

JAERI-M

放射性同位体製造資料-1234

8 0 8 4

ラジオアイソトープに関する輸送物の
安全性試験

1979年2月

岡根章五・立川克浩

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

ラジオアイソトープに関する輸送物の安全性試験

日本原子力研究所アイソトープ事業部製造部

岡根 章五・立川 克浩

(1979年1月17日受理)

日本原子力研究所アイソトープ事業部製造部では、放射性物質等車両運搬規則に従い、B(M)型、A型およびL型輸送物の安全性試験を実施した。

B(M)型輸送物の重量は約1800kgである。輸送物は ^{192}Ir (6540 Ci) と ^{32}P (188 Ci) を原子炉からRI製造棟に輸送するために使われ、構成は円筒型の積層板、アルミニウムハニカム吸収体および内枠に固定された引出型15cm厚鉛容器からなる。

B(M)型輸送物の安全性試験は、垂直、水平、斜め、逆さの4姿勢の9m落下試験と垂直、水平の2姿勢の1mピン上落下試験(パンチテスト)および耐火試験である。

パンチテストの最大衝撃力は735Gであり、9m落下試験では2590Gであった。

耐火試験は、輸送物をマッフル炉内温度が920℃に上昇した時挿入し、30分間加熱した。この間、鉛容器表面の温度は19.1℃の上昇であった。

A型とL型輸送物の12.2m落下試験では、模擬のRI溶液を入れた5mlのバイアルは何ら落下時に影響を受けなかった。

JAERI-M 8084

Safety test of transport packages for radioisotopes

Shogo OKANE and Katsuhiro TACHIKAWA

Division of Radioisotope Production, Radioisotope
Center, JAERI.

(Received January 17. 1979)

The Division of Radioisotope Production, JAERI, has tested safety of type B(M), A and L packages according to the regulations of RI transportation.

The type B(M) package weighing about 1800 kg. Used for transport of ^{192}Ir (6540 Ci) and ^{32}P (188 Ci) from reactors to the Radioisotope Production Laboratory, consists of a cylindrical plywood receptacle, aluminum honeycomb shock absorbers, steel framework and a 150 mm wall thickness drawer type lead container.

Safety tests for type B(M) included 9 m high free drops in four postures, vertical, horizontal, corner and reverse, 1 m free drops on to an iron rod with in two postures, vertical and horizontal (the latter for punch test) and thermal test.

The maximum acceleration in the punch test showed 735 G and in the 9 m drop test 2590 G.

For thermal test of the whole package, a large muffle furnace was used. When the temperature of furnace reached 920°C , the package was inserted into it and heated for 30 min. During the test surface temperature of the lead container rose only by 19.1°C .

In 12.2 m free drop of type A and L package as safety test, 5 ml vials containing simulation RI solution retained their integrity without breakage.

Key words : Package, Radioisotope Transportation,
Accidental Safety Test, Drop Test,
Punch Test, Thermal Test, Container.

目 次

1. ま え が き	1
2. 経過および調査	2
3. L型輸送物の安全性試験	4
3.1 落下試験	4
4. A型輸送物の安全性試験	8
4.1 落下試験	8
5. B(M)型輸送物の安全性試験	11
5.1 試験計画	13
5.2 試験体の設計製作	13
5.3 1 mピン上落下試験	20
5.3.1 1 mピン上垂直落下試験	20
5.3.2 衝撃力の測定	20
5.3.3 1 mピン上水平落下試験	22
5.3.4 衝撃力の測定	23
5.4 9 m垂直落下試験	26
5.4.1 衝撃力の測定	26
5.5 9 m斜め落下試験	29
5.5.1 衝撃力の測定	31
5.6 9 m水平落下試験	31
5.6.1 衝撃力の測定	33
5.7 9 m逆さ落下試験	33
5.8 耐火試験	35
5.8.1 耐火試験の結果	36
5.9 放射線漏洩試験	41
6. 結 論	44
謝 辞	44
参 考 文 献	45

Contents

1.	Preface	1
2.	Progress and survey	2
3.	Safety test of the type L package	4
3.1	Drop test	4
4.	Safety test of the type A package	8
4.1	Drop test	8
5.	Safety test of the type B(M) package	11
5.1	Experimental program	13
5.2	Design and fabrication of the package	13
5.3	1 m Punch test	20
5.3.1	Vertical 1 m punch test	20
5.3.2	Measurement of impact acceralation	20
5.3.3	Horizontal 1 m punch test	22
5.3.4	Measurement of impact acceralation	23
5.4	Vertical 9 m drop test	26
5.4.1	Measurement of impact acceralation	26
5.5	Corner 9 m drop test	29
5.5.1	Measurement of impact acceralation	31
5.6	Horizontal 9 m drop test	31
5.6.1	Measurement of impact acceralation	33
5.7	Reverse 9 m drop test	33
5.8	Thermal test	35
5.8.1	Results of thermal test	36
5.9	Radiation leak test by ^{60}Co	41
6.	Coclution	44
	Acknowledgement	44
	References	45

1. ま え が き

日本原子力研究所(原研)で製造したラジオアイソトープの頒布に当っては、その輸送を安全におこなうことが必要である。昭和34年にはじめて ^{35}S を所外に配布して以来、原研はラジオアイソトープの輸送にすでに19年の実績を有しており、その間に輸送容器の設計、製作に関しても多くの経験を積み重ねてきた。最近では年間100件を超えるラジオアイソトープの輸送がおこなわれているが、輸送時の安全確保に努めた結果、今までに輸送中の事故としては輸送車が乗用車に追突された1件が報告されているだけである。

最近になって、IAEAが2回にわたって放射性物質の安全輸送のための規則の改正をおこない、わが国でも原子力委員会が昭和50年1月この規則に準拠して原子力委員会決定「放射性物質の輸送に関する技術的基準について」をおこない、関係省庁に対してこの決定に基づいて法制の整備をおこなうよう勧告した。

これを受けて運輸省は「放射性物質等車両運搬規則」の改正作業に着手し、放射線審議会の審議を経て昭和52年11月17日に改正された同規則が公布され、昭和53年1月1日から施行されることとなった。なお経過措置として、新規則による技術上の基準に適合しないものについては、昭和53年10月31日までの間は旧規則によることとされた。

このような動きに対応して、ラジオアイソトープの頒布に支障を来すことのないよう、製造部としては所内外の組織・機関と協力して、規則改正の動向を的確に把握することに努め、経過措置の規定について関係省庁に働きかけるとともに、予想される新しい技術的基準に適合する輸送物の設計、製作および試験を独自の計画のもとにすすめた。

幸い、関係者の努力によって、輸送物の設計、製作および試験は多くの困難を克服して所期の成果をあげることができ、昭和53年11月7日には新規則による最初の ^{192}Ir の出荷を予定どおりおこなうことができた。

この報告書は新しい技術的基準に適合する輸送物の設計、製作および試験の概要をとりまとめたもので、今後、放射性物質および核燃料物質の輸送物を製作する場合にも有益な資料となるものと信ずる。

終りに輸送物の試験に御協力をいただいた下記の方々に厚く謝意を表する。

B(M)型事故時試験

製造部 青山三郎, 加藤 久, 川上 泰, 加藤岑生, 黒沢清行, 久保田益充, 小林勝利,
小暮広人, 反田孝美, 中村治人, 山口五十夫

環境安全研究部 大内丈光, 土尻 滋, 比佐 勇, 森山 昇

L, A型落下試験

製造部 小暮広人, 反田孝美

事業課 伊藤康博, 介川 達

2. 経過および調査

製造部は、放射性医薬品や工業利用等に供するラジオアイソトープ（以下RIと略す）を製造し出荷頒布をおこなっている。これらのRIの製造では、ターゲット物質を東海研究所研究炉のJRR-2, -3, -4あるいは大洗研究所のJMTRの各原子炉で照射したのち製造棟で処理して製造する。照射済みターゲットの運搬は利用する原子炉により異なり、東海研究所では構内輸送であり、JMTRの場合は大洗研究所から東海研究所までのトラックによる公道輸送となる。過去3年間に製造部が処理した照射済みターゲット（JMTR照射分のみ）およびRI製品の輸送方法別の件数をTable 1 にしめす。

わが国で核燃料物質およびRIを輸送する場合には、それぞれ「核原料物質・核燃料物質および原子炉の規制に関する法律（略称：原子炉規制法）」と「放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律（略称：障害防止法）」にまずしたがわなければならない。そして、輸送方法別に技術的な基準が「運搬規則」、「航空機による爆発物等輸送基準等を定める告示」、 「危険物船舶運送および貯蔵規則」の運輸省令と郵送による「郵便法」に定められている。

近年、RIおよび核燃料物質の輸送に関し国際的に共通した規則が要求され、IAEAによって昭和36年にRI安全輸送規則（Regulations for safe transport of radioactive materials）が定められた。

その後、昭和41年と昭和48年¹⁾に改正がおこなわれわが国においても対応が迫られて、昭和49年1月に原子力委員会がRI安全輸送専門部会を設置してこの問題を審議した。昭和50年12月に「RIの輸送に関する技術基準²⁾」を示し、放射性物質等の輸送に関する法体系の整備をはかり昭和52年10月に原子炉規制法と運搬規則の改正がおこなわれた。その結果、核燃料物質等の運搬は科学技術庁の管理の下で原子炉規制法で期制されることとなり、新しい規則が昭和53年1月1日より施行された。RI等については運輸省の管理の下で運搬規則によって規制されることになったが、暫定期間がもうけられ昭和53年11月1日より実施された。

製造部ではこのようなRIの輸送規則の改正の動向に対応し、昭和52年12月より所内関係部課と連絡を取りながら新しい輸送物の技術基準に対する調査をおこない、各種の情報を集めた。また同年4月より日本アイソトープ協会が科学技術庁から受託して設置した「輸送物の試験委員会」にも参画した。一方、製造部の既存の輸送物の安全試験は調査結果などにもとづいて作成した独自の計画を立案し実施した。

Table 1 Number of irradiated capsule and RI products under different conditions of transportation

Term \ Year		1975	1976	1977
Number of shipments of RI products	mode of transport			
	Car	93	155	175
	Mail	12	4	2
	Air	5	3	7
Number of irradiated capsules transported by car from OARAI to TOKAI		14	13	6

3. L型輸送物の安全性試験

製造部で出荷している製品は、液体状および固体状といろいろであって、L型輸送物はそのうちの少量のRI輸送に適合する。

試験体には、車両・航空機・郵便などいろいろな手段を用いて実際の出荷に使用されている段ボール箱を用いた。この試験体は実験開始時に簡易容器と呼ばれていたが、改正された運搬規則ではL型輸送物に該当しているものであり、これを用いて落下衝撃の耐久性能について試験をおこなった。

法的には障害防止法の施行規則第18条に運搬の基準が示めされ、さらに輸送物の技術上の基準として運搬規則がある。運搬規則の中では次のようにL型輸送物を規制している。

- (1) 外接する直方体の各辺は10 cm以上であること。
- (2) 安全かつ容易に取り扱かえること。
- (3) 運搬中、予想される内圧の変化、振動等によりきれつ破損等が生じないこと。
- (4) みだりに開封されないようにし、開封された場合でも、それが明らかになるように措置を講じること。
- (5) 最大表面放射線量率が0.5 mrem/h をこえないこと。
- (6) 許容表面密度以下であること。

3.1 落下試験

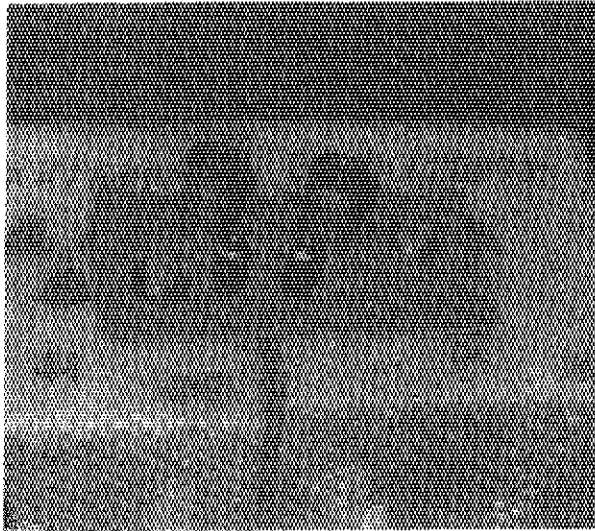
試験体は次のように製作した。Photo 1の1 にしめすように赤インク液（模擬RI製品）を5 mlを入れブチルゴム製の栓をほどこしアルミニウムキャップでかして密封したバイアル（O.D 20 mm ϕ \times 46 mm h \times 1 mm t）を3 cm厚の鉛容器（O.D 35 mm ϕ \times 70 mm h）に納めた。これを、通常RIを出荷するのと同じ方法でPhoto 1の2 のようにすいとり紙を吸収材として巻いて缶詰（O.D 75 mm ϕ \times 115 mm h）とし、Photo 1の3 のように緩衝体を兼ねた段ボール中仕切りで固定してPhoto 1の4 にしめすように段ボール箱（200 mm \square \times 250 mm h）で梱包した。試験体として2体準備した。段ボール箱はJIS規格に沿って製作されたものであり、試験体の総重量は1.3 kgであった。

落下試験は、製造棟の排気塔の踊り場でおこなった。高さはコンクリート道路から12.2 mであり、ここからPhoto 2 のように落下させた。準備した2体の試験体の落下姿勢は、Photo 3の1, 2 にしめすように水平および斜め（略称：コーナー）方向であった。

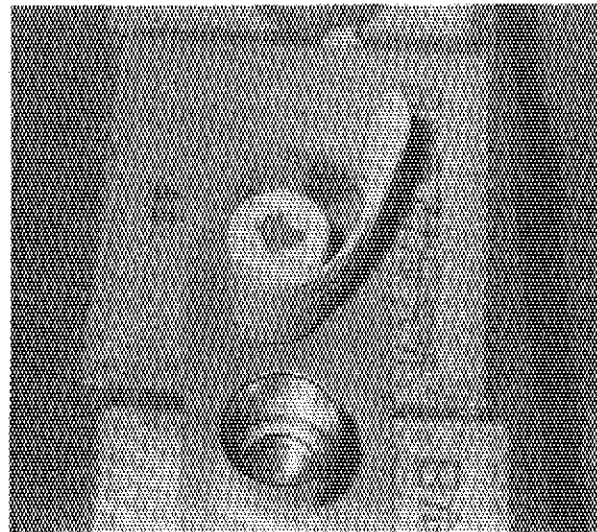
この結果、段ボール箱は胴体および角が変形した。段ボール中仕切りは、水平落下の時に缶詰があたった部分に変形した。斜め落下では缶詰の頭部が少し変形しており、段ボール箱の内部で上下に動いた事が明らかであった。2つの試験体中のバイアルは健全でしかも中の液体はもれることはなかった。

このように、12.2 mの高さからの落下において液体がもれることもなく、段ボール箱も健

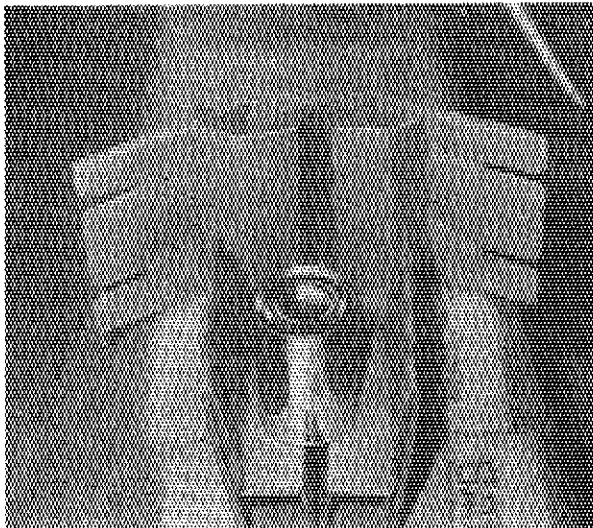
全であり段ボール中仕切りも固定と緩衝体としての機能が十分であることがわかり、実用上問題のないことを確認した。



