

樹脂製の袋の破裂に係る基本事象ごとの評価内容詳細

- ① α 崩壊による He ガス
- ② 混入有機物
- ③ ポリ容器
- ④ 混入水分
- ⑤ 容器内物質間の化学反応（ガス及び熱）
- ⑥ 爆発性物質の爆発（ガス及び熱）
- ⑦ 可燃性ガスの燃焼・爆発（ガス及び熱）
- ⑧ 臨界発生（ガス及び熱）
- ⑨ 崩壊熱
- ⑩ 夏期の高温
- ⑪ 不適切な溶着
- ⑫ 封入時の傷等
- ⑬ 樹脂製の袋の α 線による劣化
- ⑭ 樹脂製の袋の γ 線による劣化
- ⑮ 樹脂製の袋の β 線による劣化
- ⑯ 樹脂製の袋の熱劣化
- ⑰ 樹脂製の袋の経年劣化
- ⑱ 当時の樹脂製の袋の品質
- ⑲ ポリ容器放射線劣化
- ⑳ ポリ容器内突起物混入による損傷
- ㉑ 貯蔵容器開封時の傷等

① 「α崩壊によるHeガス」

1. 確認・調査事項

貯蔵期間（平成3年10月～平成29年6月、ないしは平成8年7月～平成29年6月）中に、貯蔵容器内に存在する核燃料物質のα崩壊で生成されるHeガス量を計算により導出し、樹脂製の袋の内圧上昇に対する寄与程度を評価する。

2. 確認調査方法・内容

貯蔵容器内に貯蔵されていた核燃料物質のα崩壊で生成されるα粒子が全てHeガスになるとして*1、Heガス量と貯蔵容器内の発生気体滞留可能体積とを比較することにより、貯蔵容器内圧上昇へ及ぼす影響の程度を評価する。

*1) 発生するHeガス量を保守的に見積もる（多めに見積もる。）ため、α粒子が全てHeガスになると仮定した。

3. 確認・調査結果

3.1 発生気体滞留可能領域の体積

核燃料物質のα崩壊により生成したHeガスは、貯蔵容器内の空間領域（以下「発生気体滞留可能領域」という。）に滞留することになるため、はじめに当該領域の体積を導出した。

発生気体滞留可能領域は、貯蔵容器の内容積からポリ容器の体積及び樹脂固化物の体積を減じて求められる。

$$\begin{aligned} \cdot \text{貯蔵容器の内容積} &= (13/2)^2 \times \pi \times 28.7 + (10/2)^2 \times \pi \times 1.5 \\ &= 3927 \text{ [cm}^3\text{]} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \cdot \text{ポリ容器の体積} &= \text{ポリ容器の外容積} - \text{ポリ容器の内容積} \\ &= (9.4/2)^2 \times \pi \times 23 - (9.2/2)^2 \times \pi \times 22.8 \\ &= 81 \text{ [cm}^3\text{]} \end{aligned}$$

$$\cdot \text{樹脂固化物の体積} = 360 \text{ [cm}^3\text{]}^*2$$

$$\begin{aligned} \cdot \text{発生気体滞留可能体積} &= 3927 - 81 - 360 \\ &= 3486 \text{ [cm}^3\text{]} \rightarrow 3.5 \text{ [L]} \end{aligned}$$

なお、発生気体滞留可能領域体積は、以降の確認・調査においても上記の3.5 [L]を用いる。

*2) 添付 6.4.5 の「比較的形状を保持している樹脂固化物 51 個」の観察結果より、樹脂固化物の比重は約■■■■と推定され、ポリ容器内にある樹脂固化物の重量が■■■■gであることから、その体積を 360 cm³とした。

3.2 貯蔵期間中にα崩壊で生成されるHeガス量

5種のPu組成（A組成～E組成）について、各々を天然ウランと混合させた条件で、ORIGEN2コード[1]とJENDL-4.0[2]により以下2期間に生成されるHeガス量を求めた。

・貯蔵容器への貯蔵～梱包更新（平成3年10月～平成29年6月）

・梱包更新～樹脂製の袋の破裂（平成8年7月～平成29年6月）

Heガス量計算結果を表①-1に示す。特に、梱包更新から樹脂製袋の破裂までの貯蔵期間（平成8年7月～平成29年6月）のHeガス量については、Puが全てA組成であった場合に最も大きく、次のとおりとなった。

核物質防護上の観点から■■の箇所は非開示としています。

- ・ He 重量 : 2.25×10^{-3} g
- ・ He の標準状態での体積 : 12.6 mL

4. 評価結果

梱包更新から樹脂製袋の破裂まで（平成 8 年 7 月～平成 29 年 6 月）の貯蔵期間中に核燃料物質の α 崩壊で生成される He ガス量は、Pu 組成が最も保守的とした場合（He ガス発生量を多く見積もるケースで、Pu が全て A 組成の場合）でも 12.6 mL と評価され、貯蔵容器内の発生気体滞留可能体積 3.5 L に比して 0.4 % ($\approx 0.0126/3.5 \times 100$) 以下と極めて小さく、樹脂製の袋の内圧上昇への寄与も極めて小さいと考えられる。

5. 参考文献

- [1] M. J. Bell, “ORIGEN - The ORNL Isotope Generation and Depletion Code”, ORNL-4628, 1973.
 [2] 奥村啓介ら, “JENDL-4.0 に基づく ORIGEN2 用断面積ライブラリセット:ORLIBJ40”, JAEA-Data/Code 2012-032, 2013

表①-1 貯蔵容器内の核燃料からのヘリウム発生量計算結果

Pu 組成	He 生成量			
	貯蔵容器への貯蔵 ～ 梱包更新 (平成 3 年 10 月～平成 8 年 7 月)		梱包更新 ～ 樹脂製の袋の破裂 (平成 8 年 7 月～平成 29 年 6 月)	
	[g]	[mL]	[g]	[mL]
A 組成	4.53×10^{-4}	2.5	2.25×10^{-3}	12.6
B 組成	2.09×10^{-4}	1.2	9.43×10^{-4}	5.3
C 組成	3.45×10^{-4}	1.9	1.64×10^{-3}	9.2
D 組成	4.61×10^{-4}	2.6	2.22×10^{-3}	12.4
E 組成	2.03×10^{-4}	1.1	9.20×10^{-4}	5.2

②「混入有機物」

1. 確認・調査事項

ポリ容器内の核燃料物質が有機物と混在している場合、放射線から付与されるエネルギーにより化学結合が切斷され、水素や炭化水素 (C-H) 等の種々のガスが発生する。固体中で発生した α 線 (He イオン) の飛程は、アクチノイド化合物中で 10 μm 程度、有機物中でも 100 μm 以下と考えられ、 α 崩壊のエネルギー (5 MeV \sim) のほとんどを固体に付与することから、 γ 線によるエネルギー付与に比べて格段に大きい。

当該貯蔵容器には、内容物の観察の結果、X線回折測定済試料としてエポキシ樹脂と混合されたままの核燃料物質が含まれていたことから、エポキシ樹脂の α 線分解によるガス発生に関して、試験及び計算によりガス発生量を評価した。

2. 確認調査方法・内容

調査方法は、(1) α 崩壊の半減期の短い Cm-244 を含有した酸化物粉末 (以下「Cm 粉末」という。) とエポキシ樹脂を混合し、 α 線分解による樹脂の重量減少と密閉状態でのガス発生による内圧上昇を直接的に観察する方法と、(2) エポキシ樹脂に α 線を模擬した He イオンを照射し、発生するガスを定量分析することで、G 値 (エネルギー付与 100 eV 当たり発生するガス分子数) を評価した上で、核燃料物質の粉末とエポキシ樹脂の混合物から発生するガス量を算出する方法の 2 種類を用いた。

なお、確認のため、(3) エポキシ樹脂への γ 線照射によるガス発生 G 値も試験により評価し、 α 線による寄与と比較検討した。

(1) Cm 粉末を用いたエポキシ樹脂の α 線分解試験の方法

使用した Cm 粉末は、Cm-244 (半減期 18.1 年) とその娘核種 (Pu-240) からなる二酸化物粉末である。この粉末を乳鉢で粉碎し、2 液混合型のエポキシ樹脂系接着剤と所定の比率で混合・固化した試料を 2 個作製した。混合組成は表②-1 のとおりである。

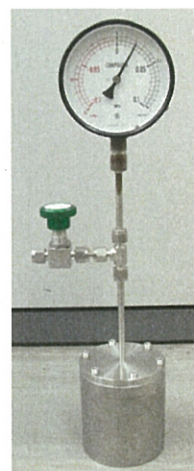
表②-1 Cm 粉末とエポキシ樹脂の混合組成

試料名	エポキシ樹脂重量 (mg)			Cm 粉末重量 (mg)	Cm 粉末含有率 (%)
	主剤	硬化剤	樹脂合計		
A	56.35	60.07	116.42	-	-
B	75.75	75.76	151.51	19.36	11.33
C	116.77	114.20	230.97	28.63	11.03

アルゴン雰囲気 (水分濃度 2 ppm 以下) のグローブボックス中で、試料 B は開放状態で毎日重量を測定し、エポキシ樹脂の分解による重量減少率を算出した。試料 A (エポキシ樹脂のみ) は、B の参照用として同様に毎日重量測定し、樹脂のみで変化があるかの確認用に用いた。試料 C は、図②-1 に示す圧力計付きの密閉容器 (有効内容積 194 mL) にグローブボックス中と同じアルゴン雰囲気下で密閉し、ガス発生による圧力上昇値を毎日記録した。図②-1 には、試料 A \sim C の作製時の外観写真も示す。



左から試料A、B、C
(ステンレス鋼製の皿の中で混合・固化)



圧力計付き
密閉容器の外観

図②-1 Cm粉末とエポキシ樹脂の固化試料外観(左)と圧力計付き密閉容器

(2) エポキシ樹脂へのHeイオン照射による発生ガス分析方法

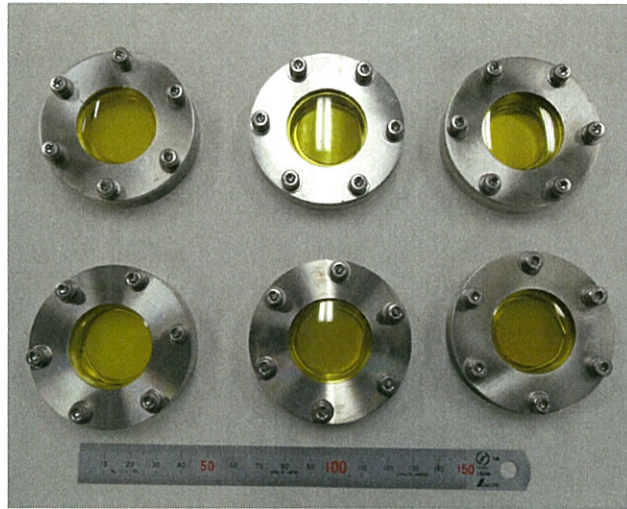
(a) 試料準備

(1)で用いたものと同じ2液混合型のエポキシ樹脂系接着剤の主剤及び硬化剤を1:1で混合し、直径26mmのステンレス鋼製円盤に塗布して厚さ数100 μm に固化したものを試料として用いた。また、実環境と同じ大気中での α 線照射を模擬するため、ステンレス鋼製の大気照射セルを利用した。このセルのビーム入射部は、7.5 μm 厚のカプトン製フィルムで、大気中に取り出したHeイオンを照射することが可能な構造となっている。図②-2に大気照射セルの写真を示す。

(b) Heイオン照射及び発生水素量分析

量子科学技術研究開発機構 量研 高崎研 TIARAのタンデム加速器を利用して、 α 粒子を模擬した5.5 MeVのHeイオンを試料に照射し、発生したガスの成分を四重極質量分析器(Q-Mass)で測定した。

大気環境を模擬する大気照射セルへのHeイオン照射を行った。タンデム加速器で9 MeVに加速されたHeイオンを利用し、大気取り出し窓と空気中でのエネルギー減衰により、5.5 MeVに減衰したHeイオンを試料に照射した。照射後、セル内の気体を水上置換により捕集し、ガスクロマトグラフにより発生ガス量の評価を行った。分析ガス種に関しては、高分子の放射線分解生成物で過半を占める水素に対して行った[1]。



