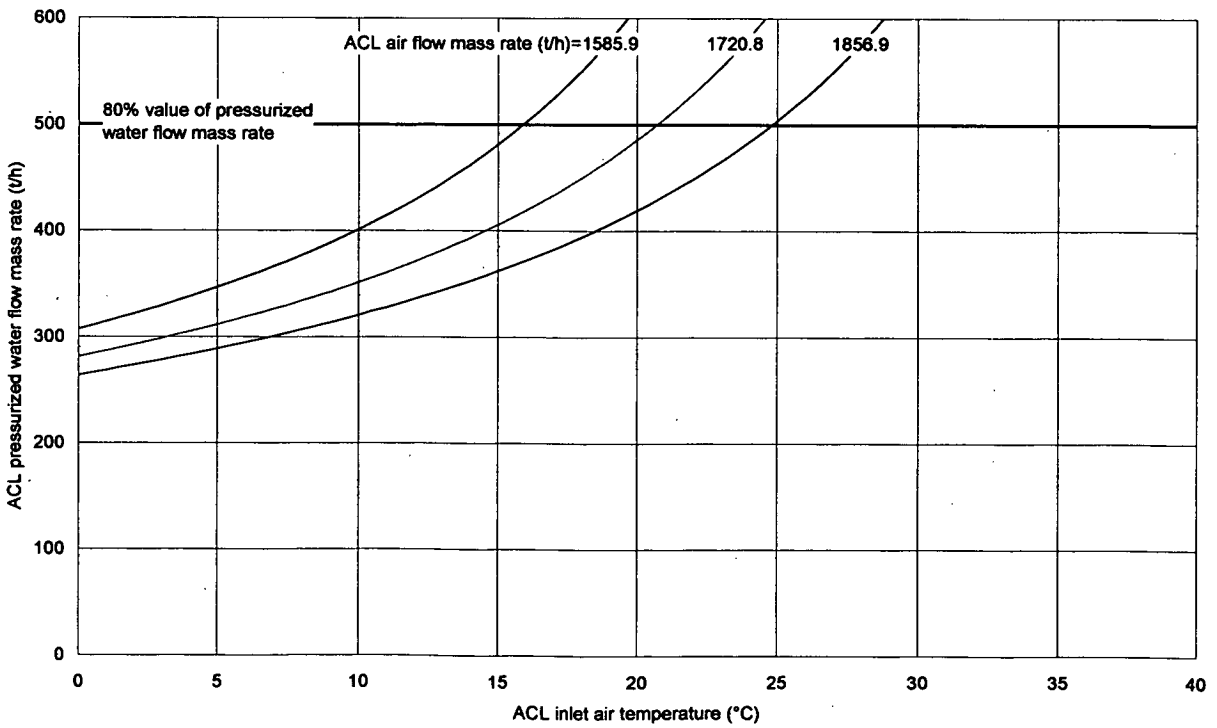


Fig. C.2 Rated operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN}=136\text{ }^{\circ}\text{C}$

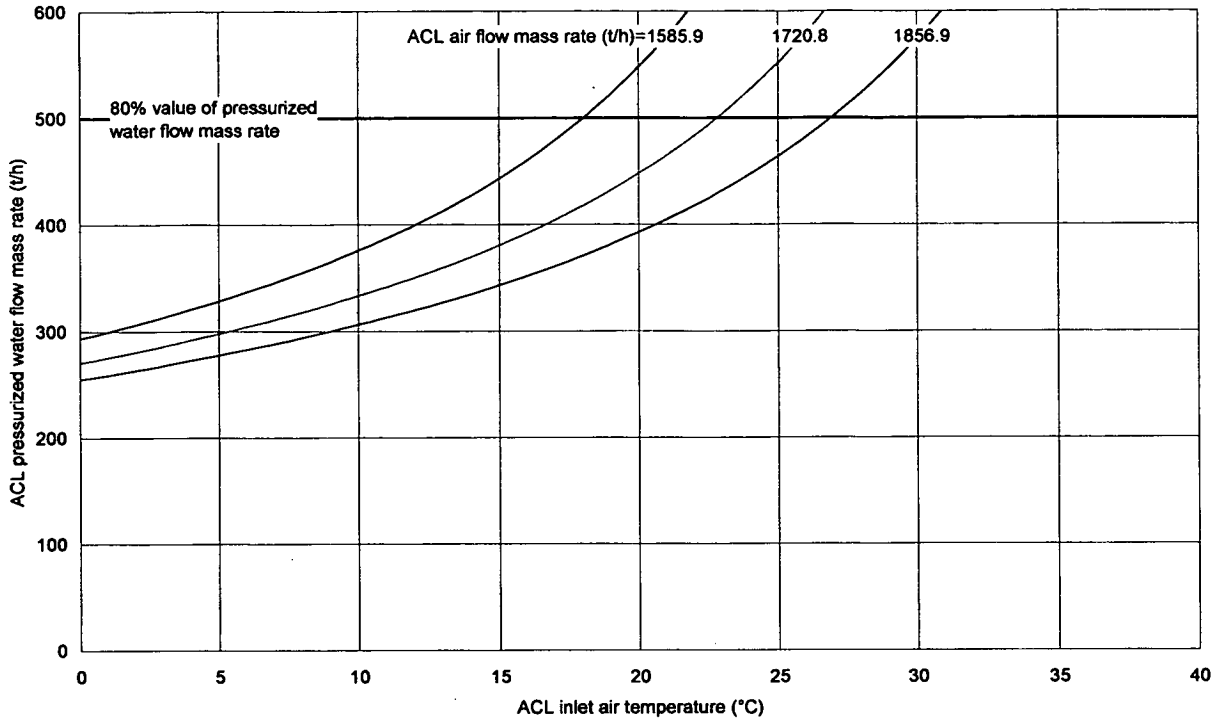


Fig. C.3 Rated operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN}=138\text{ }^{\circ}\text{C}$

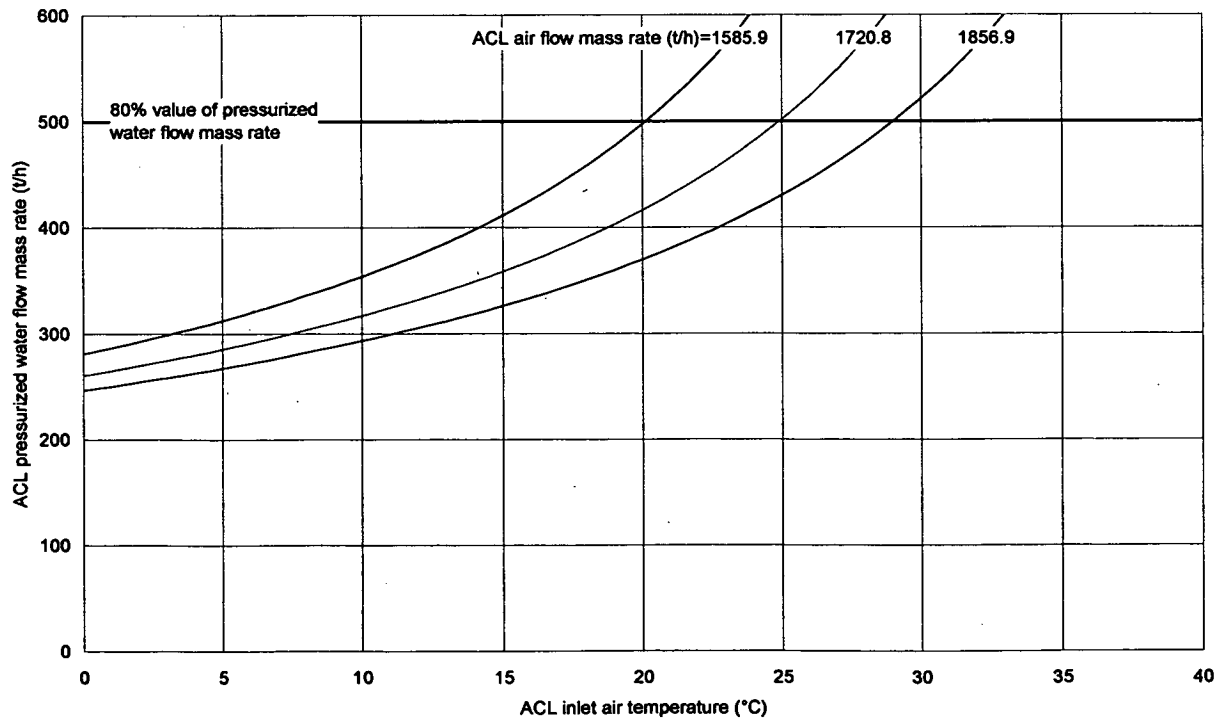


Fig. C.4 Rated operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN}=140\text{ }^{\circ}\text{C}$

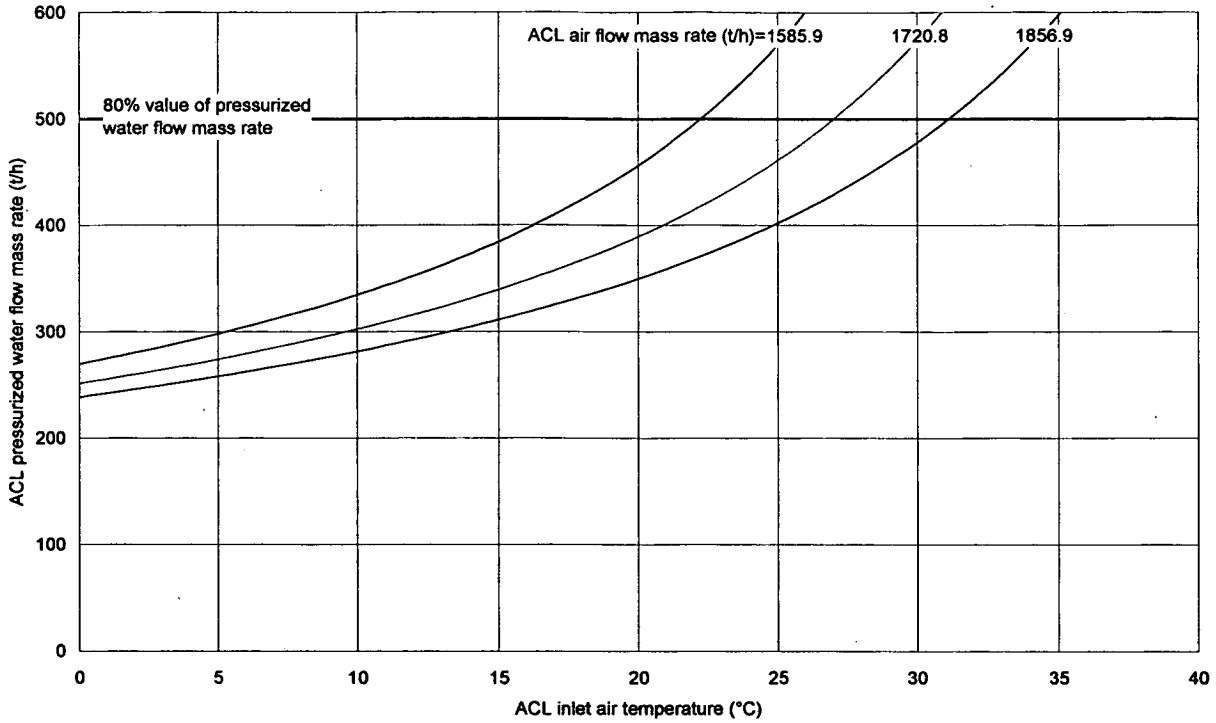


Fig. C.5 Rated operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 142 \text{ } ^\circ\text{C}$

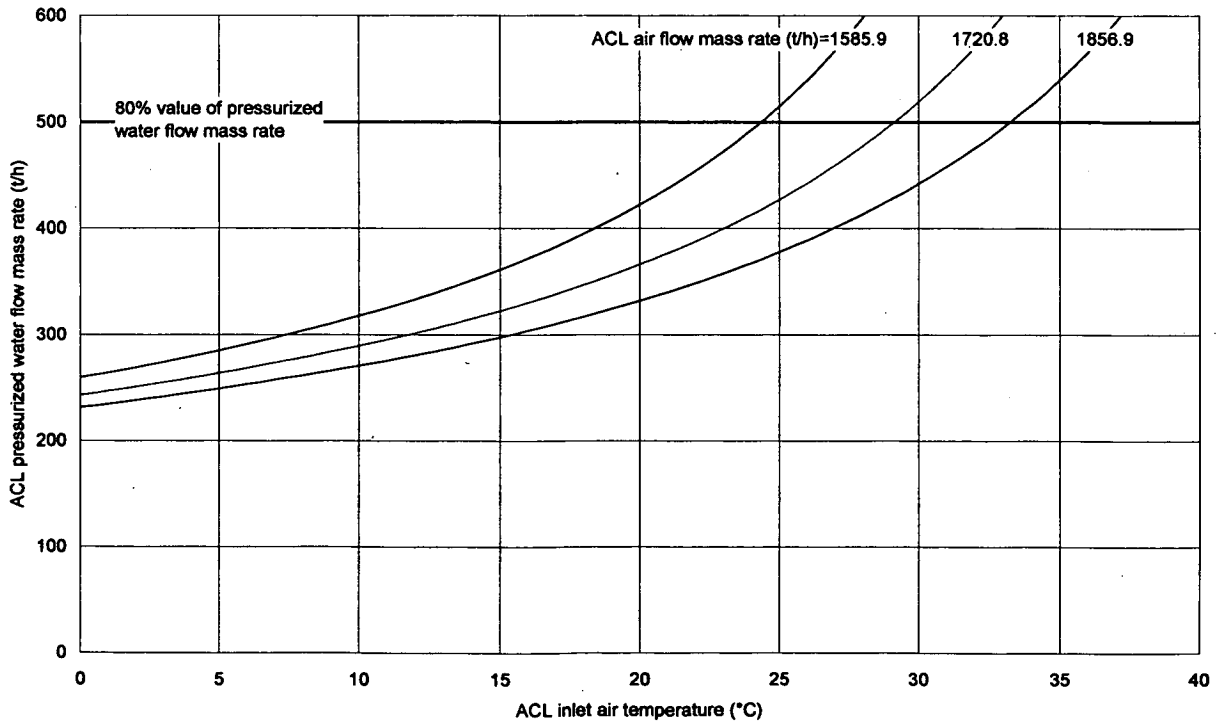


Fig. C.6 Rated operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 144 \text{ } ^\circ\text{C}$

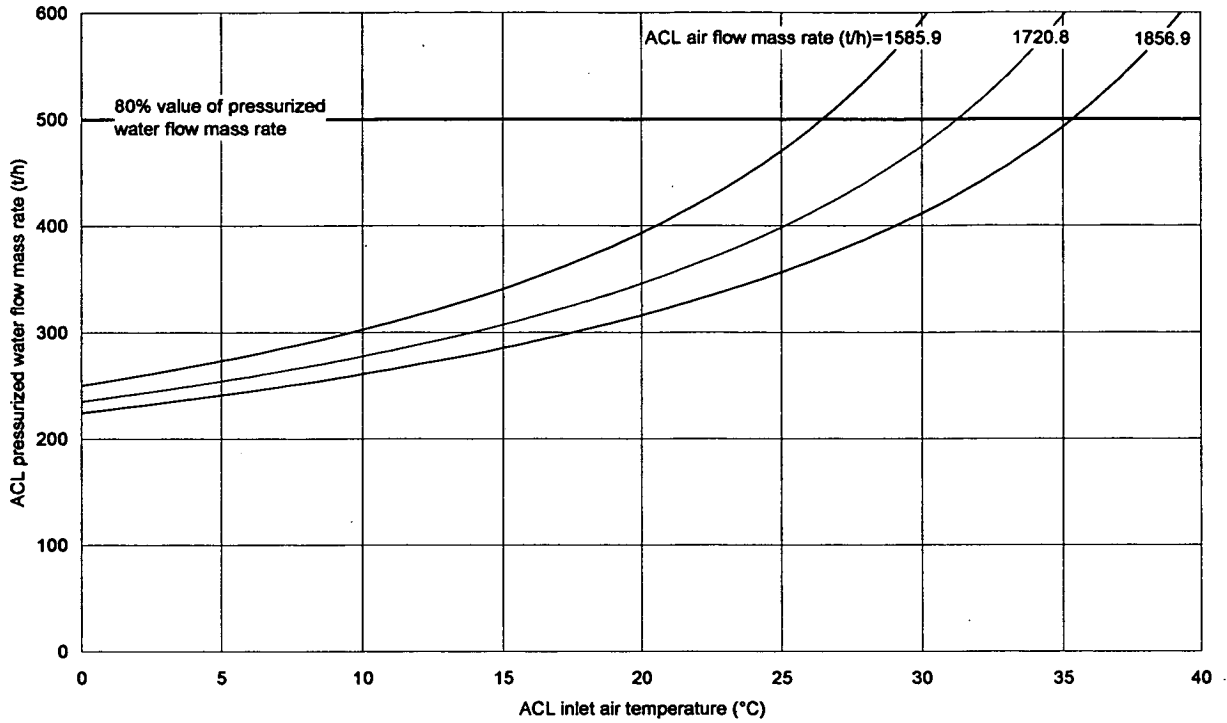


Fig. C.7 Rated operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN}=146\text{ }^{\circ}\text{C}$

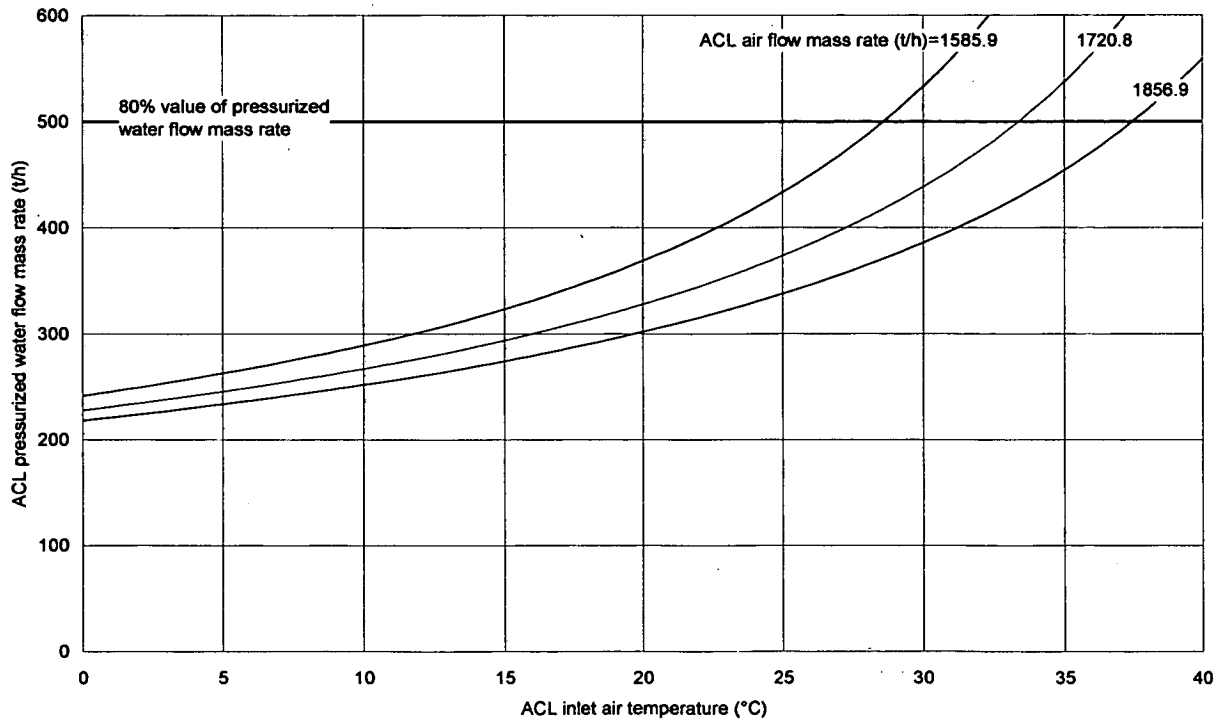


Fig. C.8 Rated operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN}=148\text{ }^{\circ}\text{C}$

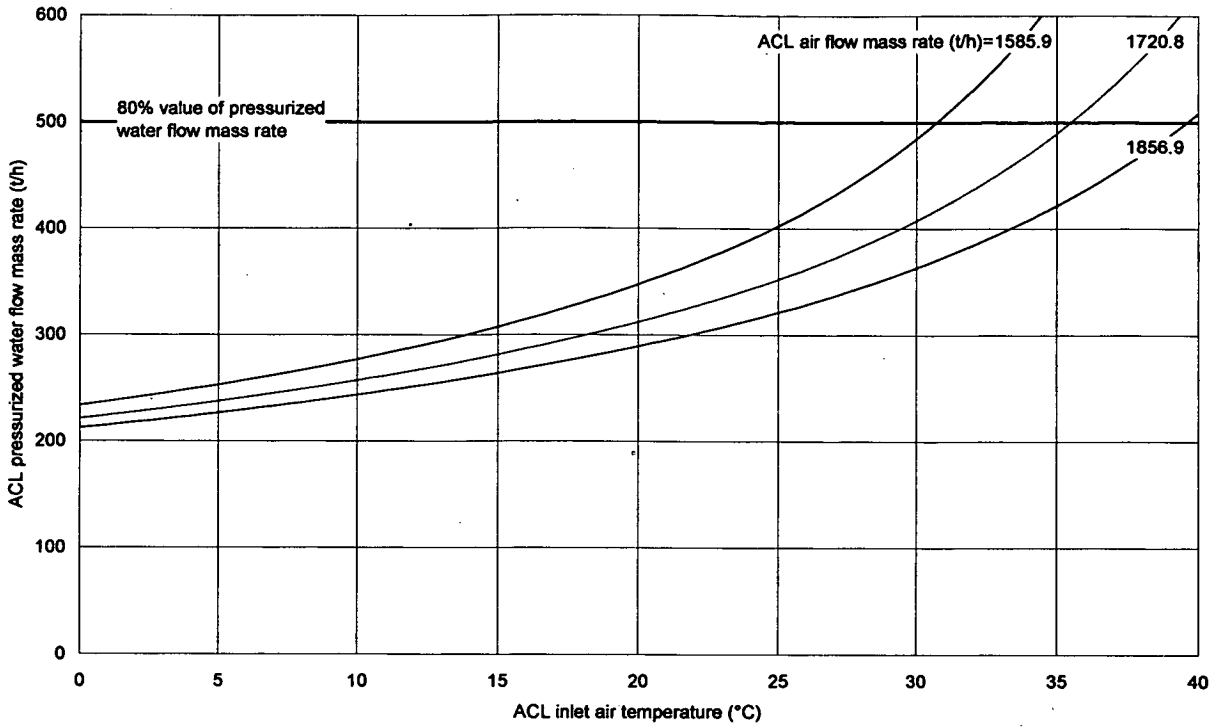


Fig. C.9 Rated operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$

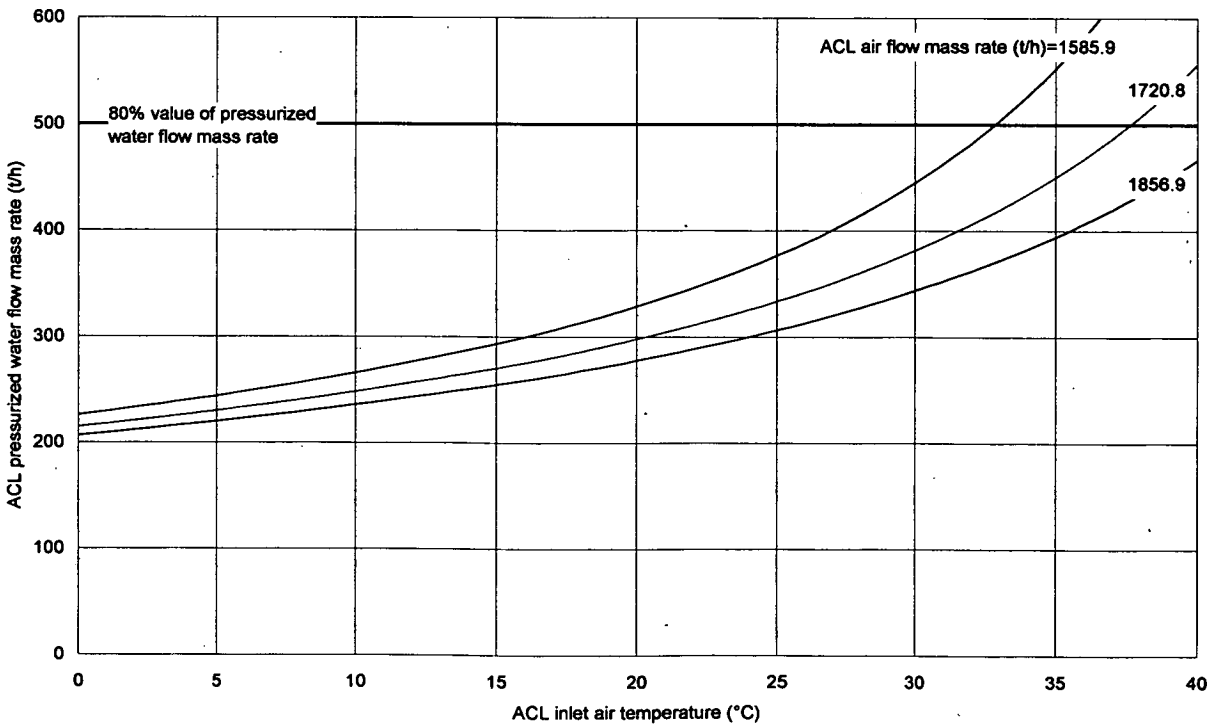


Fig. C.10 Rated operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 152 \text{ }^\circ\text{C}$

