

JAERI - M

84-080

耐熱合金とセラミックス熱交換器

1984年4月

岡本 政治

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

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 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。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1984

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷株

J A E R I - M 84-080

耐熱合金とセラミックス熱交換器

日本原子力研究所東海研究所高温工学部

岡 本 政 治

(1984 年 4 月 5 日受理)

将来のプロセスヒートシステムやガスタービンは省エネルギーの観点から、高効率化が重要課題である。そのためには運転温度を上げる必要があり、熱交換器の材料としては金属に代ってセラミックスの使用が有望視されている。そこで熱交換器を対象として耐熱合金とセラミックス材料について調査し、更に海外におけるセラミックス熱交換器の開発状況を調査して多目的高温ガス炉（V H T R）の中間熱交換器への適用の可能性について検討を行った。

JAERI-M 84-080

High Temperature Alloys and Ceramic Heat Exchanger

Masaharu OKAMOTO

Department of High Temperature Engineering,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received April 5, 1984)

From the standpoint of energy saving, the future operating temperatures of process heat and gas turbine plants will become higher. For this purpose, ceramics is the most promising candidate material in strength for application to high-temperature heat exchangers. This report deals with a survey of characteristics of several high-temperature metallic materials and ceramics as temperature-resistant materials; including a survey of the state-of-the-art of ceramic heat exchanger technologies developed outside of Japan, and a study of their application to the intermediate heat exchanger of VHTR (a very-high-temperature gas-cooled reactor).

Keywords: Ceramic, High-temperature, Heat exchanger, Alloy, VHTR, Design, Strength

目 次

1. はじめに	1
2. 耐熱金属	3
2.1 耐熱金属材料の分類	3
2.2 耐熱金属材料の進歩	3
2.3 耐熱金属材料の種類	5
2.4 耐熱金属材料の強度	14
3. セラミックス	19
3.1 セラミックス一般	19
3.2 セラミックスの強度	19
3.3 セラミックスの製造プロセス	23
3.4 セラミックス加工技術	24
4. セラミックス熱交換器の開発状況	25
4.1 伝熱性能（コンパクト性）	25
4.2 セラミックス熱交換器の開発例	26
5. セラミックス中間熱交換器	34
5.1 スリット型モジュール	34
5.2 直交流モジュール	37
6. 今後の課題	39
参考文献	40

CONTENTS

1. Introduction	1
2. High temperature alloys	3
2.1 Classification of high temperature alloy	3
2.2 Advancement of high temperature alloy	3
2.3 Specifications of high temperature alloy	5
2.4 Strength of high temperature alloy	14
3. Ceramics	19
3.1 General	19
3.2 Strength of ceramics	19
3.3 Forming process of ceramics	23
3.4 Manufacturing of ceramics	24
4. Recent developments of ceramics heat exchanger	25
4.1 Performance	25
4.2 Sample of ceramics heat exchanger	26
5. Design of ceramics intermediate heat exchanger	34
5.1 Slit module type	34
5.2 Cross-flow module type	37
6. Summary and conclusions	39
Reference	40

LIST OF TABLES

- Table 2.1 Classification of alloy
- Table 2.2 Chemical composition of Ferrite steel
- Table 2.3 Chemical composition of Austenite steel
- Table 2.4 Chemical composition of Iron-base alloy
- Table 2.5 Chemical composition of Nickel-base alloy
- Table 2.6 Chemical composition of Cobalt-base alloy
- Table 2.7 Chemical composition of Chromium-base alloy
- Table 2.8 Chemical composition of Molybdenum-base alloy
- Table 2.9 Pressure vessel calculation expressions for various code

LIST OF FIGURES

- Fig. 1.1 Approximate operating boundaries for various heat exchanger materials
- Fig. 2.1 Strength and Oxidation Plot of alloy
- Fig. 2.2 Advancement of alloy for service temperature
- Fig. 2.3 Allowable stress of boiler tube
- Fig. 2.4 1000 h stress rupture strength of iron-base alloys
- Fig. 2.5 10000 h stress rupture strength of iron-base alloys
- Fig. 2.6 1000 h stress rupture strength of nickel-base alloys
- Fig. 2.7 100 and 1000 h rupture strength vs. temperature for Nimonic 80A, TD-Nickel and IN-853
- Fig. 2.8 1000 h stress rupture strength of cobalt-base alloys
- Fig. 2.9 Creep rupture strength of molybdenum-base alloys
- Fig. 2.10 High temperature nickel-base alloys
- Fig. 2.11 Intermediate temperature nickel base alloys
- Fig. 2.12 High temperature cobalt-base alloys
- Fig. 2.13 Superalloys with superior corrosion resistance
- Fig. 3.1 Waible plot of Si₃N₄ flexual strength
- Fig. 3.2 Fracture strength for various temperature
- Fig. 3.3 Strength of typical potential heat exchanger materials
- Fig. 3.4 Push-out forming process of ceramics
- Fig. 3.5 Plunger type push-out forming unit
- Fig. 3.6 Pattern of laser processing

- Fig. 3.7 Relative costs of various raw ceramics, after Farmer
- Fig. 4.1 Surface compactness spectrum for plate-fin heat exchangers
- Fig. 4.2 Cross section of a turbine
- Fig. 4.3 Typical ceramic disk and drum cores for rotary regenerative heat exchangers
- Fig. 4.4 Ceramic heat recovery wheel
- Fig. 4.5 Silicon carbide heat exchanger subheadering components
- Fig. 4.6 Manifolding of silicon carbide heat exchanger for coal-fired closed-cycle gas turbine application
- Fig. 4.7 Finned surface geometry for gas-to-gas silicon carbide tubular heat exchanger
- Fig. 4.8 Tubular ceramic heat exchanger embodying secondary surfaces for high-temperature furnace gas heat recovery
- Fig. 4.9 Silicon carbide tube with internal and external extended surfaces for high-temperature gas-to-gas heat recovery
- Fig. 4.10 Recuperator for furnace
- Fig. 4.11 Heat pipe
- Fig. 4.12 Layout of heat-pipe heat exchanger
- Fig. 4.13 Heat-pipe heat exchangers manufactured in the UK
(reproduced by permission of Isoterix Ltd)
- Fig. 4.14 Concept of ceramic heat-pipe heat exchanger
- Fig. 4.15 Supporting structure for a V-module
- Fig. 4.16 136-MW thermal power compact recuperator with multiple V-arrangement for nuclear power plant with helium turbine cycle
- Fig. 4.17 SiN-heat exchanger element, machined flow channels in an isostatically pressed block (manufactured by RTAG)
- Fig. 4.18 Test facility for ceramic recuperator elements (maximum air temperature - 250°C; maximum air pressure - 5 bar)
- Fig. 4.19 Modular ceramic recuperator system with extruded surface geometry for high-temperature gas-to-gas heat recovery applications
- Fig. 4.20 Early cross-flow plate-fin ceramic heat exchanger module
- Fig. 4.21 Developmental ceramic plate-fin heat exchanger module for vehicular gas turbine application
- Fig. 4.22 Ceramic plate-fin counterflow recuperator module
- Fig. 4.23 Silicon carbide tubes with enhanced surfaces
- Fig. 5.1 Ceramic IHX module

- Fig. 5.2 Layout of ceramic module
- Fig. 5.3 Over all dimension of ceramic IHX
- Fig. 5.4 Module block drawing
- Fig. 5.5 Outline drawing of ceramic IHX
- Fig. 5.6 View of block structure

1. はじめに

多目的高温ガス炉（V H T R）は熱効率が高いというのがその特長の第一である。従って、V H T Rの核熱利用の場合、構成材料は必然的に過酷な高温高圧の使用条件となる。

高温にさらされる部分のうち、原子炉心はすべてグラファイトにより構成することにより使用温度条件を克服しているし、高温ダクトは内部断熱材を使用することにより高温部と耐圧部を分離して使用条件を克服している。即ち、V H T Rの構成材料のうち、高温高圧を同時に受けるものは、熱利用系の熱交換器伝熱管であり、これは伝熱性能、コンパクト化の制約から、無制限に肉厚を厚くしたり、高温強度が大でも熱伝導の悪い材料は使えない。熱効率が良いというV H T Rの特長を生かすには、高性能な熱利用系の熱交換器の開発が必要な課題で、それは高温高圧で長時間の使用に耐え得る材料の開発により克服されるものである。

本報では、高温熱交換器用材料に的を当て、耐熱材料について広範囲にセラミックスも含めてその種類、性質を調査したものである。耐熱金属についてはASTM、JIS、INC0社規格等分類が複雑であり、また種類も多いため耐熱金属全般を把握することは、容易ではない。従って、今回の耐熱金属材料の調査では、各合金の化学成分による分類整理に主眼を置き、耐熱金属全般について把握することを目的に進めた。

セラミックスについては、金属材料に比べて更にその対象は複雑で難解であり、規格・分類も金属材料ほど整理されてはいないのが現状である。機械的性質も金属のように安定したものではなく、強度の評価では確率論的アプローチが必要になる。セラミックスを構造材として使用する場合、最も難点となるのは加工が困難であることである。将来の技術開発によりこの点が克服されれば、もともと金属材料に比べて使用温度域が高く、高温でも材料強度が低下しないというセラミックスが、耐熱構造材料として広範囲に使用されるはずである。Fig.1.1は使用温度に対する適用材料の種別を示したものである。¹⁾

本報のセラミックスの項では、最も問題となる加工技術については詳細には触れられなかったが、海外のセラミックス熱交換器の開発例と、種々問題はあるがセラミックス中間熱交換器の設計例を示す。

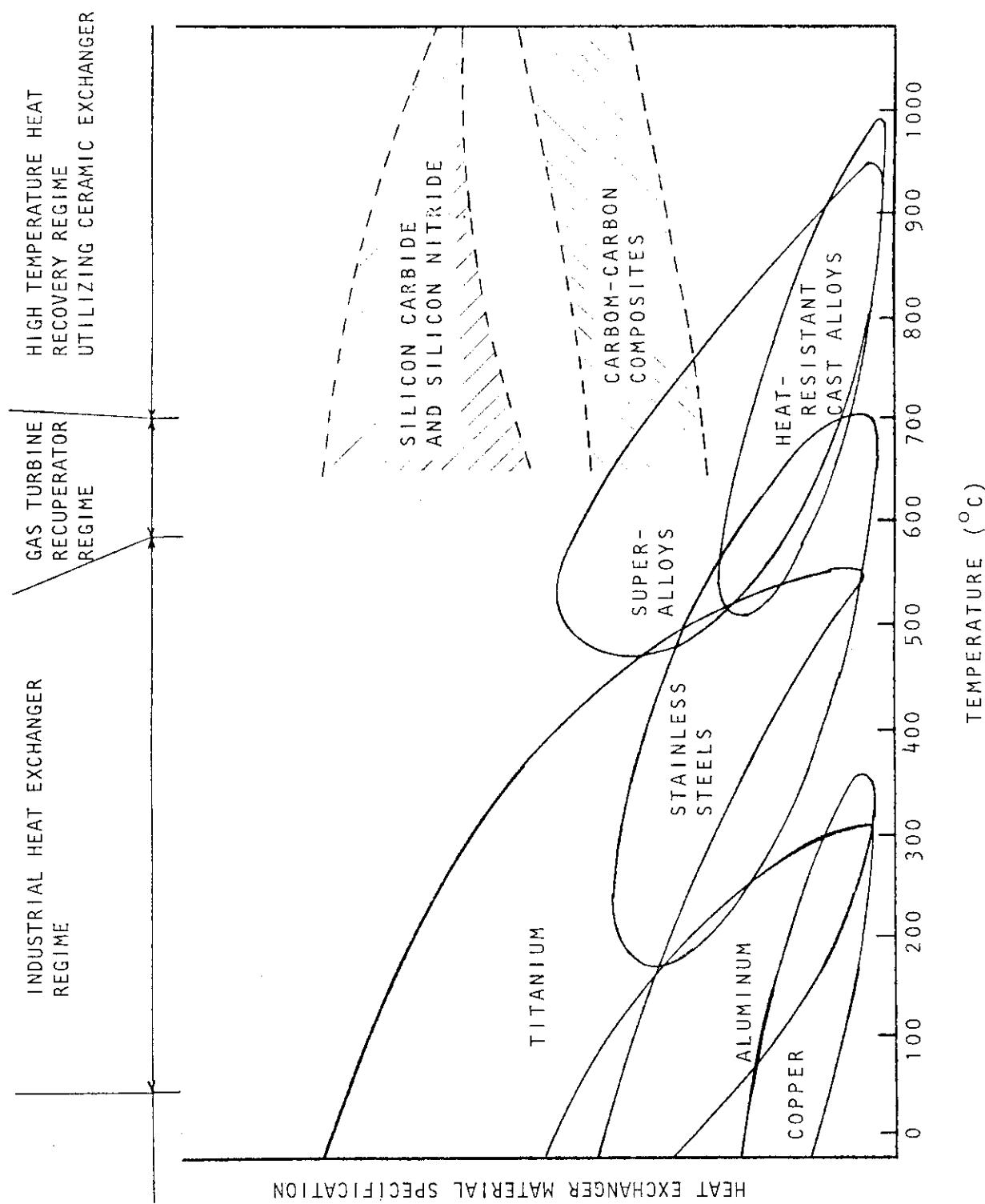


Fig. 1.1 Approximate operating boundaries for various heat exchanger materials

2. 耐熱金属

2.1 耐熱金属材料の分類

日本のJIS規格ではステンレス鋼と耐熱鋼の2本立ての分類であるが、米国のAISI(American Iron and Steel Institute)ではCr系を400台、Cr-Ni系を300台、Cr-Mn-Ni系を200台、低Cr耐熱鋼を500台の記号で扱っている。またASTM(American Society for Testing Materials)では全体が大きく6分類されており株1部が鉄合金、2部が非鉄合金となっておりそれぞれの幅で細かく分類されている。

しかし、耐熱合金はその歴史が主にジェットエンジン用として開発された特殊用途用のものであることから、規格によるフォローが十分でなく、一般に製造会社の製品名で取り扱われる。

本報では、耐熱金属をTable 2.1のように大別して取り扱った。

Table 2.1 Classification of alloy

1. フェライト系耐熱鋼
2. オーステナイト系耐熱鋼
3. Fe基耐熱合金
4. Ni基耐熱合金
5. Co基耐熱合金
6. Cr基耐熱合金
7. Mo基耐熱合金

2.2 耐熱金属材料の進歩

耐熱金属材料はその成分金属がそれぞれに固有の溶融温度を持っていて、その溶融温度以上ではもちろん使用できないし、溶融温度以下であっても、高温では一般に強度が低下し、また腐食現象によっても使用可能な温度に限界ができる。

今までの耐熱金属の用途は、ジェットエンジン用及び石油化学工業での加熱炉のリフオーマチューブが主であり、研究開発は主としてこの高温での強度と耐食性の二つの性質を対象とし、その改善向上を軸として進められてきた。つまり、Fig. 2.1に示すとおり、MoやWの合金は高温強度は大きいが耐酸化性に劣り、Pt合金は逆に強度が小さい。そしてNi基とCo基の耐熱合金が、上記の用途には最も優れていることになり、今までその方向で開発が進められてきた。

また、現在のジェットエンジンの中で最も高い温度で、しかも大きな応力を受ける動翼材料用としてきた耐熱合金の発展の跡をFig. 2.2²⁾に示す。

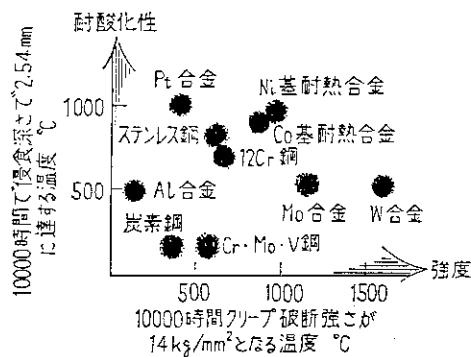


Fig. 2.1 Strengths and oxidation of alloy.

