

## アルミニウムからのガス発生によるモルタル中の空隙の検討<sup>†</sup>

橋爪修司<sup>††</sup> 松本潤子<sup>†††</sup> 馬場恒孝<sup>†††</sup>

アルミニウムを僅かでも含む固体状廃棄物をモルタルにて固型化する場合、アルミニウムから発生するガスが充填固化体の性能に与える影響を調べ、評価しておくことは重要である。本研究では種々のモルタルを用いて模擬充填固化体を試作し、固化体中の空隙率を測定した。その結果、アルミニウムと炭素鋼の接触によって固化体中でのガス発生を起因とする空隙率は減少することが認められた。また、鉄とアルミニウム接触条件下において、両金属の表面積比とガス発生による固化体の空隙率との関係はモルタル平衡水中での両金属の表面積比とガス発生量との関係と良く一致した。さらに、モルタルの物性値、アルミニウムからのガス発生量の定量結果等から固化体の空隙率を推定する手法を提案した。その手法によって、数種類のモルタル中でのアルミニウムからのガス発生を起因とする空隙率を推定した。その結果、現在想定されている充填固化体の最も保守的な条件で、しかもアルミニウムが炭素鋼と接触していない条件においても空隙率は1%以下と推定された。

**Keywords:**低レベル放射性廃棄物、モルタル、アルミニウム、炭素鋼、空隙、接触、ガス発生

When the dry low-level radioactive wastes(LLW) including even slightly aluminum are solidified with mortar, it is necessary to evaluate the effect of gas evolution from aluminum on the performance of solidified dry LLW. Experiments were conducted to measure the opening ratios in the waste packages which were prepared by using simulated dry LLW and several kinds of mortars. The decrease of opening ratio due to gas evolution in mortar was observed in the case of aluminum being in contact with carbon steel. Under the above condition, the relationship between Fe/Al surface area ratio and the opening ratio in mortar was consistent with that between Fe/Al surface area ratio and the amount of gas evolution in the simulated mortar environment, namely, in the solution equilibrated with mortar. Furthermore, authors proposed an estimation method of opening ratio in waste package by using measured data such as physical properties of mortar and gas evolution rate from aluminum. The opening ratios produced from gas evolution in several kinds of mortars were estimated by the proposed method. Estimated values of opening ratios were less than 1% even under the most conservative condition, including aluminum being not in contact with carbon steel.

**Keywords:** low-level radioactive waste, mortar, aluminum, carbon steel, opening, contact, gas evolution

### 1 緒言

原子力発電所から発生する低レベル放射性廃棄物のうち、難燃および不燃の固体状廃棄物をドラム缶内にセメント系充てん材で一体に固型化した充てん固化体は、六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センターに浅地中処分する計画である[1]。これら廃棄物のうち、固型化に使用されるモルタル中に腐食しガス発生すると言われているアルミニウム（以下、Al）[2-7]は、埋設対象の固体状廃棄物から除く予定であり、具体的には大半またはすべてがAlからできている約150mm程度以上のAl製品のみが除かれる[8]。したがって、Alの除去には限界があり、微量のAlが混入することは避けられない。モルタルは通常1日以内に固型化し、その形状を維持するので、Alを微量含む固体状廃棄物をモルタルにて固型化した場合、固型化時にガス発生起因の空隙が生じる。空隙にはモルタル水がたまり、密実なモルタル中より放射性核種の拡散が早くなり、充てん固化体のもつ放射性核種保持機能に影響を与える可能性がある。

これまで固型化材中でのAlからのガス発生挙動の基礎的な検討を目的とし、Alの腐食度とガス発生量に与えるpH、温度の影響が大きいこと、および現実的な条件内( $12 \leq pH \leq 13$ ,  $20 \sim 60^\circ\text{C}$ )では、1 molのAlの溶解に対して約1.5 molの水素ガスが発生することを明らかにした[7]。さらに、金属類の放射性廃棄物を溶融処理を行わずにドラム缶へ収納する場合[8]を考慮し、Alからのガス発生挙動に与える鉄（以下、Fe）との接触の影響について検討した。モルタル平衡水を用いた模擬環境中でAlがFeと接触すると腐食は増加するが、ガス発生は極めて抑制され、これは、Alが腐食する際のカソード反応がFeとの接触により水素発生反応から酸素還元反応に変化したためであることを明らかにした[9]。

