

<概要>

原子炉材料の種類と特徴について、金属材料、炭素材料、セラミック材料の順に説明する。金属材料としては、アルミニウム合金、ジルコニウム合金、ステンレス鋼、低合金鋼ニッケル基・鉄基合金、高融点金属合金について、原子炉材料としての特徴を述べる。炭素材料として、黒鉛材料、断熱用炭素材料、C/Cコンポジットについて高温ガス炉における応用を中心に述べる。セラミック材料は制御材料のほか電気絶縁・熱絶縁材料などとして用いられているものの例を挙げる。また、原子炉の各種構造物に用いられている材料について機能別に概要を述べる。

<更新年月>

2006年01月（本データは原則として更新対象外とします。）

<本文>

1. 原子炉材料の種類と特徴

1) 金属材料

(1) アルミニウム合金

アルミニウムは面心立方晶系の金属で変形しやすく、従って加工しやすい。また融点が低く（660℃）、中性子吸収断面積が小さいので、研究用原子炉の燃料被覆材として使用される。また、研究炉では構造材料として使用されることもある。

(2) ジルコニウム合金

ジルコニウムは稠密六方晶系に属し、中性子吸収断面積が小さいという特徴を持っているので、通常ジルカロイと呼ばれ、燃料被覆材として合金の形で用いられる。ジルカロイにはBWR用にジルカロイ-2、PWR用にジルカロイ-4などがある（表1）。ジルカロイ-4はジルカロイ-2に比べて鉄を若干増やし、ニッケルを減らすことによって水素吸収による脆化特性を改良した合金である。ジルコニウムは水との酸化反応によって腐食が進み、生成した水素を吸収し、水素化物を形成する。これが燃料被覆材中で半径方向に優先的に並ぶと脆化し、き裂生成の可能性がある。

(3) ステンレス鋼

圧力容器の内張りや配管等の構成材料として、オーステナイト系ステンレス鋼が用いられる（表2）。これは面心立方系のクロム・ニッケル・鉄合金で、耐食性に優れている。よく使われるのはSUS304であり、高温強度の優れたSUS316は高速炉燃料被覆管に使用される。ステンレス鋼は応力腐食割れが問題であり、材料の観点から割れ感受性を低くするため炭素量を減らしたSUS304L、SUS316Lなどが用いられ、環境的には冷却材（水）中の酸素イオンと塩素イオンのレベルをできるだけ低く抑える努力がなされている（図1）。

燃料被覆材としてのステンレス鋼は使用時間の経過とともに照射損傷によって材料のスエリングを生じ、体積が膨張し、延性が低下する。500℃以上の温度で10%以上のスエリングを生じる。これは冷却材の流路を狭くし、スムーズな流れを阻害することになるので、スエリングの大きくない材料を選定・利用することが大切である（図2）。

(4) 低合金鋼

軽水冷却型原子炉の圧力容器は通常マンガン-モリブデン鋼の焼き入れ・焼き戻し材（A533 Grade B）を用いて製作される（表3）。低合金鋼は照射により降伏強さおよび引張り強さが照射前に比べて上昇する。降伏応力の上昇は延性-脆性遷移温度の上昇、すなわち照射脆化が起こる。同時に破壊靱性も照射により低下する（図3）。照射によるこれらの特性の変化は、材料選定の段階および使用時間の経過に伴って追跡、監視しておく必要がある。

(5) ニッケル基・鉄基合金

ニッケル基および鉄基合金は、高温強度と耐食性に優れた材料であり、インコネル（ニッケル基）、ハステロイ（ニッケル基）、インコロイ（鉄基）などの合金がある（表4）。軽水炉では耐食性への信頼性を高めるために使用されている。高温ガス炉において高温工学試験研究炉（HTTR）の例では、制御棒被覆管および高温ヘリウムガスの配管材としてハステロイXRというハステロイの高温耐食性を改良した材料が使用されている。

(6) 高融点金属・合金

高融点金属・合金とは通常、モリブデン、タングステン、タンタル、ニオブ、バナジウム、クロムとそれらの合金である（表5）。これらの金属・合金は融点および高温強度が高く、高温で利用できる可能性のある材料である。タンタルは高速中性子の吸収断面積が比較的大きいので、高速増殖炉の制御材として用いられる。タングstenは、最も融点が高い（3653K）金属であるため、将来の核融合炉のプラズマ閉じ込めに必要な不純物収集のためのダイバータ材として使用される可能性がある。

2) 炭素材料

(1) 黒鉛材料

黒鉛単結晶は六方晶系である。原子炉用黒鉛材料は粉碎した石油コークスや、石炭コークスを原料（フィラー材）とし、バインダーと含浸材を成型加工して焼成・黒鉛化してできた一種の複合材料である。複合材料といっても異なる組織・構造の複合体という意味であり、不純物以外は炭素のみからなっている（図4）。最高2600-3000℃近くで最終熱処理を行うので、部分的に黒鉛単結晶からなる、ある大きさの結晶子、結晶性のよくない部分、ほとんどランダムな原子配置の部分および気孔から構成されている。

原子炉用黒鉛材料は、その成型法によって押出し材、型込め材、等方加圧材（ラバープレス材）、振動加圧材などがある。成型法は最終熱処理後の素材の特性の異方性と強い相関性があり、押出し材がもっとも異方的で、ラバープレス材が最も等方的な特性を示す。型込め材と振動加圧材はそれらの中間の異方性を示すのが普通である。