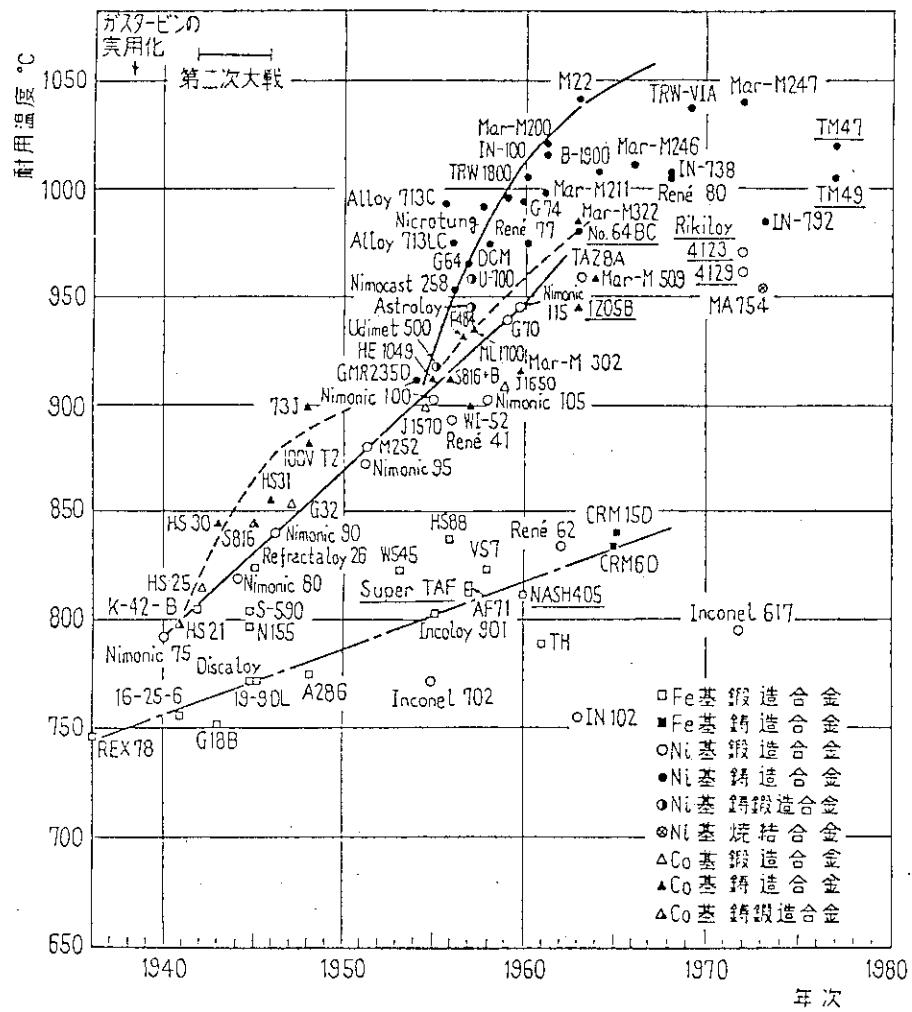


Fig. 2.2 Development of alloy for service temperature.

2.3 耐熱金属材料の種類

(1) フェライト系耐熱鋼

フェライト系耐熱鋼として代表的なものは、Cr-Mo鋼及び高Cr鋼である。これらは耐熱鋼といつても、VHTRの温度領域のものではなく、Cr-Mo鋼では500°C以下の温度領域が主目的である。高Cr鋼で主に実用化されているものには12%Cr鋼があり、優れたものでは650°Cまでの温度でオーステナイト系耐熱合金に匹敵する耐熱強度を有するものもある。

フェライト系耐熱鋼の代表的なものについて、その化学成分をTable 2.2に示す。

(2) オーステナイト系耐熱性

フェライト系に比べて、オーステナイト系耐熱鋼のほうが耐熱性が優れているが、これらのうち初期から用いられたのは、オーステナイト系ステンレス鋼で、この幅でも25Cr-20Ni鋼は、その優れた耐熱性のため用途が著しく伸びている。

またオーステナイト系に分類することは適当ではないが、析出硬化型のステンレス鋼も耐熱鋼として注目されており、便宜上ここで取り上げておく。

これらの代表的なものについて、その化学成分をTable 2.3に示す。

(3) 鉄基合金

耐熱強度については後のニッケル基合金やコバルト基合金には及びないが、前記オーステナイト系ステンレス鋼を基にして、Ni, Cr量及びその他の添加元素の種類と添加量の変化によって実用化された耐熱合金がこれらである。耐熱合金の発展の歴史から見れば比較的初期に実用化されたものである。(Fig. 2.2 参照)

これら鉄基合金の代表的なものについて、その化学成分をTable 2.4に示す。

(4) ニッケル基合金

ニッケル基合金はその基礎となっているニクロム合金(80Ni-20Cr)から発展し、英国において Nimonic 系合金が改発され、また米国においてハスティロイ系合金から出発して、インコネル系合金、M 252, Waspaloy, Udimet 500などの合金が発達した。

これらニッケル基合金の代表的なものについて、その化学成分をTable 2.5に示す。

(5) コバルト基合金

コバルト基合金の代表的なものについて、その化学成分をTable 2.6に示す。

(6) クロム基合金

クロム系合金はNiやCo系より高温クリープ強度が高いが、この系の欠点は原料Crがもろいために、合金の加工性が極めて悪く、切削が困難で、室温で極めてもろいことである。

この系の合金の格学成分をTable 2.7に示す。

(7) モリブデン基合金

Moは融点2625±50°Cで、その合金の高温クリープ強度は現用の超耐熱合金に比べて極めて高い。この系の欠点は耐酸化性が非常に劣っていることである。Moは480°C以上では甚だしく酸化し、しかも生成される MoO_3 は795°Cで溶融し、約815°C以上で揮発する。そのため、Mo基耐熱合金については、容易にはく離しない耐酸化被覆についての研究が数多く行われている。

この系の代表的合金であるTZMの化学成分をTable 2.8に示す。

Table 2.2 Chemical composition of ferrite steel (1/2)

ALLOY (COMPANY)	C	Cr	Ni	Fe	Co	Mo	Si	Mn	Al	Ti	Other
<i>Low chromium steel</i>											
C 7Cr-0.5Mo	0.1	0.5	Bal.			0.45	0.1	0.3			
-0.2	-0.7		Bal.			-0.65	-0.3	-0.6			
1Cr-0.5Mo	0.15	0.8	Bal.			0.45	0.3	0.3			
-1.10			Bal.			-0.65		-0.6			
2.25Cr-1Mo	0.08	2.0	Bal.			0.9	0.5	2.0			
-2.5			Bal.			-1.10					
5Cr-Mo	0.10	4	Bal.			0.45	0.1>	0.9			
-6			Bal.			-0.65					
7Cr-Yo	0.15>	6	Bal.			0.45	0.5	0.3>			
-8			Bal.			-0.65	-0.15				
8Cr-Yo	0.15>	8	Bal.			0.9	0.1>	0.6>			
-10			Bal.			-1.10					
Cr-Mo-V	0.25	3.0	Bal.			0.80	0.30	0.40			
17-22A(S)	0.30	1.25	Bal.			0.50	0.65	0.55			
H40	0.25	3.0	Bal.			0.50	0.40	0.40			
DTD	0.40	3.0	Bal.			0.80	0.5				
<i>High Chromium</i>											
X2CrMoV 12.1	0.20	12	0.4	Bal.		0.9					
10Cr-2W-STEEL	0.10	10	0.3	Bal.							
X17CrMoV 12.1	0.17	11.5	0.6	Bal.		0.6	0.1	0.3			
X1CrNiCrMo 13.8 5	0.01	12.5	8	Bal.		5	2				
13Cr1.12Y	0.15>	11.5	-13.5								
Lapelloy	0.30	11.5				2.75					
C 422	0.23	13.0	0.70	Bal.		1.00					
Greek-Ascolloy	0.20	12.0		Bal.		5.0					
Jessop HS	0.15	11.5		Bal.		0.45					
Rex 448	0.16	12.0		Bal.		1.00					
TAE-1E	0.20	11.0		Bal.		0.80					
<i>Ferrite stainless steel</i>											
SUS 4C5	0.08>	11.5		Bal.			1.00>	1.00>	0.10		
		-14.5		Bal.					-0.30		
SUS 429	0.12>	14.00		Bal.			1.00>	1.00>			
		-16.00		Bal.							
SUS 430	0.12>	16.00		Bal.			0.75>	1.00>			
		-18.00		Bal.							
SUS 430F	0.12>	16.00		Bal.			1.00>1.25>				
		-18.00		Bal.							
SUS 434	0.12>	16.00		Bal.			0.75	1.00>	1.00>		
		-18.00		Bal.					-1.25		
17Cr	0.12>	14		Bal.							
		-18		Bal.							
21Cr	0.25>	18		Bal.							
		-23		Bal.							
27Cr	0.35>	23		Bal.							
		-27									

Table 2.2 Chemical composition of ferrite steel (2/2)

ALLOY(COMPANY)	C	Cr	Ni	Fe	Co	Mo	Si	Mn	Al	Ti	Other
Aluminum alloy steel											
Ferral	0.1			Bal.			1.7		14.0	3.0	
Thermanol				Bal.					16.0		V 0.3
SUS 403		0.15	11.50	Bal.					0.50	1.00	
SUS 410		0.15	11.50	Bal.					1.00	1.00	
SUS 410J		0.08	11.50	Bal.					0.30	0.60	1.00
SUS 416		-0.18	-14.00	Bal.					-0.60		
SUS 420J1		0.16	12.00	Bal.					1.00	1.25	
SUS 420J2		-0.25	-14.00	Bal.					1.00	1.00	
SUS 431		0.20	15.00	1.25	Bal.				1.00	1.00	
SUS 440A		0.60	16.00	Bal.					1.00	1.00	
SUS 440C		0.75	16.00	Bal.					1.00	1.00	
SUS 440C		-0.85	-18.00	Bal.					1.00	1.00	
SUS 440F		0.95	16.00	Bal.					1.00	1.00	
SUS 440F		-1.20	-18.00	Bal.					1.00	1.25	
Precipitation hardening stainless steel											
SUS 630	0.07	15.50	3.00	Bal.					1.00	1.00	
SUS 631	0.08	16.00	6.50	Bal.					1.00	1.00	0.75
		-18.00	-7.75						-1.50		
Martensite Alloy											
SMA 1	0.40	7.50		Bal.			3.00	0.60			
SMA 3	-0.50	9.50		Bal.				-3.50			
SMA 4	0.35	10.00		Bal.			0.70	1.80	0.30		
SMA 600	-0.45	-12.00		Bal.			-1.30	-2.50			
SMA 616	0.75	15.00	1.15	Bal.				1.75	0.20		
	-0.85	-20.50	-1.65					-2.25	-0.60		
	0.15	10.00		Bal.			0.50	0.50			
	-0.20	-13.00					-0.50	1.00			
	0.20	11.00	0.50	Bal.			0.75	0.50	0.50		
	-0.25	-13.00	-1.00				-1.25	-1.00			

V 0.10-C 4.0 N 0.05-S 0.10
Nb-Ta 0.20-0.30
V 0.20-0.30

Table 2.3 Chemical composition of austenite steel (1/2)

ALLOY (COMPANY)	C	Cr	Ni	Fe	Co	Mo	Si	Mn	Al	Ti	Other
Austenite stainless steel											
SUS 201	0.15>	16.00	3.50	Bal.			1.00>	5.50			N<0.25
		-18.00-5.50									
SUS 202	0.15>	17.00	4.00	Bal.			1.00>	7.50			N<0.25
		-19.00-6.00									
SUS 301	0.15>	16.00	6.00	Bal.			1.00>	2.00>			
		-18.00-8.00									
SUS 302	0.15>	17.00	8.00	Bal.			1.00>	2.00>			
		-19.00-10.00									
SUS 303	0.15>	17.00	8.00	Bal.			1.00>	2.00>			
		-19.00-10.00									
SUS 303 Se	0.15>	17.00	8.00	Bal.			1.00>	2.00>			
		-19.00-10.00									
SUS 304	0.03>	18.00	8.00	Bal.			1.00>	2.00>			
		-20.00-10.50									
SUS 304 L	0.030>	18.00	9.00	Bal.			1.00>	2.00>			
		-20.00-13.00									
SUS 305	0.12>	17.00	10.50	Bal.			1.00>	2.00>			
		-19.00-13.00									
SUS 305J1	0.03>	16.50	11.00	Bal.			1.00>	2.00>			
		-19.00-13.50									
SUS 308	0.03>	19.00	21.00	Bal.			1.00>	2.00>			
		-21.00-12.00									
SUS 309 S	0.03>	22.00	12.00	Bal.			1.00>	2.00>			
		-24.00-15.00									
SUS 310 S	0.03>	24.00	19.00	Bal.			1.00>	2.00>			
		-26.00-22.00									
SUS 316	0.03>	16.00	10.00	Bal.			2.00	1.00>	2.00>		
ASTI 316	0.03	17.0	12.0	Bal.			2.5	1.0>			
		-18.00-14.00					-3.00				
SUS 316 L	0.030>	16.00	12.00	Bal.			2.00	1.00>	2.00>		
		-18.00-15.00					-3.00				
SUS 316 J1	0.03>	17.00	10.00	Bal.			1.20	1.00>	2.00>		
		-19.00-14.00					2.75				
SUS 316 J1L	0.030>	17.00	12.00	Bal.			1.20	1.00>	2.00>		
		-19.00-16.00					-2.75				
SUS 317	0.03>	18.00	11.00	Bal.			3.00	1.00>	2.00>		
		-20.00-15.00					-4.00				
SUS 317 L	0.030>	18.00	11.00	Bal.			3.00	1.00>	2.00>		
		-20.00-15.00					-4.00				
SUS 321	0.03>	17.00	9.00	Bal.			1.00>	2.00>			
		-19.00-13.00									
SUS 347	0.03>	17.00	9.00	Bal.			1.00>	2.00>			Ti>5%
		-19.00-13.00									
SUS 384	0.03>	15.00	17.00	Bal.			1.00>	2.00>			Nb+Ta>10-C%
		-17.00-19.00									
SUS 395	0.03>	11.50	14.00	Bal.			1.00>	2.00>			
		-13.50-16.00									

Table 2.3 Chemical composition of austenite steel (2/2)

Austenite & Ferrite							
SUS 329 J1	0.08 > 23.00	3.00	Bal.	1.00	1.00 > 1.50 >		
	-28.00 - 6.00			-3.00			
Precipitation hardening stainless steel							
Stainless W 17-4PH (Armco Steel)	0.07	17	7	Bal.	0.2	0.7	Nb 0.3 Cu 4
	0.04	17	4	Bal.			
AM 350	0.08	17	4	Bal.	2.8		
17-7PH (Armco Steel)	0.07	17	7	Bal.	1.2		
15-Mo	0.07	15	7	Bal.	2.5		
					1.2		