図②-2 大気照射セルの写真

(セル内にエポキシ樹脂試料を設置し、1気圧の空気で満たされている)

(3) エポキシ樹脂の γ 線照射によるG値（ガス発生量）の評価試験方法

(a) 試料準備

(1)で用いたものと同じ2液混合型のエポキシ樹脂系接着剤の主剤及び硬化剤を1：1で混合し、ポリプロピレン製クリアファイルに塗布して厚さ約1mmの板状に固めた後、剥がして、約1cm角の正方形に切断した。切断した試料は予備照射を行うものと予備照射を行わない試料に分けた。

(b) γ 線照射及び発生水素量分析

量研 高崎研の食品照射棟第2セルにて、6 kGy/hで60時間の予備照射を行った。予備照射ありの試料と照射なしの試料をそれぞれガラス瓶に入れてゴム栓で密封し、0.76、1.6、2.8、3.6 kGy/hの4条件の γ 線照射線量率にてそれぞれ3.5時間、室温で照射した。試料数は予備照射あり、なしともに1個とした。

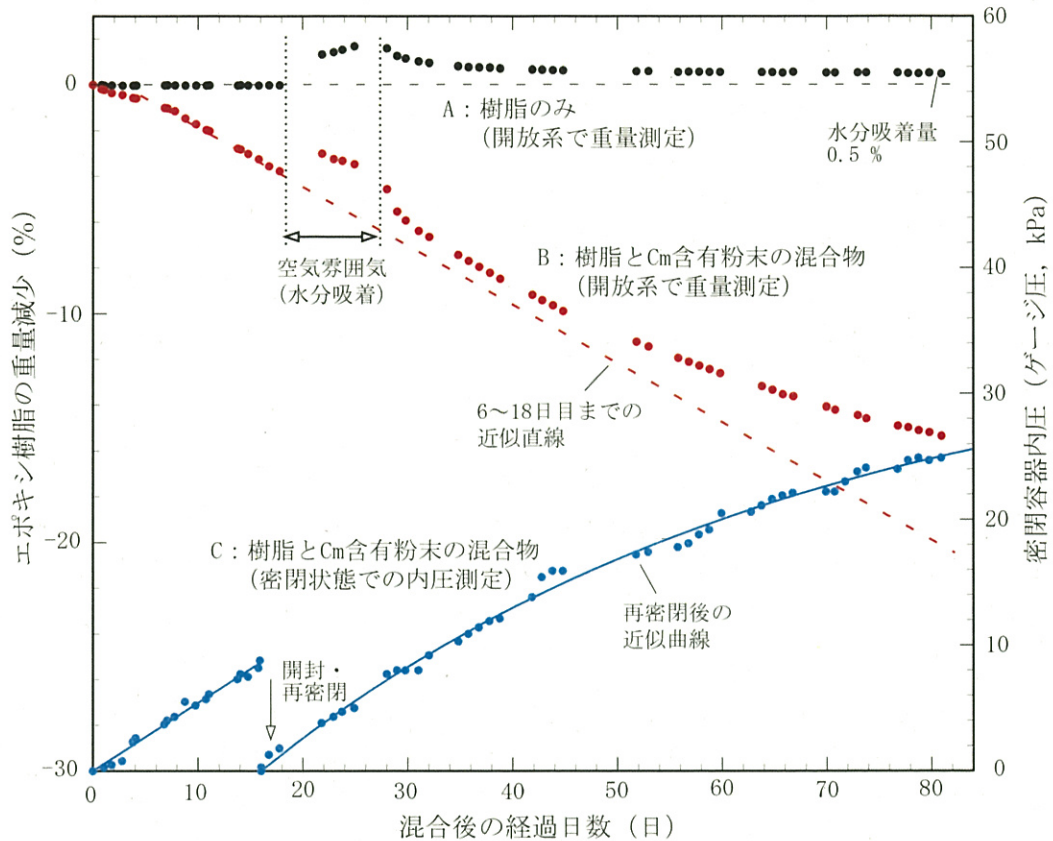
照射後、シリンジでガラス瓶内のガスを取り出し、ガスクロマトグラフを用いて水素発生量を定量分析した。

3. 確認・調査結果

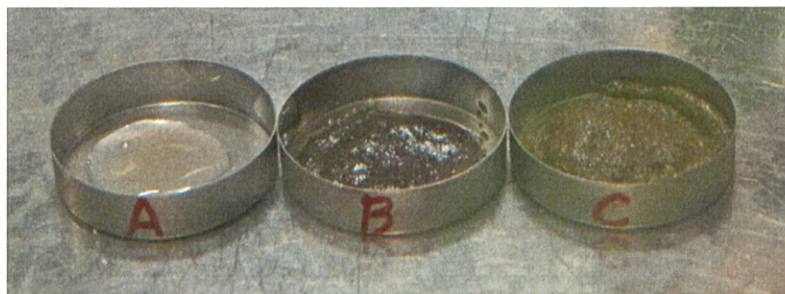
(1) Cm粉末を用いたエポキシ樹脂の α 線分解試験の結果

試料A、Bの樹脂の重量変化率と試料Cの密閉容器の内圧変化の測定結果を図②-3に示す。試験開始後16日目に一度密閉容器を開封して試料Cを取り出し、重量を測定した。グラフ上16日目までは、試料Bのエポキシ樹脂重量変化と試料Cの密閉容器内圧変化は、経過時間に対してほぼ比例していることを確認した。グラフの経過時間（16日間）において、試料A（エポキシ樹脂のみ）の重量減少は0.03%未満で無視できる値であるのに対し、開放系に保持した試料Bのエポキシ樹脂の重量減少率は3.3%（4.93 mg）と有意な値であり、 α 線による分解が起っていたことを裏付けている。一方、試料Cの密閉容器内圧は16日間で8.6 kPa上昇した。この内圧上昇をガス発生量に換算すると、 6.75×10^{-4} molとなり、標準状態換算で15.1 mLに相当する。密閉容器の開封直後に試料Cの重量を測定したところ、エポキシ樹脂の重量減少率は0.68%（1.58 mg）であり、同じ経過時間の試料Bに比べて約

1/5 と小さい値であった。試料 B の外観と比べて、密閉されていた試料 C は樹脂が全体的に膨張していた (図②-4) ことから、密閉の加圧下では、樹脂内で発生したガス分子が外部に放出されにくく、樹脂内でマイクロな気泡を形成していることが示唆される。試料 C のガス発生量と重量減少から、ガス種を水素とメタンの 2 種混合と仮定して組成を概算評価し、97 %が水素、3 %がメタンとの結果を得た。



図②-3 Cm 粉末と混合したエポキシ樹脂の重量変化率と密閉状態の内圧変化



図②-4 16 日目に密閉容器から取り出した試料 C (右端) と解放状態にあった試料 A、B の比較

試料 C の重量測定後に再び密閉状態とし、内圧変化の測定を 81 日目まで継続した。その間、一時的にグローブボックスの雰囲気空気を空気としたため、開放系にあった試料 A と B は水分吸着により重量が一時的に増え、再びアルゴン雰囲気にした後も完全には元の重量に戻らなかった。平衡状態で試料 A には 0.5 %の水分が吸着していた。グラフ上、40 日目以降から試料 B の重量減少、試料 C の内圧上昇

ともに、明らかに変化が鈍ってくる傾向を確認した。内圧上昇により、発生したガスが樹脂の外へ放出されにくくなっていることに加え、開放系での重量減少も鈍っていることから、粉末粒子周辺の樹脂の分解が進んだことによりガスが発生しにくい状態へと次第に変化していると考えられる。長期間の変化では、いずれガス発生源がなくなり内圧は一定値に飽和するとの推測から、16日目以降の内圧上昇に対して以下に示す指数関数を当てはめ、近似曲線を得た。

$$\Delta P = A[1 - \exp[-B(t - 16.03)]]$$

上式で ΔP は内圧上昇 (kPa)、 t は経過時間 (日)、 A と B はデータへのフィッティングで得られる定数であり、 A は内圧上昇の飽和値を、 B は飽和に至る時定数を意味している。 A 値として34 (kPa)、 B 値として 2.0×10^{-2} (1/日)を得た。

なお、式中の16.03は、16.03日時点で再密閉したことを意味する。

Cm粉末とエポキシ樹脂の混合物からのガス発生データから、貯蔵容器内の樹脂固化物からのガス発生量を評価するに当たり、粉末の粒子径が異なるため直接当てはめることはできない。添付6.4.6から、樹脂固化物内の粉末の平均粒子径が22 μm と36 μm であったのに対し、Cm粉末は酸溶液からの沈殿で生成されているので数 μm 程度の微細な粉末と推測される。そのため、Cm粉末のデータから、貯蔵容器内の樹脂固化物の状況に見合ったガス発生量のG値を以下のとおり評価した。

貯蔵容器内の樹脂固化物は、固化から貯蔵開始までに8年程度解放状態で保持されている。Cm粉末の実効崩壊定数 $1.90 \times 10^{-10} \text{ s}^{-1}$ に対し、添付6.4.4の表6.4.4-2に示した貯蔵容器内のPuの推定同位体組成の実効崩壊定数は $2.11 \times 10^{-12} \text{ s}^{-1}$ であるので、Cm粉末の方が90倍大きい。したがって、平成3年の貯蔵開始から平成29年の開封までの26年間は、グラフ上の32日目から138日目までの状態に概ね対応していると考えられる。

近似曲線からの外挿により、32日目から138日目までの密閉容器内圧変化は、9.3 kPaから31.1 kPaに相当し、この間の正味のガス分子発生数を 1.3×10^{21} 個と算出した。一方、この期間のCm粉末の α 崩壊数は 1.10×10^{17} 個である。これらの数値からG値を評価する際に、粉末粒子内で減衰する α 線エネルギーの効果を考慮する必要がある。表②-2は、粒子内で発生する全 α 線エネルギーのうち粒子外（エポキシ樹脂）に付与される割合を、粒子径をパラメータとしてPHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System) コード[2]で計算した結果である。この割合を α 崩壊数に乘じ、エポキシ樹脂に付与される実質的なエネルギーの補正を行なった結果、26年間の貯蔵期間に相当する平均のG値として、Cm粉末の粒子径4 μm を仮定した場合に0.18、10 μm を仮定した場合に0.23の値を得た。