黒鉛は中性子の反射・減速特性が優れているので、通常反射材、減速材として使用される。通気性があること、引張り強さが小さく、圧縮強さが大きいのが特長である。大きな引張り力のかかる部分および気密を要する機器には使用できない。しかし、不活性気体中であれば、2000℃以上での強度が金属よりも大きいという特徴がある。高温ガス炉・炭酸ガス冷却炉などでは減速・反射の機能を十分に利用するために、燃料のすぐ近くから圧力容器の近くまで多量の黒鉛材料を用いている。特に、ヘリウム冷却型高温ガス炉では温度が高い（850-950℃以上）ので、金属材料を用いることができないが、黒鉛材料を用いれば十分その役目を果たすことができる。

黒鉛材料の重要特性は、照射中の熱応力および照射寸法変化に誘起されて発生する内部応力に関連するもので、寸法変化、熱伝導率、熱膨張係数、ヤング率、強度、照射クリープ係数、破壊靱性等である。また、酸化により密度が減少し、その結果ヤング率・強度が低下するので、酸化による特性変化のデータも重要である。

(2) 断熱用炭素材料

黒鉛を製造する過程で、最初粉碎したコークス等を成型し、1000℃前後で焼成する。焼成後の炭素材料は黒鉛結晶部分がほとんどなくて主に乱層構造からなる材料であるが、熱伝導率は比較的小さく、高温強度は十分大きいので、断熱材料として好適である。熱伝導率は焼成温度が高くなるほど大きく、低いほど小さいが、焼成温度が低いと硬く加工性が悪くなり扱い難いという欠点がある。HTTRでは断熱材として炉床部にこのような炭素材料が用いられている。

(3) C/Cコンポジット

炭素繊維で強化した炭素複合材料である炭素繊維にはピッチ（石油・石炭）系、パン（PAN＝ポリアクリロニトリロ）系、レイヨン系などがあり、マトリックスには気・液・固相が用いられ、そのいずれかにより、製造方法が異なっている。特徴は比強度、比弾性率が高温まで大きいことである。高温強度の観点から、高温ガス炉の制御棒被覆管としてC/Cコンポジットを利用することが考えられ、検討されている。これは配管材料としても利用できる可能性を持った素材である。

3) セラミック材料

燃料は金属ウラン以外実用上すべてセラミックの形で使用されるが、ここでは燃料以外のものについて述べる。一般にセラミック材料は、変形し難いという特徴を持っているほか、熱絶縁性・電気絶縁性を利用して原子炉のいろいろな部分で用いられる。炭化ホウ素（B₄C）のように中性子吸収物質を含む（ホウ素Bは熱中性子吸収断面積が大きい）材料は、原子炉の制御材料として利用される。

セラミック材料の種類としては、ベリリア（BeO）、炭化珪素（SiC）、アルミナ（Al₂O₃）、

酸化ユーロピウム (Eu_2O_3)、酸化リチウム (Li_2O)、チタン酸リチウム (Li_2TiO_3) などがあ
る。 SiC や Al_2O_3 は高温材料・断熱材・絶縁材として用いられるが、 BeO リリウムの特性を利用し
て中性子の反射材として用いられ、 Eu_2O_3 は高速増殖炉の制御材として利用される。一方、 Li_2O
や Li_2TiO_3 は核融合炉のトリチウム増殖のために利用される可能性がある。

2. 原子炉の型・構造と構造物の概要

1) 原子炉の種類

原子核の核分裂反応を利用する核分裂炉と核融合反応を利用する核融合炉があるが、後者の炉
はまだ実現していない研究開発途上のものである。核分裂炉には**熱中性子炉**と高速中性子炉があ
る。熱中性子炉は冷却材あるいは減速材の種類などによって水冷却炉あるいは黒鉛減速炉などと
区別される。

熱中性子炉のうち軽水減速軽水冷却炉 (Light Water Reactor = WR) には沸騰水型軽水炉
(Boiling Water Reactor = BWR) と加圧水型軽水炉 (Pressurized Water Reactor = WR) の2種類
がある。**重水**炉には重水減速加圧重水冷却炉と重水減速沸騰軽水冷却炉がある。ガス冷却炉に
は、英国で開発された炭酸ガス冷却炉 (Gas-Cooled Reactor = GCR, Advanced Gas-Cooled
Reactor = AGR) および黒鉛減速ヘリウム冷却高温炉 (High Temperature Gas-Cooled Reactor =
HTGR) がある。

高速炉にはナトリウム冷却炉とヘリウムガス冷却炉があり、いずれも開発研究途上のものであ
る。高速炉では高速中性子がそのまま**核反応**にあずかるので、減速材を必要としない。

核融合炉としては、現在、国際熱核融合実験炉 (International Thermonuclear Experimental
Reactor = ITER) が国際協力の下で開発途上にある。

2) 原子炉の構造と構造物

(1) 燃料棒・燃料体

軽水炉の燃料被覆管にはジルコニウム合金すなわちジルカロイ-2、ジルカロイ-4などが用いら
れる。重水炉の**圧力管**はカランドリアとよばれ、やはりジルコニウム合金からできている。ガス
冷却炉では、炭酸ガス冷却型・ヘリウム冷却型ともに燃料棒・燃料ブロックには高純度黒鉛材料
が用いられる。高速増殖炉の燃料被覆管にはステンレス鋼 (SUS316) あるいはその改良材が用
いられる。

(2) 減速・反射体

軽水炉では、軽水が減速・反射の機能をもっているが、重水炉では減速は重水、冷却は重水と
軽水の両方がある。ガス冷却炉では、減速は燃料ブロックがその役割を果たし、反射体ブロッ
クが炉心の周囲に配置され、中性子を炉心部に集める役目を持っている。

