

# 特殊セラミックスの利用による作業環境改善研究

中 安 文 男\*

Environment Noise Reduction Study by the Use of Acoustical Ceramics

Fumio Nakayasu

Asbestos was used to improve acoustical and thermal conditions in the working environment. The purpose of this study is to investigate ceramics properties as the alternative material for asbestos. The acoustical properties of ceramics designed to absorb sound were investigated in this study. The properties of the concerned ceramics show the characteristics of an excellent sound absorber and a possible good sound barrier. Concrete is a good sound barrier but reflect more than 90% of the incident sound striking it.

The thickness of conventional acoustical materials, like fibers, has a great impact on the material sound absorbing qualities. However, the acoustical effect of the thickness of the concerned ceramics was found to be reasonably small.

A acoustical analysis of a working environment was done to determine the level of reverberation influenced by the different materials used to construct the space. It was found that the concerned ceramics has a potential to be good thermal shield material.

## 1、緒言

適度な騒音は覚醒効果があり、作業者の単純作業を促進する場合があるが、過度な騒音は容易に心理的ストレス状態を引き起こすため、複雑な精神作業に悪影響を及ぼす<sup>1)</sup>。作業現場、例えば原子力発電所では、閉ざされた空間の中に多数の騒音源が存在する。従来の騒音対策は公害防止の観点から、一般環境への騒音防止策が主であり、遮音に主眼が置かれていた。作業環境周辺に遮音材を設置することは、作業現場の拡散音場を増大させ作業環境の悪化をまねくことになる。勿論、機器の低騒音化の努力もなされているが、充分ではない。原子力発電所の作業現場における環境騒音レベルは、59.5dB から 90.4dB<sup>2)</sup>と騒音障害防止のための注意限界レベル 85dB さえも超えている場所があり、長年の暴露によって、肉体的影響さえも蒙る可能性がある。永久的難聴などの肉体的影響がなくとも、ヒューマンエラーが発生しやすい状況を形成し<sup>2)</sup>、重大な事故につながる可能性があることが指摘されている。

本研究を含む一連の研究は、原子力リスク低減のためのヒューマンエラー防止を目的としている。ヒューマンエラー防止法の一つとして、作業環境の快適化があり、このため、作業環境に使用する吸音材・遮熱材の開発を行おうとするものである。本研究は、この内、アスベスト代替物質であるセラミックスの遮音性能を解明しようとするものである。

---

\* 原子力技術応用工学科

本研究の対象としたセラミックスは、多孔質という独特の形態を付与することで、セラミックスの持つ本来の性質の他に、吸音性、遮熱性などの性質を持たせたものである。即ち、多孔質とすることで軽量、吸音、遮熱などのさまざまな機能が付与され、セラミックスの本来の耐熱性、耐薬品性といった性質と併せて、原子力発電所などの作業環境の改善に寄与する材料となり得る。当該のセラミックスは、十分な遮音性能を有すると共に、ある厚み以上では、厚みによってオーバーオール吸音率は変わらないが、厚みによって吸音率の周波数依存性が変化することを見出した。また、天然素材である「すぎごけ」及び「みずごけ」とセラミックスの吸音特性の比較も行った。さらに、ある仮定の作業場所に、セラミックスを含むこれらの吸音物質を使用した場合の環境騒音低下予測も行った。

当該セラミックスは、原子力発電所などの作業現場に使用すると、環境騒音の低下に十分な性能を有することを確認した。

## 2、吸音の原理

材料内部に音が入り込んで拡散することにより、音のエネルギーが振動を伴った熱エネルギーに変換され、反射する音が小さくなることを吸音という。音が多孔質材料に当たると、その開口部から材料内部に進入伝搬し、小さな孔や隙間の空気は振動しようとする。その時孔の壁に近い空気は、静止した壁の影響で動きにくくなり、この空気の粘性によって、音の一部のエネルギーは熱のエネルギーに変換され吸音される。ある特定の周波数において、材料により吸収された音響パワーの割合を正確な意味での吸音という。