表②-2 粒子内で発生する α 線エネルギーのうち粒子外に付与されるエネルギーの割合

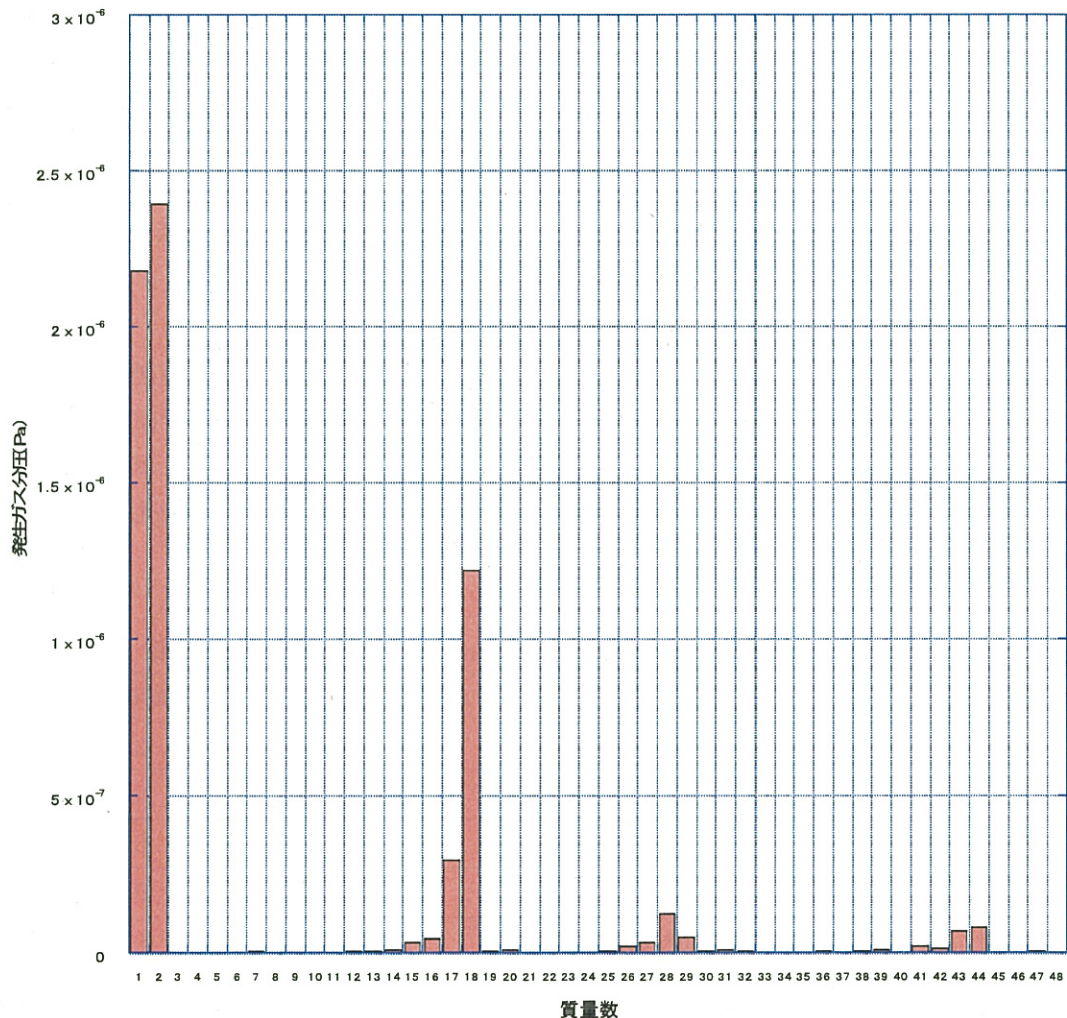
粒子直径 (μm)	粒子外に付与されるエネルギーの割合 F_e
4	0.889
10	0.701
20	0.425
30	0.293
35	0.231

(2) He イオン照射による水素ガス発生量のG値の評価結果

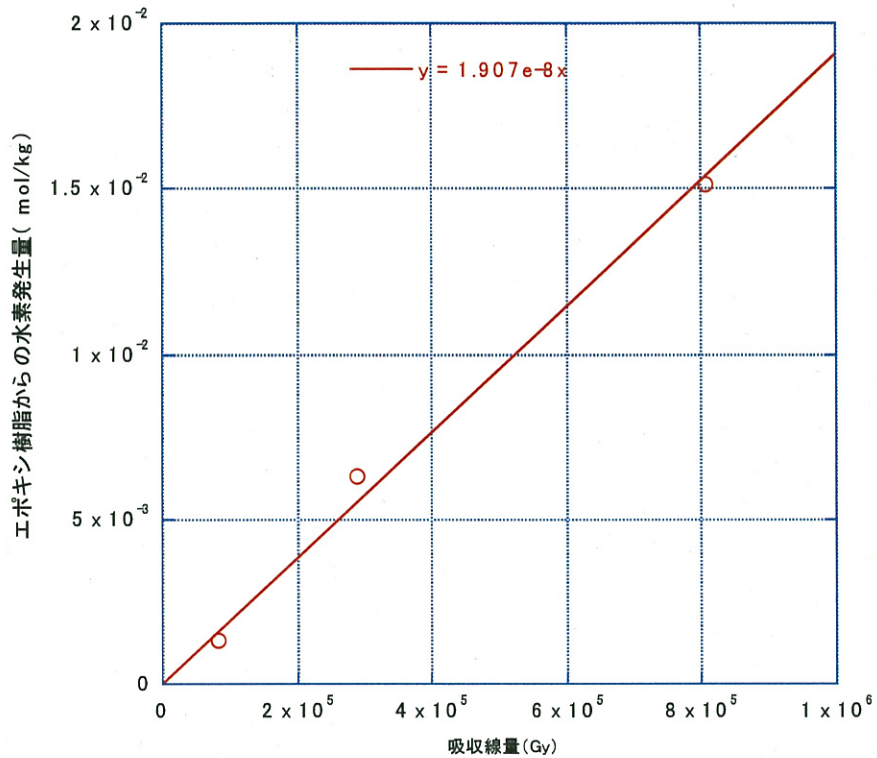
5.5 MeVのHeイオン（ビーム電流：約5 e nA）をエポキシ樹脂試料に照射し、その際に発生したガ

スの分圧を Q-Mass で測定した結果を図②-5 に示す。水素（質量数 1, 2）のほか、水とその分解物（質量数 17, 18）が多く発生していることが判る。前者に関しては、樹脂材料が分解した際に発生する水素であり、後者に関しては試料表面に吸着していた水と推察される。その他、放射線分解で発生する分子としては、一酸化炭素（質量数 28）、メタンとその分解物（質量数 14, 15, 16）、エチレンとその分解物（質量数 26, 27, 28）があるが、試料表面に吸着していた窒素（14, 28）、酸素（質量数 16, 32）の質量数と一部が同じであるため定量は難しい。また、二酸化炭素（質量数 44）の発生も確認した。表面吸着ガスの影響があるため、保守的な評価になるが、全圧から水（質量数 17, 18）と水素イオン（質量数 1）の分圧を除き、水素発生量の割合を評価すると 83 %となる。

He イオン（照射クーロン数：約 1.4 μC ～ 14 μC ）照射後の大気照射セル内の気体をガスクロマトグラフで測定した結果を図②-6 に示す。イオン照射による吸収線量は、84 kGy～810 kGy で、水素ガス発生量としては、エポキシ樹脂に対して $1.9 \times 10^{-8} \text{ mol/J}$ が得られた。この値を G 値に換算すると 0.18 となる。水素発生量が全ガス発生量の 83%であることから、全ガス発生に対する G 値は、簡易的に $0.18 \times 100/83 = 0.22$ となる。



図②-5 エポキシ樹脂に対する He イオン照射時の発生ガス質量スペクトル



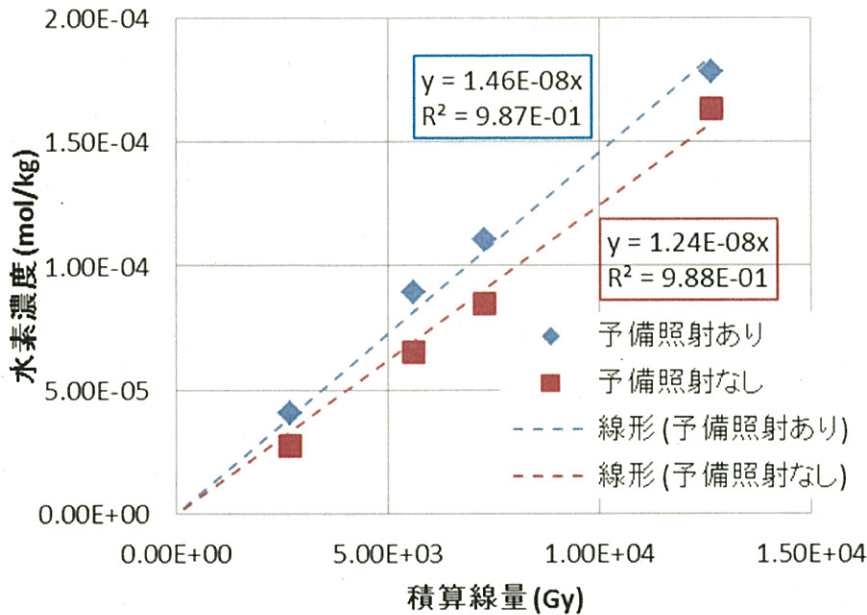
図②-6 エポキシ樹脂に対するヘリウムイオン照射時の水素ガス発生量

(3) エポキシ樹脂の γ 線照射によるG値（ガス発生量）の評価結果

γ 線照射量と水素発生量の測定結果を表②-3及び図②-7に示す。予備照射の有無の影響があることが分かる。図②-7の線図の傾きから水素ガス発生量を求めた結果、予備照射ありでは 1.5×10^{-8} mol/J、なしでは、 1.2×10^{-8} mol/Jが得られた。この結果得られた水素ガス発生量のうち高い値である予備照射ありでの値を用いると200 kGyの γ 線照射で、約 2.9×10^{-3} mol/kgの水素が発生し、標準状態での体積に換算すると、エポキシ樹脂1 kg当たり70 mLの水素が発生する。

表②-3 γ 線照射によるエポキシ樹脂の水素ガス発生量測定結果

予備照射	積算線量 (kGy)	サンプル重量 (g)	水素発生量 (mol)
あり	2.68	5.0445	2.07×10^{-7}
	5.59	5.0773	4.55×10^{-7}
	7.28	5.0725	5.99×10^{-7}
	12.64	5.0904	9.05×10^{-7}
なし	2.68	5.0185	1.39×10^{-7}
	5.59	5.0259	3.29×10^{-7}
	7.28	5.0015	4.25×10^{-7}
	12.64	5.0091	8.19×10^{-7}



図②-7 エポキシ樹脂の γ 線照射量と水素ガス発生量の関係

4. 評価結果

エポキシ樹脂の α 線分解によるガス発生量の G 値を用いて、貯蔵容器内のガス発生量を評価するのに次式を用いた。

$$\text{全ガス発生量 } V_{\text{gas, Total}} \text{ (L)}^{*1} = N_{\alpha} \times F_{\alpha} \times G \times E_{\alpha} \times 10^6 / 100 / N_A \times 22.4$$

N_{α} : 対象期間中の全 α 崩壊数 (添付 6.4.4 の表 6.4.4-3)

F_{α} : 粒子内で発生した α 線エネルギーのうち樹脂に付与される割合 (表②-2)

G : ガス発生量の G 値 (検証試験結果から)

E_{α} : α 崩壊で生じる平均エネルギー (5.29 MeV)

N_A : アボガドロ数 (6.022×10^{23})

*1 標準状態 (0 °C、1 気圧) での体積換算値

G 値については、 Cm 粉末と混合したエポキシ樹脂の α 線分解の試験結果から評価した G 値0.18~0.23に対して、エポキシ樹脂に外部から He イオンを照射した場合のガス発生量の G 値は0.22であり、同程度の値であった。貯蔵容器内の樹脂固化物からのガス発生量評価に際して、ここでは発生ガスの定量分析に基づいているとともに、粒子径に依存しない結果である He イオン照射の結果(G 値0.22)を用いることとした。全 α 崩壊数については、添付 6.4.4 に示した Pu の同位体組成A~Cの推定平均組成に基づき、 Am 除去あり/なしの両条件を考慮した。粉末粒子径は、添付 6.4.6 に示した分析結果を参考に、20 μm と35 μm の2種類に加え、これらよりも小さい10 μm の場合も想定した。貯蔵容器内の核燃料物質全量に対して、平成3年10月の貯蔵開始時から平成8年7月の梱包更新時までと、梱包更新から平成29年6月の蓋開封時までのガス発生量計算結果を表②-4に示す。ガス発生量には粉末粒子径が大きく影響することが分かる。

評価上考慮していないが、実際にはガス発生量が低くなる可能性がある要因として以下2点が挙げられる。

- ・ 内圧上昇の効果 : Cm 粉末を用いた試験に比べて、実際の貯蔵容器内の内圧上昇は10倍以上あつ

たと推測され、その際には発生したガスが放出されず樹脂内に保持される割合が高くなると推測される。

- ・ 粒子近接の効果：PHITS コードでの計算により、エポキシ樹脂内の α 粒子の最大飛程は40 μm 程度である。粉末粒子表面間の距離がこれよりも近い場合は、粉末粒子から出た α 粒子がエネルギーを全て樹脂に付与する前に別の粉末粒子に衝突してエネルギーを失うため、実効的なG値は低くなる。添付6.4.6の観察像では、実際に粉末粒子がかなり近接した試料が見られる。

なお、 γ 線照射による分解生成ガスに関しては、エポキシ樹脂1 kg 当たり70 mLの水素ガス発生量であるので、内圧上昇に対する寄与は α 線照射に比べて無視できるほど小さい。

表②-4 貯蔵容器内の樹脂固化物からのガス発生量の評価結果^{*1}

同位体組成条件 ^{*2}	粉末粒子径 (μm)	平成3年10月～ 平成8年7月の ガス発生量 (L)	平成8年7月～ 平成29年6月の ガス発生量 (L)
組成A～Cの推定平均組成 (Am除去なし)	10	16.5	79.5
	20	10.0	48.2
	35	5.44	26.2
同 (Am除去あり)	35	4.54	22.4

^{*1} ガス体積は標準状態換算値 (0°C、1気圧)、ガス発生G値0.22を使用

^{*2} 添付6.4.4参照

5. 参考文献

- [1] Z. Chang, Jay A. Laverne, "Hydrogen Production in γ -ray and Helium-Ion Radiolysis of Polyethylene, Polypropylene, Poly(methyl-methacrylate), and Polystyrene", Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry, pp. 1656-1661, Volume 38, Issue 91, 2000.
- [2] T. Sato, K. Niita, N. Matsuda et al., "Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS, Version 2.52", J. Nucl. Sci. Technol. vol. 50(9), pp. 913-923 (2013).

