

JAERI-Research



JP0150482

2001-029



## セラミックス製スリーブを用いた アルミナパイプ同士の接合基礎実験

2001年5月

阿部 哲也・廣木 成治・丹澤 貞光・古作 泰雄  
竹内 久雄\*・山川 晃\*

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

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越し下さい。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布を行っております。

This report is issued irregularly.

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

## セラミックス製スリーブを用いたアルミナパイプ同士の接合基礎実験

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部  
阿部 哲也・廣木 成治・丹澤 貞光・古作 泰雄  
竹内 久雄\*・山川 晃\*

(2001年2月22日受理)

収縮性アルミナスリーブと高融点ソルダーを用いてアルミナパイプ同士を接合するための基礎実験を行った。スリーブは、接合時に1%収縮するよう、高純度アルミナ粉末を1400°Cで1次焼結して作製し、ソルダーは、1400°C以上で液相を生成するアルミナーカルシア系を選択し、アルミナと炭酸カルシウムの混合粉末をペースト化して作製した。

パイプとスリーブの間にソルダーを介在させ、1500°Cで加熱接合した結果、スリーブの収縮とソルダーによる接合界面の形成によって、金属溶接に匹敵する気密性を持ったパイプ接合体が得られた。

Preliminary Joining Experiment of Alumina Pipes by using Ceramics Sleeve

Tetsuya ABE, Seiji HIROKI, Sadamitsu TANZAWA, Yasuo KOSAKU,  
Hisao TAKEUCHI\* and Akira YAMAKAWA\*

Department of Fusion Engineering Research  
Naka Fusion Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 22,2001)

Preliminary experiments on alumina ceramics pipes joining by using shrinkable alumina sleeve and high melting point oxide solder have been carried out.

Sleeves were prepared by way of sintering at relatively low temperature to shrink 1% during following joining process. As solder, alumina-calcia system was selected and paste containing alumina and calcium carbonate powder mixture was prepared.

Joining was carried out by inserting the paste between sleeve and pipes, and by heating at 1500°C in air. By the shrink of sleeve and the formation of interface by solder, it was possible to realize the joined pipe without the vacuum leakage. The airtightness of the joined alumina pipes is almost equal to it of the metal pipe welding.

Keywords: Joining , Alumina Pipes, Ceramics Sleeve, Oxide solder,  
Alumina-calcia,Sintering, Airtightness, Experimental

---

\*Sumitomo Electric Industries Ltd.

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 実験方法 .....	1
2. 1 アルミナパイプ及びアルミナスリーブの製作 .....	1
2. 2 ソルダーの作製 .....	2
2. 3 接合手順 .....	2
2. 4 表面形態観察および気密性能試験 .....	2
3. 結果及び考察 .....	3
3. 1 アルミナスリーブの特性 .....	3
3. 2 ソルダーの特性 .....	3
3. 3 接合特性 .....	3
3. 4 接合部の表面形態および気密性 .....	4
4. まとめ .....	4
謝 辞 .....	4
参考文献 .....	4

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Experimental .....	1
2.1 Preparation of Alumina Pipes and Sleeves .....	1
2.2 Preparation of Solder .....	2
2.3 Joining Procedure .....	2
2.4 Measurement of Morphology and Vacuum Tightness...	2
3. Results and Discussion .....	3
3.1 Properties of Alumina Sleeves .....	3
3.2 Properties of Solder .....	3
3.3 Properties of Joining Parts .....	3
3.4 Morphology and Vacuum Tightness of Joining Parts...	4
4. Summary .....	4
Acknowledgement .....	4
References .....	4

This is a blank page.

## 1. はじめに

金属に比較して格段に耐熱性が優れているセラミックスは、高温雰囲気下で使用できる構造材料として極めて魅力的である。しかしながら、セラミックスは、金属材料の様に容易に曲げたり溶接したりする技術が確立していないため、小型のセラミックス片を溶接して複雑で大型の構造物を形成させるということは非常に難しいのが現状である。

本研究では、金属材料の溶接に相当するセラミックス同士の接合技術を開発するための基礎データを得ることを目的として、高温においても、気密性、機械強度が維持可能な、収縮するセラミックススリーブと高融点ソルダーを用いた接合方法(以下スリーブ接合法と呼ぶ)についての基礎的実験を行った。スリーブは接合時に収縮してソルダー部の気泡等の欠陥生成を防止して気密性を高めると共に、接合部の機械的強度、信頼性を向上させる役割を成すものである。

本研究で用いた接合供試体であるセラミックスパイプ(接合されるセラミックスパイプ)およびセラミックススリーブの種類は、ともにアルミナ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )である。アルミナを選択した理由は、水素雰囲気中や大気中における耐水素脆性、耐酸化性等に優れないとともに、高温で使用できる電気絶縁材料として最も多用されているからである。また、試験に用いたアルミナスリーブは、接合時に僅かに熱収縮するよう低温焼結で成形すると共に、ソルダーには、アルミナとの親和性およびアルミナが熱収縮する温度で液相となること等を考慮して、アルミナーカルシア(CaO)系を選択した(具体的にはアルミナー炭酸カルシウム( $\text{CaCO}_3$ )混合粉末)。

本報告では、収縮するアルミナスリーブ並びにアルミナーカルシア(CaO)系ソルダーの製作方法およびこれらを用いて製作したアルミナパイプ接合体の接合部の形態および気密性についての基礎的実験の結果について述べる。

