

高温ガス冷却型原子炉用耐熱金属材料

大阪大学工学部教授 山 根 寿 己

1. はじめに

ここ数年来、わが国では多目的高温ガス炉利用の問題に関心が集中し、その実用化のために諸々の調査・研究が行なわれている。筆者は日本学術振興会高温ガス炉耐熱材料研究会の一員として耐熱金属材料を眺めた所感をここに記述する。これ程この高温ガス炉に関心が集まって

表1 高温ガス炉のガス温度レベルによると考えられる用途

ガス温度	利用分野
850°C 以上	製鉄, 石炭石油ガス化, 化学工業
750°C 以上	ヘリウムガスタービン発電
500°C 前後	発電
500°C 以下	化学工業, その他の工業海水淡水化, 地域冷暖房

表2 高温ガス原子炉の開発状況

原子炉	Dragon	Peach Bottom	AVR	UHT REX	KSH	Fort. St. Vrain	1,100MWe (GGA)	THTR	MARK-III
場 所	Vinfrith (英)	Peach Bottom (米)	Jülich (西独)	Los(米) Alamos	(西独)	(米)	(米)	(西独)	(英)
熱 出 力 (MWt)	20	115	46	3	65	842	2,800	750	1,517
電 気 出 力 (MWe)	—	40	15	—	24	330	1,100	300	647
熱 効 率 (%)	—	34.6	32.6	—	37	39.2	39.3	40	42.6
出力密度 (MWt/m ³)	14	8.3	2.2	—	6.4	6.3	—	6	7.5
燃 焼 度 (MW/T)	6万~10万	6万~10万	6万~10万	—	—	10万	—	—	6万 または10万
冷却材種類	He	He	He	He	He	He	He	He	He
炉出口温度	750~850°C	750	850°C	1,316°C	735°C	778°C	788°C	750°C	800°C
炉入口温度	350°C	345	175°C	890°C	425°C	405°C	326°C	270°C	300°C
圧 力 (kg/cm ²)	20	23.8	10	35	25	49	49	40	—
減速材料種類	黒鉛	黒鉛	黒鉛	黒鉛	黒鉛	黒鉛	黒鉛	黒鉛	黒鉛
燃料種類	UC ₂ /ThC ₂	UC ₂ /ThC ₂	UC ₂ /ThC ₂	UC ₂	UC ₂ /ThC ₂	UC ₂ /ThC ₂	UC ₂ /ThC ₂	UC ₂ /ThC ₂	U/Pu または UO ₂ /ThO ₂
粒子径 (mm)	—	(0.25~0.52)	—	—	—	—	0.30~0.86	—	1.1~1.2
(うち核部分)	—	(0.15~0.40)	—	—	—	—	(0.1~0.6)	—	(0.8)
燃料要素形状	柱状	柱状	ボール状	柱状	柱状	柱状	柱状	ボール状	柱状
圧力容器	鋼製	鋼製	鋼製	鋼製	鋼製	PSコンクリート	PSコンクリート	PSコンクリート	PSコンクリート
臨界年	1964年	1966年	1966年	1968年	1973年	1971年	—	1974年	1975年ごろ

いる理由は昭和45年の総合エネルギー調査会の第1次答申によると昭和42年度の総合エネルギー需要は1万 Kcal で石油に換算して2,5億kl であり、これは10年前の総需要に対して3.4倍にもなり、今後もこの拡大傾向は続くものと予想され、核エネルギーの有効利用が必要となってきたためである。この核エネルギー利用を有効にするためにはある原子炉から持ち出される冷却ガスの持っている熱を温度レベルによって用途を変えることが考えられている。

原子炉は冷却材によって軽水炉、ガス冷却炉および重水炉に大別されているが高温での用途を目指すには化学的に安定なヘリウムガスを用い、高温に耐えない被覆材のステンレス鋼を黒鉛にかえた被覆粒子燃料が考えられている。

高温ガス炉から持出されるヘリウムガスの温度レベルによる考えられる用途は第1表¹⁾に示す通りである。

現在考えられている高温ガス炉は850°C以上、出来れば1200°Cの炉心出口温度を想定しており、従って製鉄がそのエネルギー利用の主役である。

ところで外国における高温ガス炉の開発状況は表2²⁾に示すように冷却材はヘリウムガス、炉出口温度は約750°C以上で減速材として黒鉛、燃料は UC₂/ThC₂、または UO₂/ThO₂ と