③「ポリ容器」

1. 確認・調査事項

ポリ容器に直接核燃料物質が収納されている場合、ポリ容器の内面は α 線照射を受けて分解し、ガスが発生することが予想される。ここでは、ポリ容器内面が直接核燃料物質の粉末に接触している状態を仮定し、貯蔵期間中に発生するガス量を概略評価した。

2. 確認調査方法・内容

貯蔵容器内部の観察の結果、ポリ容器の底部付近から \blacksquare g の粉末が回収された。元素分析の結果、この粉末中の U/Pu 比は、計量管理帳簿に記載の核燃料物質全量の U/Pu 比と整合している。そこで、添付 6.4.4 に示した Pu の平均同位体組成推定値を用い、天然ウランとの混合酸化物を仮定し、化合物組成を $U_{0.734}Pu_{0.266}O_2$ と定めた。Am の除去は行われていないと仮定し、平成 3 年の貯蔵開始から平成 8 年の梱包更新時まで、及び梱包更新時から平成 29 年の蓋開封時までについて、添付 6.4.4 の表 6.4.4-3 に記載の α 崩壊数を基にガス発生量を評価した。酸化物粉末の理論密度を上記同位体組成データから計算により求め、その 40 %の密度で粉末がポリ容器に充填されたと仮定し、粉末充填体とポリ容器内面の接触面積を算出した。粉末粒子内の α 粒子の飛程は約 10 μ m であるから、単純な幾何学近似と α 線の発生方向から、ポリ容器内面から 5 μ m の範囲内にある粉末粒子中で発生する α 粒子の全エネルギーの半分がポリ容器に付与されると仮定した。

ポリ容器の α 線分解で発生するガスの G 値の評価は、貯蔵容器内に収納されているものと同じポリ容器を切断して試料片（直径 27 mm 円板状）を加工し、エポキシ樹脂と同様の手法により 5.5 MeV の He イオンを照射して行った。ガス分析により得られた G 値を用い、貯蔵期間中にポリ容器から発生し得るガス量を評価した。

3. 確認・調査結果

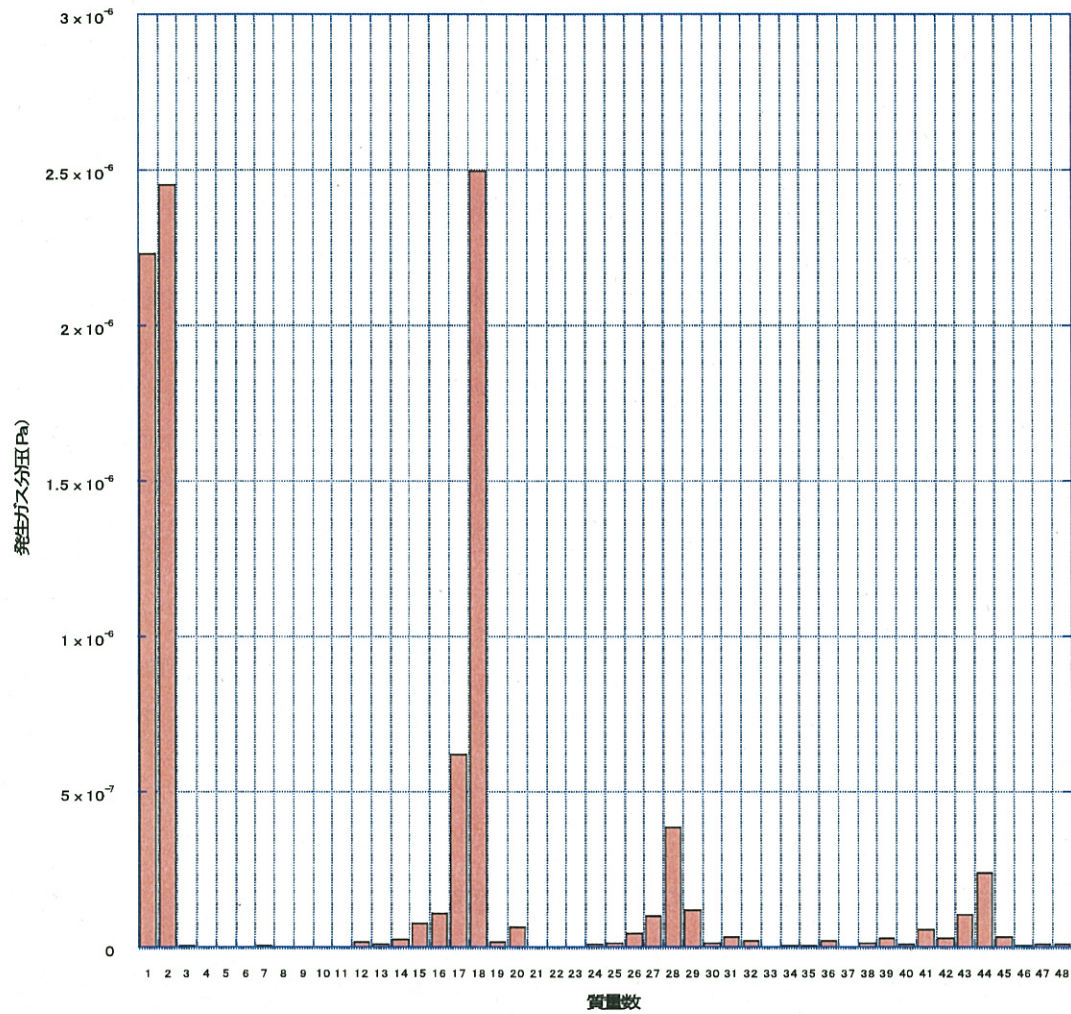
(1) ポリ容器試料への He イオン照射による G 値の評価結果

5.5 MeV の He イオン（ビーム電流：約 5 e nA）をポリ容器試料に照射し、その際に発生したガスの分圧を Q-Mass で測定した結果を図③-1 に示す。水素（質量数 1, 2）のほか、水とその分解物（質量数 17, 18）が多く発生していることが判る。前者に関しては、樹脂材料が分解した際に発生する水素であり、後者に関しては試料表面に吸着していた水と推察される。水の生成が多い理由としては、ポリ容器が長期間（26 年以上）大気中で保管されていたことが原因と考えられる。その他、放射線分解で発生する分子としては、一酸化炭素（質量数 28）、メタンとその分解物（質量数 14, 15, 16）、エチレンとその分解物（質量数 26, 27, 28）があるが、試料表面に吸着していた窒素（14, 28）、酸素（質量数 16, 32）の質量数と一部が同じであるため定量は難しい。また、二酸化炭素（質量数 44）の発生を確認したため、試料表面が酸化している可能性がある。表面吸着ガスの影響があるため、保守的な評価になるが、全圧から水（質量数 17, 18）と水素イオン（質量数 1）の分圧を除き、水素ガス発生量の割合を評価すると 61 %となる。

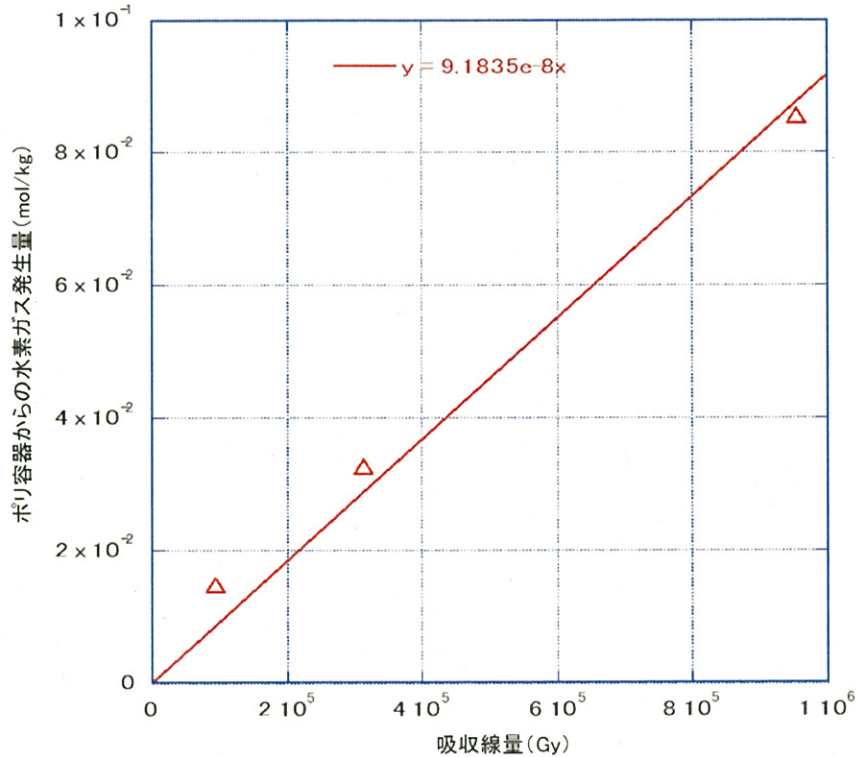
He イオン（照射クーロン数：約 1.5 μ C～15 μ C）照射後の大気照射セル内の気体をガスクロマトグラフで測定した結果を図③-2 に示す。イオン照射による吸収線量は、93 kGy～950 kGy で、水素ガス発生量としては、ポリ容器に対して 9.2×10^{-8} mol/J が得られた。この値は、エポキシ樹脂の 4.8 倍

核物質防護上の観点から \blacksquare の箇所は非開示としています。

に相当すること、さらに水素ガスが全体の 61 %であることを加味し、ポリ容器の α 線分解で発生する全ガスの G 値を 1.4 と評価した。



図③-1 ポリ容器試料片に対する He イオン照射時の発生ガス質量スペクトル



図③-2 ポリ容器試料に対する He イオン照射時の水素ガス発生量

(2) 貯蔵容器内のポリ容器からのガス発生量の評価結果

同位体組成を考慮した酸化粉末の理論密度は 11.09 g/cm^3 で、この 40 % の密度で充填された場合の粉末充填体積は $\blacksquare \text{ cm}^3$ である。ポリ容器の底面積 66.48 cm^2 に対して充填高さはわずかに $\blacksquare \text{ mm}$ となるので、ポリ容器と粉末の接触面として底面だけを考える。底面積に $5 \text{ }\mu\text{m}$ の厚さをかけた有効体積は $3.32 \times 10^{-2} \text{ cm}^3$ で、粉末充填体積に対する割合は \blacksquare である。一方、貯蔵容器中の核燃料物質全量に対する粉末成分中の金属元素重量の割合は \blacksquare である。貯蔵容器内の全 α 崩壊数（表 6.4.4-3 参照）にこれら 2 つの割合と更に $1/2$ を乗じると、ポリ容器に入射する α 粒子数が得られ、梱包更新までの 5 年間で \blacksquare 個、梱包更新後の 21 年間で \blacksquare 個となる。

含有する α 崩壊核種の組成と崩壊定数の重みをつけた平均の α 粒子エネルギーは 5.29 MeV である。これと G 値 1.4 を用いて、 α 粒子 1 個当たり発生するガス分子数を 7.41×10^4 個と算出した。この値に上記のポリ容器に入射する α 粒子数を乗じ、発生するガス量として、梱包更新までの 5 年間で 37.5 ml ($1.67 \times 10^{-3} \text{ mol}$)、梱包更新後の 21 年間で 181 ml ($8.07 \times 10^{-3} \text{ mol}$) を得た。

