JAEA-Data/Code
2017-011
DOI:10.11484/jaea-data-code-2017-011

高温ガス炉に接続するヘリウムガスタービンの設計データ（改訂版）

Design Database of Helium Gas Turbine for HTTR-GT/H_2 Test Plant
(Revised Version)

今井 良行　佐藤 博之　Xing L. Yan

Yoshiyuki IMAI, Hiroyuki SATO and Xing L. YAN

原子力科学研究部門
高温ガス炉水素・熱利用研究センター

HTGR Hydrogen and Heat Application Research Center
Sector of Nuclear Science Research

August 2017

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

JAEA-Data/Code

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ（http://www.jaea.go.jp）
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2017

JAEA-Data/Code 2017-011

高温ガス炉に接続するヘリウムガスタービンの設計データ（改訂版）

日本原子力研究開発機構　原子力科学研究部門
高温ガス炉水素・熱利用研究センター

今井　良行、佐藤　博之、Xing L. Yan

（2017 年 8 月 9 日　受理）

高温ガス炉は優れた安全性を有し、高温熱供給が可能であることから多様な産業利用が期待されている。日本原子力研究開発機構では、高温ガス炉核熱を用いたヘリウムガスタービン及び水素製造施設による高効率発電に着目し、文部科学省の原子力科学技術委員会に設置された高温ガス炉技術研究開発作業部会が提言した､今後 10 年間の実施課題に焦点を当てた研究開発を実施している。具体的には、世界で初めての原子炉施設へのヘリウムガスタービン及び水素製造施設の接続に係る許認可の取得、高温ガス炉から取り出される核熱を用いたヘリウムガスタービン発電技術及び水素製造技術の確証を目的に、高温工学試験研究炉（HTTR）にヘリウムガスタービン及び水素製造施設等から成る熱利用システムを接続した HTTR 熱利用試験を計画している。また、ヘリウムガスタービンの要素技術として、タービン翼への核分裂生成物沈着低減技術の研究開発を実施している。

本報は、平成 28 年度に発行した報告書「高温ガス炉に接続するヘリウムガスタービンの設計データ（JAEA-Data/Code 2016-007）」について、平成 28 年度に実施した HTTR 接続熱利用システムの機器設計結果、並びに、タービン翼候補合金中の核分裂生成物同位体の拡散試験データ分析結果を反映した改訂版である。

大洗研究開発センター：〒311-1393　茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002

JAEA-Data/Code 2017-011

Design Database of Helium Gas Turbine for HTTR-GT/H_2 Test Plant (Revised Version)

Yoshiyuki IMAI, Hiroyuki SATO and Xing L. YAN

HTGR Hydrogen and Heat Application Research Center
Sector of Nuclear Science Research
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received August 9, 2017)

High Temperature Gas-cooled Reactor (HTGR) is expected to extend the use of nuclear heat to a wider spectrum of industrial applications because of the high temperature heat supply capability and inherently safe characteristics. Japan Atomic Energy Agency has been conducting research and development for remaining topics in need of further development of high efficient HTGR gas turbine power generation system which is recommended by a task force established under the Nuclear Science Committee of Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT). We are developing a plan for a nuclear cogeneration demonstration utilizing of the High Temperature engineering Test Reactor (HTTR), the first HTGR in Japan. In addition, we are developing turbine blade alloy for reduction of fission product plate-out.

This report is the revised version of the report titled "Design Database of Helium Gas Turbine for High Temperature Gas-cooled Reactor, JAEA-Data/Code 2016-007" reflecting component design and experimental data analysis results for fission product isotope diffusion through the turbine blade alloy conducted in Fiscal Year 2016.

Keywords: HTGR, Helium Gas Turbine, HTTR, Demonstration Test

目 次

1. はじめに 1
2. HTTR に接続する熱利用システムの設計データ 2
2.1 HTTR に接続する熱利用システムの概要 2
2.2 ２次ヘリウム冷却設備 2
2.3 ヘリウムガスタービン 3
3. タービン翼候補合金中の核分裂生成物同位体の拡散試験データ 33
3.1 試験方法 33
3.2 試験結果及び分析結果 33
4. まとめ 39
謝辞 39
参考文献 39

Contents

1. Introduction 1
2. Design Database for HTTR Heat Application System 2
2.1 Summary of HTTR Heat Application System 2
2.2 Secondary Helium Cooling System 2
2.3 Gas Turbine 3
3. Experiment Data for Fission Product Isotope Diffusion through Turbine Blade Alloy 33
3.1 Experiment Method 33
3.2 Experiment and Analysis Result 33
4. Conclusion 39
Acknowledgement 39
References 39

This is a blank page.

1. はじめに

高温ガス炉は､燃料に二酸化ウラン等の燃料核をセラミックス材により被覆した被覆燃料粒子、冷却材にヘリウム、減速材や原子炉内の主な構造材に黒鉛を用いた原子炉であり、これらの基本要素の固有の特性を活用することで、優れた安全性を有するのみならず、高温熱供給が可能である。このような優れた特長を有する高温ガス炉については、平成 26 年 4 月に閣議決定された「エネルギー基本計画」において、「水素製造を含めた多様な産業利用が見込まれ、固有の安全性を有する高温ガス炉など、安全性の高度化に貢献する原子力技術の研究開発を国際協力の下で推進する。」との言及がなされ、これを受けて文部科学省の原子力科学技術委員会に設置された高温ガス炉技術研究開発作業部会において、今後 10 年間の実施課題として、ヘリウムガスタービン発電や熱化学法 IS プロセスによる水素製造等の高温ガス炉の熱利用に関する要素技術開発や大洗研究開発センターの高温工学試験研究炉（High Temperature engineering Test Reactor；HTTR）を用いたこれら熱利用技術の実証試験、実用高温ガス炉の安全基準の策定等が示された [1)]。

日本原子力研究開発機構（原子力機構）では高温ガス炉を用いたヘリウムガスタービンによる高効率発電に着目し、高温ガス炉技術研究開発作業部会が提言した実施課題に焦点を当てた研究開発を実施している。具体的には、世界で初めての原子炉施設へのヘリウムガスタービン及び水素製造施設の接続に係る許認可の取得やヘリウムガスタービン発電や水素製造技術の確証を目的に､HTTR にヘリウムガスタービン及び水素製造施設等から成る熱利用システムを接続した HTTR 熱利用試験を計画している。また、ヘリウムガスタービンの要素技術として、タービン翼への核分裂生成物（Fission Product；FP）沈着低減技術の研究開発を実施している。本報では、平成 28 年度に発行した報告書「高温ガス炉に接続するヘリウムガスタービンの設計データ（JAEA-Data/Code 2016-007）」[2)]について、HTTR 接続熱利用システムの機器設計結果、並びに、タービン翼候補合金中の核分裂生成物同位体の拡散試験結果を反映した改訂版であり、２次ヘリウム冷却設備及びヘリウムガスタービンの全体系統構成、熱物質収支、並びに機器設計データを提示する。加えて、タービン翼への FP 沈着低減技術について、タービン翼候補合金と FP 同位体の拡散試験の結果として試験データ分析結果を提示する。

2. HTTR に接続する熱利用システムの設計データ

2.1 HTTR に接続する熱利用システムの概要

HTTR 熱利用試験では、熱電併給実用高温ガス炉の展開に向けて、高温ガス炉を用いたヘリウムガスタービン発電技術及び水素製造技術を確立するとともに、世界で初めての原子炉施設へのヘリウムガスタービン及び水素製造施設の接続に係る許認可を取得することを目的とする。**Fig.2.1** に HTTR、並びに、水素製造施設及びヘリウムガスタービンから成る熱利用システムの設備構成を示す。本プラントは熱電併給実用高温ガス炉の設備構成を模擬するため、水素製造施設に熱を供給する第２中間熱交換器（IHX）とヘリウムガスタービンを２次ヘリウム冷却設備にカスケード的に設置する系統を採用している。既存設備のうち、１次冷却設備や補助冷却設備、炉容器冷却設備については改造しない。一方、２次ヘリウム冷却設備の２次加圧水冷却器を撤去し、２次ヘリウム冷却設備配管を原子炉格納容器や原子炉建屋外へ引き回す改造を行う。また、第２IHX やヘリウムガスタービン、発電サイクルの構成要素である再生熱交換器や前置冷却器、IHX への戻りヘリウム温度を調整する冷却器を２次ヘリウム冷却設備に設置する。前置冷却器や冷却器での熱は冷却水に伝えられ、冷却塔や空気冷却器において大気に放出される。水素製造施設は３次ヘリウム冷却設備に設置し、第２IHX を介して３次ヘリウム冷却設備に供給された熱を利用する。熱利用システムの運転モードには、ヘリウムガスタービンのみに熱を供給し発電を行う単独発電運転と、第２IHX 及びヘリウムガスタービンの両者に熱を供給する熱電併給運転の２種類がある。単独発電運転と熱電併給運転間の切り換え時には第２IHX 切換弁及び第２IHX バイパス弁の開閉により流路を変更する。また、冷却器出入口に設置した冷却器切換弁の開閉により流路を変更し、単独発電運転時には冷却器Ａを、熱電併給運転時には冷却器Ｂを使用する。１次冷却設備は、いずれの運転においても加圧水冷却器及び IHX で除熱する並列運転を行う。原子炉は、単独発電運転において原子炉出口冷却材温度 850°C の定格運転を、熱電併給運転において原子炉出口冷却材温度 950°C の高温試験運転を行う。HTTR 既設設備の設計や運転条件については、参考文献[3)]を参照されたい。

2.2 ２次ヘリウム冷却設備

2.2.1 系統

２次ヘリウム冷却設備は、炉心で発生した熱を１次冷却設備の IHX を介して受け取り、その熱をヘリウムガスタービンに伝達し発電するとともに第２IHX や３次ヘリウム冷却設備を介して水素製造施設に伝達する機能を有する。２次ヘリウム冷却設備の系統構成を **Fig.2.2** に、熱物質収支を **Table 2.1** に、配管仕様を **Table 2.2** に示す。配管及び弁仕様は、既設配管との取り合いや原子炉格納容器貫通部仕様、建設コスト、配置上の制約、製作性等を考慮して設定した。

2.2.2 一体型熱交換器

実用高温ガス炉では再生熱交換器と前置冷却器をひとつの圧力容器（熱交換器収納容器）に格納する構造としている。そこで、本構造の製作性技術を確立する観点から HTTR に接続する熱利

用システムの再生熱交換器と前置冷却器の検討に当たり同構造を採用することとした。一体型熱交換器の構造を **Fig.2.3** に示す。

(1) 再生熱交換器

再生熱交換器は、ガスタービン出口の高温ヘリウムにより圧縮機から排出された低温ヘリウムを加熱するガス／ガス熱交換器であり、実用高温ガス炉と同じオフセットフィン式のプレートフィン型を採用している。再生熱交換器部の基本仕様を **Table 2.3** に示す。

(2) 前置冷却器

前置冷却器は、圧縮機に導入するヘリウムを冷却する機能を有する。前置冷却器の型式には、実用高温ガス炉と同様に胴側を２次ヘリウム、管内を冷却水が流れる縦置きのヘリカルコイル式熱交換器を採用し、伝熱管にローフィン管を用いる。前置冷却器の基本仕様を **Table 2.4** に示す。

2.2.3　冷却器

冷却器は、熱利用システムの最下流に設置され、IHX への戻りヘリウム温度を所定の温度まで冷却する機能を有する。冷却器の型式にはたて置きU字管型のシェル・アンド・チューブ式熱交換器を採用し、胴側をヘリウム、管内を冷却水が流れる構造とした。単独発電運転と熱電併給運転では、要求される中間熱交換器入口ヘリウム温度が大きく異なるため、２種類の冷却器（冷却器Ａ：単独発電運転、冷却器Ｂ：熱電併給運転）を並列に設置し、運転状態に応じ冷却器切換弁の操作で切り替える方式としている。冷却器の基本仕様を **Table 2.5** に、**Fig.2.4** に構造図を示す。

2.2.4　ミキシング容器

熱電併給運転時において、第２IHX からのヘリウムと、再生熱交換器の高圧側出口からの戻りヘリウムを混合させる機能を有する。**Table 2.6** に基本仕様を、**Fig.2.5** に構造図を示す。