垂直入射吸音率(規格 ASTM E 1050)は入射音と反射音の干渉を利用して求める。図-1は、音が壁に当たったときの様子を示す。Iは入射波のエネルギー、Rは反射波のエネルギー、Tは透過波のエネルギー、rは壁に吸収される(結局は熱エネルギーに変換される)エネルギーを表す。エネルギー保存則より

$$I = R + T + r \quad (1)$$

の関係が成り立つ。ここで、反射率は  $R/I$ 、透過率は  $T/I$ 、吸音率  $\alpha$  は  $\alpha = (1 - R/I)$  で定義される。従って、吸音率には、吸収エネルギーと透過波エネルギーの考慮を含むことになる。

音楽堂などにおいては、音響設計上、特定周波数に対する吸音特性の要求がある。他方、作業環境における騒音低下には、全周波数領域に渡る吸音特性の良いものが要求される。この要求を満たす材料としては、多孔質材料があり、繊維質(軟質)多孔質材料の代表的なものとしては、アスベスト、ロックウール、ガラスウールなどがある。アスベストの使用が禁止されたが、ロックウール、ガラスウールなどが現在も使用されている。

他方、気泡コンクリート板などの独立空孔型の硬質材料は材料自体の吸音性が悪いのに加え、空孔への音の伝播が悪く、吸音性能は良くない。

本研究は、耐熱性及び耐薬品性に優れ、且つ吸音性能も良い、多孔質材料の評価を行うものである。

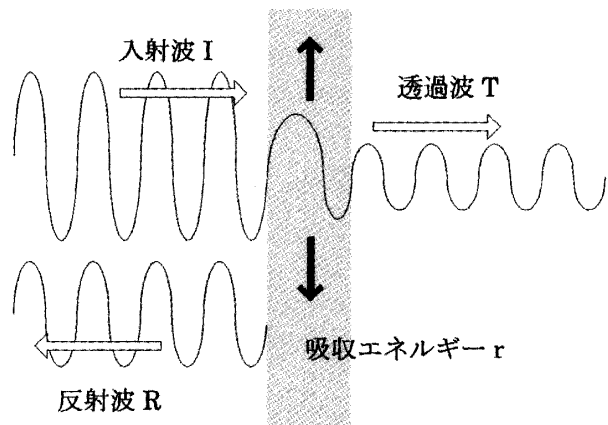


図-1 垂直入射吸音率概念図

### 3、試験方法及び供試体

#### 3-1、垂直吸音率測定装置

測定は、B&K(Brüel & Kjær)社 4206 型 2 マイクロホンインピーダンス測定管（垂直入射吸音率測定装置）を用いて行った。この装置は、図-2 に示すように、音響インピーダンス管を用い、管端に内蔵されたスピーカから放射した音波を、試料へ垂直に入射させ、

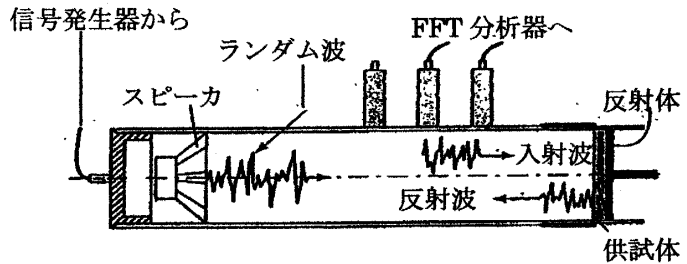


図-2 垂直吸音率測定装置

その反射波を、管内 2 点に設置されたマイクロホンで捉え、その伝達関数をリアルタイムに演算し、垂直入射吸音率等を算出するものである。

一般に垂直吸音率は、図-2 にみられるように、装置を水平にして測定が行われる。しかし、本研究では、「すぎごけ」「みずごけ」などの自然物も測定対象にしたため測定装置を垂直にする必要があった。垂直で使用した測定装置の外観を図-3 に示す



図-3 吸音測定装置

音響設計などに使用される吸音率は、残響室法吸音率が多い。これは、材料への音の入射条件を限定していないので、実環境での使用条件に適合させやすいためである。これに対して垂直入射吸音率は、音の入射条件を、実環境では特殊な条件である垂直入射に限定している。このため、音響設計の資料としてそのまま用いるには無理があるが、残響室法吸音率と違い、測定試料が小さくてすみ、測定も容易であるため、吸音材料の比較測定や、基礎的な材料特性の把握などの研究・開発段階で利用する場合には問題はなく、よく利用されている方法であり、本研究でも垂直入射吸音率測定を採用した。