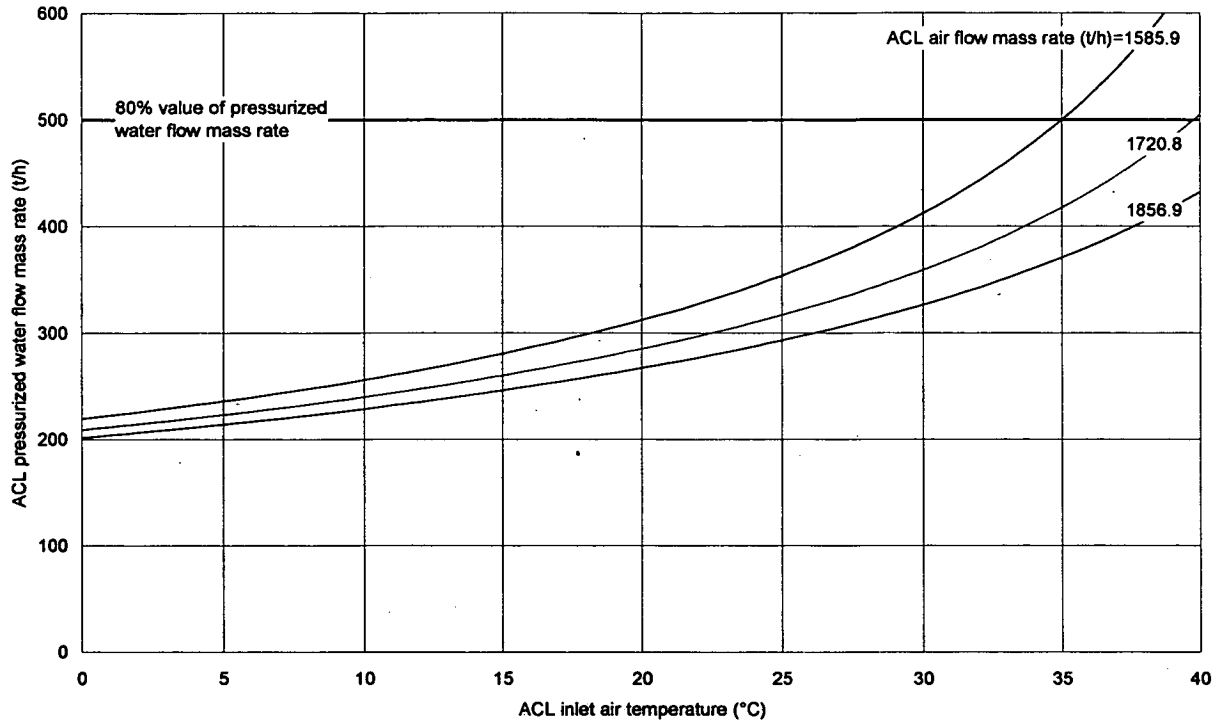


Fig. C.11 Rated operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL-IN} = 154 \text{ } ^\circ\text{C}$

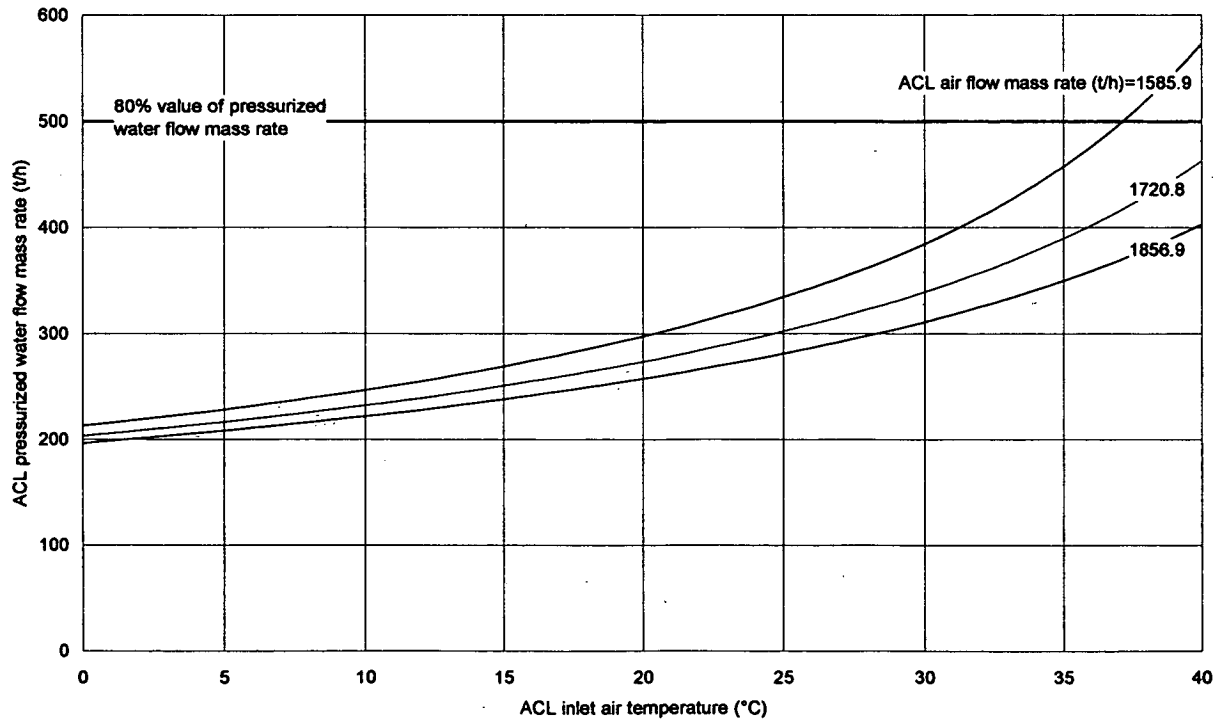


Fig. C.12 Rated operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL-IN} = 156 \text{ } ^\circ\text{C}$

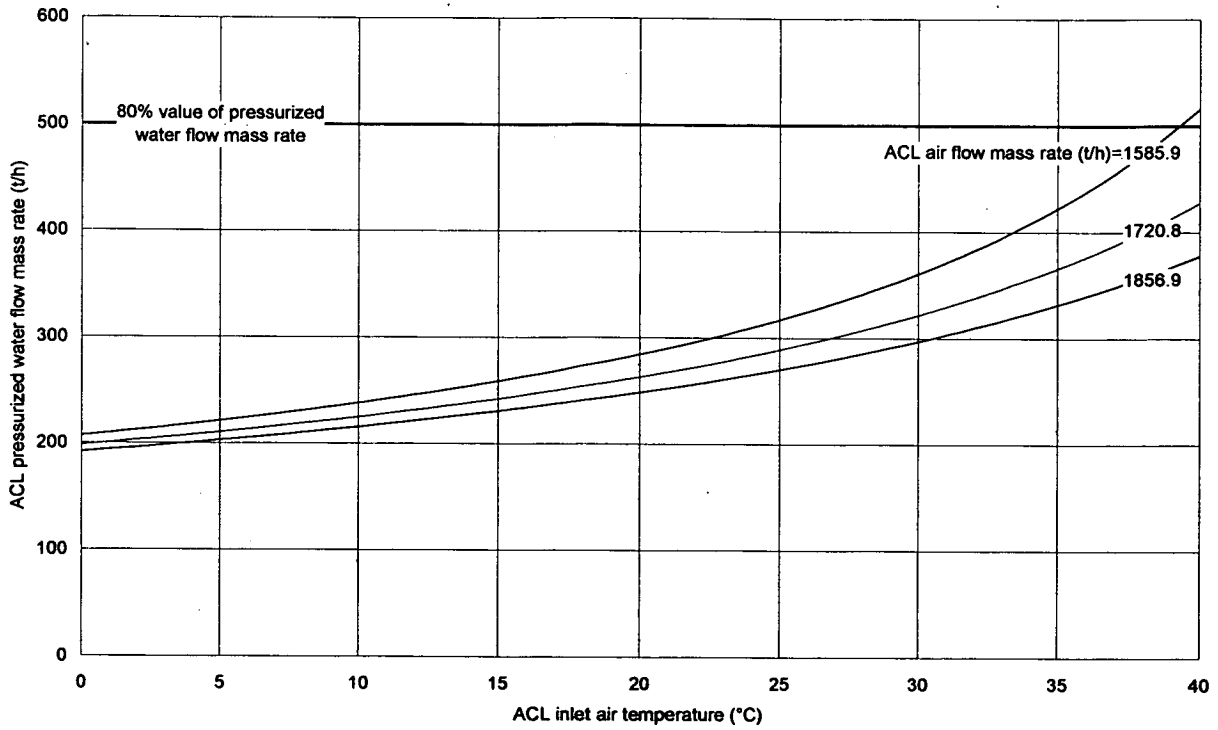


Fig. C.13 Rated operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 158 \text{ } ^\circ\text{C}$

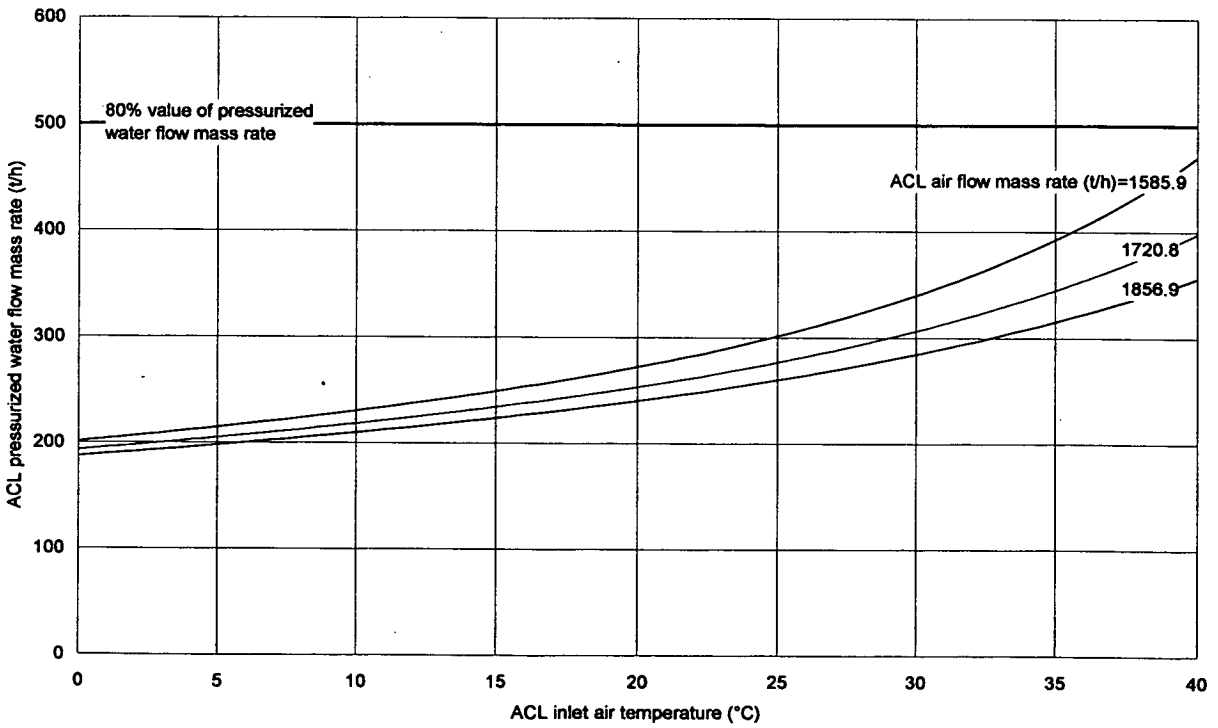


Fig. C.14 Rated operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 160 \text{ } ^\circ\text{C}$

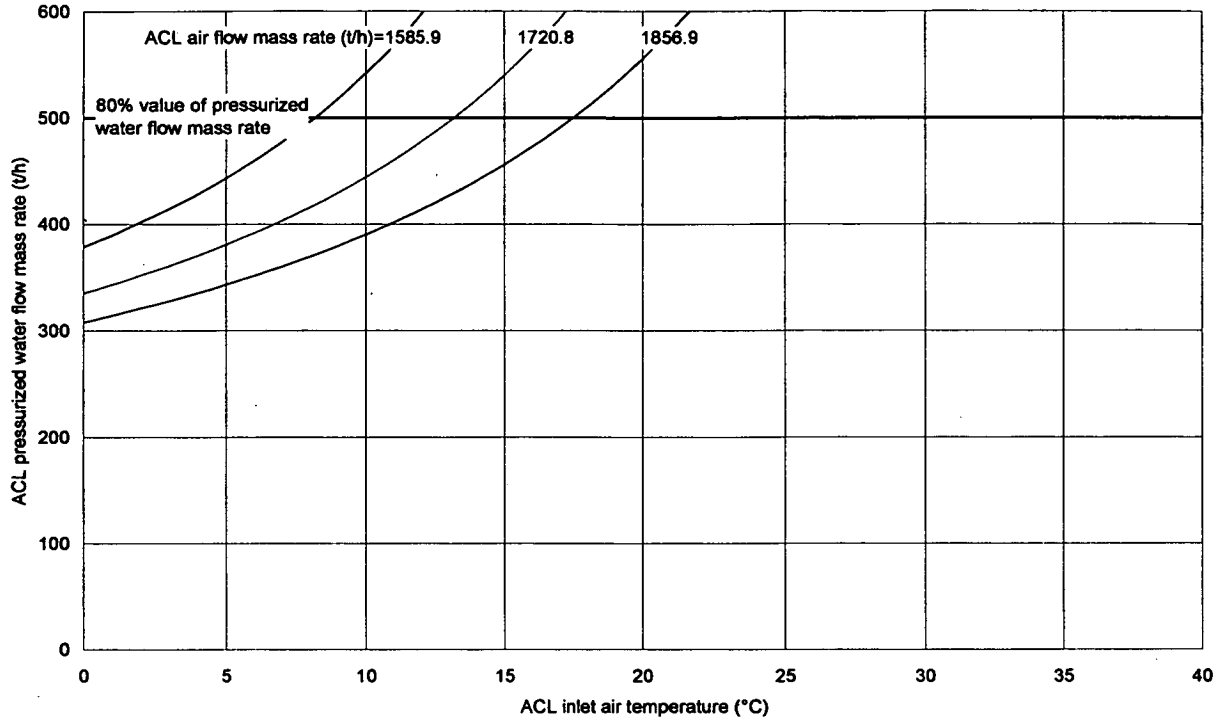


Fig. C.15 Rated operation / parallel-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 134 \text{ } ^\circ\text{C}$

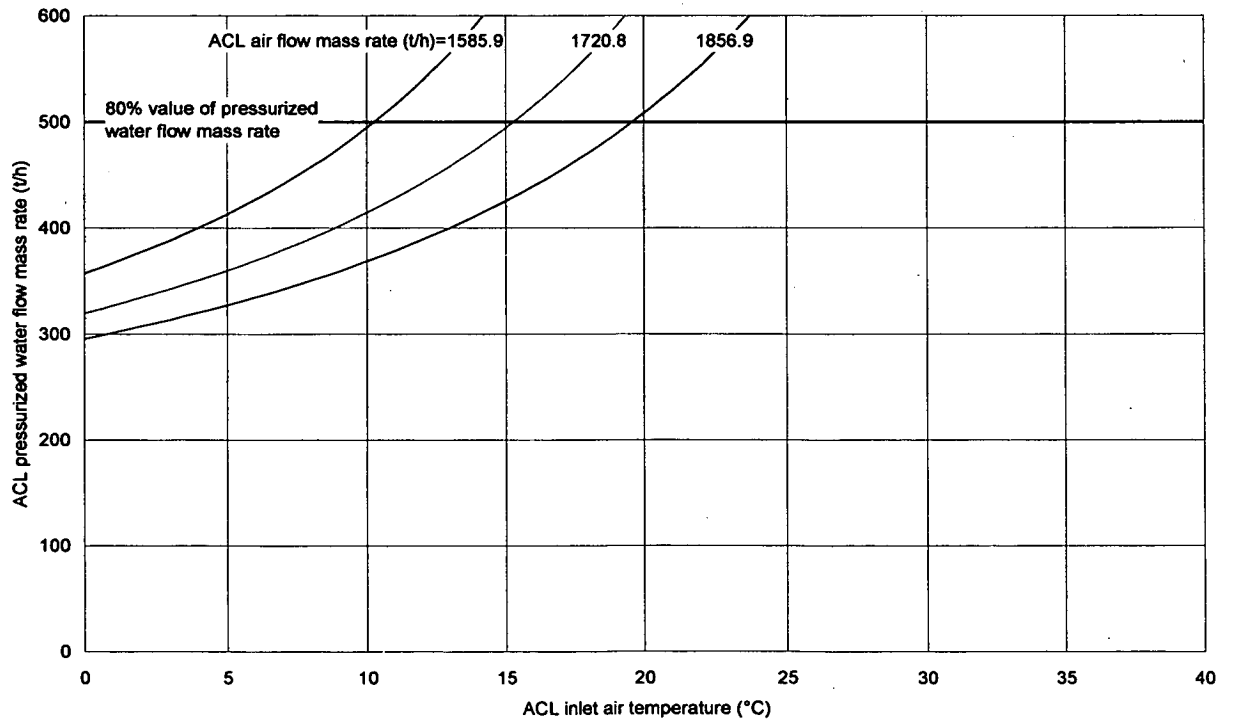


Fig. C.16 Rated operation / parallel-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 136 \text{ } ^\circ\text{C}$

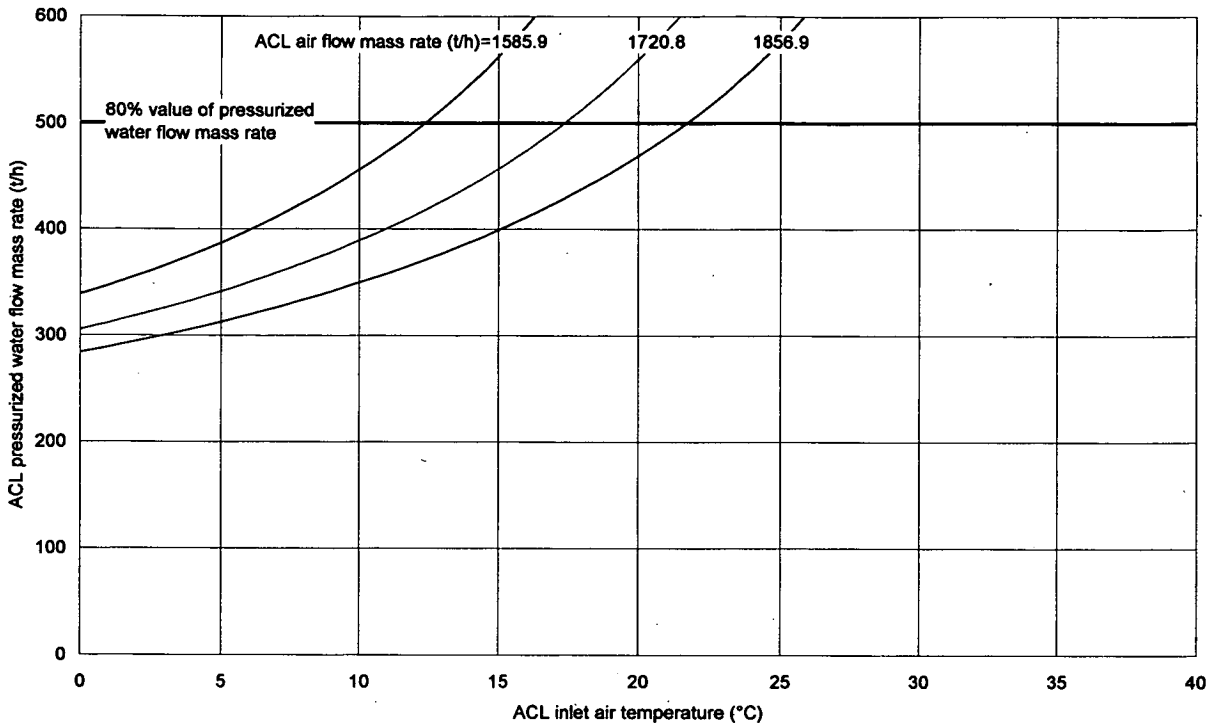


Fig. C.17 Rated operation / parallel-loaded, $T_{Water}^{ACL-IN} = 138 \text{ }^\circ\text{C}$

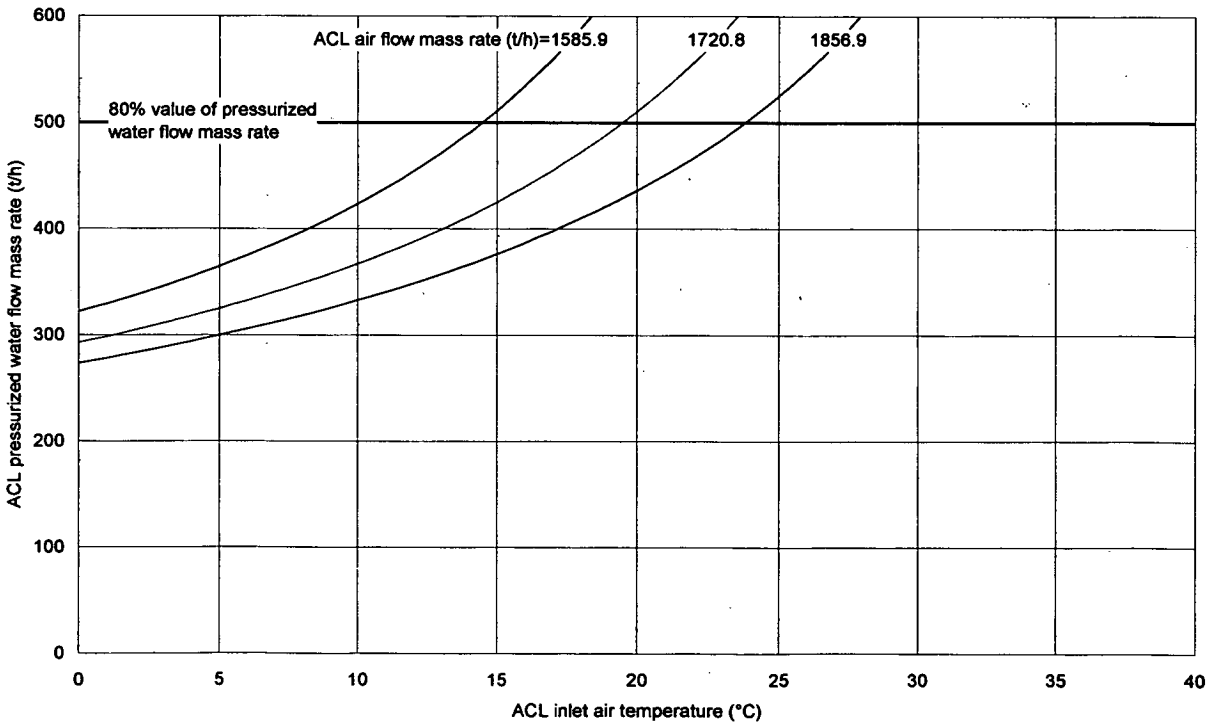


Fig. C.18 Rated operation / parallel-loaded, $T_{Water}^{ACL-IN} = 140 \text{ }^\circ\text{C}$