Table 2.4 Chemical composition of iron base alloy

ALLOY (COMPANY)	C	Cr	Ni	Fe	Co	Mo	Si	Mn	Al	Ti	Other
SUH 31	0.35	14.00	13.00	Bal.			1.50	0.60			W 2.00-3.00
	-0.45	16.00	-15.00				-2.50				
	0.20	22.00	12.00	Bal.			1.00	> 2.00			
			-24.00-15.00								
SUH 310	0.25	24.00	19.00	Bal.			1.50	> 2.00			
			-26.00-22.00								
SUH 330	0.15	14.00	33.00	Bal.			1.50	> 2.00			
			-17.00-37.00								
SUH 661	0.08	20.00	19.00	Bal.			18.50	2.50	1.00		
	-0.16	-22.50-21.50					-21.00	-3.50	-2.00	0.35	
19-9 DL	0.30	19.0	9.0	Bal.			1.25				
Gamma Cb	0.40	15.0	25.0	Bal.			4.0				
Timken 16-25-6	0.10	16.0	25.0	Bal.			6.0				
Timken 16-15-6	0.07	16.0	15.0	Bal.			6.0				
Dissaloy 24 (AISI632) (Westinghouse)	0.05	13.5	23.0	Bal.			3.0				
A 235 A (AISI630) (Allegheny Ludlum)	0.05	15.0	26.0	Bal.			1.3	0.50	1.35	0.2	2.0
Incoloy 800H (INCO)	0.07	21.0	32.5	Bal.			0.5	0.75	0.38	0.38	
Incoloy 802 (INCO)	0.35	21.0	32.5	Bal.			0.4	0.6	0.75		
Incoloy T (INCO)	0.04	20.0	33.0	Bal.						1.0	
Incoloy 901 (INCO)	0.05	12.8	43.0	Bal.			5.8			2.5	
ALLOY IN-519 (Casting) Manaurite 35X (Casting)	0.3	24.0	24.0	Bal.			1.0	0.75			
SUH 446	0.4	25.0	33.0	Bal.				1.5			
	0.20	> 23.00	Bal.				1.00	> 1.50			
NCF 2 P	0.10	19.00	30.00	Bal.							
H.R. CrownMax N-155 (Multimet, AISI631)	0.20	23.0	12.0	Bal.							
	0.40	20.0	20.0	Bal.			20.0	3.0			
Union Carbide	0.15	20.0	20.0	Bal.			20.0	3.0			
LCN-155	0.40	20.0	22.0	Bal.			20.0	4.0			
S 500	0.20	17.0	18.0	Bal.			7.0	3.0			
Rex 337	0.40	13.0	13.0	Bal.			10.0	2.0			
G 18 B	0.12	17.5	11.0	Bal.							
FCB(T)	0.65	18.0	14.0	Bal.			0.2	2.2			
K-423											Nb 2.0 Nb-Ta

Table 2.5 Chemical composition of nickel base alloy (1/2)

ALLOY (COMPANY)	C	Cr	Ni	Fe	Co	Mo	Si	Mn	Al	Ti	Other
Hastelloy S (Haynes Stellite)	0.02	16.0	Bal.	1.0	14.5					0.2	B 0.02 La 0.02
Hastelloy X (Haynes Stellite)	0.1	22.0	Bal.	19.0	1.5	9.0				0.2	
Alloy IN 586 (INCO)	0.05	25.0	Bal.			10.0					Ce 0.03
Inconel 617 (INCO)	0.07	22.0	Bal.		12.5	9.0			1.0	0.35	
Inconel 625 (INCO)	0.05	22.0	Bal.	5 >	1.0 > 9.0	0.3	0.15	0.4 > 0.4 >			Cu 0.5
Nimonic 80A (INCO Moud(H.Wiggin))	0.10	19.5	Bal.	5.0			1.0	1.0	0.4		
IN-713 LC	0.05	12.0	Bal.	0.5	4.5	0.5	0.25	5.9	0.6	Zr 0.1 Cu 0.5	
Inconel 601	0.05	23.0	Bal.	14.0			1.0	0.75	1.35	Cu 1.0 Max	
G-X 33 CrNiNb 24 24	0.30	24.0	Bal.	24.0			1.5	1.5		ND 1.5	
G-X 40 NiCrNb 35 25	0.40	25.0	Bal.	35.0			1.5	1.5		ND 1.0	
Wst. Nr. 1.4931	0.08	16.5	16.5	Bal.			0.45	1.5		ND 1.2	
Refractory 26	0.05	18.0	Bal.	18.0	20.0	0.3			0.2	2.8	
(Westinghouse)											Zr 0.04 B 0.003
Nimonic PE 15 (INCO Moud(H.Wiggin))	0.05	16.5	Bal.	34.4		3.2			1.2	1.2	
TD Nicr Na 754	20	78									Tr02 2
Nimonic 80 (INCO Moud(H.Wiggin))	0.13 >	18.0	Bal.		15.0				0.3	0.6	Y203 0.6
Nimonic 85 (INCO Moud(H.Wiggin))	0.08	20.0	Bal.	2.0 >	16.0	-21.0			0.8	1.8	
Nimonic 100 (INCO Moud(H.Wiggin))	0.3 >	11.0	Bal.	2.0 >	20.0	5.0			1.0	2.7	
N 252	0.15	19.0	Bal.	2.0	10.0				1.75	3.0	
Udimet 500	0.15	17.5	Bal.	4.0 >	16.5	4.0			5.0	1.5	
Udimet 700	0.15	17.0	Bal.	18.0	5.0				4.25	3.5	
Inconel X (INCO)	0.05	15.0	Bal.	7.0					0.7	2.5	
Inconel X5Cr (INCO)	0.04	15.0	Bal.	7.0					0.9	2.4	
Inconel 700 (INCO)	0.10	15.0	Bal.	0.5	28.0	3.0			3.0	2.0	
Inconel 739 (INCO)	0.07	15.5	Bal.	0.5					2.7	1.7	
Hastelloy R-225 (Haynes Stellite)	0.15	15.5	Bal.		2.5	5.3			2.0	2.5	
Waspalloy	0.05	19.0	Bal.		11.5	3.0			1.2	2.5	
GXR 235	0.15	15.5	Bal.		4.5				3.0	2.0	
Guy Alloy	0.10	13.0	Bal.			6.0			6.0	1.0	
E-900(Casting)	0.10	8.0	64		10.0	0.0	0.25 >		5.5	4.7	
IN 100(Casting)	0.13	10.0	60		15.0	3.0			9.0	4.5	
IN-782(Casting)	0.12	12.4	61								W 3.8 B 0.020 Zr 0.10 Ta 3.9

Table 2.5 Chemical composition of nickel base alloy (2/2)

ALLOY (COMPANY)	C	Cr	Ni	Fe	Co	Mo	Si	Mn	Al	Ti	Other
Inconel 600	0.04	15.8	76.6	7.2			0.25	0.20			
Inconel 700	0.12	15.0	46.0	0.7	28.5	3.75	0.30	0.1	3.0	2.2	B 0.012 Zr 0.10 Nb 2.0
Inconel 713 C (Casting)	0.12	12.5	72.0	2.5	4.2	c.30	0.25	6.1	0.8		Nb-Ta 5.0
Inconel 718	0.04	18.6	53.0	18.5	3.1	0.18	0.20	0.4	0.9		Nb-Ta 0.9
Inconel X 750	0.04	15.3	73.0	6.8	0.25	0.70	0.8	2.5			W 10.0 B 0.015
MAR-M 24Sa	0.15	9.0	59.8	10.0	2.5		5.5	1.5			Zr 0.05 Ta 1.5
Rene 41	0.09	19.0	55.3		11.0	10.0		1.5	3.1		B 0.005
Udimet 520	0.05	19.0	55.9		12.0	6.0		2.0	3.0		B 0.005
Udimet 710	0.07	18.0	54.9		15.0	3.0		2.5	5.0		B 0.020
NCF 1P	0.15	14.0	72.00-6.00		0.50	> 1.00					P<0.030 Si<0.015
		-17.00			-10.00						

Table 2.6 Chemical composition of cobalt base alloy

ALLOY (COMPANY)	C	Cr	Ni	Fe	Co	Mo	Si	Mn	Al	Ti	Other
Haynes alloy HS 21 (Vitallium)	0.25	28.0	3.0	2.0	Bal.	6.0					
HS 23 (61)	0.40	24.0	15.0 ^a	Bal.							
HS 25	0.10	25.0	10.0	2.0	Bal.						
HS 605 ^b											
HS 30 (422-19)	0.40	25.0	16.0	6.5	Bal.	6.0					
ES 31 (X-40)	0.50	25.0	10.0	1.0	Bal.						
Haynes alloy HE 1049 X-50	0.40	26.0	10.0	Bal.							
S 816	0.08	23.0	20.0	3.0	Bal.						
S 816-B	0.40	20.0	20.0	Bal.							
J 1570	0.20	20.0	23.0	2.0	Bal.						
J 1654	0.20	19.0	27.0	Bal.							
FSX-414 (Casting)	0.25	23.0	10.0	1.0	32.0						
MAR-M 322 (Casting)	0.85	21.5			53.0						
MAR-M 322 (Casting)	1.00	21.5			61.0						
MAR-M 509 (Casting)	0.60	23.5	10.0		55.0						
S-816 b	0.33	20.0	20.0	4.0	42	4.0	0.40	1.2			
(Allegheny Ludlum) WI-52 (Casting)	0.45	21.0		2.0	63.0		0.50 ^c	0.25			
X-40 (Casting)	0.50	25.5	10.5		54		0.50	0.75			
X-45 (Casting)	0.25	25.5	10.5		54		0.50	0.75			

Table 2.7 Chemical composition of chromium base alloy

ALLOY (COMPANY)	C	Cr	Ni	Fe	Co	Mo	Si	Mn	Al	Ti	Other
CM 469	60		15			25					
CM 554	60		25			15					
CMT	53		15			25					
									2		

Table 2.8 Chemical composition of molybdenum base alloy

ALLOY (COMPANY)	C	Cr	Ni	Fe	Co	Mo	Si	Mn	Al	Ti	Other
TZM	0.015					Bal.					0.05

2.4 耐熱金属材料の強度

圧力容器の強度設計に際しては、その使用条件に応じて過度時の弾性変形、過度時の塑性変形、せい性破壊、クリープ変形、弾性及び塑性座屈、疲れ、応力腐食、腐食疲れの可能性を検討してそれぞれに対する策を講じる必要がある。ASME のボイラコード Sec.I や圧力容器規格 Sec.VIII Div. 1 では最大主応力説を取り単純な計算で求められる応力の許容値として許容応力を定めている。ASME の場合、この許容応力を 342 °C 以下では引張り強さの 1/4 とし、342 °C 以上では 1000 時間に 0.01 % 伸びを生じる応力を採っている。日本の規格は ASME に従ったものであるが各國のコードはそれぞれ異なった規定となっており、Table 2.9 に示す。

また圧力容器の設計基準には主応力説ではなく、最大せん断応力説を探るものである。ASME では Sec. III 及び Sec. VIII Div. 2 がこれである。コードの内容の説明は省略し、許容応力の規準は次のとおりである。静荷重に関しては、一般に常温又は設計温度における引張り強さ (σ_u)、降伏強さ (σ_y)、並びに設計温度における 10 万時間クリープ・ラップチャ一強さ (σ_{cr}) 及び 10 万時間で 1 % のクリープひずみを生じる応力 (σ_{cl}) を基準とし、これから各強さをそれぞれ異なる係数で割った値のなかで最低のものを、許容応力あるいは許容応力強さとして定めている。

以上圧力容器の強度設計一般を説明したが、耐熱金属材料の強度を評価する場合には、主応力説、せん断応力説のいずれも、材料のクリープ強度が支配的要素となる。

本報では、Fig. 2.3 ~ Fig. 2.9 に各種耐熱金属材料の許容応力又はクリープ破断強さを示した。また、Fig. 2.10 ~ Fig. 2.12 にはニッケル基合金、コバルト基合金について 100 時間の破断強さを基準とし、使用限界温度をバーチャートによって示した。また Fig. 2.13 は 10000 時間の破断強さを基準に超合金の使用限界温度を示した。

Table 2.9 Pressure vessel calculation expressions
for various codes

コード	原形式	標準記号に書き直した式	備考(矢印は→書き直しを示す)
ASME	$t = \frac{PR}{SE - 0.6P}$	$t = \frac{pD}{200\sigma\eta - 1.2P}$	$S \rightarrow \sigma = \frac{1}{4}\sigma_B$ (342 °C以下) 342 °C以上では1000時間に0.01%伸びを生じる応力を採る。 $E = \eta = 0.95$ または 0.90 腐れしろは必要に応じて採る。
BS 1500	$t = \frac{P_w D_i}{2f_w J - P_w} + C$	$t = \frac{pD}{200\sigma\eta - p} + \alpha$	$f_w \rightarrow \sigma = \frac{1}{4}\sigma_B$ (342 °C以下) 342 °C以上では高温引張り強さの1/4を採る。 $J \rightarrow \eta = 0.95$ 以下 0.85 以下 0.70 以下 腐れしろ $\alpha = 1.6$
DDA	$S = \frac{pD_i}{200 \frac{K}{S} v - p} + C$	$t = \frac{pD}{200\sigma\eta - p} + \alpha$	$K \rightarrow \sigma = \frac{\text{高温降伏点}}{1.5}$ $v \rightarrow \eta = 0.8$ 以下 但し条件によっては1.0まで採れる。 腐れしろ α は必要に応じて採る。
フランス	$e = \frac{pD_i}{200R\alpha} + C$	$t = \frac{pD}{200\sigma\eta} + \alpha$	$R \rightarrow \sigma = \frac{1}{4}\sigma_B$ (320 °C以下) 320 °C以上では高温引張強さの1/4を採る。 $\alpha \rightarrow \eta = 0.9 \sim 0.4$ 腐れしろ $\alpha = 1.5 \sim 2.0$
スエーデン	$S_{min} = \frac{pD}{200 \frac{\sigma_{ber}}{S_F} Z} + C$	$t = \frac{pD}{200\sigma\eta}$	$\frac{\sigma_{ber}}{S_F} \rightarrow \sigma = \frac{\text{高温降伏点}}{1.5}$ $Z \rightarrow \eta = 0.9 \sim 0.6$ 腐れしろは必要に応じて採る。