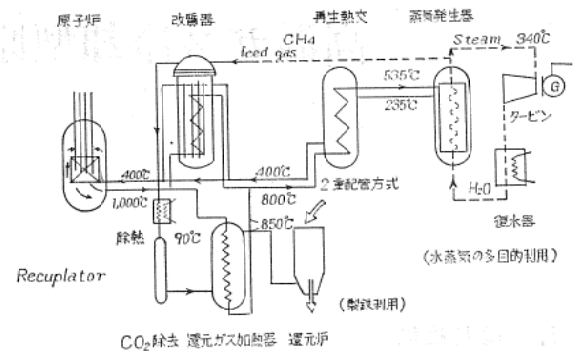


図-1. 冷却システムの概念のための図

なっている。

2. 多目的高温ガス炉のシステム

冷却材としては中性で安定なヘリウムを用いるがこのヘリウムガスの冷却システムを理解するための概念図を図1³⁾に示す。原子炉から出る1000°Cのヘリウムは還元ガス加熱器および改質器を通り再生熱交換器を通して改質器を経て原子炉に戻る。還元ガス加熱器で加熱された還元ガスは製鉄に、再生熱交換器からの熱で蒸気発生器で蒸気を発生しタービンのような動力を動かす。このような考え方は一つの試案ではあるが一番実現性があると考えられる。

3. 原子炉構成材料

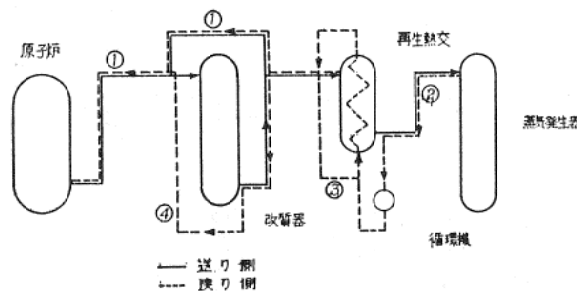
高温ガス炉の炉芯構造である燃料、黒鉛、圧

表3 炉芯構成材料

燃 料	黒鉛ブロック+燃料ピン方式 Ball 型, Block型 (米国式, Dragon 式), Rod 型 kernel; (Sol-gel 法・粉末冶金法) UO ₂ , UC ₂ , ThC ₂ Coating; BISO Buffer layer, DyC TRISO Buffer, SiC, DyC TRISO-II Buffer, PyC, SiC, DyC 40μ, 30μ, 25μ, 45μ, kernel 500μ, /780μ Pellet; overcoating-Press 法, mold-injection 法 Sheath; graphite extruded or moulded OD24φ, ID8φ, 40L OD34φ, ID24.2φ×500L
黒 鉛	Gilsonite 系黒鉛 Block.....isotropic Graphite 対面300(六角柱) Carbon Block insulator ×500 L Reflector 可動, 固定 6.1×10 ²¹ (>0.18 MeV)
圧 力 容 器	2½Cr-1Mo 鋼 (A387D, A542) 400°C 40 atg(炉芯1,000), <10 ¹⁹ not(>1 MeV), He~11,000 mm (内径高I)×-5,000 mm I.D 肉厚 胴部 140, 鏡板 200~140
制 御 棒	B ₄ C pellet, Bsteel ball ハステロイで包む 炉内では1200°C B ¹⁰ で10%含有 → Gray rod ワイヤーシース材

表4 改質器他の器での材料

改質器	反応管 Shell	外管 HK-40 内管 Incoloy-800 SB-42	165 O D, 125 I D 34 O D, 27.2 I D
再生熱交	銅 伝熱管	A-387 D Hasteloy-X	700 → 535°C 400 ← 235°C
蒸気発生器	管	STBA24, STB35, STPT42, SUS32	
還元ガス加熱器	シエル He Tube シート	2 $\frac{1}{4}$ Cr-1 Mo 鋼 Heasteloy-X, HK-40 Incoloy	入口 1,000°C 出口 700°C 還元ガス 400°C



配管関係材料

配管番号	①		②		③	④
	内管	外管	内管	外管		
ライナ	ハステロイX	—	ハステロイX	—	—	—
断熱材	マスロック	—	マスロック	—	—	—
配管材	2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo	2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo	2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo	2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo	STPA-24	STPA-24
保温材	—	カポサイト	—	カポサイト	カポサイト	カポサイト