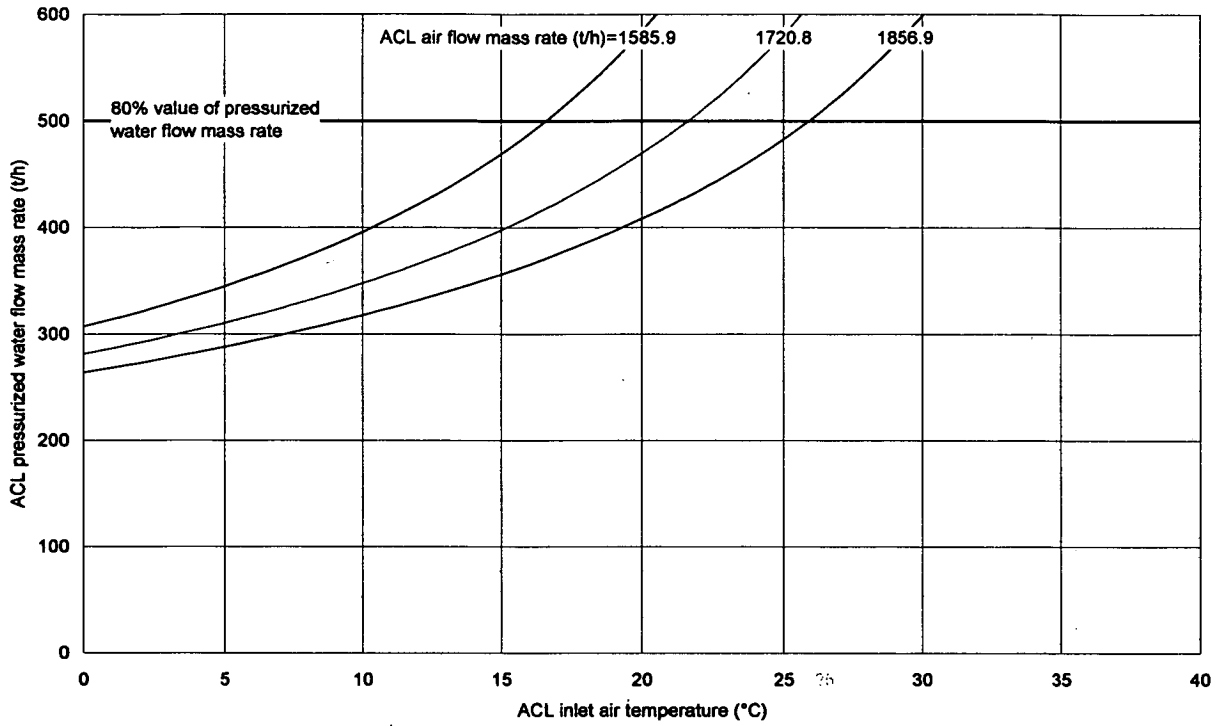


Fig. C.19 Rated operation / parallel-loaded, $T_{Water}^{ACL-IN} = 142 \text{ } ^\circ\text{C}$

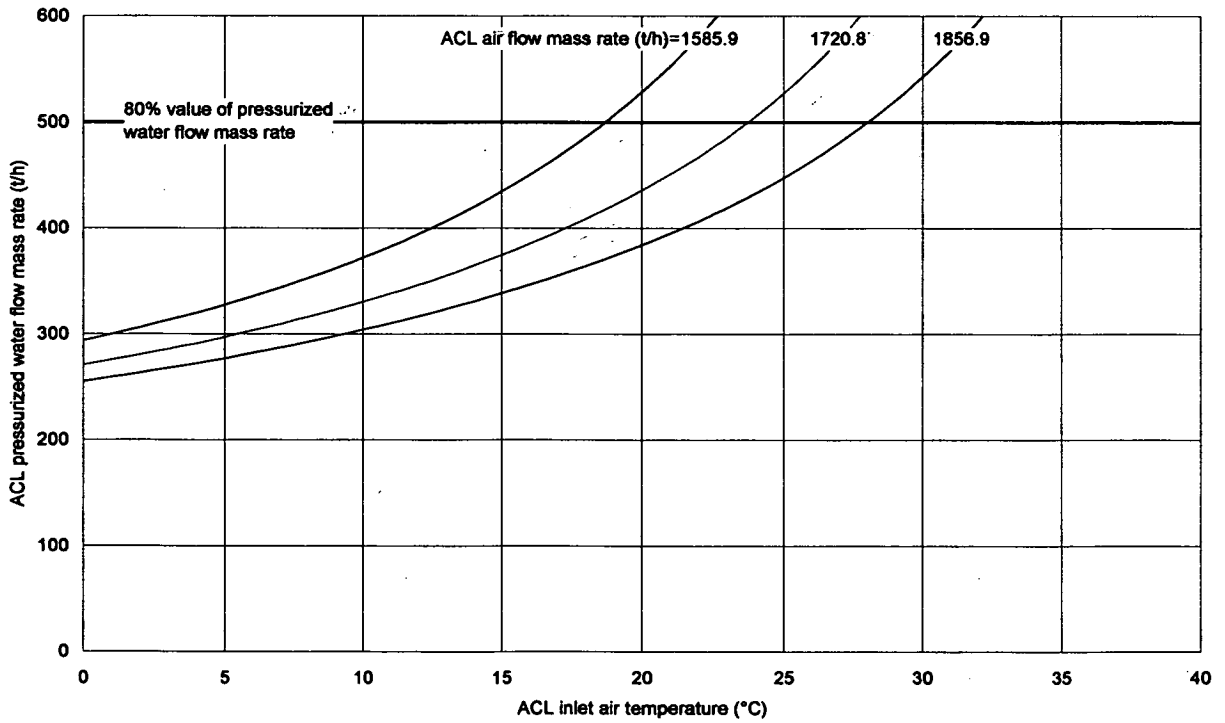


Fig. C.20 Rated operation / parallel-loaded, $T_{Water}^{ACL-IN} = 144 \text{ } ^\circ\text{C}$

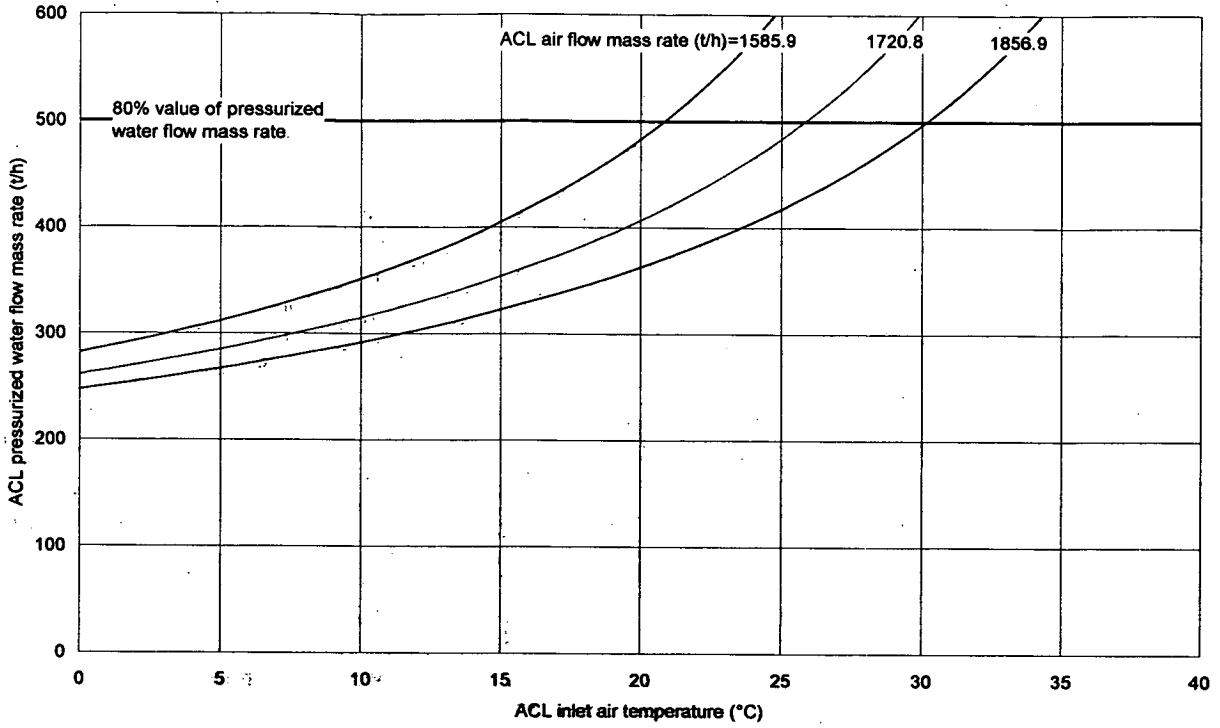


Fig. C.21 Rated operation / parallel-loaded, $T_{Water}^{ACL-IN} = 146 \text{ }^\circ\text{C}$

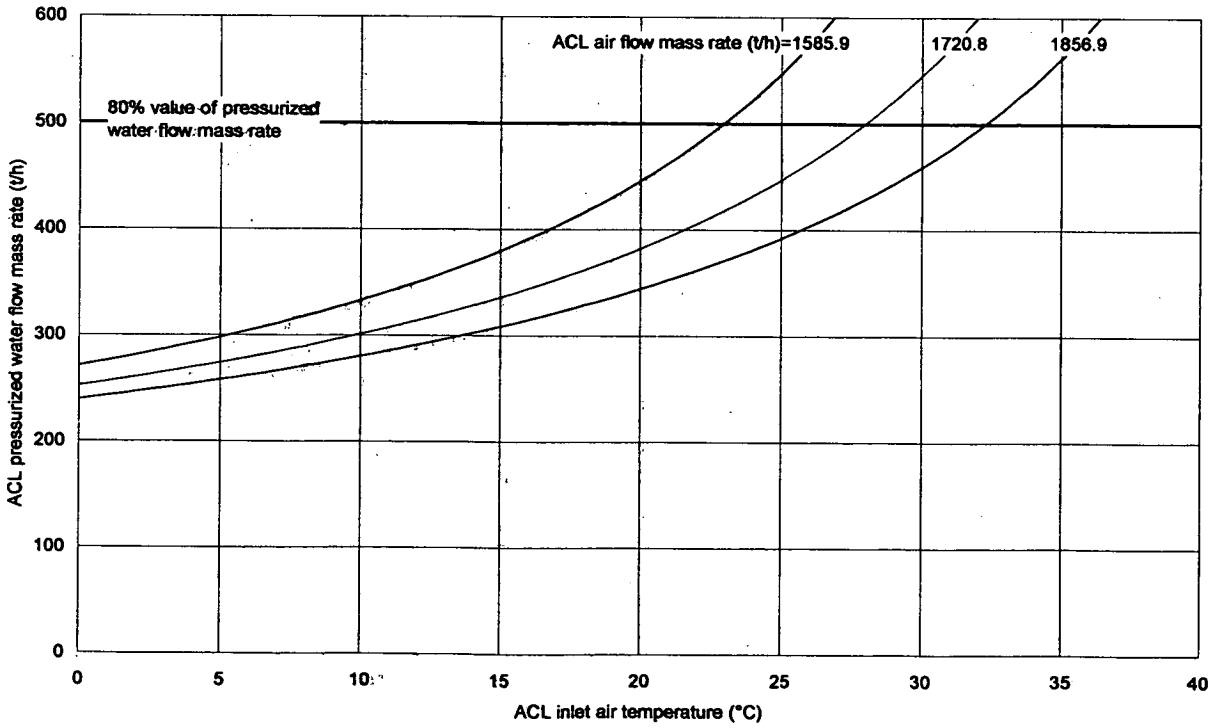


Fig. C.22 Rated operation / parallel-loaded, $T_{Water}^{ACL-IN} = 148 \text{ }^\circ\text{C}$

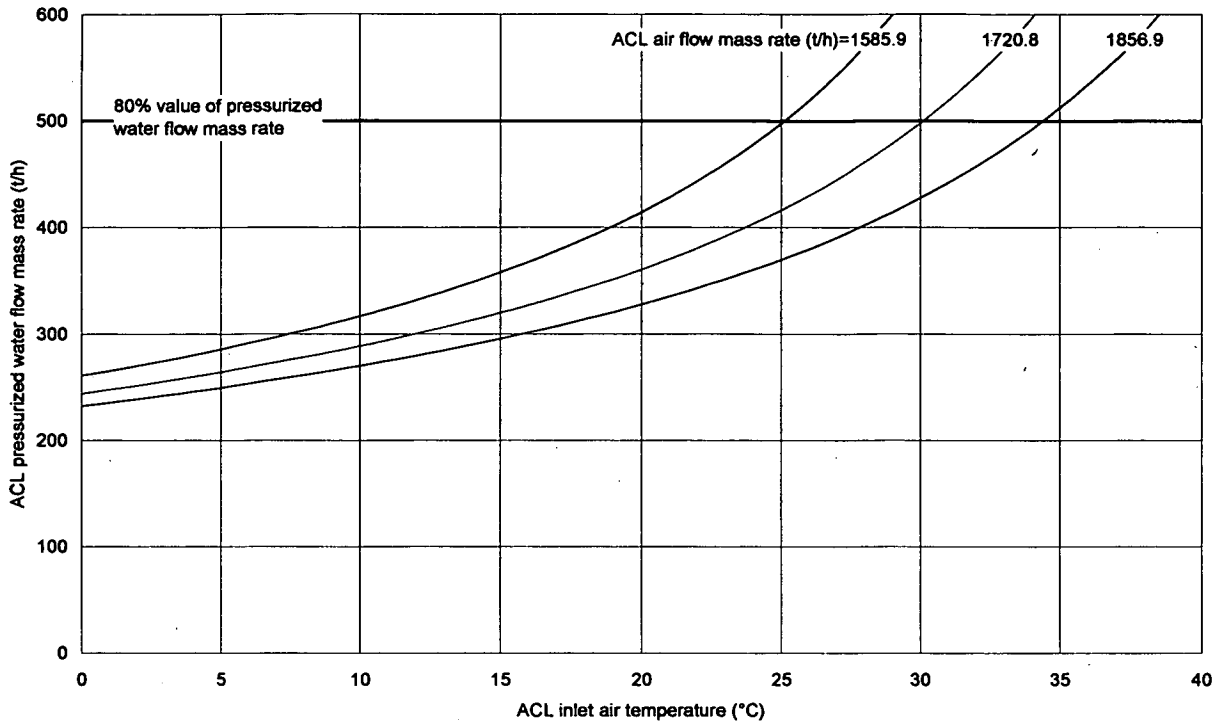


Fig. C.23 Rated operation / parallel-loaded, $T_{Water}^{ACL-IN} = 150 \text{ } ^\circ\text{C}$

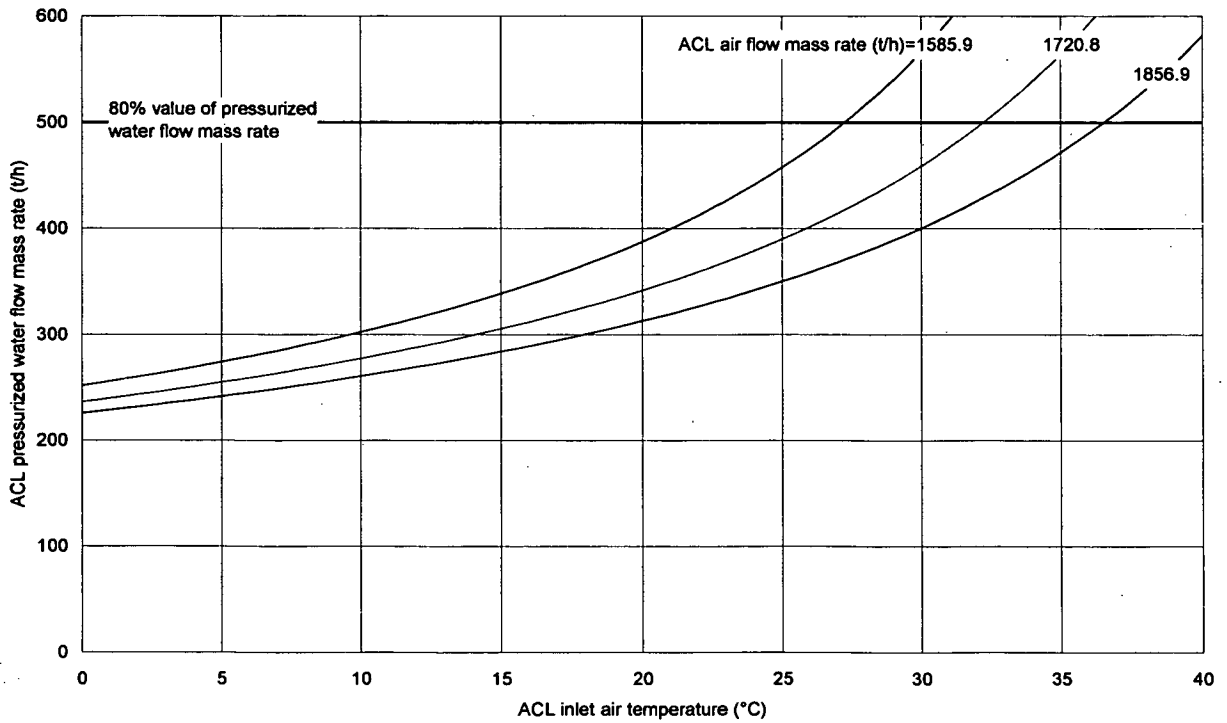


Fig. C.24 Rated operation / parallel-loaded, $T_{Water}^{ACL-IN} = 152 \text{ } ^\circ\text{C}$

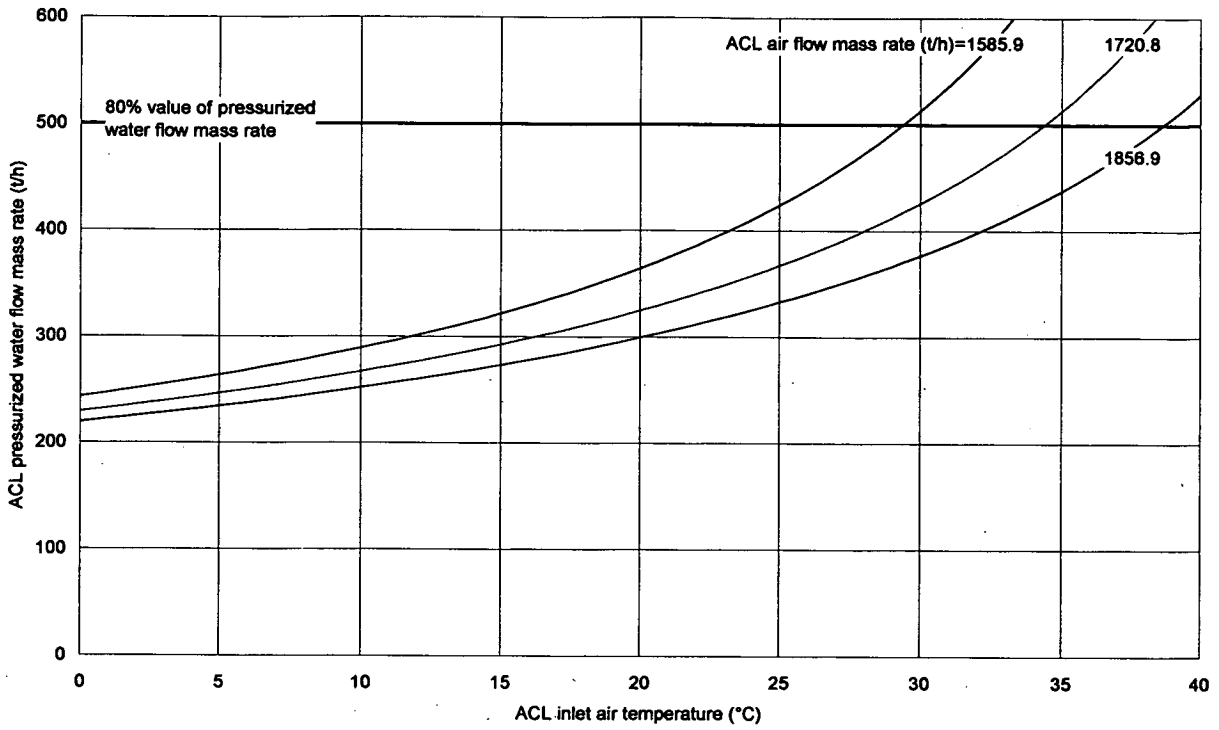


Fig. C.25 Rated operation / parallel-loaded, $T_{Water}^{ACL-IN} = 154 \text{ } ^\circ\text{C}$

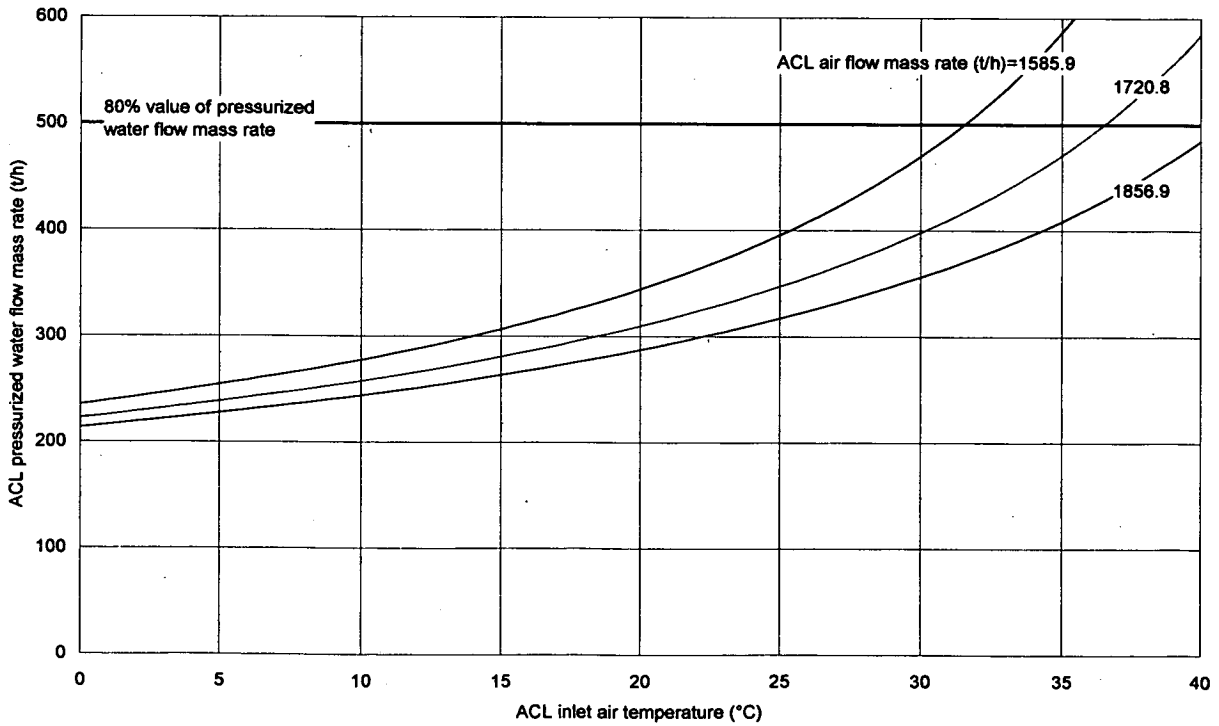


Fig. C.26 Rated operation / parallel-loaded, $T_{Water}^{ACL-IN} = 156 \text{ } ^\circ\text{C}$