#### 3-2、吸音率測定供試体

本試験に使用したセラミックス供試体の化学成分を表-1 に、その物理的性質などを表-2 に、その形状を図-4 に示す。本研究では、セラミックス以外に、天然の「すぎごけ」、「みずごけ」及びコンクリートの吸音特性評価を行ったが、これらの供試体寸法は、図-4 の  $a=100\text{mm}$ ,  $b=100\text{mm}$  に相当している。なお、セラミックス供試体は、10%NaOH 溶液及び 10%HCl 溶液とは反応しない、即ち耐薬品性があることを確認している。また、1100℃以上の耐熱性を有することも、試験で確認済みである。一方、別途試験によると、熱伝導率は 0.17W/mK であり、遮熱材として十分な性能を有すると考えられる。

表-1 セラミックス供試体化学成分(%)

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO
63	22	12	1	2

表-2 セラミックス供試体物理的性状など

熱伝導率	かさ比重	見掛気孔率	吸水率
0.17W/mK	0.8	46%	56%

吸音率測定に使用した供試体の形状を図-4 に示す。一般に垂直吸音率測定は、測定周波数帯域により 2 つの音響インピーダンス管を使用する。本研究では内径 100mm の大口径管を、50Hz から 1600Hz の周波数帯域で使用し、内径 29mm の小口径管を 500Hz から 6300Hz で使用した。図-4 に示す供試体のうち、左側のソリッド型は吸音率測定に、右側のリング型はソリッド型の中間に位置させ、空気層を形成するためのスペーサとして使用した。なお、図-5 に作成した供試体の写真を示す。

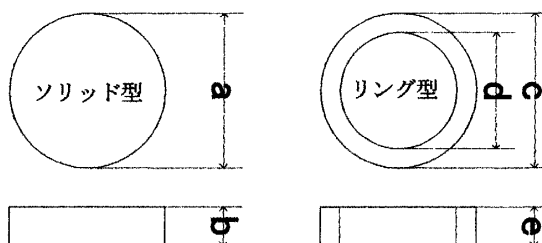


図-4 セラミックス供試体形状  
a 及び c は 100mm と 29mm、b は 20mm と 100mm、e は 20mm、d は 98mm と 27mm

### 3-3、吸音率測定方法

図-4 及び図-5 に示す供試体を図-2 及び図-3 に示す音響インピーダンス管の供試体位置に装着して吸音率測定をおこなった。供試体としては、ソリッド型を複数枚組み合わせて、それぞれ 20mm, 40mm, 60mm, 80mm 及び 100mm の厚さとした。また、厚さ 20mm のソリッド型 2 枚の間に、リング型 1 枚を挟みこんだ供試体 (セラミックス 60mm (40mm+air20mm) と称する) 及び厚さ 20mm のソリッド型 3 枚とリング型 2 枚を交互に組合せた供試体 (セラミックス 100mm (60mm+air40mm) と称する) も使用した。これらセラミックス供試体及びコンクリート供試体は、音響インピーダンス管を水平にして測定し、「すぎごけ」及び「みずごけ」については、音響インピーダンス管を垂直 (図-3) にして測定した。

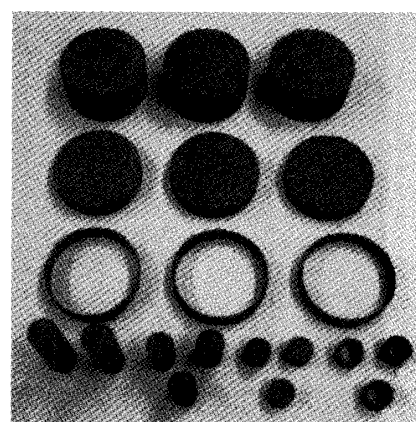


図-5 セラミックス供試体例

## 4、吸音率試験結果及び結果の評価

### 4-1 試験結果

セラミックス供試体の厚みを変化させた時の吸音率の変化を図-6 に示す。本試験を含め、すべての試験に背後空気層、即ち、図-2 の供試体と反射体の間の空気層を設けていない。図-6 から明らかのように、供試体セラミックスが厚くなるに従い、低周波数領域の吸音特性がよくなる。これは、一般の多孔質吸音体と同一の傾向を示して