(3) 制御棒

熱中性子炉用制御材料としては、炭化ホウ素、カドミウムなどが用いられ、高速中性子炉では
タンタル、酸化ユーロピウムなどが使われる (**表6**)。一方、被覆材料としてはステンレス鋼、
ニッケル合金、黒鉛材料などが用いられ、高温ガス炉用では将来C/Cコンポジットの利用が考え
られている。

(4) 圧力容器

軽水炉、高温ガス炉、炭酸ガス冷却炉ともに鋼材が使用されている。軽水炉では耐応力腐食割
れ性のマンガンーモリブデン鋼 (A533B) が主として用いられている。ここでは、照射脆化によ
る延性—脆性遷移温度の上昇、破壊靱性の低下、応力腐食割れが問題となる。高温ガス冷却炉で
は、HTTRの場合、クロモリ鋼 (A387 Grade22 = 2.25Cr-1Mo鋼の焼きならし・焼き戻し材) が使
用されている。ここでの問題はリンなどが原因となる結晶粒界の長時間熱脆化と破壊靱性の低下
などである。

(5) 格納容器

原子炉、一次冷却設備およびその関連施設を格納する気密な容器のことである。鋼製、プレ
ストレスコンクリート製、鉄筋コンクリート製などの容器がある。

(6) 遮蔽材

遮蔽材は原子炉の核分裂反応から生じる中性子、 **γ 線**などの放射線を遮断し、減衰させるた
めに必要な材料である。したがってこの材料には、中性子吸収特性がよいこと、中性子反射・減
速性能がよいこと、 γ 線減衰特性がすぐれていることなどが要求される。このような条件を満足す
る材料としては原子番号が大きく、密度が大きいこと、水素原子を含むこと、ホウ素を含むこと
などがあり、実際上の材料としては、水、黒鉛、炭化ホウ素、ホウ素含有鋼材、鉄、鉛、鉄コン
クリート、パラフィンなどが用いられる。

＜関連タイトル＞

[原子燃料の基礎 \(03-06-01-01\)](#)

[原子炉・核融合炉材料の照射損傷 \(03-06-01-05\)](#)

[原子炉材料の基礎（1） \(03-06-01-09\)](#)

＜参考文献＞

参考文献

- (1) 長谷川正義、三島良績（監修）：原子炉材料ハンドブック、日刊工業新聞社（1977）
 - (2) 日本原子力研究所：たゆまざる研究の軌跡（1995）
 - (3) 金属学会（編）：原子力材料（1989）
 - (4) 石森富太郎（編）：原子炉工学講座4、燃・材料、培風館（1974）
 - (5) 石野栞：照射損傷、東京大学出版会（1979）
 - (6) 炭素材料学会（編）：改訂 炭素材料入門（1984）
 - (7) 奥達雄、石原正博：構造設計法概論、三恵社（2003年2月）
 - (8) 東洋炭素株式会社：会社案内（2002）
-

表1 主なジルコニウム合金の標準成分と用途

合 金 名	開発国	合金添加元素(%)					用 途
		Sn	Fe	Ni	Cr	Nb	
ジルカロイ-1	アメリカ	2.5					
ジルカロイ-2	アメリカ	1.0	0.12				燃料被覆管, 圧力管
ジルカロイ-3	アメリカ	0.2/0.5	Fe+Ni+Cr:0.25/0.4				
ジルカロイ-4	アメリカ	1.5	0.15		0.10		燃料被覆管, 圧力管, スペーサー, 案内管, チャンネルボックス
オゼナイト0.5	ソ 連	1.2	0.1	0.1		0.1	燃料被覆管
オゼナイト1.0	ソ 連	Sn+Fe+Ni+Nb:1.0					
Zr-2.5Nb	カナダ					2.5	圧力管