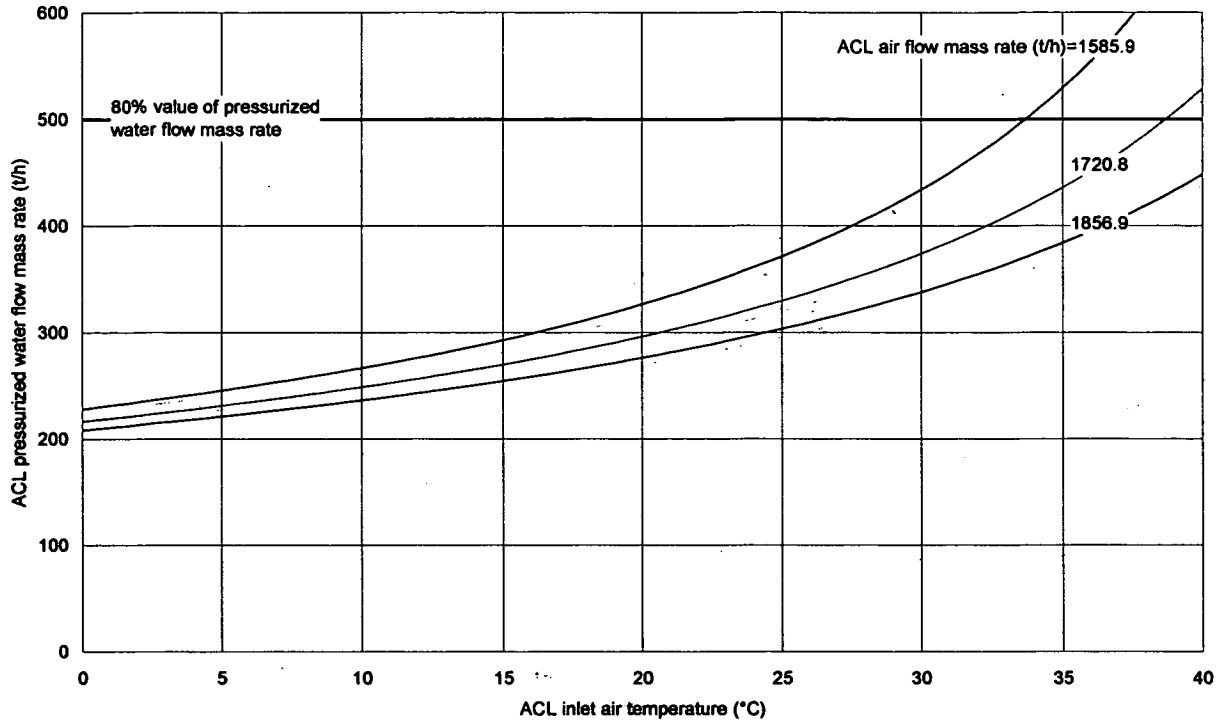


Fig. C.27 Rated operation / parallel-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 158 \text{ } ^\circ\text{C}$

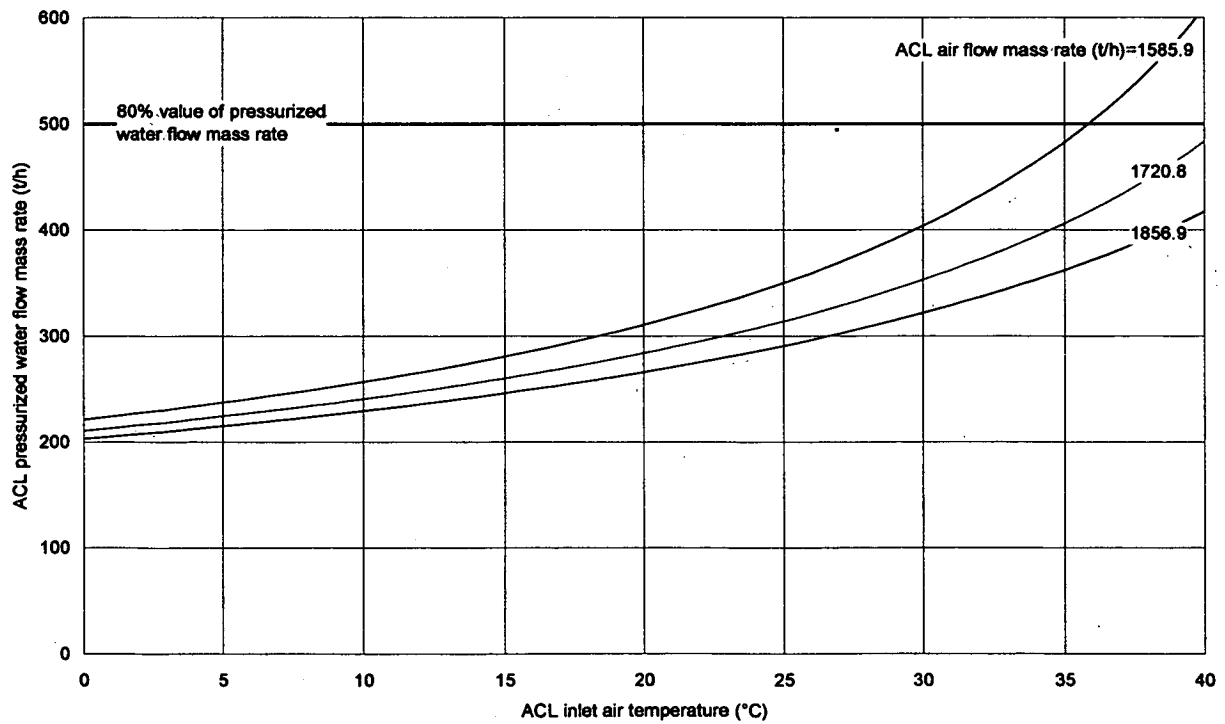


Fig. C.28 Rated operation / parallel-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 160 \text{ } ^\circ\text{C}$

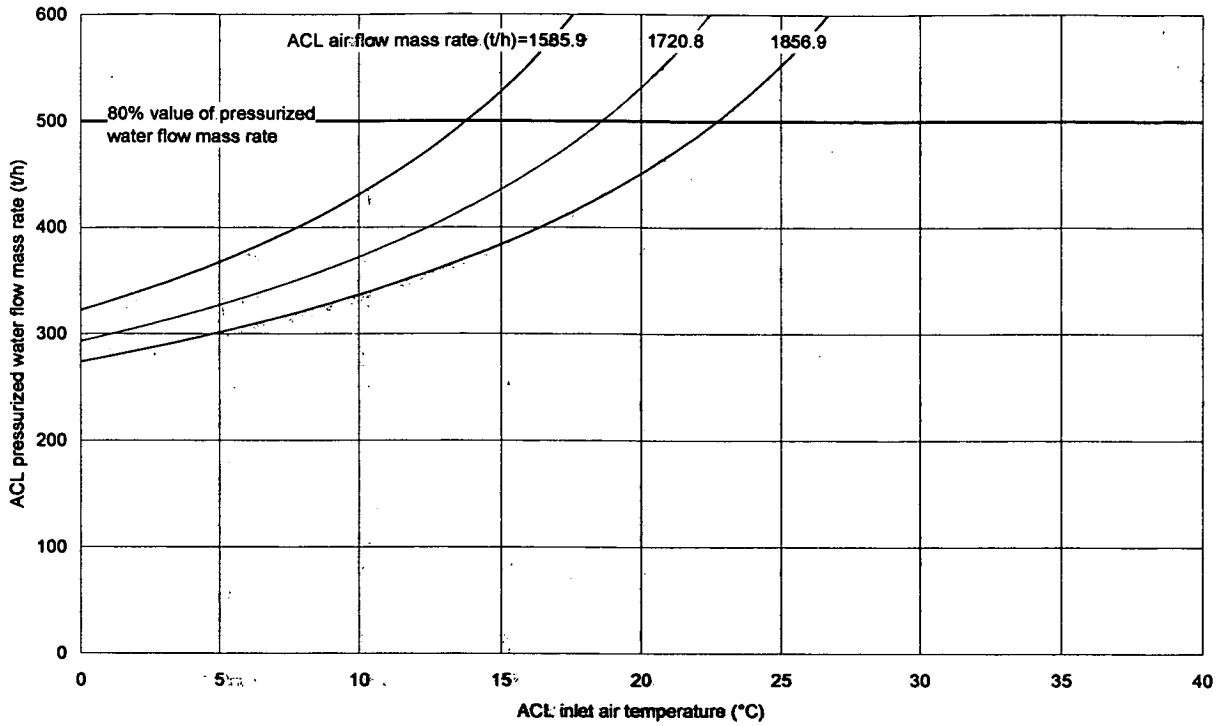


Fig. C.29 High temperature test operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL-IN} = 134 \text{ }^{\circ}\text{C}$

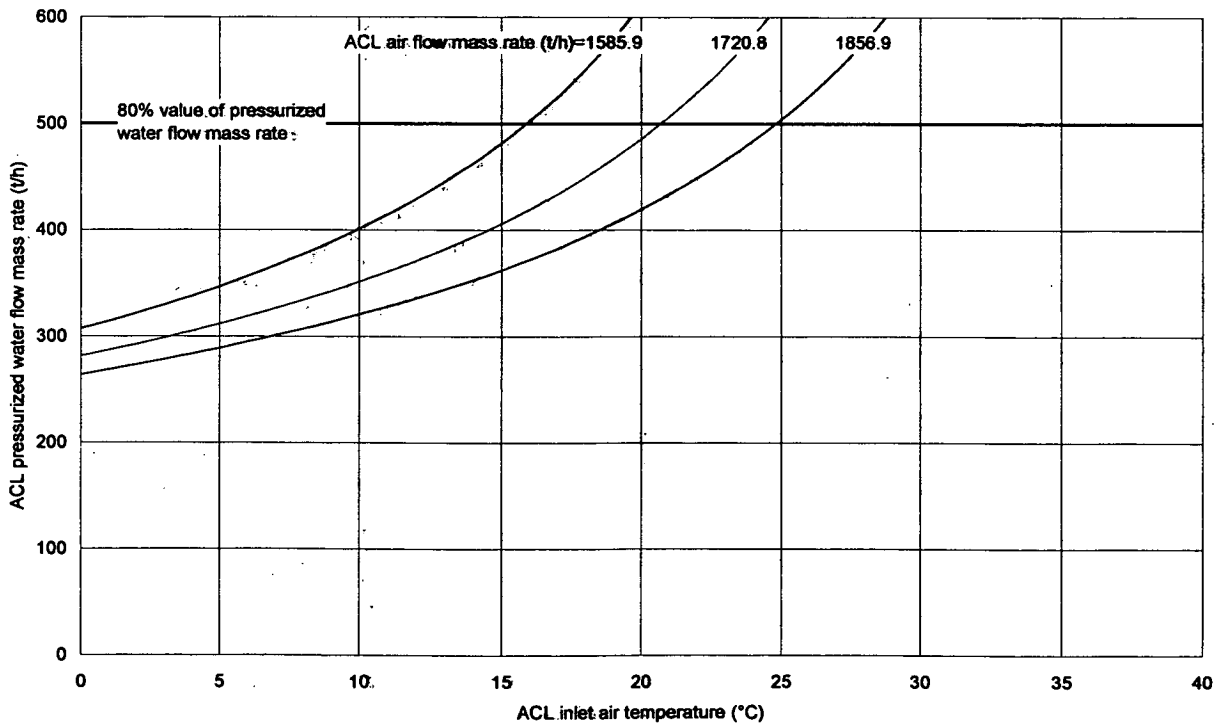


Fig. C.30 High temperature test operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL-IN} = 136 \text{ }^{\circ}\text{C}$

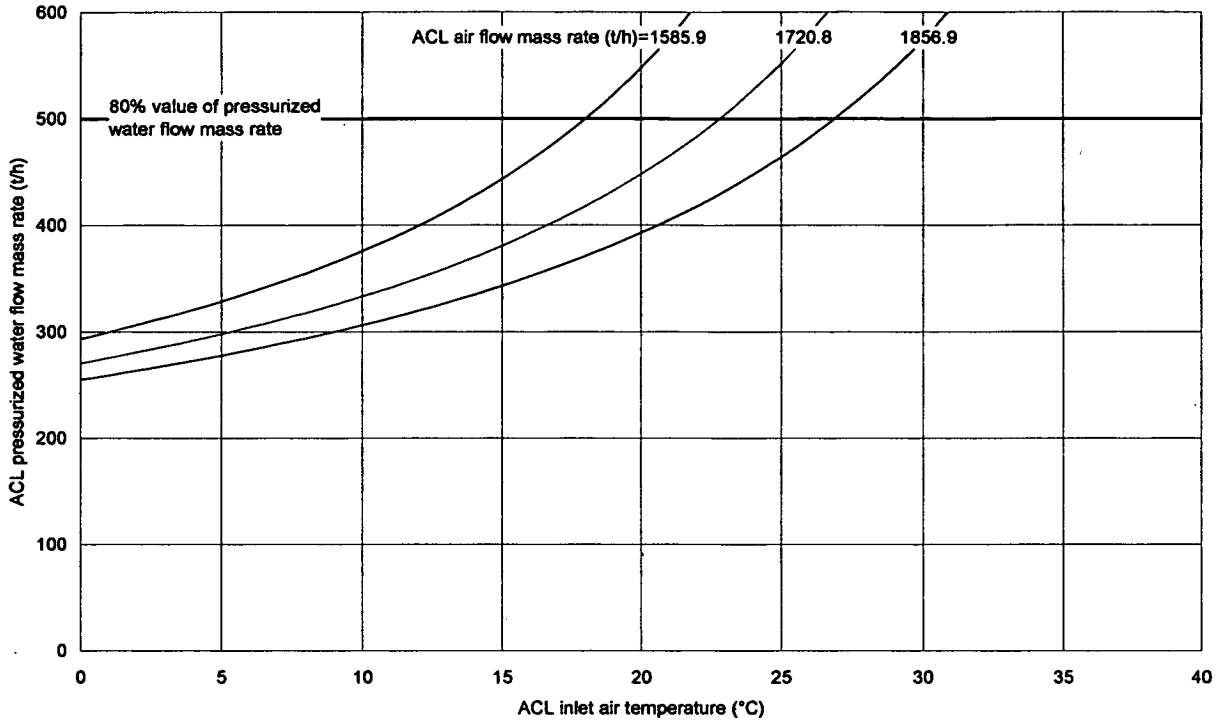


Fig. C.31 High temperature test operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN}=138\text{ }^{\circ}\text{C}$

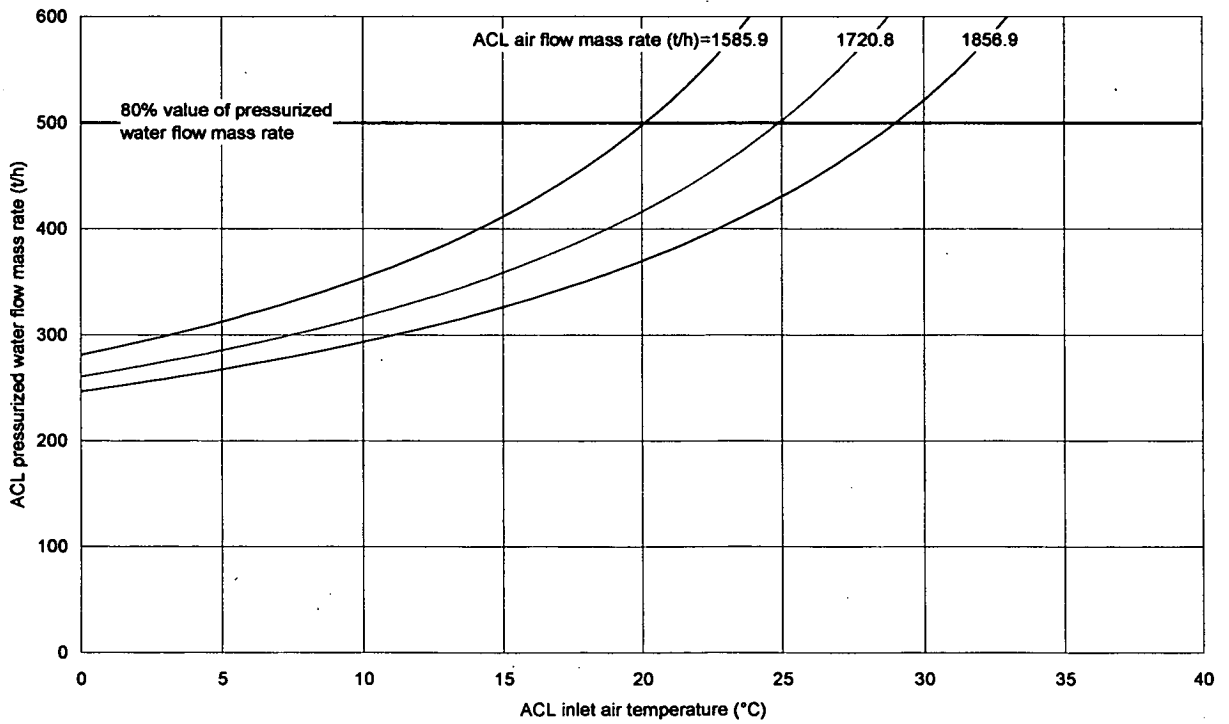


Fig. C.32 High temperature test operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN}=140\text{ }^{\circ}\text{C}$

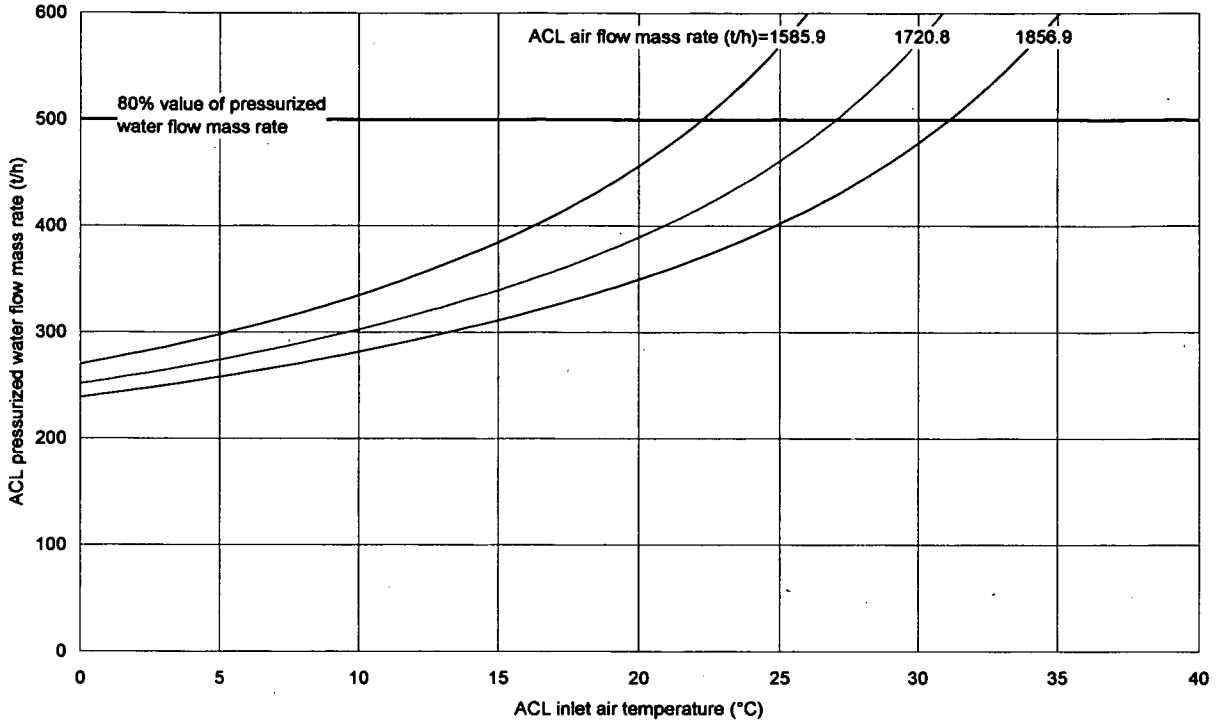


Fig. C.33 High temperature test operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL-IN} = 142 \text{ } ^\circ\text{C}$

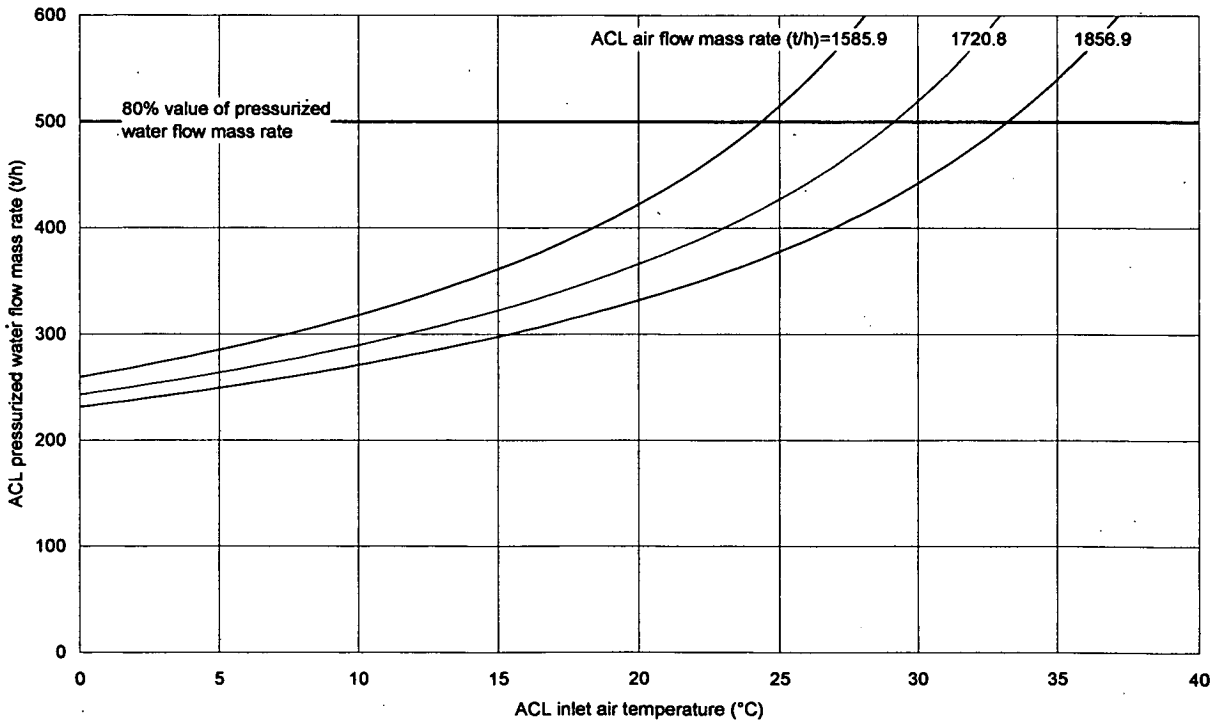


Fig. C.34 High temperature test operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL-IN} = 144 \text{ } ^\circ\text{C}$

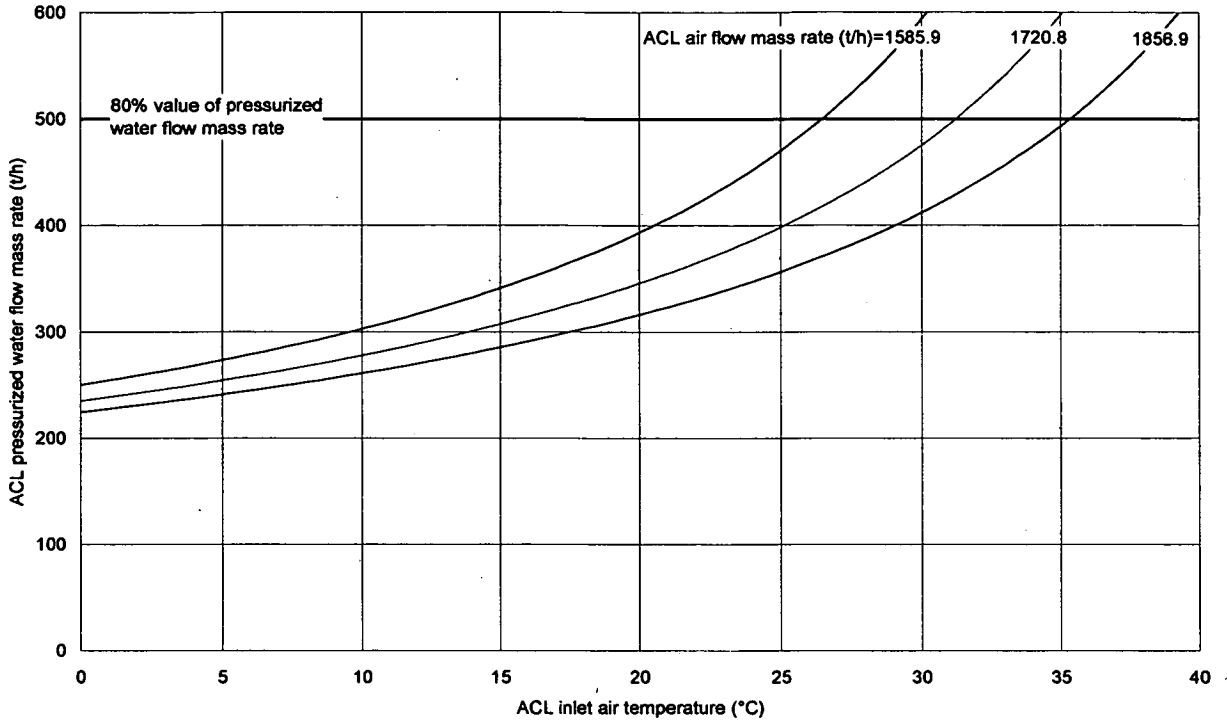


Fig. C.35 High temperature test operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL-IN} = 146 \text{ }^{\circ}\text{C}$