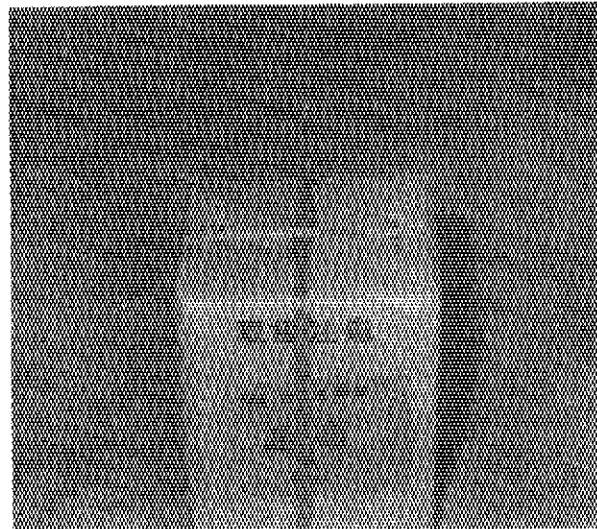
1. Vials and lead containers



2. Can and lead container wrapped with sorking paper



3. Canned container and cardboard partitioner



4. Completed package

Photo.1 Constitution of L type package

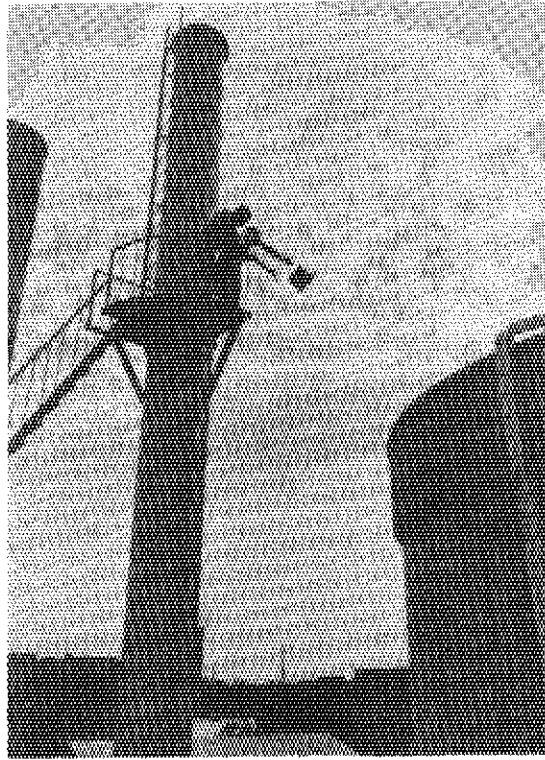
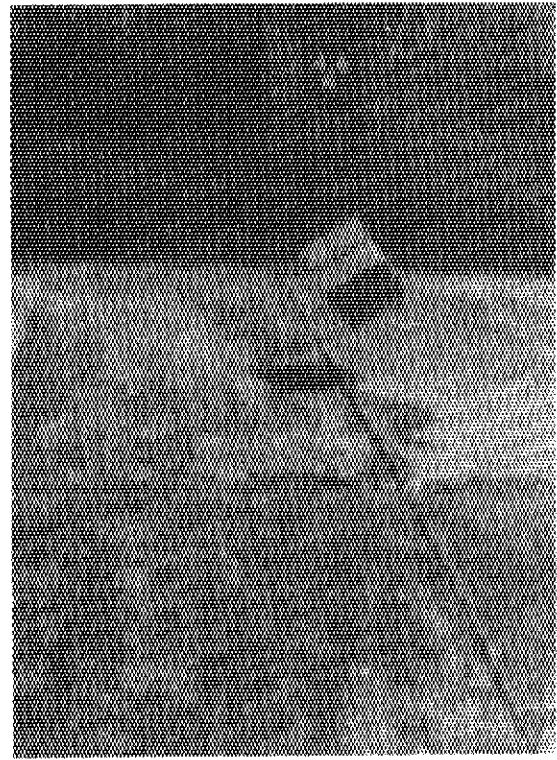


Photo.2 Free drop test of L type package



1. Horizontal drop



2. Corner drop

Photo.3 Postures of L type package in the 12.2 m drop test

4. A型輸送物の安全性試験

L型輸送物と同様の目的で使用するもので、A型として法規制をうける物を選んだ。障害防止法の適用は同じであり、運搬規則の中では基準としてL型の条件を満足していることや実証試験後の健全性の基準がしめされている。

液体状あるいは固体状のRIを運搬する輸送物に対する実証試験の項目は次の通りである。

- (1) 50 mm/hの雨量に相当する水を最低1時間吹きかける。(水吹き試験)
- (2) 重量5トン以下の物は1.2 mから最大の破損をおよぼすように落下させる。(落下試験)
- (3) 自重の5倍の重量を2.4時間かける。(圧縮試験)
- (4) 重量6 kg, 直径3.2 cmの丸棒(先端は半球形)を最も弱い部分に1 mの高さから落下させる。(貫通試験)
- (5) 液体RIの液量の2倍以上を吸収できる吸収材を遮蔽材の内側に備え、かつ吸収したのち表面の最大放射線線量率が200 mrem/hをこえない。

4.1 落下試験

試験体は、Photo 4の1にしめすように3 cm厚鉛容器の中に3.1と同様に密封したバイアルを入れてふたをし、Photo 4の2の外装箱(200 mm[□] × 186 mm h)に納さめたものである。総重量は20 kgである。

落下方法は3.1と同じ水平方向である。落下途中に逆さ(ふたが下側)になりその後、Photo 5の1のように1回バウンドしPhoto 5の2の状態に静止した。

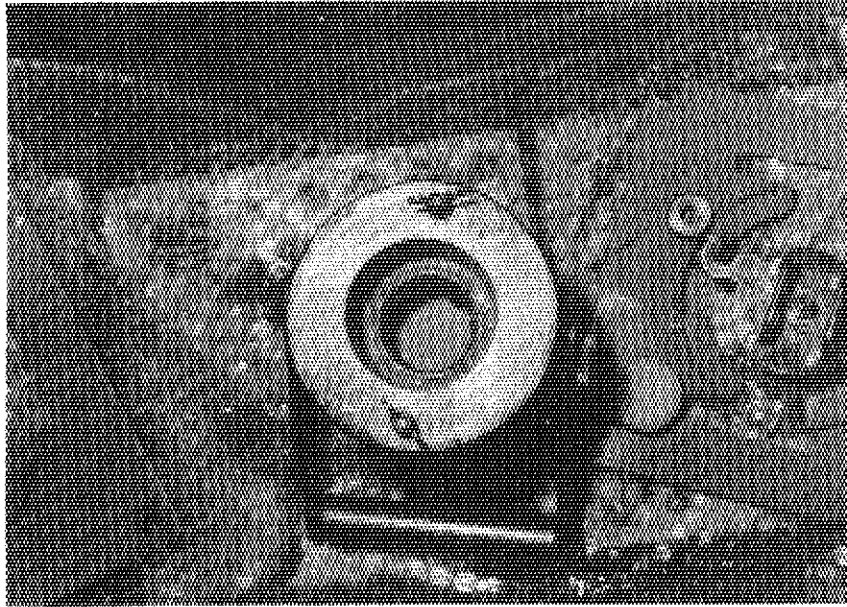
落下後の輸送物では、Photo 4の2の外装箱のアルミニウム板製(2 mm t, 2 mm t鉄板で補強)のふたが衝撃によりPhoto 5の2のように蝶番部が破断し本体より分離した。また、鉛容器を押さえていた鉄板中ふた(2 mm t)が鉛容器の上下運動でふくらんだ。

鉛容器では、Photo 5の3にしめすように把手が吸収体としての役目をして変形した。また、鉛容器のふたを押えていた蝶ネジがまがったほかに外観上の変化はなかった。バイアル自身は何ら落下時の影響は受けなかった。

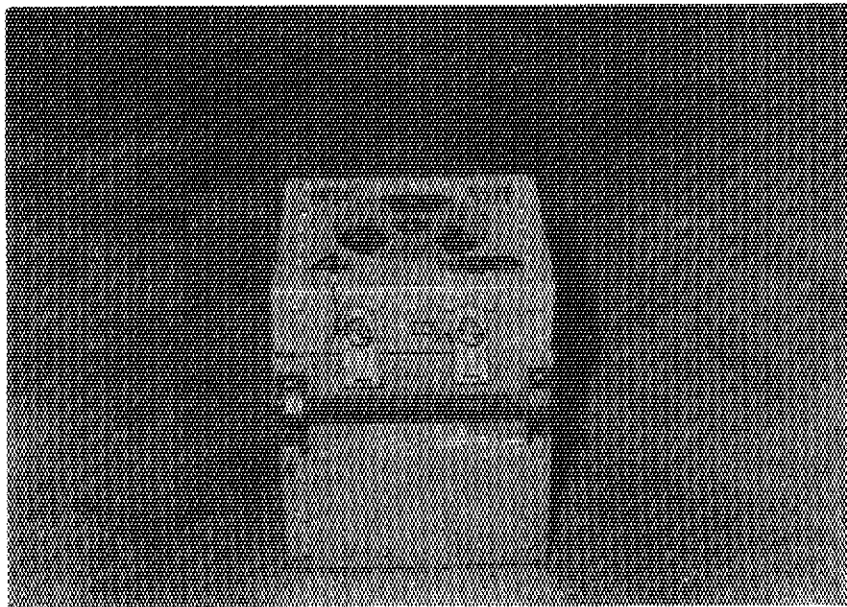
以上の結果から、12.2 mの高さから落下させても、準備したA型輸送物は何らの支障のないことを確認した。

今回の実験から下記の事がわかり、A型輸送物の改良に役立った。

- (1) 外装箱および鉛容器のふたの止め金具を改良する。
- (2) 落下後の鉛容器の取り出し易さを考える。
- (3) 他の事として、水密性と吸収材を内部に備えつけるように改良が必要である。

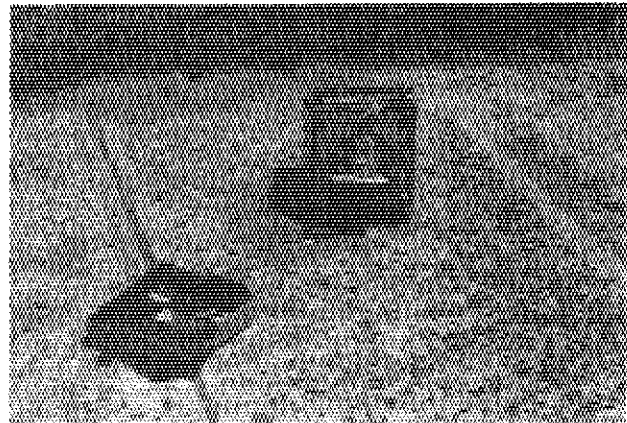


1. Lead Container (30mm thick)



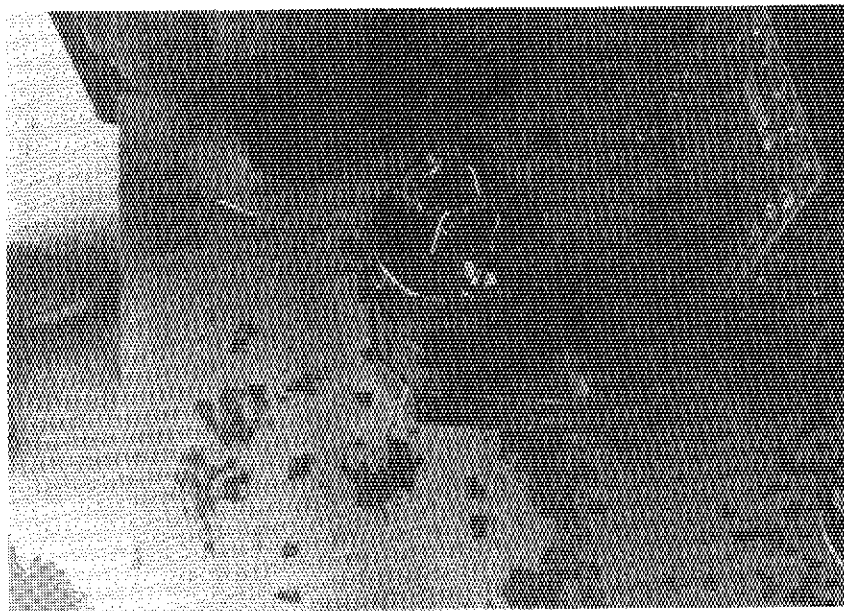
2. Shipping container

Photo.4 Constitution of A type package



1. Package rebounding after
1st collision to the ground

2. State of breakage of the package



3. Deformation of the handle of the container

Photo.5 Results of 12.2 m drop test for the A type package

5. B (M) 型輸送物の安全性試験

L型を除きA型およびB型輸送物には実証試験をおこない技術的基準の可否の確認を行うことが法的に規定されている。そして、B型にはB (M)、B (U)の2種類がある。

B型適用になる核種の数値は、Table 2の A_1 、 A_2 値をこえる場合であって、表には製造部で製造している代表的核種の数量をしめしたが、その中で A_1 、 A_2 値をこえる核種は ^{192}Ir と ^{32}P であり、規制ではB (M)型適用であってB (U)に該当する核種はない。

B (M)型輸送物としての通常時試験は次のようである。

- (1) A型輸送物の基準条件を十分に満足している。
- (2) (1)の合格後、野外温度が 38°C の所に1週間おく。

この試験後に

- (a) 1時間当り漏洩量が A_2 値の 10^{-6} をこえない。
- (b) 表面温度が日陰において 50°C をこえない。
- (c) 表面の放射性物質の放射能面密度が許容表面密度をこえない。

以上の条件をみたしたのち、事故時試験に移行し、

- (3) 9mの高さから最大の破損をおよぼすように落下させる。(落下試験)
- (4) 垂直に固定した軟鋼丸棒(O.D150mm ϕ ×200mm ℓ 、上面はなめらかな水平であること)に1mの高さから落す。(パンチテスト)
- (5) 800°C の温度環境に30分間置き、3時間自然放置する。(耐火試験)
- (6) 深さ15mの水中に8時間浸漬する。(1.5気圧相当)(浸漬試験)
- (7) 野外温度 38°C の環境に1週間放置する。(太陽熱負荷試験)

以上の順序で試験をおこない、

- (a) 輸送物表面から1m離れた位置で最大放射線線量率が1rem/hをこえない。
 - (b) RIの1週間当りの漏洩量が A_2 値をこえない。
- (a)(b)の項目に合格しなければB (M)型輸送物としては認められない。

B (M)型適用の核種としては ^{32}P と ^{192}Ir がある。 ^{32}P (半減期14.22日)の場合は、JMTRの反射体領域のH-9あるいはJ-9などの照射孔で速中性子束密度 $6.5 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 、熱中性子束 $2.4 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ の中性子束で結晶硫黄60gを20日間照射すると、188Ciの ^{32}P が炉の停止直後に生成している。10日後にRI棟に到着したときには115Ciである。 ^{32}P 製品は毎月1回1.32Ciを定期的に出荷している。この事から、大洗から東海への運搬時には A_1 、 A_2 の30Ciの数値をこえるのでB (M)型に相当し、東海から製品として出荷する場合はA型適用となる。

^{192}Ir (半減期7.44日)の場合にはJMTRでG-11あるいはI-11の照射孔で20日間熱中性子束密度 $2 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ でイリジウムペレット38.3gを照射すると、炉停止後に6540Ciが生成している。製品としては5900Ciと300Ciに分けて出荷している。 ^{192}Ir では、 A_1 および A_2 値が20CiであるためにB (M)型適用である。

Table 2 A_1 and A_2 values for radionuclides

Radionuclides	A_1 (Ci)	A_2 (Ci)
^3H	1000	1000
^{24}Na	5	5
^{32}P	30	30
^{35}S	1000	1000
^{42}K	10	10
^{51}Cr	600	600
^{58}Co	20	20
^{60}Co	7	7
^{64}Cu	80	80
^{90}Y	10	10
^{99}Mo	100	100
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	100	100
^{131}I	40	10
^{170}Tm	300	40
^{192}Ir	20	20
^{197}Hg	200	200
^{235}U	100	0.2

A_1 : Special form radioactive material.

A_2 : All other radioactive materials.