## 2. 実験方法

### 2.1 アルミナパイプ及びアルミナスリーブの製作

アルミナスリーブ製作手順をFig.1に示す。

パイプの素材としては、市販のアルミナパイプ(日本化学陶業社製SSA-Sグレード、純度:99.5%、常用使用温度:1850°C、外径:10.5mm、内径:6mm)を用い、外径を9.525mm(3/8インチ)、長さを40~70mmに加工して、被接合用パイプ試料を作製した。

スリーブの原料としては、高純度で微細なアルミナ粉末(住友化学社製AKP-50、純度:99.99%、平均粒径:0.2 μm)を用いた。この粉末に、蒸留水を溶媒として分散剤を0.5%添加し、樹脂製のボール及びボールミルを用いて48時間分散させた。さらに、成形助剤として水に分散したパラフィン系樹脂を固形分換算で1.0%添加し、1時間混合して、鋳込み成形用スラリーを得た。スラリー中のアルミナ粉末濃度は、42vol%であった。

このスラリーを中心を有する鋳込み成形型に注入し、1MPaの加圧下で筒形状(外径:20mm、内径:8mm、高さ:33mm)に固化させた。成形に要した時間は約5分であった。常温で48時間自然乾燥した後、50°Cに保った乾燥機内で24時間保持して乾燥を完了し、さらに、成形助剤等有機物成分の除去及びその後の予備加工工程において必要な圧粉体強度確保のため、Fig.2(a)に示す温度パターンに従って大気中において最高1000°Cで加熱した。

これらの圧粉体は外径19.5mm、内径9.2mm、高さ31mmに機械加工した後、大気中において1400°Cで一次焼結した。1400°Cにおける保持時間は30分、昇温速度は10°C/分とした。この一次焼結条件は、焼結温度と収縮率の関係を求める予備実験によって、二次焼結における収縮率が1%(内径収縮量は約100 μm)となる様定めた。予備実験は、大気中において、最高温度での保持時間を30分、昇温速度を10°C/分の温度条件で実施した。

収縮スリーブは研削加工により、スリーブ内径が被接合用パイプの外径( $\phi 9.525\text{ mm}$ )に若干の所定空隙量を加えた大きさに、外径はこの内径にさらに所定のスリーブ肉厚(1~3mm)を加えた大きさに、さらにスリーブ長さは24mmに成形された。

## 2. 2 ソルダーの作製

ソルダーとしては、高圧ナトリウムランプにおいて透光性アルミナの封止に用いられるアルミニカルシア系を選択した[1]。この系においては、被接合材料との親和性や熱膨張係数の制御を目的に、マグネシア(MgO)や酸化ホウ素(B<sub>2</sub>O)等を添加することが行われている[2]。本研究においても、これらの添加効果について探索的検討を行ったが、実験結果に明確な差は見られず、添加物は導入しなかった。

ソルダーとしては、アルミナ粉末(AKP-50)と炭酸カルシウム粉末(高純度化学社製、純度:99.9%)から構成された混合粉末を用いた。この系は、Fig.3[3]に示す様に、配合比が5CaO·3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の付近で液相生成温度が約1400°Cまで低下することが知られている。この配合比になるよう両粉末を秤量し、エタノールを溶媒として樹脂製のボール及びボールミルを用いて24時間混合した。1時間自然乾燥してアルコールを除去後、60°Cで5時間保持して乾燥を完了させ、アルミナ製ロールミルを用いてビヒクル(セラミックス粉末を溶剤で練ったもの)と混練してペースト化した。

## 2. 3 接合手順

接合のための加熱処理に先立ち、上記パイプ、スリーブ、ソルダーをFig.4の様に組合せた。スリーブとパイプの空隙(径の差)は、スリーブ単独の内径収縮量(約100 μm)と同じかそれより小さい20-100 μmの範囲に設定した。

ソルダー中の有機溶媒(主成分はテルピネオール)を除去するために、まずソルダーを60°C及び80°Cに各々24時間加熱処理した後、さらに大気中、800°Cで2時間加熱処理して有機バインダーを除去すると共に、炭酸カルシウムを熱分解させた。昇温手順をFig.2(b)に示す。バインダーの分解は600°C以下の温度域でほぼ完了するが、接合時にソルダー成分の酸化物と反応して一酸化炭素等のガスを発生し、欠陥の原因となる恐れのある微量のカーボン残滓を生成するので、これを燃焼・除去するため800°Cまで昇温した。冷却後、大気中で10°C/分で1500°Cまで加熱して30分間保持し、ソルダーを溶解・固化させると共にスリーブを収縮させ、接合を完了した。

## 2. 4 表面形態観察および気密性能試験

接合した試料は、スリーブの外径を測定して収縮状況を調べると共に、ヘリウムを探索ガスとして接合部に吹きかけてヘリウムリークディテクター(島津製作所製MSE-11AP)により漏洩していくヘリウム量を検知することで接合部の気密性を測定した。さらに、接合部を、Fig.4に示した面で機械的に切断して、割れの有無やソルダー層の厚さを観察すると共に、走査型電子顕微鏡(SEM、日本電子社製JSM-6300F)とEDS(Link社製Exl)によって、接合状況及び元素の拡散状況の観察を行った。また、接合時の加熱処理がパイプ及びスリーブの組織に及ぼす影響を調べるため、加熱前後の試料について破面組織観察を行った。