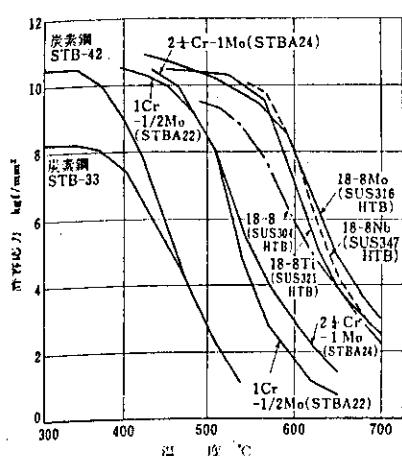


Fig. 2.3 Allowable stress of boiler tube.³⁾

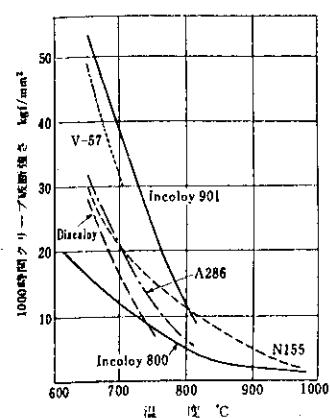


Fig. 2.4 1000 h stress rupture strength of iron-base alloys.³⁾

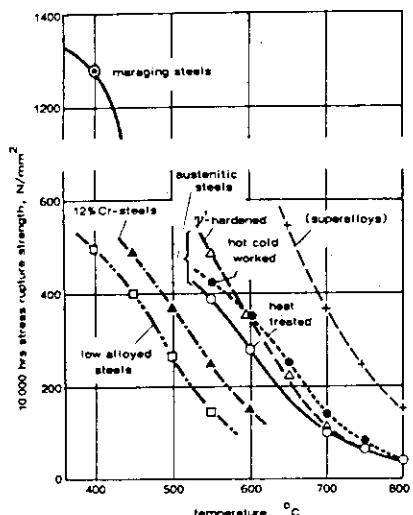


Fig. 2.5 10000 h stress rupture strength of iron-based alloys.⁴⁾

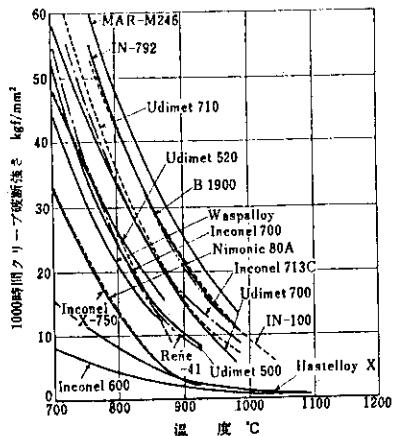


Fig. 2.6 1000 h stress rupture strength of Nickel-base alloys.³⁾

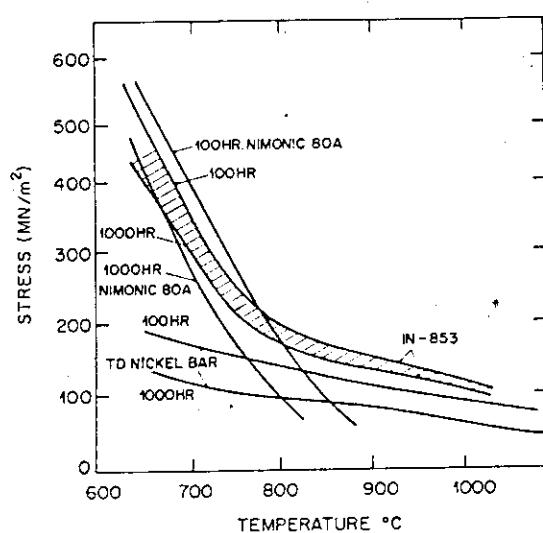


Fig. 2.7 100 and 1000 h rupture strength vs. temperature for Nimonic 80A, TD-Nickel and IN-853.⁵⁾

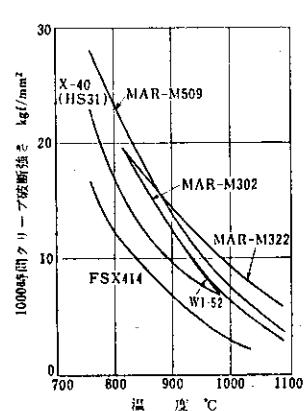


Fig. 2.8 1000 h stress rupture strength of cobalt-base alloys.³⁾

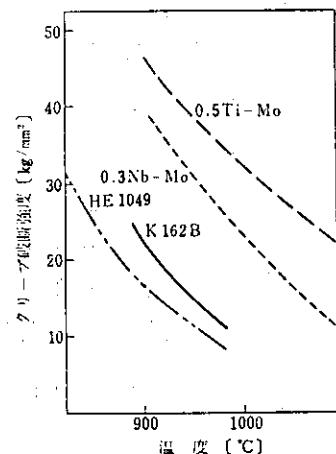


Fig. 2.9 Creep rupture strength of Molybdenum-base alloys.⁶⁾

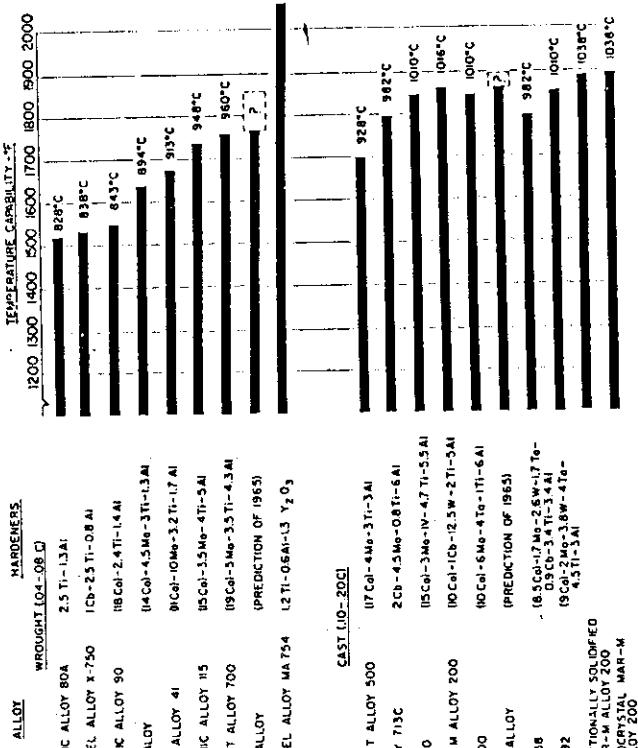


Fig. 2.10 High-temperature nickel-based alloys. 7)

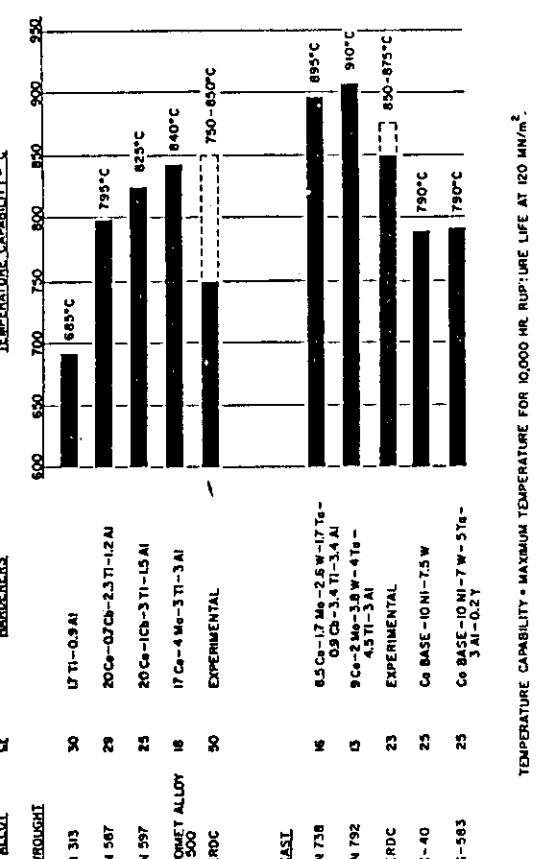


Fig. 2.11 Intermediate-temperature nickel-based alloys. 7)

TEMPERATURE CAPABILITY • MAXIMUM TEMPERATURE FOR 100-HR. RUP:URE LIFE AT 344 MN/m²

Fig. 2.11 Intermediate-temperature nickel-based alloys. 7)

TEMPERATURE CAPABILITY • MAXIMUM TEMPERATURE FOR 100-HR. RUP:URE LIFE AT 138 MN/m²

Fig. 2.13 Superalloys with superior corrosion resistance. 7)

TEMPERATURE CAPABILITY • MAXIMUM TEMPERATURE FOR 10,000 HR. RUP:URE LIFE AT 120 MN/m²

Fig. 2.13 Superalloys with superior corrosion resistance. 7)

3. セラミックス

前章までは金属材料の性質を調べたが、現在の最高の高温強度を持つニッケル基合金でもその使用限界温度は約1000℃程度である。そこでこれ以上の温度域まで拡大して耐熱材料を検討する際には、当然非金属材料のセラミックス材料に的が絞られてくる。

本章以後は、セラミックスについてその製造法、機械的性質の検討を行う。

3.1 セラミックス一般

セラミックスとは、一般に非金属の無機固体材料の総称である。金属の酸化物、炭化物（炭素自身を含む）、窒化物、ほう化物、ハロゲン化物などがこの分類に入る。

原子間の結合方式からみると、セラミックスはイオン結合性を有するものがほとんどである。一方金属は金属結合であり、電気と熱をよく伝えるのは金属での共有結合が飽和していないので、電子がその結合から離れて動けるからである。また切断、塑性、じん性などの金属の機械的性質は、金属結合に方向性がなく、金属では結合を切らずに原子が他の原子の上を滑って動くことができるということによる。

これに対してイオン結合は、電気的に正の原子から負の原子に電子が移って正負のイオンが作られ、その間の静電的な引力によって生じるものである。従って金属のような延性ではなく、高温の焼成により微粒子間に結合を起こさせた焼結体（セラミックス）は、成形加工は不可能であり、焼成前に行わなければならない。

工業的に見ればこのことが、金属材料に対して最も不利な点であり、セラミックスを機械構造材料に使用する場合にはこの成形、焼成の技術開発は避けて通れない課題である。

3.2 セラミックスの強度

(1) 強度のはらつき

セラミックスを構造材料に用いる場合、構造保持機能だけあれば良いというものは少なく、他の機能を利用する際に副次的な要素として構造保持機能が要求される場合が多い。一般に機械構造材料に要求される機能としては、高温における強度、耐酸化性、耐熱衝撃性、熱伝導性（断熱材として用いる場合は低いことが要求されるが、伝熱管に使用するときは逆になる）、耐摩耗性、耐食性、じん性等がある。しかし、これらの中でも実用化、金属材料への置換という意味から最も重要な要素は、強度であり、特にその信頼性が最大の関心事である。セラミックスはもともとぜい性材料であるため、強度に対する信頼性が低く、このことが実用化を阻んで来た。

セラミックスの強度のはらつきの取り扱いには、統計的手法が必要であり、そのモデルとしては、ワイブル分布（3.1式）が広く用いられている。

$$P = 1 - \exp \left[- \left\{ \left(\frac{\sigma_R}{\mu} \right) \Gamma \left(\frac{m+1}{m} \right)^m \right\} \right] \quad (3.1)$$

σ_R : 最大応力

μ : 平均強度

$\Gamma(x)$: ガンマ関数

m : ワイブル係数

ワイブル分布は信頼性の問題に関して、機械や部品の寿命の分布にしばしば用いられる。その理由は、このような機械や部品が、非常に多くの独立な部分から成り、その1つの部分が破壊すれば全体が故障、破壊すると考えられる場合、全体の寿命は、個々の部品の寿命の最小値に一致すると想定されるからである。

式中 m がワイブル係数で、大きい程強度のバラツキが小さいので安全係数を小さくすることができ、従って強度の低い材料でも使用できることになる。Fig. 3.1⁸⁾にホットプレス及び常圧焼結の Si_3N_4 の抗折強度ワイブル分布を示す。ホットプレスによる Si_3N_4 は常圧焼結に比べ強度及びワイブル係数が大で信頼性の高いセラミックスであることが分かる。

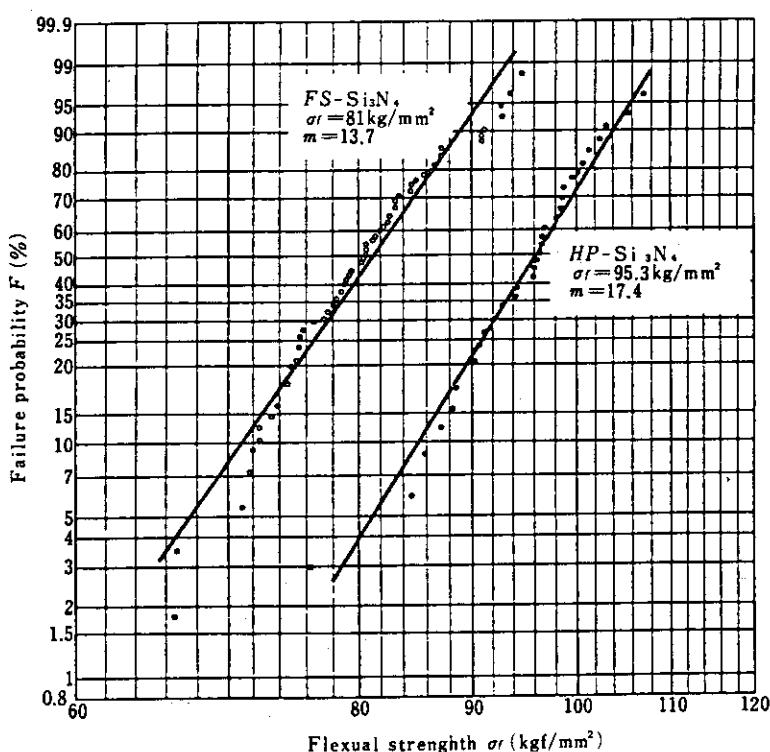


Fig. 3.1 Waile distribution of Si_3N_4 flexual strength.⁸⁾

(2) 高温強度

金属材料に比べてセラミックスは、機械構造材料としては寸法精度、加工等に不利な点が多いが、高温強度については、融点も高くてはるかに優れている。Fig. 3.2⁹⁾ に SiC と Si_3N_4 の曲げ強度 - 温度特性を示した。金属では、温度が高くなると徐々に強度が低下するが、セラミックスは図に示すように 1000 °C 程度まで強度低下ではなく、それ以上の高温になると急激に低下する。これはセラミックス中に焼結助剤を主成分とするガラス相が粒界に存在し、それが高温で軟化してくるためであると説明されている。それでも SiC, Si_3N_4 などは超耐熱合金に比べて、はるかに高い高温強度を有する。セラミックスと耐熱合金の高温強度を並べて Fig. 3.3¹⁰⁾ に示す。

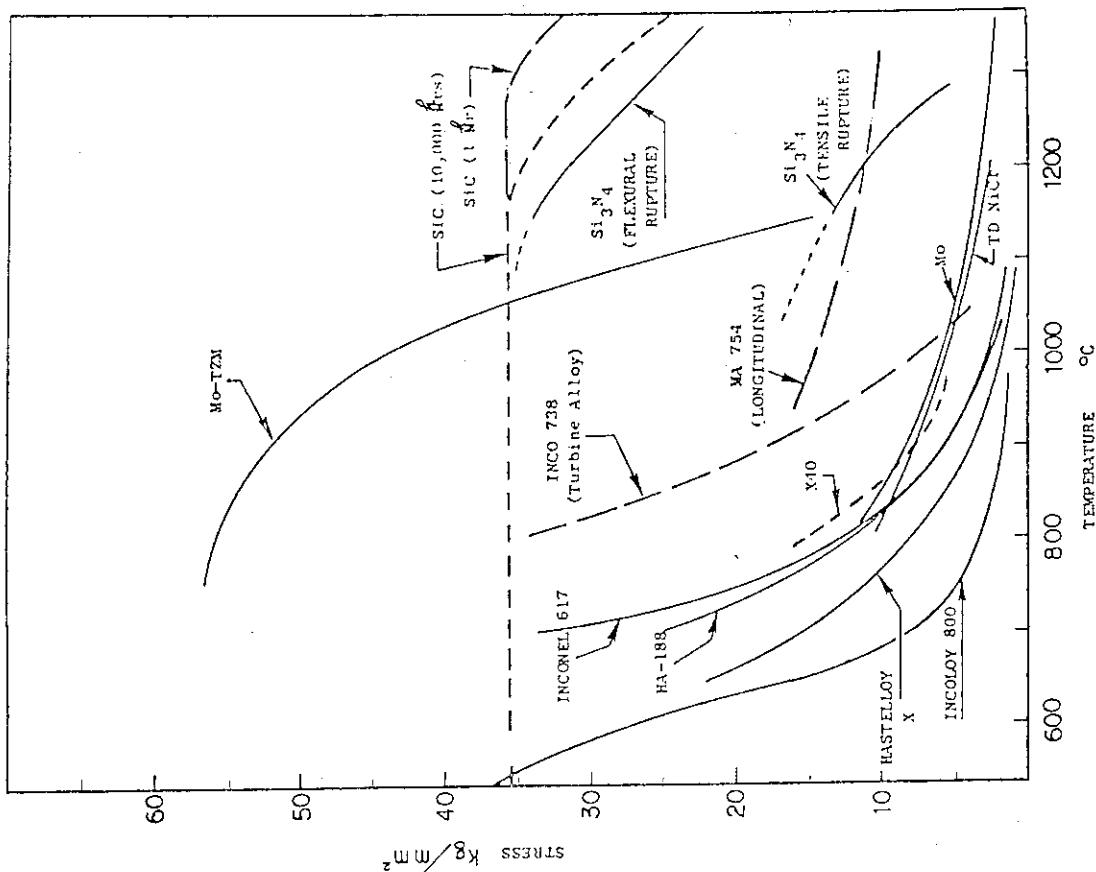


Fig. 3.3 Strengths of typical potential heat exchanger materials (1000 h rupture strengths are shown except where indicated).