4. 評価結果

貯蔵容器内部の観察結果を基に、ポリ容器底面に U と Pu の混合酸化物が一様に接触していたとして、 α 線分解により発生する標準状態のガス量は、平成 3 年 10 月の貯蔵開始から平成 8 年 7 月の梱包更新時までに 37.5 ml 、梱包更新時から平成 29 年 6 月の蓋開封時までに 181 ml である。

核物質防護上の観点から \blacksquare の箇所は非開示としています。

④「混入水分」

1. 確認・調査事項

貯蔵期間（平成8年7月～平成29年6月）中に、貯蔵容器内に存在する核燃料物質試料粉末に吸着した水分の放射線分解により生成されるガス量を計算により導出し、樹脂製の袋の内圧上昇に対する寄与程度を評価する。

2. 確認調査方法・内容

水が放射性物質と混在している場合に、放射線から付与されるエネルギーにより分解され、水素と酸素が発生する。

一般的に粉末の含水量は粒度や周囲の湿度に依存し、各種報告では粉末の核燃料物質の大気中での含水率として [] wt%とされている[1][2]。ここでは、ガス生成量の範囲を見積もるために、水分吸着量として [] wt%及び [] wt%の両ケースについて検討する。

検討に際しては、貯蔵期間（梱包更新～樹脂製の袋の破裂；平成8年7月～平成29年6月）内に放射性物質の核壊変に伴う放射線により、粉末試料に吸着されている水分の全量が放射線分解されたと仮定する。

3. 確認・調査結果

現地調査にて、貯蔵容器 No. 1010 のポリ容器内には粉末が [] g あることを確認した。

当該粉末が全て核燃料物質の酸化物であった場合、[] g は約 [] mol (= [] / (238.051 + 15.999 × 2))；核燃料物質の質量数として、核燃料中に最も多く含まれると思われる U-238 の値 238.051 を使用) に相当する。当該粉末には、[] wt%の水分吸着量の場合は 0.0297 g (0.00165 mol = 0.0297 / (1.008 × 2 + 15.999)) の H₂O が、[] wt%の水分吸着量の場合は 0.0495 g (0.00275 mol = 0.0495 / (1.008 × 2 + 15.999)) の H₂O が含まれることになる。

この H₂O が全量放射線分解された場合、[] wt%の水分吸着量の場合は 0.00165 mol の H₂ 及び 0.000825 mol の O₂ が、[] wt%の水分吸着量の場合は 0.00275 mol の H₂ 及び 0.00138 mol の O₂ が発生する。すなわち、各々合計すると 0.00248 mol と 0.00413 mol になり、その体積は標準状態で 0.055 L と 0.093 L となる。

なお、当該貯蔵容器については、平成8年7月の梱包更新時に開封されており、放射線分解により発生した H₂ 及び O₂ はその際に放出されるが、同時に核燃料物質試料は開封時の環境に含まれる水分を吸着し、梱包更新後にそれを放射線分解するため、梱包更新前と同量の H₂ 及び O₂ ガスが発生し、貯蔵容器内に滞留することになると考えられる。

4. 評価結果

貯蔵期間中に試料に吸着した水分が全て放射線分解された場合の H₂ 及び O₂ ガスの合計発生量は、水分吸着量を [] wt%とした場合には 0.055 L、水分吸着量を [] wt%とした場合には 0.093 L であり、貯蔵容器内の発生気体滞留可能体積 3.5 L に比して 1.6% (= 0.055 / 3.5 × 100) ないしは 2.7% (= 0.093 / 3.5 × 100) となり、樹脂製の袋の内圧上昇への寄与は小さい。

核物質防護上の観点から [] の箇所は非開示としています。

5. 参考文献

- [1] 高橋 俊也ら, “酸化ウラン粉末, ペレットおよび燃料ピンの水分の分析”, 動力炉・核燃料開発事業団東海事業所技術レポート, TN841-74-52, 1974.
- [2] 北川 修ら, “ウラン-プルトニウム混合酸化物粉末への水分の吸着挙動”, 日本原子力学会 2004 秋の大会, G32, 2004.

⑤「容器内物質間の化学反応（ガス及び熱）」

1. 確認・調査事項

樹脂固化物に含まれていたことを確認したウラン/プルトニウムの炭化物及び窒化物（以下「炭化物等」という。）に関し、それらと水分の反応について検討・考察する。

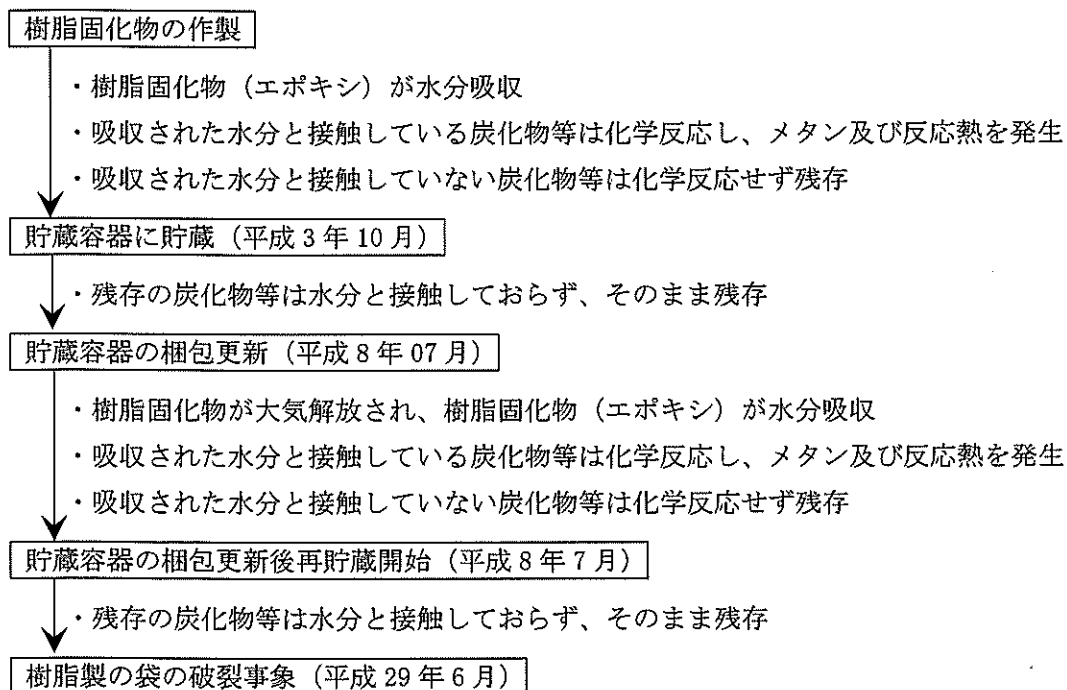
2. 確認調査方法・内容

樹脂固化物の X 線回折測定等により、樹脂固化物に炭化物等が含有されていることが確認されており（添付 6.4.6）、樹脂固化物に含まれている炭化物等と水との反応について検討・考察する。

3. 確認・調査結果

炭化物等は、水に対する化学的活性が非常に高く、水分に触れると瞬時に激しく反応し、メタン及び反応熱を発生する。

樹脂固化物の X 線回折測定において、水に対する活性の高い炭化物等が検出されたということは、次のような状況/環境にあったと考えられる。



すなわち、貯蔵容器での貯蔵期間中（貯蔵容器に貯蔵～貯蔵容器の梱包更新[平成 3 年 10 月～平成 8 年 7 月]、及び貯蔵容器の梱包更新後再貯蔵開始～樹脂製の袋の破裂事象[平成 8 年 7 月～平成 29 年 6 月]）においては、炭化物等は水分と接触しておらず、炭化物等と水分の化学反応は起こらない。

4. 評価結果

貯蔵容器での貯蔵期間中には、炭化物等と水分の化学反応は起こらず、当該化学反応の生成物であるメタンや反応熱も発生しないと考えられる。

⑥「爆発性物質の爆発（ガス及び熱）」

1. 確認・調査事項

文献等により爆発性物質生成（量、爆発可能性等）、衝撃・影響等の有無を調査し、爆発性物質の生成・爆発可能性を検討する。

2. 確認調査方法・内容

文献、化学平衡計算等により、高温・高圧条件下や α 線、 γ 線照射条件下における爆発性物質の生成可能性や衝撃・影響等の有無を調査する。

高温・高圧条件下での生成可能性については、爆発性物質である硝酸アンモニウムの生成可能性を化学平衡計算により確認する。また、 α 線、 γ 線照射条件下については、硝酸アンモニウムの特性や現地調査の結果を踏まえた生成可能性を検討する。さらに、仮に硝酸アンモニウムの爆発条件に達すると想定される場合には、その衝撃・影響等を調査する。

3. 確認・調査結果

エポキシ樹脂はアミノ基（ $-\text{NH}_2$ ）を有する硬化剤を用いていることから、エポキシ樹脂中には爆発性物質に含まれるニトロ基（ $-\text{NO}_2$ ）やアジド基（ $-\text{N}_3$ ）の構成元素である一定量（エポキシ 1 kg に対して約 20 g）の N を含有する。一般的にアミノ基からニトロ基に変化するためには、強力な酸化剤である濃硝酸が必要とされている。貯蔵容器内には濃硝酸等の強力な酸化剤は存在し得ないためアミノ基がニトロ基に変化することはないと考えられるが、貯蔵容器内は α 線や γ 線等の放射線照射下であり、また局所的・瞬間的に高温・高圧条件下になる可能性を想定して、これらの条件における爆発性物質である硝酸アンモニウム（ NH_4NO_3 ）の生成可能性を検討した。

高温・高圧条件下での生成可能性の検討として、化学平衡計算により N、H、O を含む系で高温・高圧条件（温度 23 °C～223 °C、圧力 1 atm～100 atm）において安定相を評価した。その結果、生成物は N_2 、 O_2 、 H_2O のみで、硝酸アンモニウムの生成はなかった。これより、高温・高圧条件下では、熱力学的平衡条件において硝酸アンモニウム等の爆発性物質が生成する可能性はないことが分かった。

次に、 α 線、 γ 線照射条件下での生成可能性を検討した。 γ 線照射（10 MGy）で H_2 や CH_3 を放出したエポキシ樹脂試料のフーリエ変換赤外分光（FT-IR）測定において、アミノ基に相当するピークの照射前後での変化はなく、またニトロ基に相当するピークは観察されなかったことが報告されている[1]。また、エポキシ樹脂内の C-C、C-H、N-H 結合とニトロ基で存在する N-O 結合の乖離エネルギー[2]は、607 kJ/mol（C-C）、337.2 kJ/mol（C-H）、377 kJ/mol（NH-H）及び 305 kJ/mol（NO-O）であり、NO-O が最も低いエネルギーで乖離する。このことから、 α 線や γ 線照射によるニトロ基生成はなく、また仮にニトロ基が生成したとしても照射下では安定には存在しないため、 α 線、 γ 線照射条件下において硝酸アンモニウム等の爆発性物質の生成可能性は低いと考えられる。

以上から、貯蔵容器内において硝酸アンモニウム等の爆発性物質が生成する可能性は想定し難い。また、硝酸アンモニウムの場合、爆発には 260 °C 以上の高温が必要であるが[3]、⑨「崩壊熱」における貯蔵容器内の温度評価結果では温度上昇は 2 °C 以下であり、爆発は生じ得ない。更に作業員への聞き取り調査の結果、破裂時における異臭等はないことが分かっており、爆発性物質の生成及び爆発が生じなかったことを裏付けている。

4. 評価結果

高温・高圧下や α 線及び γ 線照射下ではエポキシ樹脂内に爆発性物質である硝酸アンモニウムは生成せず、また爆発温度である 260 °C 以上にも達しないため、爆発性物質の生成及びその爆発の可能性は低い。

5. 参考文献

- [1] J. Dawson, et al., “Initial studies on the effects of radiation, thermal ageing and aqueous environments on the stability and structure of candidate polymeric encapsulant materials”, Mineralogical Magazine, 76(8), pp. 2985-2994, December 2012.
- [2] T. L. Cottrell, “The Strengths of Chemical Bonds”, 2nd ed., Butterworth, London, 1958.
- [3] スティーブン・ジョセフ・バブラ, “硝酸アンモニウムの偶発的な爆発を防止するための方法および装置”, 特開平 7-54792, 1995.