図-2. 配管関係記号

力容器，制御棒があるが，それらを構成する材料を表3³⁾に示す。冷却材であるヘリウムを通す配管のうちヘリウム1次系，改質器反応管，再生熱交換器，蒸気発生器，還元ガス加熱器では表4³⁾に示すようなものが考えられている。これらの配管を高温ガスのシステムで示すと図2³⁾および表5³⁾のように1000°Cのような高温ヘリウムガスに接触するライナー部にハステロイX高温がかからない外側には2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼を使うことが予想されている。しかしながら現在，市販の耐熱金属材料では1000°Cの高温で十分使用に耐える材料はその数が多くなく，高融点金属を用いるには経済性の点から難点がある。そこで高温ガスに接する部分（ライナー）には耐熱金属材料を用いその耐熱金属材料と断

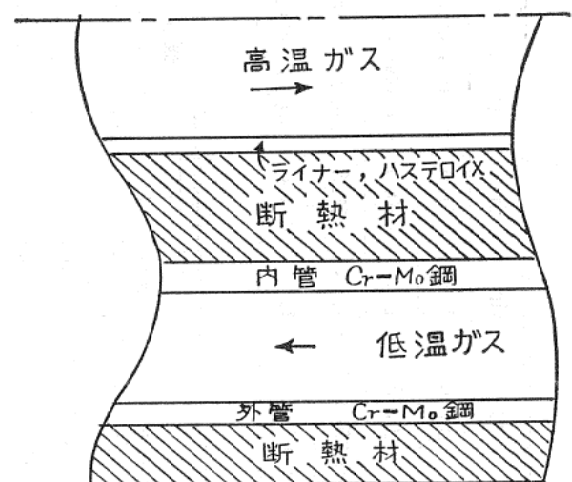


図-3. 耐熱金属材料の強度を補う構造例

熱材料をはり合わせて強度を補う構造が考えられている。(図3)

表5 4種類の耐熱合金の化学成分

合金名	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Fe	Co	Mo	W	Ti	Al	Cu	その他
Incoloy 800	<0.10	<1.5	<1.0	<0.035	<0.015	19/23	30/35	BAL	—	—	—	0.15/0.60	0.15/0.60	<0.75	
Inconel 600	<0.15	<1.0	<0.5	<0.030	<0.015	14/17	>72	6/10	—	—	—	—	—	<0.50	
HK 40	0.35/0.45	<1.75	<1.5	<0.04	<0.04	24/27	19/22	BAL	—	<0.5	—	—	—	—	N0.08/0.15
Hastelloy X	0.05/0.15	<1.0	<1.0	<0.04	<0.03	20.5/23	BAL	17/20	0.5/2.5	8/10	0.2/1.0	—	—	—	B <0.01

表6 高温で使用可能な耐熱合金の化学成分 (%)

種別	合金名	C	Si	Mn	Cr	Ni	Co	W	Mo	Ti	Al	Fe	その他
铸造合金	HK 40	0.4			25	20	—	—	—	—	—	残	—
	HP	0.5	1.2	1.0	26	32	—	<0.5	—	—	—	”	—
	IN-519	0.3	1.0	0.75	24	24	—	<0.5	—	—	—	”	—
	MO-RE1	0.3~0.9	0.5~3.5	0.5~4	20~30	15~35	—	0.3~4	—	—	—	”	—
	Super22H	0.35~0.7	≤2	≤2	25~29	46~50	—	3~6	—	—	—	”	—
	Supertherm MO-RE2	0.5 ≤1	1.6 ≤1	<0.7 ≤1	26 26~38	35 残	—	<0.5 10~25	—	—	—	” —	+α —
Incoloy シリーズ合金	Incoloy 800	<0.10	<1.0	<1.5	19~23	30~35	—	—	—	0.15~0.60	0.15~0.60	残	S, <0.015 Cu, <0.75 Nb, —
	Incoloy 802	0.2~0.5	<0.75	<1.5	19~23	30~35	—	—	—	0.25~1.25	0.15~1.0	”	S, <0.015 Cu, <0.75 Nb, —
	Incoloy 807	<0.10	<0.75	<1.0	20.5	40.0	8.0	5.0	<0.3	<0.55	<0.50	”	S, — Cu, — Nb, 1.0
Inconel シリーズ合金	Inconel 600	0.04	—	—	16	残	—	—	—	—	—	7.2	Cu, 0.1
	Inconel 601	0.05	0.25	0.5	23.0	60.5	—	—	—	—	1.35	14.1	S, 0.007 Cu, 0.25
	Inconel 625	<0.10	<0.50	<0.50	20~23	残	<1.0	—	8~10	≤0.4	<0.4	<5.0	P, <0.015 S, <0.015 Nb, 3.15~4.15

