ラジオアイソトープ輸送容器の安全性に関する研究(Ⅱ)[†]

日本アイソトープ協会輸送容器試験委員会‡

2. 非破壊検査装置の線源格納部分(A型)

2.1 試験体

試験体は非破壊検査用の装置で現在使用されている¹⁹²Ir 用3種類および⁶⁰Co 用1種類を供試した。仕様を表6に示した。

試験体4種類は非破壊検査用の装置の線源格納部分であり、これは照射装置を兼ねている。したがって運搬、輸送のための外装容器(木箱梱包を含む)が付属されているため、外装容器を含め通常輸送する状態で試験を行った。

2.2 試験方法

1.2と同じ試験を行った。

試験開始前、終了後において、¹⁹²Ir(または⁶⁰Co)を用いて試験体の漏えい線量の測定を行った。

1機種、1台で全試験を行ったため、試験により試験体の一部に変形または破損を生じた場合でも、つぎの試験に支障がないかぎりそのままつぎの試験を行った。

なお、試験の順序は、水吹つけ試験、圧縮試験、貫通試験、落下試験である。

2.2.1 水吹つけ試験

1.2.1に準じて行ったが試験体は通常輸送されるときと同じ状態で床面に水平に置いた。

2.2.2 落下試験

a) 落下試験塔

工業技術院機械技術研究所に既設の4脚鉄骨溶接構造で上部に容量10tの捲上機1台を備える落下試験塔を用いた。

10tの捲上機は試験体を安全に吊り上げ、かつ任意に落下しうる電磁力を利用した機械式の着脱装置を備えている。

試験体を落下衝撃する衝撃面は、鉄筋コンクリート床(6m×6m×2.5m)の上に、ターゲット用鋼板(SS-41, 5m×5m×厚さ5cm, およびSS-41, 2m×2m×厚さ7cm)を重ねたもので

ある。

b) 方法

落下高さはターゲット鋼板面から1.2mの高さとし、外装容器に線源格納容器を入れた状態で線源格納容器に対して最も大きな衝撃が加わるような面、すなわち外装容器では、試験体LおよびN-2は側面、試験体M、N-1は底面がターゲットに平行に当たるような落下姿勢とした。

さらに試験体L、M、N-1については、線源格納容器のみについて、最大破損を受けると予想される部分、すなわち線源ホルダー側(照射口の反対側)がターゲット鋼板面に当たるような姿勢で落下させた。

2.2.3 衝撃加速度の測定

落下衝撃時の加速度をゲージ型3軸加速度変換器を用いて計測した。変換器は試験体Lは線源格納容器の上面、試験体M、N-1、N-2は線源格納容器本体胴側面にネジ留めにて、いずれもX方向が垂直(落下)方向、Y、Z方向が水平方向になるように取り付けた。

データは動ひずみ増幅器を通して、磁気テープ式データレコーダに記録した。記録は直視式電磁オシログラフで再生し、解析を行った。

2.2.4 貫通試験

1.2.3に準じて行った。

衝撃箇所は試験体L、M、N-1、N-2いずれも外装容器の蓋面1箇所、線源格納容器については構造上最も弱い部分に当たるように配慮した。

試験後の判定は目視および寸法測定等によった。

2.2.5 圧縮試験

1.2.4に準じて行った。

本試験では外装容器に線源格納容器を入れ、通常輸送される状態で試験を行い、試験体L、Mは垂直投影

[†] Tests on Transport Packaging for Radioactive Materials (Ⅱ). Committee on Test of Transport Packaging for Radioactive Materials, The Japan Radioisotope Association.

[‡] *Radioisotopes*, 25, (8) 504 (1976)

表6 非破壊検査装置試験体

試験体 記号	形 式	外装容器(梱包を含む)			線 源 格 納 容 器		
		外形寸法 (mm)	材質・構造	重 量 (kg)	外形寸法 (mm)	材質・構造	重 量 (kg)
L	CTC-15AW ¹⁹² Ir 用	600×650×350 内箱 590×176×230 t=2.1	SS材 外箱内箱とも 蝶番付蓋 溶接構造	23	130×220×250	遮へい材 鉛お よびW合金 外装 鉍金铸件	17
M	PI-10H ¹⁹² Ir 用	425×480×470 t=2.0	SS41 蝶番付蓋 溶接構造	33	340×227×227	遮へい材 W 合金 STB 外装	18.7
N-1	Ir-20 ¹⁹² Ir 用	230×280×260 t=2.3	SPC-1 蝶番付蓋 溶接構造	7.7	240×230φ	遮へい材 鉛お よびW合金 外装 SUS27	23.2
N-2	Co-5 ⁶⁰ Co 用	830×590×690 t=15~20	えぞ松 床角材 つが 一部スカシ梱 包	57	527×635×494	遮へい材 鉛お よびW合金 外装 STK	340