ここでは2核種の輸送における安全性試験をおこなった。

5.1 試験計画

製造部では昭和51年12月より過去のR I等の輸送物の安全性試験の調査のために工業技術院機械技術研究所⁽³⁾、自治省消防庁消防研究所⁽⁴⁾⁽⁵⁾、日本アイソトープ協会⁽⁶⁾⁽⁷⁾、京都大学⁽⁸⁾などの研究機関を訪問して実態調査をし、あわせて文献調査もおこなった^{(9)~(14)}。

その結果、日本アイソトープ協会が受託した昭和49年度原子力平和利用委託研究「R I輸送容器の安全性に関する研究⁽⁶⁾」が唯一のR Iの輸送物に対する実証試験であることがわかった。

この研究ではL型、A型輸送物の実証試験がすべて実施され、B型に対してはIAEA規則の1.2 m水平落下試験、貫通試験、1 mピン上垂直落下試験、9 m垂直落下試験、耐火試験の項目が同一試験体でおこなわれたものであった。そして昭和52年度に同様の委託研究を日本アイソトープ協会が受託し、B型に対する実証試験をおこなうことがわかったので、筆者らは独自の試験計画を立て実験に参加した。

試験計画表はTable 3 にしめす通りである。試験をおこなうにあたって、落下試験は9 m落下および1 mのピン上落下とし、姿勢としては(a)垂直、(b)水平、(c)斜め、(d)逆さの4種類とした。そして各部の衝撃力の測定には加速度変換器(Gメーター)を使用した。落下後の健全性の判定方法は、外観検査と ^{60}Co γ 線源を用いて試験前後の漏洩放射線線量率を比較する方法をとった。この試験に合格したのちに耐火試験をおこない、健全性は同様の方法を用いて合格の判定をすることとした。1個の試験体で各種の試験をおこなうこととした。

昭和52年5月から実験を開始した。昭和52年9月に運搬規則の改正が提示されたが、昭和53年10月31日まで暫定期間が設けられたので、計画表中のスケジュールの変更はおこなわなかった。昭和53年1月までに試験を終了し、その結果から運搬規則に沿ったB(M)型輸送物を設計製作し、昭和53年11月1日から使用できるように計画した。

5.2 試験体の設計製作

B(M)型輸送物の設計製作にあたって要求される項目に合格させなければならないので、堅牢な構造を考えることはもちろんであるが、同時に取り扱う作業者の労力を軽減する作業性も考えなければならない。このためには、輸送物の構造をより簡単にし、保護容器からの鉛容器の出し入れが容易でなければならない。この相反するような条件をどこで一致させるかが設計上の基本的な問題であった。

輸送物の実証試験は、大別すると落下試験と耐火試験に区別することができるため、これらを満足させる構造条件は次の通りである。

- (1) 落下衝撃に対し緩衝機能をもつこと。
- (2) 耐火構造であること。

^{192}Ir および ^{32}P 用の鉛容器はFig. 1の通りであり、本体とドロアー、扉、上部プラグの各部品から構成されている。通常引出型15 cm厚鉛容器と呼ばれる。一方の扉を開いて、セ

Table 3 Comparison of experimental program of the tests for the type B(M) transportation package and practice

年度	昭和52年	昭和53年	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月
項目	昭和52年	昭和53年	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月
容器関係	設計仕様	9m落下試験 ・7m落下試験 ・リ-フテスト	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月
計画	設計仕様	9m落下試験 ・7m落下試験 ・リ-フテスト	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月
関係	設計仕様	9m落下試験 ・7m落下試験 ・リ-フテスト	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月
調査	調査	9m落下試験 ・7m落下試験 ・リ-フテスト	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月
実施内容	調査	9m落下試験 ・7m落下試験 ・リ-フテスト	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月
実施者	阿部 立川	阿部 立川	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月
法改正の動き	12/13 法改正説明会	10/15 告示	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月
(R I)	12/13 法改正説明会	10/15 告示	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月
核燃料	4/6 モリス規制 説明会	10/15 告示	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月

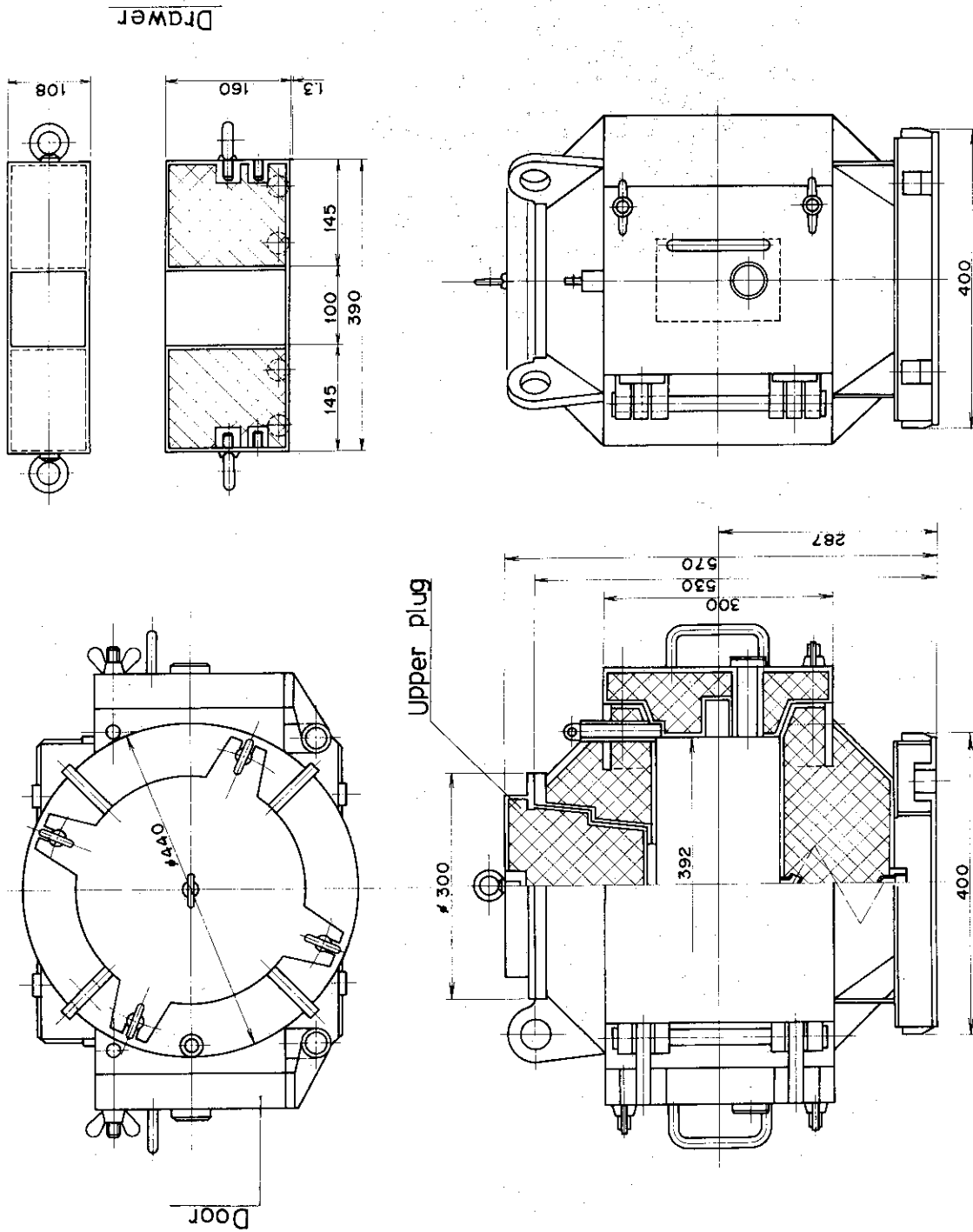


Fig. 1 Drawer type lead container

ルの後面の取出し位置にセットして、反対側の扉の通し穴から押し棒をセットしドロアーを前後に操作して照射済みキャプセルをPhoto 6 のように大洗研究所のホットラボの詰め替えセ

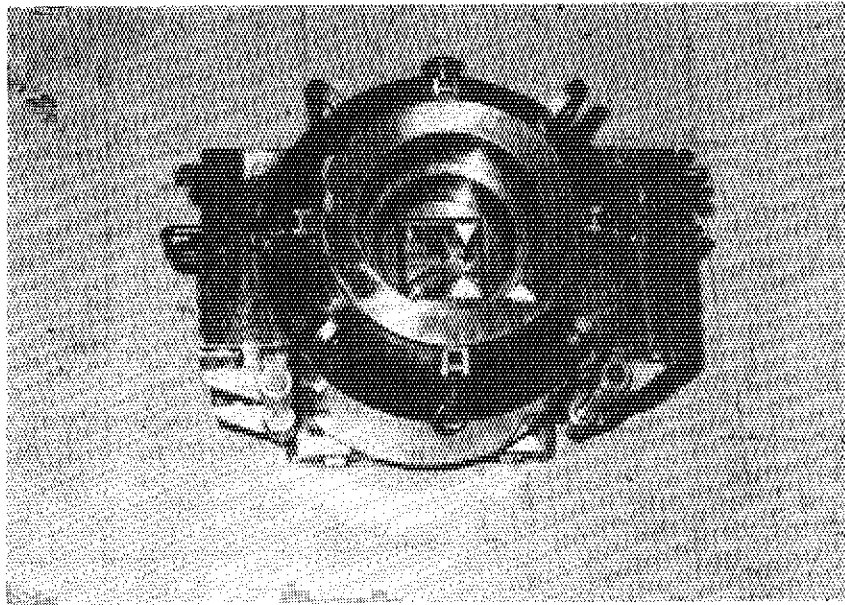


Photo.6 Drawer type lead container (150 mm thick) containing an irradiation capsule

ルから鉛容器に移す。この鉛容器をそのまま9 m落下あるいは耐火試験に供すると、破壊あるいは鉛の溶融のため、事故時試験後の漏洩線量率あるいは漏洩放射エネルギーの規制値を維持することができない。それゆえ、上記のべた2つの構造条件を満足させるためにFig. 2 にしめすように外箱保護容器（以下外箱と略す）を設計製作した。このモデルは昭和49年度の実証試験⁽⁶⁾のデータを参考にした。

設計上の特徴は、(1)外箱の上面と底面の外周に沿って鋼製のパイプ（90 mm φ）衝撃吸収体を取りつけた。(2)通しボルトの本数を減らし作業性を高めた。(3)積層板と内枠の間にアルミニウムハニカム（上下面は円板で側面は曲板）衝撃吸収体をもうけたことである。

外箱の外側は、垂直、斜め、逆さ落下に対しては、上面と底面に90 mm φの鋼製パイプに加えて十字に鋼製フィンをつけ、水平落下に対しては、胴部外周の垂直面にフィン28枚をつけて緩衝材として積層板を保護するようにした。

積層板は米松合板（19 mm t）を上下面では円形に、また側面では円環状に切出し、円筒状に板を60枚積層して用いた。各合板間にはレゾルシノールフォルムアルデヒド接着剤を塗布し、100℃で30トンの圧力をかけて5～6時間の加熱加圧により強力に成形接着した。合板は耐衝撃性にすぐれているばかりでなく、多孔質であるため断熱効果も大きい。外箱は本体とふた部に分離でき、両者は貫通する直径30 mmの通しボルト8本で結合される。

Fig. 1 の鉛容器はFig. 3 にしめす鋼製の内枠（試験結果から改造した最終的な形のもので、当初は5.4項で後述するものと同じものを使用した。）により、落下時の衝撃で扉や上部

プラグが開らいたり抜けたりしないように、また外箱内部で移動したりあるいは回転しないように固定される。内枠が落下時において上下および水平移動をおこなった時のために、衝撃吸収体として上下にはアルミニウムハニカム円板(785mmφ×50mm t)をまた側面には4分割(交換しやすいようにした)ハニカム曲板(900mmφ×820mm h×50mm t)を用いた。上下アルミニウムハニカムの内側には3mm厚の鋼製円板を置き、ハニカムが変形吸収できるようにした。同様の目的で4分割ハニカムに対しては鋼製の6mm円筒をおいた。

輸送物はフォークリフトによる運搬がしやすいようにラワン材の枕をつけてあり、要所要所に吊り金具を装備している。

全体寸法は、外径1300mmφ、高さ1220mm、積層板の厚さ150mmで重量は986kgである。鉛容器の重量はドロアー55kg、プラグ70kgで全重量は855kgで、内枠は120kgであって輸送物の総重量は1841kgである。

ハニカムのコアの厚さ50mmは次のようにして決定した。1841kgの輸送物が50Km/hの速度で衝突した時に、輸送物が300G(昭和49年度の試験結果から引用)まで耐えるとし、受圧面積を半径650mmの円とした時にコアの厚さを次の式から求めた。

$$t_c = \frac{1}{0.7} \cdot \frac{V^2}{2gG} = \frac{(13.8)^2}{0.7 \times 2 \times 9.8 \times 300} = \frac{190.44}{411.6} = 4.6 \text{ cm}$$

V: 衝突速度 50 Km/h = 13.8 m/sec

G: G = 300

g: 重力加速度

0.7: 全厚の約70%のみ吸収に役立つ

コアの挫屈強度(f_{cr})は次式で計算した。

$$f_{cr} = \frac{WG}{A} = \frac{1841 \times 300}{1.45} = 3.8 \times 10^5 \text{ kg/m}^2 = 540 \text{ psi}$$

A: 受圧面積 1.45 m²

計算値 $3.8 \times 10^5 \text{ kg/m}^2$ に対して実測値 $5.16 \times 10^5 \text{ kg/m}^2$ の昭和飛行機K・K製のハニカムを選んだ。

この製品 t_c を計算すると

$$t_c = \frac{WV^2}{f_{cr} \cdot A} \cdot \frac{0.5}{0.7g} = \frac{1841 \times 190.44 \times 0.5}{5.16 \times 10^5 \times 1.45 \times 0.7 \times 9.8} = 3.4 \text{ cm}$$

これにより、コア厚50mmは十分に余裕のあるものであることがわかる。

ハニカムは3S-アルミニウム箔を材料とした六角形の蜂の巣のような構造であり、密度 0.13 g/cm^3 、圧縮強さ 92.5 kg/cm^2 、押しつぶし強が 51.6 kg/cm^2 という特性をもっている。ハニカムは空気97%、アルミニウム3%の容積比率のため非常に軽い。表面はアルミニウム板を接着してサンドイッチパネルとして使用する。パネル内は無数の小さな気密室となっており対流が起らないために断熱効果がよく、熱伝導率は $0.4 \text{ Kcal/m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ である。