### 3. 結果及び考察

#### 3.1 アルミナスリーブの特性

スリーブの一次焼結条件を決めるための予備的な収縮挙動測定結果をFig.5に示す。収縮量が飽和する温度は1500°Cであった。収縮曲線から、一次焼結温度を1400°Cにすれば、収縮が完了する温度域で接合を完結させるための二次焼結(焼結温度;1500°C)処理による収縮率が1%となり、内径(約 $\phi 9.5\text{mm}$ )の収縮量を約 $100\mu\text{m}$ にできると推定された。接合時の収縮量については、明確な根拠があるわけではないが、収縮量制御の容易性、一次焼結体の加工性(焼結温度が高いほど、粒成長が進んで砥石の目詰まりが生じにくくなると共に強度が高くなり加工が容易になる)を考慮し、この条件を選択した。Photo.1に、完成したスリーブの外観を示す。肉厚は、左から、3mm, 2mm, 1.5mm, 1mmである。スリーブの内径側には、茶色に変色した部分が見られた。これは、スリーブは焼結温度が低く収縮途中であるため、Photo.2(b)BEFOREの様に粒径 $1\mu\text{m}$ 以下の非常に微細な脱落しやすい粒子からなっているのに加え、内径側は接合後の気密性維持のため面粗度を小さくする目的で微粒の砥石を用いて研削加工したため、砥石の目詰まり、摩耗が激しく、その一部が付着したためと考えられる。この付着物による影響については、今回は検討できなかった。

一次焼結体の接合時の収縮率を確認するため、加工後のスリーブを、収縮が十分に進む条件(1500°Cで30分間保持)で焼結して収縮量を測定した。スリーブの内径、外径、長さとも、収縮率は0.8~1.1%の範囲であり、想定通りの収縮挙動を示した。加熱に伴い、Photo.2(b)AFTERに示す様に、粒成長が進んで粒径は約 $3\mu\text{m}$ になった。一方、Photo.2(a)には、加熱前後のパイプ破面のSEM像を示す。スリーブの組織は、加熱後もパイプに比較すると微細均粒で、相対的に高強度を維持できると期待された。

#### 3.2 ソルダーの特性

得られたソルダーの粘度は、630PSであった。カルシア原料として、微細な炭酸カルシウム粉末を用いたため、空気中の水分との反応による特性変化が心配されたが、2ヶ月保管後も粘度や接合挙動に変化は見られず、実用的に問題がないことがわかった。

#### 3.3 接合特性

Table 1に、実験を行ったスリーブの肉厚とパイプとの空隙の組合わせを示す。測定値は同じ条件の試料の平均値を示す。

どの組合わせについても、有機溶媒、有機バインダーの分解、除去工程においては、目視で観測できる様な、膨れや噴出物は見られなかった。

接合温度は、アルミナーカルシア系の液相が生成し、スリーブの収縮が完了する最低温度である1500°Cとした。接合後のスリーブの外径収縮量をTable 1に併記した。スリーブ外径の収縮量は、3~57 $\mu\text{m}$ で、スリーブを単独で加熱処理したときの収縮量(肉厚1mmで約 $110\mu\text{m}$ 、3mmで約 $150\mu\text{m}$ )より明らかに小さく、また、パイプとの空隙が小さいほど小さくなる傾向があり、パイプとソルダーによって径方向の収縮が抑制されたことが示された。

Table.1には、切断後断面における割れの有無についても併記した。スリーブの肉厚が薄い場合には、スリーブが割れることがあった。これらの割れの原因については、接合時の収縮によって引張応力が生じたためと推定されるが、接合後の試料は目視による限り割れは観測されておらず、また、後述するように真空漏れも観測されていないことから、試料片の切断調製時に荷重あるいは残留熱応力分布の変化によって割れたことも考えられ、今後さらに検討する必要がある。

### 3. 4 接合部の表面形態および気密性

**Photo.3**には、接合部のSEM像及び元素分布を示す。SEM像の中央の黒い部分がソルダーに、その両側の部分がカルシウムの拡散領域に相当する。SEM測定試料を調製する段階での研磨処理過程においてガラス層からなるソルダー部分が選択的に除去されるため窪んでいるが、割れや隙間は観測されず、スリーブが収縮して空隙がソルダー層で満たされることにより、良好な接合界面が形成されたと推定される。また、カルシウムの拡散距離は約 $5\mu\text{m}$ で、比較的小さい値となった。これは、接合温度が比較的低いためと推定される。**Photo 4**に接合後の試料外観を示す。

ヘリウムを探索ガスとした接合部の気密試験においては、**Table 1**のどの試料についても、ヘリウム実測値はヘリウムリークディテクターの検出感度以下( $10^{-9}\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{sec}(\text{He})$ )であった。この検出感度値  $10^{-9}\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{sec}(\text{He})$ は、金属製真空容器の溶接健全性を判断するために一般的に使われている指標であって、この値以下であれば、溶接界面に真空漏れが出現するような割れ、空隙等が存在していないといわれる。したがって、本接合試料には、金属材の溶接界面に匹敵するような極めて気密性の良好な接合界面が形成されていることがわかる。