2.3　ヘリウムガスタービン

ヘリウムガスタービンは、タービン、圧縮機、発電機/電動機等で構成される。ターボマシンの設備構成を **Fig.2.6** に示す。また、ヘリウムガスタービン構成要素の慣性モーメント（GD2 値）を **Table 2.7** に示す。以下に各機器の概要を示す。

2.3.1　タービン

タービンの型式は遠心式であり、同一仕様のタービンを発電機の軸両端へ対称配置することで軸捩りトルク起因の軸振動や、タービン段間の接続配管と車室の熱膨張差に起因する反力を抑制しつつ、サイクル圧力比の向上を達成している。タービンの基本仕様を **Table 2.8** に示す。また、タービン特性は以下手順で導出する。導出に当たり必要な特性曲線を **Fig.2.7** 及び **Fig.2.8** に示す。

① 修正流量（$G\sqrt{T_i}/P_i$）の算出
② 流量係数（$\phi = U/C_0$）の算出

③ 理論ガス流速の算出

$$U = \frac{D}{1000} \times \pi \times \frac{N}{60} \tag{2.3.1}$$

$$C_0 = \frac{U}{\phi} \tag{2.3.2}$$

④ 圧力比の算出

⑤ 効率の算出

ここで、Gは質量流量 [kg/s]、T_iは入口温度 [K]、P_iは入口圧力 [Pa]、Uはインペラ周速 [m/s]、Dはインペラ外径 [mm]、Nはインペラ回転数 [rpm]、C_0は理論ガス流速 [m/s]、ϕは流量係数である。

2.3.2　圧縮機

圧縮機は、ヘリウムガス環境で低マッハ数の性能データベースが存在する遠心式でクローズドインペラ型とし、2段の圧縮機を発電機の軸両端へ対称配置することで系統設計上要求されるサイクル圧力比を達成している。圧縮機の基本仕様を **Table 2.9** に示す。また、圧縮機特性は以下手順で導出する。導出に当たり必要な特性曲線を **Fig.2.9** 及び **Fig.2.10** に示す。

① 流量係数（ϕ）の算出

$$U = \frac{D}{1000} \times \pi \times \frac{N}{60} \tag{2.3.3}$$

$$\phi = \frac{Q}{\pi D^2 U/4} \times 2.78 \times 10^2 \tag{2.3.4}$$

② 圧力係数（μ）及び効率の算出

③ 圧力比の算出

$$\pi_C = \left(\frac{\mu U^2}{g Z_s R T_i} \frac{\kappa - 1}{\kappa} + 1 \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \tag{2.3.5}$$

ここで、π_Cは圧縮機圧力比、gは重力加速度[m^2/s]、Z_sは入口圧縮係数（=1.05）、Rはガス定数（=211.9）[kg m/kg K]である。

2.3.3　発電機/電動機

発電機はタービン及び圧縮機の設計仕様に基づき選定している。また、ヘリウムガスタービン起動用として電動機が接続されている。発電機の基本仕様を **Table 2.10** に示す。

Table 2.1(a) Heat and mass balance for HTTR-GT/H_2 plant (Sole power generation)

Location	Temperature [°C]	Pressure [MPa]	Flow rate [kg/s]
IHX secondary side outlet	570	4.110	9.85
Turbine inlet	568.2	4.059	9.85
Turbine outlet	503.5	3.152	9.85
Recuperator LP side inlet	503.5	3.151	9.85
Recuperator LP side outlet	118.5	3.143	9.85
Precooler inlet	118.5	3.143	9.85
Precooler outlet	25.0	3.140	9.85
Compressor inlet	25.0	3.130	9.85
Compressor outlet	75.7	4.307	9.85
Recuperator HP side inlet	75.7	4.304	9.85
Recuperator HP side outlet	460.7	4.298	9.85
Cooler A inlet	460.7	-	9.85
Cooler A outlet	374.0	-	9.85
IHX secondary side inlet	374.0	4.260	9.85
IHX primary side inlet	850.0	4.000	4.16
IHX primary side outlet	387.0	-	4.16
Precooler water side inlet	20.0	0.500	114.4
Precooler water side outlet	30.0	-	114.4
Cooler A water side inlet	120.0	3.600	52.1
Cooler A water side outlet	140.0	-	52.1

Table 2.1(b) Heat and mass balance for HTTR-GT/H_2 plant (Cogeneration)

Location	Temperature [°C]	Pressure [MPa]	Flow rate [kg/s]
IHX secondary side outlet	900.0	4.110	2.57
2nd IHX secondary side inlet	887.4	-	2.57
2nd IHX secondary side outlet	835.0	-	2.57
Turbine inlet	568.2	4.077	9.150
Turbine outlet	506.3	3.283	9.150
Recuperator LP side inlet	506.3	3.282	9.150
Recuperator LP side outlet	116.5	3.275	9.150
Precooler inlet	116.5	3.267	9.150
Precooler outlet	25.0	3.265	9.150
Compressor inlet	25.0	3.265	9.150
Compressor outlet	74.2	4.402	9.150
Recuperator HP side inlet	74.2	4.138	9.150
Recuperator HP side outlet	464.0	4.134	9.150
Cooler B inlet	464.0	-	2.57
Cooler B outlet	150.0	-	2.57
IHX secondary side inlet	150.0	4.125	2.57
IHX primary side inlet	950.0	4.000	3.43
IHX primary side outlet	389.0	-	3.43
Precooler water side inlet	20.0	0.500	104.0
Precooler water side outlet	30.0	-	104.0
Cooler B water side inlet	120.0	3.600	49.2
Cooler B water side outlet	140.0	-	49.2

Table 2.2 Piping specifications of secondary helium cooling system (1/4)

Segment	Number	PP1	PP2	PP3	PP4	PP5	PP6	PP7	PP8
	From	Vertical co-axial piping	Horizontal co-axial piping	End of co-axial piping	Containment penetration	Containment penetration	2nd IHX	2nd IHX bypass line	Mixing volume
	To			Containment penetration		2nd IHX	Mixing volume		Turbine
Piping type		Co-axial piping	Co-axial piping	Inner insulated piping	Inner insulated piping	Inner insulated piping	Inner insulated piping	Inner insulated piping	Single piping
Outer pipe (Pressure boundary)	Material	SCMV4	SCMV4	SUS316TP	SUS316TP	SUS316TP	SUS316TP	SUS316TP	SUS316TP
	Outer diameter [mm]	609.6	558.8	914.0	406.4	660.0	660.0	660.0	508.0
	Thickness [mm]	31.0	28.6	45.0	21.4	34.0	34.0	34.0	26.0
Inner pipe	Material	STPA24	STPA24	-	-	-	-	-	-
	Outer diameter [mm]	457.2	406.4	-	-	-	-	-	-
	Thickness [mm]	23.8	21.4	-	-	-	-	-	-
Inner insulator	Material	Kaowool	Kaowool	Kaowool	Kaowool	Kaowool	Kaowool	Kaowool	-
	Thickness [mm]	73.8	56.8	187.0	52.0	166.0	166.0	166.0	-
Liner	Material	Hastelloy-XR	Hastelloy-XR	Hastelloy-XR	Hastelloy-XR	Hastelloy-XR	Hastelloy-XR	Hastelloy-XR	-
	Outer diameter [mm]	262.0	250.0	450.0	260.00	260.0	260.0	260.0	-
	Thickness [mm]	6.0	5.0	7.0	5.0	5.0	5.0	5.0	-
Outer insulator	Material	Silica insulation	Silica insulation	Silica insulation	-	Silica insulation	Silica insulation	Silica insulation	Silica insulation
	Thickness [mm]	125.0	125.0	30.0	-	30.0	30.0	30.0	70.0

Table 2.2 Piping specifications of secondary helium cooling system (2/4)

Segment	Number	PP9	PP11	PP12	PP13	PP14	PP15A	PP15B
	From	Turbine	Integral heat exchanger	Compressor	Integral heat exchanger	Branch for IHX bypass line	Branch for cooler A and cooler B	Branch for cooler A and cooler B
	To	Integral heat exchanger	Compressor	Integral heat exchanger	Junction for IHX bypass line	Branch for cooler A and cooler B	Cooler A	Cooler B
Piping type		Single piping	Single piping	Single piping	Single piping	Single piping	Single piping	Single piping
Outer pipe (Pressure boundary)	Material	SUS316TP	STPT410	STPT410	SUS316TP	SUS316TP	SUS316TP	SUS316TP
	Outer diameter [mm]	508.0	406.4	406.4	406.4	406.4	406.4	267.4
	Thickness [mm]	26.2	21.4	21.4	21.4	21.4	21.4	15.1
Outer insulator	Material	Silica insulation	Silica insulation	Silica insulation	-	Silica insulation	Silica insulation	Silica insulation
	Thickness [mm]	150.0	50.0	50.0	-	125.0	125.0	70.0

Table 2.2 Piping specifications of secondary helium cooling system (3/4)

Segment	Number	PP16A	PP16B	PP17	PP17b	PP20A,B,C,D	PP21	PP22	PP23
	From	Cooler A	Cooler B	Branch from cooler A and cooler B	Containment penetration	IHX inlet	IHX bypass line	Recuperator inlet temp. control line	Recuperator inlet temp. control line
	To	Branch from cooler A and cooler B	Branch from cooler A and cooler B	Connection to co-axial piping					
Piping type		Single piping	Single piping	Single piping	Single piping	Single piping	Single piping	Single piping	Single piping
Outer pipe (Pressure boundary)	Material	STPA24	STPA24	STPA24	STPA24	STPA24	SUS316TP	STPT410	SUS316TP
	Outer diameter [mm]	406.4	267.4	406.4	406.4	165.2	406.4	406.4	406.4
	Thickness [mm]	21.4	15.1	21.4	21.4	41.8	21.4	21.4	21.4
Outer insulator	Material	Silica insulation	Silica insulation	Silica insulation	-	-	Silica insulation	Silica insulation	Silica insulation
	Thickness [mm]	125.0	50.0	125.0	-	-	125.0	125.0	125.0

Table 2.2 Piping specifications of secondary helium cooling system (4/4)

Segment	Number	PP24	PP25	PP26	PP27	PP28	PP29	PP30
	From	Turbine bypass control line	Turbine bypass line	Containment penetration	End of inner insulated piping	Choking valve bypass line	Rupture disk line	Turbine inlet temp. control line
	To			End of inner insulated piping	Turbine			
Piping type		Single piping	Single piping	Inner insulated piping	Single piping	Single piping	Single piping	Single piping
Outer pipe (Pressure boundary)	Material	STPT410	STPT410	SUS316TP	SUS316TP	STPT410	STPT410	STPT410
	Outer diameter [mm]	406.4	406.4	660.0	508.0	406.4	406.4	114.3
	Thickness [mm]	21.4	21.4	34.0	26.0	21.4	21.4	8.6
Inner pipe	Material	-	-	-	-	-	-	-
	Outer diameter [mm]	-	-	-	-	-	-	-
	Thickness [mm]	-	-	-	-	-	-	-
Inner insulator	Material	-	-	Kaowool	-	-	-	-
	Thickness [mm]	-	-	166.0	-	-	-	-
Liner	Material	-	-	Hastelloy-XR	-	-	-	-
	Outer diameter [mm]	-	-	260.0	-	-	-	-
	Thickness [mm]	-	-	5.0	-	-	-	-
Outer insulator	Material	Silica insulation	Silica insulation	-	Silica insulation	Silica insulation	Silica insulation	-
	Thickness [mm]	125.0	125.0	-	70	125.0	125.0	-

Table 2.3 Major specifications of recuperator

Items		Specifications
Component number		1
Heat transfer rate [MW]		19.69
Design temperature [°C]		Fin:590, Vessel:150
Design pressure [MPa]		5.1
Fin pitch [mm]		1.2
Gap width between fins [mm]		1.2
Fin thickness [mm]		0.15
Plate thickness [mm]		0.5
Heat exchange module number		7
Heat exchange module width [mm]		320
Heat exchange module length [mm]		380
Heat exchange module fin stage number		75
Flow area [m^2]		0.154
Heat transfer area [m^2]		891
Vessel outer diameter [mm]		Top head:2880, Lower head:1740
Vessel wall thickness [mm]		Top head:80, Lower head:60
Vessel height [mm]		9400
Material	Plate, fin	SUS316
	Inlet connecting piping	HP side:STPT410, LP side:SUS316
	Out connecting piping	SUS316
	Vessel	SQV2A