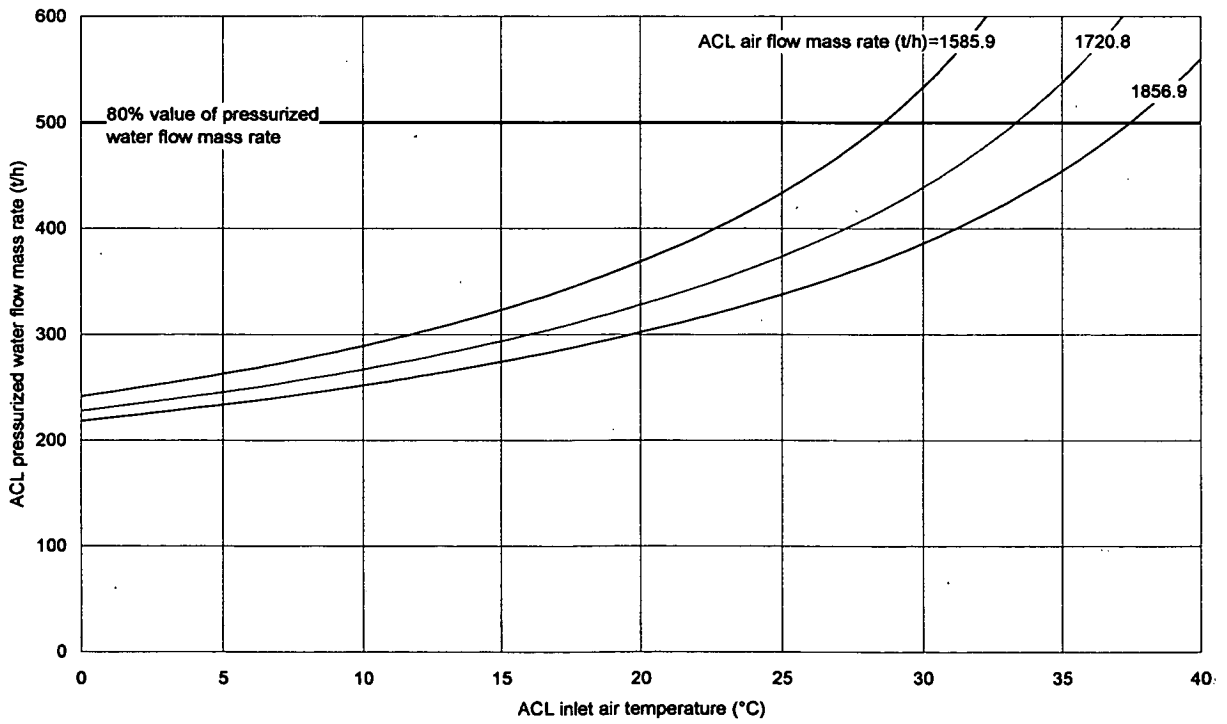


Fig. C.36 High temperature test operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL-IN} = 148 \text{ }^{\circ}\text{C}$

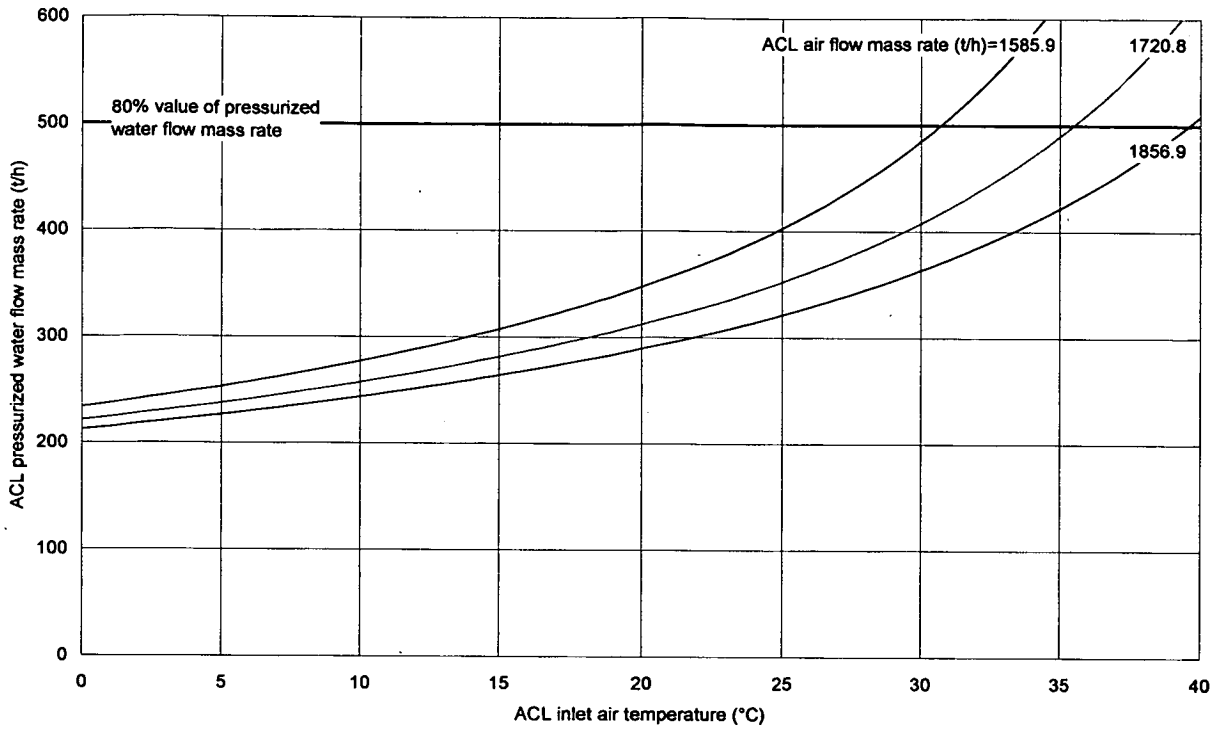


Fig. C.37 High temperature test operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 150 \text{ } ^\circ\text{C}$

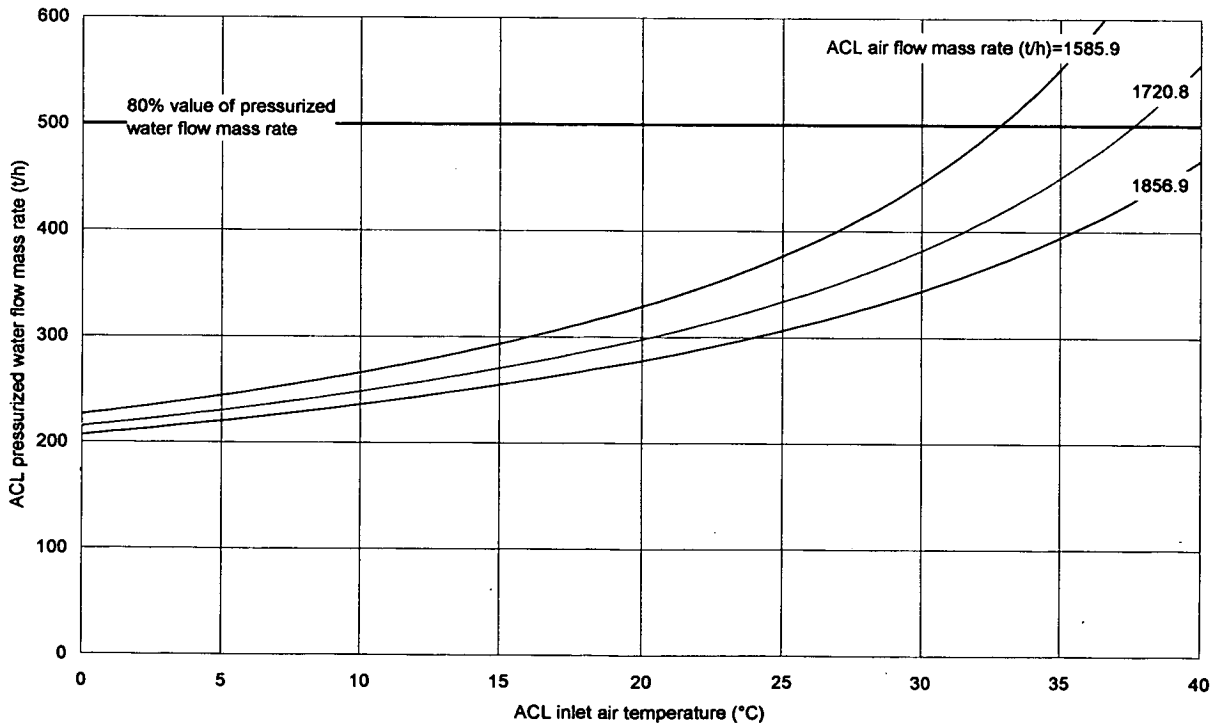


Fig. C.38 High temperature test operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 152 \text{ } ^\circ\text{C}$

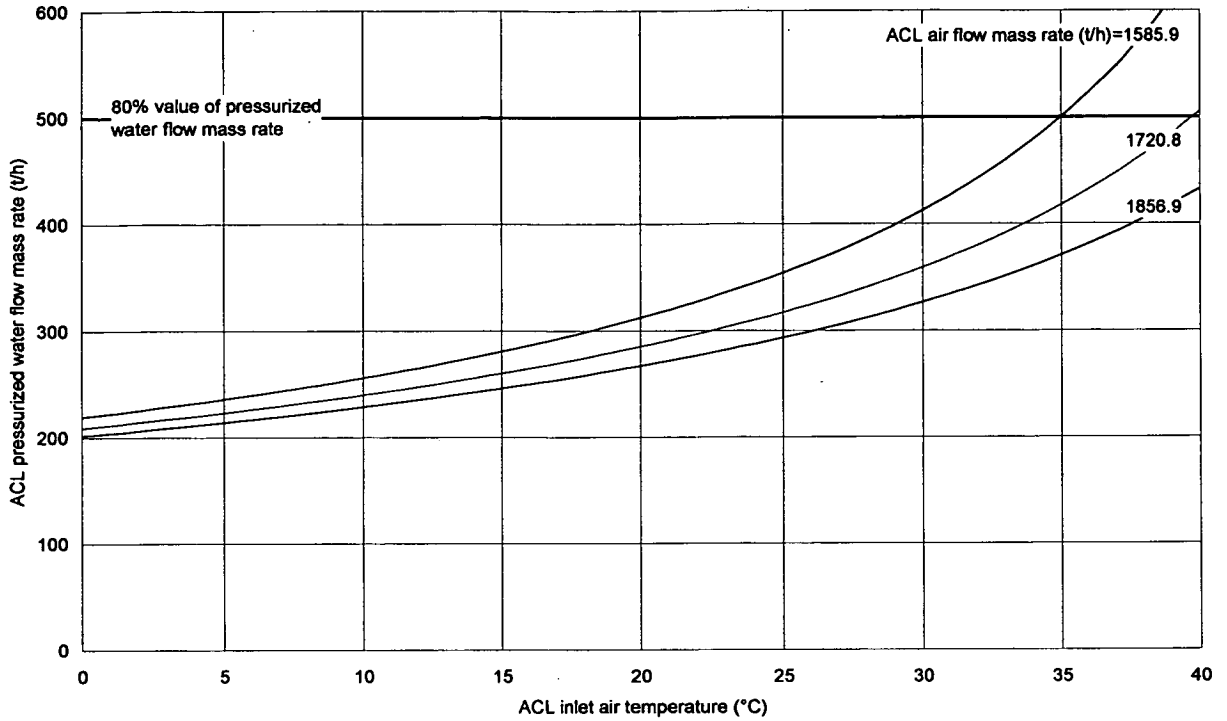


Fig. C.39 High temperature test operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 154 \text{ } ^\circ\text{C}$

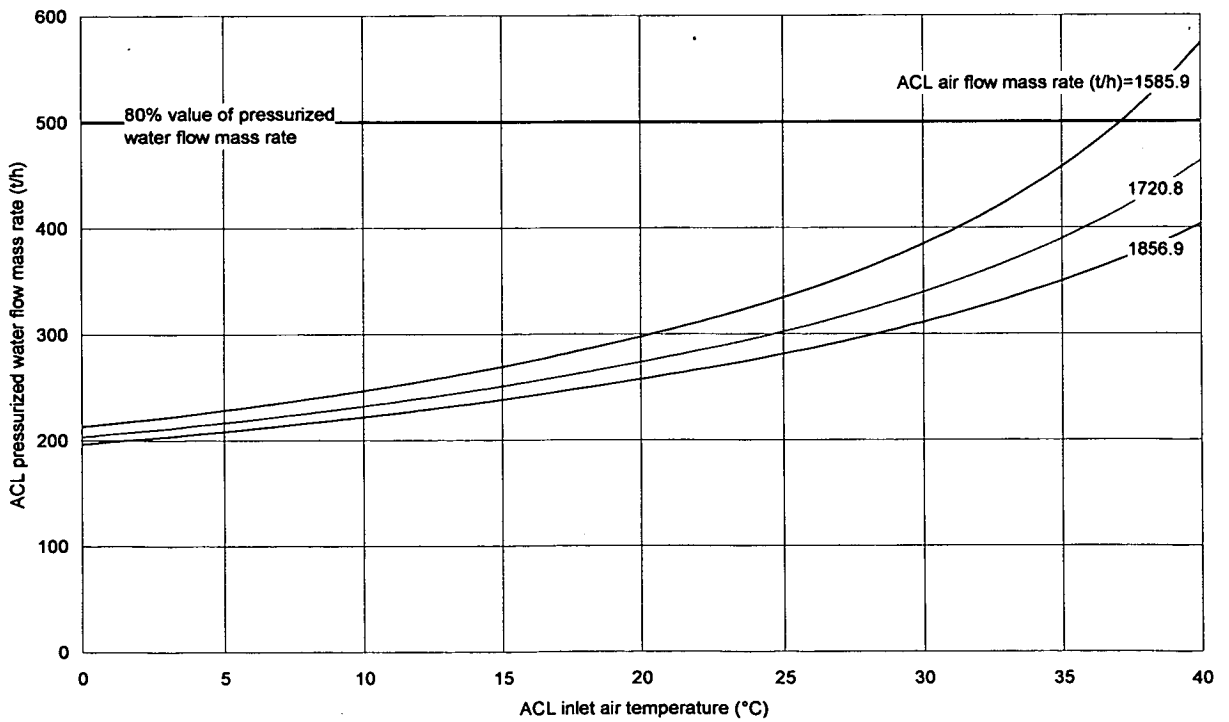


Fig. C.40 High temperature test operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 156 \text{ } ^\circ\text{C}$

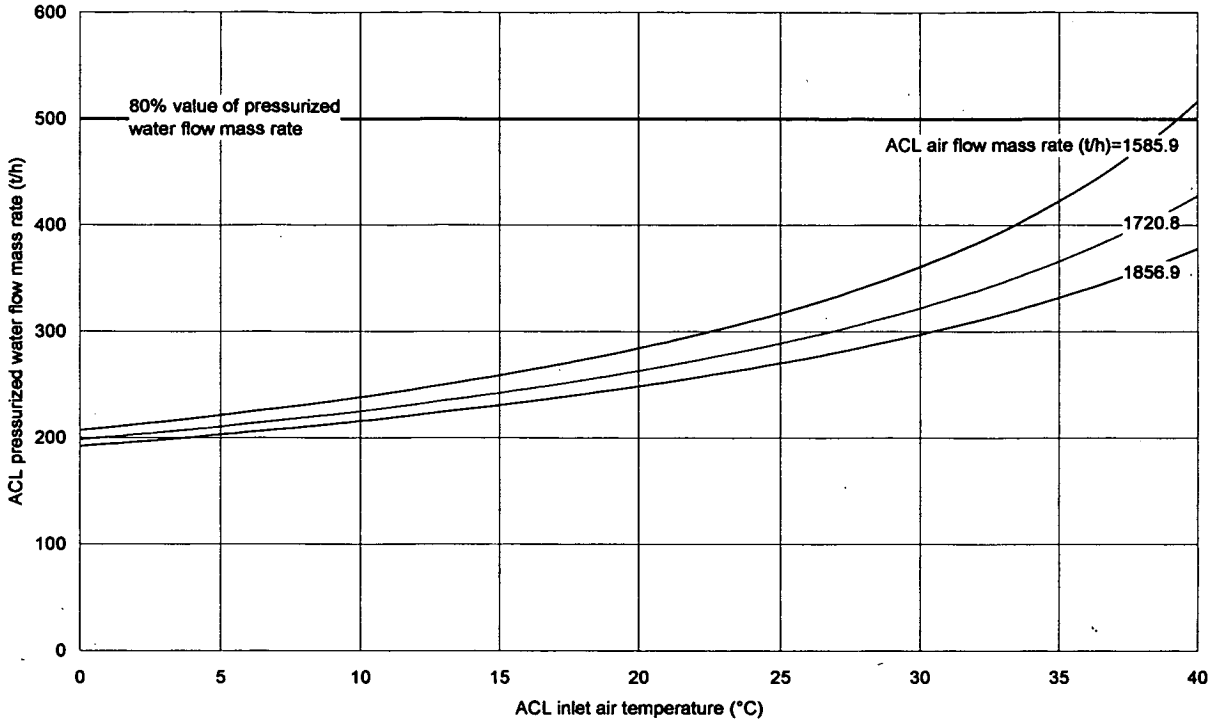


Fig. C.41 High temperature test operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL-IN} = 158 \text{ }^\circ\text{C}$

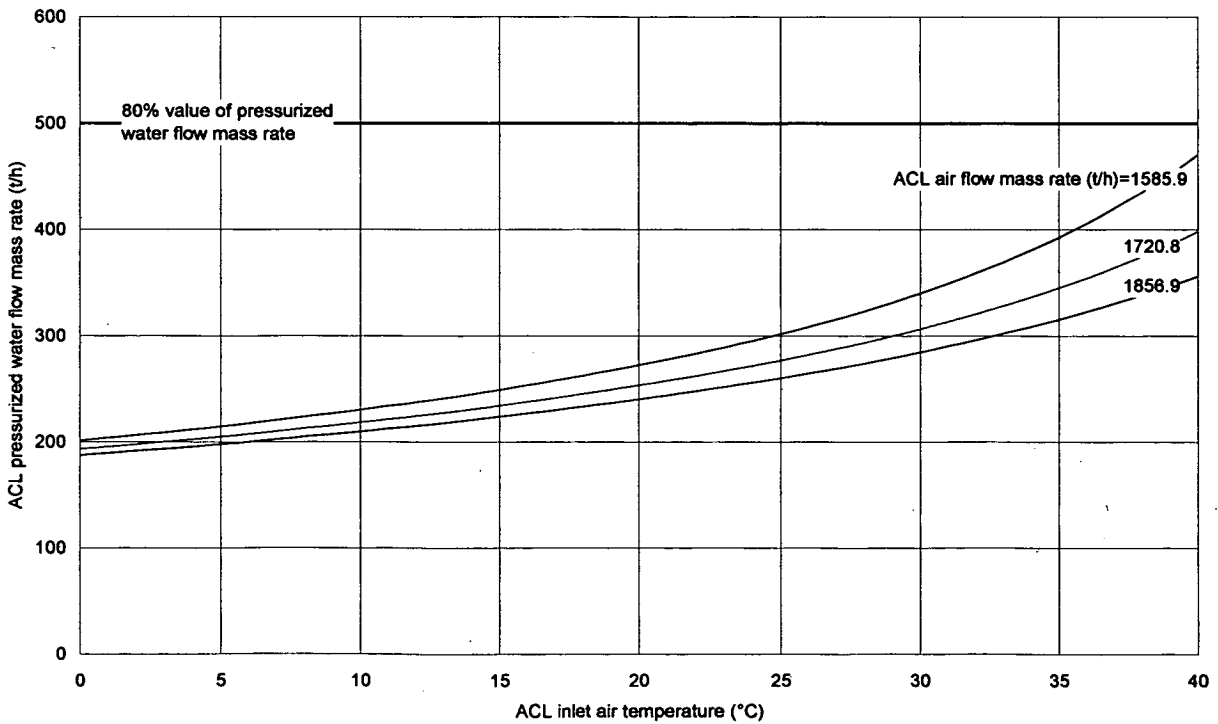


Fig. C.42 High temperature test operation / single-loaded, $T_{Water}^{ACL-IN} = 160 \text{ }^\circ\text{C}$

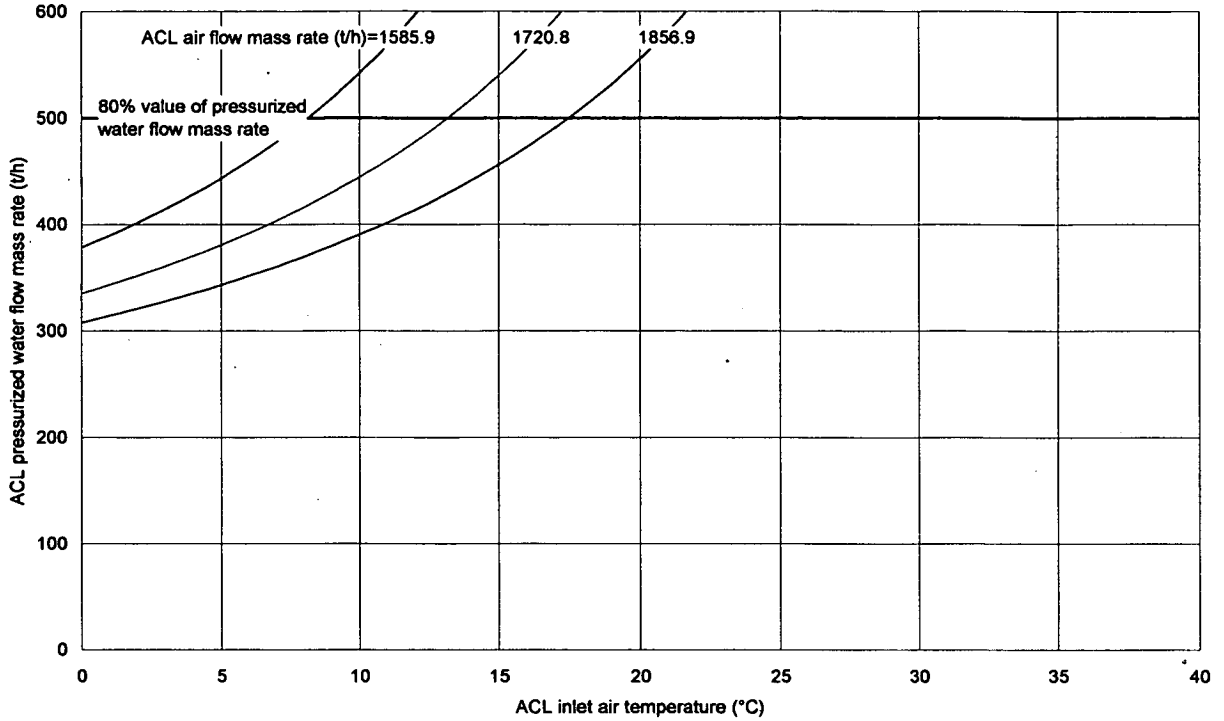


Fig. C.43 High temperature test operation / parallel-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 134 \text{ }^\circ\text{C}$