### 4. まとめ

- (1) セラミックス同士の接合技術を開発するための基礎データの取得を目的として、収縮するセラミックススリーブと高融点ソルダーを用いた接合方法(スリーブ接合法)についての基礎実験を行った。
- (2) スリーブは、接合時に1%程度収縮するように、高純度アルミナ粉末を $1400^\circ\text{C}$ で1次焼結して作製した。  
ソルダーは、 $1400^\circ\text{C}$ 以上で液相を生成するアルミニカルシア系を選択し、アルミニと炭酸カルシウムの混合粉末をペースト化して作製した。
- (3) アルミニナパイプとアルミニナスリーブ間にソルダーを介在させ、 $1500^\circ\text{C}$ で加熱処理して接合させた結果、スリーブ自身の収縮とソルダーによって、金属材の溶接界面に匹敵するような極めて良好な気密性を有する接合界面が形成された。

### 謝辞

本研究を遂行するにあたり、試料製作にご協力いただきました住友電気工業株式会社伊丹研究所の関係各位に深く感謝致します。また、本研究にあたり、多くのご支援を頂きました核融合工学部 関 昌弘部長、日本真空技術株式会社 村上 義夫氏、ブランケット工学研究室の方々に深く感謝致します。

### 参考文献

- [1]高塙治夫, 窯業協会誌, 84(9) 420 (1976)
- [2]高塙治夫, 窯業協会誌, 82(5) 248 (1974)
- [3]Ernest M. Levin et al, "Phase Diagrams for Ceramists", p46(Fig.43) (1956)

**Table 1** Wall thickness and joining clearance of each tested sleeve

Wall thickness of sleeve (mm)	Joining Clearance (*1) ( $\mu$ m)	Sleeve Shrinkage ( $\mu$ m)	Crack (*2)		Number of Samples (-)
			Pipe (-)	Sleeve (-)	
1.002	49	21	0	1	2
1.510	51	24	0	0	2
2.007	53	35	0	0	2
3.015	48	57	0	0	1
1.005	21	3	0	1	2
1.010	95	40	0	0	2

(\*1)Difference between Inner Diameter of Sleeve and Outer Diameter of Pipe

(\*2)Number of Samples in Which Cracks Exist

[Preparation of Sleeves]

- ▽ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Powder (Sumitomo Chemical, AKP-50)
- Mixing Ball Milling
- Molding Slip Casting
- Machining
- Sintering 1400°C in air
- Machining Inner=φ 9.525mm+α (α=20~100μm)

[Preparation of Pipes]

- ▽ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Pipes Purity:99.5%, As-Sintered
- Machining φ 9.525mm

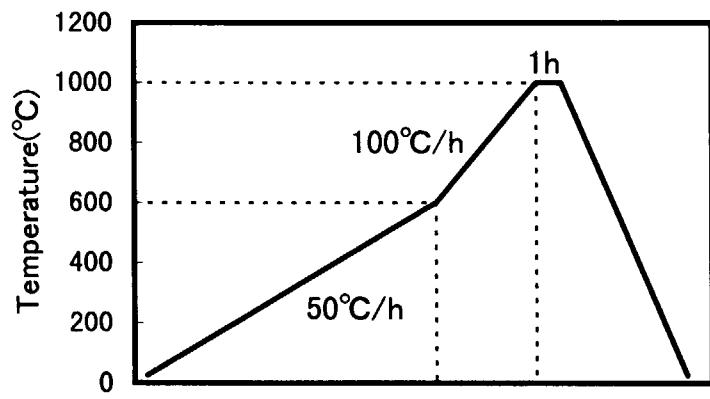
[Preparation of Paste]

- ▽ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Powder (Sumitomo Chemical, AKP-50)  
CaCO<sub>3</sub> Powder (Kojundo Chemical Lab., Purity:99.9%)
- Mixing Ball Milling
- Drying
- Kneading Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Roll Milling

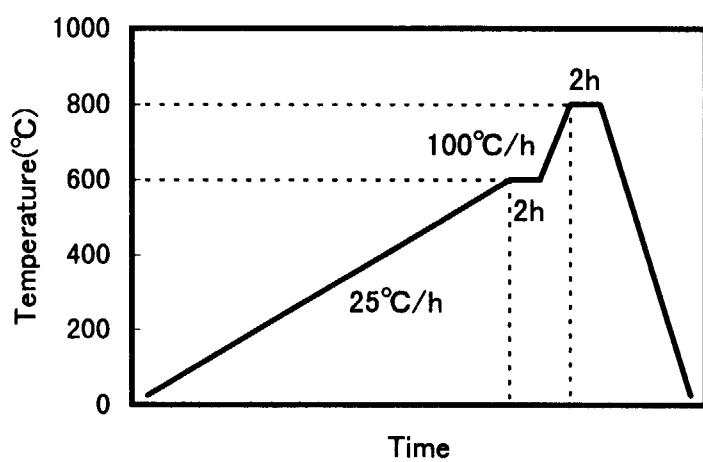
[Joining]

- Combination and Inserting paste
- Decomposition of organic binder 800°C in air
- Heat treatment for Joining 1500°C in air