[出典] 奥達雄、石原正博：構造設計法概論、三恵社(2003年2月)、p.25

表2 近代的オーステナイトステンレス鋼の組成と特性

系列	JIS (SUS)	化学成分(%)								特性
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	その他	
Cr-Mn系	201	≤0.15	≤1.00	5.50/7.50	≤0.06	≤0.03	3.50/5.50	16.00/18.00	N≤0.25	Niの一部をMo及びNiにて置換、304の代用品、強度高い。
	202	≤0.15	≤1.00	7.50/10.00	≤0.06	≤0.03	4.00/6.00	17.00/19.00	N≤0.25	
>17-7系	301	≤0.15	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.030	6.00/8.00	16.00/18.00	-	オーステナイト不安定、冷間加工硬化大、304より耐食性やや劣る。
	302	≤0.15	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.030	8.00/10.00	17.00/19.00	-	
	AISI302B	≤0.15	2.00/3.00	≤2.00	≤0.045	≤0.030	8.00/10.00	17.00/19.00	Mo*≤0.60	*任意、上に同じ。耐熱性付与。
快削系	303	≤0.15	≤1.00	≤2.00	≤0.20	≤0.15	8.00/10.00	17.00/19.00	-	切削性の改良。
	303Se	≤0.15	≤1.00	≤2.00	≤0.20	≤0.060	8.00/10.00	17.00/19.00	Se≤0.15	
>18-8系	304	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.030	8.00/10.50	18.00/20.00	-	18-8代表型。
	304L	≤0.030	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.030	9.00/13.00	18.00/20.00	-	極低炭素で耐粒界腐食性の向上、溶接のまま使用。
	305	≤0.12	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.030	10.50/13.00	17.00/19.00	-	302,304よりオーステナイト安定、加工硬化、磁性変化少なし。
	305Jl	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.030	11.50/13.50	16.50/19.00	-	
	308	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.030	10.00/12.00	19.00/21.00	-	上に同じ、302, 304より一般に耐食性良、304の溶接棒。
22-12系以上	309S	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.030	12.00/15.00	22.00/24.00	-	Cr,Ni量の増加に応じて耐食性、耐熱性を向上。加工硬化少なし、冷間加工による磁性ほぼなし。
	310S	≤0.08	≤15.0	≤2.00	≤0.040	≤0.030	19.00/22.00	24.00/26.00	-	
	AISI314	≤0.25	1.50/3.00	≤2.00	≤0.045	≤0.030	19.00/22.00	23.00/26.00	-	
17-10 Mo系 Mo+Cu系	316	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.030	10.00/14.00	16.00/18.00	Mo 2.00-3.00	還元性の酸に対する耐食性を向上、極低炭素化して 粒界腐食防止。
	316L	≤0.030	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.030	12.00/15.00	16.00/18.00	Mo 2.00-3.00	
	316Jl	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.030	10.00/14.00	17.00/19.00	Mo 1.20-2.75 Cu 1.00-2.50	Cu添加し耐酸性向上。
	316JlL	≤0.030	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.030	12.00/16.00	17.00/19.00	Mo 1.20-2.75 Cu 1.00-2.50	極低炭素化。
	317	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.030	11.00/15.00	18.00/20.00	Mo 3.00-4.00	Moの増加によりさらに耐食性を向上。
	317L	≤0.030	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.030	11.00/15.00	18.00/20.00	Mo 3.00-4.00	
Ti,Nb安定型	321	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.030	9.00/13.00	17.00/19.00	Ti≥5×C% Nb+Ta	炭化物生成元素添加によって炭化物を安定化し、粒界腐食を防止。
	347	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.030	9.00/13.00	17.00/19.00	≥10×C%	
	AISI348	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.030	9.00/13.00	17.00/19.00	Nb≥10×C%	Co≤0.2,Ta≤0.1 原子炉用。
冷間成形型	384	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.030	17.00/19.00	15.00/17.00	-	冷間加工による硬化度小、コールドヘッダー用材料よりすぐれている。
	385	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.030	14.00/16.00	11.50/13.50	-	

[出典]奥達雄、石原正博：構造設計法概論、三恵社(2003年2月)、p.22

表3 圧力容器鋼材の材料規格の概要

材料規格 (ASTM/1975年)			化学成分(wt%)									機械的性質				関連相当材料規格
規格 番号	タイプ プレート	クラス	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	降伏 強さ (MPa)	引張り 強さ (MPa)	伸び (%)	絞り (%)	
A533	B	1	≤0.25	0.15/0.30	1.15/1.50	≤0.035	≤0.04	0.40/0.70	—	0.45/0.60	—	≥345	552/689	≥18	—	JIS:G3120/2種/SQV2A
		2	≤0.25	0.15/0.30	1.15/1.50	≤0.035	≤0.04	0.40/0.70	—	0.45/0.60	—	≥483	621/793	≥16	—	JIS:G3120/2種/SQV2B
		3	≤0.25	0.15/0.30	1.15/1.50	≤0.035	≤0.04	0.40/0.70	—	0.45/0.60	—	≥483	689/962	≥16	—	—
A508	—	1	≤0.35	0.15/0.35	0.40/0.90	≤0.025	≤0.025	≤0.4	≤0.25	≤0.1	0.05	≥241	483/655	≥20	≥38	JIS:3212/1種/SFVV1
		2	≤0.27	0.15/0.35	0.50/0.90	≤0.025	≤0.025	0.50/1.00	0.25/0.45	0.55/0.70	0.05	≥345	552/724	≥18	≥38	JIS:3212/2種/SFVV1
		3	0.15/0.25	0.15/0.35	1.20/1.50	≤0.025	≤0.025	0.40/1.00	≤0.25	0.45/0.60	0.05	≥345	552/724	≥18	≥38	JIS:3212/1種/SFVV1
		4	≤0.23	≤0.3	0.20/0.40	≤0.02	≤0.02	2.75/3.90	1.50/2.00	0.40/0.60	0.03	≥586	724/896	≥18	≥45	—
A542	—	1	≤0.15	≤0.5	0.30/0.60	≤0.035	≤0.035	—	2.00/2.50	0.90/1.10	0.03	≥586	724/862	≥14	—	—
		2	≤0.15	≤0.5	0.30/0.60	≤0.035	≤0.035	—	2.00/2.50	0.90/1.10	0.03	≥689	793/931	≥13		
		3	≤0.15	≤0.5	0.30/0.60	≤0.035	≤0.035	—	2.00/2.50	0.90/1.10	0.03	≥518	655/793	≥20		
		4	≤0.15	≤0.5	0.30/0.60	≤0.035	≤0.035	—	2.00/2.50	0.90/1.10	0.03	≥414	586/724	≥20		
A543	A	1	≤0.23	0.20/0.35	≤0.4	≤0.035	≤0.04	厚さ101.6mm 以下: 2.6/3.25	1.50/2.00	0.45/0.60	0.03	≥586	724/862	≥14	—	—
		2	≤0.23	0.20/0.35	≤0.4	≤0.035	≤0.04		1.50/2.00	0.45/0.60	0.03	≥689	793/931	≥14		
		3	≤0.23	0.20/0.35	≤0.4	≤0.035	≤0.04		1.50/2.00	0.45/0.60	0.03	≥482	621/793	≥16		
	B	1	≤0.23	0.20/0.35	≤0.4	≤0.02	≤0.02	厚さ101.6mm 以下: 2.6/3.25	1.50/2.00	0.45/0.60	0.03	≥586	724/862	≥14		
		2	≤0.23	0.20/0.35	≤0.4	≤0.02	≤0.02		1.50/2.00	0.45/0.60	0.03	≥689	793/931	≥14		
		3	≤0.23	0.20/0.35	≤0.4	≤0.02	≤0.02		1.50/2.00	0.45/0.60	0.03	≥482	621/793	≥16		
A387	22	1	≤0.15	≤0.5	0.3/0.6	≤0.035	≤0.035	—	2.00/2.50	0.90/1.10	—	≥205	415/585	≥18	≥40	焼戻し:675℃
		2	≤0.15	≤0.5	0.3/0.6	≤0.035	≤0.035	—	2.00/2.50	0.90/1.10	—	≥310	515/690	≥18	≥40	JIS:SCMV4