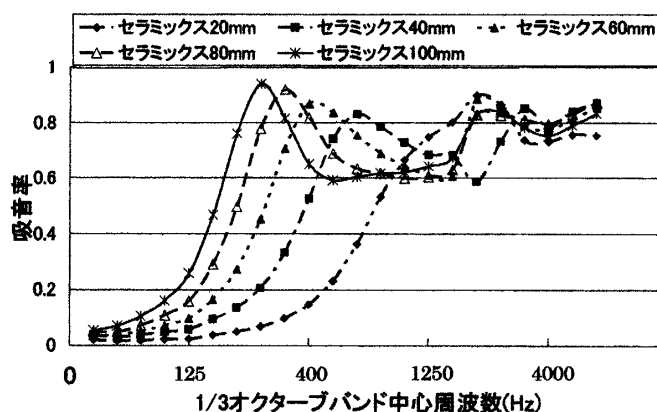


図-6 セラミックスの吸音特性 (厚み依存性)

いる。数百 Hz から上の周波数領域では、当該セラミックスの吸音率が 0.6 以上あり、優れた吸音材であることを示している。また、当該セラミックスの厚みを変化させることにより、任意の周波数の吸音率を大きくさ

せ得ることの可能性も示唆している。

図-7に、20mm厚の吸音セラミックス2枚の間に、20mmの空気層を設けた供試体（セラミックス60mm(40+air20)と呼ぶ）の試験結果を示す。本試験結果によると、厚さ60mmの内、20mmが空気層であり、実質のセラミックスの厚みが40mmしかない供試体と、厚さ60mmにセラミックスがすべて充填された供試体の吸音特性がほぼ同一の傾向を示している。言い換えると、内部空気層20mm厚を含む、セラミックス60mm(40+air20)の吸音特性は、内部に空気層を含まないセラミックス40mm厚のものより、低周波数部での吸音特性が改善され、セラミック60mmに近い特性を示していることになる。これは内部に空気層を有するセラミックス吸音体を使用すると、軽量化及び低コスト化が実現する可能性を示していることになる。

図-8に20mmのセラミックス3枚の間に、それぞれ20mmの空気層を設けた供試体（セラミックス100mm(60+air40)と呼ぶ）とセラミックス60mmとセラミックス100mmの吸音特性の試験結果を示す。セラミックス100mm(60+air40)は、セラミックス100mmとほぼ同一の吸音特性を示し、セラミックス60mmより、低周波数領域での吸音特性が改善される。これは図-7に示す、セラミックス60mm(40+air20)の試験結果と同じであり、セラミックス間に存在する空気層の有効性を示すものである。

図-9に「みずごけ」、「すぎごけ」及びコンクリートの吸音特性を示し、比較のためにセラミックス100mmも付記している。同図から明らかのように、低周波数領域での吸音性能は、セラミックス100mmが一番良く、ついで「すぎごけ」、「みずごけ」の順である。コンクリートはほとんど吸音しない。コンクリートの500Hz近傍で吸音率がピークを示しているのは、コンクリート（打ちっぱなし）表面の凹凸の影響によるものと考え