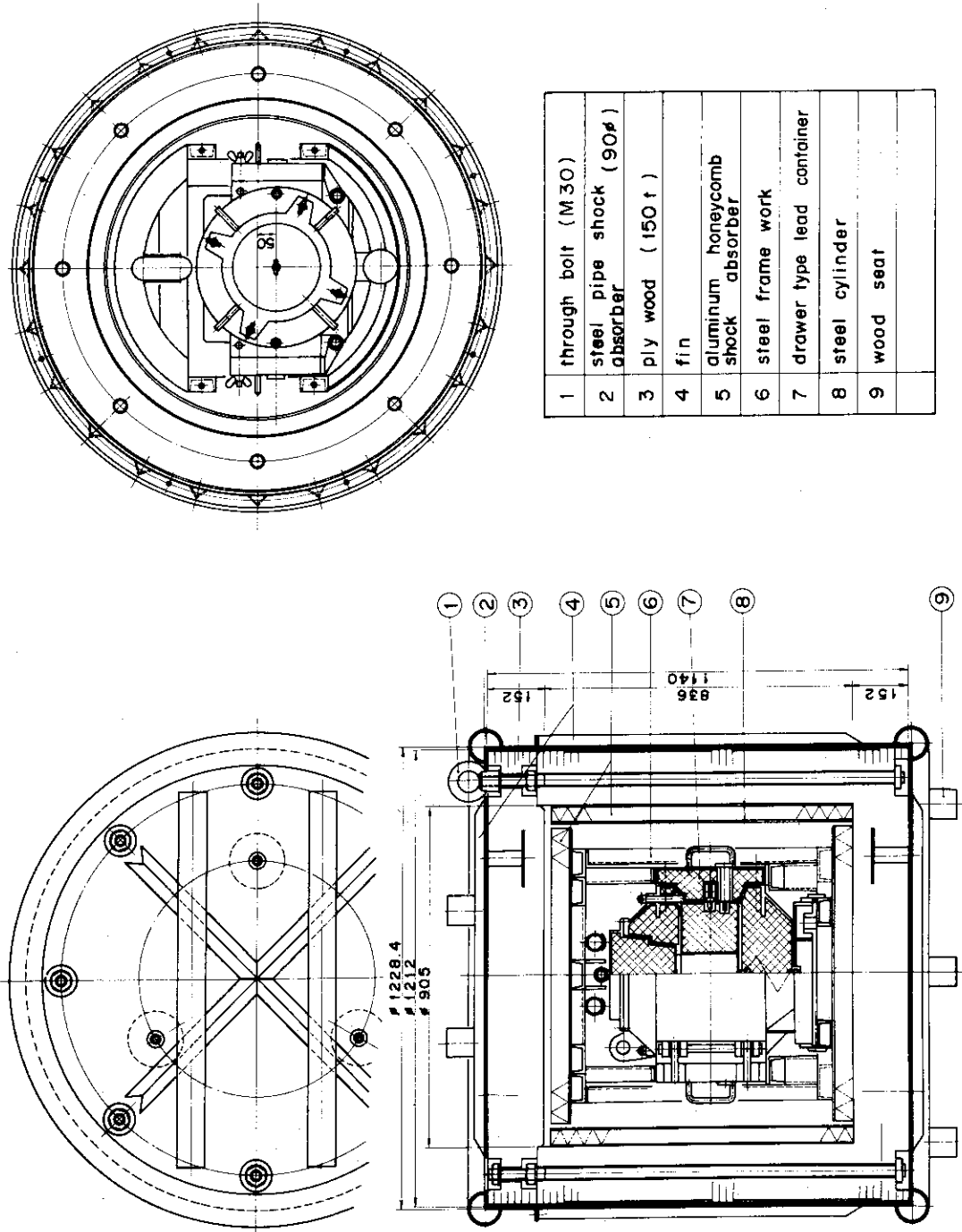


Fig. 2 Construction of package system

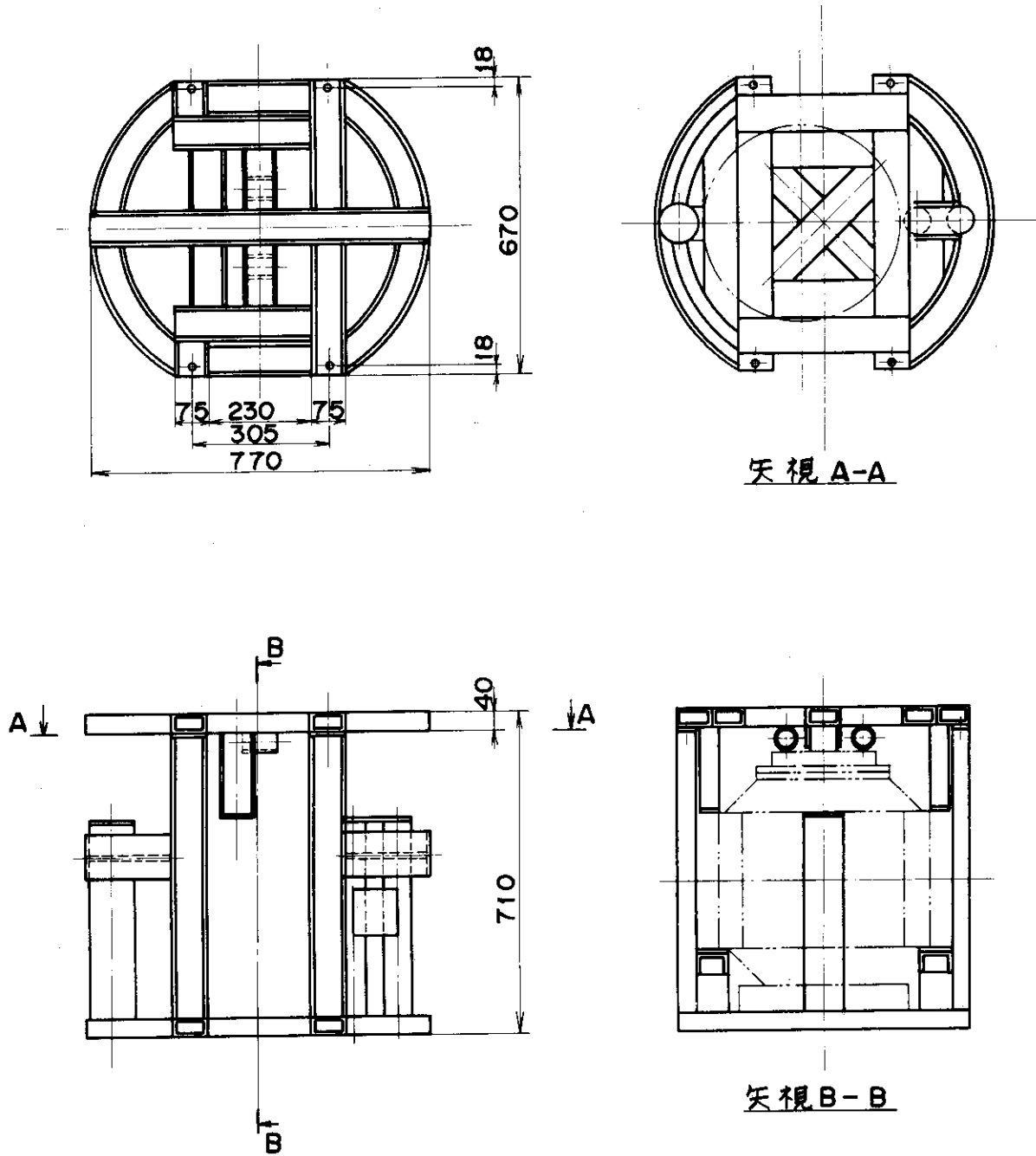


Fig. 3 Inner frame work

輸送物の外表面は落下試験時には白色に塗装し、試験後の状態観察と放射線漏洩線量測定のために、Table 4 にしめすように座標を作った。

耐火試験時には熱輻射の吸収を大きくするために黒色つや消し塗装とした。

5.3 1mピン上落下試験

5.2項でのべた試験体を工業技術院機械技術研究所に設置されているPhoto 11 にしめす落下塔で電磁式の着脱装置により1mの高さに吊り上げて、直径15cm、高さ20cmで上面がなめらかな水平である鋼製ピンの上に落下させる実験をおこなった。

試験体が落下する接地面は、鉄筋コンクリート床(6m×6m×2.5m)の上に鋼板(5m×5m×5mmと2m×2m×7mm)を重ねたものである。

落下姿勢は垂直、水平、斜め、逆さの順でおこなう予定であったが、垂直、水平の2姿勢をおこなった所で内枠が破損したので後の二者の試験は中止した。(この時の内枠はTable 3に示す9月におこなった9m垂直落下試験後、鉛容器の胴部のささえを改造したものであった)

5.3.1 1mピン上垂直落下試験

輸送物はPhoto 7のようにピン上に落ちた。このあと、衝突からFig. 4にしめすような7つの状態を経て静止した。状態図は、G値の解析をより簡単にするために輸送物の動きを想定したもので、AからDにしめす実測したG値曲線と時間的な関連はない。

状態図中の輸送物の動きは次の通りである。

①でピンにおち②でピンからずれて下部のショック吸収パイプから接地し③から⑤の間で横に転倒して上部の吸収パイプ、胴部およびフィンと接地して上下運動をくりかえしながら前方に $\frac{1}{3}$ 回転した。さらに⑥の接地面でスリップして静止した。

その結果、輸送物の形状変化は次のようになった。

- (1) 輸送物底部の中心部のピンがあたった部分は深さ4mm、直径30mmの凹みが生じた。
- (2) 内枠の支柱とふたを押さえているM-6ナット4本のうち2本が切損した。
- (3) その他は異常はなかった。

5.3.2 衝撃力の測定

輸送物に対する衝撃力の測定には、500Gまで測定できる共和電業K・K製のX・Y・Z方向が選択できる三軸型加速度変換器AS-500TAM50を使用した。500Gの選択理由は、昭和49年⁽⁶⁾に行ったデータから300G位が最大値になると予想し、もしオーバーしても十分に余裕があると判断したためである。

変換器(Gメーター)の取付け方向は、輸送物の落下姿勢を想定して決めた。(1)鉛容器の扉の面(Y方向)(2)鉛容器の上部プラグ上(Y, Z方向)(3)内枠の支柱(Z方向)の3個所に設置した。Gメーターはネジ止め型(30mm×38mm×16mm)で各取り付け位置にはタップを切って固定した。各Gメーターのリード線が落下の衝撃で切断しないように配慮して輸送物のふたから出し、動はずみ増幅器、4チャンネルの磁気式データレコーダーおよび記録計

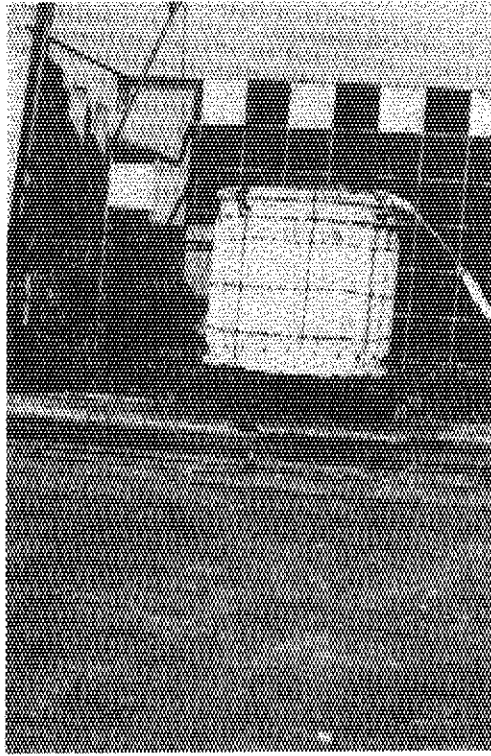


Photo.7 Vertical punch test of B(M) type package

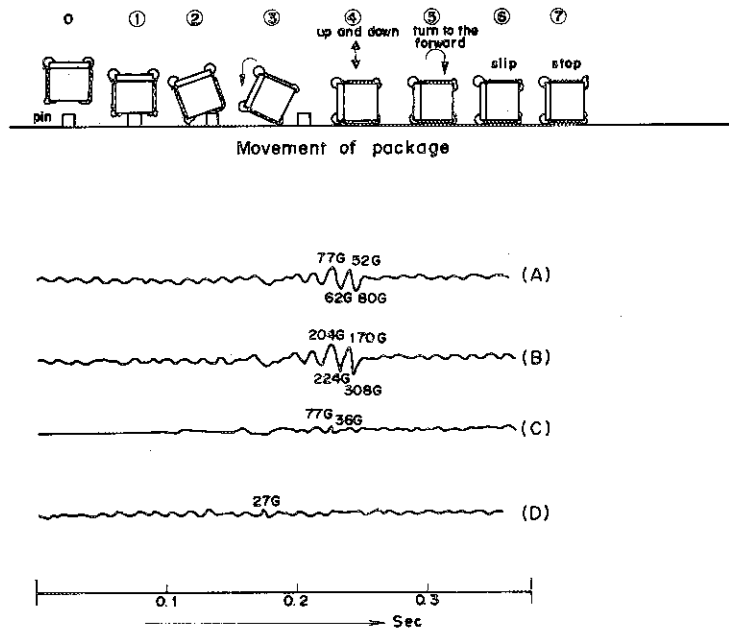


Fig. 4 Results of vertical 1 m punch test

- Position of G-meters (A) : container door (Y axis direction)
 (B) : upper plug of container (Y axis direction)
 (C) : upper plug of container (Z axis direction)
 (D) : support of steel frame work (Z axis direction)

(Visigraph) に接続して記録をとった。この記録は、後日直視式電磁オシログラフで再生して読み取り解析をおこなった。この結果を Fig. 4 の G 値の図にしめす。

取り付けた G メーターの最大 G 値は、扉の面で Y 方向 (A) 80 G, プラグ上面で Y 方向 (B) と Z 方向 (C) でそれぞれ 308 G, 77 G, 内枠支柱では Z 方向 (D) で 27 G であった。(A) から (D) の G 値図を解析すると状態図①で Z 方向に力が働き、落下測定点に近い個所の順で (D) と (C) のように表われる。また、状態図②から⑤の間で Y 方向に力が働き (A) と (B) に表われる。(B) と (C) において (C) の 36 G の値が Y 方向に働く力とほぼ同じ時間に表われていることは、内枠が状態図②から③の間で複雑に Z および Y 方向に動いた結果である。状態図⑥から⑦については、大部分の衝撃力が吸収されてしまったと思われるが、X 方向に対する G メーターの設置はしなかったので、実際のごとはわからない。

以上のことから輸送物のピン上での Z 方向への力は余り大きくなく、むしろピンからずり落ちて接地してから静止するまでの Y 方向への力が強いことがわかる。この事は、内枠のボルトが 2 本切損した事や接地してから状態図⑤で外箱の中の鉛容器が回転した事などから証明される。

輸送物の動きと G 値図は各測定位置について解析すると次のようになる。

(A) 図の扉の G メーター (Y 方向) は、プラグ上面の G メーター (Y 方向) と距離的に近接しているため同じ動き方をしめしたが、G 値はプラグ上面より小さかった。

(B) 図のプラグ上面 (Y 方向) では、状態図③でピンより落ちて底部が床面に衝突し 204, 224 G をしめし、その後、状態図④で胴体部および上部が接地して上下運動をして 170 G をしめし、状態図⑤で $\frac{1}{3}$ 回転したために 308 G の最大値をしめしている。

(C) 図のプラグ上面 (Z 方向) では、状態図①で 77, 36 G の値は、ピンに衝突した時の底部から上部への衝撃力の伝わり (内枠の上下運動) によるものである。

(D) 図の内枠上 (Z 方向) の G 値は、状態図①②の時に生じたもので、底部の積層板やハニカムの衝撃力吸収が大きく効果を発揮した結果 27 G という小さい値となっている。

5.3.3 1 m ピン上水平落下試験

輸送物は Photo 8 のようにピンに落ちた。このあと、衝突から静止の間に Fig. 5 にしめすように 8 つの状態を経て静止した。

状態図中の輸送物の動きは次の通りである。

①でピンに落ち②でピンからずれながら前方に半回転して床面に落ちてゆき、④から⑤で上部および下部のショック吸収パイプとフィンが床面に衝突した。⑥で衝突のショックで前方に $\frac{1}{3}$ 回転して⑦でスリップし⑧で静止した。

その結果、輸送物の形状変化は次のようであった。

(1) 輸送物は底部から 6.6 cm の高さの所で 1 枚のフィンがピンの直径に相当して約 3.1 cm の深さでつぶれた。また、前方に半回転後床面に衝突した時の衝撃で、上・下のショック吸収パイプとフィンが少し変形した。

(2) 内枠が回転して動いたためにセットした G メーターのうち、1 個のリード線が切断され測定不能となった。

(3) 6mm厚鋼製の円筒に内枠が動いて衝突したために傷がついたが、目にみえる程の変形はなかった。しかし、側面ハニカムのうち鉛容器の胴部が衝突した部分は3mmの深さでつぶれた。

(4) Photo 9 のように鉛容器が回転して扉が内枠支柱のうちの1本にあたり、これが溶接部からとれた。同時に扉の蝶ネジ(SUS製)1本と内枠のふたを固定しているボルトが4本切損した。

(5) 鉛容器は(4)のように動き固定位置から約10cmずれた。

以上水平落下試験の結果から試験体が(4)でのべた状態になり、続けて斜めおよび逆さ落下実験をおこなうことが不可能となったために中止した。このような内枠支柱の切損の原因は、鉛容器の上下の押さえは考慮したが回転変位に対しては対策をほとんど考えなかった事による。このため、上下動と回転変位を防ぐような構造でさらに堅牢な物に改造しなければならないことがわかった。また、水平落下では衝撃が大きいことがわかり9mの落下試験の順序に参考となる資料がえられた。

5.3.4 衝撃力の測定

Gメーターは5.3.2と同じものを使い、位置は(1)扉(X方向)(2)上部プラグ上(X方向)(3)内枠支柱上(X方向)(4)底部積層板上(Y方向)に固定した。落下方向はX方向になるようにした。

この測定結果をFig. 5のG値の図にしめす。取り付けたGメーターの最大G値は、内枠支柱のX方向(C)に169G、扉のX方向(A)に735G、プラグ上面のX方向(B)に407Gの値であった。

(A)から(D)のG値図を解析すると、輸送物にはピンにあたってから静止するまでの8つの動きの中でもととして、X方向に力が働き(A)から(C)にその値を表わしている。

(D)のY方向に働いた力は状態図④の時に発生したもので、リード線が切れたために詳細は分らないが、積層板などの吸収力の大きさを考えると値は余り大きくならないと推定される。

輸送物の動きとG値図は各測定位置について解析すると次のようになる。

(A)図の扉(X方向)はGメーターの取り付け位置が衝突側のため最大G値が735Gと大きかった。また多くのピークから、鉛容器の回転による支柱およびボルトと蝶ネジの切損などから複雑な動きが推定できる。ピークを解析すると(イ)ピン上衝突の衝撃、(ロ)半回転後の床面衝突の衝撃、(ハ)その後のバウンドによる上下動の衝撃、(ニ)スリップ後の上下動が考えられる。この衝撃に対応するピーク値は、196~320Gが上記の(イ)であり、389~246Gは(ロ)であり、547~339Gが(ハ)であって、そして他のピークは(ニ)の時に生じたものである。

(B)、(C)図のプラグ上面と内枠支柱(X方向)のピークは、上記(A)図で述べた4つの要因を表わしている。また(A)図と時間的にピークの出方が一致せず解析を困難にしているが、(B)、(C)図の場合は(A)図のように複雑な動きが少なく、輸送物の衝突時に発生するピークだけをしめしていると思われる。