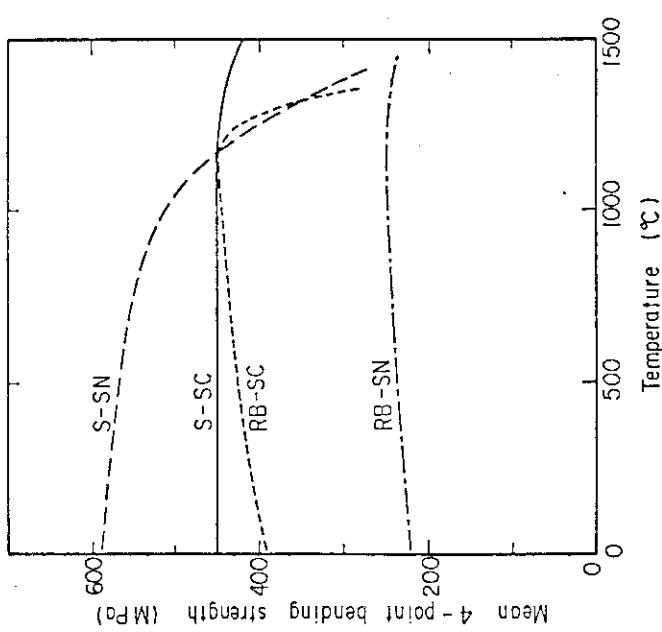


Fig. 3.2 Fracture strength for various temperature
 S-SC : Self bonded silicon carbide
 S-SN : Self bonded silicon nitride
 RB-SC : Reaction bonded silicon carbide
 RB-SN : Reaction bonded silicon nitride

3.3 セラミックスの製造プロセス

セラミックスの製造は原料の調合に始まり、成形、焼成の段階を通り製品となる。この一連の工程は製品及びセラミックスの種類により、それぞれの条件から製造法が異なり、それに従って製品の品質性能はこの各工程の処理によって大きく異なってくる。ミックスの強度を上げるには、焼結体の気孔率を減少させることが重要なポイントであり、製造操作もこれに的が絞られることになる。

Fig. 3.4 にセラミックスの射出成形の場合の製造工程を示す。以下に各工程の要点を示す。

- ・原料は有機材料と混練する。有機材料は結合剤、可塑剤、滑剤、助剤の働きをするもので、添加量については理論的に決める計算式がない。従って、事前にサンプル試験を行い、混練しながら粘性を測定し、添加量のデータを取っておかなければならぬ。
- ・次に図に示すような各方法により成形材料にする。
- ・次は射出成形機 (Fig. 3.5 に射出成形ユニットの例を示す) にて成形体を造る。
- ・焼成に入る前に、脱脂工程により、始めに加えた有機材料を分解揮発させる。
- ・最後に焼成して製品セラミックスを得る。

最近のセラミックスタービンブレード等の開発で用いられているホットプレス法は、この最後の焼成工程で、加圧しながら焼成する方法により緻密化を促進する手段として極めて優れた方法である。

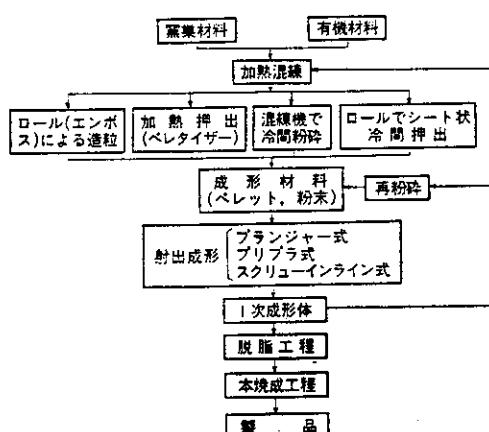


Fig. 3.4 Push-out forming process of ceramics.

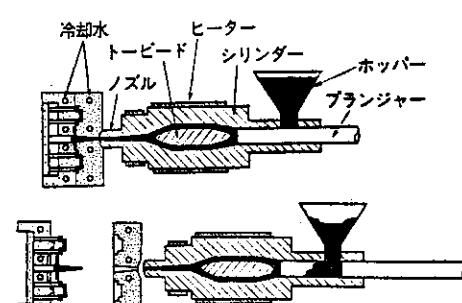


Fig. 3.5 Plunger type push-out forming unit.

3.4 セラミックス加工技術

金属材料と比べた場合セラミックスは加工が困難であるということが機械構造材料としての実用化を阻んでいる原因の一つになっている。

セラミックスが金属のように切削、溶接等が可能になれば、飛躍的に金属材料に置き換わることが予想される。ここでは、セラミックスの加工技術として有望なレーザ加工について説明する。

材料表面のレーザ照射を続ければ表面温度は材料の融点に達して表面の融解が始まる。融解が生じれば融解潜熱の吸収が始まり、液相と固相の境界面は材料内部へと移動していく。更に表面温度が上昇して材料の沸点に達すると、蒸発気化が行われ、除去によるクレーターが表面に生じる。

それぞれのレーザに対して、出力密度とレーザ照射時間の組み合わせにより、実際にはいろいろの加工方法がある。Fig. 3.6¹¹⁾ にその区分を示すが、加工物の種類や性質、レーザビームの集束度あるいは波長などによって一義的に決められないことは言うまでもない。

出力密度が大き過ぎるときはには、熱的にイオン化された不透明な高温プラズマが発生して、レーザを吸収してしまうので加工はできない。それより出力密度の低いところ、すなわち 10^6 W/cm^2 以上のところでは表面温度は $1 \mu\text{s}$ オーダーの極く短い時間で蒸発温度に達し、レーザ照射が続いている間表面から気化蒸発が続き、穴あけや切断、あるいはトリミング、チューニング、バランミングなどの微少量除去が行われる。 10^5 W/cm^2 以下の出力密度では、表面温度が蒸発温度に達するまでに数 ms を要するので、それまでに表面下温度が容易に融解温度に達してしまう。従ってレーザ照射が終れば、ある溶け込み深さの溶接が行われることになる。また 10^4 W/cm^2 程度以下の出力密度では、表面からの蒸発や表面下での融解が生じないで、加工物内部への熱伝導による急冷によって各種の表面処理が行われる。

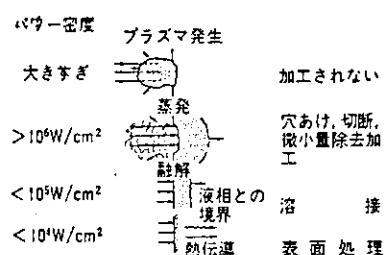


Fig. 3.6 Pattern of laser processing.¹¹⁾

4. セラミックス熱交換器の開発状況

4.1 伝熱性能（コンパクト性）

セラミックスはもともとが“焼き物”であるから、熱交換器を考える場合金属とは別の観点から設計を行う必要がある。セラミックスの一般的な特長を下記に示す。

- (1) 耐熱合金、金属に比べて、素材そのものは安価である。
- (2) 金属材料に比べて使用温度域が高い。
- (3) 高温でも材料強度が低下しない。
- (4) 加工が困難である。
- (5) 強度のばらつきが大である。
- (6) 大型構造物の製作が困難である。
- (7) 延性がないためもろく壊れやすい。
- (8) 組み立て、溶接が困難である。

セラミックスの熱交換器の実用化がなかなか進まないのは、Fig. 4.1¹²⁾ のコスト比較に示すとおり素材そのものは安価であるが、組み立て加工に有効な方法がないため全部の価格を総計すると金属材料のほうが有利であるからである。従って熱交換器のコンパクト化が必要となるわけで、Fig. 4.2¹⁾ にプレートフィン型熱交換器の場合のコンパクト性能を示す。コンパクトな熱交換器を製作するには当然のことながらフィンの数を多くし、またプレート間のギャップを小さくすることにより、単位容積当たりの伝熱面積を大きくしなければならない。

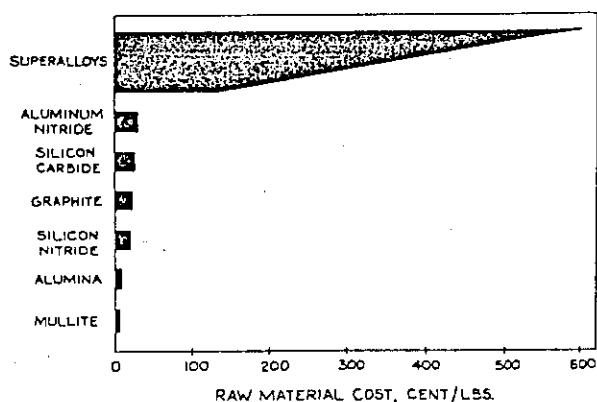


Fig. 4.1 Relative costs of various raw ceramics, after Farmer.¹²⁾

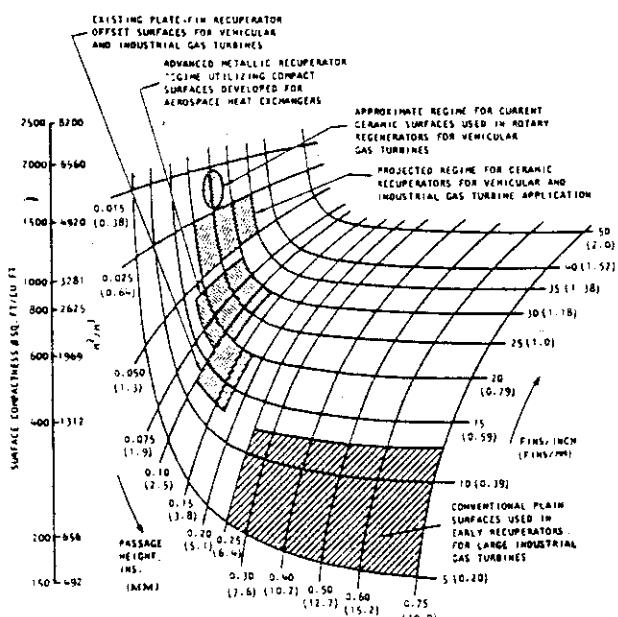


Fig. 4.2 Surface compactness spectrum for plate-fin heat exchangers.¹⁾

4.2 セラミックス熱交換器の開発例

各種の開発例を以下に示す。

- (1) Fig. 4.3¹²⁾, 4.4¹⁾はガスタービンに適用した蓄熱式熱交換器である。
 - (2) Fig. 4.5¹⁾はロータリ熱交換器の熱回收回転板である。詳細は不明である。
 - (3) Fig. 4.6¹⁾, 4.7¹⁾は米国の電力研究所 (Electric Power Research Institute) の開発例である。
 - タービン入口温度 982 °C
 - 伝熱管壁面温度 1093 °C
 - 伝熱管寸法 25.4^{OD} × 3.18th
 - 材質 NC-430 (シリコンカーバイト)
 - (4) Fig. 4.8¹⁾はNorton社製フィン付き管である。
 - フィンピッチ 0.2 fins/mm
 - (5) Fig. 4.9¹⁾, 4.10¹⁾はHagne International社製ストロット炉用熱交換器である。
 - ガス温度 1371 °C
 - フィン外径 95 mm
 - 材質 シリコンカーバイド
 - (6) Fig. 4.11¹³⁾は大倉エンジニアリング(株)製の加熱炉用復熱器である。
 - (7) Fig. 4.12¹⁴⁾～4.15¹⁴⁾はヒートパイプを利用したボイラ用空気加熱器の例である。
 - (8) Fig. 4.16¹⁵⁾, 4.17¹⁵⁾は高温ガス炉用復熱器の例である。
 - (9) Fig. 4.18¹⁵⁾, 4.19¹⁵⁾はガスタービン内組み込み型の復熱器の例である。製作は西独である。
 - (10) Fig. 4.20¹⁾はThermal Transfer Corporation社製のモジュラー型復熱器の例である。
- セラミックモジュールはG.T.E.Sylvania社製である。
- クロスフロー型式
 - 寸法 254 mm角
 - ガス温度 1482 °C
 - (11) Fig. 4.21¹⁾はクロスフローの板状フィン式熱交換器の例である。
 - (12) Fig. 4.22¹⁾, 4.23¹⁾はガスタービン用板状フィン式熱交換器の例である。詳細は不明である。
 - (13) Fig. 4.24¹⁾はシリコンカーバイドの管製品である。

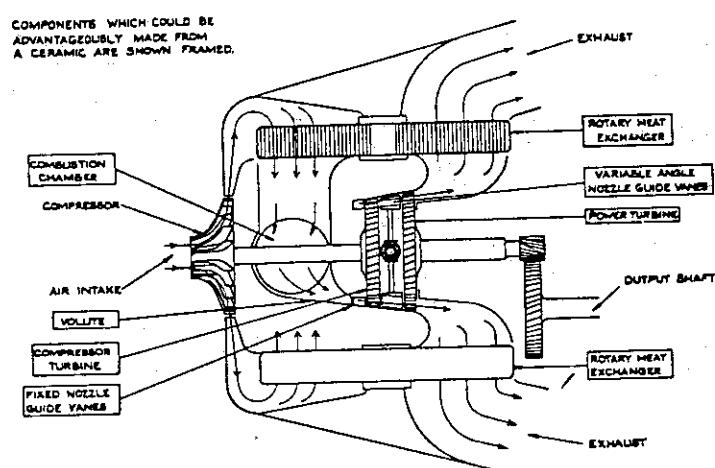


Fig. 4.3 Cross section of a turbine.