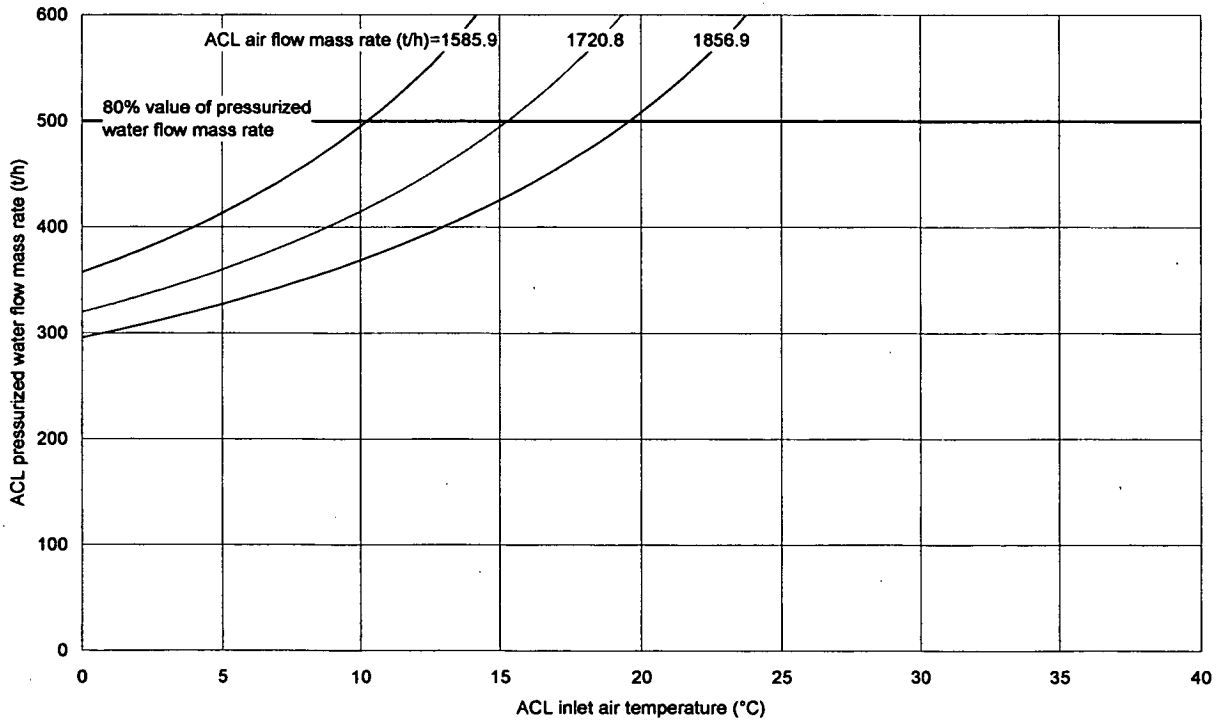


Fig. C.44 High temperature test operation / parallel-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 136 \text{ }^\circ\text{C}$

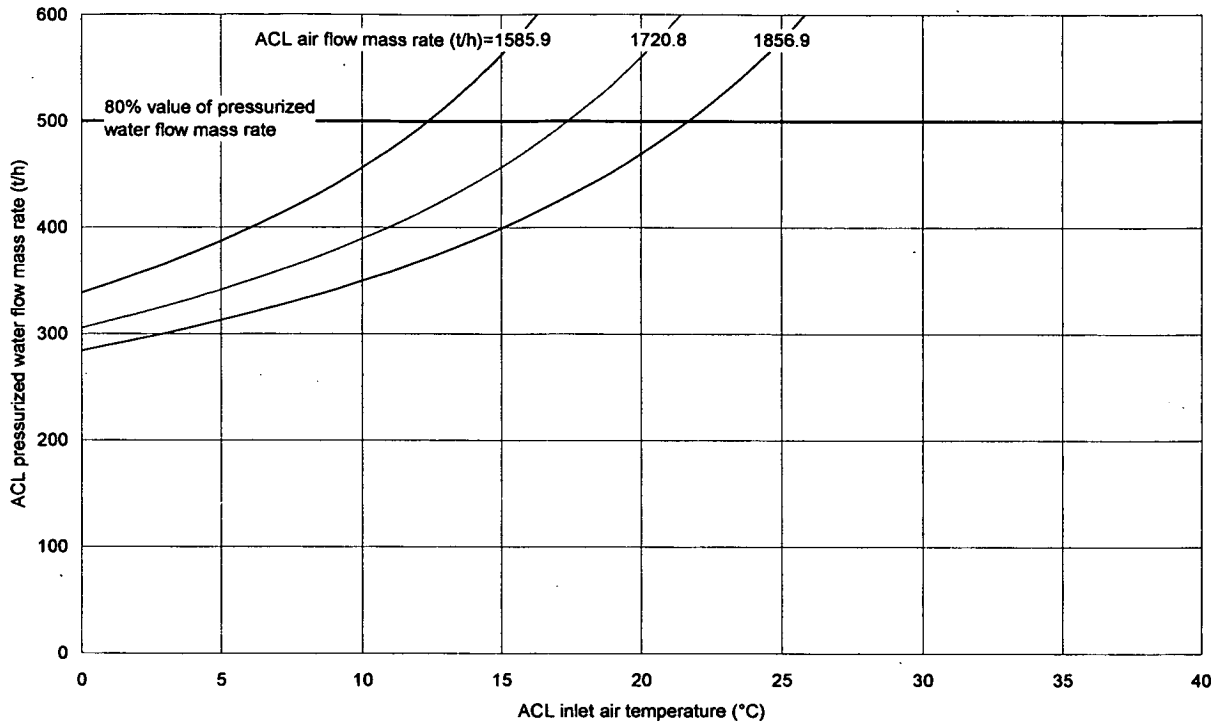


Fig. C.45 High temperature test operation / parallel-loaded, $T_{Water}^{ACL-IN}=138\text{ }^{\circ}\text{C}$

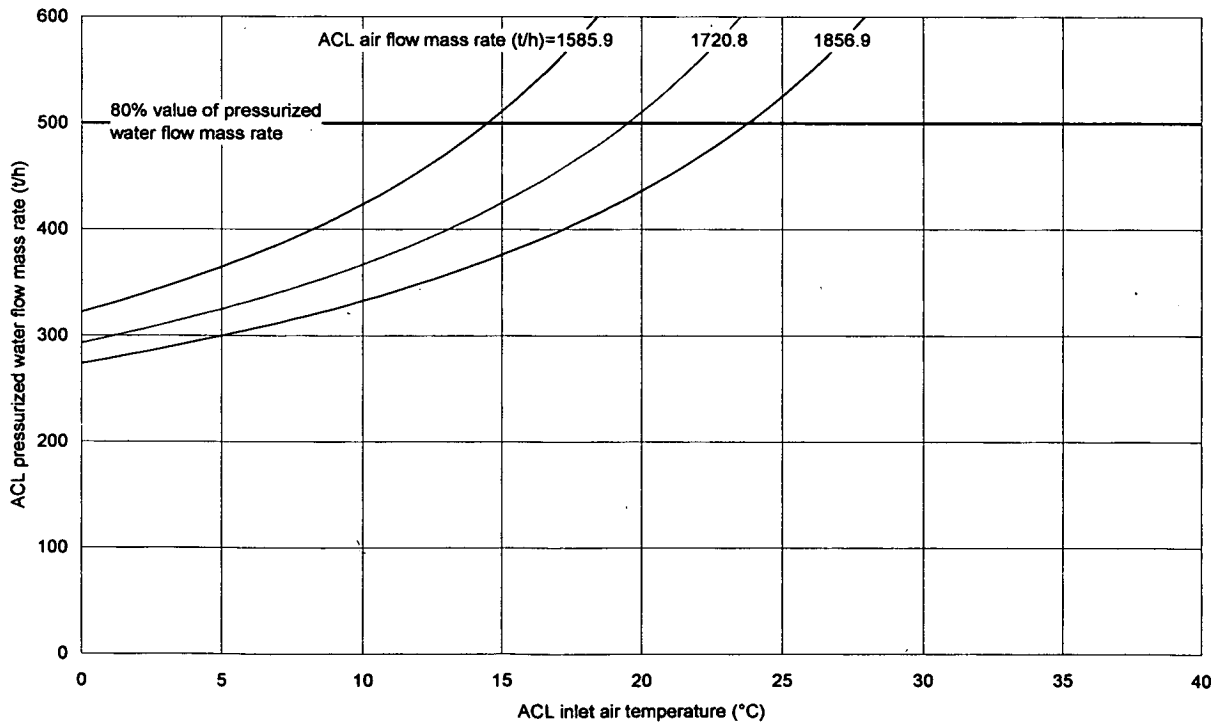


Fig. C.46 High temperature test operation / parallel-loaded, $T_{Water}^{ACL-IN}=140\text{ }^{\circ}\text{C}$

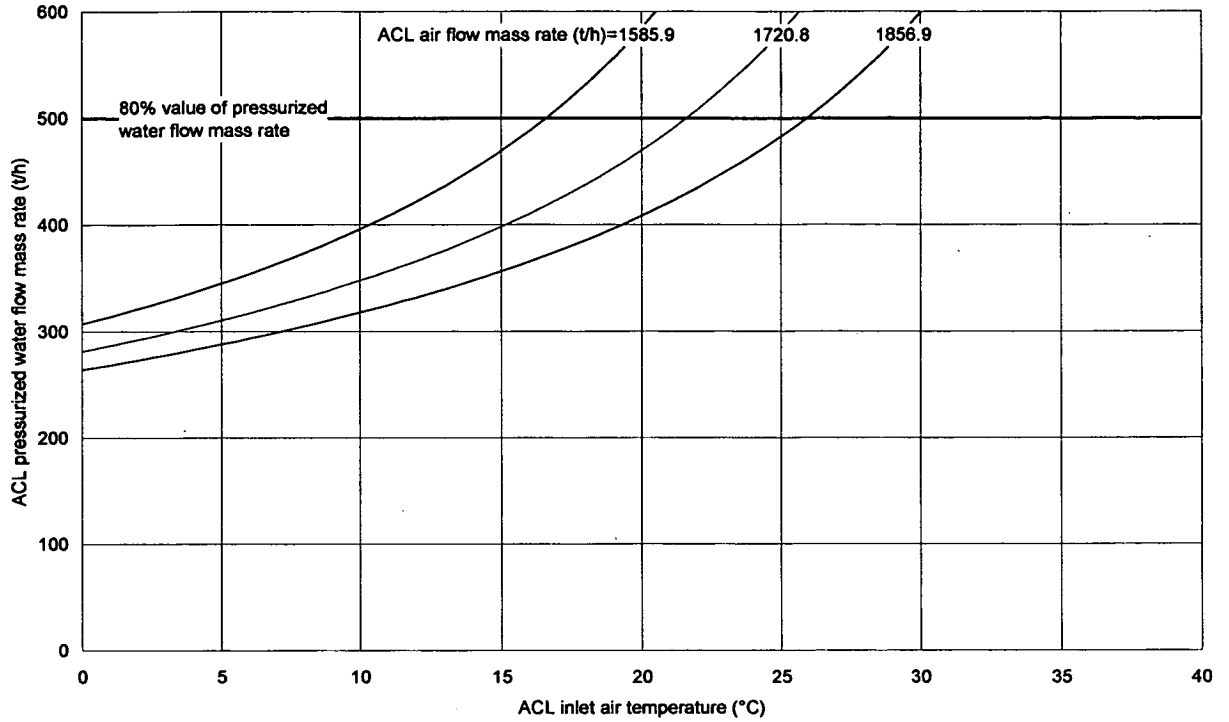


Fig. C.47 High temperature test operation / parallel-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 142 \text{ } ^\circ\text{C}$

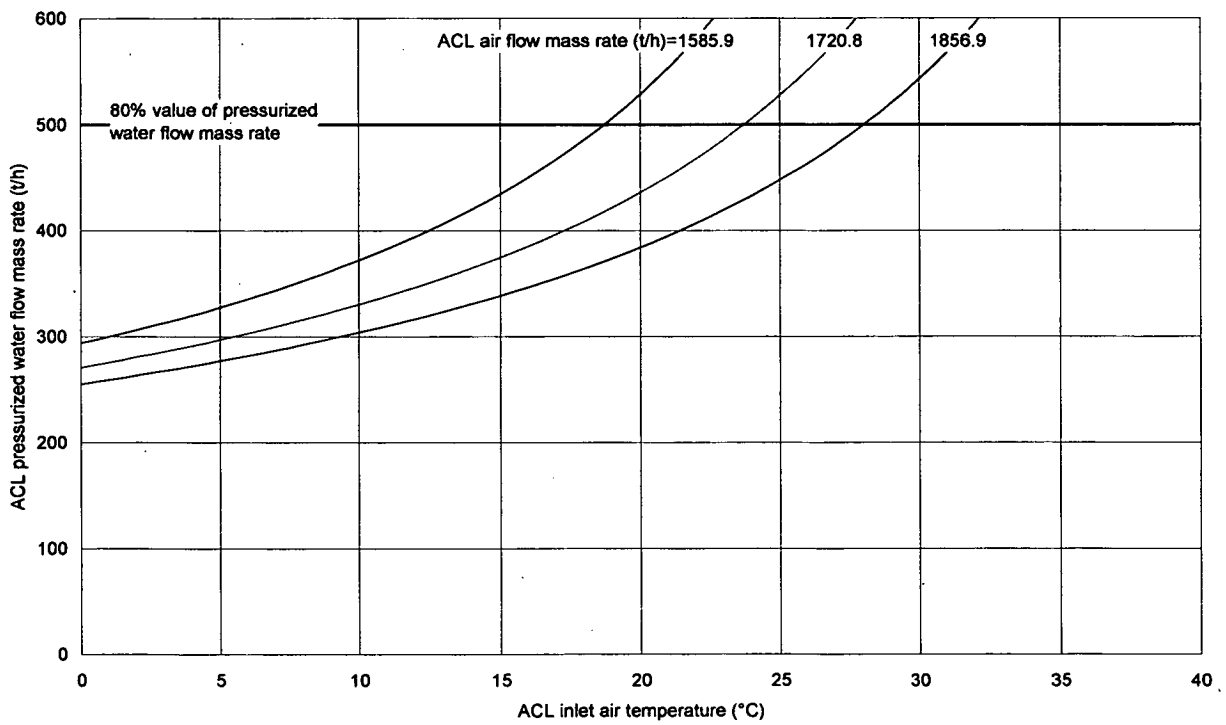


Fig. C.48 High temperature test operation / parallel-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 144 \text{ } ^\circ\text{C}$

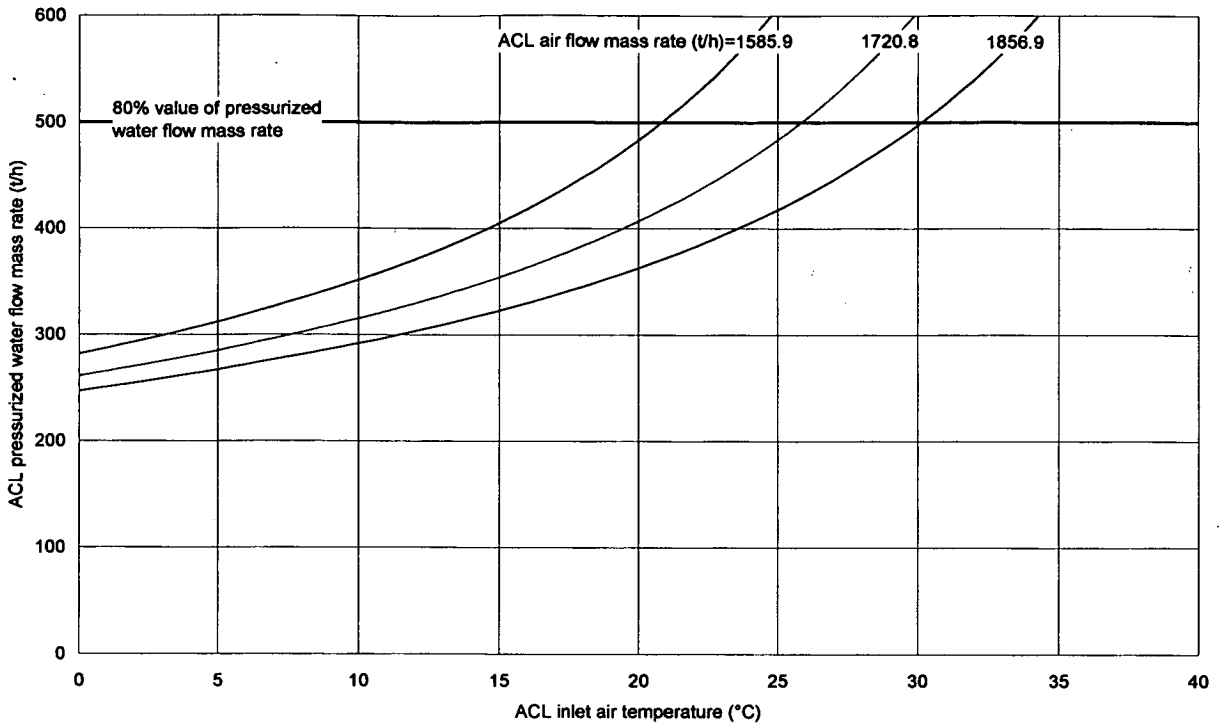


Fig. C.49 High temperature test operation / parallel-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 146 \text{ } ^\circ\text{C}$

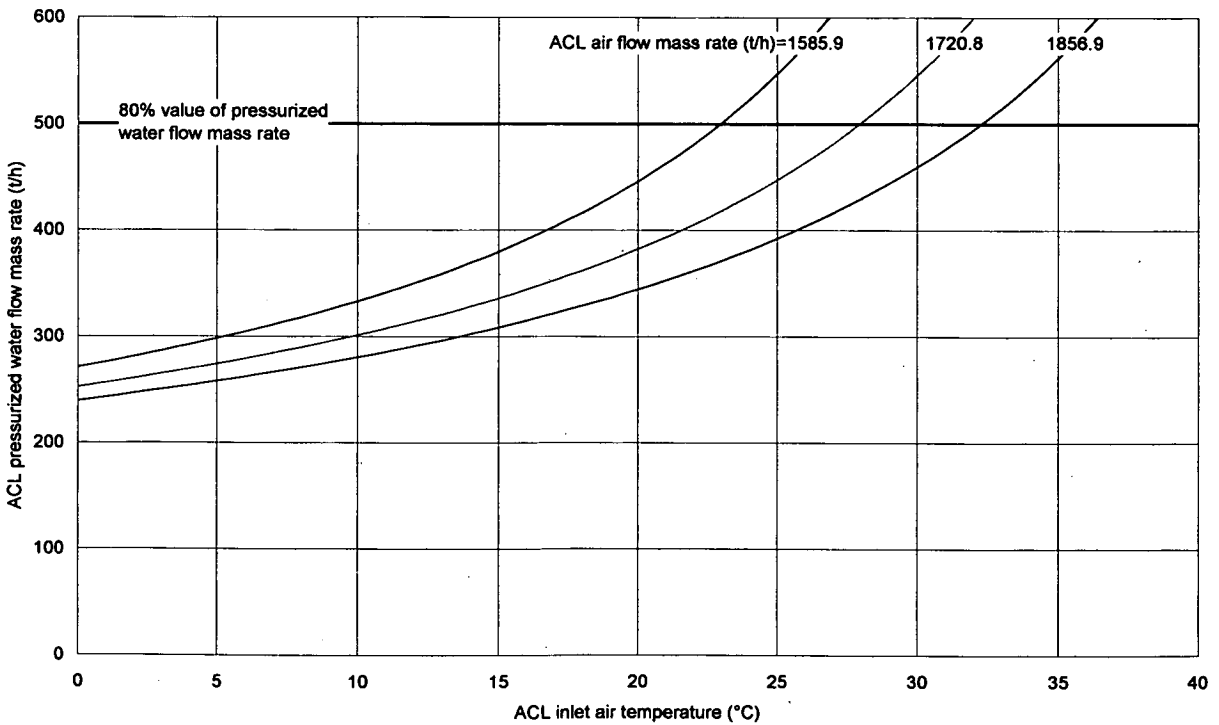


Fig. C.50 High temperature test operation / parallel-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 148 \text{ } ^\circ\text{C}$

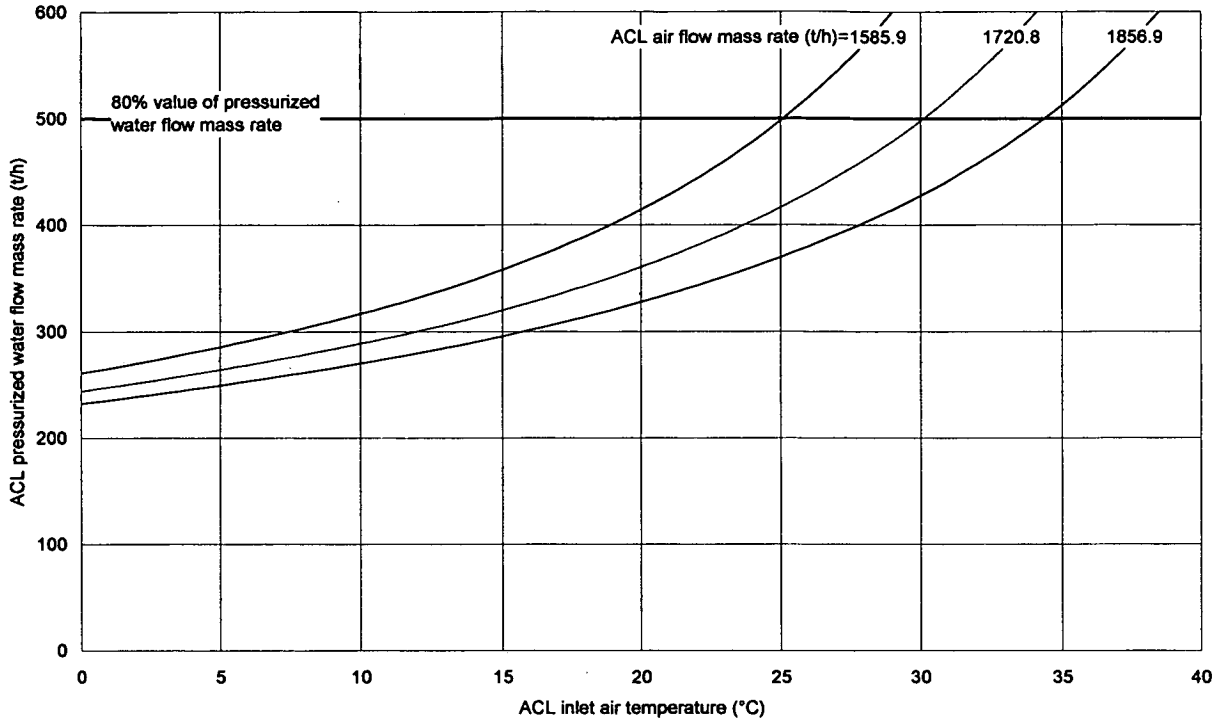


Fig. C.51 High temperature test operation / parallel-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$

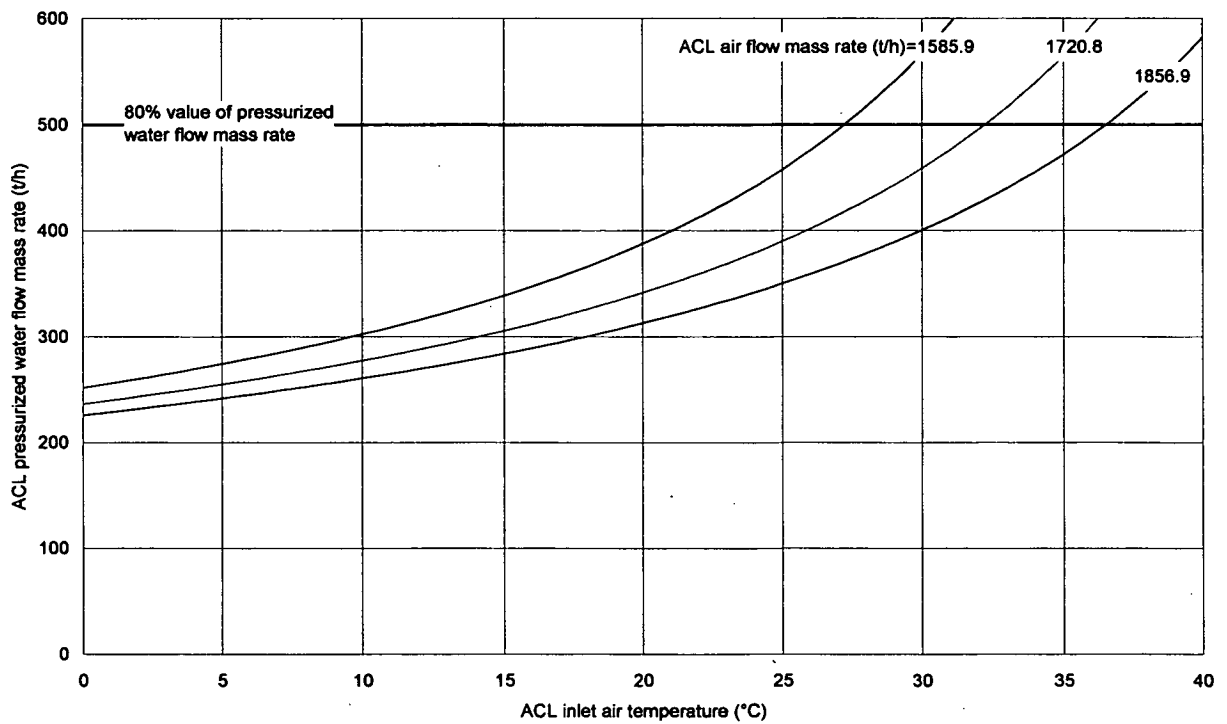


Fig. C.52 High temperature test operation / parallel-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 152 \text{ }^\circ\text{C}$