本報では、実際のモルタル環境中でのAlからのガス発生を起因とする空隙について検討する。すなわち、実際にAlを含有する模擬固化体を試作し、固化体中の空隙率を測定する。さらに、実際の固体状廃棄物の固型化には種々のモルタルの使用が考えられるので、使用するモルタルの物性値やAlからのガス発生量の定量結果等から固化体中に生じるガス発生起因の空隙率を推定する手法を検討する。

### 2 実験方法

#### 2.1 Al含有模擬固化体の試作方法

Fig.1に示すように0.5 mm厚さの純度99.5 %以上のAl板

<sup>†</sup> An opening in mortal produced from gas evolution of aluminum, by Shuji Hashizume (shashizu@lab.keihin.nkk.co.jp), Junko Matsumoto and Tsunetaka Banba.

<sup>††</sup> 日本原子力研究所 東海研究所(現、NKK総合材料技術研究所) Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai Research Establishment (Now, NKK Corporation, Materials & Processing Research Center)〒210-0855 川崎市川崎区南渡田町1-1

<sup>†††</sup> 日本原子力研究所 東海研究所 Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai Research Establishment 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

とFeが主成分の炭素鋼製の3 mmおよび6 mm厚さの等辺山形鋼およびサミット缶（容量約5 dm<sup>3</sup>）の模擬廃棄物を50 dm<sup>3</sup>ドラム缶に4つのサミット缶で仕切って収納した。Al板はサミット缶の内壁に接するように設置した。3 mmおよび6 mm厚さの等辺山形鋼は300 mm長さに切断し、サミット缶内に混合して縦置きした。仕切られた4つの炭素鋼製のサミット缶内は、空隙率に与えるAlの大きさ、炭素鋼との接触の影響等が検討可能になるよう模擬廃棄物を収納した。その後、Table 1に配合組成を示すように固体状廃棄物の固型化に用いられると考えられる6種類のモルタルを選んだ。6種類のモルタルには汎用的な混和剤を含むように選定した。松村ら[1]は充填材料の性能条件として流動性をあげているので、流動性の異なる3種類のモルタルを選択して固型化した。このとき、混和剤としては最も汎用的なナフタリン系高性能減水剤を用いた。

## 2.2 固化体の空隙測定方法

固型化を実施して約1年後に、設定した4つのサミット缶を横切るようにドラム缶を垂直方向に切断し、断面を写真撮影した。断面の写真を画像解析し、長さが2 mm以上の空隙の面積を定量化し、空隙率を算出した。具体的な切断位置はFig.1に示すA～Dの4断面である。