Fig.1 Experimental procedure



(a) Preliminary Sintering of Sleeve

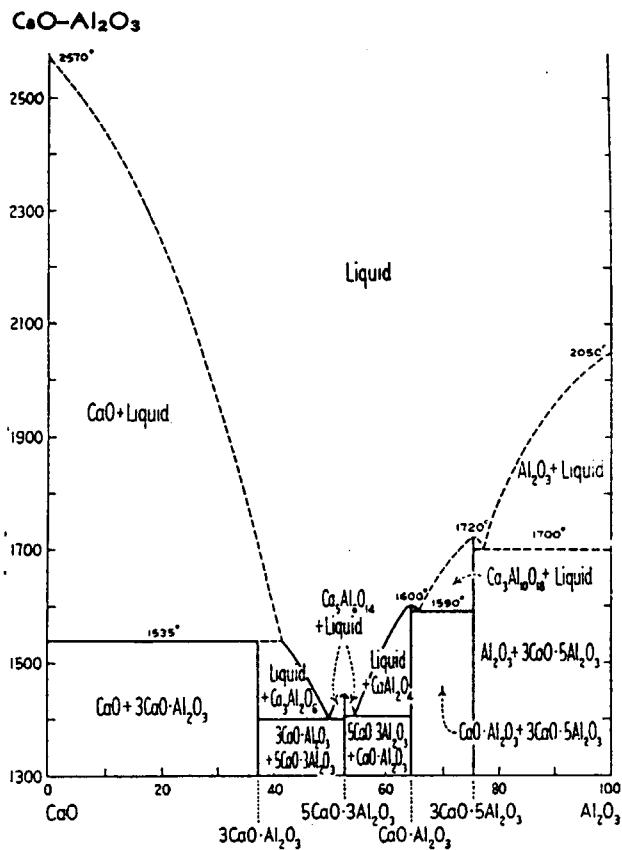


(b) Decomposition of Binder

**Fig.2** Heating treatment pattern for producing  $\text{Al}_2\text{O}_3$  pipe and sleeve. ;

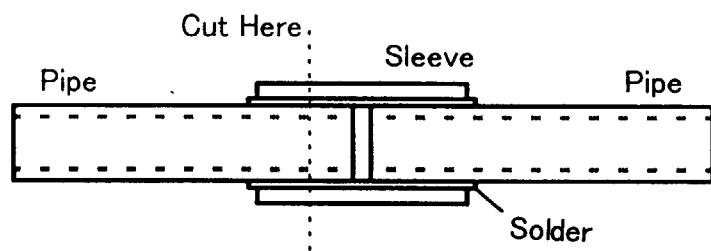
(a) Preliminary Sintering of Sleeve

(b) Decomposition of Binder

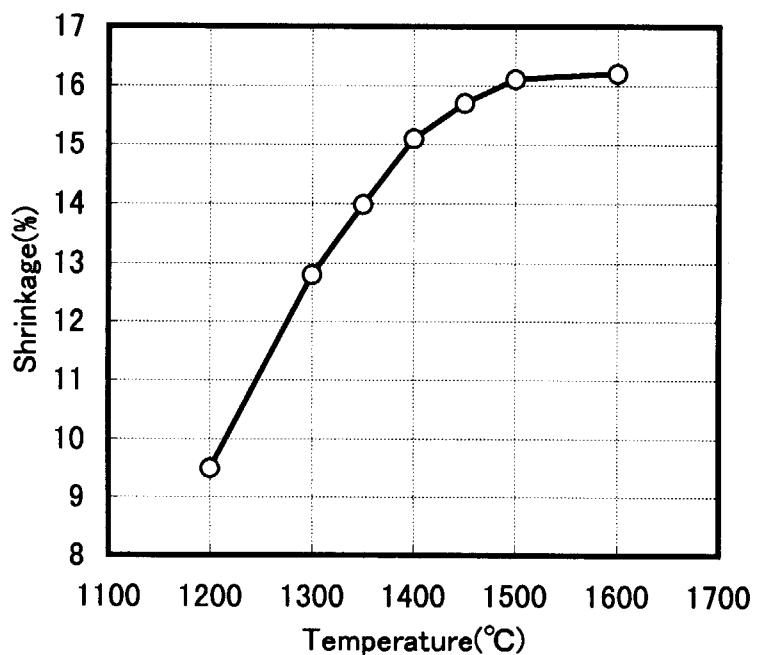
FIG. 43.—System CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

G. A. Rankin and F. E. Wright, *Am. J. Sci.*, 4th Ser., 39, 11 (1915). The compound designated 3CaO·5Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> is most probably CaO·2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, according to J. R. Goldsmith, *J. Geol.*, 56, 80-81 (1948).