面積に1,300 kg/m² を乗じた数に相当する荷重, すなわちLは507 kg, Mは265 kg, また, 試験体N-1, N-2は自重の5倍, すなわちN-1は155 kg, N-2は1,985 kgの圧縮加重とした。荷重は鉛ブロックまたは他の試験体を用いて負荷した。

試験体が金属製外装容器であるL, M, N-1については抵抗線ひずみゲージを貼り圧縮試験中のひずみの量を静ひずみ測定器で測定した。

2.3 結果および考察

2.3.1 水吹つけ試験

試験後の判定は, 目視により観察した。外装容器が金属製のものについては内部への浸水量も観察した。

試験体Lは外箱, 内箱内いずれも水の浸入はなく, したがって線源格納容器はまったく異常がなかった。試験体Mは外装容器内に0.25 lの水がはいったが線源格納容器はまったく異常がなかった。水がはいった原因は蓋と外装ケースとのスキ間から浸入したためである。試験体N-1は外装容器内に0.61 lの水がはいったが線源格納容器はまったく異常がなかった。水がはいった原因はMの場合と同じである。試験体N-2は木箱外装が濡れたが線源格納容器はまったく異常がなかった。

2.3.2 落下試験

a) 外装容器(線源格納容器を含む)の落下試験

試験体L, M, N-1は外装容器が金属製のため外観上変形, 損傷はまったくみられなかった。

試験体Lは外装容器が2重構造になっており線源格納容器は内側の容器に収納されているが, 内側容器衝撃側の板に変形が認められた。

試験体M, N-1は直接線源格納容器に衝撃が伝わり, 試験体Mでは線源格納容器の把手の変形,

図1 非破壊検査線源格納部分(試験体N-1)の1.2m落下試験時の衝撃加速度の計測結果

表7 非破壊検査装置落下試験加速度変換器計測結果

試験体	状態	方向	g 値*		落下状態**
			+	-	
L	線源格納容器が金属製外装容器にはいった状態	X	160	—
		Y	—	67	
		Z	62	97	
M	同上	X	290	—
		Y	27	105	
		Z	43	51	
N-1	同上	X	299	—
		Y	222	194	
		Z	95	93	
N-2	線源格納容器が木材梱包にはいった状態	X	35	33
		Y	46	63	
		Z	29	24	
L	線源格納容器のみ	X	28	33
		Y	80	336	
		Z	—	55	
M	同上	X	△	△
		Y	△	△	
		Z	△	△	
N-1	同上	X	619	125
		Y	390	461	
		Z	272	262	

表中 —は衝撃が弱く測定不能 △印は計測失敗

* +は衝撃方向のg, -は反発方向のg

** 落下方向をX↓で示す。

試験体N-1は把手取付ネジ1本の折れが認められた。しかし線源格納容器の遮へい能力、機能にはまったく影響がなかった。

試験体N-2は、(1)落下衝撃面に相当する床角材の破損、(2)蓋面留めボルト1本の曲り、クギ約10mmのとび出し、(3)蓋約15mmの浮き上り、(4)線

源格納容器後部鋳物カバーの一部割れがあったが、線源格納容器の遮へい能力、機能にはまったく影響がなかった。

b) 線源格納容器のみの落下試験

試験体 L, M, N-1 について行った結果、試験体 L 線源格納容器の外装鉋金鋳物のネジ留め合わせ部分に 0.4 mm のスキ間を生じた。試験体 M は把手の変形があった。試験体 N-1 は外観上まったく変化は認められなかった。しかもいずれも機能上の影響は受けていない。

c) 加速度変換器による計測

計測結果を表 7 に示し、データレコーダによる読み出し記録の一例を図 1 に示した。

g 値の最大は試験体 N-1 の線源格納容器のみの場合の +619 g であるが、N-1 は金属製把手であるため衝撃による吸収はきわめて少ない。試験体 L は線源格納容器のみの場合、落下方向(X方向)が衝撃値がきわめて少なく、Y方向が大きいことから、落下のさい姿勢が変わったものと判断できる。なお、落下衝撃部は樹脂製の保護カバーが付いているため衝撃時の吸収効果もあったものと考えられる。

全体的に線源格納容器が外装容器にはいった状態での衝撃値は低い。外装容器の構造によっても違いが外装容器による衝撃力の吸収効果が現れておりとくに試験体 N-2 の木材の場合では顕著である。