⑦「可燃性ガスの燃焼・爆発（ガス及び熱）」

1. 確認・調査事項

貯蔵期間（平成 8 年 10 月～平成 29 年 6 月）中に、貯蔵容器内に発生する可燃性ガス量を計算により導出し、水素等の燃焼範囲への到達可能性、爆発発生等の有無を調査する。

2. 確認調査方法・内容

計量管理の帳簿における Pu の組成等の情報から、エポキシ樹脂やポリ容器への放射線照射により発生する可燃性ガスの発生率を算出する。貯蔵容器内からの H₂ ガスの漏えい量及び想定し得る貯蔵容器内の空気量を考慮して、貯蔵容器内における燃焼範囲への到達期間を算出し、作業員への聞き取り調査結果も踏まえて貯蔵期間中及び樹脂製の袋の破裂時における爆発発生の可能性を検討する。

なお、樹脂製の袋及び貯蔵容器内における H₂ ガスの漏えい率の計算方法の詳細は添付 7. 1. 4 に示す。

3. 確認・調査結果

「②混入有機物」及び「③ポリ容器」の評価結果から、可燃性ガスである H₂ ガスの発生率として 1 日当たり最大 3.9×10^{-4} mol（約 21 年間で $79.7 \times 0.83 = 66.1$ L）、最小で 1.1×10^{-4} mol（約 21 年間で $22.6 \times 0.83 = 18.7$ L）を想定した。貯蔵容器内（貯蔵容器内容積からポリ容器とエポキシ樹脂の体積を差し引いた容積：3.5 L）の標準状態の空気中に含まれる空気量は約 0.16 mol となる。樹脂製の袋及び貯蔵容器（O-リング）からの H₂ ガスの漏えい量は、H₂ ガスの透過係数を用いて時間幅を 1 日間とした数値解析により算出した。樹脂製の袋からの H₂ の透過係数は、 2.7×10^{-10} cc・cm/cm²・s・10 mmHg [1]、貯蔵容器の O-リングからの H₂ の透過係数は最大で 3.1×10^{-7} 、最小で 1.0×10^{-7} cc・cm/cm²・s・atm [2, 3] とした。一重目と二重目の樹脂製の袋は一体となって厚さ 0.6 mm、一重目の樹脂製の袋の表面積（1620 cm²）でほぼ貯蔵容器内容積（樹脂製の袋内有効体積 3.4 L と設定）まで膨張すると仮定した。貯蔵容器の O-リングは外径 φ 120 mm、貯蔵容器への装着時の幅を最大で 5.0 mm、最小で 1.0 mm とした。

以上の条件により 21 年間の貯蔵期間中における H₂ ガスの漏えい量を計算した結果、最大で全水素ガス発生量の約 58%、最小で約 7% の水素ガスが漏えいすることとなった。これにより、貯蔵容器内で空気中での水素の燃焼範囲（4.0～75 vol.% [4]）となる期間を見積もったところ、H₂ ガスの発生率を最大とした条件において貯蔵開始後 7 日～1114 日、最小とした条件において 46 日以上で燃焼範囲となった。

水素爆発における最小着火エネルギーは約 0.02 mJ [5] と低く、その着火源としては貯蔵容器が動いた際の試料間の摩擦等によって生じる静電気が考えられる（0.02 mJ は体に感じない程度の静電気エネルギー）。しかしながら、貯蔵期間中においては、貯蔵容器は静置されていたことから摩擦等により静電気が生じる可能性は低く、爆発は生じなかったものと考えられる。また、仮に爆発したとしても、作業員への聞き取り調査及び破裂した樹脂製の袋の観察結果から貯蔵容器開封まで一重目の樹脂製の袋が健全だったことから、貯蔵期間中に爆発が発生したことは想定しがたい。

一方、破裂時においては貯蔵容器外に放出した水素が空気と混合され、燃焼範囲となりガスの流動等による静電気の発生により水素爆発が生じる可能性が考えられる。しかしながら、作業員への聞き取り調査により、破裂音のみで炎や燃焼による異臭も無く、高温にもなっていないことが分かってお

り、水素爆発は生じなかったものと考えられる。

4. 評価結果

エポキシ樹脂からの水素等の放射線分解ガスによる貯蔵中の爆発は、着火源の可能性は考え難いため可能性は低い。

5. 参考文献

- [1] 住友化学科学株式会社ホームページ, http://www.sumitomo-chem.co.jp/acryl/03tech/b3_gas.html.
- [2] 桜シール株式会社ホームページ, <http://www.sakura-seal.co.jp/category/1981184.html>.
- [3] 株式会社パッキンランドホームページ, <https://www.packing.co.jp/GOMU/kitaitoukasei1.htm>.
- [4] 柳生 昭三 他, “水素の爆発危険性についての研究 (第1報) —水素の爆発限界に及ぼす圧力の影響—”, 産業安全研究所研究報告 RIIS-RR-18-1, 1969.
- [5] 佐藤 保和 他, “安全に関わる水素の性質、安全工学”, vol.44 No.6 (2005) 378.

⑧「臨界発生（ガス及び熱）」

1. 確認・調査事項

貯蔵容器に収納されている核燃料物質により臨界が生じ、ガスや熱が発生する可能性を調査する。

2. 確認調査方法・内容

貯蔵容器に収納されている核燃料物質の質量を調査し、臨界に係る制限値以下であることを確認する。

3. 確認・調査結果

貯蔵容器に収納されている核燃料物質の質量を計量管理の帳簿等により調査した。その結果、以下に示す重量の核分裂性物質（Pu 及び U-235）が収納されていることがわかった。

Pu : ■ g

U-235 : ■ g

合計 : ■ g

※いずれも元素重量

4. 評価結果

収納されている核燃料物質重量は、湿式条件での Pu-239 の最小臨界質量 510 g に安全係数を見込んだ推奨制限値 220 g [1] より大幅に小さい質量であったことから、臨界発生の可能性はない。

5. 参考文献

[1] Nuclear Safety Guide, TID-7016 Rev. 1, 1961.

核物質防護上の観点から ■ の箇所は非開示としています。

⑨ 「崩壊熱」

1. 確認・調査事項

貯蔵期間（平成 8 年 10 月～平成 29 年 6 月）中に、貯蔵容器内に存在する核燃料物質試料の崩壊熱による発熱量と貯蔵容器内の温度分布を計算により導出し、貯蔵容器内の温度上昇の有無による内圧上昇への影響を評価する。

2. 確認調査方法・内容

計量管理帳簿から得た貯蔵容器内の核燃料物質の組成を用いて崩壊熱を計算する。この崩壊熱を発熱源として、円筒座標系の二次元定常数値解析により、貯蔵容器内の温度分布及び平均温度を計算する。

3. 確認・調査結果

① 「 α 崩壊による He ガス」における評価と同様に、 \blacksquare g の U と \blacksquare g の Pu の混合試料について、 α 崩壊が最も多くなる組成（A 組成）で ORIGEN2 コードにより崩壊熱を計算した結果、約 0.48 W となった。そこで崩壊熱を 0.5 W とし、図⑨-1 に示した貯蔵容器内の構造を模擬（貯蔵容器内寸法： ϕ 130 mm \times 302 mm、ポリ容器外寸法： ϕ 94 mm \times 230 mm）した円筒座標系における温度分布の二次元定常数値解析を実施した。伝熱メカニズムとしては、より断熱性が高く温度上昇が大きい保守的な条件として、対流や輻射による伝熱は考慮せず熱伝導のみとし、貯蔵容器（ステンレス鋼：16.0 W/(m \cdot K)）及びポリ容器（ポリエチレン：0.34 W/(m \cdot K)）の熱伝導率を考慮した[1]。発熱源に関しては、実際は大半がエポキシ樹脂に固定されポリ容器内に分散しているものと想定されるが、断熱性が高く保守的な評価結果を与える条件として、発熱源を ϕ 10 mm \times 10 mm とし r 軸方向の中心に配置し、かつ発熱源の周りを空気で囲むこととした。数値解析は、r - z 軸における 1 mm \times 1 mm のメッシュに対して、以下の定常熱伝導方程式[2]を離散化した式により実施し、初期温度として 40 °C (313 K) を設定した。

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \left(\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + S_c = 0 \quad (\text{⑨-1})$$

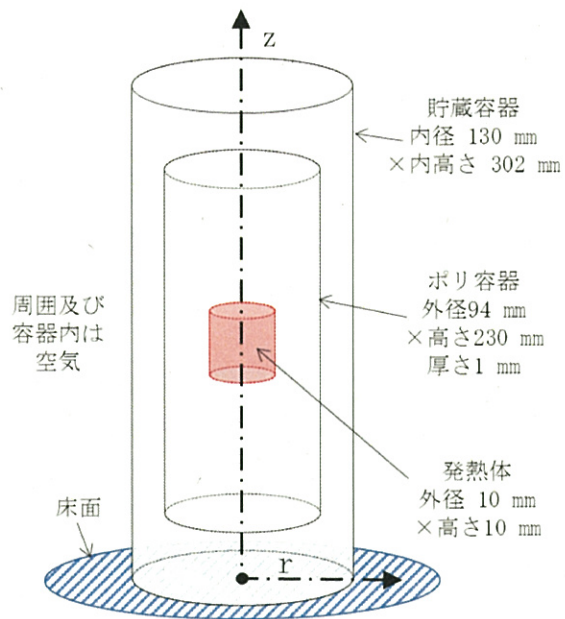
ここで r: 半径[m]、 S_c : 単位体積当たりの発熱量[W/m³]、T: 温度[K]、z: 高さ[m]、 λ : 熱伝導率[W/(m K)]である。

温度分布を解析した結果、発熱体中心温度が最も高く、発熱体から離れるに従い温度は指数関数的に低下することが分かった。この時の貯蔵容器内部の平均温度は 41.7 °C (温度上昇 1.7 °C) であり、内圧の増加は 0.6 %となることから、崩壊熱による内圧上昇への影響はほとんどない。

4. 評価結果

α 線発生量が最も多くなる Pu 組成を用いた条件における崩壊熱約 0.5 W での貯蔵容器内温度上昇は最大で 2 °C 以下である。この温度上昇による内圧の増加は 1 % 以下であり、崩壊熱による内圧上昇への影響はほとんどない。

核物質防護上の観点から \blacksquare の箇所は非開示としています。



図⑨-1 二次元定常数値解析のモデル（図中の配置は最も温度が高くなる条件）

5. 参考文献

- [1] 日本機械学会編，“伝熱工学資料 改訂第5版”，日本機械学会，2009.
- [2] スハスV. パタンカー著，“コンピュータによる熱移動と流れの数値解析”，森北出版株式会社，1985.