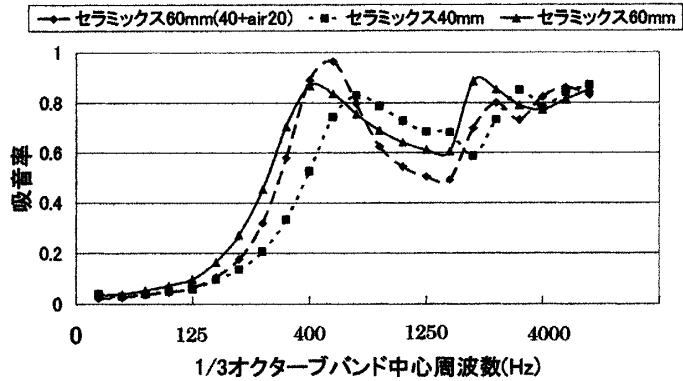


図-7 セラミックス吸音特性（空気層の効果1）

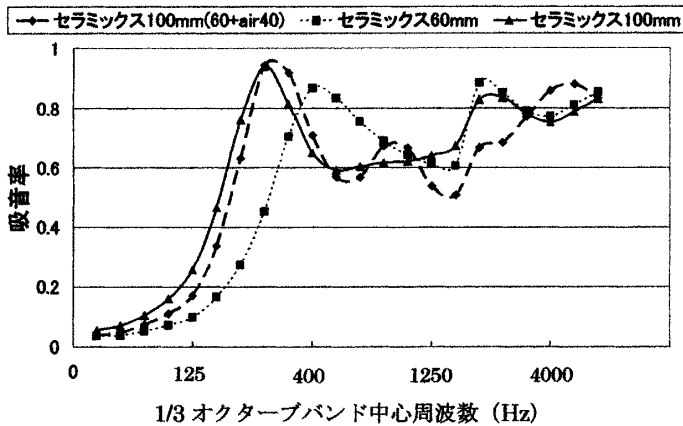


図-8 セラミックス吸音特性（空気層の効果2）

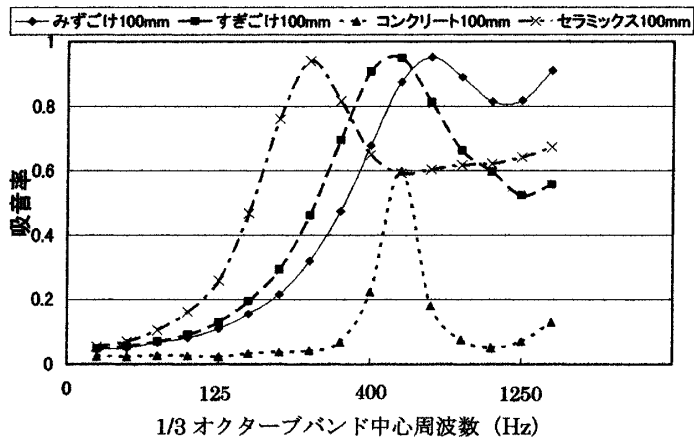


図-9 吸音特性比較

られる。図-9から、当該セラミックスは寺院などの庭にある「すぎごけ」に勝るとも劣らない吸音特性を有することが確認される。

4-2、結果の評価

吸音材料の吸音率は、材料そのものの吸音性能を表すもので、騒音対策効果を表すものではない。ある特定周波数領域の吸音率の大きい材料を使用しても、騒音源の特性との関係で、必ずしも騒音対策に大きな効果があるとは限らない。そこで、点音源が、仮定した大きさの室内(10m×10m×3mh)にあり、その各周波数バンド毎のパワーレベルが100dBと一定であるとする。この場合のオーバーオールのパワーレベルは、113dBとなる。この時の拡散音のオクターブバンド音圧レベル及びオーバーオールの音圧レベルを図-10に示す。なお図-10及び図-11の左端の点は、拡散音のオーバーオール音圧レベルを表している。オーバーオールの音圧レベルとは、各周波数バンド毎の音圧レベルの総和をとった合成レベルをいう。吸音体を使用した時のオーバーオールの音圧レベルの低下をその吸音体の性能と考えることができる。図-10から明らかなように吸音性能は、セラミックスの厚みが増すにつれて、良くなる。

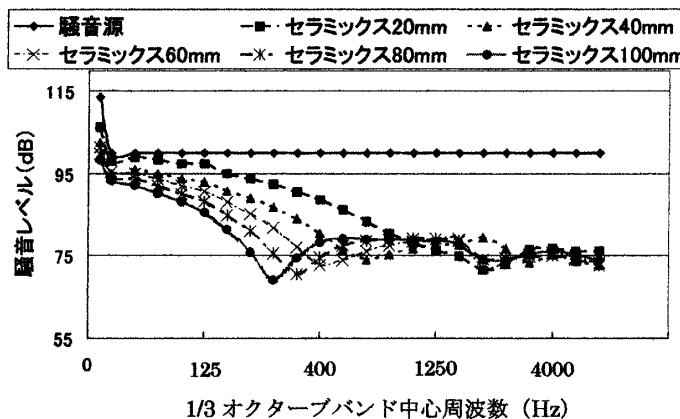


図-10 拡散音レベル (A特性補正なし)