Table 2.4 Major specifications of precooler

Items		Specifications
Component number		1
Heat transfer rate [MW]		4.784
Design temperature [°C]		Shell:150, Tube:60
Design pressure [MPa]		Shell:5.1, Tube:0.98
Inner shell outer diameter [mm]		0.88
Shell inner diameter [mm]		1680
Shell wall thickness [mm]		60
Tube outer diameter [mm]		28.8
Tube thickness [mm]		2.85
Fin outer diameter [mm]		31.8
Fin height [mm]		1.5
Fin thickness [mm]		0.3
Fin pitch [mm]		1.29
Tube number		143
Effective tube length [mm]		1400
Helical coil layer number		9
Inner coil diameter [mm]		960
Outer coil diameter [mm]		1600
Radial coil pitch [mm]		40.0
Axial coil pitch [mm]		40.0
Effective heat transfer height [mm]		1210
Heat transfer area [m^2]		125.5
Material	Shell	SQV2A
	Tube	STB410

Table 2.5 Major specifications of cooler

Items		Specifications	
		Cooler A	Cooler B
Component number		1	1
Heat transfer rate [MW]		4.43	4.19
Design temperature [°C]		Shell:500, Tube:300	Shell:500, Tube:300
Design pressure [MPa]		5.1	5.1
Plenum inner diameter [mm]		1200.0	1000
Plenum wall thickness [mm]		60.0	50.0
Shell inner diameter [mm]		1200.0	100.0
Shell wall thickness [mm]		60.0	50.0
Baffle plate thickness [mm]		150.0	120.0
Tube outer diameter [mm]		25.4	25.4
Tube thickness [mm]		2.9	2.9
Tube number		185	153
Tube arrangement		Triangular array	Triangular array
Tube pitch [mm]		40.0	35.0
Effective tube length [mm]		2400	3800
Material	Plenum	SB410	SB410
	Shell	SUS316	SUS316
	Baffle plate	SUS316	SUS316
	Tube	SUS321TB	SUS321TB

Table 2.6 Major specifications of mixing volume

Items		Specifications
Component number		1
Design flow rate [kg/s]		9.825
Design temperature [°C]		925
Design pressure [MPa]		5.1
Material	Shell	SUS316
	Liner	Hastelloy-XR

Table 2.7 GD values for helium gas turbine

Components	GD^2 value [kgm^2]	Corresponding GD^2 value [kgm^2]
Total	6789.3	7000.0

Table 2.8 (a) Design specification of HP turbine

Component type	Centrifugal	
Working fluid	Helium	
Rotational speed	min^{-1}	18000
Stage number		1
Tip speed	m/s	377
Pressure ratio		1.13
Component number		1

Table 2.8 (b) Design specification of LP turbine

Component type	Centrifugal	
Working fluid	Helium	
Rotational speed	min^{-1}	18000
Stage number		1
Tip speed	m/s	377
Pressure ratio	min^{-1}	1.15
Component number		1

Table 2.9 (a) Design specification of HP compressor

Component type	Centrifugal	
Working fluid	Helium	
Rotational speed	min^{-1}	16387
Stage number		2
Tip speed	m/s	322/339
Pressure ratio	min^{-1}	1.18
Component number		1

Table 2.9 (b) Design specification of LP compressor

Component type	Centrifugal	
Working fluid	Helium	
Rotational speed	min^{-1}	16387
Stage number		2
Tip speed	m/s	339/339
Pressure ratio	min^{-1}	1.17
Component number		1

Table 2.10 Design specification of generator/motor

Rated power [kW]	2500
Motor type	AC motor
Cooling type	Ambient air
Rotational speed [rpm]	1450/1550
Pole number	6
Component number	1

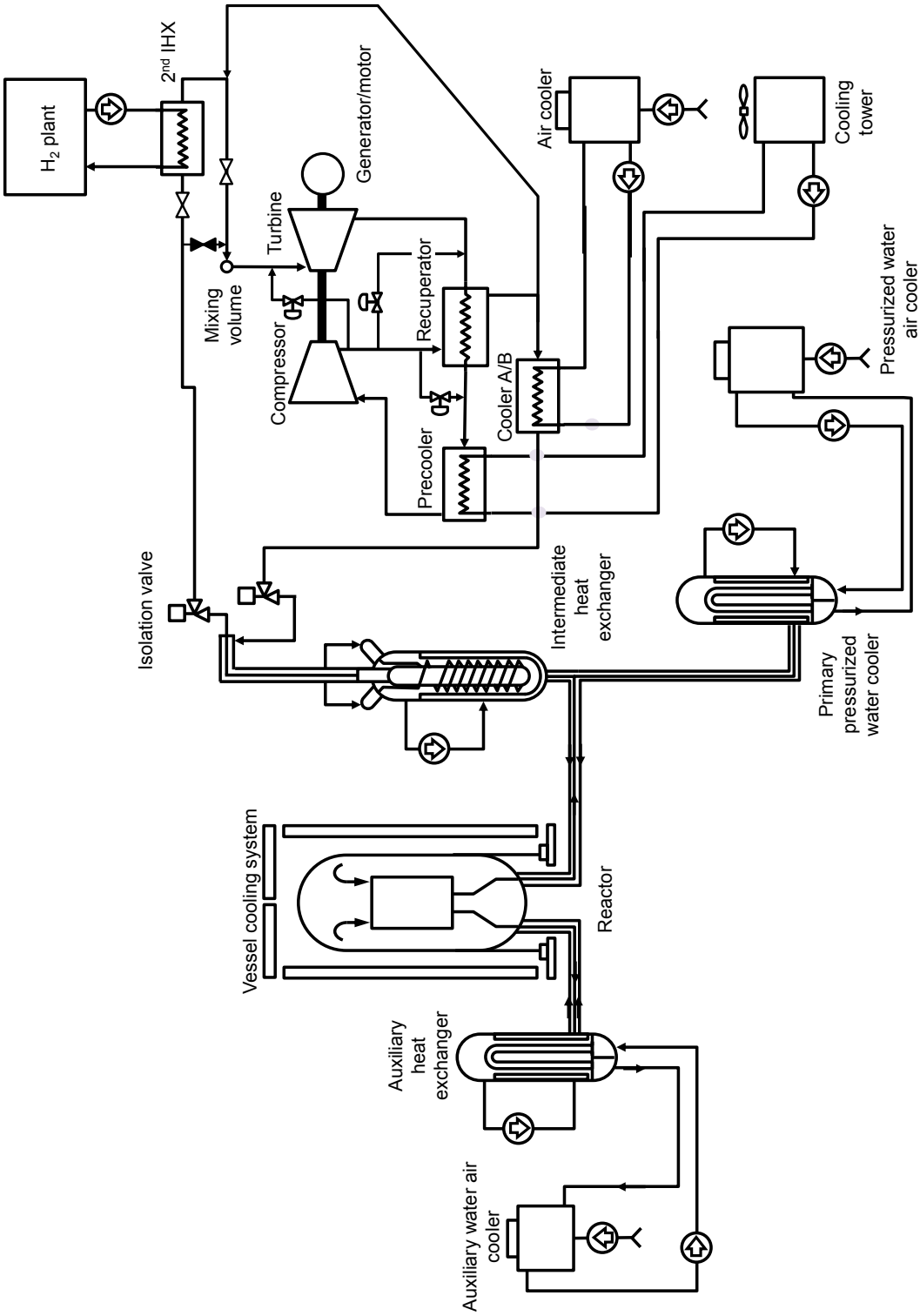

Fig.2.1 Layout for HTTR-GT/H_2 plant

This is a blank page.

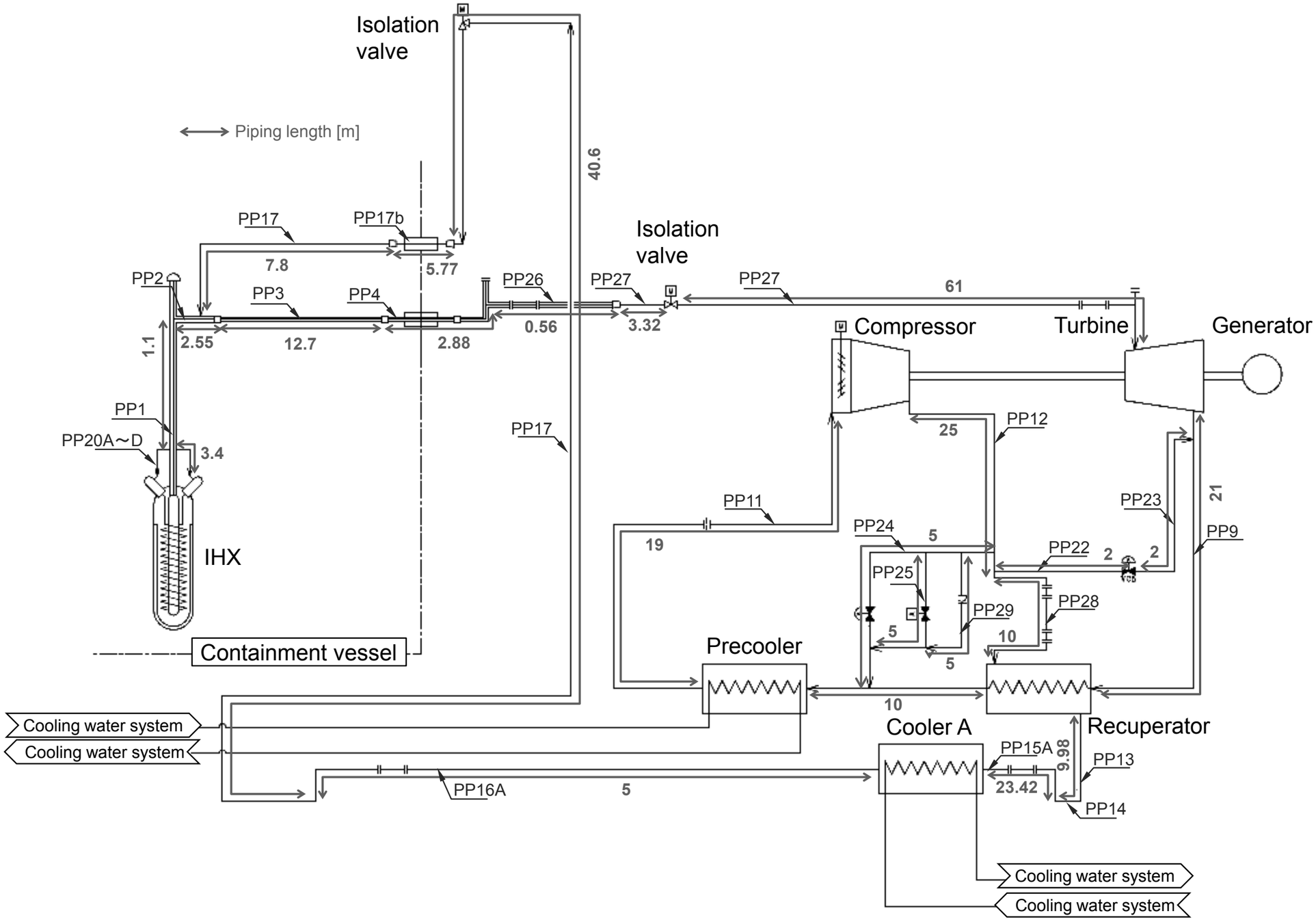

Fig.2.2(a) Configuration for secondary helium cooling system in HTTR-GT/H_2 plant (Sole power generation)