2・3・3 貫通試験

外装容器の蓋面は、いずれも多少のへこみを生じたが、破損、貫通には至っていない。

線源格納容器は試験体 M, N-1 については容器表面にへこみが生じ、L, N-2 については線源部保護キャップ割れおよびシャッター保護カバー割れを生じた。しかし、いずれもシャッター、線源部の機能上の破損は生じていない。

2・3・4 圧縮試験

試験体 L, M, N-1 は金属製外装容器、N-2 は木材梱包であるため各試験体とも目に見える変化は生ぜず、最も変化量の大きかった上面蓋の反りでも応力値に換算して最大約 2 kg/mm²、24 時間後で最大約 3.5 kg/mm² であり、一般構造用圧延鋼材 SS41 の引張り強さ 41~52 kg/mm² に比べまったく強度的に問題となるような値ではなかった。側面についてはさらに無視できる値であり、金属製外装容器および木材梱包では荷重負荷時あるいは負荷後 1 時間の試験で異常なれば経

時変化はないものと判断できる。

2・4 漏えい線量の測定

2・4・1 方法

試験開始前および全試験を終了後に各試験体の線源格納容器に通常の線源ホルダーを使用して試験体 L, M, N-1 については ¹⁹²Ir、試験体 N-2 については、⁶⁰Co を用いて漏えい線量率の測定を行った。

2・4・2 結果

試験体 M, N-1, N-2 においては線量率の変化は見られなかったが、試験体 L については容器表面において試験後に約 20% の漏えい線量の増加が認められた。これは自由落下試験のさい外装鉋金鋳物に 0.4 mm のスキ間を生じたためと判断できる。

ちなみに鉋金の厚さが 5 mm であることから ¹⁹²Ir の線質で直接線が鉋金 5 mm で減衰する割合を概算すると、約 25% 減となり、測定結果とはほぼ一致する。しかしながら外装鉋金は遮へい材の目的で使用しているのではなく、試験体 L を解体し内部を点検したが遮へい材にはまったく異常は認められなかった。

2・5 まとめ

現在国内で多く使用されている非破壊検査装置について IAEA の規則に準じ試験を行ったが、現在の外装容器あるいは木材梱包で輸送を行う場合には、IAEA 規則の A 型の試験に適合すると判断して良い。ただし、輸送中の安全性を高めるためには、外装容器と線源格納容器との間には極力衝撃を吸収する吸収材を使用した構造で輸送することが望しい。

また、非破壊検査装置では線源格納容器は金属製であり、外装容器も木材または金属製であることから、水の吹つけ試験は省略しても支障なく、圧縮試験の試験時間を短縮しても差し支えないものと判断できる。

3. 装備機器の線源格納部分 (A 型)

3・1 試験体

本試験では、RI 装備機器*用線源容器のうち、各機種ごとに、代表的なもの 15 種類を選んだ。試験体の仕様等を表 8 に示した。

3・2 試験方法

1・2 と同じ試験を行い、1 機種 1 台で全試験を行っ

* 本項における装備機器とは、密封された RI の線源を装備した計測機器(RI 装備計測機器)をいう。

表 8 装備機器試験体の仕様

試験体	形 名	用 途	外 形 寸 法 (mm)	重 量 (kg)	包 装	内 容 物
F-1	BS-15	厚さ計	334×334×314	9.2	杉板17mm厚 防水紙 エアキャップ	鉄鋳物 5 mm 厚 100×150×65 5 kg
F-2	NTS1A (BS-16)	厚さ計	349×419×384	12.1	杉板17mm厚 防水紙 エアキャップ	鋼板2.3mm厚 120×214×90 5 kg
G-2	8640	厚さ計	325×310×260	7.3	米母15mm厚 エアキャップ	ステンレス製 90×140×60 2.8kg
K-1	C-300	厚さ計 密度計 レベル計	780×720×550	278	米松角材スカ ン梱包 ボルト締め	鉄鋳物, 鉛鋳込 300φ×387 250kg
G-3	8800	密度計	370×340×365	90	ラワン20mm厚	鉄鋳物, 鉛鋳込 210×260×230 68kg
K-4	C-200A	密度計 レベル計	770×630×500	98.5	米松角材スカ ン梱包 ボルト締め	鋼板, 鉛鋳込 191φ×243 80kg
H-3	AHU-78152	密度計 レベル計	490×445×590	101.5	杉板スカン梱包	鉄鋳物, 鉛鋳込 210×210×478 80kg
F-3	BS-03A-3	密度計 レベル計	458×453×448	139	杉板24mm厚 ビニルシート	鉄鋳物10mm厚 鉛鋳込 220φ×318 110kg
H-4	AHU-78153	レベル計	460×1950×290	265	杉板スカン梱包	鋼管, 鉛鋳込 114.3φ×1560 220kg
K-3	CE-141	レベル計	530×540×1195	175	米松角材スカ ン梱包 ボルト締め	鋼管, 鉛鋳込 141φ×850 150kg
K-2	DB-4	水分計	580×600×465	68	米松角材スカ ン梱包 ボルト締め	鉄鋳物 200×240×210 50kg
H-1	DFN-16106	水分計	180×1210×120	8.7	杉板15mm厚 ビニルシート エアキャップ	ステンレス管 38φ×1000 5 kg
G-1	8820	イオウ 分析計	320×310×260	7.3	米母15mm厚 エアキャップ	ステンレス製 150φ×80 2.7kg
H-2	AGK-77108	イオウ 分析計	460×725×490	35.7	杉板15mm厚 ビニルシート エアキャップ	鉄鋳物 190×190×490 30kg
E-1	GC-5A	ガスクロ マトグラ フ	247×117×140	0.8	段ボール ブリキケース 樹脂製サポート	ステンレス製 12φ×200 0.2kg