(D)図の積層板上(Y方向)は、Gメーターのリード線の断線のため解析はできなかった。

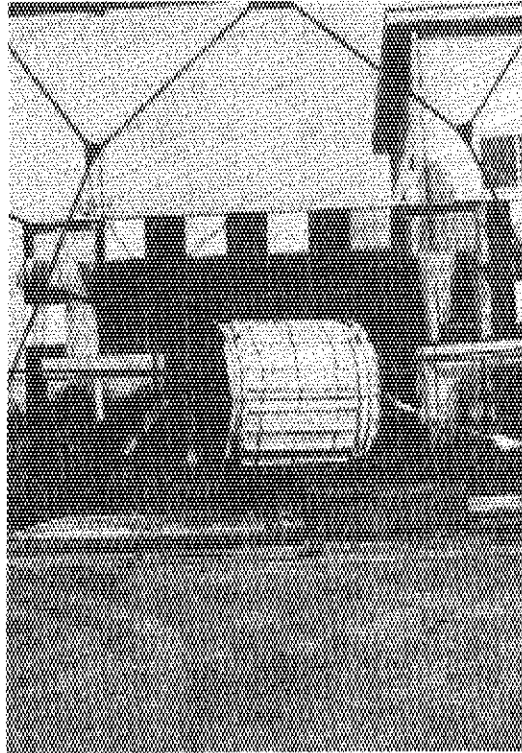


Photo.8 Horizontal punch test of B(M) type package

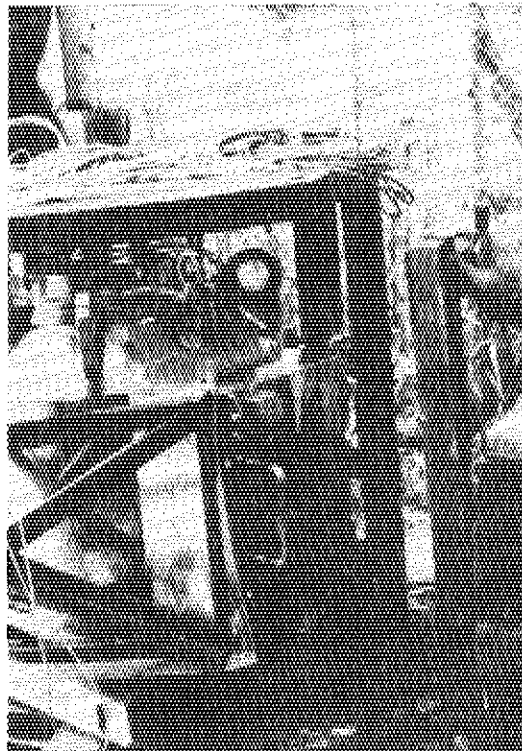


Photo.9 Results of horizontal punch test

Frame work supporting the container was deformed and SUS bolts were broken off

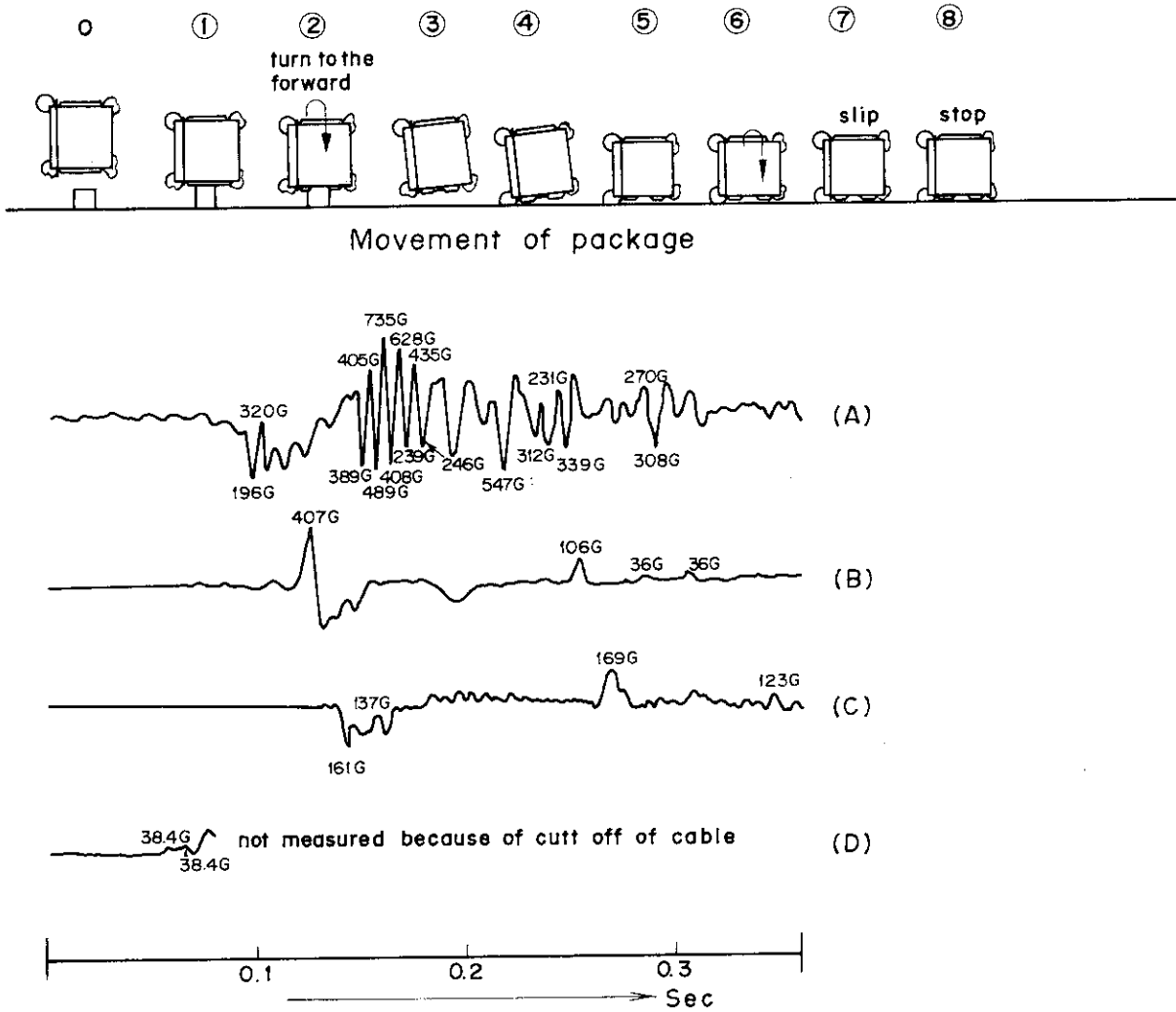


Fig. 5 Results of horizontal 1 m punch test

- Position of G-meters
- (A) : container door (X axis direction)
 - (B) : upper plug of container (X axis direction)
 - (C) : support of steel frame work (X axis direction)
 - (D) : the ply wood of bottom (Y axis direction)

5.4 9m垂直落下試験

Table 4 の実施内容の項にしめしたように9m垂直落下試験を最初におこなった。

昭和49年⁽⁶⁾の試験結果から第1回目の内枠は鉛容器の上下動だけを押さえるようにした。

Photo 10 にしめすように輸送物は外箱、アルミニウム製ハニカムおよび鉛容器を上下にサンドイッチ状に固持する内枠とからなる。

輸送物の高さの測定には所定の長さのヒモを底につけて距離をはかる方法と、1mごとに目盛りをつけて試験塔に固定してあるバーを目視で確認する方法をとった。

輸送物はPhoto 11 のように9mの高さに吊り上げ、垂直に切り離され床面に落下した。衝突後、Fig. 6 のような7つの状態をとって静止した。

状態図中の輸送物の動きは次の通りである。

①で輸送物は床面にラワン材があたって②のようにつぶれ始めた。③で完全につぶれ、続いて下部ショック吸収パイプがあたってつぶれた。同時に輸送物の反発により④で約30cmバウンドして⑤で最初の接地点から37cmずれた位置に接地して上下動をくりかえし、⑥で少し回転して⑦で静止した。これらの一連の動きは、輸送物の床面における落下跡から容易に観察できた。

上記の結果から輸送物の形状は次のように変化した。

(1) 着地時に7.5cm角のラワン材枕が完全につぶれた。このラワン材は下部ショック吸収パイプに溶接した10mmのボルトで固定していたために、落下時にショックが直接パイプに伝わり3.5から4.0cmのひびが2箇所に入った。

(2) 上部のアルミニウム製ハニカム円板と鋼製円板が衝突した時の衝撃で内枠にあたり、4箇所挫屈した。その最大幅は12cm、また最大深さは2cmであった。この状態をPhoto 12にしめす。垂直落下したのち跳び上がり最大挫屈部へ力が働いたことが観察でわかった。

(3) 鉛容器の上部プラグが抜けないように押さえていた内枠上部についている支えが上部プラグが上下動した衝撃で3.9から4.5cmまがった。

5.4.1 衝撃力の測定

GメーターはAS-1000TAM50を使用した。9m落下の衝撃力は共同実験者の実験結果から1000G位と予想したためである。

Gメーターの取り付け位置は、(1)扉(X方向)(2)上部プラグ上(Z方向)(3)底部ハニカム円板上(Z方向)(ハニカムの吸収能力の確認のため)(4)底部積層板上(Z方向)(5)内枠支柱上(X方向)であった。

この結果をFig. 6のG値図にしめす。各Gメーターの最大値は、積層板上のZ方向(D)で1098G、ハニカム上面のZ方向(C)で637G、扉のX方向(A)で215Gであり、上部プラグでは235Gであった。

(A)から(D)のG値図を解析すると、輸送物には床面にあってから静止するまでの7つの動きの中で主として、Z方向に力が働き(B)から(D)にその値が表われている。

(A)のX方向の力は状態図①から③の間で鉛容器が内部で動いたために生じた。

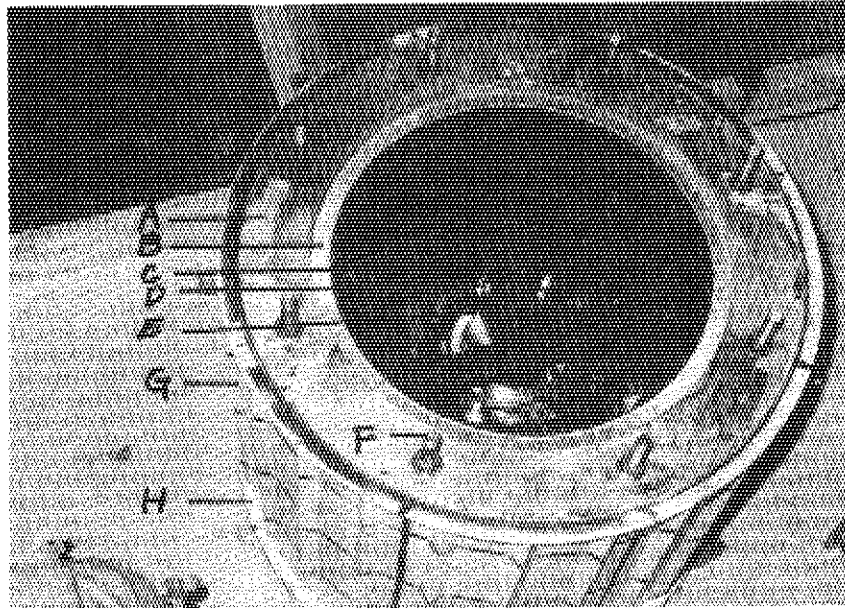


Photo.10 Structure of B(M) type package

- A:Cylindrical plywood shell (150mm thick)
- B:Aluminum honeycomb shock absorber (50mm thick)
- C:Steel frame work
- D:Steel cylinder (6mm thick)
- E:Drawer type lead container (150mm thick)
- F:M-30 through bolt
- G:Fin
- H:Steel pipe shock absorber



Photo.11 Tower used for free drop tests

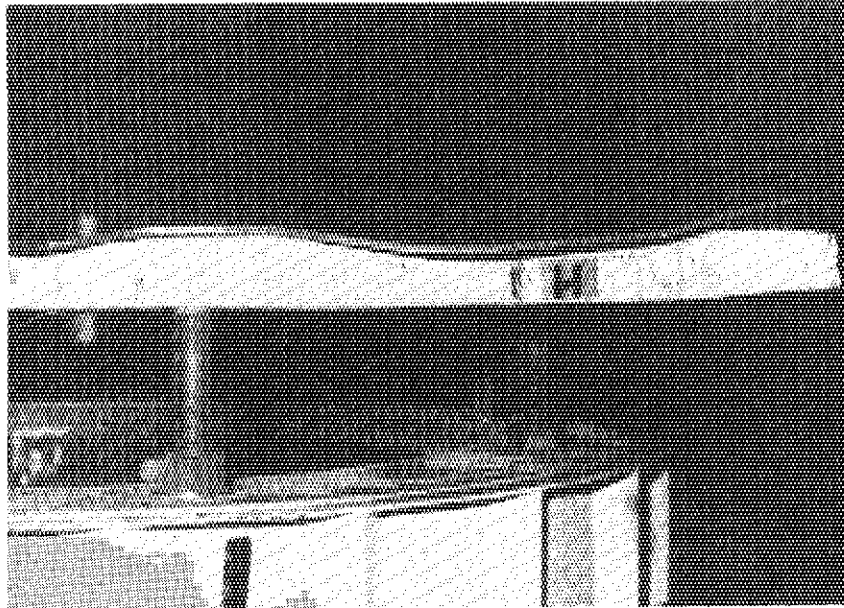


Photo.12 Deformation of the upper aluminum honeycomb by vertical 9 m drop test

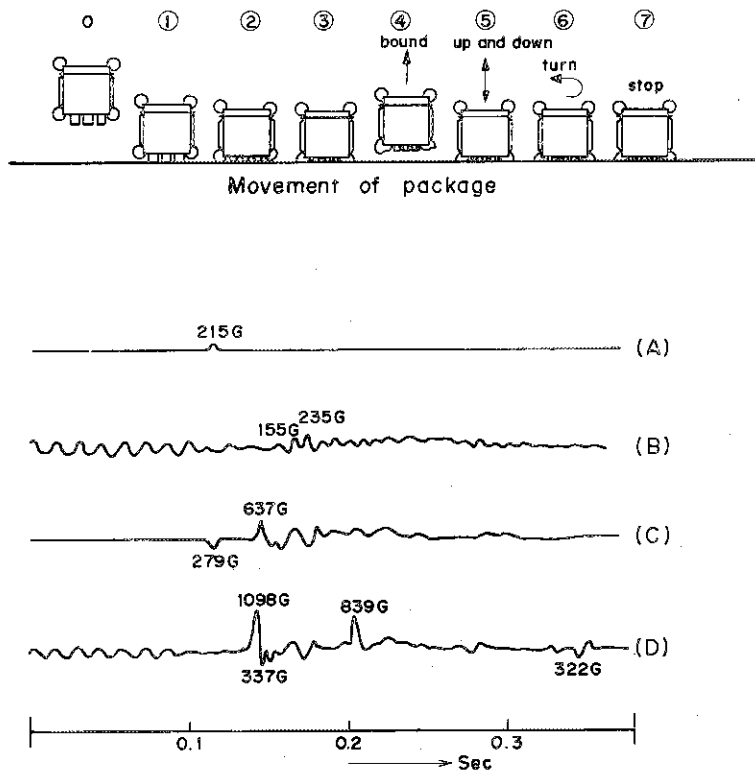


Fig. 6 Results of vertical 9 m drop test

- Position of G-meters (A) : container door (X axis direction)
 (B) : upper plug of container (Z axis direction)
 (C) : honeycomb disk of bottom (Z axis direction)
 (D) : the ply wood of bottom (Z axis direction)

輸送物の動きとG値図は各測定位置について解析すると次のようになる。

(A)図の扉(X方向)でのピークは、床面にラワン材が衝突した時、鉛容器が動き力が働いたもので小さかった。

(B)図の上部プラグ(Z方向)のピークは、衝突後、積層板とハニカムおよび内枠による衝撃力吸収があったために時間的に遅れている。

(C)図の下部ハニカム円板上では、接地後の状態図①から②の間で279Gをしめし、状態図②から③で637Gの値を表わしている。

(D)図の積層板上では、状態図③で1098Gをしめし、バウンド後の接地で839Gをしめし、さらにスリップ後、輸送物が床面から落ちないように防止した枕木にあたって322Gのピークが最後の方に出ている。

垂直落下でのG値は最大1098Gと大きな値をしめしたが、衝撃による上下動を防ぐ事だけを考えれば健全性を確保できることがわかった。

5.5 9m斜め落下試験

垂直落下に引き続き斜め落下をおこなった。垂直落下の試験結果を参考に鉛容器が動かないように固持するFig. 3にしめした内枠を使った。

IAEAがしめす斜め落下試験は輸送物の落下角度を45度に規定している。

この方法で試験体を一点吊りし、落下させた。落下後Fig. 7のような9つの状態をとって静止した。

状態図中の輸送物の動きは次の通りである。

①で下部ショック吸収パイプがあたって②から③で、パイプは完全につぶれて積層板中にくいこむような大きな変形をした。この状態をPhoto 13にしめす。④で倒れて横になり上部ショック吸収パイプが接地し、続いて⑤から⑥のように倒立した。⑦で上下動をおこなって⑧でスリップして⑨で静止した。

上記の結果から輸送物の形状は次のように変化した。

(1) Photo 13のように、元のパイプと比較して寸法をはかると、16cmつぶれて積層板側にくいこみ、幅は20cmにわたり底部の水平面から8cmもり上った。フィン一枚が少し変形したのみであった。

(2) 倒立したため上部ショック吸収パイプが少し変形した。

(3) 8本の通しボルトのうち、衝突位置にあった1本が(1)のように角に積層板があたったため、1.8cmふた側に浮き上った。

また、3本のボルトナットが1回転ゆるんだ。

(4) 鉛容器が動き内枠支柱の一本が少し曲がりボルト1本が切損した。

上記のように、斜め落下における外観変化の大きさに比べ内部の形状変化は小さかった。原因としては、ショック吸収パイプと衝突面の積層板の厚さが角で21cmと厚かったために、これらが緩衝材として十分に機能したためである。

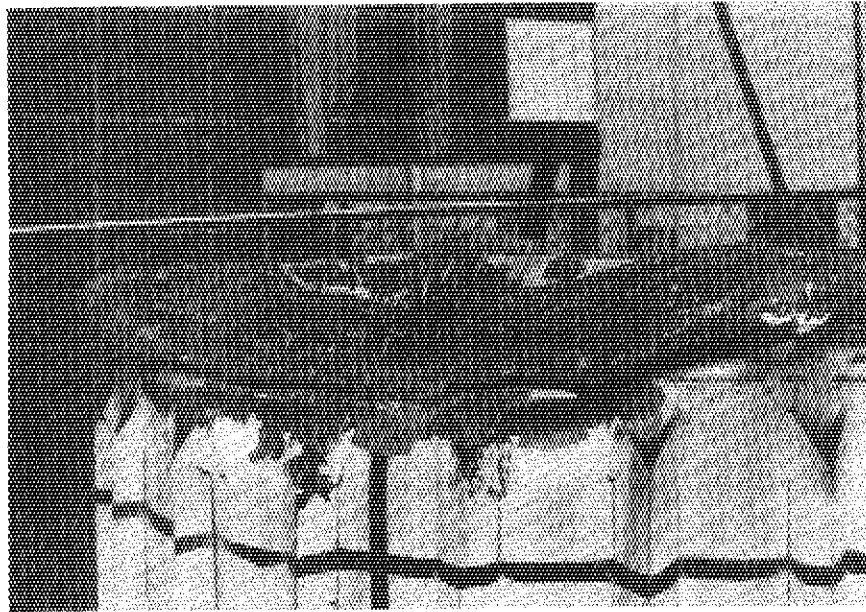


Photo.13 Deformation of the bottom steel pipe shock absorber by corner 9 m drop test