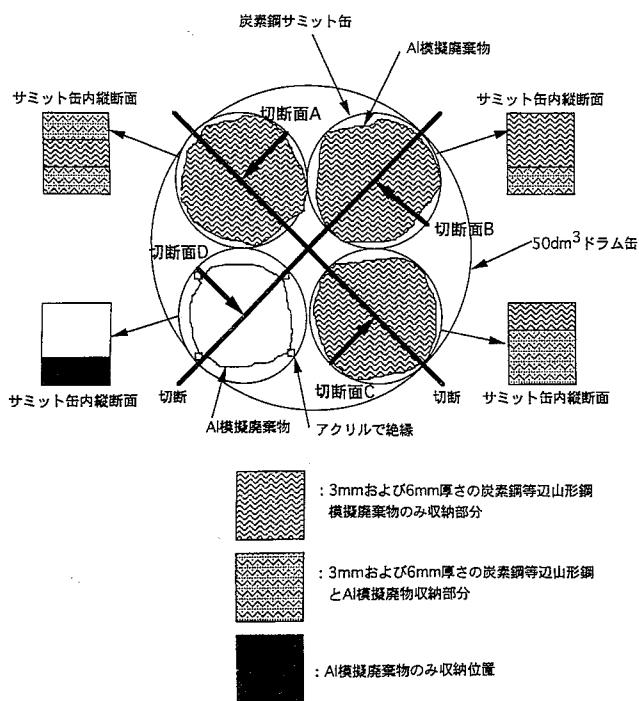


Fig.1 Arrangement of simulated dry LLW and sections for inspections

それぞれの断面に表われる収納した模擬廃棄物の特徴をTable 2に示す。切断面Aは、単位体積当たりのAl表面積を160 cm<sup>2</sup>dm<sup>-3</sup>とした部分で、この値は原子力環境整備センターが行った実態調査結果[10]に示される廃棄物総重量当たりのAl表面積から推定された値の12～21倍に相当する。この時Alと炭素鋼は接触し、Fe/Al表面積比が5となる。なお、実態調査結果[10]ではFe/Al表面積比が130～160であった。モルタル模擬環境中ではFe/Al表面積比が20以下でガス発生が認められ100以上では認められなかった。したがって、本試験においては空隙の検討を容易にするため、Fe/Al表面積比を実態調査結果より小さくした。また、Alの設置位置を上下2箇所に分けた。切断面Bでは、切断面Aの下のみのAlの設置とし、切断面Aに比べ単位体積当たりのAl表面積を1/2とした。この時Alと炭素鋼は接触し、Fe/Al表面積比が9となる。切断面Cでは、切断面Aと同じ単位体積当たりのAl表面積、同Fe/Al表面積比としたが、Alの設置位置を中央から下方に集中させた。異種金属接触腐食が生じる場合、これら金属が離れていると溶液抵抗により異種金属接触腐食の影響が小さくなる。切断面Cは切断面Aに比べ、Alを

Table 1 The mix proportion of mortar for solidification of dry LLW

モルタルNo.	1	2	3	4	5	6
固化体No.	HAI-1	HAI-2	HAL-3	—	—	—
セメント	普通ポルトランドセメント					
細骨材	けい砂5号					
混和剤	ナフタリン系高性能減水剤 メラニン系高性能減水剤 ポリカルボン酸系高性能AE減水剤					
目標P-ロード 流下時間、秒	50	35	16	35	35	35
水/セメント比	0.350	0.395	0.430	0.395	0.395	0.395
単位水量、 kgm <sup>-3</sup>	335	363	383	363	363	363
単位セメント量、 kgm <sup>-3</sup>	958	918	890	918	918	918
単位細骨材量、kgm <sup>-3</sup>	958	918	890	918	918	918
単位混和剤量、kgm <sup>-3</sup>	9.6	9.2	8.9	23.0	13.8	7.3

Table 2 Aluminum plates incorporated in simulated dry LLW: size, position, Fe/Al surface area ratio, etc.

項目	A	B	C	D
単位体積当たりのAl表 面積、cm <sup>2</sup> dm <sup>-3</sup>	160	82	160	82
Al設置位置と箇所数	上方と下方の2箇所	下方の1箇所	中央から下方に かけての1箇所	下方の1箇所
炭素鋼との接触の有無 とFe/Al表面積比	有、5	有、9	有、5	無

一部に集中させて設置した分、異種金属接触の影響が小さくなると考えられる。切断面Dでは、切断面Bと同様の単位体積当たりのAl表面積とした。この時Alが炭素鋼と接触しないよう、サミット缶から絶縁してAlを設置し、さらに等辺山形鋼を入れなかった。したがって、切断面Bとの比較によりAlと炭素鋼の接触の影響が検討できる。

### 2.3 プロクタ試験方法

Table 1に示す実際の固体状廃棄物の固型化に用いられると考えられる典型的な6種のモルタルを選び、プロクタ試験を実施した。試験方法は、ASTM C403 "Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration" [11]に準拠し、モルタルの貫入抵抗値の経時変化を測定し、この結果から、始発時間（貫入抵抗値が500 psi (3.4 MPa)に達した時の時間）を内挿して求めた。始発時間は振動を与えた時に気泡が抜ける限界の時間と考えられており、種々のモルタルを用いた時のAlからのガス発生を起因とした固化体内の空隙率の推定には必要と考えた。