た。試験順序は、水吹つけ試験、貫通試験、落下試験、圧縮試験である。

3・2・1 水吹つけ試験

1・2・1に準じて行ったが、試験体の姿勢(配置)は、E-1は1・2・1と同じように台を用いて斜に置き、他のものは通常輸送されるときと同じ状態で床面に水平に置いた。

3・2・2 落下試験

1・2・2に準じて行った。

試験体の落下姿勢が、落下衝撃時の挙動および変形に著しい影響を与えることが予期されるが、内容物が最大破損を受ける方向に落下させることとした。50 kg以下の試験体については、同じ試験体で引き続き各コーナーについて0.3mの高さからの自由落下試験を行った。

参考データを得るために試験体のいくつかについて衝撃加速度の測定を行った。方法は、2・3・2bと同じである。比較的重量の軽い試験体は1・2・2と同じミゼットGメーターをX, Y, Z方向に取り付けた。

3・2・3 貫通試験

試験体をコンクリート床面の水平面上に梱包した状態で置き、1・2・3と同じ方法で行った。貫通試験棒の衝撃面は、試験体のいちばん弱いと思われる部分を狙って、木箱梱包のものは木材梱包面、木枠すかし梱包のものは試験体(線源格納部分)に直接落下させた。

試験後の変形は寸法測定等により記録した。

3・2・4 圧縮試験

1・2・4に準じて行った。荷重は鉛ブロックのほか、他の試験体等を用いた。なお負荷荷重はつぎのとおりである。

試験体	E-1	F-1	F-2	G-1	G-2	H-1	H-2	K-2	K-4
負荷量* (kg)	40	150	200	120	120	320	490	480	640

* 垂直投影面積×1,300kg/m²

試験体	F-3	G-3	H-3	H-4	K-1	K-3
負荷量** (kg)	700	450	510	1,530	1,440	890

** 自重×5

3・3 結果および考察

試験結果およびIAEA規則のA型としての適合判定を表9に示した。

3・3・1 水吹つけ試験

装備機器の場合、一般に木箱または木枠による梱包

であり、水の吹つけ試験による強度低下はほとんどない。また、内容物はすべて金属製の線源容器であり、シートパッキング、Oリングなどでシールされており、梱包内に水がはいったとしてもまったく問題はない。

3・3・2 落下試験

梱包材の一部に軽微な損傷を生じたものもあったが内容物にはまったく影響がなかった(写真5)。現状の梱包方法でもIAEA規則の落下試験に十分適合するが、万一、輸送中に転落した場合を考えると、若干の改良が望ましいものがある(3・3・5項参照)。

写真5 RI 装備機器包装の落下試験による変形例

衝撃加速度は、10 kg以下の軽量の試験体では、10～50 gでそれ以外の比較的重量のある試験体では60～3,000 gという値であった。装備機器の場合、容器の重量、形状、梱包の状態等が大きく異なっており、また、今回の試験ではデータ数も十分ではないのでこの結果だけから衝撃加速度の数値について判断することは困難である。