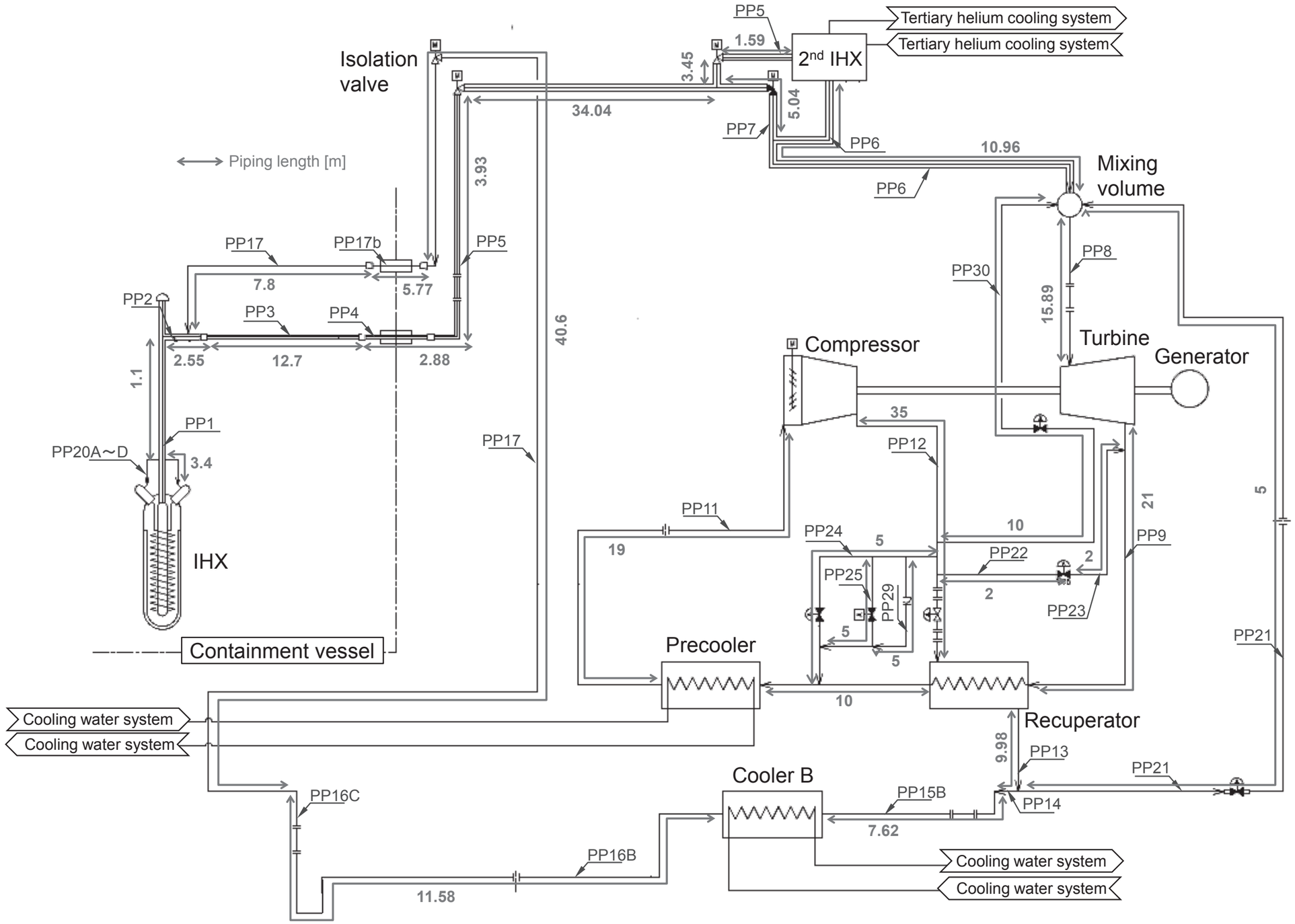

Fig.2.2(b) Configuration for secondary helium cooling system in HTTR-GT/H_2 plant (Cogeneration)

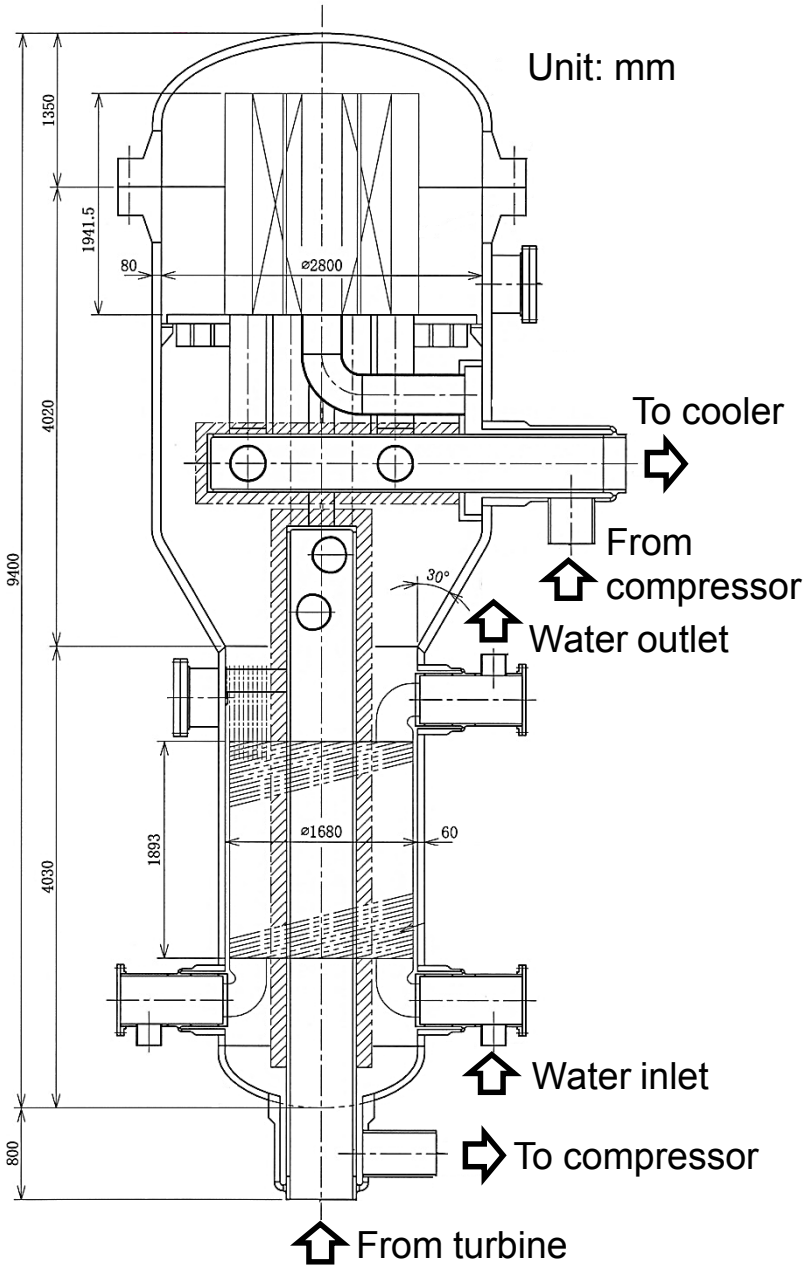

Fig.2.3 Cross cut view of integrated heat exchanger (1/2)

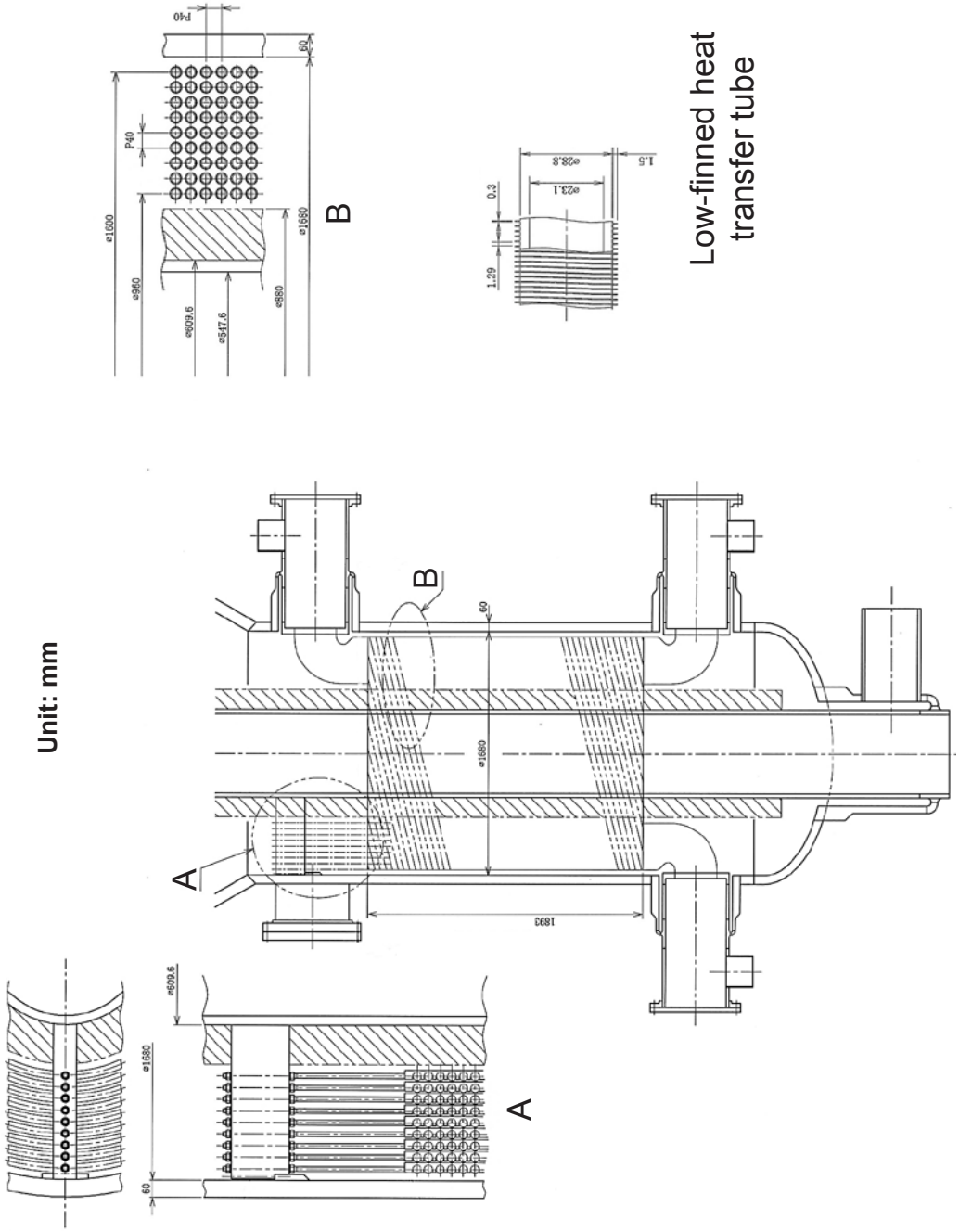

Fig.2.3 Cross cut view of integrated heat exchanger (2/2)