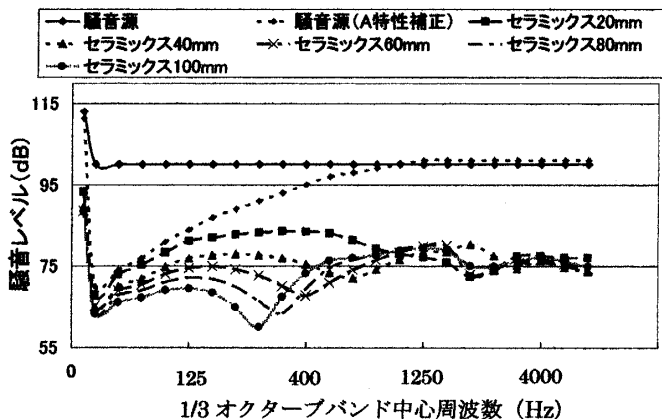


図-11 拡散音レベル (A特性補正後)

点音源の各周波数の音圧パワーレベルを100dBとし、耳の聴感特性の補正(A特性補正)を行った場合の拡散音のオクターブバンド音圧レベルとオーバーオール音圧レベルを図-11に示す。同図から明らかなように、図-10とは異なり、セラミックスの厚みによる、オーバーオールの音圧レベルの差はそれ程大きくない。

オーバーオールの音圧レベル低減量を吸音物質及び仮定する騒音源との関係で整理したものを表-3に示す。同表に見られるように、同じ点音源に

表-3 オーバーオール音圧レベル低減量比較 (単位: dB)

補正	セラミックス厚み (mm)					すぎごけ	みずごけ	コンクリート	参照図
	20	40	60	80	100				
有*	-18	-22	-23	-23	-23	-20	-24	-8	11
無*	-7	-11	-12	-14	-15	-12	-12	-5	10

注) 補正無・有は、騒音源の各周波数の音圧レベルが100dBであるとしての、A特性補正の有無を示す

対し、A 特性補正を行ったものの方が、A 特性補正を行わないものに対し、拡散音レベルの低減量が大きい。これは A 特性補正による低周波数領域の音圧レベルの低下により、低周波数領域の吸音特性の悪さの、オーバーオール騒音レベルへの寄与が少なくなるからである。

#### 4-3、吸音セラミックス使用による作業環境の改善

4-2 節に記したように、吸音セラミックスを作業場内装（6 面）に使用した時の作業環境改善の評価には、作業場所の騒音の特性、特にオクターブバンドでの騒音レベルの情報が必要となる。ここでは、前記した作業場所の仮定（10m×10m×3mh）及び騒音レベルの仮定（オクターブバンドでの音圧レベルが 100dB の点音源で、A 特性補正を行った騒音レベル）で、作業現場でのオーバーオール騒音レベルの低下量を試算した。その結果を図-12 及び図-13 に示すが、両図には吸音特性の悪いコンクリートの評価結果も付記している。

騒音レベルは、直接音と拡散音との和であり、音源からの距離が一定以上になると拡散音が支配的になる。この様子が図-12 及び図-13 に見られる。図-12 に示すようにセラミックスの厚みが 40mm 以上になるとオーバーオールの吸音能力に差が見られなくなる。図-13 によると、セラミックス 100mm のオーバーオールの吸音能力は、天然素材の「すぎごけ」及び「みずごけ」のそれとそれ程の差がないことが解る。

上記の仮定において、セラミックスを作業場内装として使用した場合、環境騒音が 20dB 程度低下することが期待され、これは、ヒューマンエラーの防止に効果があると推定される。

#### 4-4、ナトリウムとの反応予備試験

本研究は、原子力発電所などのようにヒューマンエラーの発生を防止しなければならない作業現場の作業環境改善に使用可能なセラミックスの提供を目的として実施した。原子力発電所の一つに高速増殖炉があり、この炉では、冷却材としてナトリウムを使用する。この高温のナトリウムとセラミックスの反応をみるための予備試験を実施した。結果は次のとおりである。

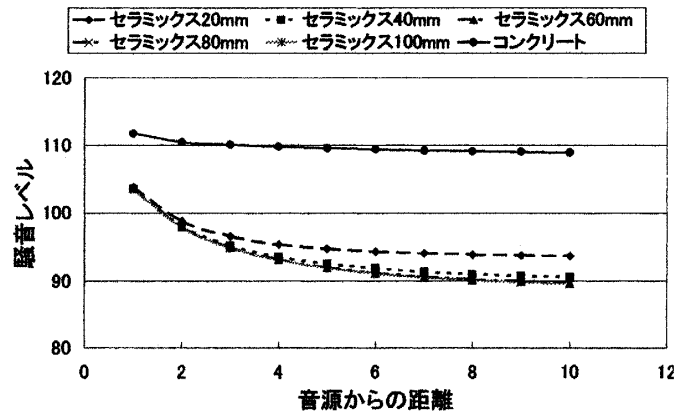


図-12 吸音物質使用による騒音レベルの低下 (1)