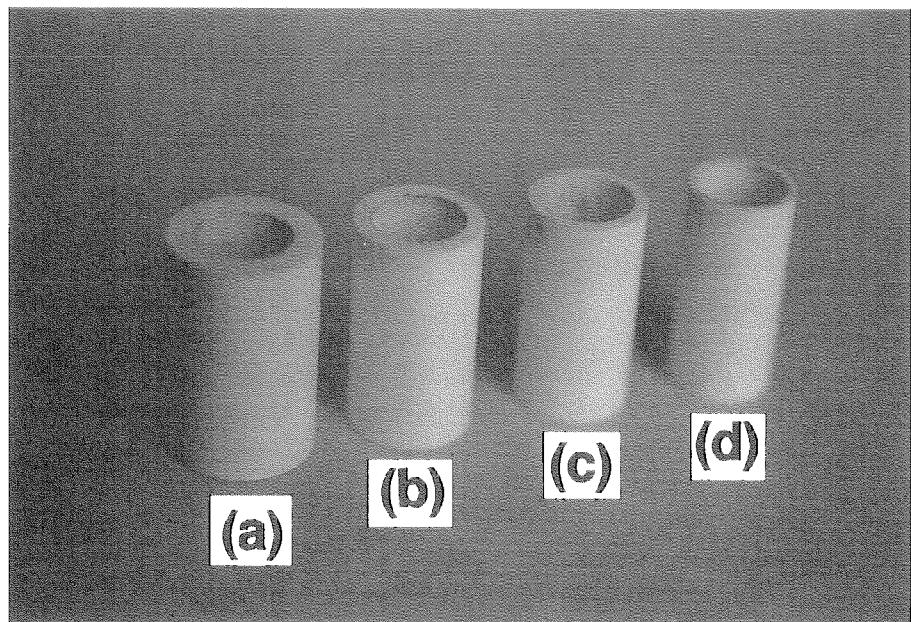
Fig.3 Phase diagram of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO



**Fig.4** Combination configuration of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  pipe,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sleeve and  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ Solder