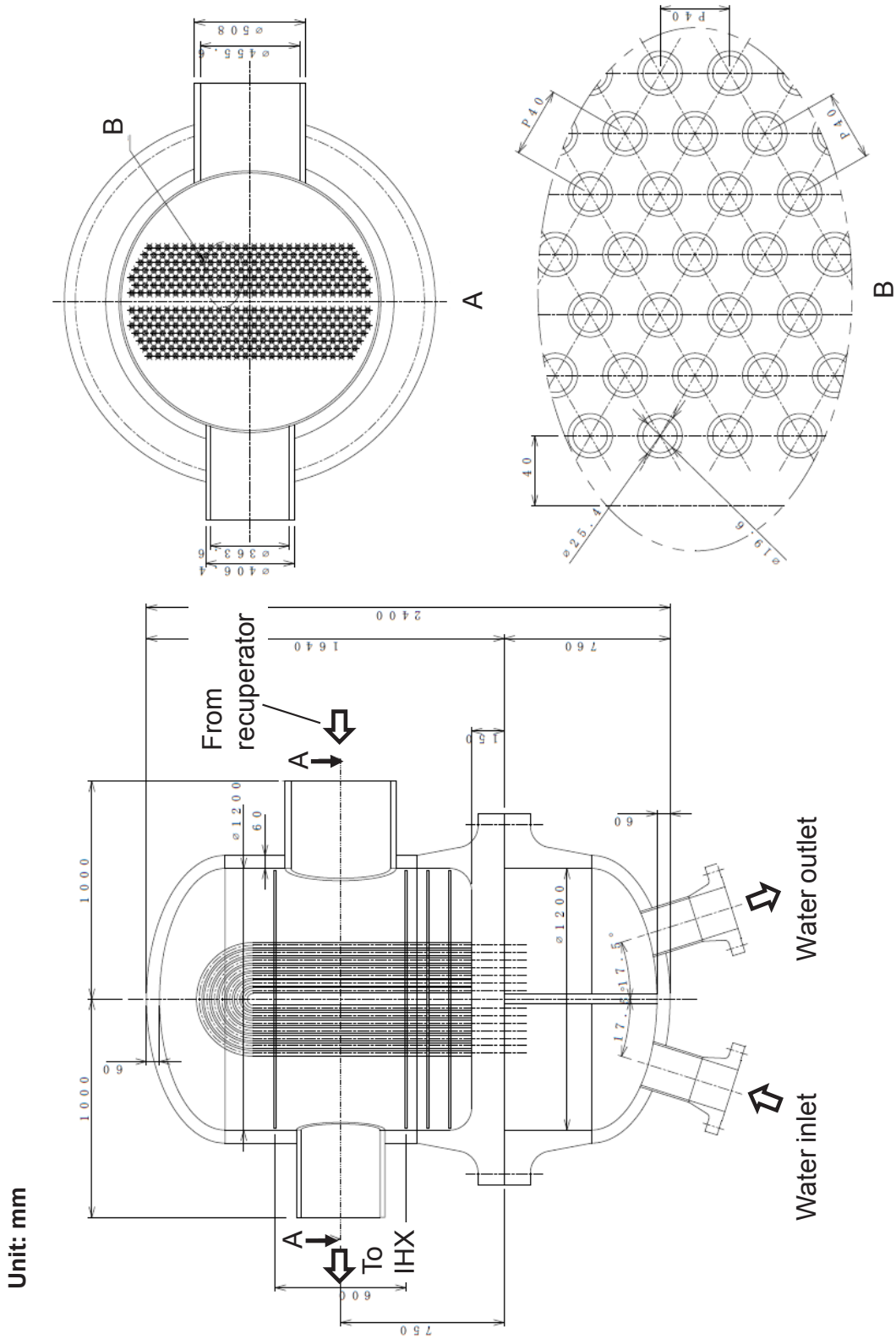

Fig.2.4(a) Cross cut view of cooler A

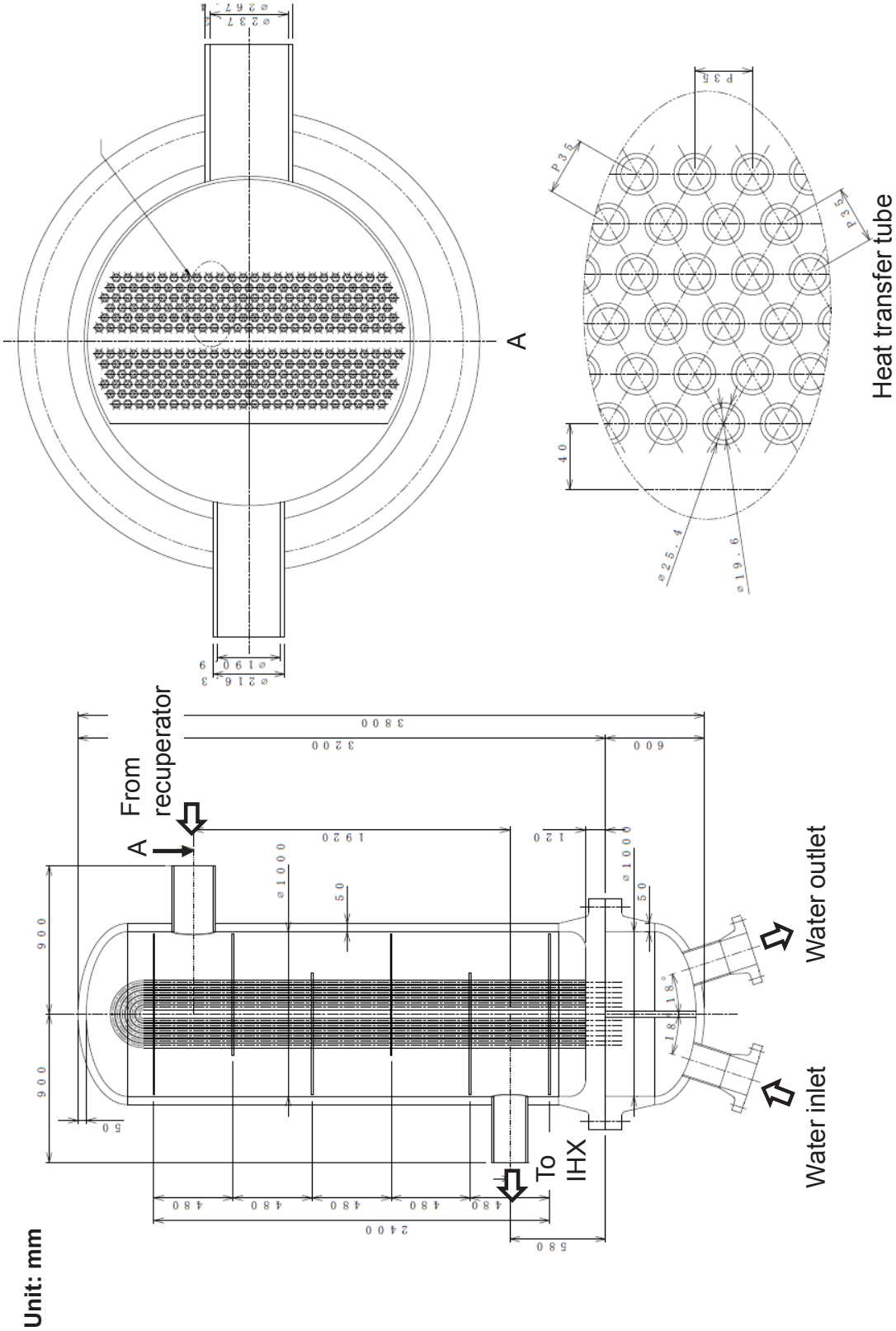

Fig.2.4(b) Cross cut view of cooler B

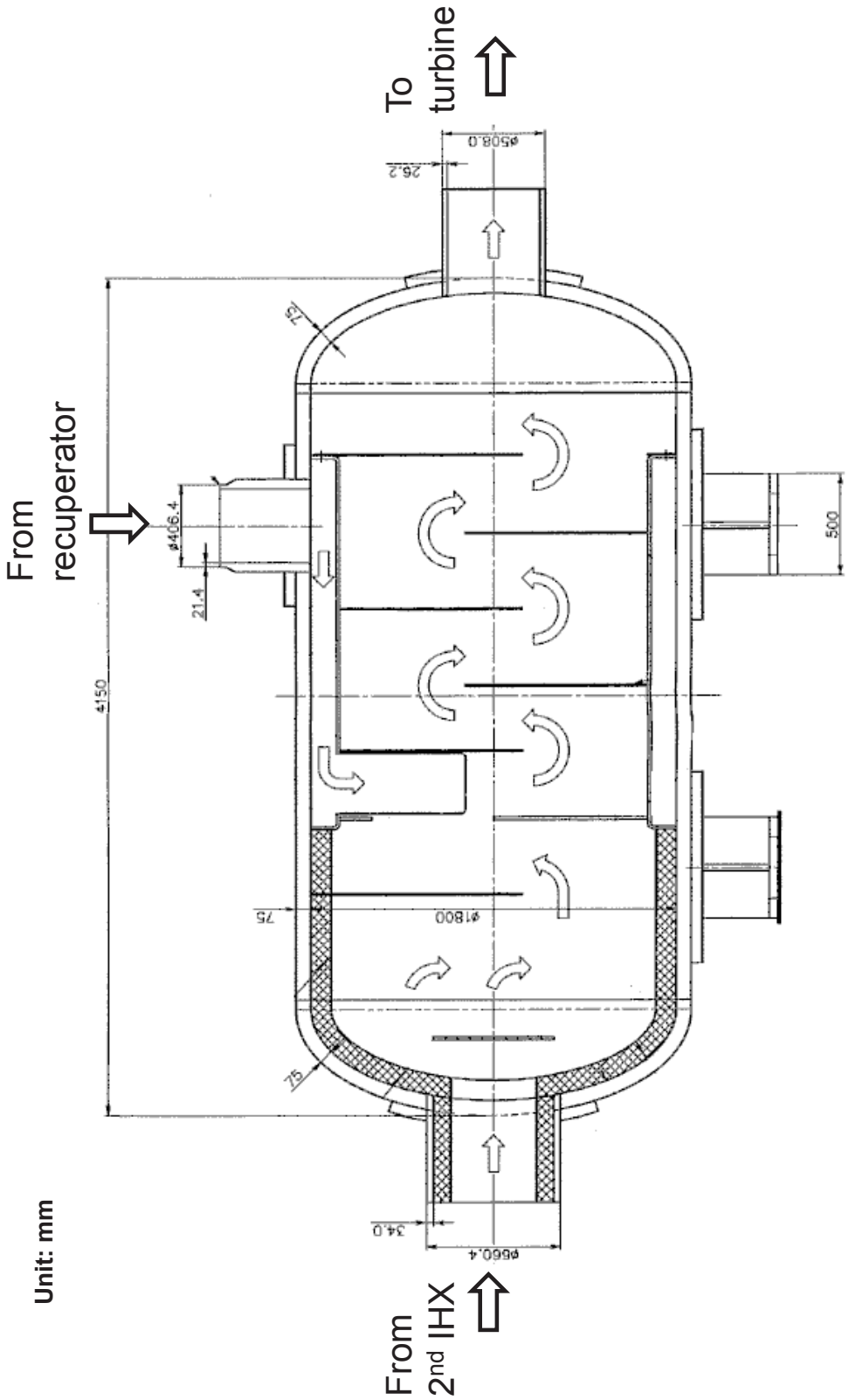

Fig.2.5 Cross cut view of mixing volume

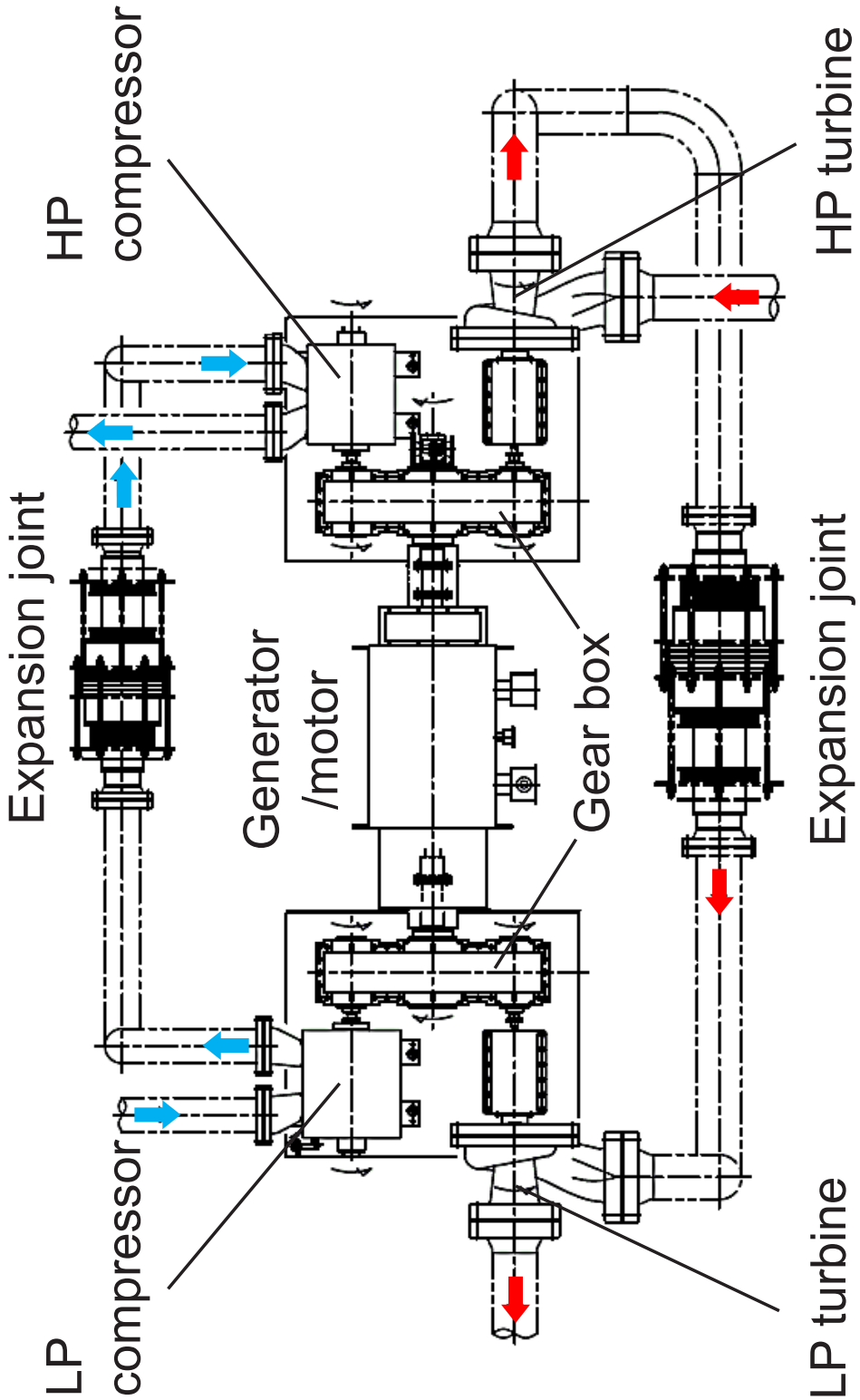

Fig.2.6 Helium gas turbine layout

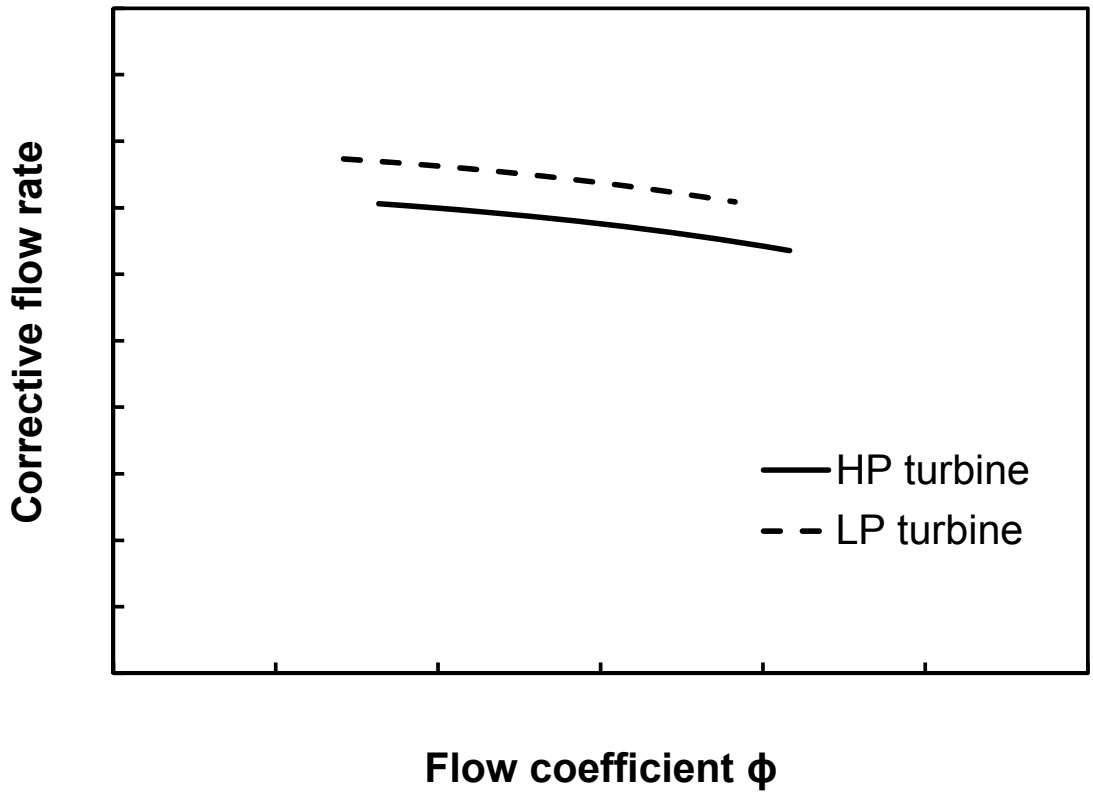

Fig.2.7 Correlation between flow coefficient and corrective flow for turbine

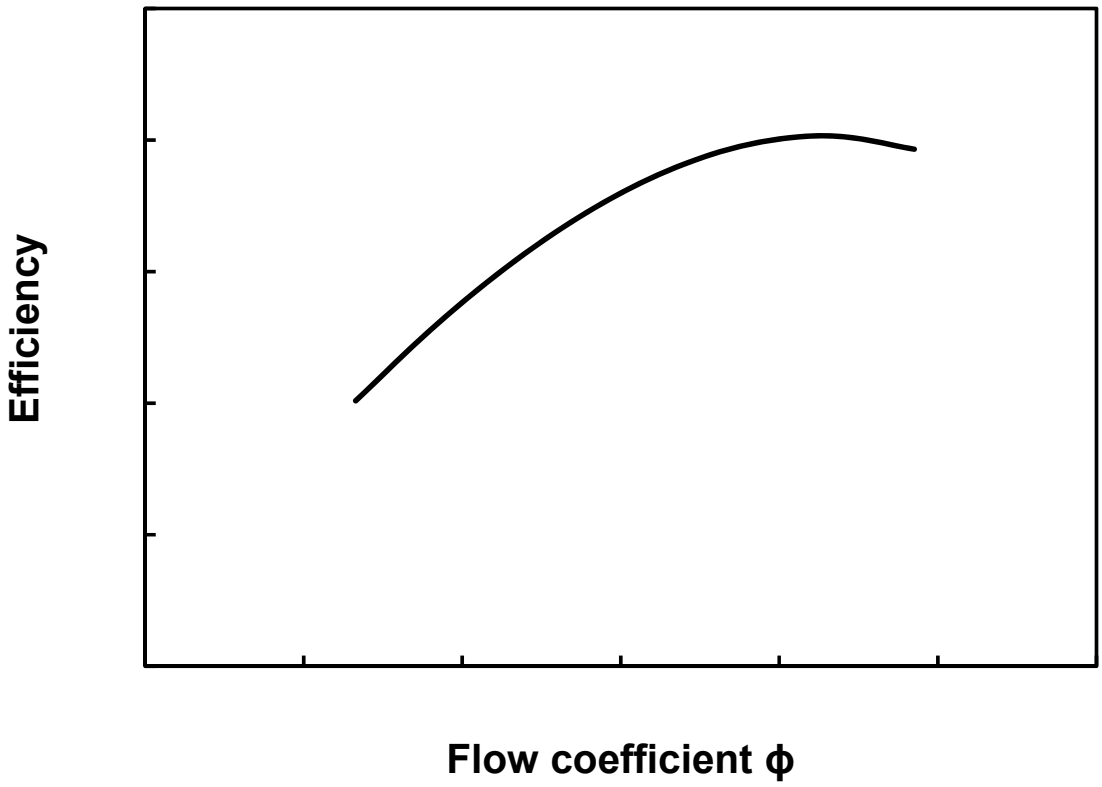

Fig.2.8 Correlation between flow coefficient and efficiency for turbine