4. 高温ガス炉用耐熱金属材料

前述した耐熱金属材料として名前があがったものにハステロイ X、インコロイ 800、インコ

ネル 600, HK40 の 4 種類がある。これは現在生産されている耐熱金属材料のうちある程度大きなもの、生産実績、使用実績がかなりあり、安定した材料であるという理由から日本原子力研究所で選ばれたものである。この 4 合金の化学組成を示すと表 5 のようにインコロイ 800 と HK 40 は鉄基であり、インコネル 600 とハステロイ X はニッケル基合金である。

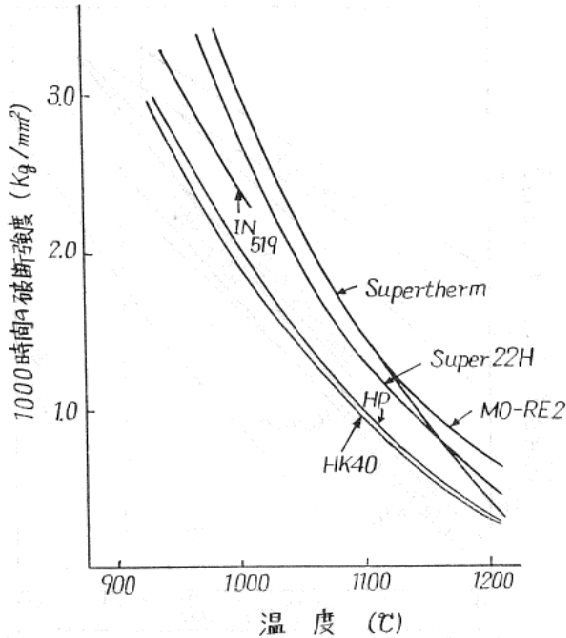


図-4. 铸造用合金の1000時間のクリープ破断強度の比較

表7 1000°C 10⁵時間におけるクリープ破断応力

合金名	ラプチャー応力 kg/mm ²
Incoloy 800	0.35
Incoloy 807	0.56
Inconel 600	0.4
Hastelloy X	0.3~4.7
HK40	0.55
Supertherm	1.2
MORE 2	1.4
将来予想される値	
鍛造用合金	~1.0
铸造用合金	~2.0