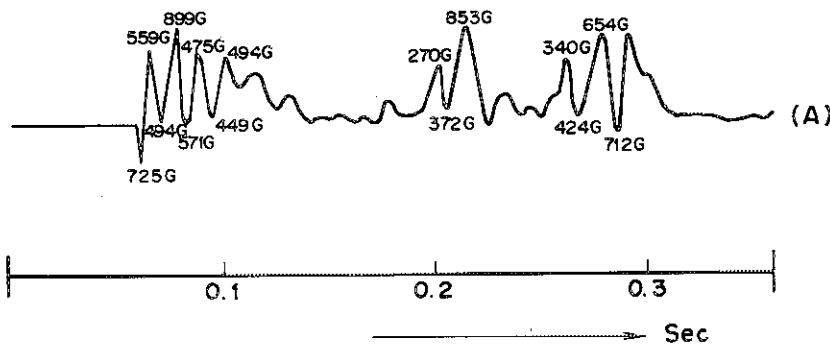
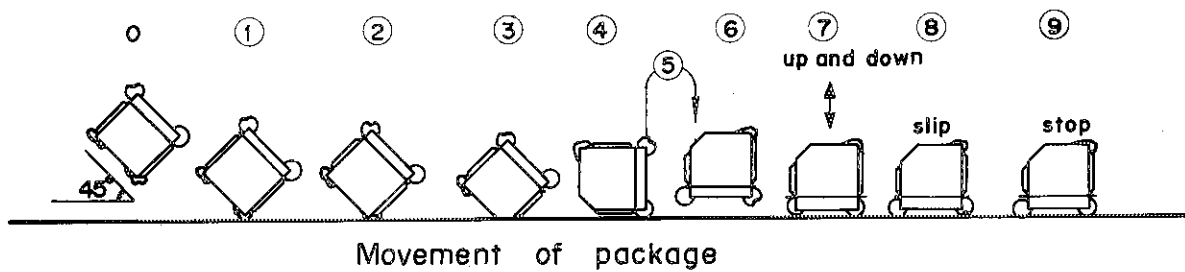


Fig. 7 Results of corner 9 m drop test

Position of G-meters (A) : the ply wood of bottom (Z axis direction)

5.5.1 衝撃力の測定

Gメーターは垂直落下と同じものを使用した。測定方向については輸送物が衝突後どのような動きをするか予想がむずかしかったが、(1)底部積層板上(Z方向)、(2)内枠支柱(Z, Y方向)、(3)上部プラグの上(Z, Y方向)、(4)扉(X, Y方向)に取り付けた。

この結果をFig. 7のG値図にしめす。4個所にGメーターを取り付けたがピークが表われたのは、積層板上だけで最大値は899Gであった。

(A)図の積層板上のG値図を解析すると、ピークの出方を3つに分けることができる。それは、(1)状態図①と②における衝撃、(2)状態図③から⑤の倒立するまでの衝撃、(3)倒立後の衝突から静止までのものである。

輸送物の動きとG値図を解析してみると、衝突して下部ショック吸収パイプが完全につぶれて行く状態図①から②の間で725Gから494Gの値をしめしている。そして③から⑤と積層板がつぶれて行く過程で時間的に遅れてから、270Gから853Gをしめし、倒立後の衝撃を340Gから712Gとしめしていることがわかった。

このように積層板上のZ方向だけにピークが表われ、他に出なかった原因は推定できなかった。

5.6 9m水平落下試験

斜め落下試験後、切損した内枠のボルト1本をかえて試験をおこなった。試験体の落下方向は、内枠の構造から最大の影響が出るように考えて、10°角の支柱のある方を衝突面とするようにした。

輸送物は着地後ほとんど回転も上下動もせず、Fig. 8のように3つの状態をとって静止した。

状態図中の輸送物の動きは、①で上・下のショック吸収パイプがあたり、②から③でパイプおよびフィンが完全につぶれた。

この結果から輸送物の形状変化は次のようになった。

(1) 衝突状況から、鉛容器および内枠などの重量がそのまま輸送物の外壁に加わり強い衝撃となった結果、下部のショック吸収パイプおよびフィン2枚が10cmの幅でつぶれた。上部の吸収パイプは長さ8cm位のつぶれで、つぶれの大きさから下部から上部へと順に接地したと考えられる。

(2) 内枠の4本の支柱は全部曲ってしまい、固定していたボルトも全部切損した。また10°角の鉛容器胴部支えの鋼材が衝突した側面ハニカムと鋼製円筒をつき破って積層板に6cmくいこみ、内部の観察をおこなうために鉛容器を出そうとしたが、道具を用いないとはずれなかった。取り出した時の状態をPhoto 14にしめす。

(3) 衝突した側面ハニカムが深さ1cmつぶれた。

(4) (1)から(3)の状況にもかかわらず鉛容器はほとんど無傷であった。

この結果から、内枠の構造としてハニカムに対する受圧面積を大きくすることと、角のついたものを使用しない方がよいことなどがわかり、Fig. 3にしめすような改造したものを作っ

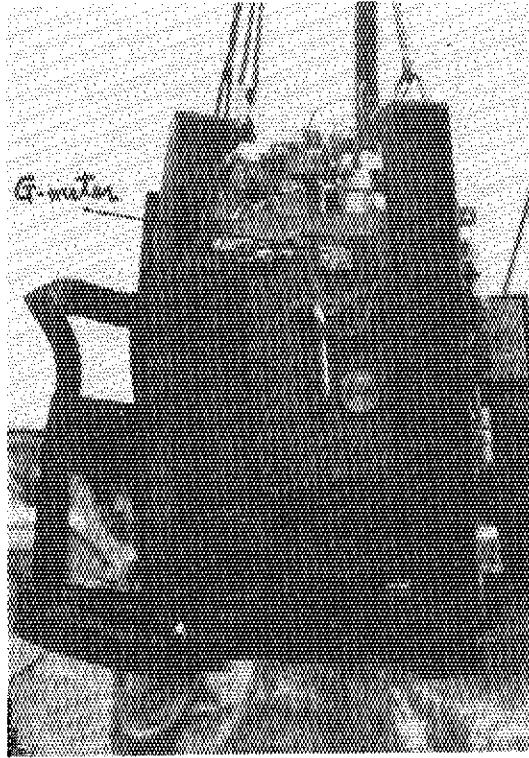


Photo.14 Deformation of the steel frame work by horizontal 9 m drop test

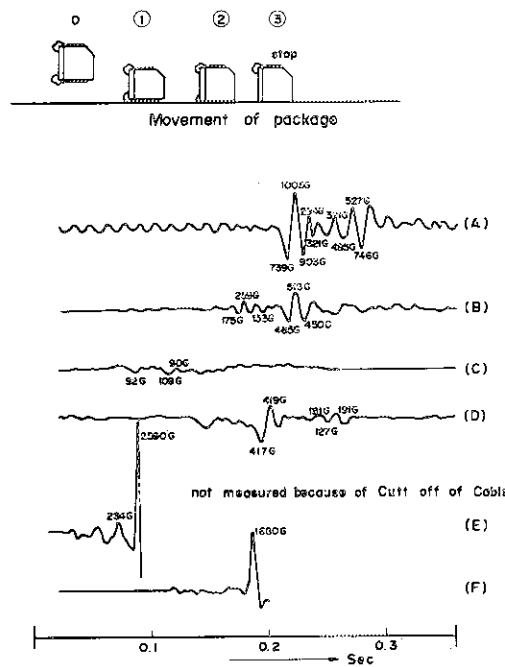


Fig. 8 Results of horizontal 9 m drop test

- Position of G-meters (A) : container door (Z axis direction)
- (B) : container door (X axis direction)
- (C) : upper plug of container (Y axis direction)
- (D) : support of steel frame work (X axis direction)
- (E) : ply wood of bottom (Z axis direction)
- (F) : ply wood of bottom (Y axis direction)

た。

5.6.1 衝撃力の測定

Gメーターは、(1)扉(Z, X方向)(2)上部プラグの上(Z, Y方向)(3)底部積層板上(Z, Y方向)(4)内枠支柱(X方向)に取り付けた。

この結果をFig. 8のG値図にしめす。各Gメーターの最大値は、扉のZ, X方向でそれぞれ1005G(A), 519G(B), 上部プラグのY方向で109G(C), 内枠支柱ではX方向で417G(D), 底部積層板のZ, Y方向でそれぞれ2590G(E), 1680G(F)であった。

底部積層板のGメーターのリード線が測定中に切断した。しかし切断する前に最大のピークが測定できた。(これ以上のG値が発生したかどうかは判断できない)

輸送物の動きとG値図は各測定位置について解析すると次のようになる。

(A), (B)図の扉のZおよびX方向で発生したピークは、鉛容器と内枠が内部で動いて支柱が曲がったり、ボルトがきれたり、補強円筒に衝突したためである。

(C)図の上部プラグのY方向のピークは、最初の衝突時に来たものである。

(D)図の内枠でのX方向のピークは、(B)図の状態が原因である。

(E)図の積層板上のZ方向で約2600Gという値が記録されたが、バウンドも上下動もせず静止したことを考えると、鉛容器および内枠の重量がそのまま外側に伝わったためと思われる。(F)図のY方向も同様な事であると考えられるがリード線が断線したため詳しい事はわからない。

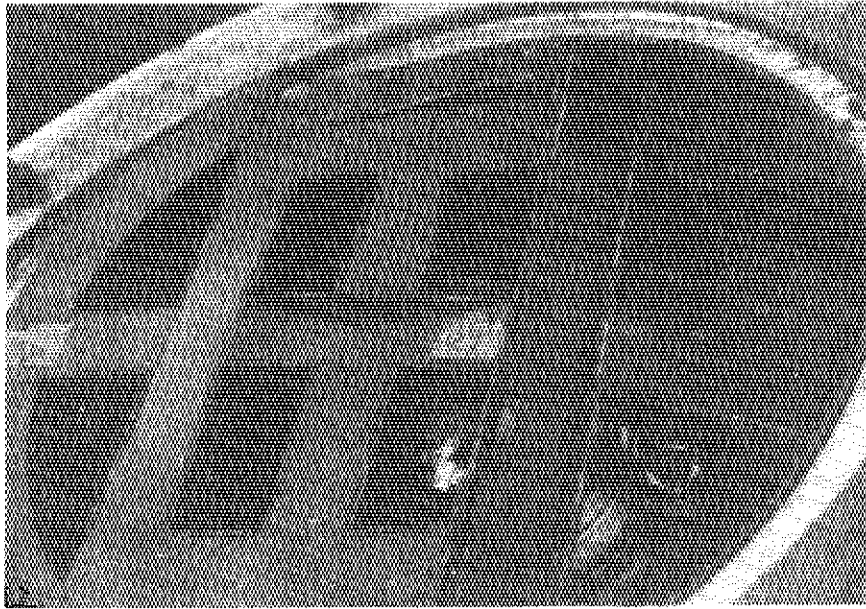
(A)図から(F)図の発生したピークの中で、最初の衝突時に積層板のZ方向にピークがあらわれている以外は、各図に時間的な関連は見い出せない。静止するまでの3つの状態の動きの中で、X, Y, Zの各方向にピークが出ていることから、(1)鉛容器と内枠の衝突、(2)内枠の破損、(3)内枠のハニカムと積層板の衝突、(4)(3)でのハニカムの吸収能力が生かされなかったなどの複数の要因が全て現われていると結論できる。以上の事から、輸送物の動きと各G値図との関連づけた解析も不可能であった。

5.7 9m逆さ落下試験

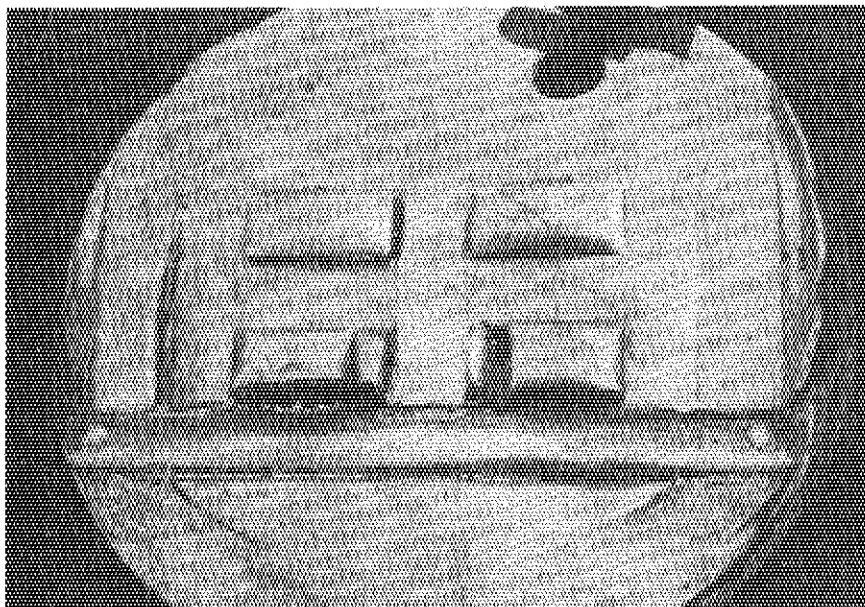
9m逆さ落下試験は、一日で斜め・水平を含めて3種類の試験をおこなわなければならなかった関係上、水平落下試験後の変形した内枠を修理する時間もなくそのまま、ボルト止めもせず曲がった支柱の上にふたをのせるだけでおこなうこととし、また上部ハニカムも内枠のふたの上へ直接乗せて試験をおこなった。また、Gメーターも固定が困難であったことと試験が時間に非常に大きく制約をうけたことなどから使用しなかった。

輸送物の破損状態は垂直落下試験と同じように、上部ショック吸収パイプおよび輸送物の頂部につけた7cm角のラワン材の枕が均一に押しつぶされ、またパイプが2ヶ所6cmにわたりひびが入った以外は、外観上の異状はなかった。

落下してから20cm位バウンドしたがあまりスリップはしなかった。通しボルトも何ら損傷



1. Deformation of frame work



2. Deformation of aluminum honeycomb

Photo.15 Deformation of the upper frame work and honeycomb
in reverse 9 m drop test

を受けることはなかった。

内枠のふたの鋼材の枠は、箱型溶接構造であるのでPhoto 15の1のように鋼板が溶接部より剥離したような状態となった。この衝撃がそのままハニカムに伝わり、ハニカム表面はPhoto 15の1の破損した枠組みの形をうけてPhoto 15の2にしめすように型打ちしたような状態となった。

鉛容器自身は内枠のふたにつけた扉の上下動を防ぐ支えが扉にあたり4mmへこみ、また上部プラグには押さえ用の支えのあとがのこった。

5.8 耐火試験

輸送物を自動車で運搬する際に起こる衝突での火災に対する耐火性の評価が、昭和39年のIAEA規則に取り入れられて次のような試験を規定した。

すなわち、800℃で30分間加熱をしたのち3時間自然冷却する。加熱によって鉛容器の鉛（融点327℃）が溶融したことで遮蔽能力が低下していないかどうかをγ線の漏洩線量率を測定して検査をしたのち、輸送物の表面から1m離れた距離で放射線線量率が1rem/hをこえなければ合格であると規定している。

この試験には、自治省消防研究所内の台車駆動型で軽油を燃料とする低圧噴霧式セミマッフル炉（炉内有効寸法1.4m×1.2m×1.27m）を使用した。

これまでの試験に用いた輸送物の大きさが直径1.3m、高さ1.3mであった。このため、外箱のふた部のショック吸収パイプと十文字のフィンのついた外筒をとり除いた。また外箱の底部外側も同じようにし、さらに内側の底部鋼製円筒の底板をとり除き積層板をけずって直径1.2m×高さ1.1mに縮小した。輸送物の外表面は熱の吸収をよくするためにツヤ消し黒色塗装とした。

加熱中における輸送物の内外面、鉛容器表面および炉内空間温度の経時変化を助川電気KK製T-40, 4000-DK9B5EXAの熱電対を使用して記録計に記録させた。また、その測定個所にはミクロンKK製のヒートラベル（不可逆式）も取り付けて、43℃ないし260℃までの間を約20℃間隔で12点測定できるようにした。

熱電対の測定個所は次の通り20ヶ所とし、各構成材の温度がはかれるようにした。（Fig. 9参照）

(1) 試験体を炉内に挿入してからの空間温度を知るために、試験体から15cm離し、そして試験体の乗っている台車から55.1cmの高さで、右と左（右・左空間温度）および中心（中心空間温度）に3本取り付けた。