[出典]奥達雄、石原正博:構造設計法概論、三恵社(2003年2月)、p.6

表4 原子炉に使用される耐食耐熱合金の化学組成

合 金	該 当 規 格				化 学 成 分 (wt%)													備考
	JIS	Al Si	ASTM	AMS	C	Si	Mn	Ni	Cr	Co	Mo	W	Nb	Ti	Al	Fe	その他	
インコイ 800	NCF2		B-163,B-407 B-408,B-409		0.05	0.50	0.75	32.5	21.0					0.38	0.38	46		鑄造合金
801				5552,5742	0.05	0.50	0.75	32.0	20.5					1.13		44.5		
802					0.32	0.38	0.75	32.5	21.0					0.75	0.58	46		
901				5660,5661	0.05	0.40	0.45	42.7	13.5		6.2			2.5	0.25	残	0.015B	
A-286	SUH660	660	A-453,A-461	5525,5731,5732 5734,5735,5736 5737,5804,5805 7235,7478,7479 7481	0.05	0.40	1.40	26	15		1.25			2.15	0.2	残	0.03V	
HK-40	SCH22		A-297,A-351,A-567		0.41	1.02	0.87	20.53	24.37		0.01					残		
ハステロイ B			A-494,B-295,B-304 B-333,B-335	5396	0.05	1.0	1.0	残	1.0	2.50	28					5		
C			A-194,A-567,B-295 B-304,B-334,B-336	5388,5389,5530 5750	0.04	0.50	0.35	残	16.0	1.0	16.0	4.0				6	0.2V	
C-276					0.004	<0.01	0.34	残	16.4	1.1	16.3	3.7			0.22	6	0.2V	
X		680	B-435	5390,5536,5587 5588,5754,5798 5799,7237	0.10	1.0	1.0	残	22	2.0	9	0.6				18		
ハステロイ R-235		686			0.15			残	15.5	Max. 2.5	5.5			2.5	2.0	10		
インコネル 600	NCF1	—	B-163,B-166 B-167,B-168	5540,5580,5665 5683,5687,7232	0.08	0.25	0.5	76.0	15.5							8.0		
601					0.05	0.25	0.5	60.5	23.0						1.35	14.1	0.25Cu	
617					0.03	0.43	0.04	残	20.5	12.0	8.5			0.35	1.20	—		
625		—	B-443,B-444 B-446	5599,5666	0.05	0.25	0.25	61.0	21.5		9.0		3.7	0.2	0.2	2.5		
700					0.16	0.25	0.10	残	15.0	28.0	3.0			2.2	3.0	0.07		
702		—	—	5550	0.04	0.20	0.05	残	15.6					0.7	3.4	0.4		
718		—	—	5383,5589,5590 5596,5597,5562 5563,5564,5832	0.04	0.30	0.20	残	18.6		3.1		5.0	0.9	0.4	18.5		
X-750	(NCF 3)	688	A-461	5542,5582,5598 5667,5668,5669 5670,5671,5699 5779	0.04	0.70	0.30	残	15.0				0.90	2.50	0.80	6.80		
Nimonic 80A					0.05	0.50	0.70	残	20.0	Max. 2.0				2.30	1.2	Max. 5.0		
Pyromet 860					0.05	0.10	0.25	44	13	4.0	6.0			3.0	1.0	残	0.01B	

表5 代表的高融点合金の機械的性質(Mo、Cr、Nb、Ta)

合金名	化学組成(wt%)	引張強さ(MPa)				100hr破断強さ(MPa)			
		RT	1366K	1477K	1589K	1366K	1477K	1316K	その他
Mo	Mo-0.06C	789	255-294		89	89			
TZM	Mo-0.5Ti-0.08Zr-0.03C	537-1055	537	448	370	359			
TZC	Mo-1.25Ti-0.3Zr-0.15C	828	394	373	269	276	234	145	
Cb-TZM	Mo-0.5Ti-0.3Zr-1.5Nb-0.03C				307			230	
BM-3	Mo-1Ti-0.5Zr-1.5Nb-0.4C	422-843	667	588	490			245	157(1673K)
UM2A	Mo-0.1Ti-0.1Zr-0.004	785	373	324	255	245	78.5		
Nb	Nb-0.024C	331	69.6	63.7	41.2	21.6	27.5		
Nb-1Zr	Nb-1Zr	325	159	63.7		41.2-131	26.5	15.7	
C-129Y	Nb-10W-10Hf-0.1Y	610	273	207	179	68.6-104			
FS-85	Nb-11W-28Ta-0.05Mo-0.9Zr-0.1Hf	586	269	234	159	68.6-160	68.6-113	68.6-92.2	
Cb-132M	Nb-20Ta-15W-5Mo-1.5Zr-0.1C	906	614-904		397	318	222	186	
B-88	Nb-28W-2Hf-0.07C				366	386	248	176-221	
Cb-1	Nb-30W-1Zr-0.06C-0.04N					427	331	241	
BH-4	Nb-9.5Mo-1.5Zr-0.03La-0.3C	735-785	693	531	363	284	184	152	
T-222	Ta-9.6W-2.4Hf-0.01C	755	372	165	98.1	193	34.4		
IM-16	Cr-0.5Ta-0.25B-0.25C-0.05Y					147	123		
BX-2	Cr-0.15Ti-0.2V-0.02C	343	127						