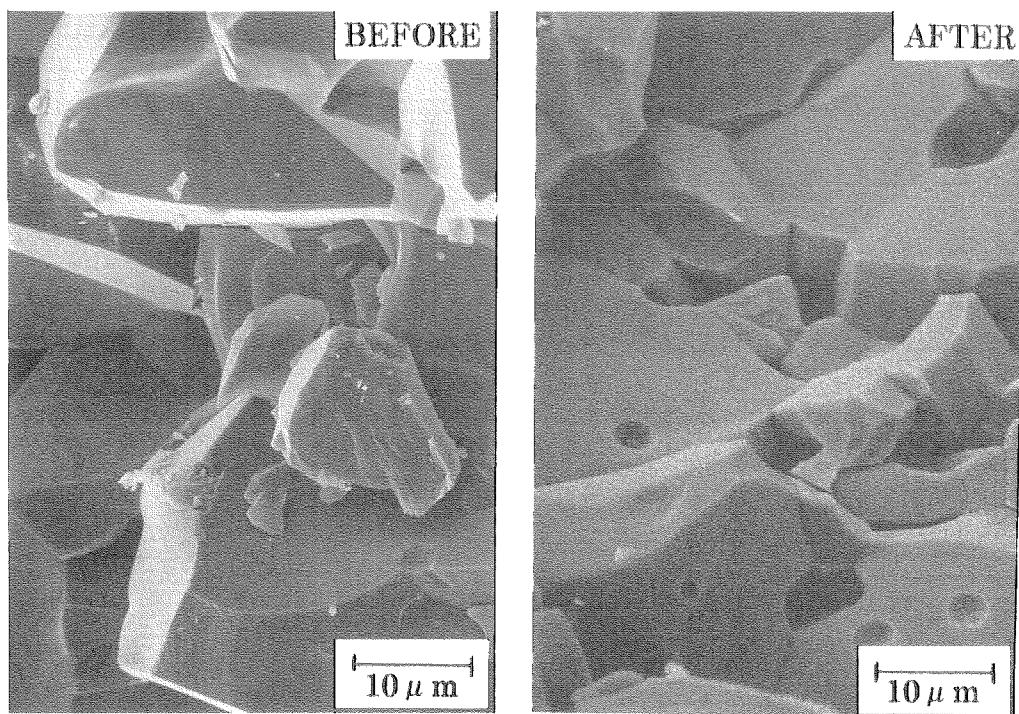


**Fig.5**  $\text{Al}_2\text{O}_3$  shrinkage change as a function of the heating temperature.

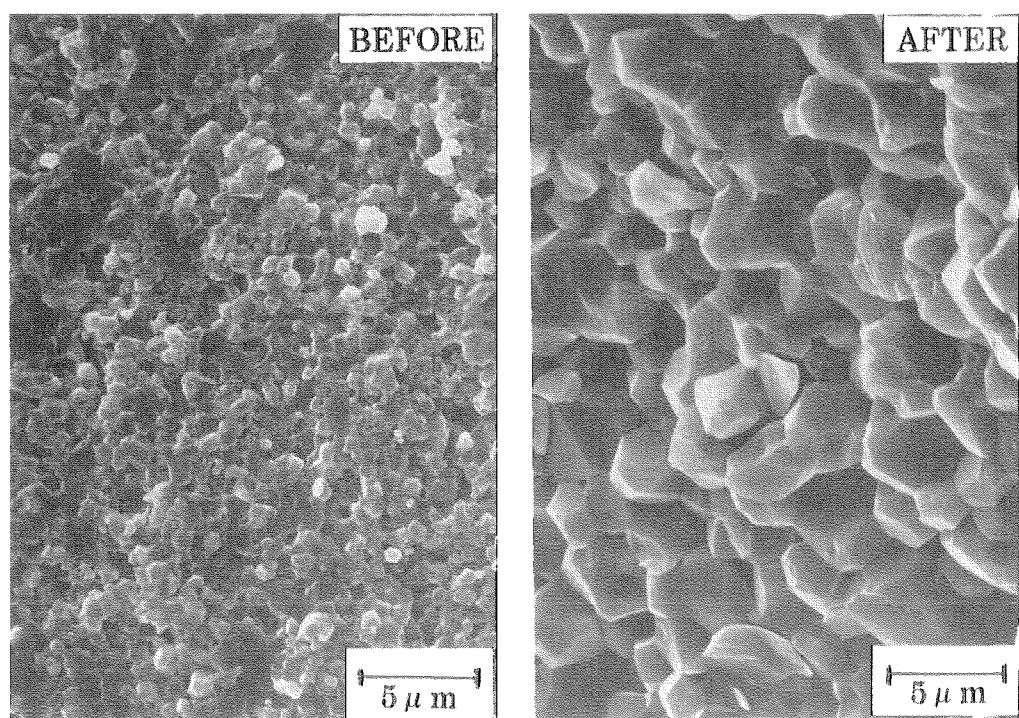


**Photo 1**

Wall thickness of each sleeve; (a) 3 mm, (b) 2 mm, (c) 1.5 mm,  
(d) 1 mm



(a) Pipe



(b) Sleeve

**Photo 2**

Morphology observation of fracture surface on  $\text{Al}_2\text{O}_3$  pipe  
and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sleeve before and after heating treatment by using SEM

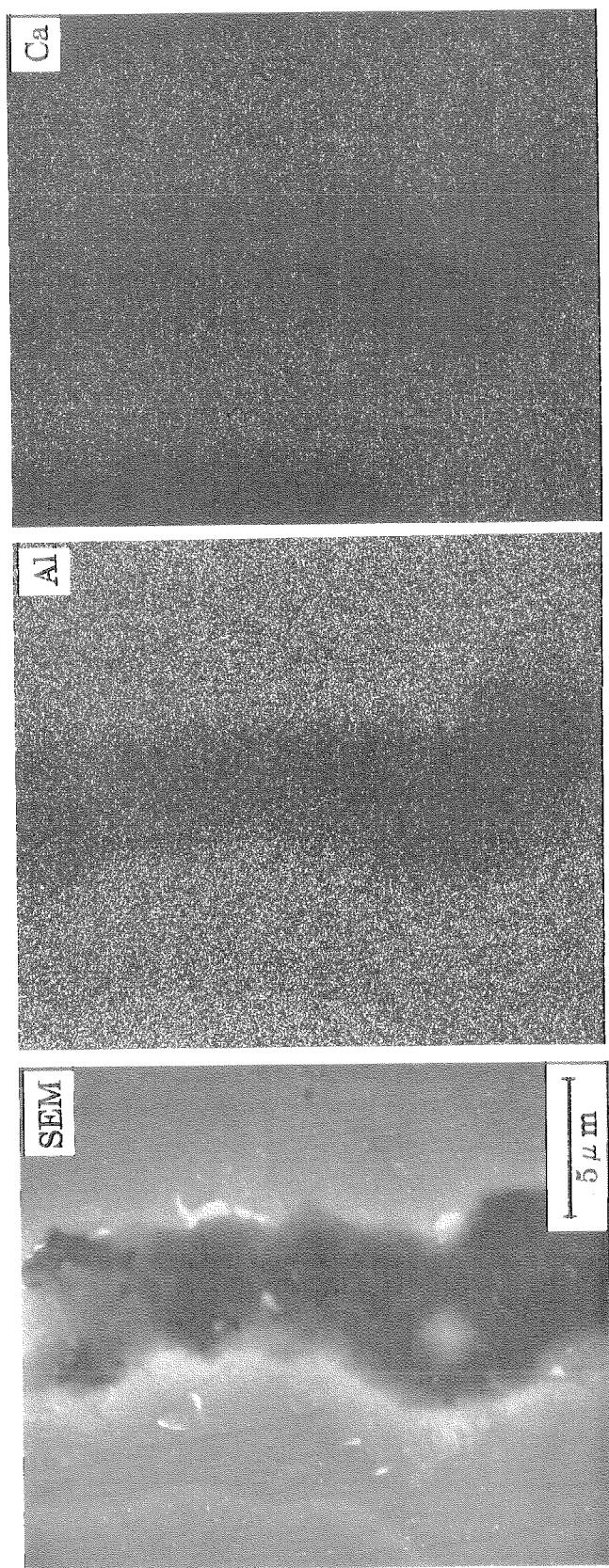
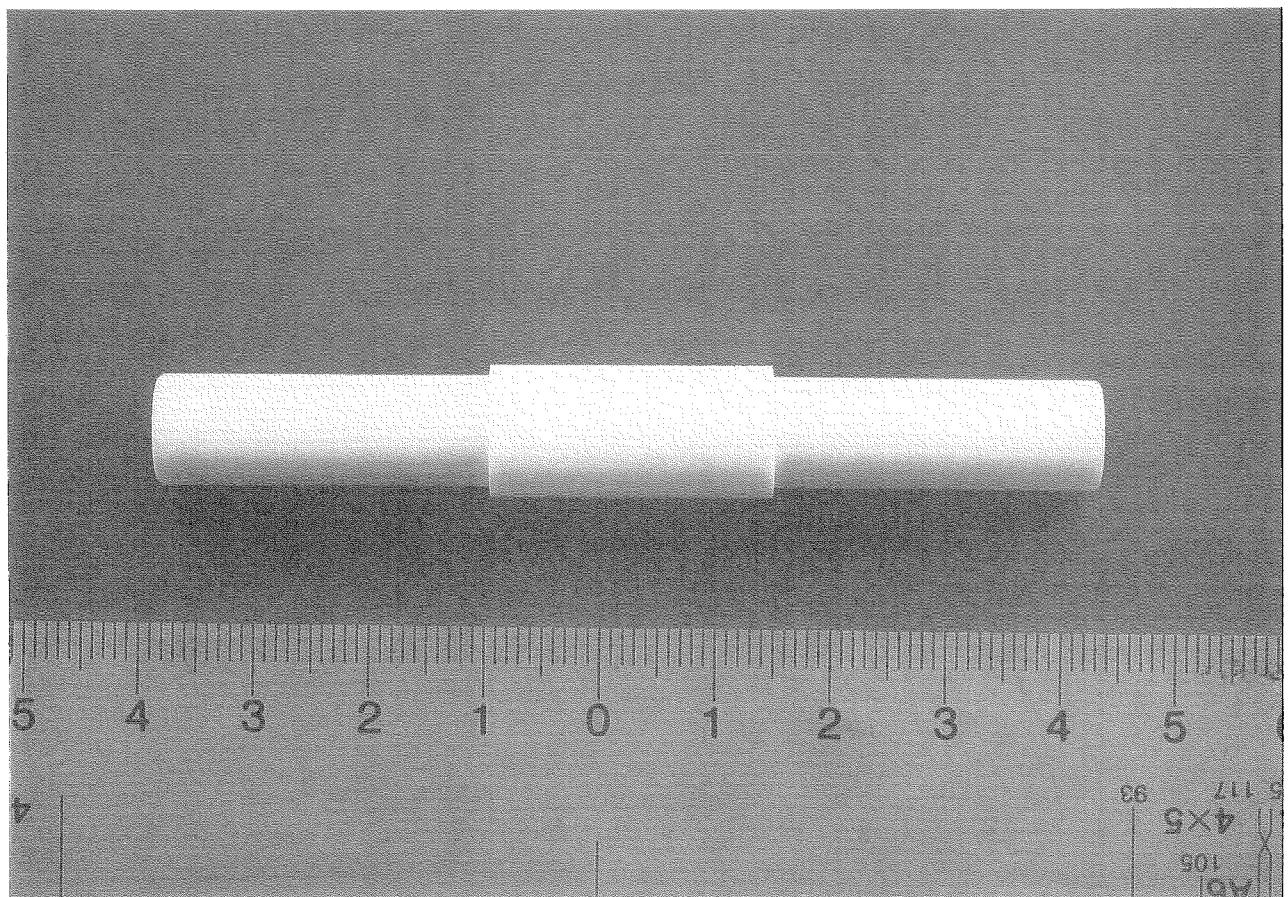