⑩ 「夏期の高温」

1. 確認・調査事項

夏期の室内温度上昇による内圧上昇への影響を調査する。

2. 確認調査方法・内容

貯蔵容器への収納時期、夏期の温度を想定して、温度上昇による内圧上昇への影響を評価する。

3. 確認・調査結果

作業記録の調査結果等によると、核燃料物質の貯蔵容器への封入は夏に実施された。このため夏期の温度上昇はほとんどなく、内圧上昇もほとんどないと考えられる。

4. 評価結果

夏場の温度上昇が内圧上昇へ及ぼす影響はほとんどなく、影響は無視できると考えられる。

⑪「不適切な溶着」

1. 確認・調査事項

1.1 現物の破損箇所（溶着性）

2. 確認調査方法・内容

2.1 現物の破損箇所（溶着性）

(1) 現地調査

貯蔵容器内部の観察において、樹脂製の袋の溶着部の不良について調査した。

3. 確認・調査結果

(1) 現地調査

当該樹脂製の袋の観察において、溶着部に不良箇所は観察されなかった。

4. 評価結果

事象発生時の当該樹脂製の袋の観察結果からは、溶着部の不良箇所は観察されなかった。これより、不適切な溶着に起因する影響については考えなくて良いと判断した。

⑫「封入時の傷等」

1. 確認・調査事項

1.1 現物確認による傷等の有無

2. 確認調査方法・内容

2.1 現物確認による傷等の有無

(1) 現地調査

貯蔵容器内部の観察において、樹脂製の袋の傷等の有無を確認した。

3. 確認・調査結果

(1) 現地調査

当該樹脂製の袋の観察において、袋に傷等は観察されなかった。

4. 評価結果

事象発生時の当該樹脂製の袋の観察結果からは、袋に傷等は観察されなかった。これより、封入時の傷等に起因する影響については考えなくて良いと判断した。

⑬ 「樹脂製の袋の α 線による劣化」

1. 確認・調査事項

1.1 樹脂製の袋の α 線照射による劣化度合い

2. 確認調査方法・内容

2.1 樹脂製の袋の α 線照射による劣化度合い

(1) 現地調査

貯蔵容器内部の観察において、事象発生時の当該ポリ容器の健全性を確認する。

3. 確認・調査結果

3.1 樹脂製の袋の α 線照射による劣化度合い

(1) 現地調査

樹脂製の袋が α 線によって劣化するには、 α 線を遮蔽しているポリ容器に収納された核燃料物質がポリ容器外に漏出する必要がある。貯蔵容器内部の観察において、ポリ容器の底部付近での著しい変色及び頂部付近での変色が認められたものの、ポリ容器の破損は認められなかった。

4. 評価結果

貯蔵容器内部の観察において、ポリ容器の底部付近での著しい変色及び頂部付近での変色が認められているが、破損は確認されていない。すなわち、核燃料物質はポリ容器内に留まっていたと考えられ、 α 線による樹脂製の袋の劣化への影響はないと判断できる。

⑭ 「樹脂製の袋の γ 線による劣化」

1. 確認・調査事項

1.1 樹脂製の袋の γ 線照射試験による劣化度合い評価

(1) γ 線照射後の引張試験による劣化度合い評価

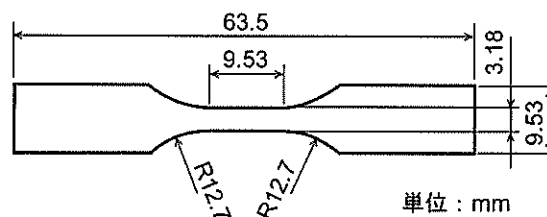
2. 確認調査方法・内容

2.1 樹脂製の袋の γ 線照射試験による劣化度合い評価

(1) γ 線照射後の引張試験による劣化度合い評価

1) 試料準備

樹脂製の袋（長さ 3 m×直径約 30 cm ϕ 、厚さ 0.3 mm）を長さ 20 cm に切断後、切断片から試験片打ち抜き治具を用いて引張試験用試験片を 20 枚作成した。また、追加試験用として、樹脂製の袋（長さ 2.4 m×直径約 54 cm ϕ 、厚さ 0.3 mm、）を長さ 20 cm に切断後、切断片から試験片打ち抜き治具を用いて引張試験用試験片 42 枚を打ち抜き、このうち 15 枚を試験に用いた。試験片は ASTM D1822 L タイプであり、寸法は図⑭-1 に示すものである。



図⑭-1 ASTM D1822 L タイプの引張試験片の寸法図

引張試験片 10 枚を用い、量研 高崎研の食品照射棟第 2 セルにて、6 kGy/h で 60 時間照射することにより、樹脂製の袋の吸収線量評価結果に基づく 26 年間の積算照射線量に相当する照射線量 360 kGy の照射を行った。また、追加試験として、引張試験片 10 枚を用い、6 kGy/h で 20 時間及び 40 時間照射することにより、21 年間の樹脂製の袋への積算照射線量に相当する照射線量 240 kGy（一重目に相当）及び 120 kGy（二重目に相当）の照射を引張試験片 5 枚ずつについてそれぞれ行った。両試験とも、室温で試験片は一方のつかみ部をクリップに留め、水平に渡した針金に吊るすようにして照射した。照射終了後、外観観察を行った。

2) 引張試験

量研 高崎研の引張試験装置（東洋精機製 STPOGRAGH VB50）を用い、非照射の試料と上記の照射を行った試料の引張試験を行った。5 つの試料に対して観察及び測定を行い、その平均値を測定結果とした。試験は室温にて行った。

なお、試験前にゲージ部両端にペンにて距離 10 mm の標点を描いて、目視にて破断直前の標点間距離を測定して破断時標点間距離とした。

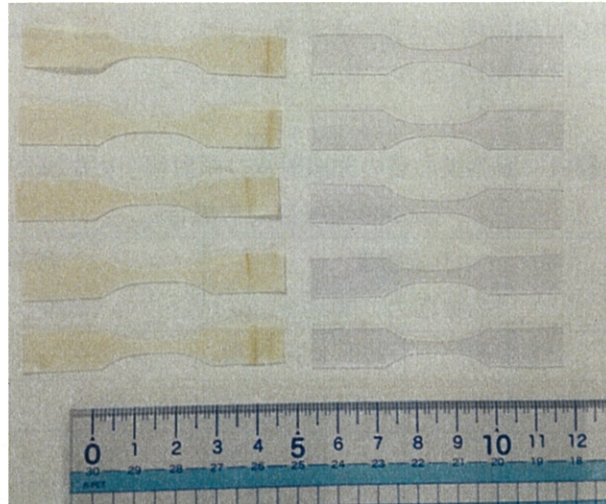
3. 照射線量確認・調査結果

3.1 樹脂製の袋の γ 線照射試験による劣化度合い評価

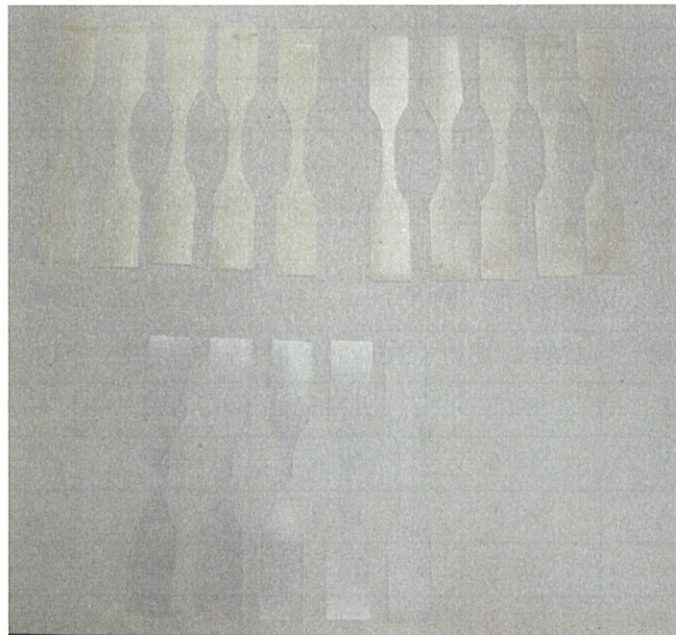
(1) γ 線照射後の引張試験による劣化度合い評価

1) 外観観察結果

照射終了後の引張試験片を非照射の試験片と比較して外観観察を行った。図⑭-2に非照射と照射後の引張試験片の外観観察結果を示す。照射した試験片は茶色く変色が見られ、高照射線量ほど変色の度合いが大きかったが、もろくなるなどの劣化が認められなかった。



(a) 360 kGy 照射した試料（左側の 5 個）及び非照射の試料（右側の 5 個）



(b) 240 kGy 照射した試料（左上側の 5 個）、120 kGy 照射した試料（右上側の 5 個）
及び非照射の試料（下の 5 個）

図⑭-2 非照射と照射後の引張試験片の外観観察結果

2) 引張試験結果

表⑭-1 に非照射及び照射後の引張試験結果を、引張試験前の樹脂製の袋の厚さ 0.3 mm、ゲ

一ジ部の幅 3.18 mm、標点間距離 10 mm から求めた引張強度（公称応力）と破断伸び（公称ひずみ）に換算して示す。図④-3 に公称の引張強度及び公称の破断伸びの照射線量依存性を示す。樹脂製の袋の引張強度及び破断伸びは、照射線量が増加するにしたがってほぼ比例して低下している。360 kGy の γ 線照射により、樹脂製の袋の引張強度は公称応力値として 19.8 MPa から 13.1 MPa に約 34 % 低下した。また、破断伸びは破断時の公称ひずみ値として 338 % から 232 % に約 31 % 低下した。120 kGy の γ 線照射により、樹脂製の袋の引張強度は非照射に比べて公称応力値として 23.8 MPa から 20.2 MPa に約 15 % 低下し、240 kGy では 17.8 MPa に約 25 % 低下した。また破断伸びは破断時の公称ひずみ値として、120 kGy では 340 % から 308 % に約 9 % 低下し、240 kGy では 270 % となり、約 21 % 低下した。

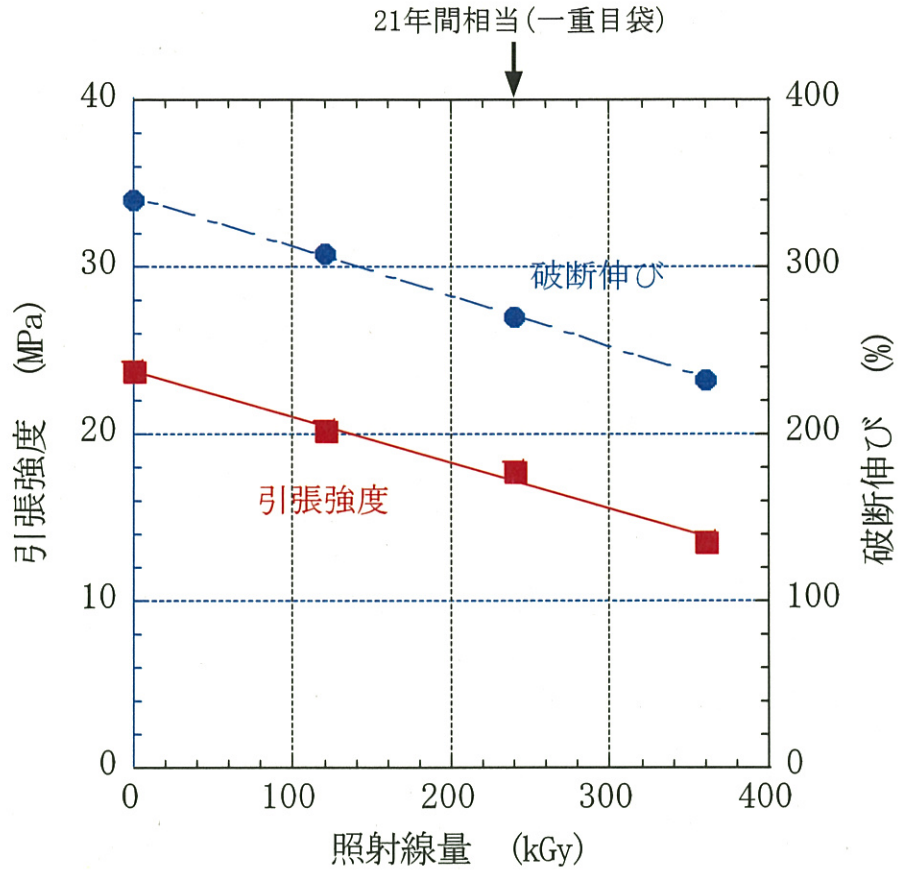
表④-1 樹脂製の袋の非照射及び照射後引張試験結果

(a) 360 kGy 照射の場合

	引張強度 (公称応力、MPa)		破断伸び (公称ひずみ、%)	
	非照射	360 kGy 照射	非照射	360 kGy 照射
No. 1	20.6	13.1	350	220
No. 2	19.3	13.2	350	230
No. 3	19.2	12.9	330	230
No. 4	19.4	12.4	320	240
No. 5	20.5	14.0	340	240
平均	19.8	13.1	338	232

(b) 120 kGy 及び 240 kGy 照射の場合

	引張強度 (公称応力、MPa)			破断伸び (公称ひずみ、%)		
	非照射	120 kGy 照射	240 kGy 照射	非照射	120 kGy 照射	240 kGy 照射
No. 1	25.1	20.5	17.9	330	310	280
No. 2	22.5	19.9	18.4	350	310	270
No. 3	23.8	20.5	17.3	350	300	270
No. 4	23.4	19.5	17.2	340	310	260
No. 5	23.9	20.5	18.3	330	310	270
平均	23.8	20.2	17.8	340	308	270