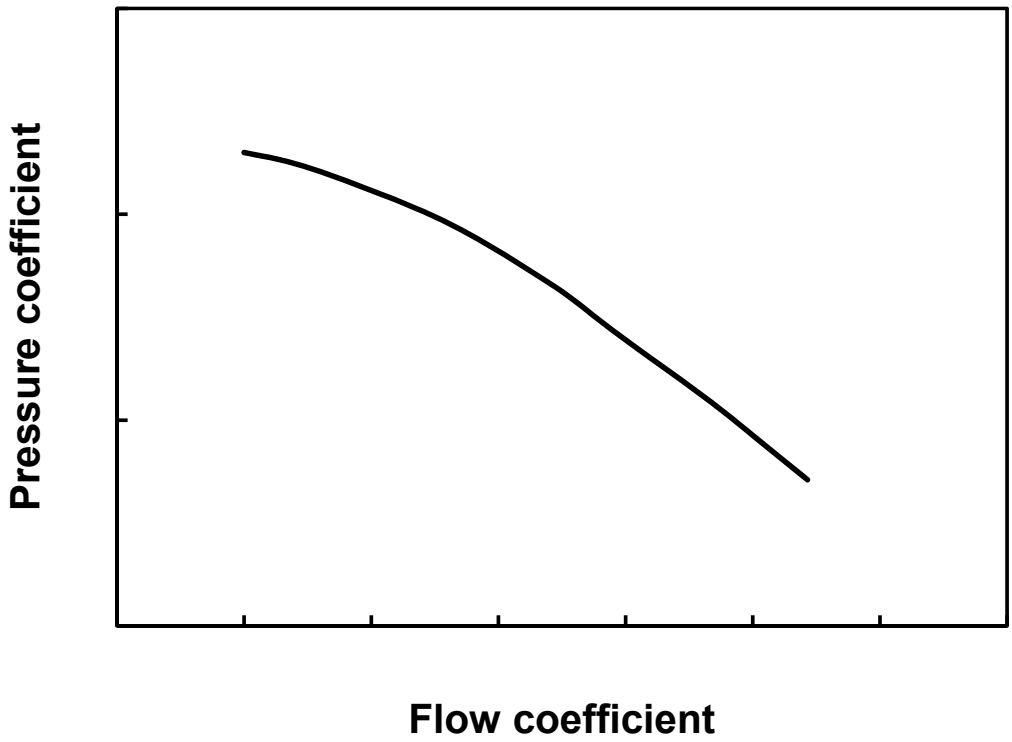

Fig.2.9 Correlation between flow coefficient and pressure coefficient for compressor

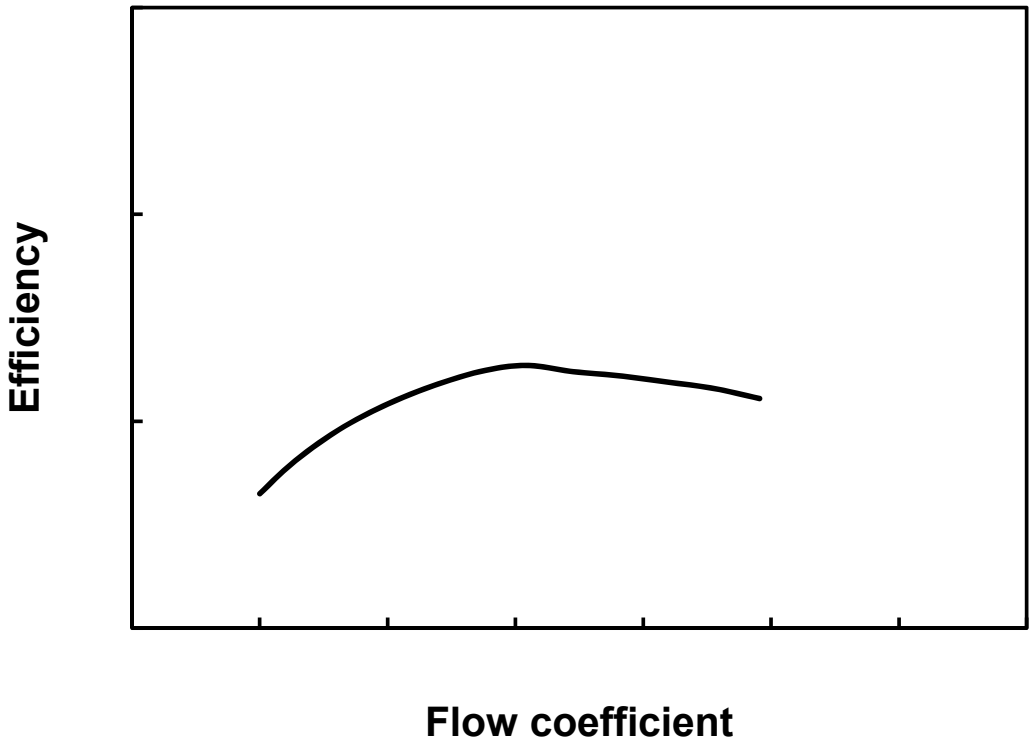

Fig.2.10 Correlation between flow coefficient and efficiency for compressor

3. タービン翼候補合金中の核分裂生成物同位体の拡散試験データ

3.1 試験方法

タービン翼候補合金である多結晶性インコネル 713C と、FP の安定同位体である銀（Ag）との拡散対の加熱後の切断面を電子線マイクロアナライザ（Electron Probe Micro Analyzer ; EPMA）により分析することで、タービン翼候補合金中の FP の拡散データを取得した。また、試験データを分析し、拡散挙動シミュレーションに必要な情報を同定した。以下に試験方法を示す。