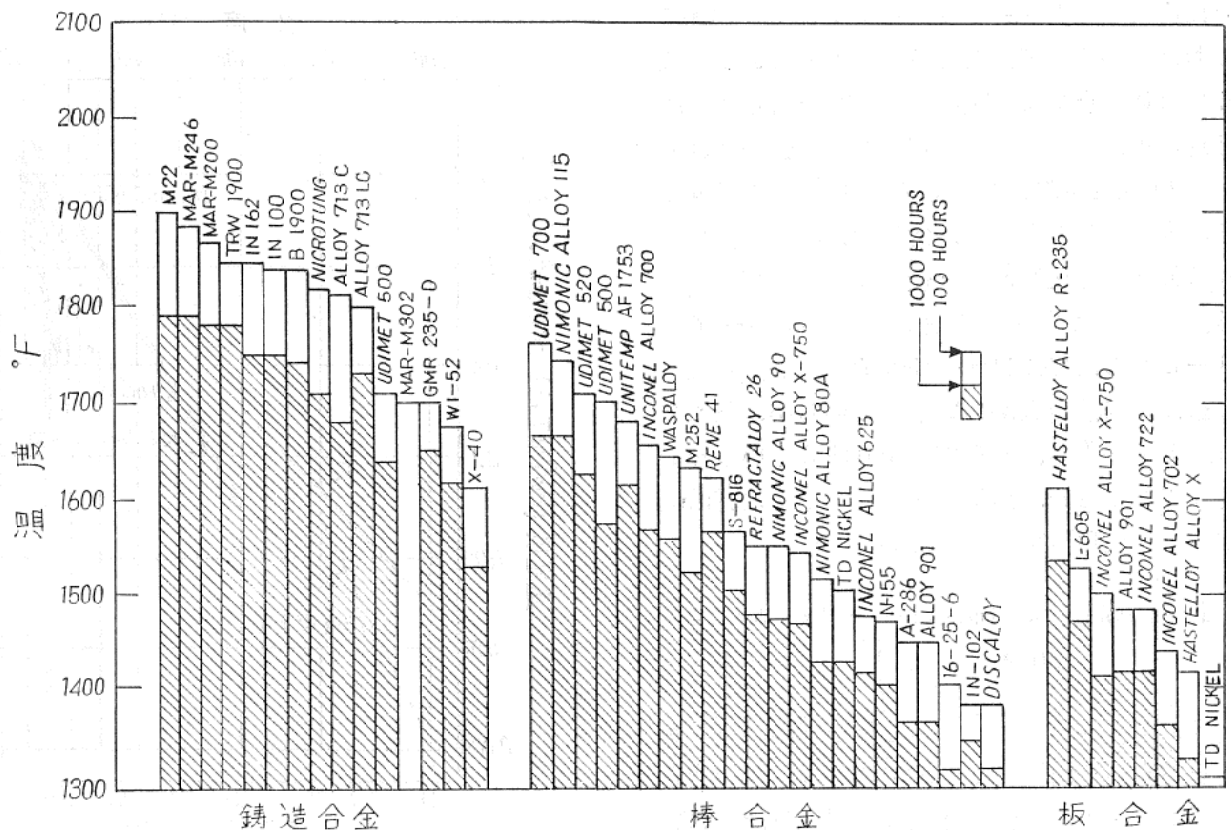


図-5. 20000 psi の応力で100、1000時間で破壊する温度

まず高温ガス原子炉用耐熱金属材料に要求される性質をあげてみると、1. 1000°Cのような高温に耐える耐クリープ性を有すること、2. かなり大きなものの生産が可能で管にすることが出来るもの、3. 還元ガス中の水素をなるべく透過しないこと、4. ヘリウムガス中に微量含まれる不鈍ガスにより腐蝕されないこと、などの特性が要求される。

現在市販されている耐熱金属材料で1000°Cの高温で使用可能であると考えられる材料を表6に示す。この表にはモリブデン、タングステンのような高融点金属は経済性の問題、かなり大量を管への加工する上での制限等から除外してある。この表6の合金のうち鑄造合金に属するものは、Incoloy シリーズ、および Inconel シリーズ合金のような鍛錬合金よりも当然の事ながら、高温における機械強度は高い。

図4は鑄造用耐熱合金を1000時間クリープして破断する強度と温度の関係を示したもので1000°C以上での耐クリープ性という点から見ると Supertherm, MORE 2 あたりが高い値を示している。鍛錬用合金になるとこれら鑄造用合金に比較してクリープ強度は低くなる。1000°Cにおける 10⁵ 時間における破断強度は表7のように鑄造合金では 1kg/mm²に達しない。図5⁶⁾は鑄造用、棒用および板用の耐熱合金の20,000 psi (14 kg/mm²), で100と1000時間で破断する温度を示したもので、鑄造用、棒用、板用と異なるに従って使用温度が低くなる様子がよく分る。従来ロケットの燃焼筒の温度は 2000°C, タービン入口では1100~1300°Cと言われる温度に耐える耐熱合金が用いられているが、前者では1分余の寿命、後者で数100時間という短い寿命であるため、高温ガス炉用のような長時間安定した使用実績は全くない。

5. Incoloy 800, Inconel 600, Hastelloy X および HK40

前にも述べたようにこの4合金が高温ガス炉用耐熱金属材料として候補にのぼり、その性質の調査を日本学術振興会の高温ガス炉耐熱材料研究会で行ない、その調査報告書はすでに発行