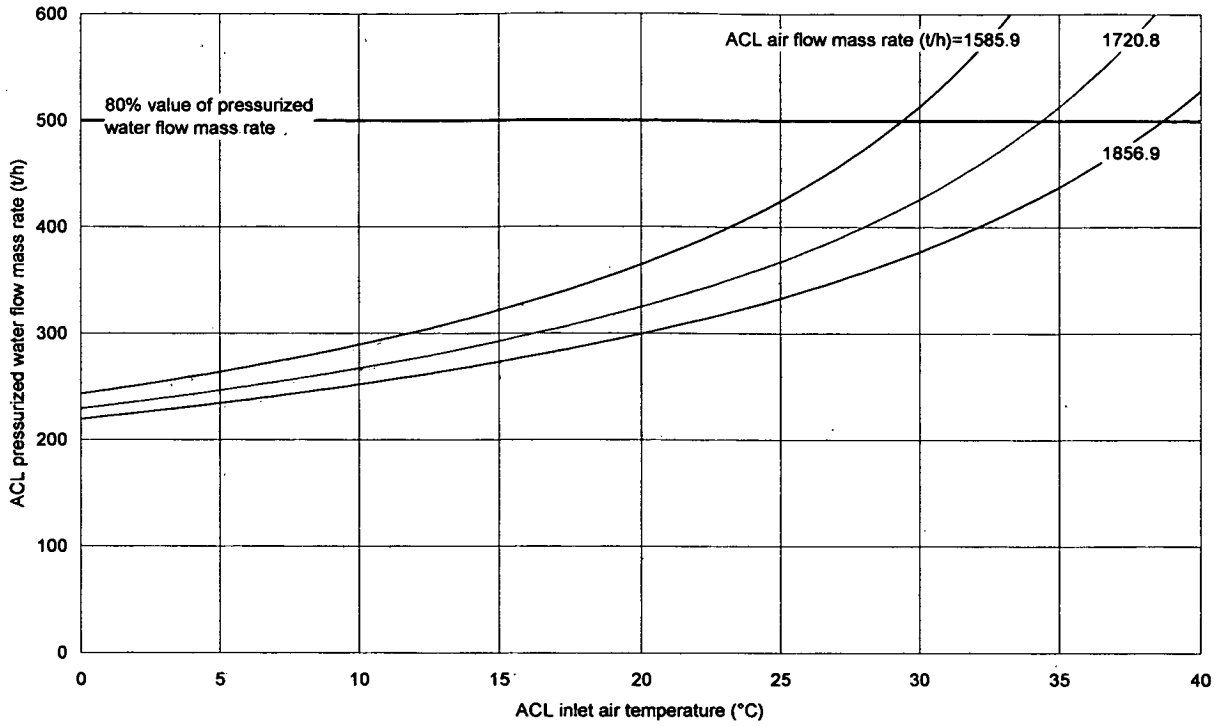


Fig. C.53 High temperature test operation / parallel-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 154 \text{ } ^\circ\text{C}$

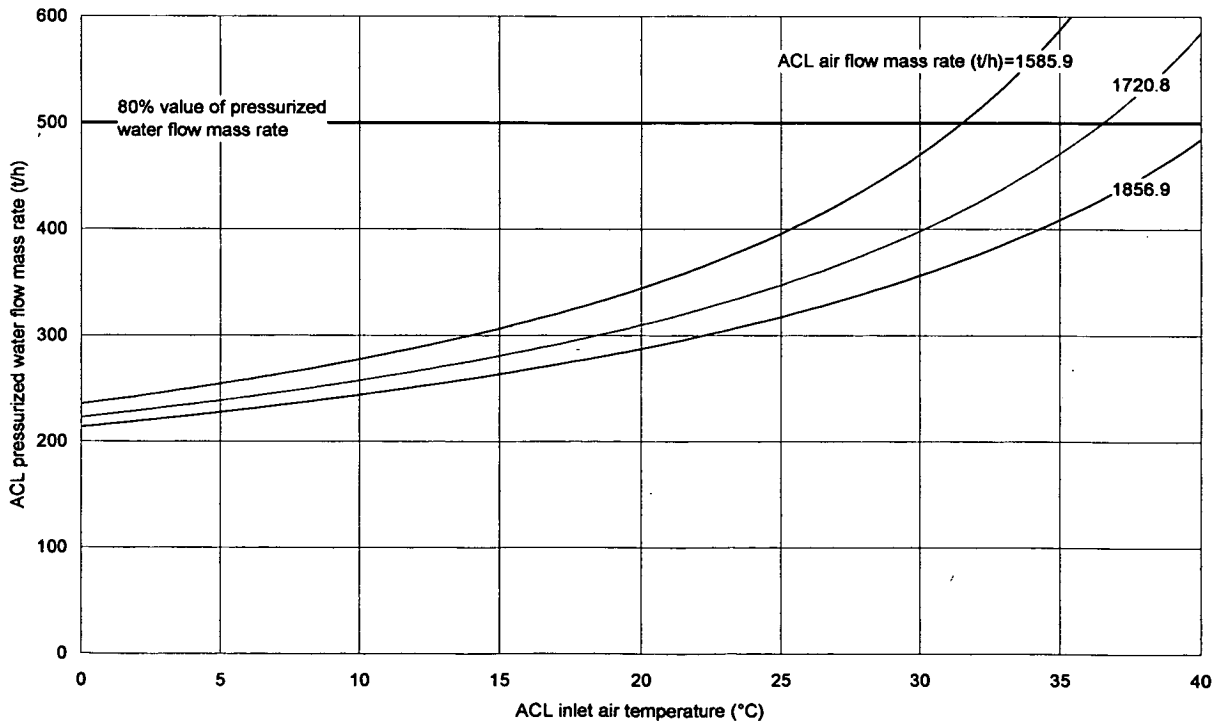


Fig. C.54 High temperature test operation / parallel-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN} = 156 \text{ } ^\circ\text{C}$

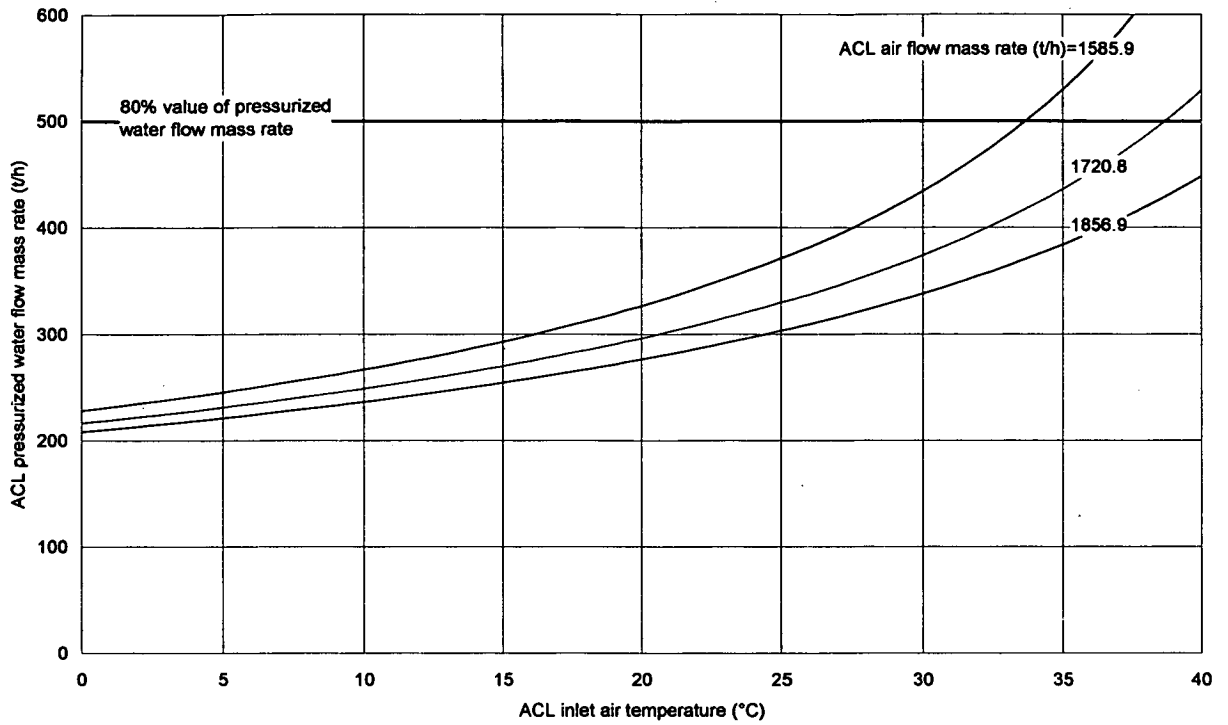


Fig. C.55 High temperature test operation / parallel-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN}=158\text{ }^{\circ}\text{C}$

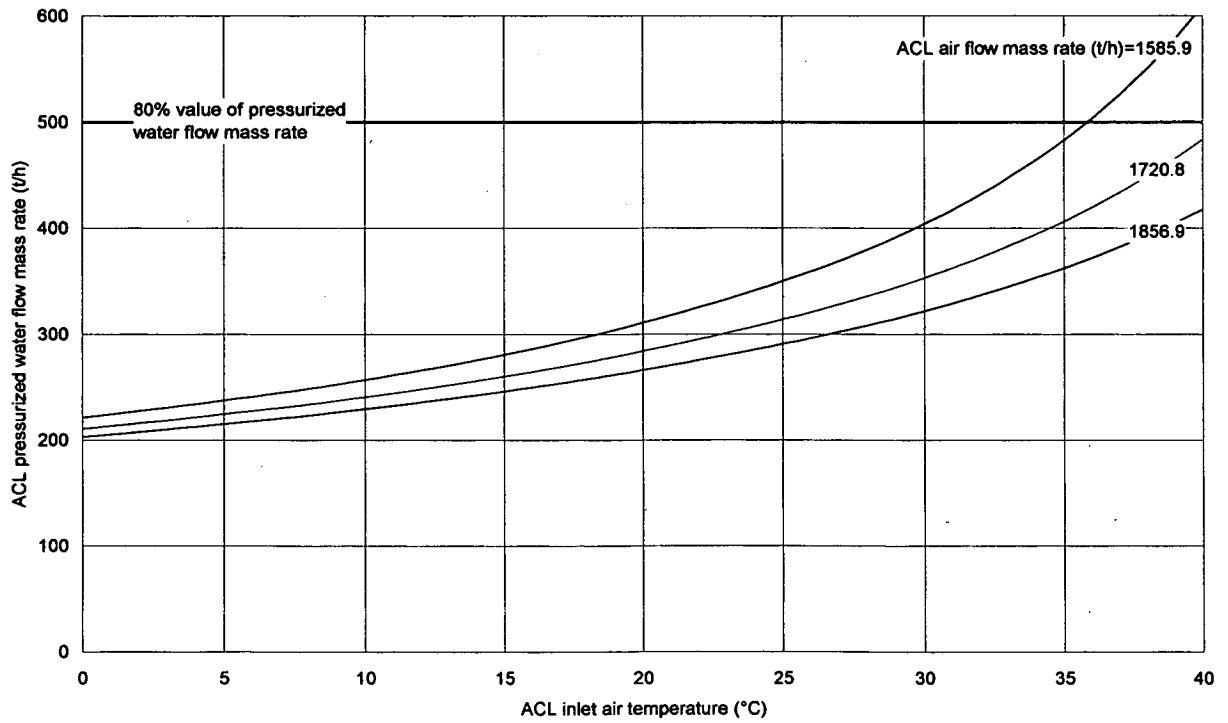


Fig. C.56 High temperature test operation / parallel-loaded, $T_{Water}^{ACL_IN}=160\text{ }^{\circ}\text{C}$

付録 D 原子炉出力に対する ACL 加圧水流量の予測

This is a blank page.

Figures list in Appendix D

Fig. D.1	Rated operation / single-loaded, $G_{Air}^{ACL} = 1585.9$ t/h.....	104
Fig. D.2	Rated operation / parallel-loaded, $G_{Air}^{ACL} = 1585.9$ t/h.....	104
Fig. D.3	High temperature test operation / single-loaded, $G_{Air}^{ACL} = 1585.9$ t/h.....	105
Fig. D.4	High temperature test operation / parallel-loaded, $G_{Air}^{ACL} = 1585.9$ t/h.....	105
Fig. D.5	Rated operation / single-loaded, $G_{Air}^{ACL} = 1720.8$ t/h.....	106
Fig. D.6	Rated operation / parallel-loaded, $G_{Air}^{ACL} = 1720.8$ t/h.....	106
Fig. D.7	High temperature test operation / single-loaded, $G_{Air}^{ACL} = 1720.8$ t/h.....	107
Fig. D.8	High temperature test operation / parallel-loaded, $G_{Air}^{ACL} = 1720.8$ t/h.....	107
Fig. D.9	Rated operation / single-loaded, $G_{Air}^{ACL} = 1856.9$ t/h.....	108
Fig. D.10	Rated operation / parallel-loaded, $G_{Air}^{ACL} = 1856.9$ t/h.....	108
Fig. D.11	High temperature test operation / single-loaded, $G_{Air}^{ACL} = 1856.9$ t/h.....	109
Fig. D.12	High temperature test operation / parallel-loaded, $G_{Air}^{ACL} = 1856.9$ t/h.....	109

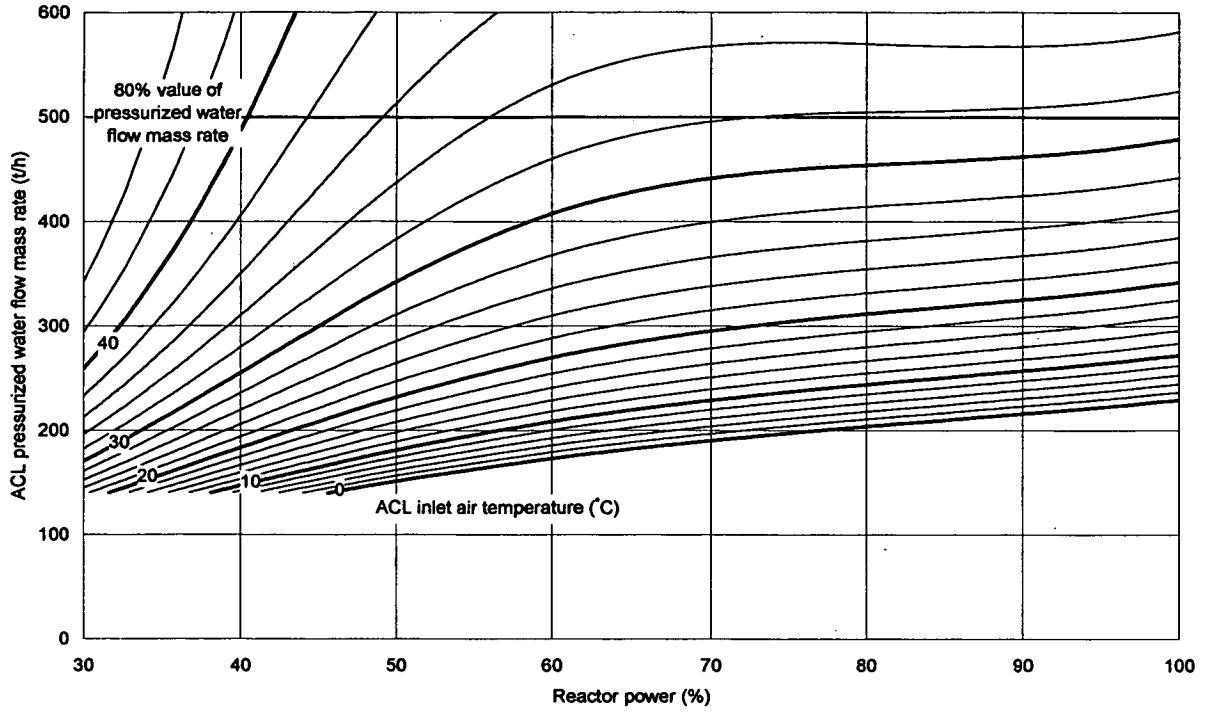


Fig. D.1 Rated operation / single-loaded, $G_{Air}^{ACL} = 1585.9$ t/h

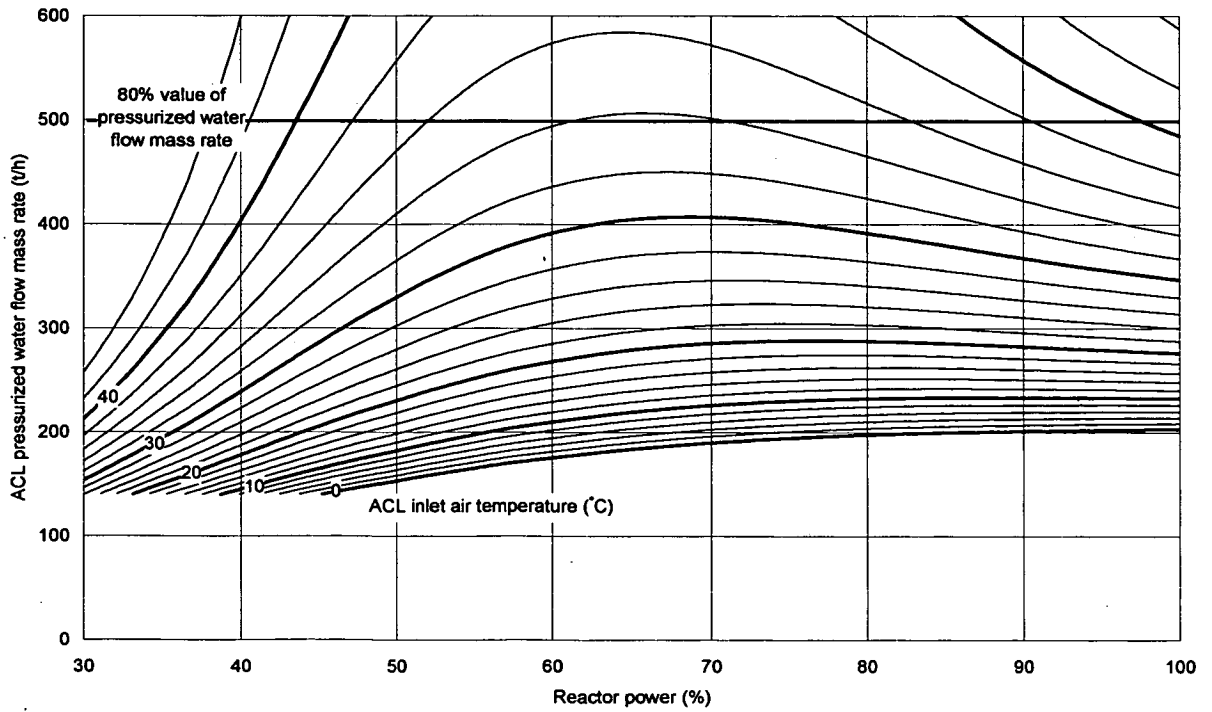


Fig. D.2 Rated operation / parallel-loaded, $G_{Air}^{ACL} = 1585.9$ t/h

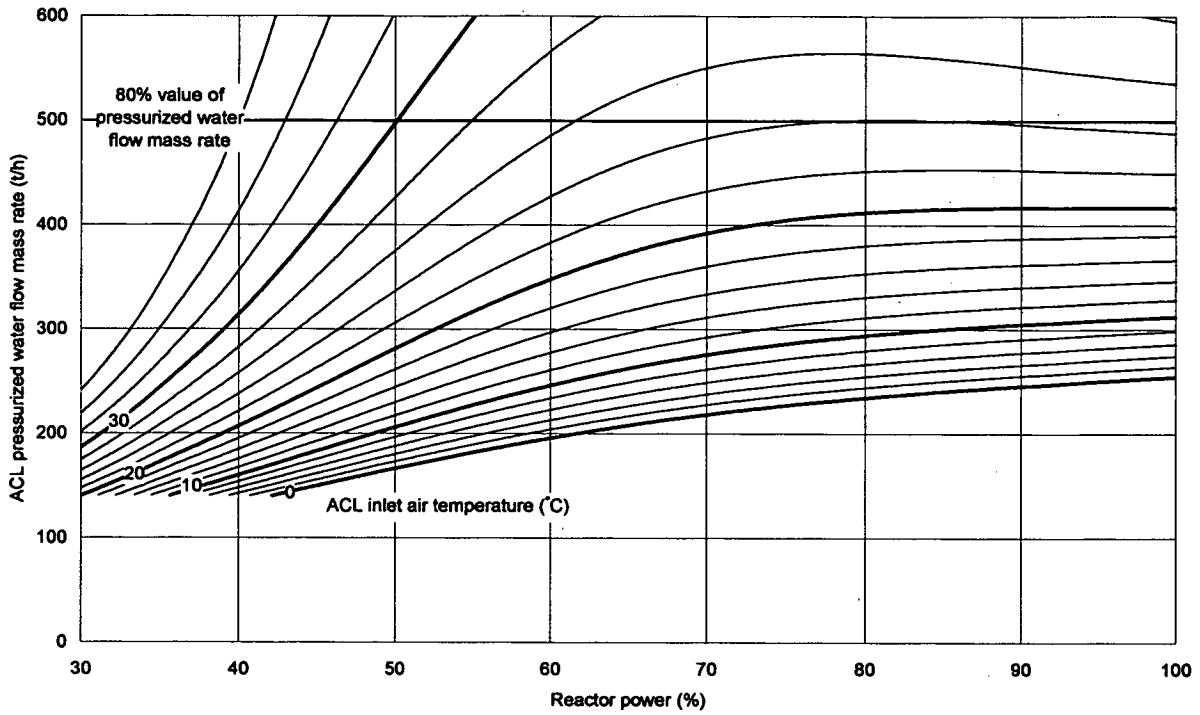


Fig. D.3 High temperature test operation / single-loaded, $G_{Air}^{ACL} = 1585.9$ t/h

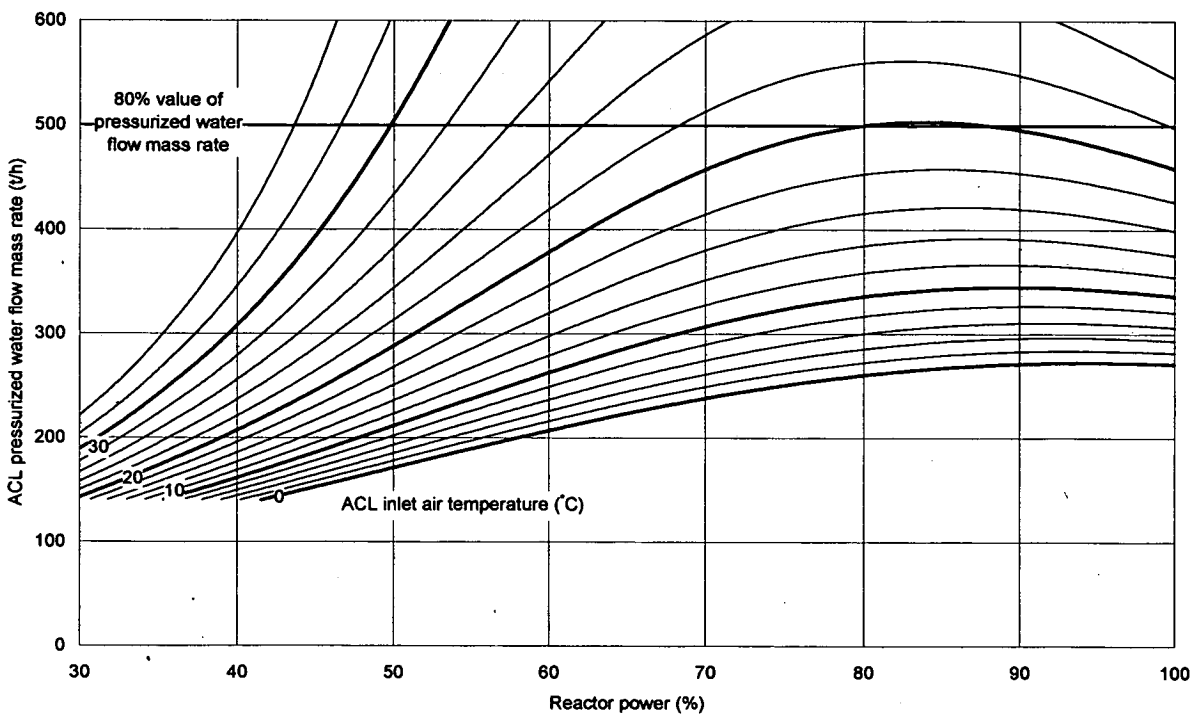


Fig. D.4 High temperature test operation / parallel-loaded, $G_{Air}^{ACL} = 1585.9$ t/h