### 3 結果と考察

#### 3.1 Al含有模擬固化体の空隙測定

固化体HAL2の4つの切断面A～Dの外観写真をFig.2に示す。流動性の異なるモルタルを用いた他の固化体の4切断面も同様な外観であった。多量の模擬廃棄物である炭素鋼の等辺山形鋼近傍、および固化体の上部に空隙が認められる。上部の空隙の断面は円に近い形状を示しているものが多く、それらの直径は10～40 mm程度の大きさであった。一部には切断面Bに認められる様に固化体上端にまでつづくみみず状の空隙もあった。各切断面の空隙率測定結果をTable 3に示す。模擬廃棄物の近傍には形状によっては空隙が残りやすく、本実験で用いた金属等の高強度の固体状廃棄物をそのまま固型化した固化体ではその値が0.9 %程度であることが知られている。したがって、切断面A～Cについてはこの値を測定値から差し引くことによりAlからのガス発生を起因とした空隙率が求まると考えた。この結果をTable 4に示す。ガス発生起因の空隙率は2 %以下であった。なお、切断面Dについてはサミット缶内に少量のAlのみが存在しただけだったため、模擬廃棄物の形状による空隙の影響は考慮しなかった。

モルタルの種類によるガス発生起因の空隙率を各切断面毎で比較すると最大1.5 %と比較的大きな差があったものの、平均値で比較するとその差は0.4 %と小さい値を得た。したがって、流動性が空隙率に与える影響は小さいものと考える。また、切断面によるガス発生起因の

空隙率の平均値を比べると、切断面C、Dでは切断面A、Bに比べ0.9 %大きい値を得た。切断面Cは大表面積のAlを中心から下方に設置した部分であり、切断面Dは炭素鋼との接触を避けるよう設定した部分である。切断面Cと同表面積のAlが設置された切断面Aのガス発生起因の空隙率が少なかったのは、切断面Aは均一にAlを設置したため異種金属接触の効果が比較的大きかったためと考えられる。切断面Dの空隙率を切断面Bの空隙率とFe/Al表面積比の観点から比較し、Fig.3に示す。このとき、実

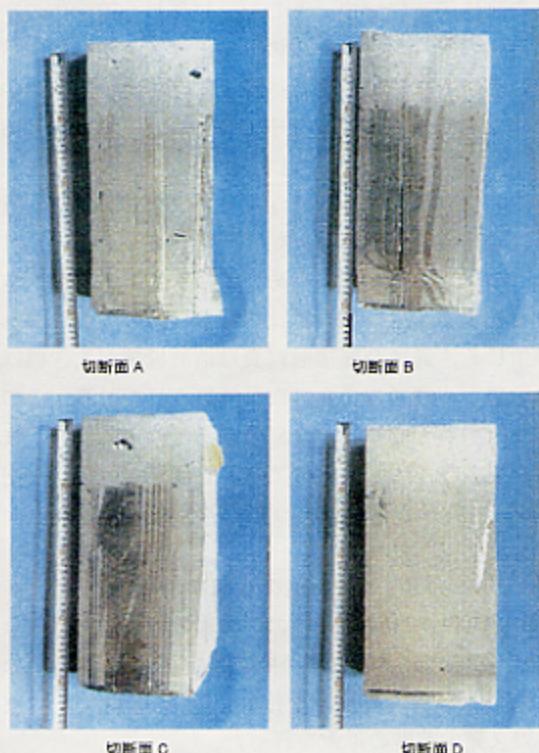


Fig.2 Appearances of sections A-D in solidified simulated dry LLW (HAL2)

Table 3 The opening ratio in solidified aluminum-containing simulated dry LLW (%)

固形化体No.	A	B	C	D	平均
HAL-1	2.4	1.8	2.8	1.2	2.1
HAL-2	1.6	2.1	1.7	1.7	1.8
HAL-3	0.7	0.6	2.9	2.0	1.6
平均	1.6	1.5	2.5	1.6	-