まず、10mm 四方の多結晶性及び単結晶性インコネル 713 の試料全面に電解めっき法で Ag 膜（約 5μm）を形成させ、その後、Ag 蒸発防止のためニッケル（Ni）膜（約 5μm）を施工し、拡散対とした。**Table 3.1** にインコネル 713C の組成、**Fig.3.1** に拡散対の模式図を示す。拡散対は酸化防止のため石英管内に真空封入し、電気炉を用いて 800°C で 2,000 時間の加熱を行った。加熱後の試験片を低速カッターにて切断し、導電性樹脂に埋め込み後、切断面を精密研磨して切断面の EPMA により観察を行った。

3.2 試験結果及び分析結果

3.2.1 試験結果

Fig.3.2 に走査型電子顕微鏡／エネルギー分散型 X 線分光法（Scanning Electron Microscope / Energy Dispersive X-ray Spectroscopy ; SEM-EDX）による試験片切断面の分析結果を示す。Ag 及び Ni についての EDX 元素マッピングの結果から、試験片切断面の SEM 画像上において母材表面に Ag めっき層が白い帯状に残存し、かつ、Ag 面上に Ni めっき層が灰色の帯状に残存していることが判断できる。この結果から、観察範囲内において候補合金と Ag の拡散対は加熱完了まで有効に接触面を維持できていたと判断し、Ag の母材中への拡散傾向を明らかにするため、EPMA によるライン元素信号強度計測（以下、「ライン計測」）を SEM-EDX 観察範囲と同じ領域で実施した。

Fig.3.3 及び **Fig.3.4** に EPMA によるライン計測結果を示す。本試験では多結晶性のインコネル 713C を候補合金として用いたため、Fig.3.3、Fig.3.4 中に矢印で示す結晶粒界が観測された。結晶粒内及び結晶粒界中の拡散傾向の差を明らかにするため、EPMA ライン計測は結晶粒内（Fig.3.3）、結晶粒界（Fig.3.4）に沿って実施した。結晶粒内及び結晶粒界中のライン計測位置をそれぞれ Fig.3.3、Fig.3.4 の図中左側の SEM 画像上に、ライン計測結果を図中右側に示す。いずれの結果も、候補合金中に FP 同位体の拡散によると思われる Ag の偏析現象と推測される信号（Ag 信号）が観察された。候補合金中の Ag 信号は Fig.3.3 及び Fig.3.4 中で赤く囲った領域に観察されている。Fig.3.3 の結晶粒内では Ag 信号強度は微弱で、かつ、拡散領域も 3μm 程度に留まっているのに対し、Fig.3.4 の結晶粒界中では結晶粒内より二桁程度の高い信号強度であり、拡散領域も 5μm 以上に及んでいる。これらの結果から、同一候補合金中の結晶粒内と結晶粒界中では FP 同位体の拡散傾向が異なり、結晶粒界が FP の高速拡散経路として機能している可能性が示唆された。

3.2.2 分析結果

試験データを分析し、拡散挙動シミュレーションに必要な情報を同定した。

(1) 平均濃度

Ni-Ag 系の状態図から、銀は融点である 961.93°C の温度条件では、純ニッケルに 1%までしか溶解せず、固溶体を形成する。一方、純銀にニッケルはほとんど溶解しない。インコネル 713C 中に含まれるニッケルは 70%程度であることから、インコネル 713C 中の模式的な銀のプロファイルは **Fig.3.5** のようになると想定される。本プロファイルは、純銀の領域と、固溶体の領域の二つの領域で構成されており、二つの領域の境界で銀濃度は 100%から 1%未満に急激に変化している。SEM/EDX を用いて純銀の領域の深さを測定した結果を **Table 3.2** に示す。

(2) 粒径

SEM 画像から、粒径は 800-900μm と推定される。

(3) 粒界幅

粒界幅は一般的に数個の原子分、あるいはサブナノメートル（0.5 nm 程度）である。今後、TEM を用いて当該材料の粒界幅を計測予定である。

Table.3.1 Composition of Inconel 713C (wt%)

	Ni	Cr	Co	Mo	W	Ta	Nb	Ti	Al	Fe	others
IN713C	Bal.	12.5	-	4.2	-	-	2	0.8	6.1	2.5	0.13

Table 3.2 Maximum depth in pure Ag region, where Ag was detected with SEM/EDX. Aging temperature: 800°C. PC: Poly-crystalline Inconel 713C. SC: Single-crystalline Inconel 713C.

Material	Aging term t (/h)	Depth y (/um)
PC	400	1.06
PC	1600	1.60
SC	400	0.58
SC	1600	1.35

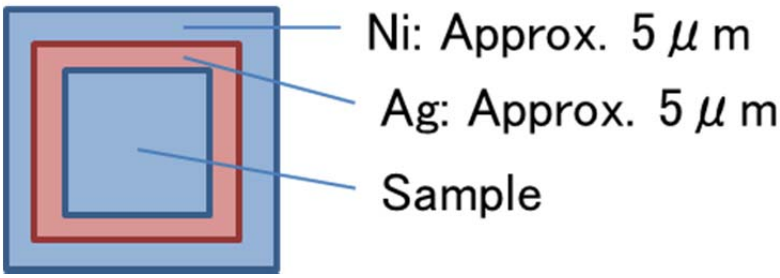

Fig.3.1 Schematic diagram of the diffusion pair

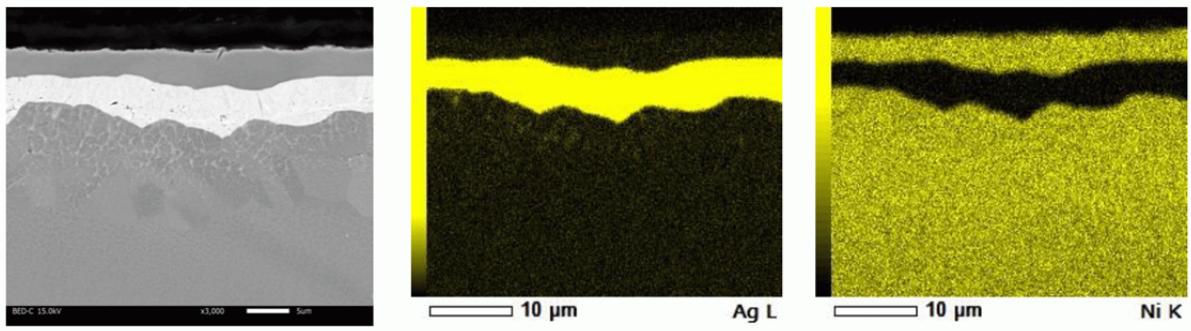

Fig.3.2 SEM-EDX analysis result for the cross section of specimen

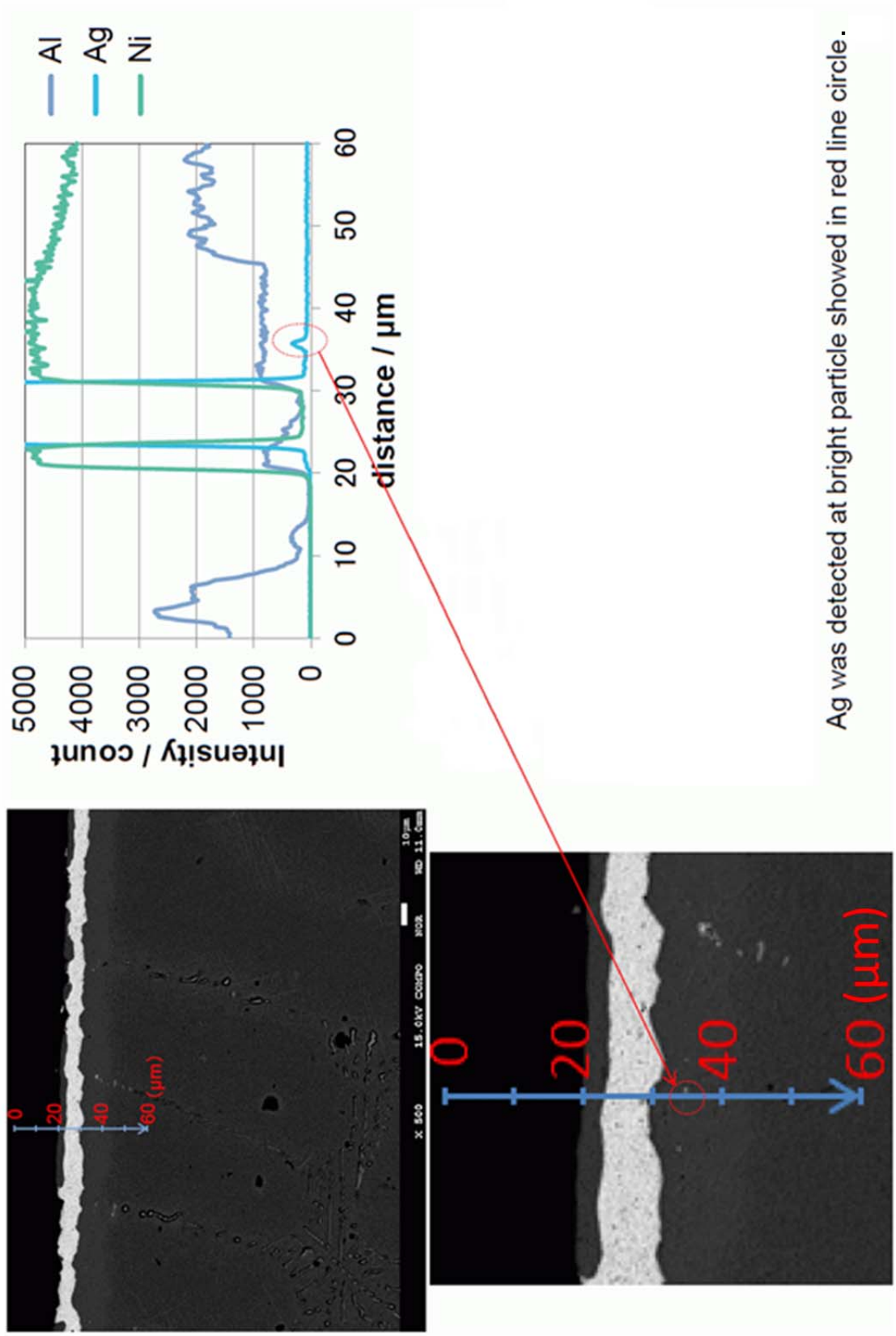

Fig.3.3 EPMA line analysis result (Polycrystalline Inconel 713C, In-Grain)