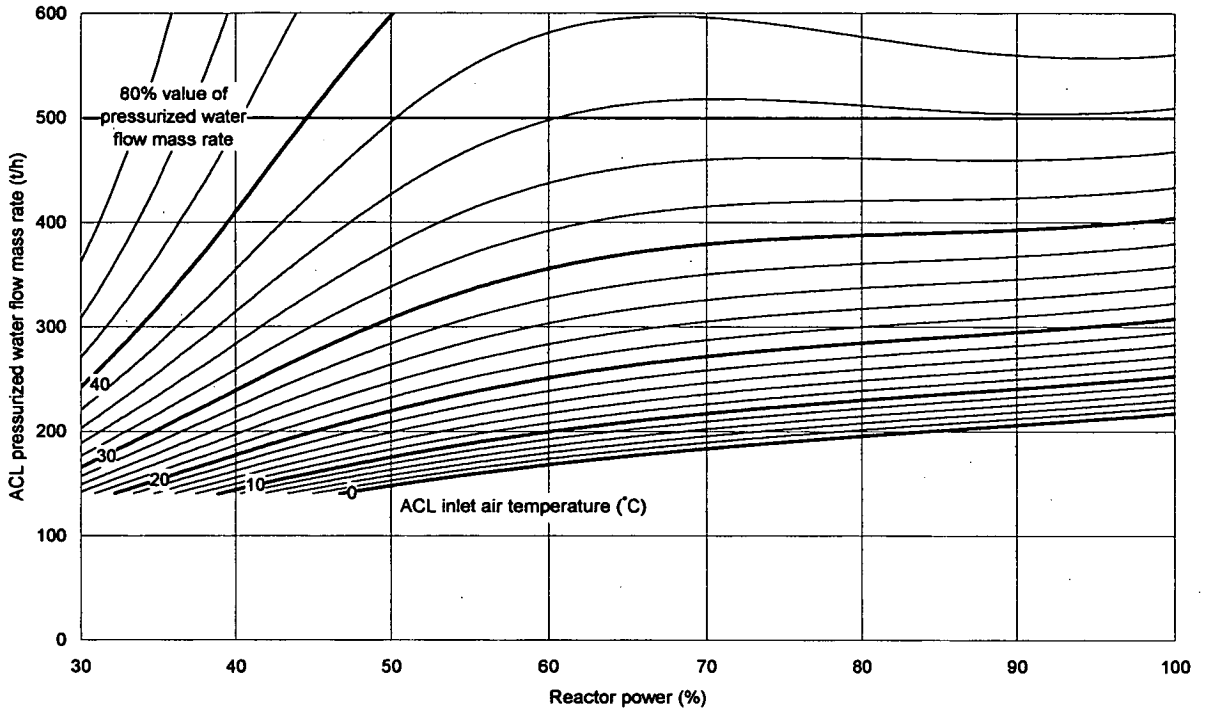


Fig. D.5 Rated operation / single-loaded, $G_{Air}^{ACL} = 1720.8$ t/h

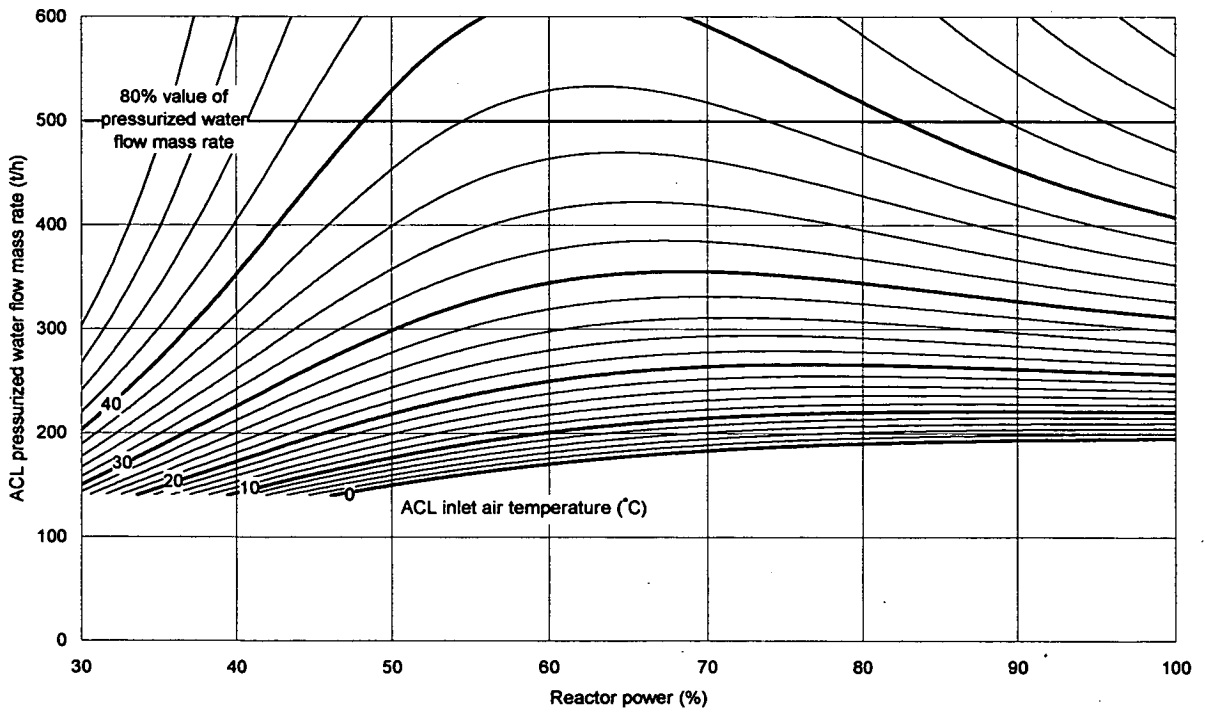


Fig. D.6 Rated operation / parallel-loaded, $G_{Air}^{ACL} = 1720.8$ t/h

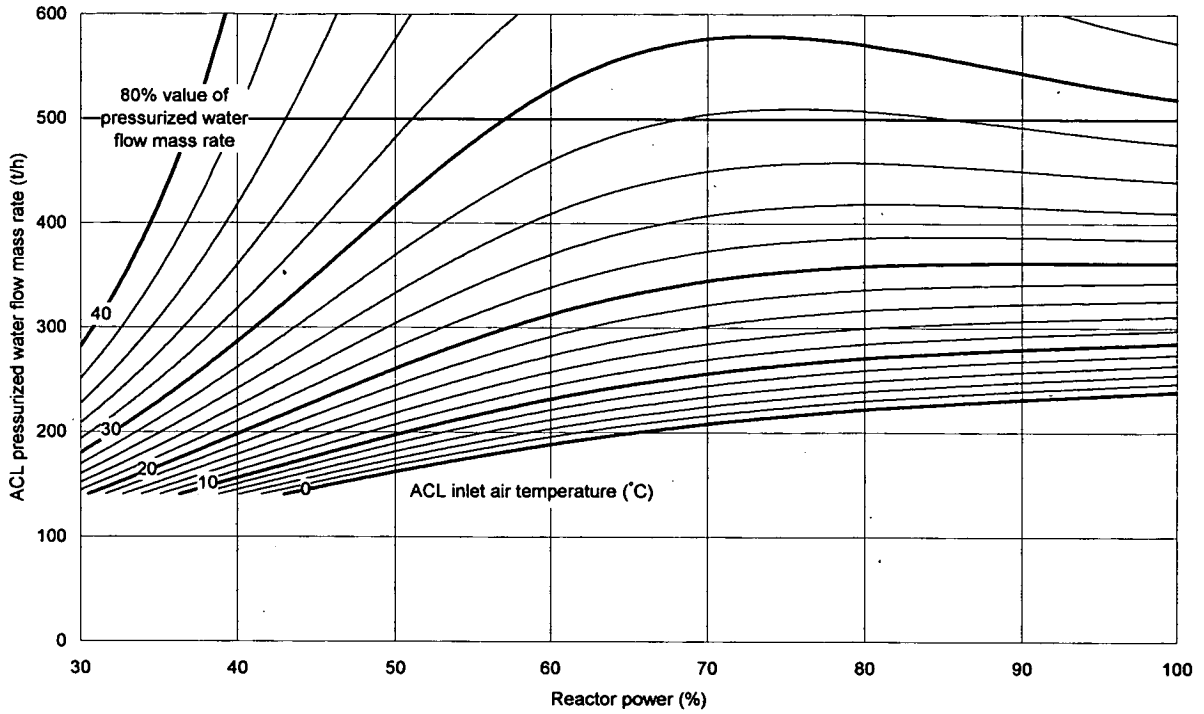


Fig. D.7 High temperature test operation / single-loaded, $G_{Air}^{ACL} = 1720.8 \text{ t/h}$

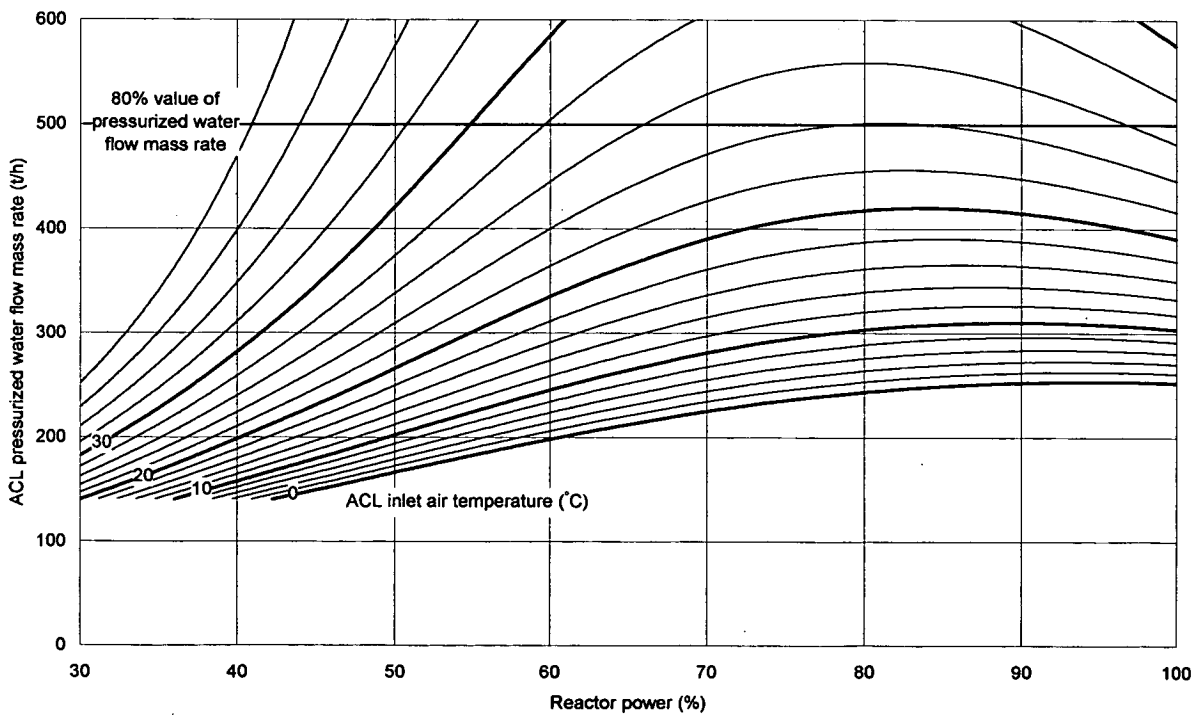


Fig. D.8 High temperature test operation / parallel-loaded, $G_{Air}^{ACL} = 1720.8 \text{ t/h}$

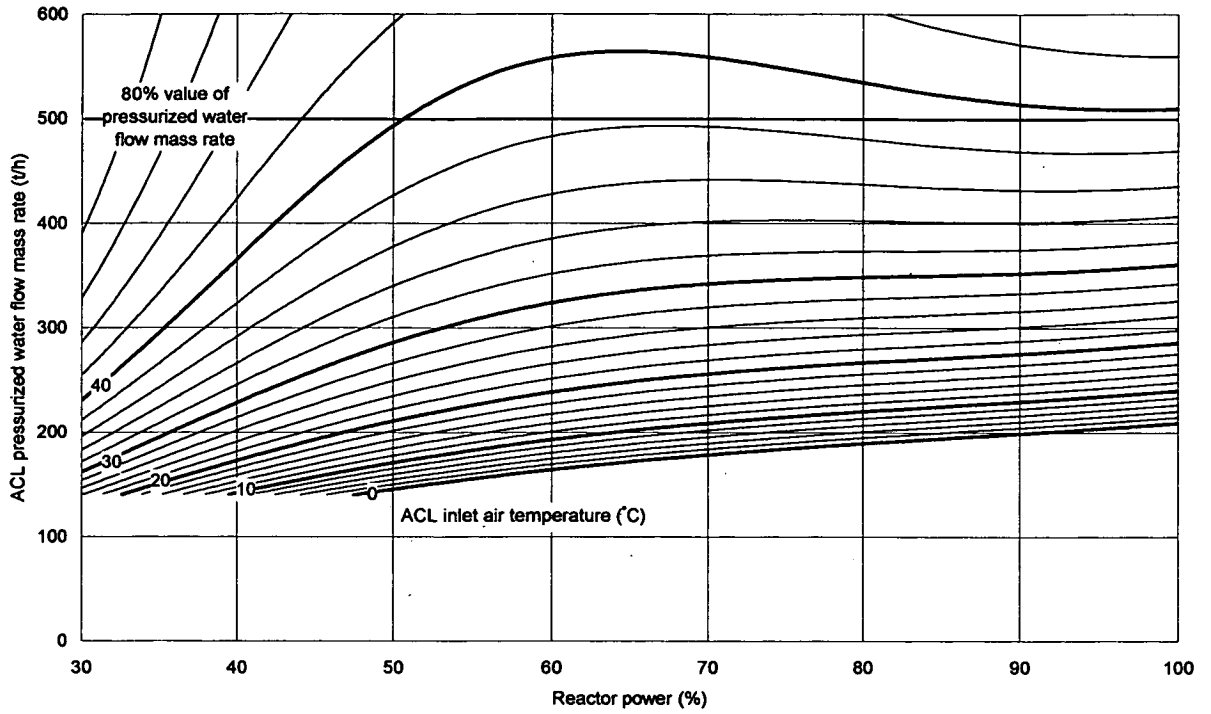


Fig. D.9 Rated operation / single-loaded, $G_{Air}^{ACL} = 1856.9 \text{ t/h}$

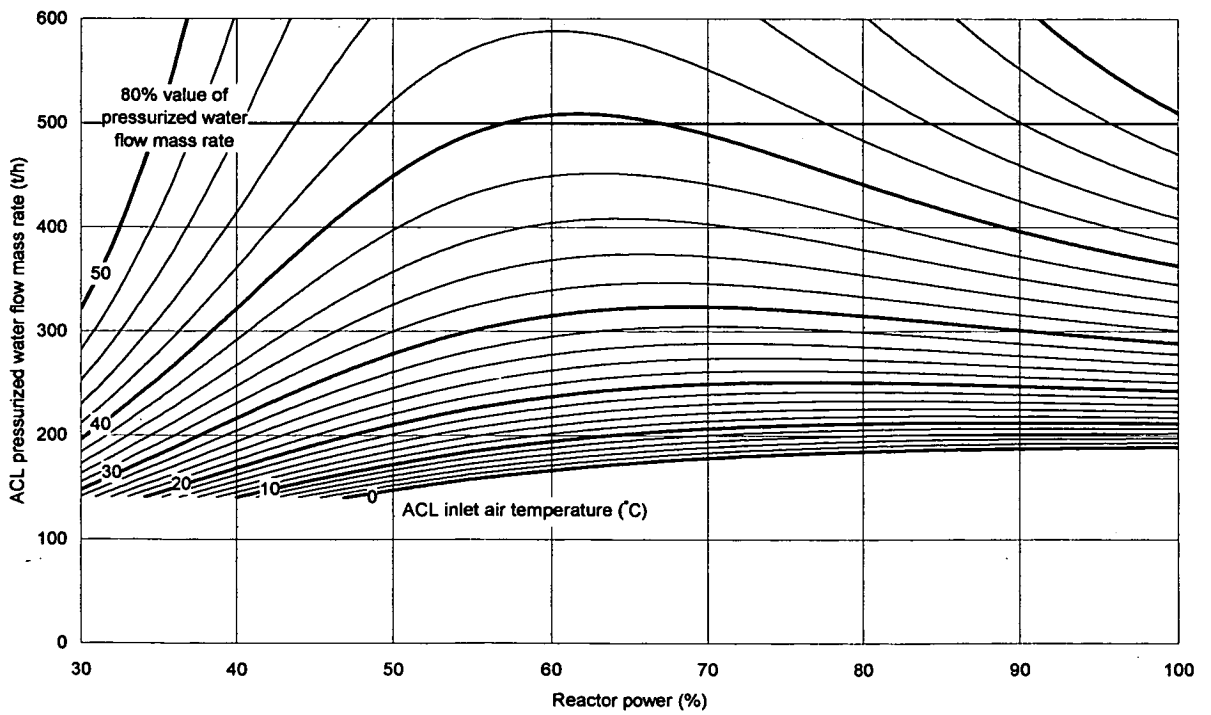


Fig. D.10 Rated operation / parallel-loaded, $G_{Air}^{ACL} = 1856.9 \text{ t/h}$

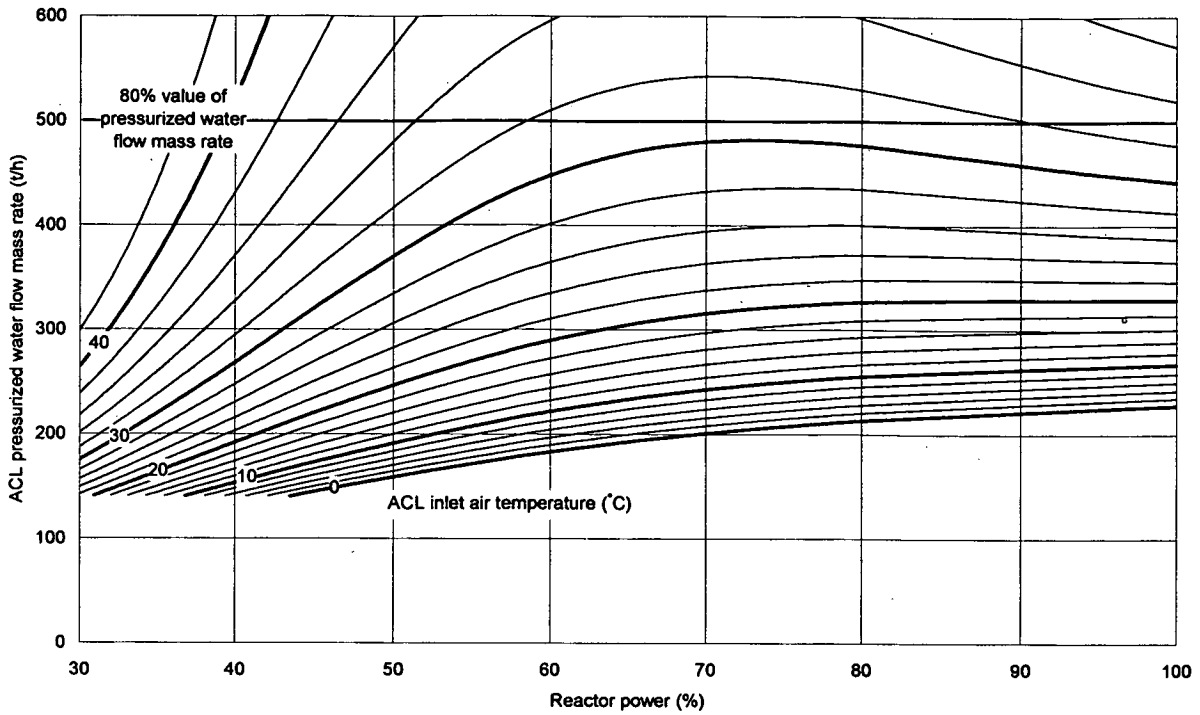


Fig. D.11 High temperature test operation / single-loaded, $G_{Air}^{ACL} = 1856.9 \text{ t/h}$

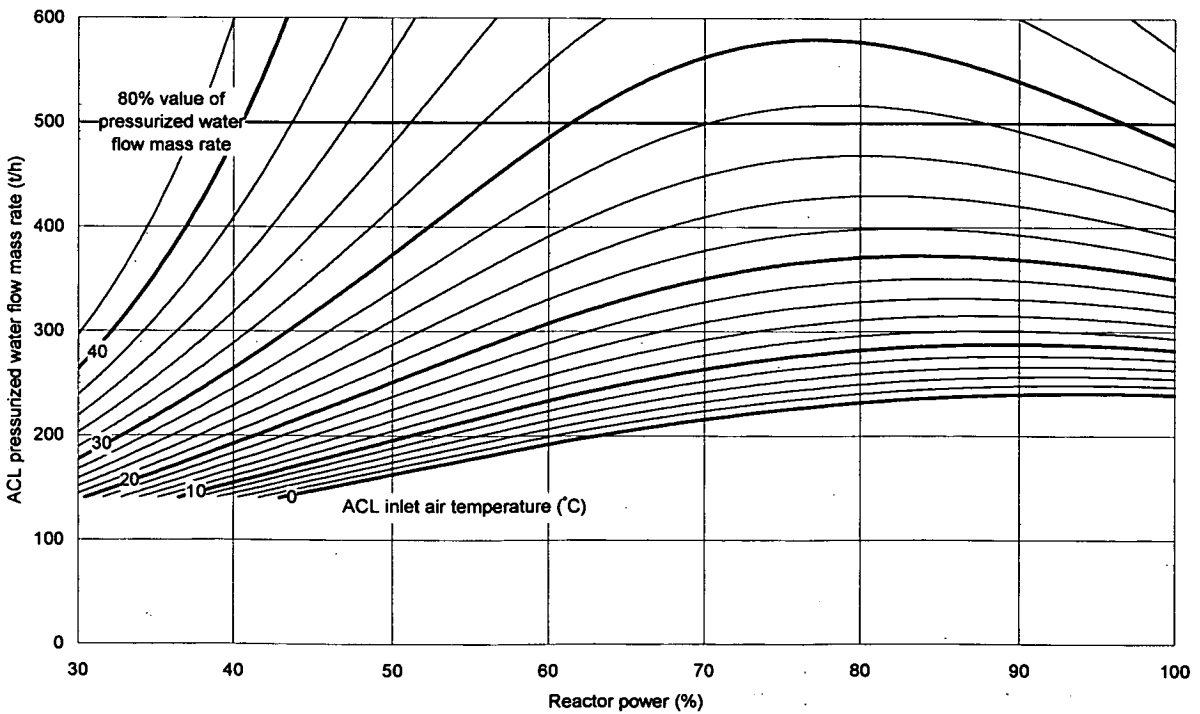


Fig. D.12 High temperature test operation / parallel-loaded, $G_{Air}^{ACL} = 1856.9 \text{ t/h}$

This is a blank page.

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

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

表3 固有の名称をもつSI組立単位

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

表2 SIと併用される単位

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

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J

1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ	b
バル	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m

1 b = 100 fm² = 10⁻²⁸ m²

1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa

1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²

1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq

1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg

1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy

1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

表5 SI接頭語

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

(注)

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

換算表

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

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

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

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

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

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

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

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

HTTRの加圧水空気冷却器の伝熱性能に関する評価



古紙配合率100%
白色度70%の再生紙を使用しています