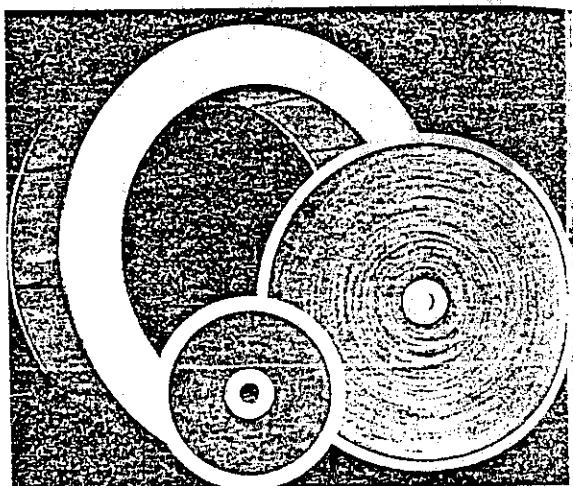


Fig. 4.4 Typical ceramic disk and drum cores for rotary regenerative heat exchangers.



Fig. 4.5 Ceramic heat recovery wheel.¹⁾

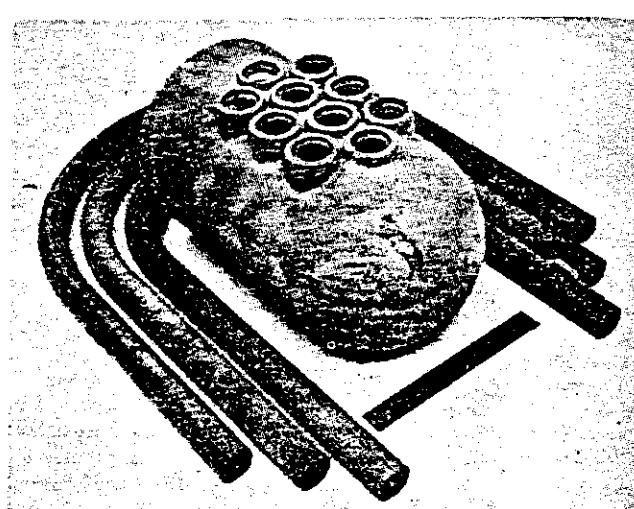


Fig. 4.6 Silicon carbide heat exchanger subheadering components.¹⁾

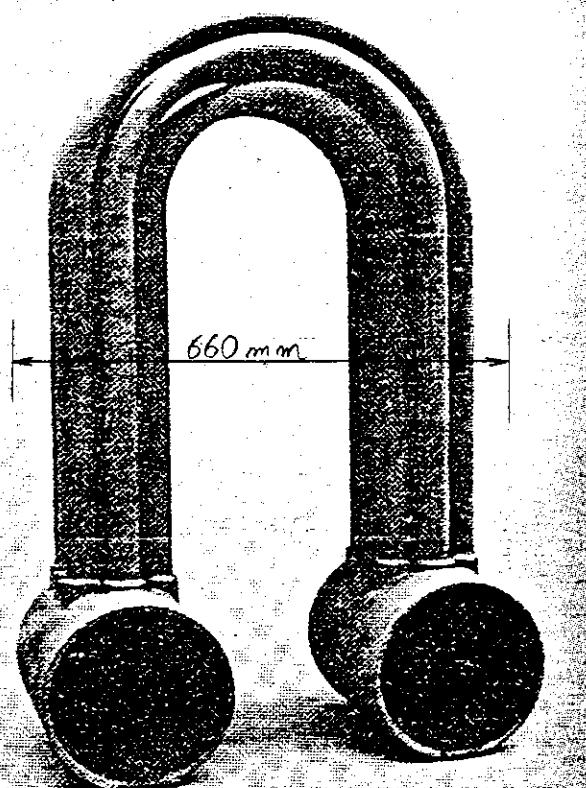


Fig. 4.7 Manifolding of silicon carbide heat exchanger for coal-fired closed-cycle gas turbine application.¹⁾

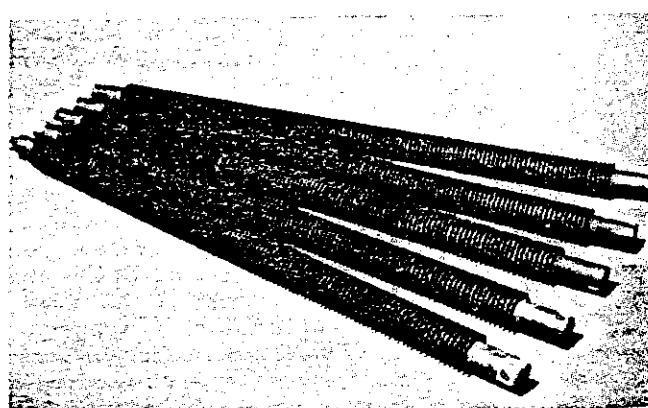


Fig. 4.8 Finned surface geometry for gas-to-gas silicon carbide tubular heat exchanger.¹⁾

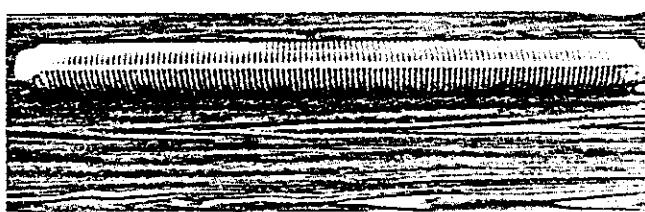


Fig. 4.10 Silicon carbide tube with internal and external extended surfaces for high-temperature gas-to-gas heat recovery.¹⁾

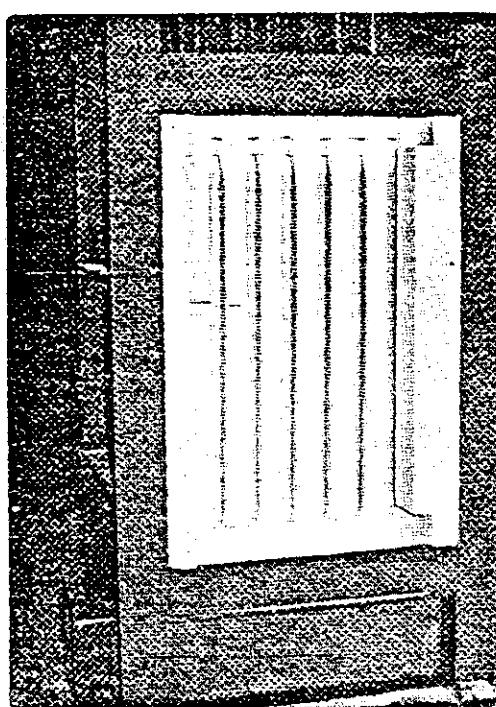


Fig. 4.9 Tubular ceramic heat exchanger embodying secondary surfaces for high-temperature furnace gas heat recovery.¹⁾

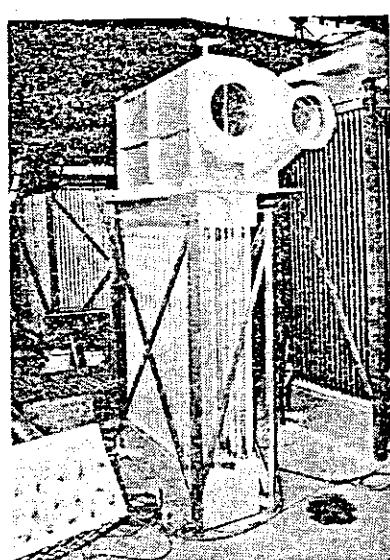


Fig. 4.11 Recuperator for
furnace.¹³⁾

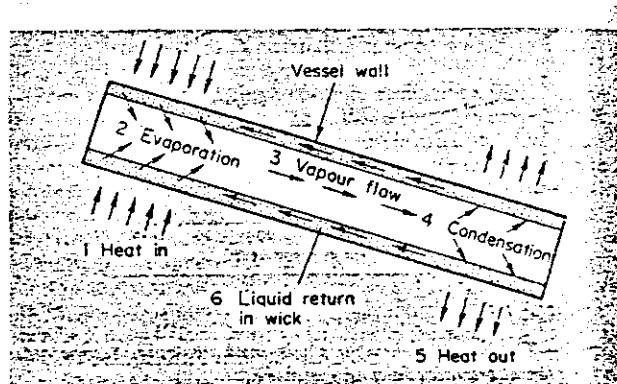


Fig. 4.12 Heat pipe.¹⁴⁾

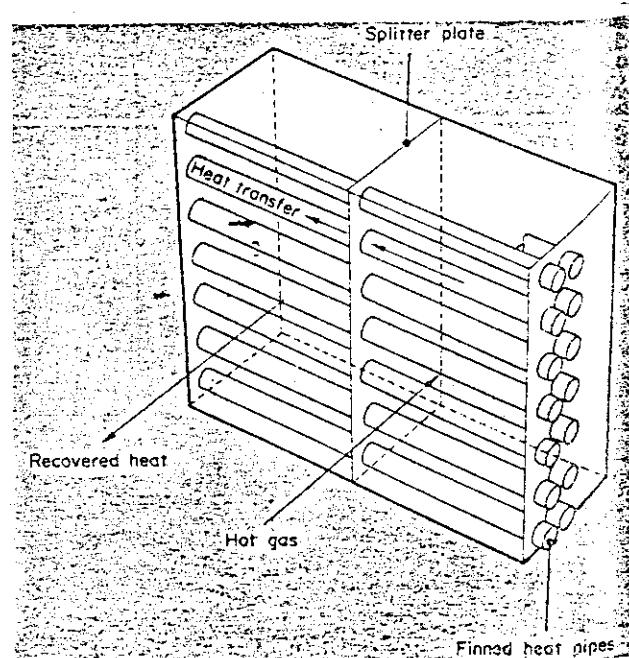


Fig. 4.13 Layout of heat-pipe heat exchanger.¹⁴⁾

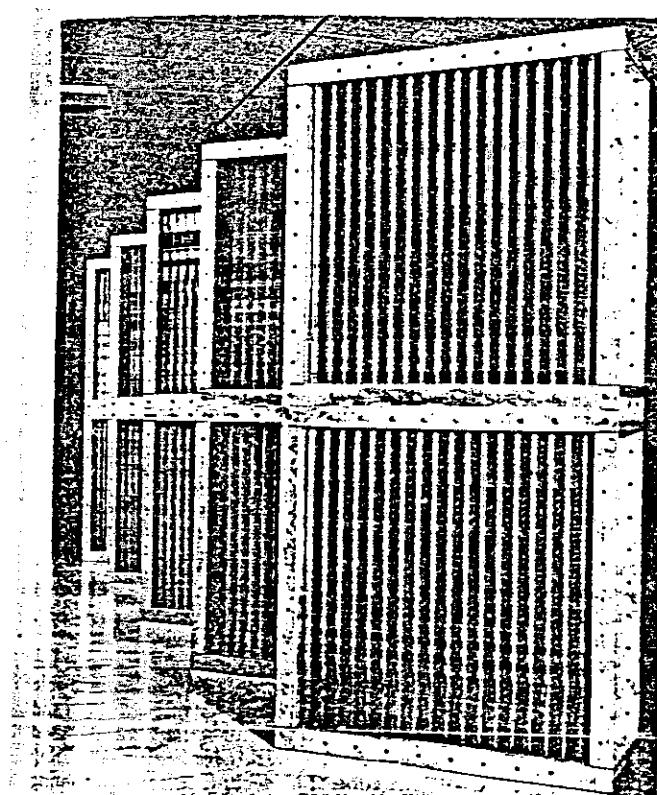


Fig. 4.14 Heat-pipe heat exchangers manufactured in the UK (reproduced by permission of Isoterix Ltd).¹⁴⁾

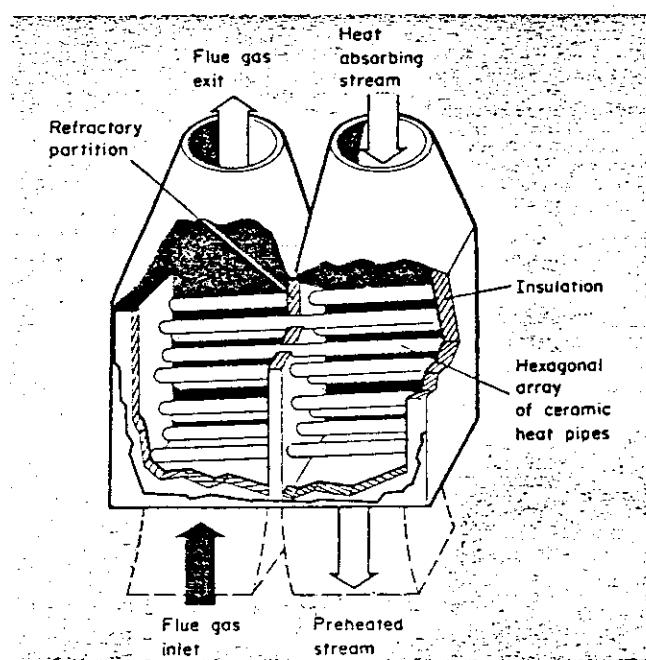


Fig. 4.15 Concept of ceramic heat-pipe heat exchanger.¹⁴⁾

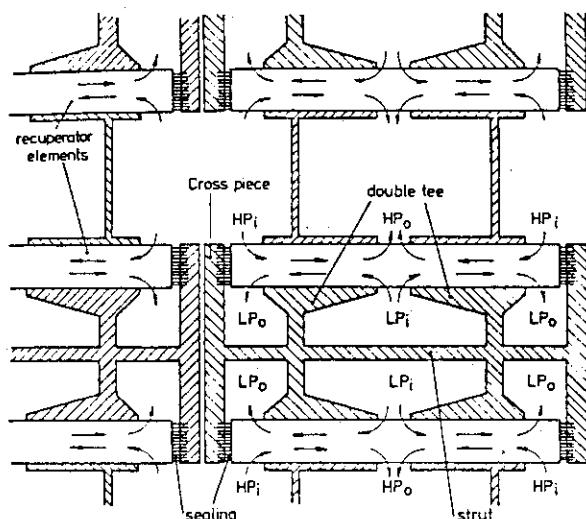
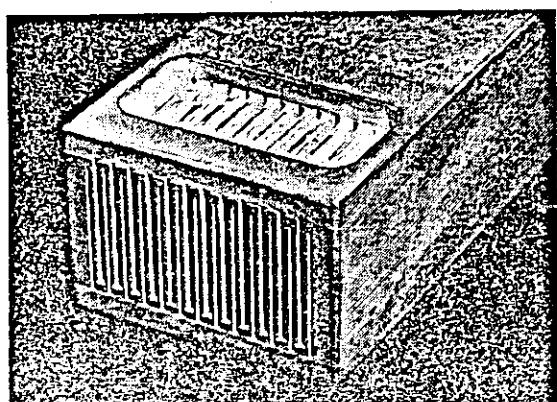


Fig. 4.16 Supporting structure for a V-module (rigid structure on the LP-side).¹⁵⁾



Enlarged front part with still open flow channels

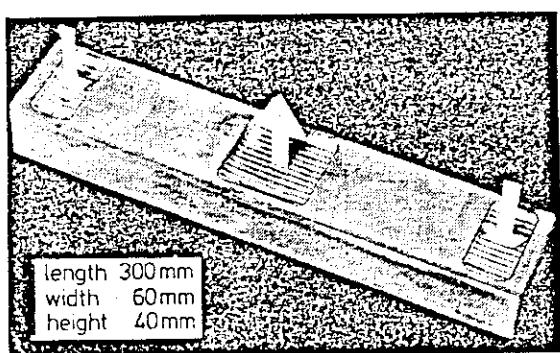


Fig. 4.18 SiN-heat exchanger element, machined flow channels in an isostatically pressed block (manufactured by RTAG).¹⁵⁾