Table 4 The opening ratio produced from gas evolution of aluminum (%)

固形化体No.	A	B	C	D	平均
HAL-1	1.5	0.9	1.9	1.2	1.4
HAL-2	0.7	1.2	0.8	1.7	1.1
HAL-3	0.0	0.0	2.0	2.0	1.0
平均	0.7	0.7	1.6	1.6	-

モルタル中の空隙率はモルタル模擬環境中で得られたガス発生量に比例すると考え、モルタル模擬環境中で得られたガス発生量に与えるFe/Al表面積比の影響[9]と比較できるように図に重ねてプロットした。さらに、実モルタル中の空隙率と模擬環境中のガス発生量に与えるFe/Al表面積比の影響を比較できるように、Fe/Al表面積比が0のときの空隙率とガス発生量の平均値をともに1とし整理した。また、切断面AおよびCの空隙率は切断面BおよびDに比べ単位体積当たりのAl表面積が2倍であるので、Al表面積の影響を避けるため測定値を2で除した値をこの図に同時にプロットした。試作した固化体の空隙率はばらつきは大きいものの、Alと炭素鋼が接触する部分では接触のない部分に比べ減少した。実モルタル中の空隙率とモルタル模擬環境中のガス発生量に与えるFe/Al表面積比の影響の程度は比較的良好一致した。実モルタル中の空隙率のばらつきが大きい原因としては、以下の様に考える。すなわち、始発時の実モルタル中では若干の固型化が進んでいるため、モルタルとの平衡水溶液であるモルタル模擬環境に比べ溶液抵抗の大きくなる部分が生じる。異種金属接触腐食は溶液抵抗が大きいほどその効果が小さくなる[12]ことが知られており、そのため、空隙率が大きくなつた部分があったと考える。また、腐食生成物が生じた部分では腐食反応が低下し、空隙率が小さくなつた部分があったと考える。

### 3.2 種々のモルタルを用いた時の空隙率の推定

種々のモルタルを用いた時の空隙率の推定のために、① 空隙が形成される限界の時間を推定し、② その時のモルタルの上昇温度の推定を行い、③ その時のAlの腐食度とガス発生速度の推定を行った。

#### ① 空隙を形成する限界時間の推定

プロクタ試験から得られる始発時間が振動を与えた時

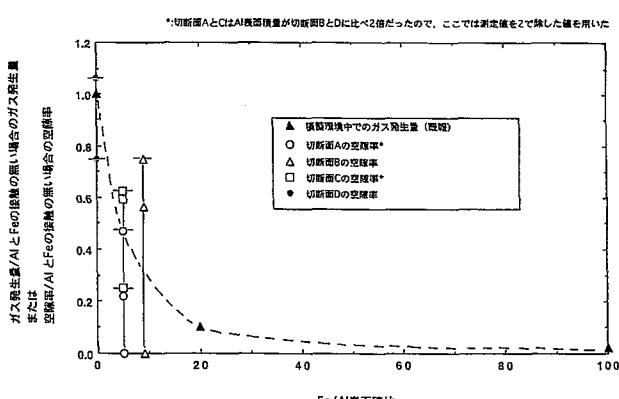


Fig.3 The effect of Fe/Al surface area ratio on the opening ratio produced from gas evolution of aluminum in mortar, and the gas evolution of aluminum in simulated mortar environments

Table 5 Time of setting of mortar and some estimated value related to gas evolution

モルタルNo.	1	2	3	4	5	6
固化体No.	HAL-1	HAL-2	HAL-3	-	-	-
始発時間、時間	4.77	5.45	5.75	5.90	8.37	8.35
推定される始発時の上昇温度、℃	9	9	10	10	14	14
推定される始発時のAlからの腐食速度、 $\text{cm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$	9.8	9.8	10.5	10.5	13.3	13.3
推定される始発時のAlからのガス発生速度(GER) $\times 10^3$ 、 $\text{dm}^3 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$	1.2	1.2	1.3	1.3	1.6	1.6
推定空隙率、% (単位体積当たりのAI表面積: $13 \text{ cm}^2 \cdot \text{cm}^{-3}$ 、FeとAI触媒の場合)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3