(2) 積層板のふたの裏側の中心部近傍に表面、2.5cm、7.5cmおよび12.5cmの深さで取り付けた。

(3) 輸送物の胴部中央部の左右対称に(2)と同じような取り付けをおこなった。

(4) 下部ハニカム円板上と底部積層板中心に2cmおよび12cmの深さの3ヶ所に取り付けた。

(5) 鉛容器の上部プラグと扉の鉛部分に2.5cmの深さで2カ所取り付けた。

燃焼中に8本の通しボルトにナットが焼きつかないようにグラファイトゾルの塗布処置をお

こなつた。

このように準備した試験体を耐火レンガ製の駆動式台上にのせて炉の前に置き頂部の空間温度が920℃まで上った時に、シャッターを開け試験体を炉内に入れた。(Photo 16の1) 30分後、試験体を取り出した(Photo 16の2)。鋼製の外筒は赤熱しふたの積層板むき出し部分から40cm位の高さに炎が吹き出していた。

1時間後に炎の量が $\frac{1}{4}$ 弱になり、その10分後に消失した。しかし、斜め落下試験で破損した個所の鋼板と積層板のすきまおよび、ふた部の積層板とそれをおおっている鋼製の円筒とのすきまで燃えていることが確認された。

3時間後に内部の炎は完全に消えたが、炭の状態では依然として燃焼を続けていたので水をかけて消火し、通しボルト(M-30)が焼きつかないうちにふたをあけ、内部を完全に消火した。(他の共同実験グループでは通しボルトが焼きついてとれないことがあった)このときの内部の状態をPhoto 16の3にしめす。

5.8.1 耐火試験の結果

消火後の試験体の状態をPhoto 17にしめす。

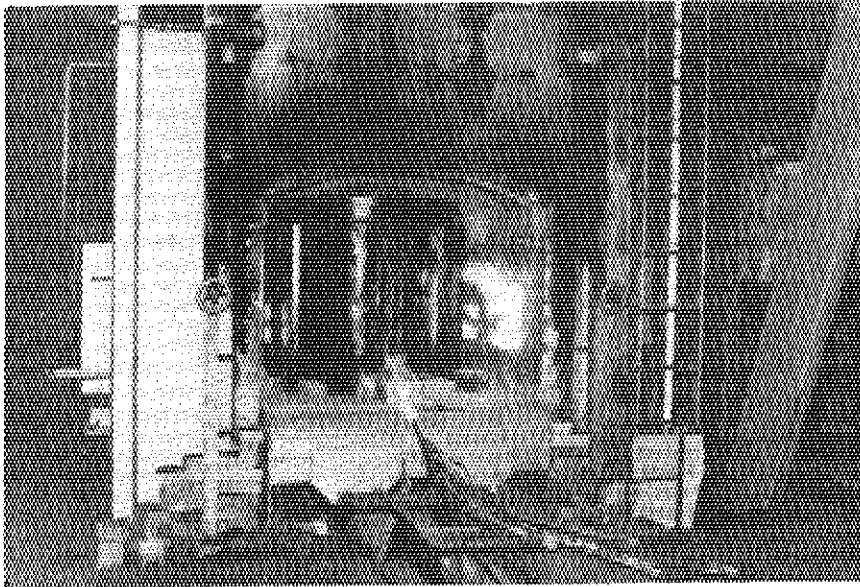
Photo 17の1は積層板のふたであり、Photo 17の2はこれを取り除いた状態、Photo 17の3は底部外表面である。またPhoto 17の4は底部で最も燃えた部分(Photo 17の3)(F)の写真である。写真中のAからGまでの記号は通しボルトの位置決めと観察用である。ふたの炭化は平均して周囲から1~2.5cmの深さにおよび、(D)のように1cm位焼けおちた個所もあった。これらの状況はPhoto 17の2の胴部積層板の炭化状況と類似している。

ふたを取り除いた写真では積層板と外筒との間にすきまができたことがわかる。また、米松製の積層板から出た松やにて円筒が黒くなっているのがわかる。胴部積層板の炭化はふたと同じ位で、外筒とのすきまに接する積層板円筒の外表面は底部から上部まで1cm位炭化が進んでいる。また、Photo 17の2の積層板の炭化の進み具合は最大で深さ3cm、最小で1cmであった。これは斜め落下で損傷を受けて面が平でない個所から空気の流れが台車との間に生じ、そこから酸素が供給され燃焼が長くつづいたことを表わしている。このためPhoto 17の3のように台車に密に接している内側部分は、空気の供給が少なく影響を受けておらず、逆にすきまのあった外側部分はほとんど焼け落ちている。斜め落下試験後、外筒が積層板にくいこみ、すきまのない(G)はただ炭化しているだけである。

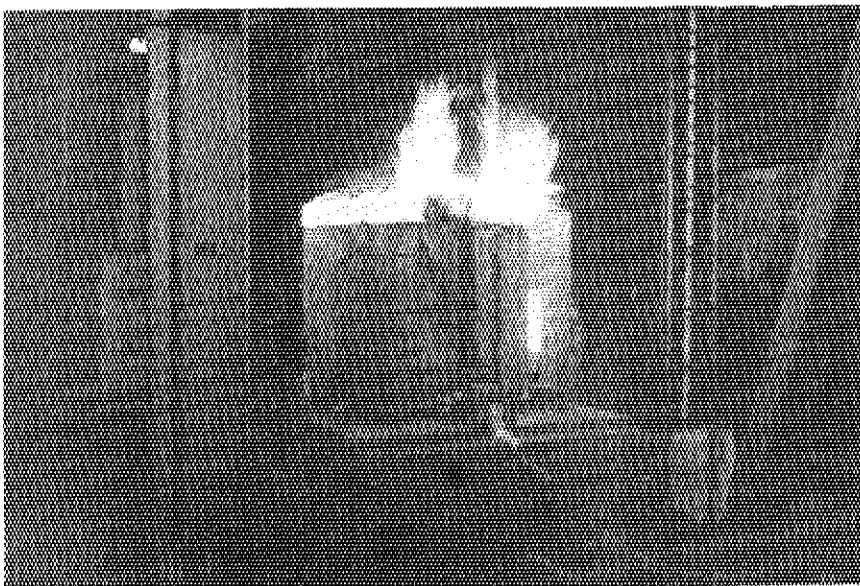
最もよく燃えた(F)は、幅12cm、高さ14cm(解体後の検査では25cmであった)にわたり焼け落ちた。

耐火試験終了後に解体した試験体をPhoto 18にしめす。Photo 18の1はPhoto 17の1と同じもので、ふたをおおっている鋼材を取り除いたものである。鋼材におおわれていた部分は全部炭化され、針金でつづいて深さをはかると3cm位であった。外力を加えなければくずれることはない。

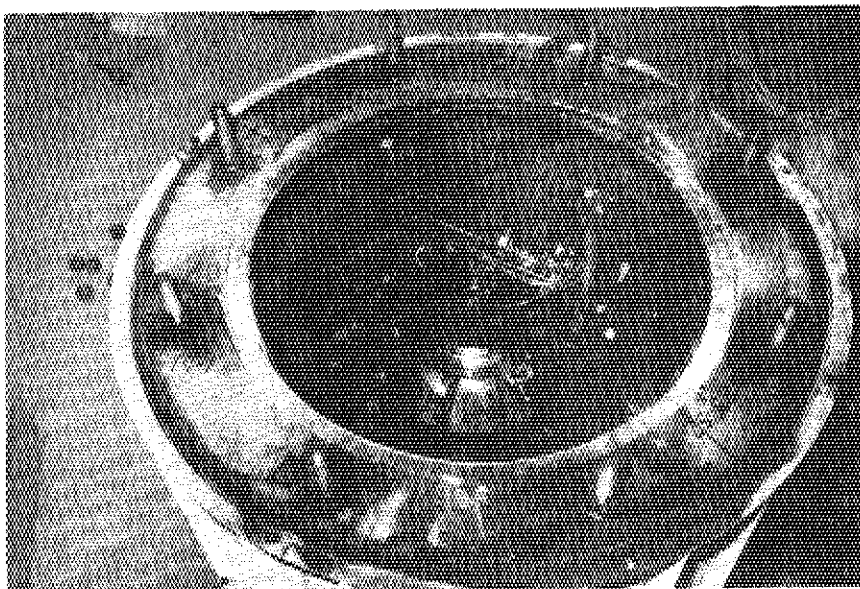
Photo 18の2はPhoto 17の2の内筒およびハニカムと外筒を取り去ったもので、積層板の外側表面は均一に炭化していた。また、底部のすきまから流れこんだ空気とともに炎がは



1. Package entering furnace

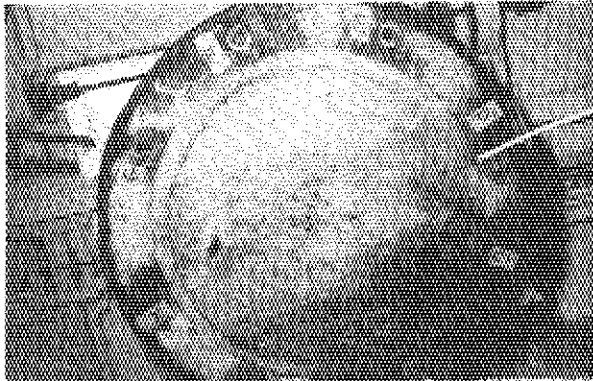


2. Withdrawal of package from furnace

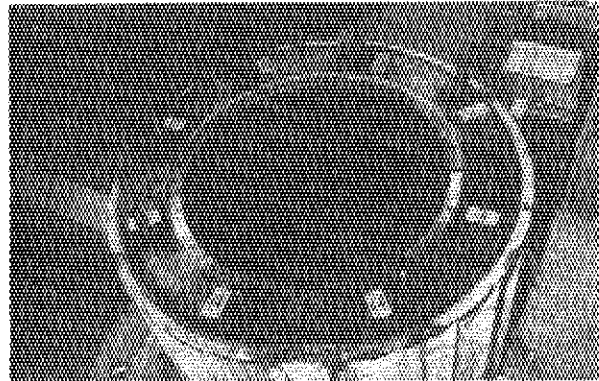


3. Inner view of the package after test

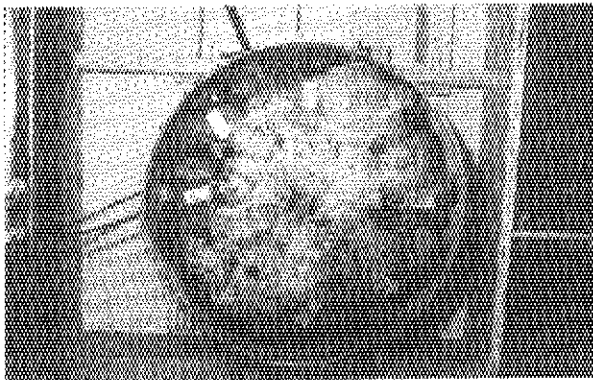
Photo.16 Results of thermal test



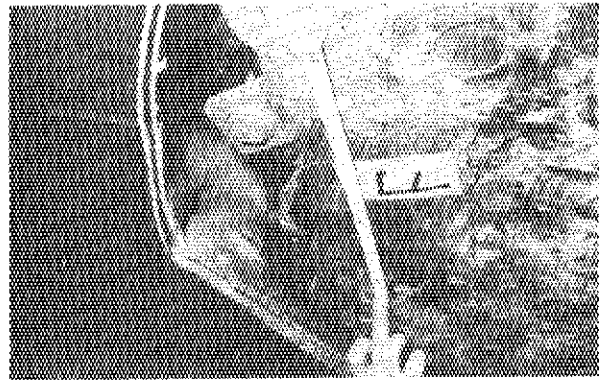
1. Inside of the plywood lid



2. Charring of body plywood shell.
Aluminum honeycomb is still in position

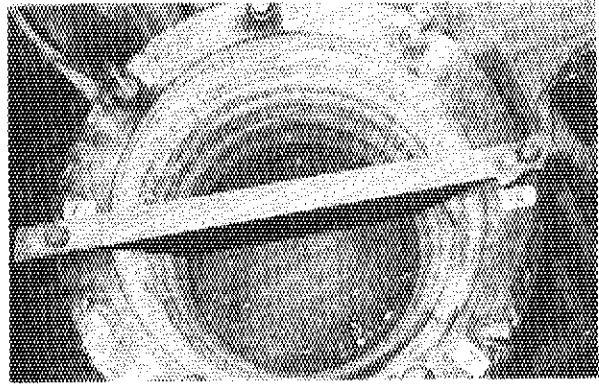
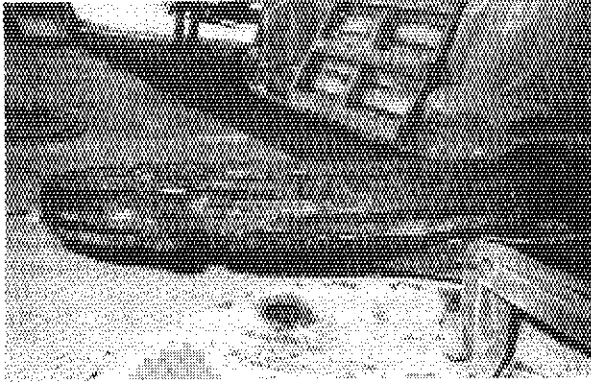