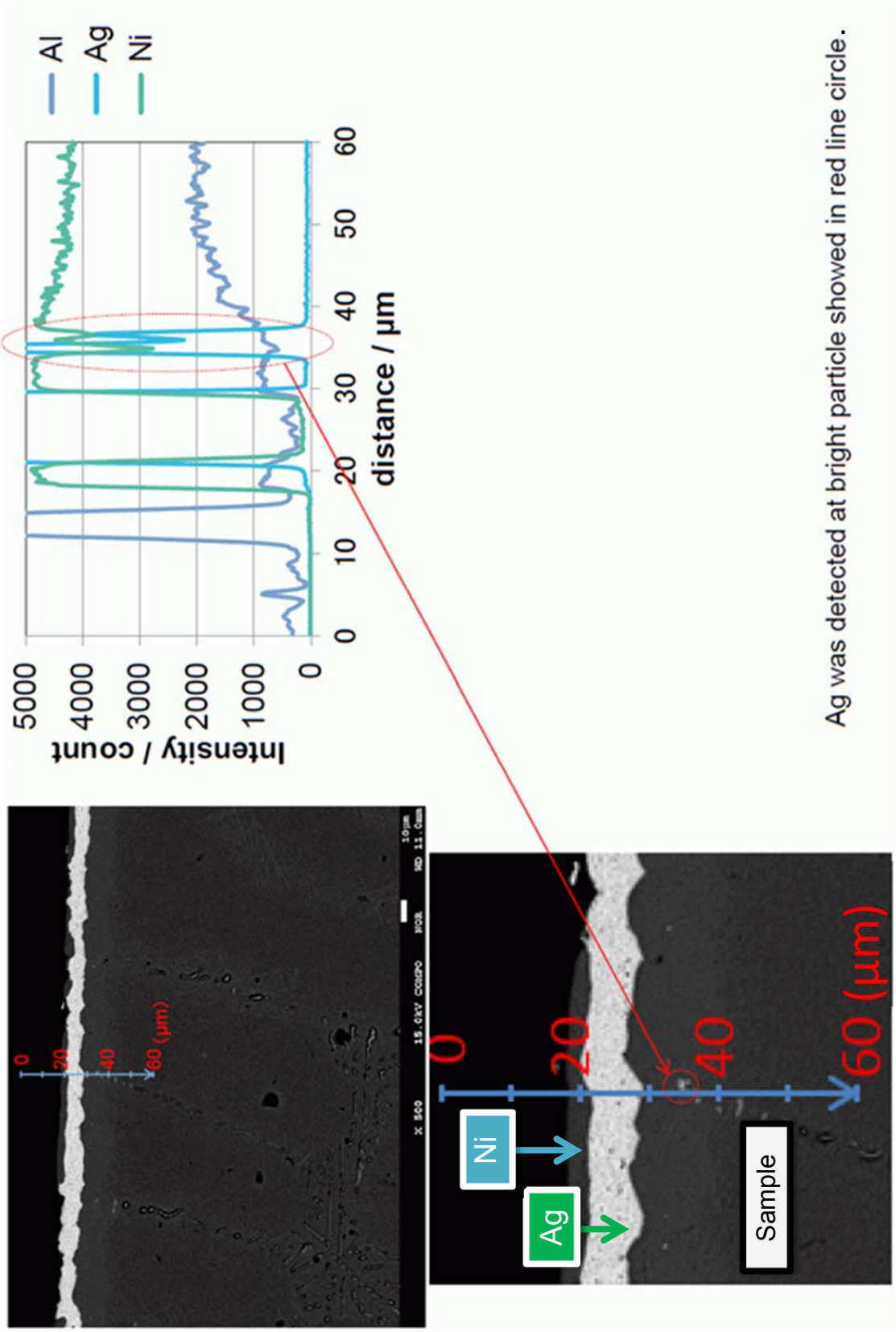

Fig.3.4 EPMA line analysis region (Polycrystalline Inconel 713C, Grain-Boundary)

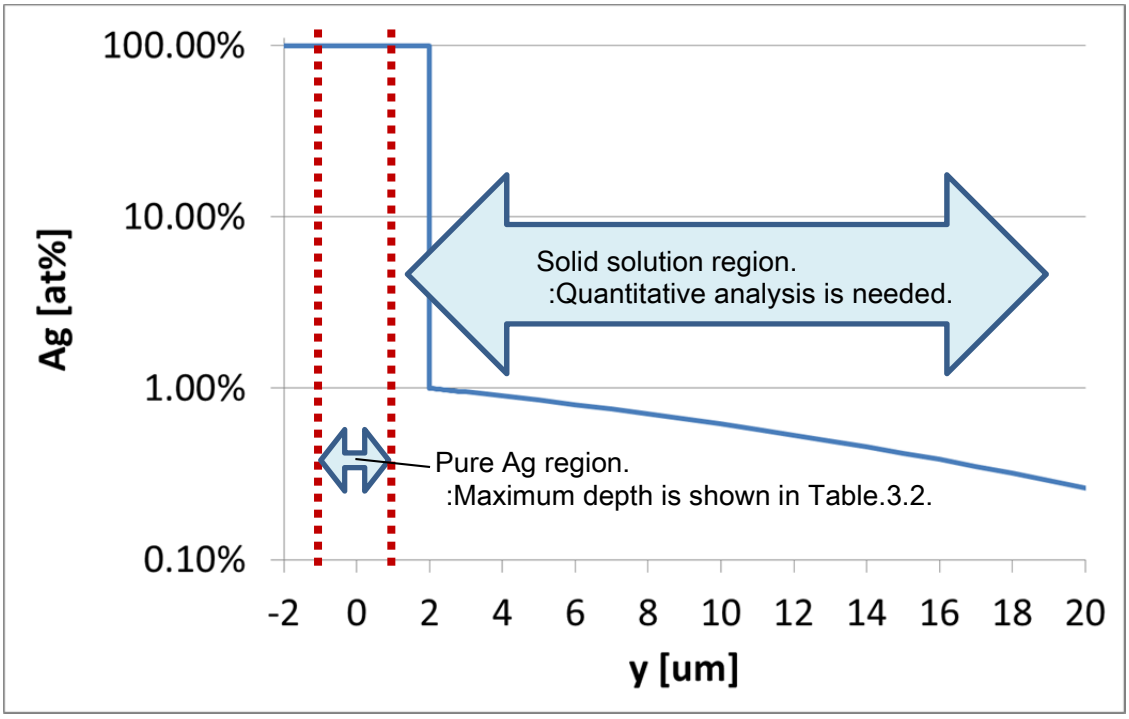

Fig.3.5 Schematic depth profile of Ag after aging

4. まとめ

原子力機構では、高温ガス炉を用いたヘリウムガスタービンによる高効率発電に着目し、世界で初めての原子炉施設へのヘリウムガスタービン及び水素製造施設の接続に係る許認可の取得やヘリウムガスタービン発電技術や水素製造技術の確証を目的に、HTTR にヘリウムガスタービン及び水素製造施設等から成る熱利用システムを接続した HTTR 熱利用試験を計画している。また、ヘリウムガスタービンの要素技術として、タービンにおける FP 沈着低減技術の研究開発を実施している。本報では、平成 28 年度に発行した報告書「高温ガス炉に接続するヘリウムガスタービンの設計データ（JAEA-Data/Code 2016-007）」について、平成 28 年度に実施した HTTR 接続熱利用システムの機器設計結果、並びに、タービン翼候補合金中の核分裂生成物同位体の拡散試験データ分析結果を反映した。

今後、ヘリウムガスタービンの要素技術確立や、日米共同での HTTR 熱利用試験実施を目指して、「高温ガス炉研究開発に関する協力のための日本原子力研究開発機構とアメリカ合衆国エネルギー省との間のプロジェクト取決め」に基づき、当該設計データを米国エネルギー省及びアイダホ国立研究所に提供予定である。

謝　辞

HTTR に接続する熱利用システムの検討、並びに、タービン翼への FP 沈着低減技術の研究開発にあたり貴重なご助言を頂いた高温ガス炉水素・熱利用研究センター　國富一彦センター長、橘幸男ディビジョン長、中川繁昭研究主幹に感謝いたします。

参考文献

1) 原子力科学技術委員会　高温ガス炉技術研究開発作業部会, 高温ガス炉技術開発に係る今後の研究開発の進め方について（案）, http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/072/attach/1351826.htm,（アクセス日：2017/7/21）.

2) 今井良行, 佐藤博之, 野本恭信, Xing L. Yan, 高温ガス炉に接続するヘリウムガスタービンの設計データ, JAEA-Data/Code 2016-007 (2016), 27p.

3) Saito, S., Tanaka, T., Sudo, Y. et al., Design of High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR), 1994, JAERI 1332, 247p.

This is a blank page.

国際単位系（SI）

表１．SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	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
光度	カンデラ	cd

表２．基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立方メートル	m^3
速さ，速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	毎メートル	m^{-1}
密度，質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m^2
比体積	立方メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度[a]，濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率[b]	（数字の）　1	1
比透磁率[b]	（数字の）　1	1

(a) 量濃度（amount concentration）は臨床化学の分野では物質濃度（substance concentration）ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元１をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の１は通常は表記しない。

表３．固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン[b]	rad	1 [b]	m/m
立体角	ステラジアン[b]	sr[c]	1 [b]	m^2/m^2
周波数	ヘルツ[d]	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	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
仕事率，工率，放射束	ワット	W	J/s	$m^2\ kg\ s^{-3}$
電荷，電気量	クーロン	C		s A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	$kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度[e]	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd sr[c]	cd
照度	ルクス	lx	lm/m^2	$m^{-2}\ cd$
放射性核種の放射能[f]	ベクレル[d]	Bq		s^{-1}
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト[g]	Sv	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		$s^{-1}\ mol$

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b)ラジアンとステラジアンは数字の１に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の１は明示されない。
(c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性核種の放射能（activity referred to a radionuclide）は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g)単位シーベルト（PV,2002,70,205）についてはCIPM勧告2（CI-2002）を参照。

表４．単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	$m^{-1}\ kg\ s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	$kg\ s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m\ m^{-1}\ s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m\ m^{-1}\ s^{-2}=s^{-2}$
熱流密度，放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	$kg\ s^{-3}$
熱容量，エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}$
比熱容量，比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2\ s^{-2}\ K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	$m\ kg\ s^{-3}\ K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m^3	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m^3	$m^{-3}\ s\ A$
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ s\ A$
電束密度，電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ s\ A$
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2\ kg\ s^{-2}\ mol^{-1}$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}\ mol^{-1}$
照射線量（X 線及びγ線）	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1}\ s\ A$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2\ s^{-3}$
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=m^2\ kg\ s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2\ sr)$	$m^2\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=kg\ s^{-3}$
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m^3	$m^{-3}\ s^{-1}\ mol$

表５．SI 接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^{6}	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表６．SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	’	1’=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	”	1”=(1/60)’=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 $hm^2=10^4m^2$
リットル	L, l	1 L=1 l=1 $dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	1 t=10^3 kg

表７．SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10^{-19}J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10^{-27}kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10^{11}m

表８．SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10^5Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg≈133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10^{-10}m
海里	M	1 M=1852m
バーン	b	1 b=100fm^2=$(10^{-12}cm)^2$=$10^{-28}m^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	B	
デシベル	dB	

表９．固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10^{-7} J
ダイン	dyn	1 dyn=10^{-5}N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm^{-2}=0.1Pa s
ストークス	St	1 St =$1cm^2\ s^{-1}$=$10^{-4}m^2\ s^{-1}$
スチルブ	sb	1 sb =1cd cm^{-2}=10^4cd m^{-2}
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm^{-2} =10^4lx
ガル	Gal	1 Gal =1cm s^{-2}=$10^{-2}ms^{-2}$
マクスウエル	Mx	1 Mx = 1G cm^2=10^{-8}Wb
ガウス	G	1 G =1Mx cm^{-2} =10^{-4}T
エルステッド[a]	Oe	1 Oe ≙ $(10^3/4\pi)$A m^{-1}

(a) ３元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≙ 」は対応関係を示すものである。

表10．SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10^{10}Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10^{-4}C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10^{-2}Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10^{-2}Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10^{-9}T
フェルミ		1 フェルミ=1 fm=10^{-15}m
メートル系カラット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10^{-4}kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1 cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー），4.184J（「熱化学」カロリー）
ミクロン	μ	1 μ =1μm=10^{-6}m

（第8版，2006年）