3・3・3 貫通試験

梱包材に木板を使用している場合、板に割れを生じたものもあるが、そこで大部分のエネルギーが吸収されて内容物には損傷を与えなかった。梱包内にエアキャップなどの緩衝材が充填されている場合には、貫通棒は板と緩衝材で止まり、内容物には達していない。スカシ梱包の場合は、内容物に直接貫通棒を当てたが、内容物が、鉄鋳物、鋼管などを使用した線源容器であるため、表面にわずかに傷がつく程度で、遮へい能力などの機能にはまったく影響がなかった。ブリキ容器(試験体E-1)の場合も容器が変形するだけで内容物にはまったく変化がなかった。

貫通棒に取り付けたGメーターの読みは、金属面衝突、木材面衝突、板割れ一部貫通の順に小さくなっており、定性的な概念と一致する。

3・3・4 圧縮試験

表9 装備機器試験結果

試験体	水の吹つけ試験		貫通試験		自由落下試験		圧縮試験	
	判定	所見	判定	所見	判定	所見	判定	所見
F-1	○	梱包材がぬれたがまったく異常なし	○	梱包材の一部が割れたが内容物には異常なし	○	異常なし	○	異常なし
F-2	○	同上	○	同上	○	同上	○	同上
G-2	○	同上	○	同上	○	同上	○	同上
K-1	○	同上	○	内容物表面にわずかに傷がつくが異常なし	○	底板の一部が折れたが内容物に異常なし	○	同上
G-3	○	同上	○	梱包材表面に傷がつくのみ	○	梱包材の一部がわずかに破損したが内容物には異常なし	○	同上
K-4	○	同上	○	同上	○	同上	○	同上
H-3	○	同上	○	内容物表面にわずかに傷がつくが異常なし	○	同上	○	同上
F-3	○	同上	○	梱包材表面に傷がつくのみ	○	異常なし	○	同上
H-4	○	同上	○	梱包材の一部が割れたが内容物には異常なし	○	底板の一部が破損したが内容物には異常なし	○	同上
K-3	○	同上	○	内容物表面に若干傷がついたが異常なし	○	同上	○	同上
K-2	○	同上	○	同上	○	同上	○	同上
H-1	○	同上	○	梱包材の一部が割れたが内容物には異常なし	○	異常なし	○	同上
G-1	○	同上	○	同上	○	同上	○	同上
H-2	○	同上	○	同上	○	同上	○	同上
E-1	○	同上	○	ブリキ容器にヘコミが生じたが内容物には異常なし	○	同上	○	同上

いずれの試験体も目に見えるような変化は起こらず、梱包材に対する圧縮荷重は計算上最大のものでも 20 kg/cm^2 程度であり、梱包に使用される木材の圧縮強度 ($400 \sim 500 \text{ kg/cm}^2$) に比較して $1/20$ 以下である。木箱、木枠による梱包の場合、変形・破損が時間とともに進行することは考えられないので、30分～1時間の試験で異常がなければ IAEA 規則に適合すると判断して良いと考える。

3.3.5 梱包改良一案

試験結果から見て、下記のような梱包であれば十分と思われる。

- (1) 10 kg 以下の容器では、厚さ15mm程度の板を使用した木箱に、エアキャップ等の緩衝材を用いて梱包する。
- (2) 50 kg 以上の重量物の場合は、容器を底板にボルト等で固定する。ただし、(a)のように直接荷重を受けていない方式は不可で、(b)の方式にすべきである。

- (3) 10～50 kg の容器は、形状に応じて(1)または(2)に準じて梱包する。
- (4) 梱包は下記のいずれかにより、落下時の損傷を少なくすることが望ましい。
- (a) ボルト組立, (b) 木ネジによる組立, (c) コーナー金具の使用, (d) 鋼帯の使用, (e) 複数の釘を方向をかえて打ち、衝撃による釘抜けをふせぐ。

3・4 まとめ

現在、国内で多数使用されている代表的な RI 装備機器の線源格納部分について、IAEA 規則による通常時試験を行ったが、現在の機器の安全性を確認するとともに今後の機器設計および輸送梱包に対して有益な指標を得ることができた。

今回の試験結果からみて、現在使われている RI 装備機器については、現状の機器設計、輸送梱包のまま、IAEA 規則の A 型輸送容器に適合すると判断して良い。

今後の輸送梱包に対する指針の試案を 3・3・5 に掲げたが、この案は今回の試験結果から得られた十分条件であり、最低必要条件からみればかなりの安全率がかかっている。最低必要条件を求めるとすれば今後の試験にまっほかはない。

なお、現在使用されている RI 装備機器は IAEA 規則の適用免除限度量以下で用いているものがかなり多いが、これらも今回の試験研究で同規則 A 型に適合することが確認された容器と同一形式のものが使用されていることを付記する。

(次号につづく)