[出典]奥達雄、石原正博：構造設計法概論、三恵社(2003年2月)、p.29

表6 原子炉で使用する主な制御棒材料

制御材	原子炉の型	被覆材
Ag-15%In-5%Cd合金	加圧水型軽水炉(PWR)	ステンレス鋼
炭化ホウ素(B_4C)粉末	重水炉、軽水炉	ステンレス鋼
炭化ホウ素(B_4C)ペレット	高速増殖炉(FBR);常陽など	ステンレス鋼
タンタル(Ta)	高速増殖炉(FBR);Phoenix	ステンレス鋼
酸化ユーロピウム(Eu_2O_3)ペレット	高速増殖炉(FBR);BOR-60	ステンレス鋼
ホウ素(3%)含有鋼	炭酸ガス冷却炉、AGR	低合金鋼
炭化ホウ素(B_4C)	高温ガス冷却炉(HTGR)	インコロイ-800

[出典]金属学会(編):原子力材料(1989年4月)、p.211

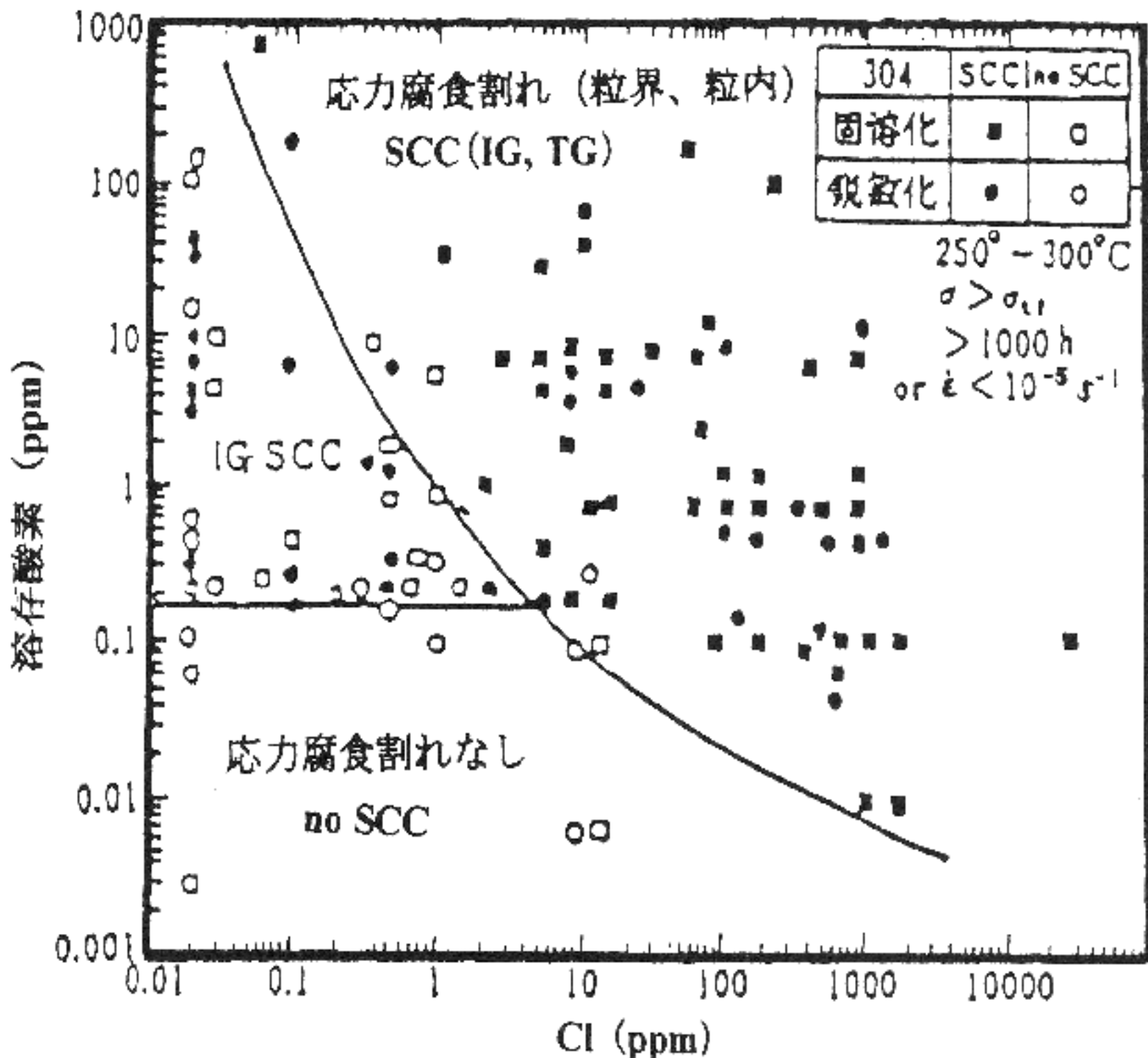
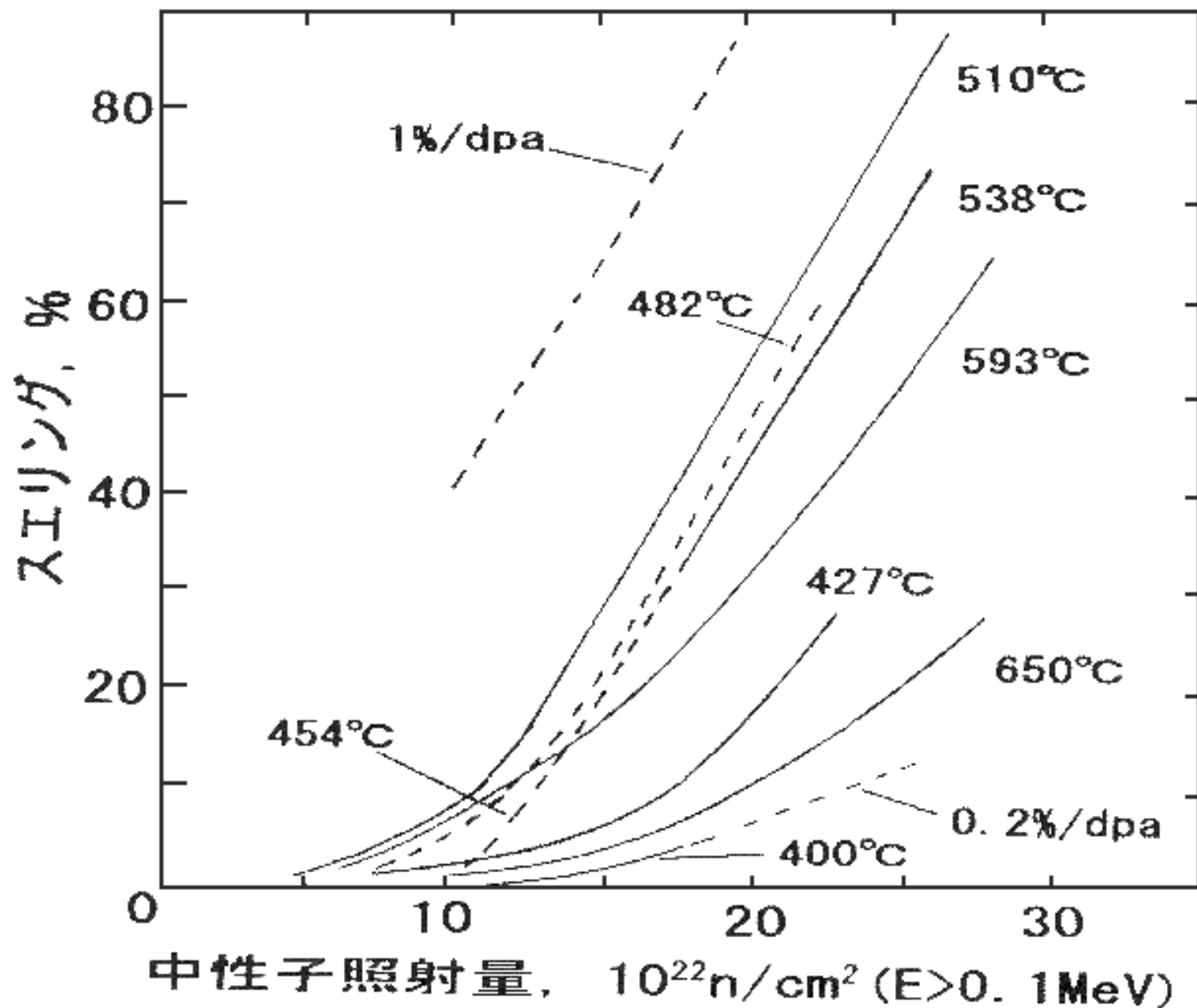