されている。その報告書によるこれら合金の問題点をまとめると次のようになる⁴⁾。

(1) 水素透過性

高温ガス炉を製鉄に用いる時、再加熱用熱交

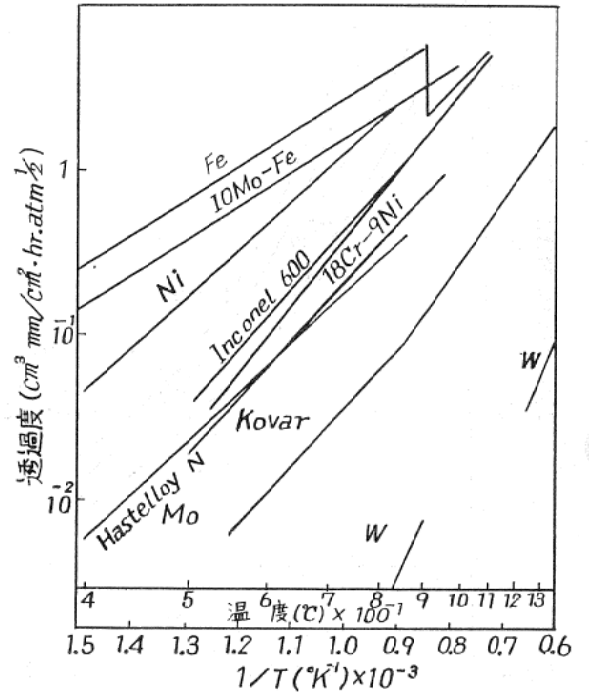


図-6. 種々の金属材料の水素透過度

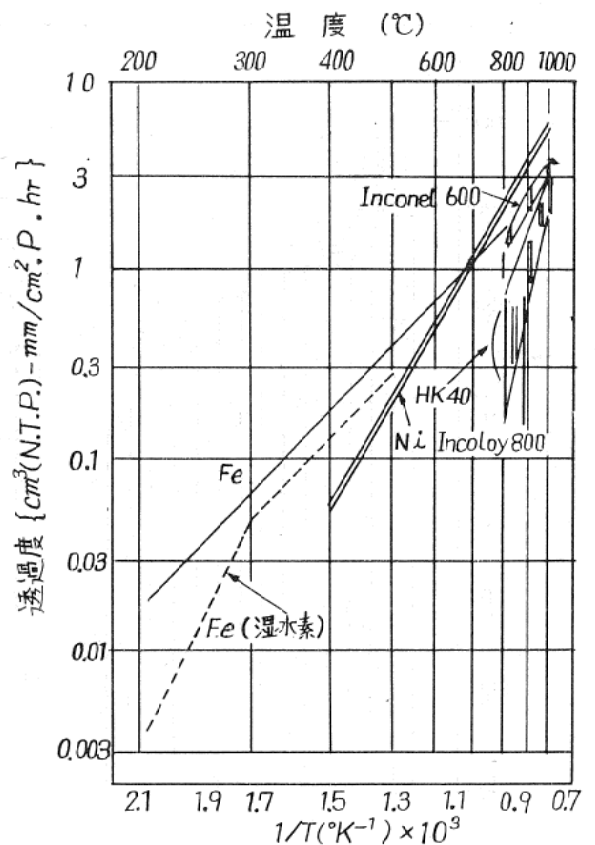


図-7. 2.3の金属および合金の水素透過度

生産と技術

実績は多く、設計応力を小さく出来る用途には使用できる。溶接材料と溶接の高温割れに注意を要する。

(ii) Inconel 600 製造加工性はオーステナイト系ステンレスと略々同じで問題ないが、高温強度は Hastelloy X より低い。

(iii) Hastelloy X は短時間強度は大きいですが、長時間持続するか確認する必要がある。

(iv) HK40 は石油化学などに多数の実績があるが靱性が低いこと熱応力による熱疲労に注意を要する。

以上のような問題点の指摘を耐熱材料の立場から眺めて来たが、日本学術振興会高温ガス炉用耐熱材料研究委員会では昭和47年度も引き続き Inconel 600, Incoloy 800, Hastelloy X, HK 40

以外の高級材料の調査研究をも行なうので、その成果を見守って頂きたい。

文 献

- 1) 科学技術庁原子力局：原子炉多目的利用分科会報告書(案) (昭和46年12月)。
- 2) 村田浩：第8回原子力総合シンポジウム予稿集(和45年8月)。P. 39
- 3) 武谷清昭：多目的高温ガス炉の耐熱金属材料：日本学術振興会、高温ガス炉耐熱材料研究会資料、昭和46年7月22日
- 4) 日本学術振興会、高温ガス炉研究会調査報告書、昭47年3月。
- 5) 武田修三、湯川夏夫、日本学術振興会耐熱金属材料研究委員会研究報告8(昭和42年) No. 2 P. 139
- 6) High Temperature High Strength Nickel Base Alloys, Internal Nickel Co., June 1968, 2nd Edition