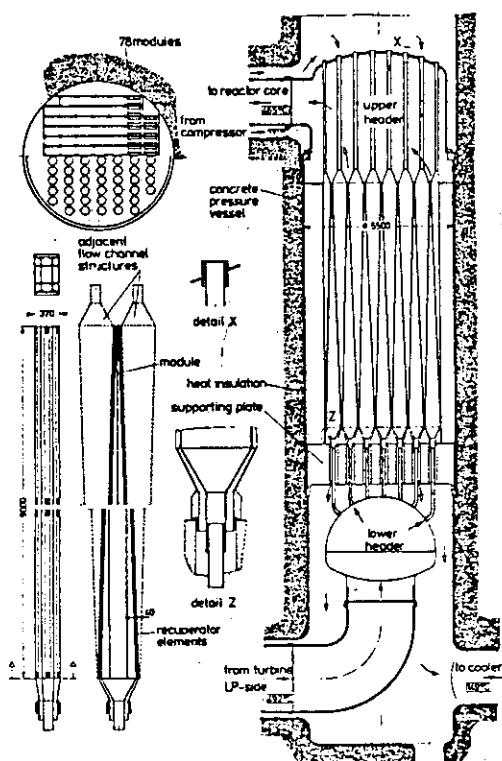


Fig. 4.17 136-MW thermal power compact recuperator with multiple V-arrangement for nuclear power plant with helium turbine cycle.¹⁵⁾

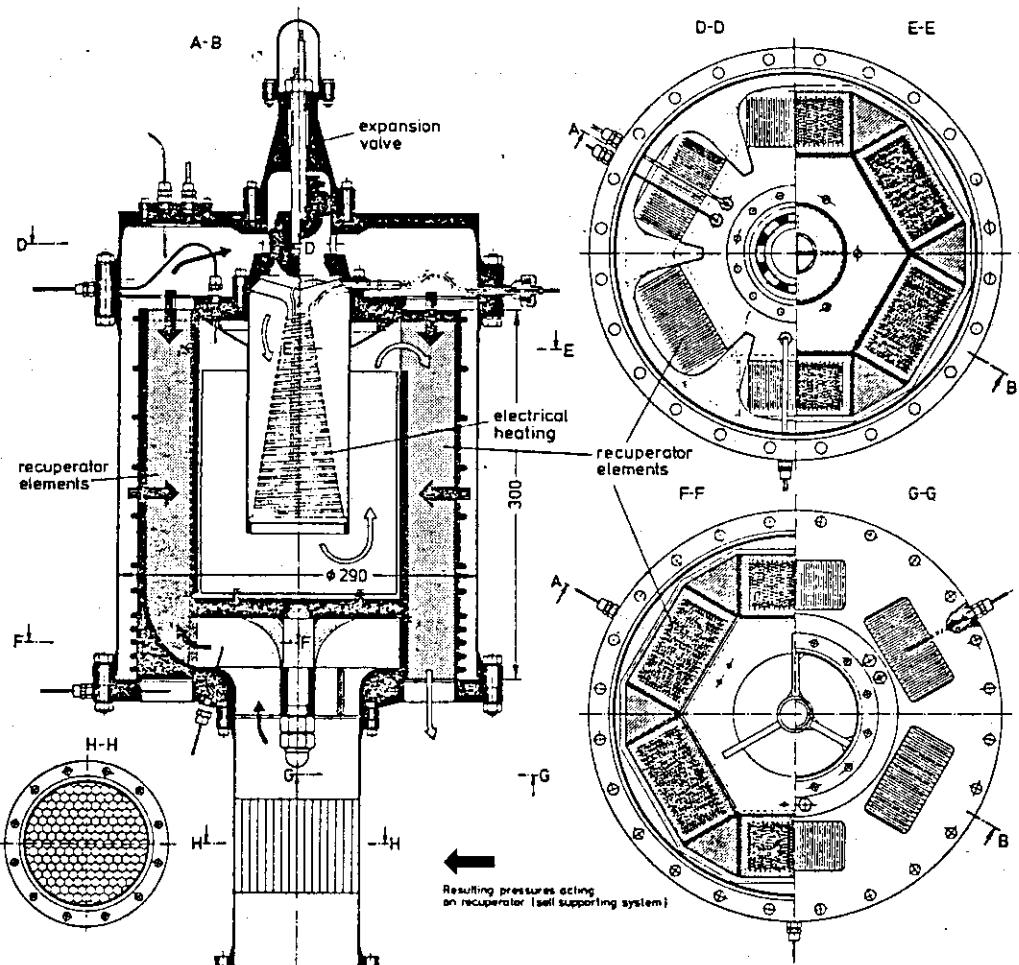


Fig. 4.19 Test facility for ceramic recuperator elements
(maximum air temperature $\approx 250^{\circ}\text{C}$; maximum air pressure ≈ 5 bar).¹⁵⁾

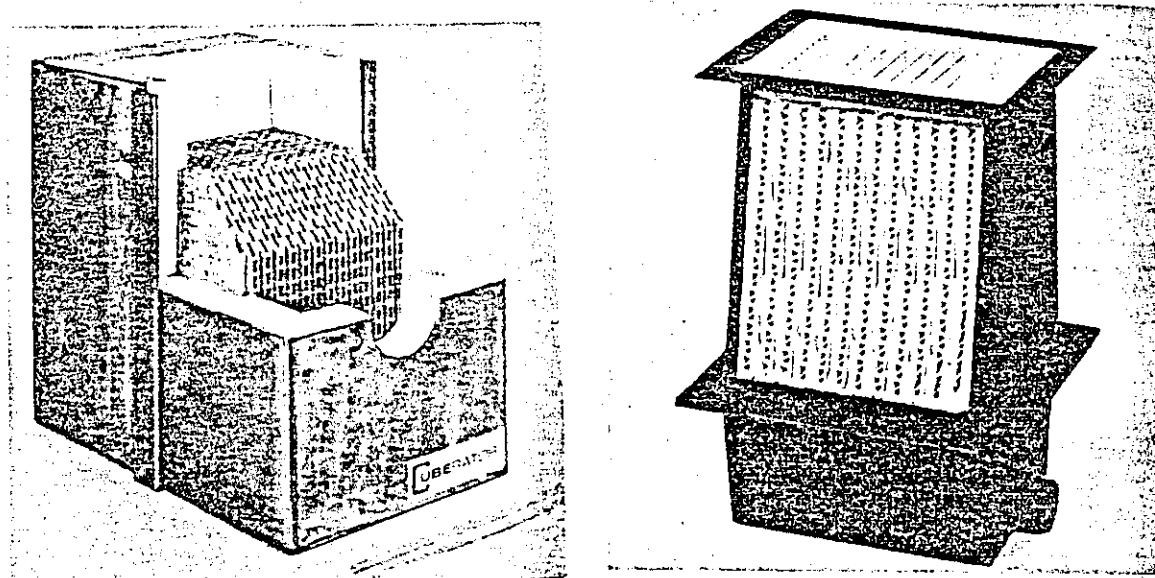


Fig. 4.20 Modular ceramic recuperator system with extruded surface geometry for high-temperature gas-to-gas heat recovery applications.¹⁾

Fig. 4.21 Early cross-flow plate-fin ceramic heat exchanger model.¹⁾

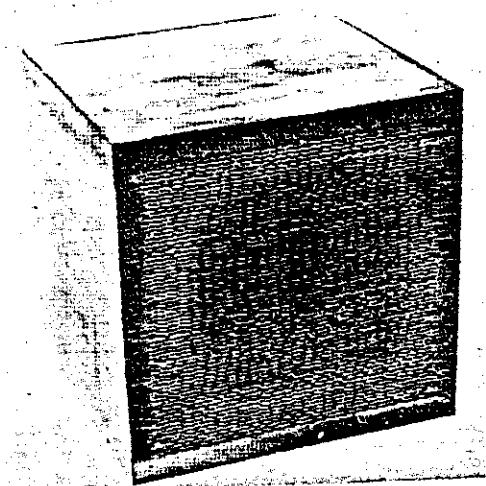


Fig. 4.22 Developmental ceramic plate-fin heat exchanger module for vehicular gas turbine application.¹⁾

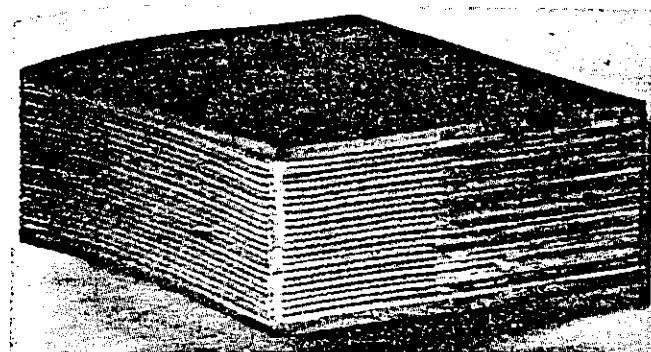


Fig. 4.23 Ceramic plate-fin counter-flow recuperator module.¹⁾

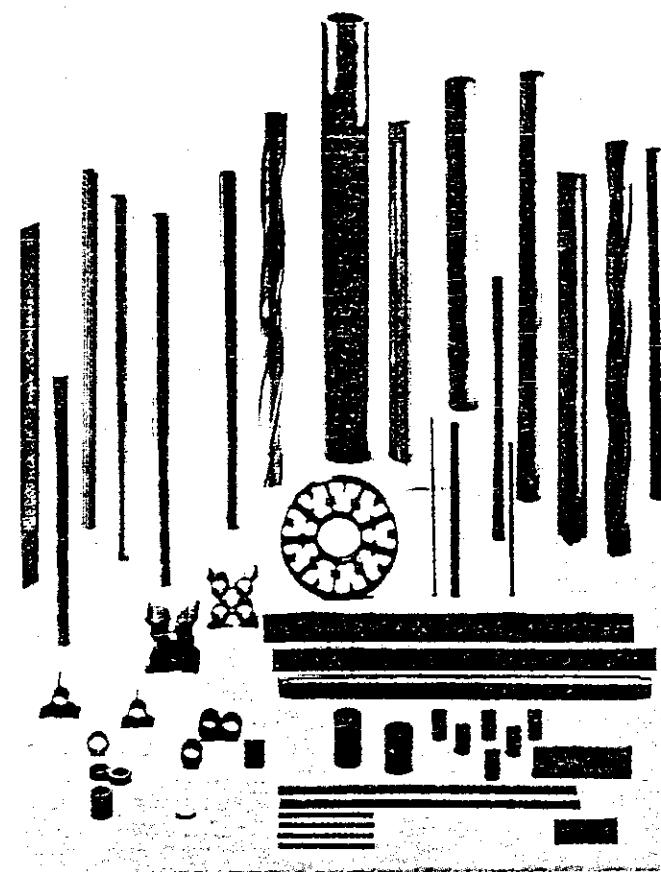


Fig. 4.24 Silicon carbide tubes with enhanced surfaces.¹⁾

5. セラミックス中間熱交換器

実験炉の中間熱交換器（25 MW）をセラミックスで製作した場合にどの程度の規模になるか、また構造はどのようなものになるかについて検討を行った。

5.1 スリット型モジュール

(1) モジュール構造

Fig. 5.1 にモジュール構造を示す。このモジュールは Section A-A に示すとおり、スリットの深さを 1 次側、2 次側で差を付けてあり、これを Fig. 5.2 に示すようにレンガ積みにすることによりそれぞれの流路を構成する。

(2) 伝熱計算

概略計算とし計算モデルは単純な向流とする。

・計算条件

1 次側 He ガス流量	30.7 ton/h
2 次側 He ガス流量	30.7 ton/h
1 次側入口温度	940 °C
1 次側出口温度	375 °C
2 次側入口温度	340 °C
2 次側出口温度	905 °C
伝熱量	25 MW
セラミックスの熱伝導率	12.6 kcal/m · h · °C

・計算結果

流れに直角方向のモジュール行数をパラメータにして伝熱計算を行った。

モジュール行数を少なくすると流速が増し、熱伝達率が大きくなってコンパクトになるが、圧力損失が大きくなる。詳細な検討にはこのバランスから行数を決定しなければならないが、今回は概略計算なので仮りに流速が約 18 m/s になる 30 モジュール行を採用した。計算結果を下記に示す。

	1 次側	2 次側
ガス流速	18.8 m/s	18.0 m/s
レイノルズ数	18000	18450
熱通過率		319.5 kcal/m ² · h · °C
必要伝熱面積		1923 m ²
必要モジュール数		2130 個

(3) 全体構造、寸法

伝熱計算より必要なモジュール数は 2130 個となったが全体の仕上り構造から実際には 2160

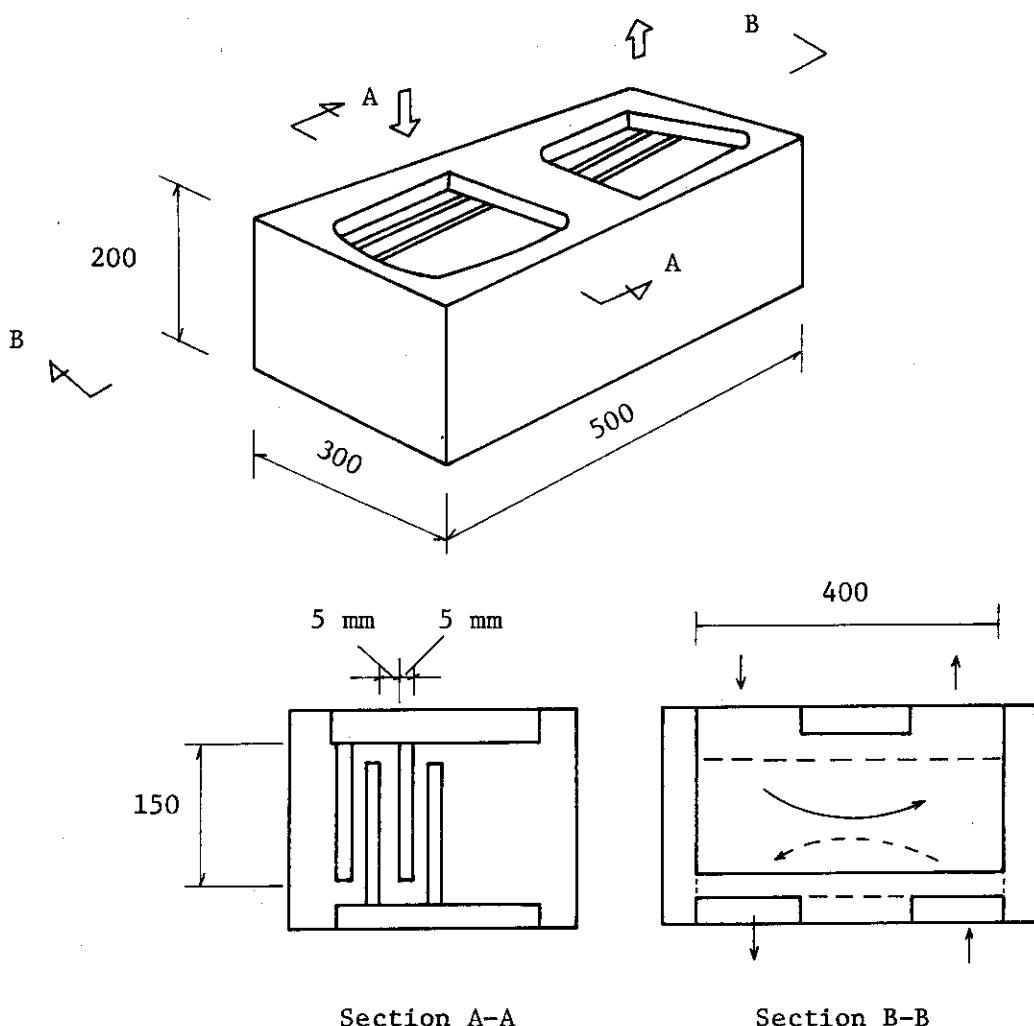


Fig. 5.1 Ceramic IHX module

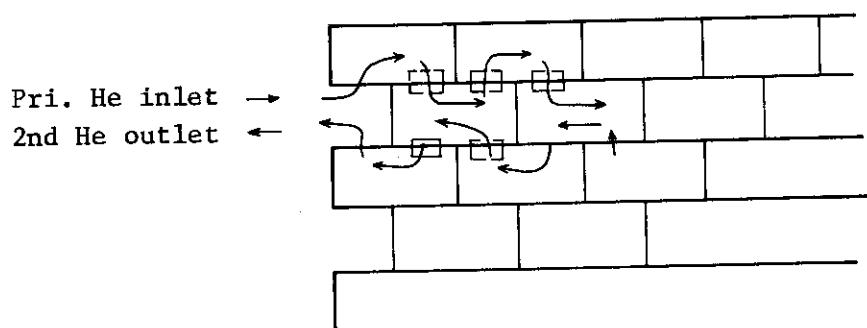


Fig. 5.2 Layout of ceramic module

個となる。全体のモジュールを組み上げた状態を Fig. 5.3 に示す。1 次 He ガス、2 次 He ガスの流路断面はそれぞれ 30 モジュールから成り、長さ方向は $18 \times 4 = 72$ モジュールとなる。長さ方向には 4 パスとし 18 モジュールで折り返す。全体寸法は、幅 3600 mm、高さ 2000 mm、長さ 9000 mm である。