図1 ステンレス鋼(SUS304)の高温高圧水による応力腐食割れに及ぼす溶存酸素と塩素イオンの影響

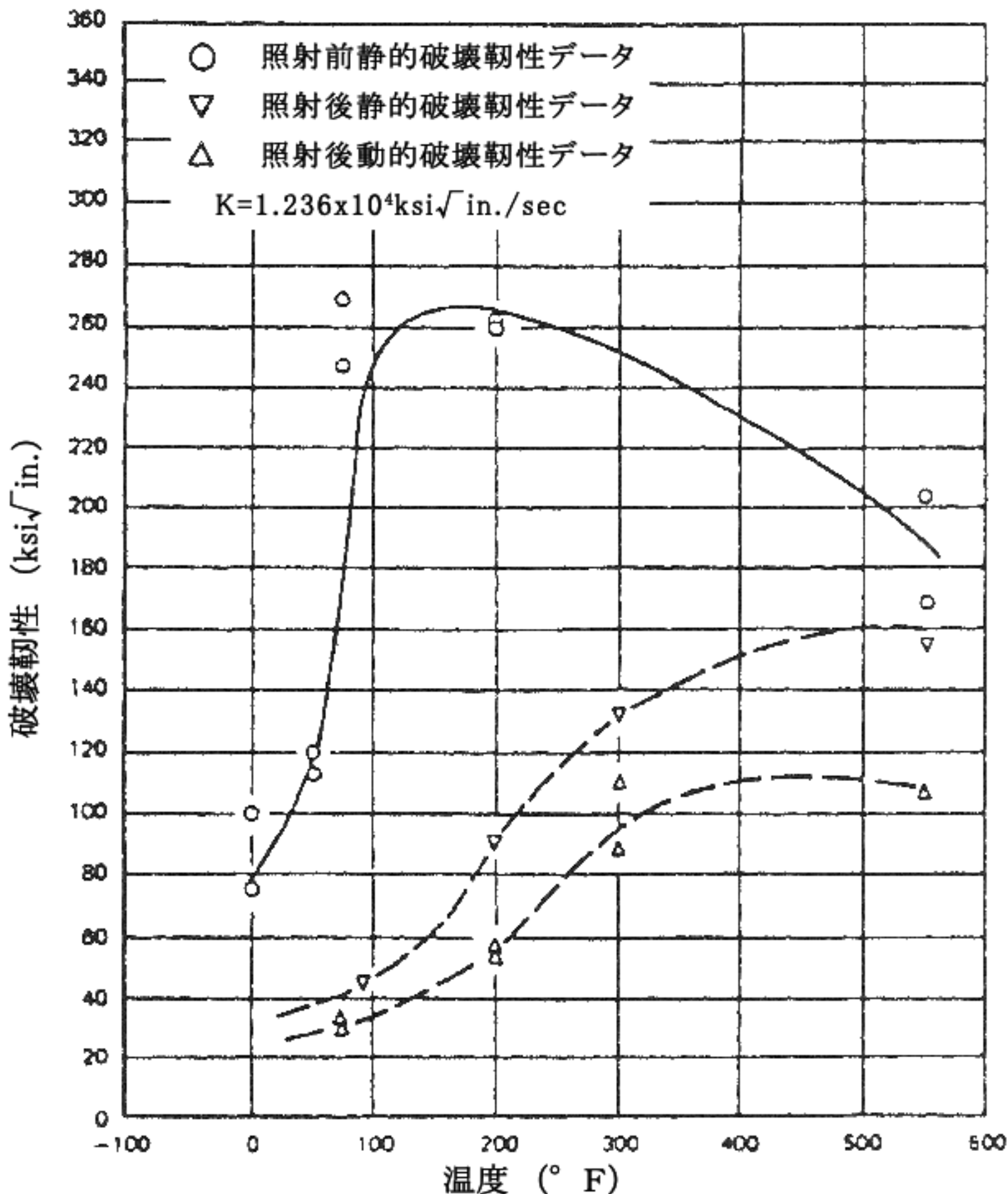
[出典]奥達雄,石原正博:構造設計法概論、三恵社(2003年2月)、p.24



(注) 各曲線は1個の試験片のデータを示す

図2 耐スエリング性とクリープ強さを高めるため20%冷間加工したステンレス鋼(SUS316)のボイドスエリング

[出典] 奥達雄、石原正博: 構造設計法概論、三恵社(2003年2月)、p.25



(注) 照射量: $2.2 \times 10^{23} \sim 2.5 \times 10^{23} \text{ n/m}^2$, $E_n > 160 \text{ fJ}$

図3 超厚板鋼板(A533B Cl.1)から採取した10mm厚さのコンパクトテンション(CT)試験片による照射前後の動的引裂き(DT)試験結果

〔製造プロセス〕

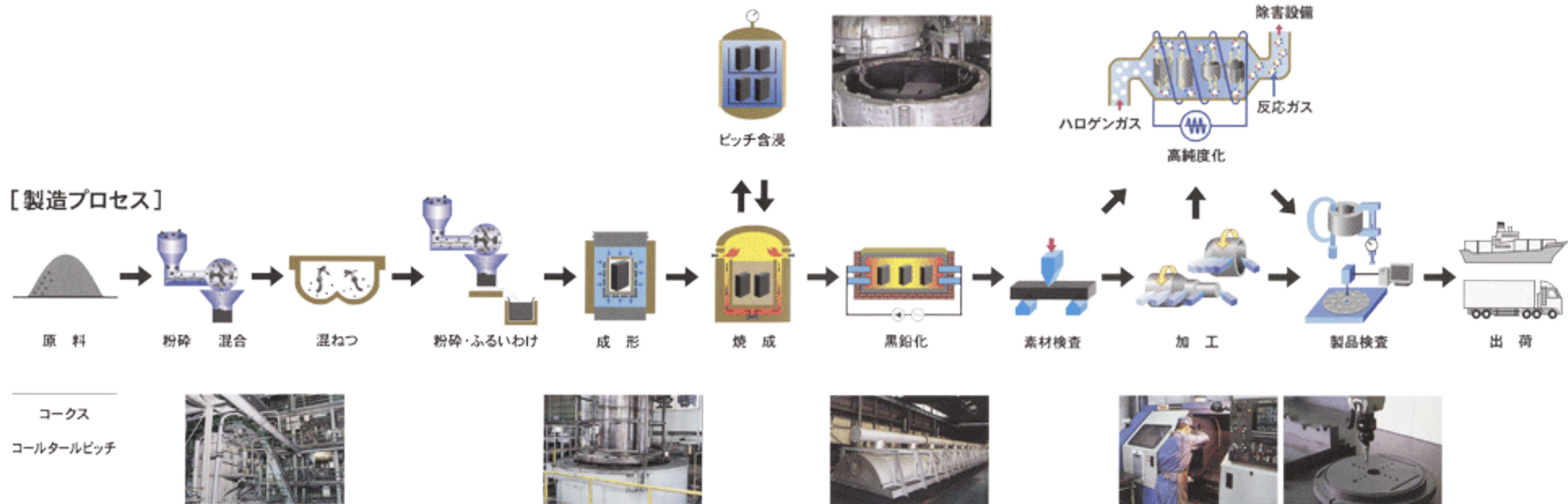


図4 人造黒鉛材料の製造工程

〔出典〕東洋炭素株式会社：会社案内（2002）