に気泡が抜ける限界の時間と考えられているので、空隙を形成する限界の時間として、この値を使用した。測定結果をTable 5に示す。固体状廃棄物の固型化に用いると考えられる種々のモルタルでは、4.8~8.4時間に始発時間があり、空隙の形成はこの時点で起こると考えられる。

#### ② 始発時のモルタルの上昇温度の推定

モルタルを固型化する際、セメントの水和反応により温度が上昇する。ドラム缶内での始発時の上昇温度の推定には、断熱条件を適用した。これは50 dm<sup>3</sup>ドラム缶の内径は公称390 mmもあり、水和反応が開始したばかりの比較的外気との温度差の小さい時点の上昇温度の推定であることによるものである。断熱条件での材令t日のセメントの水和反応による温度上昇は、

$$T_t = T(1 - e^{-dt}) = Z_E Q(1 - e^{-dt}) / B_E c \quad (1)$$

で表すことが可能である[13]。ここで、

$T_t$  : 材令t日におけるコンクリートの断熱上昇温度, ℃

$T$  : コンクリートの最高到達温度, ℃

$Z_E$  : 単位セメント量,  $\text{kgm}^{-3}$

$B_E$  : コンクリートの単位重量,  $\text{kgm}^{-3}$

$c$  : コンクリートの比熱,  $\text{kcal kg}^{-1} \text{C}^{-1}$

$Q$  : 最大発熱量,  $\text{kcal kg}^{-1}$

$d$  : 実験により定められる定数

$t$  : 材令, 日

である。ただし、普通ポルトランドセメントの場合、

$$Q = 85.80$$

$$d = 0.312$$

であり、また、一般的なコンクリートでは、

$$B_E = 2300$$

$$c = 0.25$$

である。単位セメント量は各モルタル毎に既知であるので、始発時間におけるセメントの水和反応を起因としたモルタルの上昇温度が(1)式を用いて推定される。各モルタルの上昇温度の推定結果をTable 5に示す。固体状廃棄

物の固型化に用いると考えられるモルタルでは、始発時間において、9~14°Cの温度上昇が推定された。

### ③ 始発時のAlの腐食度とガス発生量の推定

Alが炭素鋼と接触しない場合、ある温度におけるモルタル模擬環境中のAlの腐食度とそのときの水素ガス発生量は以下の関係がある。すなわち、(2)式で示すようにモルタル模擬環境におけるAlの腐食度の対数は絶対温度の逆数と1次の相関があり、(3)式で表すように1molのAlの溶解に対して1.5 molの水素ガスが発生する[7]。

$$\log CR - 8.94 = -2400/T \quad (2)$$

$$GER * 10^3 = 0.124CR \quad (3)$$

ここで、

CR : 腐食度,  $\text{gm}^{-2}\text{h}^{-1}$

T : 絶対温度, K

GER : ガス発生速度,  $\text{dm}^3\text{cm}^{-2}\text{h}^{-1}$

である。20°Cにて固型化を開始したと仮定して、始発時間における各モルタル中でのAlの腐食度とガス発生速度を(2)式と(3)式にしたがい計算し、Table 5に示す。Alが炭素鋼と接触しない場合、固体状廃棄物の固型化に用いると考えられるモルタル中でAlは始発時間に9.8~13.3  $\text{gm}^{-2}\text{h}^{-1}$ の腐食度と0.0012~0.0016  $\text{dm}^3\text{cm}^{-2}\text{h}^{-1}$ のガス発生速度を示すと推定された。

### ④ 空隙率の推定

Alからのガス発生を起因とした固化体内の空隙率( $P$ )は、固型化が開始した始発時間での単位時間当たりのガス発生量( $GE$ )から固型化材を通過し外に逃げた単位時間当たりのガス量( $EE$ )を差し引いた量を固化体体積で除した値に比例すると考えられる。 $GE$ が大きくなると $EE$ も比例して大きくなると考えられるので、ここでは  $EE=r'GE$  と仮定した。したがって、

$$P = r(GE - EE)/V = r(GE - r'GE)/V = r(1-r')GE/V \\ = r(1-r')GER * SA / V \quad (4)$$