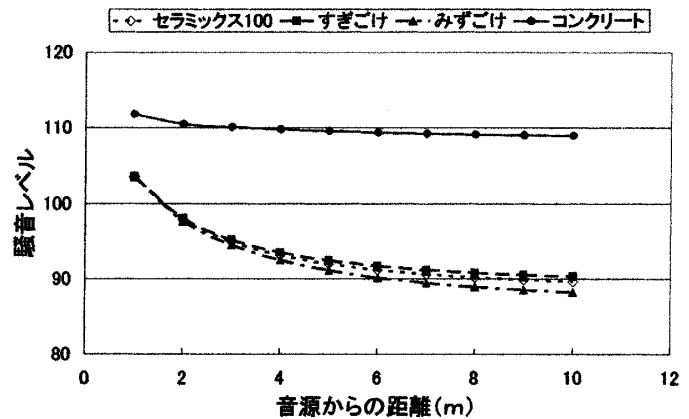


図-13 吸音物質使用による騒音レベルの低下 (2)

- 1) ナトリウムを加熱容器にいれ、容器を 300℃程度に熱して、溶解しているナトリウムを、当該セラミックス上に落下させたが、反応は生じなかった。
- 2) ナトリウムを加熱容器にいれ、容器を 400℃程度に熱すると自然発火する。この燃焼しているナトリウムを、当該セラミックス上に落下させると、反応（燃焼）が起こった。

当該のセラミックスは、表-1 に示すように、 $\text{SiO}_2$  を主成分とするものであり、この  $\text{SiO}_2$  がナトリウムと反応したものと考えられる。

## 5、結言

原子力発電所などの作業現場での作業環境改善のためのセラミックスの特性評価試験を実施し、以下のことが判明した。その結果、当該セラミックスは、アスベスト代替物質として有望であると結論できる。

- 1) 選定したセラミックスは十分な吸音性能を持ち、作業環境改善の内、騒音低下に効果がある。
- 2) 吸音性能を、オーバーオール騒音レベルで評価すると、40mm の厚さで充分その効果がある。
- 3) 作業環境の騒音の内、特定の周波数の騒音を軽減する必要がある場合、特定の厚みのセラミックスを選定する必要がある。
- 4) 複数枚のセラミックスの中間に空気層を設けた場合、その空気層に、当該セラミックスを充填した吸音効果と同じ効果が得られる。

今後の課題としては、以下のことがあげられる。

- 1) 高速増殖炉での使用を考えナトリウムと反応しないセラミックスの開発も必要である。この場合  $\text{SiO}_2$  を含有しないセラミックスが必要であると思われる。
- 2) アスベスト代替物質としての断熱材を目的とすると、当該セラミックスの熱伝導率を 1 桁程度低下させる必要があり、このためには多孔質セラミックスの空孔を閉空孔とするのも一つの方法である。しかし、閉空孔とすると吸音性能が低下するので、2 層セラミックスの開発が必要である。第 1 層には吸音性能を、第 2 層には遮熱・遮音性能を有させ、第 1 層と第 2 層の空孔性質を制御することにより、吸音、遮熱・遮音性能を有するセラミックスが実現できる。

## 6、謝辞

本研究のセラミックスの提供及び供試体加工にご協力いただいた八木惣株式会社八木社長及び八木重勝氏ならびに小田建設株式会社の小田社長に謝意を表します。ナトリウムとの反応予備試験を実施いただいた日本原子力研究開発機構の佐々木課長を始め同機構の皆様方に感謝いたします。

本研究の実施には、福井工業大学の特別研究費の交付を受けています。

## 参考文献

- 1) 茅 陽一監修, 環境ハンドブック, (2002), 306-307
- 2) 彦野 賢, '原子力発電所の定検作業中における騒音の影響緩和', INSS Journal Vol.19, (2002) p26-34

(平成17年12月2受理)