(4) 考 察

- ・概略検討のため最も簡単なモジュールにより計算したが、板状フィン等の改善を行えば更にコンパクトな熱交換器になる。
- ・設計製作上問題となるのは、モジュール間のシール・接合方法であり、この点については確実で信頼性のある技術を開発しなければならない。ガスタービン用復熱器及び加熱炉用空気加熱器は完全に気密にする必要がないため、決定的な問題点とはならない。

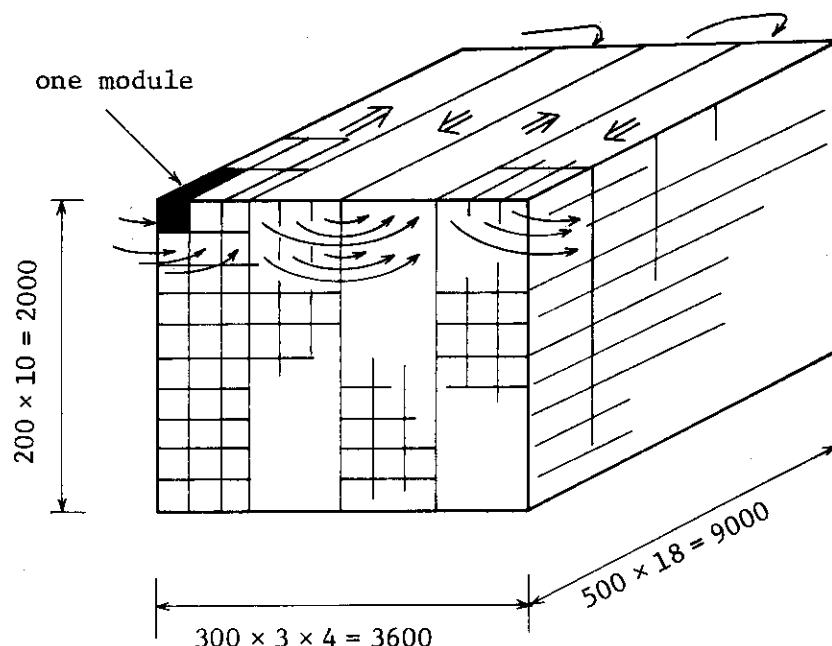


Fig. 5.3 Over all dimension of ceramics IHX

5.2 直交流モジュール

前項では向流のモジュールにて検討したが、ここではクロスフロータイプのモジュールに構造概念を検討した。また1次、2次のシール方式については、1次側流路のみを気密にするためにシールし、2次側については漏れを許す構造（組み立てを考慮）とした。

(1) モジュール構造

Fig. 5.4 にモジュールブロックの構造を示す。モジュール内流路は1次側と2次側で直交する多数の穴により構成され、伝熱はそれぞれの穴列間にて行われる。1次側流路についてはインロー構造にてブロック間のシールを行い、2次側はフラット面でリークは許すものとする。

(2) 全体構造

- Fig. 5.5, 5.6 に全体構造を示す。1次側流路を気密にすることで、1次、2次の境界を形成し、2次側は外の圧力容器が圧力バウンダリとなり、ブロック間の漏れは許す。
- 2次側を外気とのバウンダリとしたのは、圧力容器から He ガスが漏れた場合でも、外を汚染しないように考慮した。また1次、2次のバウンダリがリークした場合には、差圧により1次系の方向に He ガスが漏れるので汚染は起こらない。
- 1次 He ガス入口を上部としたのは、ブロックの自重をブロック自身でもたせるような構造になっているので、高温部を上にしたほうが有利であるからである。

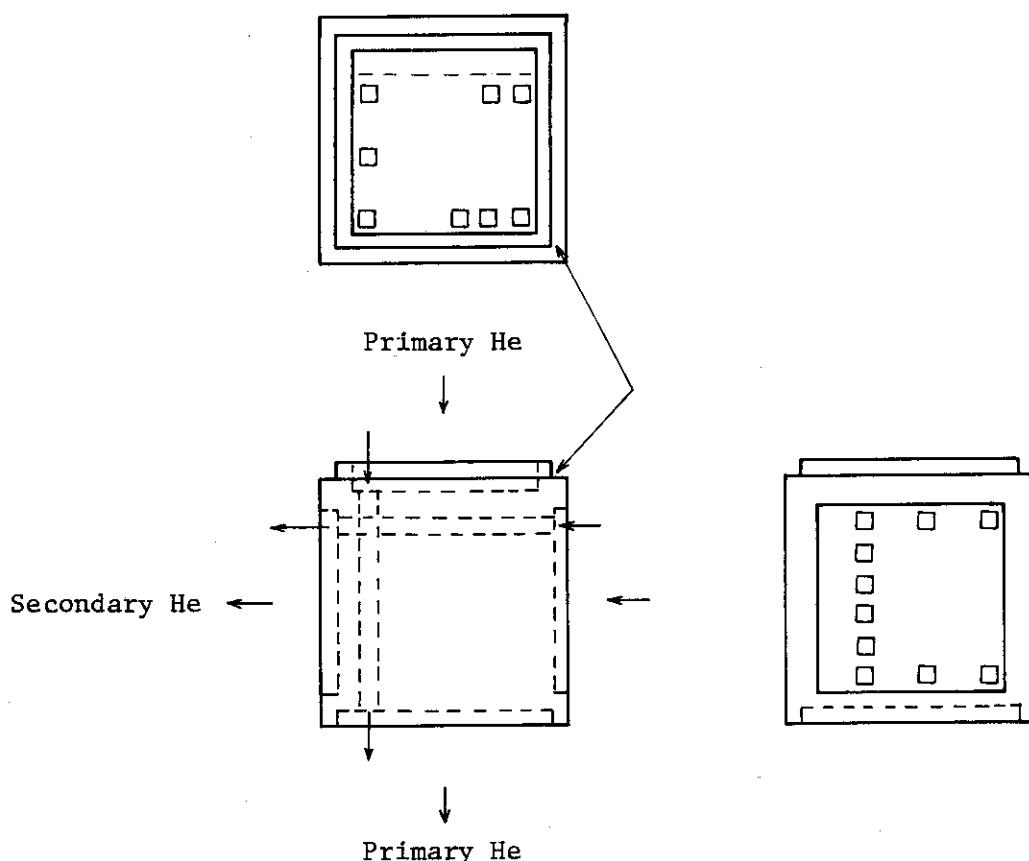


Fig. 5.4 Module Block Drawing

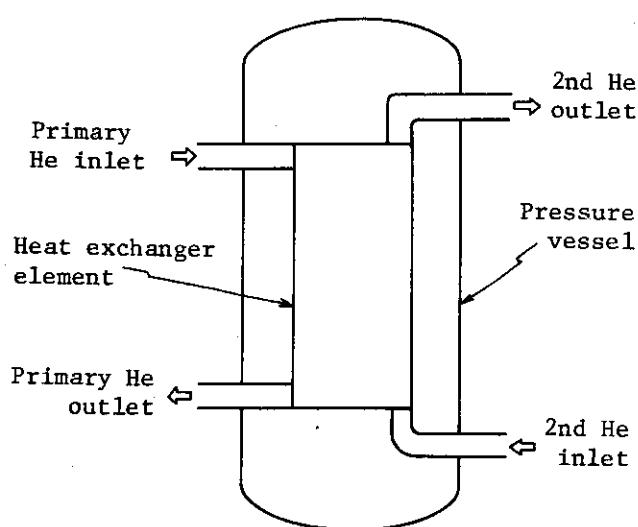


Fig. 5.5 Outline drawing of ceramic IHX

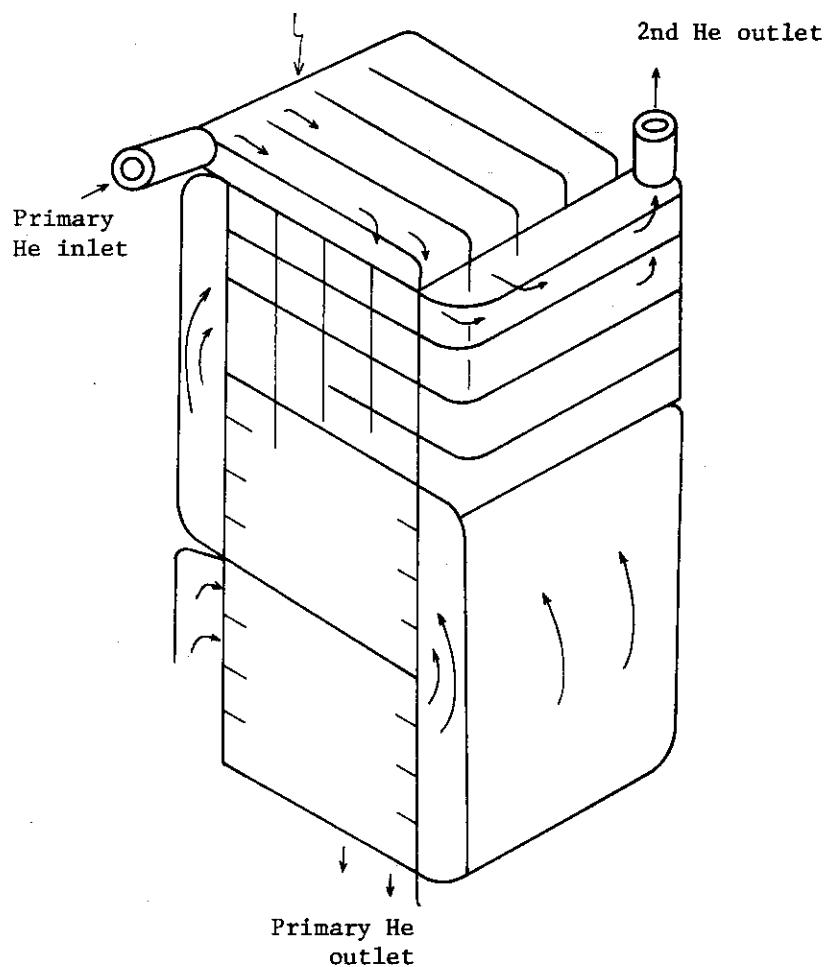


Fig. 5.6 View of Block Structure

6. 今後の課題

高温ガス炉の実用化に当たっては高性能の高温用熱交換器の開発が必須の課題である。熱交換器用耐熱材料を考えた場合温度条件からセラミックスが有望な材料ではある。素材コスト自体は耐熱合金に比べ非常に安価なのであるが、製作、加工に確立された技術がないことが実用化を阻んでいる。

本論では耐熱鋼、耐熱合金、セラミックスと調査してきたが、具体的にセラミックス中間熱交換器を想定し概念設計を行ってみると、幾つかの技術的難題がクローズアップしてくる。それらは材料強度等の問題だけでなく、加工、組立てといったフィールドワーク的問題であり、試作、テスト等試行錯誤により解決しなければならないように思われる。また現在の熱交換器製作技術は、その大部分が金属材料を基に確立されているものであり、セラミックスに置き換えるには、それに適したセラミックス用のシステム技術を開発しなければならないと思われる。

最後に、本報は日本原子力研究所で進めている高温ガス炉高温機器の開発計画（大型構造機器実証試験、Helium Engineering Demonstration Loop ; HENDEL）を立案検討するに当たり、プロセス用熱交換器の開発手順確立のため行った作業をとりまとめたものである。作業に当たり、有益な助言をいただいた高温工学部HENDEL開発試験室関係者各位に感謝する。

参考文献

- (1) McDonald, C.F., "The Role of the Ceramic Heat Exchanger in Energy and Resource Conservation", Journal of Engineering for Power, April (1980).
- (2) 田中良平, "耐熱金属の限界", 日本機械学会誌, 第83巻, 第734号, January (1980).
- (3) 機械工学便覧
- (4) Brandis, H., et al., "High-temperature Alloys Based on Titanium and Iron", High-Temperature Materials in Gas Turbines, Brown, Boveri & Company (1973).
- (5) Gessinger, G.H. and Bomford, M.J., "Modern Methods of Powder Metallurgical Processing of Superalloys", High-Temperature Materials in Gas Turbines, Brown, Boveri & Company (1973).
- (6) 吾妻潔, et al. "鉄鋼材料", 朝倉書店, P 267
- (7) Decker, R.F., "Nickel-based and Cobalt-based Superalloys : Present and Future Potential", High-Temperature Materials in Gas Turbines, Brown, Boveri & Company (1973).
- (8) 西田勝利, "Si₃N₄材料の応用について", Ceramic Sience and Technology at the Present and in the Future, December (1982).
- (9) 栗田学, et al. "セラミックスエンジン開発の意義と問題点およびセラミックスに要求される特性", Ceramic Sience and Technology at the Present and in the Future, December (1982).
- (10) "VHTR Engineering Design Study, Intermediate Heat Exchanger Program", COO-2841-1, November (1976).
- (11) 小林昭, "セラミックスのレーザ加工", Ceramics Japan, vol.18(6) (1983).
- (12) Lines, D.J., "Ceramic Materials for Gas Turbine Components", High-Temperature Materials in Gas Turbines, Brown, Boveri & Company (1973).
- (13) 成瀬庸一・八田篤明, "熱交換器への応用", Ceramics Japan, vol.18(1) (1983).
- (14) Reay, D.A., "Heat-pipe Heat Exchangers", The Chemical Engineer, April (1981).
- (15) Förster, S., Kleeman, M., "Compact Metallic and Ceramic Recuperators for Gas Turbines", ASME paper 78-GT-62 (1978).