ここで、

$P$  : Alからのガス発生を起因とした固化体内の空隙率  
 $GE$  : 固型化が開始した始発時間での単位時間当たりのガス発生量,  $\text{dm}^3\text{h}^{-1}$

$EE$  : 固型化材を通過し外に逃げた単位時間当たりのガス量,  $\text{dm}^3\text{h}^{-1}$

$V$  : 固化体体積\*10<sup>3</sup>,  $\text{dm}^3$

$SA$  : Alの表面積,  $\text{cm}^2$

$r$  : 炭素鋼との接触の有無により異なる定数, h

$r'$  : 外に逃げたガスの割合を示す定数

である。ここで、切断面Dの空隙率の測定結果より炭素鋼との接触がない場合の $r(1-r')$ は0.16である。Fig.3に示

すように実モルタル中のガス発生を起因とする空隙率とモルタル模擬環境中のガス発生量に与えるFe/Al面積比の影響の程度は比較的良好一致したので、Fe/Al面積比増加による $r(1-r')$ の減少の程度はモルタル模擬環境中のガス発生量データから類推することとした。その結果、Fe/Al面積比が5および9の時、 $r(1-r')$ は各々0.08、0.05とし、各モルタル中での空隙率を各切断面について推定した。Fig.4に実測値と推定値との比較を示す。個々の実測値にはばつきが大きいので、実測値と推定値の差は最大1.7%あったが、各切断面の実測値と推定値の平均値は比較的一致した。固体状廃棄物の固型化に用いると考えられるモルタルにもこの推定方法を適用し、比較的空隙率が大きくなる次のような条件で計算した結果をTable 5に示す。この時、推定空隙率は有効数字を考慮し、小数点以下一桁でまとめた。また、推定条件は単位体積当たりのAl表面積は実態調査結果[10]から推定された値の最大値に相当する13  $\text{cm}^2\text{dm}^{-3}$ とし、しかもAlが炭素鋼と絶縁している場合とした。その結果、実際の固体状廃棄物の固型化に用いると考えられるモルタルの始発時間、モルタルの上昇温度に若干の差はあるが、これらモルタル中のAlからのガス発生を起因とする空隙率は、比較的始発時間が長いモルタルを用いた場合でも1%以下と推定された。

## 4 結言

Alを微量含む固体状廃棄物をモルタルにて固型化した場合、固型化時にガス発生が生じ、充てん固化体のもつ

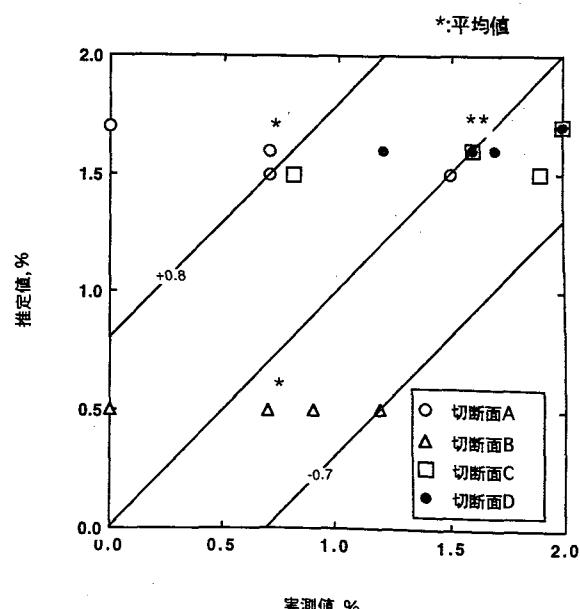


Fig.4 Comparison of the measured opening ratio with the estimated value

放射性核種保持機能に影響を与える可能性があるので、実際にAlを含有する模擬固化体を試作し、固化体中の空隙率を測定した。また、実際の固体状廃棄物の固型化には種々のモルタルの使用が考えられるので、使用するモルタルの物性値やAlからのガス発生量の定量結果等から固化体の空隙率を推定する手法を検討した。その結果、以下の結論を得た。