Photo 3

Morphology observation and element distribution analyses on  
Joining interlayer of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  pipe by using SEM and EDS



**Photo 4**

External view of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  joined pipe made by using  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sleeve and  $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaO}$  solder

This is a blank page.

# 国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

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

表3 固有の名称をもつSI組立単位

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

表2 SIと併用される単位

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

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

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

(注)

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

## 換算表

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

粘度  $1 \text{ Pa}\cdot\text{s} = 10 \text{ P(ボアズ)} (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$

動粘度  $1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)} (\text{cm}^2/\text{s})$

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
力	1	10.1972	9.86923	$7.50062 \times 10^3$	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	$1.33322 \times 10^{-4}$	$1.35951 \times 10^{-3}$	$1.31579 \times 10^{-3}$	1	$1.93368 \times 10^{-2}$
	$6.89476 \times 10^{-3}$	$7.03070 \times 10^{-2}$	$6.80460 \times 10^{-2}$	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)
	1	0.101972	$2.77778 \times 10^{-7}$	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	$6.24150 \times 10^{18}$	= 4.184 J(熱化学)
	9.80665	1	$2.72407 \times 10^{-6}$	2.34270	$9.29487 \times 10^{-3}$	7.23301	$6.12082 \times 10^{19}$	= 4.1855 J(15 °C)
	$3.6 \times 10^6$	$3.67098 \times 10^5$	1	$8.59999 \times 10^5$	3412.13	$2.65522 \times 10^6$	$2.24694 \times 10^{25}$	= 4.1868 J(国際蒸気表)
	4.18605	0.426858	$1.16279 \times 10^{-6}$	1	$3.96759 \times 10^{-3}$	3.08747	$2.61272 \times 10^{19}$	仕事率 1 PS(仏馬力)
	1055.06	107.586	$2.93072 \times 10^{-4}$	252.042	1	778.172	$6.58515 \times 10^{21}$	= 75 kgf·m/s
	1.35582	0.138255	$3.76616 \times 10^{-7}$	0.323890	$1.28506 \times 10^{-3}$	1	$8.46233 \times 10^{18}$	= 735.499 W
	$1.60218 \times 10^{-19}$	$1.63377 \times 10^{-20}$	$4.45050 \times 10^{-26}$	$3.82743 \times 10^{-20}$	$1.51857 \times 10^{-22}$	$1.18171 \times 10^{-19}$	1	

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
	1	$2.70270 \times 10^{-11}$		1	100
	$3.7 \times 10^{10}$	1		0.01	1

照 射 線 量	C/kg	R
	1	3876
	$2.58 \times 10^{-4}$	1

線 量 当 量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

(86年12月26日現在)

セラミックス製スリーブを用いたアルミニナパイプ同士の接合基礎実験