3. Charring of shell bottom



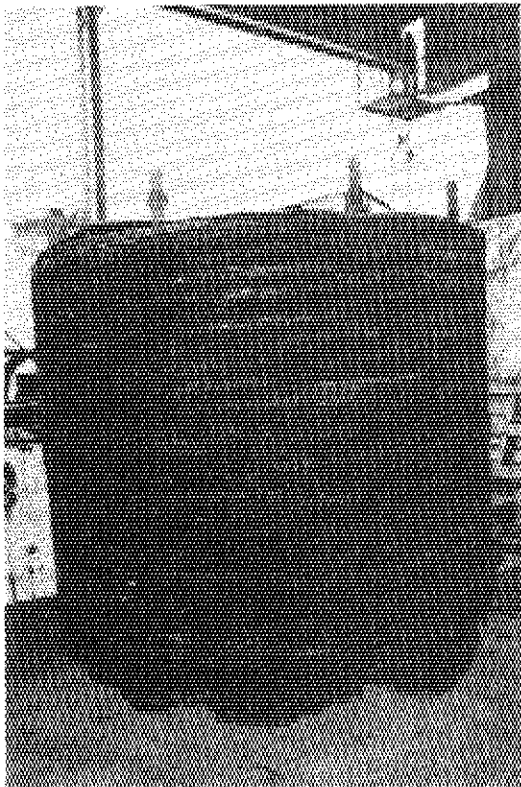
4. Detail of charring of shell
bottom

Photo.17 Results of thermal test

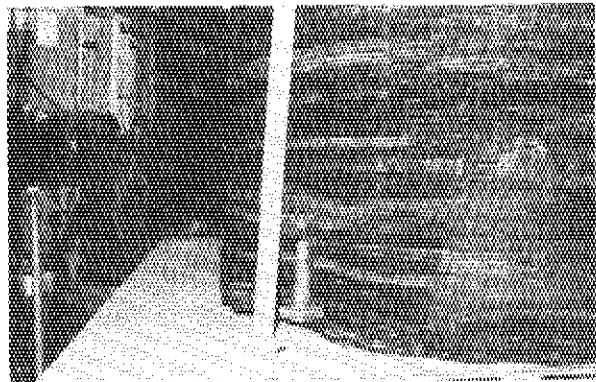


1. Charred periphery of the lid

2. Inner surface of plywood shell



3. Charring of outside of plywood shell



4. Charring of the crushed part of the bottom

Photo.18 Results of thermal test

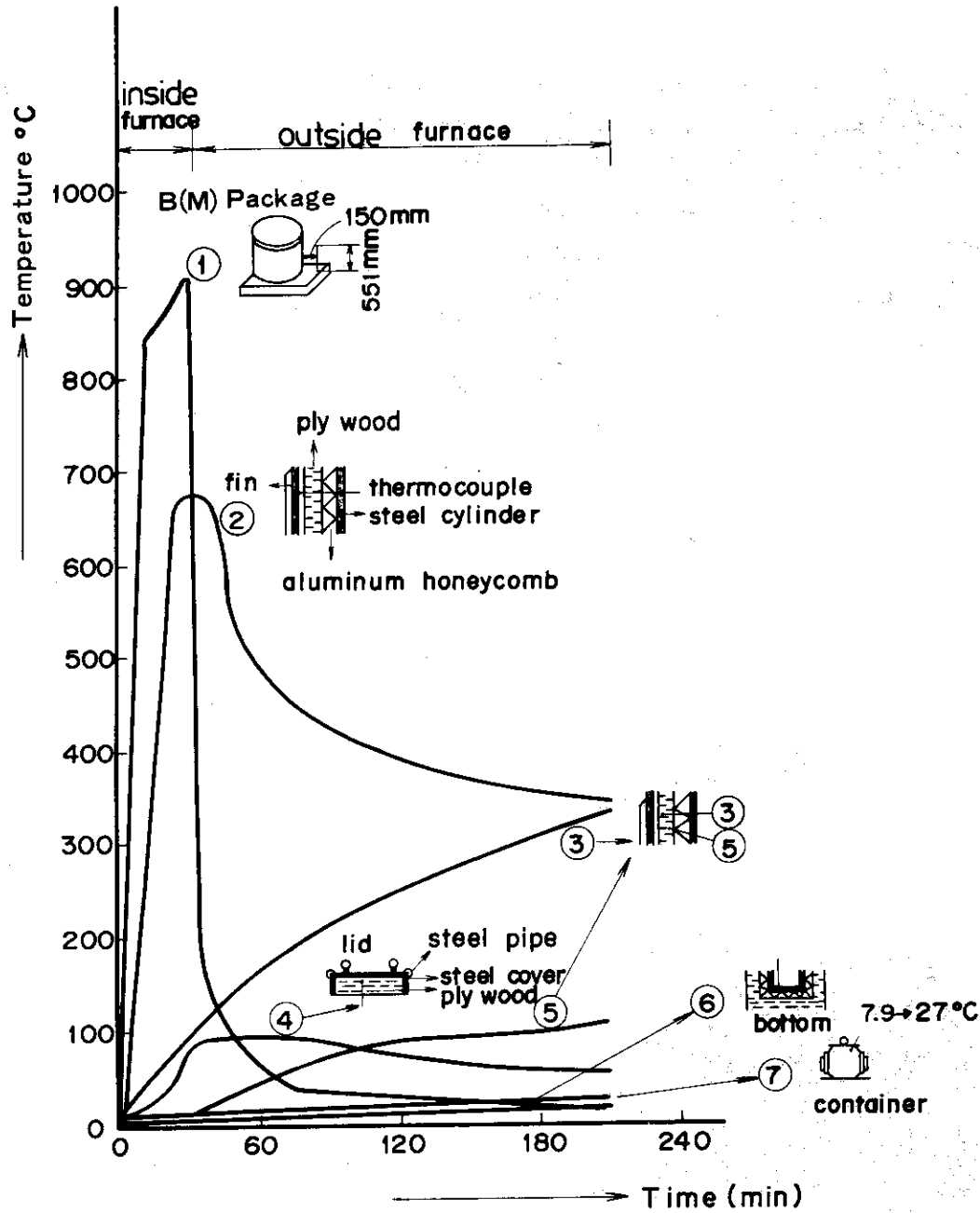


Fig. 9 Change of temperature at each of measuring points during thermal test

- ① 55cm above the carrier
- ② 15 cm deep in the side ply wood.
- ③ 12.5 cm deep in the side ply wood.
- ④ 12.5cm deep in the lid ply wood.
- ⑤ 7.5 cm deep in the side ply wood.
- ⑥ surface of bottom aluminum honeycomb.
- ⑦ 2.5 cm deep in the plug of container.

い上ってきた跡も外観検査でわかった。底部積層板の内面および積層板の内側は何ら燃えた形跡はなかった。

このPhoto 17およびPhoto 18より積層板の断熱性がすぐれており厚さも薄くできることがわかったが、通しボルトの構造強度上の問題もあり15cmが適当であると結論した。

耐火試験では炉内の空間温度が981℃になったときにシャッターをあけて試験体の挿入を始めた。試験体の挿入を完了するまでの2分間で684℃まで約300℃下り、その後800℃に回復するまで約30分間かかった。

試験における試験体の温度変化をFig. 9にしめす。この図から次のことが言える。

①のように台車の上から55.1cmに設置した中心空間温度は、試験体を挿入してから10分後に800℃になり、30分間で923℃になった。右・左空間温度も30分間で882℃および776℃になった。炉から取り出したのちは、急激に室温まで下っている。

②の積層板の外表面温度は30分間の加熱で675℃まで上ったのち、炉外ではゆるやかな勾配で下降した。これは、Photo 18の3にしめすように炭状になってもえていた事が原因である。

③の胴部積層板の内壁より12.5cm入った個所の温度は、試験開始から終るまでゆっくりと330℃まで上って取り付け位置まで燃えたことをしめすが、同個所で深さ7.5cmの温度は120℃と低い値をしめしている。

④のふた内側から12.5cmの深さの温度は、最終的に50℃になったが、試験体自身が加熱保温されていたため他の結果からも推定できた。

⑥のハニカム円板上の温度は、試験体の内外からの熱の伝導の影響をうけて多少温度が上がった。

⑦の鉛容器における温度上昇は、上部プラグで19.1℃、扉で13.2℃であって何ら容器は影響されることはなかった。

5.9 ^{60}Co による放射線漏洩試験

放射線漏洩試験は落下試験および耐火試験後の輸送物の健全性を立証する方法である。

日本アイソトープ協会所有の ^{60}Co 23 Ciの線源をFig. 10のように鉛容器のドロアー中の中央の一定位置に線源を設置（高さ関係については、図のように各試験ごとに測定した）し、内枠、ハニカムなど構成材を全部入れ、輸送物の表面で放射線漏洩線量率を調べた。輸送物には測定場所を明らかにするため、白ペンキでTable 4にしめすような座標を書いた。

ふたは円周に沿ってAからHまで放射状に8等分し、また中心部から同心円状に15cmおきにK・L・Mと3等分した。胴部は水平に30cm間隔で4等分し、上記の円周のAからHに応じて垂直に8等分した。底部は13個所（aからlまで）に測定点をきめた。

試験は、(1) 試験前、(2) 9m垂直落下後、(3) ピン上落下、9m落下（斜め、水平、逆さ）後、(4) 耐火試験後の4回おこなった。この結果をTable 4にしめす。

Table 4より表示線量率のばらつきから、線源の高さ関係だけでなく中心線からもずれていることが推測できたが、輸送物の破損による線量の増加は認められず遮蔽能力の健全性が確

認された。また、運搬規則による事故時試験後の表面線量率が1 m離れて1 rem/h という値には、十分の余裕があり事故時試験後の輸送物の健全性が確認された。

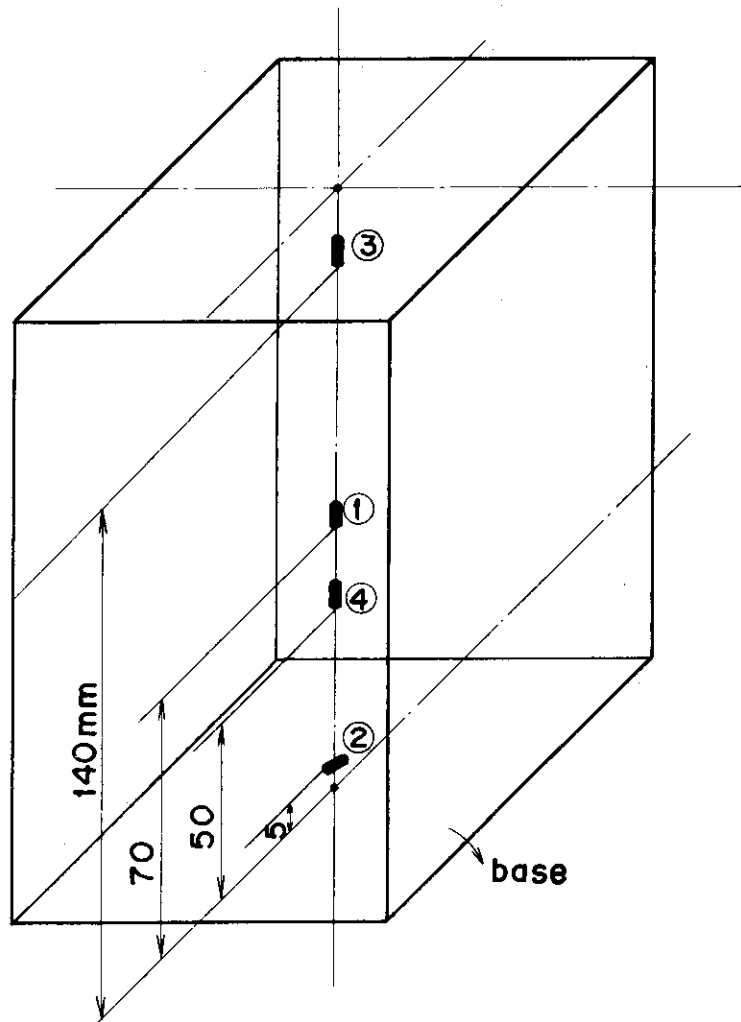
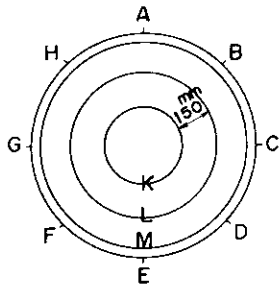


Fig. 10 Set positions of ^{60}Co source at γ -leak test

- ① Before free drop test
- ② After 9 m vertical drop test
- ③ After accident test
- ④ After thermal test

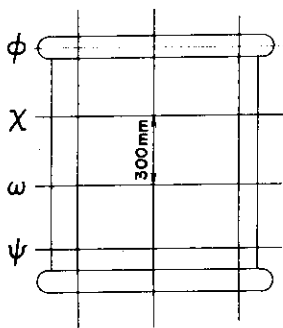
Table 4 Results of γ -leak test

(Unit : mr/h)



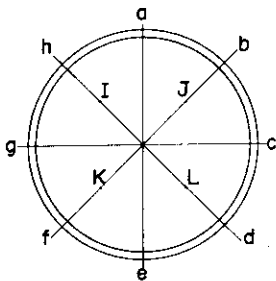
Lid

	A	B	C	D	E	F	G	H	Test No.*
K	2.7	2.6	2.7	2.1	2.5	1.8	1.9	1.9	1
	2.2	2.2	2.7	4.6	2.3	2.5	3.9	2.9	2
	3.0	2.7	4.0	3.4	3.3	3.2	3.2	3.7	3
	1.6	1.7	2.0	2.1	2.1	1.7	1.6	1.0	4
L	4.5	4.5	3.0	3.0	4.3	2.4	3.4	3.0	1
	3.4	2.4	4.5	2.5	3.4	3.3	2.9	3.5	2
	4.1	4.6	6.2	3.5	6.0	8.2	5.0	6.3	3
	2.6	4.0	5.1	4.9	3.8	2.8	2.8	2.7	4
M	1.8	2.5	1.9	1.8	1.9	2.5	3.0	4.1	1
	1.8	3.1	3.5	3.8	2.2	3.0	2.1	2.6	2
	4.4	5.3	6.0	4.2	6.0	5.0	4.0	6.4	3
	3.3	3.7	4.3	4.8	4.9	4.2	4.0	4.8	4



B(M) type package

ϕ	0.7	0.9	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	1.3	1
	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	1.4	1.4	1.4	1.7	1.6	1.4	1.4	1.7	3
	1.0	0.5	1.0	1.6		1.2	1.9	1.0	4
χ	0.8	3.6	2.8	3.1	1.0	2.0	2.3	4.1	1
	0.9	3.1	3.3	4.1	1.5	4.0	2.8	3.6	2
	2.1	1.6	1.0	2.2	2.8	1.6	1.0	4.6	3
	1.5	0.3	1.3	1.2	0.8	1.0	1.3	1.1	4
ω	0.8	8.6	4.8	6.6	0.8	5.4	5.4	10.9	1
	1.1	7.4	5.3	10.4	1.3	8.5	4.0	7.9	2
	3.4	2.1	0.8	4.0	3.9	3.8	1.0	11.0	3
	0.8	0.8	5.0	4.4	1.6	1.2	5.4	4.8	4
ψ	0.7	3.2	2.5	3.2	0.8	2.0	2.8	4.9	1
	0.9	2.6	2.2	3.2	1.1	3.2	2.3	3.3	2
	1.4	1.1	0.6	1.8	2.0	1.5	0.8	4.0	3
	0.8	0.4	2.5	2.5	0.7	1.4	2.5	3.0	4



Bottom

a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	
1.2	0.8	0.8	1.0	1.1	1.1	0.8	1.1	4.4	4.1	4.2	4.1	1
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.7	0.6	0.7	0.5	0.7	0.7	0.8	0.9	2.4	3.0	2.4	4.2	3
1.7	1.8	1.6	2.0	2.1	3.7	2.8	1.3	8.6	9.5	9.5	8.6	4

* NO.1 : Before free drop test, NO.2 : After 9m vertical drop test
 NO.3 : After accident test NO.4 : After thermal test

6. 結 論

L型、A型輸送物の安全性試験を経て、昭和52年10月に改正された運搬規則に沿ったB(M)型輸送物の事故時試験(浸漬試験を除く)をおこなった結果、法律の規制に合格した物であることを確認した。

今後は残されたL型・A型の試験およびB(M)型の通常時試験と輸送物の安全解析をおこなって第2報で報告する予定である。

今回の一連の実験から、木材が衝撃吸収材と断熱材として使用して効果のすぐれていることがわかった。しかし、外箱の内部の構造に関しては、ハニカム、鋼製円筒、内枠などでの衝撃力の吸収をいかに大きくするか、また、作業性を高めるなどの改良すべき問題も残った。

衝撃力の解析では、G値を記録紙上のピークの高さから算出する時、基底状態をどこにするかで簡単に数値が狂ってしまうなど、信頼性に問題が残ると同時に数値の活用にも一考する必要性がある。

謝 辞

今回の実験にあたり、御指導いただいた製造部長阿部俊彦氏、前製造部長天野恕氏(現環境安全研究部部長)とB(M)型輸送物の落下試験において直接御指導いただいた、機械技術研究所の金衛敬興、佐々木務両氏および加熱試験において御指導いただいた島田裕久、宮崎早苗両氏に深く感謝致します。

また、実験の窓口としてスケジュールの調整など御尽力いただいた日本アイソトープ協会調査研究課の鈴木英世、澤宏の両氏と放射線漏洩試験において御協力いただいた技術課更科三郎氏ほか関係者の方々に深く感謝いたします。そして、R1輸送容器試験委員会の皆様に深く感謝いたします。

6. 結 論

L型、A型輸送物の安全性試験を経て、昭和52年10月に改正された運搬規則に沿ったB(M)型輸送物の事故時試験(浸漬試験を除く)をおこなった結果、法律の規制に合格した物であることを確認した。

今後は残されたL型・A型の試験およびB(M)型の通常時試験と輸送物の安全解析をおこなって第2報で報告する予定である。

今回の一連の実験から、木材が衝撃吸収材と断熱材として使用して効果のすぐれていることがわかった。しかし、外箱の内部の構造に関しては、ハニカム、鋼製円筒、内枠などでの衝撃力の吸収をいかに大きくするか、また、作業性を高めるなどの改良すべき問題も残った。

衝撃力の解析では、G値を記録紙上のピークの高さから算出する時、基底状態をどこにするかで簡単に数値が狂ってしまうなど、信頼性に問題が残ると同時に数値の活用にも一考する必要性がある。

謝 辞

今回の実験にあたり、御指導いただいた製造部長阿部俊彦氏、前製造部長天野恕氏(現環境安全研究部部長)とB(M)型輸送物の落下試験において直接御指導いただいた、機械技術研究所の金衛敬興、佐々木務両氏および加熱試験において御指導いただいた島田裕久、宮崎早苗両氏に深く感謝致します。

また、実験の窓口としてスケジュールの調整など御尽力いただいた日本アイソトープ協会調査研究課の鈴木英世、澤宏の両氏と放射線漏洩試験において御協力いただいた技術課更科三郎氏ほか関係者の方々に深く感謝いたします。そして、R1輸送容器試験委員会の皆様に深く感謝いたします。

参 考 文 献

1. IAEA: "Regulations for The Safe Transport of Radioactive Materials. Safety Series No.6, IAEA, Vien 1973
2. 原子力委員会: 放射性物質等の輸送に関する安全基準, 1975. 1.
3. 日本機械学会: 使用済核燃料輸送容器の落下衝撃に関する試験研究. 原子力平和利用委託研究成果報告書, 1968. 1969. 1970.
4. 日本機械学会: 使用済核燃料輸送容器の熱除去に関する試験研究. *ibid.* 1969
5. 日本機械学会: 使用済核燃料輸送容器の耐火性に関する試験研究. *ibid.* 1975
6. RI輸送容器専門委員会: RI輸送容器の安全性に関する研究. *Radioisotopes*, 25, 8~10 (1976)
7. 青木成文: アイソトープの輸送, 第13回日本アイソトープ会議セッション2. 1977. 12
8. 筒井天尊: 放射性物質の輸送, 第11回京大炉学術講演会, No.6, 1976. 3
9. RI利用における安全管理の問題点. 原子力工業, 21, 13~16, 1975
10. 放射性物質輸送上の問題点. 原子力工業, 22, 9~42, 1976
11. IAEA: "Transport Packaging for Radioactive Materials, Proceeding of a Seminar", IAEA, Vien (1976)
12. J.Counts et al: "Evaluation of Analysis Method for Type B Shipping Container Impact Problems, LA-6640, 6643-MS, (1977)
13. L.B.Sharppert: "Cask Design Guide", ORNL-NSIC-68 (1970)
14. R.A.Scaggs: "Safety Summany Report -LP-12, Tritium Container", DPSPU 72-124-2, (1972)
15. HEXCEL Products Inc.: "Design Handbook for Honeycomb Sandwich Structure" TSB-123, 1967
16. US Forest Service Research Note, "Minimum Weight Structural Sandwich", FPL-086, 1967