- 1 試作した固化体の空隙率はばらつきは大きいものの、Alと炭素鋼が接触する部分では接触のない部分に比べ減少した。実モルタル中のガス発生が起因とする空隙率とモルタル模擬環境中でのガス発生量に与えるFe/Al面積比の影響の程度は比較的良好一致した。実モルタル中の空隙率のばらつきが大きい原因としては、実モルタル中では溶液抵抗の大きくなる部分が生じ、異種金属接触の効果が小さくなりAl単独時のようにガス発生し空隙率が大きくなったり、腐食生成物が生じた部分で腐食反応が低下し、空隙率が小さくなったりしたためと推定した。
- 2 使用するモルタルのプロクタ試験で定義される始発時間、上昇温度、腐食度、ガス発生速度から固化体の空隙率を推定する手法を確立した。固体状廃棄物の固型化に用いると考えられるモルタル中のAlからのガス発生を起因とする空隙率は、Al表面積を実態調査結果から推定された値とした時、Alが炭素鋼と接触しない場合でも1%以下と推定された。

#### 謝辞

本研究は、電源開発促進対策特別会計法に基づく科学技術庁からの受託研究「低レベル放射性廃棄物固化体長期浸出試験」の一部として実施した。

#### 参考文献

- [1] 松村勝秀、平井輝幸、北島英明、林勝、金川裕、谷口俊夫、岡本道明：原子力発電所雑固体廃棄物の廃棄体製作技術と課題。放射性廃棄物研究 2 153-181(1996).
- [2] 中居邦浩、高瀬博康、宮本哲史：浅地中処分施設におけるガス発生・移行評価 (1) 評価モデルの開発。日本原子力学会1996春の年会、大阪、3月27-29日、M46 (1996).
- [3] 橋爪修司、松本潤子、馬場恒孝：モルタル中におけるAlのガス発生挙動（受託研究），JAERI-Review 96-013 (1996).
- [4] 藤澤龍太郎、長俊之、菅原克生、滝沢与司夫、堀川義彦、塙見隆行、廣永道彦：処分環境下での鉄とアルミニウムの腐食挙動。日本原子力学会1996春の年会、大阪、3月27-29日、M41(1996).
- [5] 西高志、松尾俊明、廣永道彦、堀川義彦、塙見隆行：不燃性雑固体安定固化技術の開発 (4)-複雑形状Al廃棄物に対する腐食抑制剤の効果-。日本原子力学会1996春の年会、大阪、3月27-29日、M44 (1996).
- [6] 藤澤龍太郎、長俊之、菅原克生、滝沢与司夫：処分環境下での鉄とアルミニウムの腐食挙動。第43回腐食防食討論会予稿集、大阪、10月16-18日、A304 (1996).
- [7] 橋爪修司、松本潤子、馬場恒孝：モルタル模擬環境中でのAlからのガス発生挙動に与える環境因子の影響。材料と環境, 47(10), 638-644 (1998).
- [8] 北海道電力(株)、東北電力(株)、東京電力(株)、中部電力(株)、北陸電力(株)、関西電力(株)、中国電力(株)、四国電力(株)、九州電力(株)、日本原子力発電(株)：充填固化体の標準的な製作方法, 11 (1996).
- [9] 橋爪修司、松本潤子、馬場恒孝：アルミニウムからのガス発生挙動に与える鉄との接触の影響。原子力バックエンド研究, 5(1), 45-49 (1998).
- [10] (財) 原子力環境整備センター：低レベル放射性廃棄物処分用廃棄体製作技術について（各種固体状廃棄物）, 83 (1996).
- [11] ASTM: Annual Book of ASTM Standards, Volume 04.02, ASTM, 214-218 (1990).
- [12] 伊藤伍郎：腐食科学と防食技術、第5版、コロナ社、102 (1973).
- [13] 岡田清、六車ひろし編：改訂新版コンクリート工学ハンドブック、朝倉書店、1057 (1981).