図⑭-3 樹脂製の袋の引張強度及び破断伸びの照射線量依存性

4. 評価結果

4.1 樹脂製の袋の γ 線照射試験による劣化度合い評価

(1) γ 線照射後の引張試験による劣化度合い評価

360 kGy の γ 線照射により、樹脂製の袋の引張強度は公称応力値として 19.8 MPa から 13.1 MPa に約 34 % 低下し、引張延性は破断時の公称ひずみ値として 338 % から 232 % に約 31 % 低下した。120 kGy の γ 線照射により、樹脂製の袋の引張強度は非照射に比べて約 15 % 低下し、240 kGy では約 25 % 低下した。また破断伸びは 120 kGy の γ 線照射では非照射に比べて約 9 % 低下し、240 kGy では約 21 % 低下した。

⑮ 「樹脂製の袋のβ線による劣化」

1. 確認・調査事項

樹脂製の袋のβ線照射による劣化度合い

2. 確認調査方法・内容

2.1 現物確認

現物の樹脂製の袋の健全性の確認

2.2 評価・文献

樹脂製の袋について、β線による劣化に関する検討を行った。

3. 確認・調査結果

3.1 調査

Pu-241 は、14.4 年の半減期でβ崩壊し Am-241 に壊変する。このβ崩壊に伴い放出されるβ線による樹脂製の袋の劣化の影響について評価する。

β線の最大飛程 R (g/cm²) と最大エネルギー E_{max} (MeV) の間の関係は、Feather の式で表される；

$$\cdot R = 0.542 \times E_{\max} - 0.133 \quad \text{ただし、} 0.8 \text{MeV} < E_{\max}$$

$$\cdot R = 0.407 \times E_{\max}^{1.38} \quad \text{ただし、} 0.15 \text{MeV} < E_{\max} < 0.8 \text{MeV}$$

上記関係式の適用下限である 0.15 MeV のβ線では、R は 0.030 g/cm² (=0.407 × 0.15^{1.38}) であり、密度 1 g/cm³ の物体の場合には 0.03 cm (=0.03/1) 以上の厚さがあればβ線は透過できない。

Pu-241 のβ崩壊によって放出されるβ線の E_{max} は 0.0208 MeV で、上記関係式の適用範囲外であるものの、前出の 0.15 MeV のβ線より最大飛程は短くなる。

ポリ容器の密度は 0.92~0.95 g/cm³ 程度、上部/底部及び側面の肉厚は 0.1 cm であり、0.15 MeV のβ線における最大飛程から考えても、Pu-241 がポリ容器内にある場合には、そのβ崩壊によって放出されるβ線はポリ容器を透過できず、当該β線による樹脂製の袋の劣化への影響はないと判断できる。

4. 評価結果

現地調査（ポリ容器の外観目視検査等）により、ポリ容器には底部付近の変色や胴体部分の脆化があったが、破損はなかったことを確認した。すなわち、Pu-241 を含む核燃料物質はポリ容器内に留まっており、Pu-241 のβ崩壊に伴い放出されるβ線による樹脂製の袋の劣化への影響はないと判断できる。

⑩ 「樹脂製の袋の熱劣化」

1. 確認・調査事項

- 1.1 樹脂製の袋の熱による劣化度合い
- 1.2 樹脂製の袋の熱解析結果と過去の基準値との比較

2. 確認調査方法・内容

2.1 樹脂製の袋の熱による劣化度合い

(1) 聞き取り調査

聞き取り調査の報告書から熱劣化に関する情報収集を行った。

(2) 評価・文献

樹脂製の袋の原材料である PVC の熱劣化に関する文献調査を行った。

2.2 樹脂製の袋の熱解析結果と過去の基準値との比較

(1) 評価・文献

温度上昇の要因として考えられる基本事象 (⑤～⑩) の評価結果を参考に評価した。

3. 確認・調査結果

3.1 PVC の熱による劣化度合い

(1) 聞き取り調査

事象発生時の貯蔵容器について、当該容器に触れたところ、温度上昇はなかったとの証言があった。

(2) 評価・文献

PVC の劣化に与える熱の影響は過去の評価試験 [1] により以下のとおり報告されている。

- ・劣化の原因は PVC に添加されている可塑剤の飛散及び PVC の分解であると考えられる。
- ・可塑剤の飛散により PVC の重量減少が 17 % になる、あるいは PVC の分解により吸光度が 0.25 になると伸びが半減する。
- ・伸びが半減するまでの時間を寿命と定義すると、空気中での PVC の寿命は表⑩-1 のとおりである。

表⑩-1 空気中での PVC の寿命

温度 [°C]	寿命 [h]
120	30
105	120
100	200
90	310
80	1,200

また、表⑩-1 に示す温度と PVC の寿命の関係から、室温付近の温度 (30 °C、25 °C、20 °C) における寿命の評価が外挿によって可能と仮定すると、30 °C で約 320,000 h (約 37 年)、25 °C で約 640,000 h (約 73 年)、20 °C で約 1,280,000 h (約 146 年) と見積もられる。

3.2 樹脂製の袋の熱解析結果と過去の基準値との比較

(1) 評価・文献

温度上昇の要因として考えられる基本事象 (⑤～⑩) の評価結果を考慮したが、いずれも貯蔵期間中に有意な劣化をもたらすほどの温度上昇はないと考えられる。

4. 評価結果

文献調査結果を基に室温付近での劣化の影響を評価し、PVC の寿命と定義した伸びが半減するまでの時間は貯蔵期間に比べて長いと判断した。また、温度上昇の要因として考えられる事象では有意な温度上昇はなく、熱劣化は放射線劣化の影響よりも小さい。さらに作業者の聞き取り結果から貯蔵容器表面の温度上昇もなかったことから、本項目の寄与度合いは小さいと考えられる。

5. 参考文献

[1] ビニルバッグ検討委員会, “ビニルバッグ検討委員会報告書”, PNC-ZN5410-88-003, 1988

⑰「樹脂製の袋の経年劣化」

1. 確認・調査事項

1.1 樹脂製の袋の経年による劣化度合い

2. 確認調査方法・内容

2.1 樹脂製の袋の経年による劣化度合い

(1) 聞き取り調査

聞き取り調査の報告書から経年劣化に関する情報収集を行った。

(2) 評価・文献

経年劣化に関する文献調査及び製造メーカーへの聞き取り調査を行った。

3. 確認・調査結果

3.1 樹脂製の袋の経年による劣化度合い

(1) 聞き取り調査

経年劣化の度合いに関する証言は得られなかった。

(2) 評価・文献

樹脂製の袋の経年劣化による影響については東海再処理センターにおいて実施された未使用の樹脂製の袋及び照度の小さな倉庫にそれぞれ8年、30年保管された樹脂製の袋を用いた引張試験及び外観観察の結果[1]より以下のとおり報告されている。

- ・樹脂製の袋の破断時伸びは保管期間の増加に伴い増加する傾向が見られる（8年保管で11.4%増加、30年保管で15.7%増加）。
- ・樹脂製の袋の破断時強度は保管期間が増加しても大きな低下は見られない。
- ・30年保管した樹脂製の袋は若干黄色に変色しており、表面に孔食状の丸い凹みが見られる。

また、製造メーカーへの聞き取り調査の結果、経年劣化は主に紫外線の影響によることが分かった。

4. 評価結果

文献調査の結果、30年間の保管による樹脂製の袋の破断時強度及び伸びはほとんど低下しないことが分かった。また、製造メーカー聞き取り調査から経年劣化は主に紫外線の影響によるものであるが、貯蔵期間中は貯蔵容器により遮光されていたことから本項目に起因する影響については考えなくて良いと判断した。

5. 参考文献

- [1] 独立行政法人日本原子力研究開発機構，“「JNFL再処理工場」に関わる委託業務報告書(グローブ及びビニルバックの放射線劣化評価試験)”，契約番号24J105，2013。

⑱ 「当時の樹脂製の袋の品質」

1. 確認・調査事項

1.1 数十年前の樹脂製の袋の品質調査（強度等）

2. 確認調査方法・内容

2.1 数十年前の樹脂製の袋の品質調査（強度等）

(1) 評価・文献

製造メーカーへの聞き取り調査を行った。

3. 確認・調査結果

3.1 数十年前の樹脂製の袋の品質調査（強度等）

(1) 評価・文献

製造メーカー聞き取りの結果、樹脂製の袋の原材料は平成 2 年頃から変更されていないことを確認した。

4. 評価結果

製造メーカーへの聞き取り調査により、購入当時より原材料等の変更がないことを確認した。品質に変更がないことから本項目に起因する影響については考えなくて良いと判断した。

⑱ 「ポリ容器放射線劣化」

1. 確認・調査事項

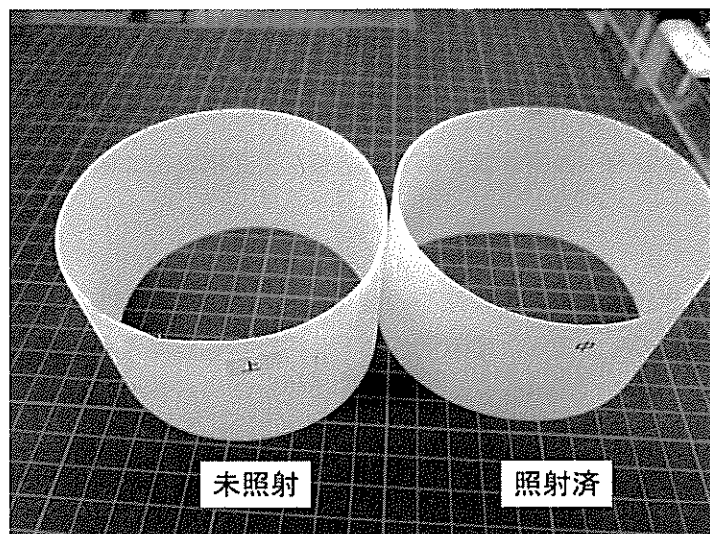
ポリ容器の γ 線照射試験による劣化度合い評価

2. 確認調査方法・内容

ポリ容器の胴部を高さ約 4 cm の輪切りに切断した後、量研 高崎研の食品照射棟第 2 セルにて、6 kGy/h で約 60 時間照射し、26 年間の積算照射線量に相当する照射量 360 kGy の照射を行い、照射終了後、外観観察を行い、劣化度合いを確認する。

3. 確認・調査結果

照射終了後の輪切りに切断したポリ容器を非照射のものと比較して外観観察を行った。図⑱-1 に非照射と照射後の試料の外観観察結果を示す。照射した試料は若干の黄色化がみられたが、柔軟性もほとんど変化はなく、もろくなるなどの劣化は認められなかった。



図⑱-1 非照射と照射後のポリ容器の外観観察結果

4. 評価結果

360 kGy の γ 線照射により、ポリ容器は非照射に比べて若干の変色はあったものの、柔軟性はほとんど変化なく、もろくなるような劣化は認められなかった。また、現地調査の結果、ポリ容器に実際に触れた感触からはポリ容器の脆化の傾向が認められたが、破損はしていなかったことから、本項目に起因する影響については考えなくて良いと判断した。

⑳ 「ポリ容器内突起物混入による損傷」

1. 確認・調査事項

ポリ容器内への突起物混入有無

2. 確認調査方法・内容

2.1 ポリ容器内への突起物混入有無

(1) 聞き取り調査

貯蔵容器への収納時におけるポリ容器内への突起物の混入有無について、収納当時の作業者への聞き取り調査等を行う。

(2) 現地調査

貯蔵容器内部の観察において、ポリ容器や樹脂製の袋及びその内部を観察し、突起物の混入有無を確認する。(1)、(2)から突起物がポリ容器外に出て樹脂製の袋を破損した可能性を総合的に評価する。

3. 確認・調査結果

(1) 聞き取り調査

収納当時の作業者等への聞き取り調査の結果、突起物収納に係る有用な情報はなかった。

(2) 現地調査

事象発生時の当該ポリ容器や樹脂製の袋及びその内部を観察した結果、ポリ容器に破損はなく、また、樹脂製の袋の破損に起因するような突起物等の混入もないことを確認した。

4. 評価結果

聞き取り調査からは突起物収納に係る有用な情報はなかった。現地調査の結果、ポリ容器に破損はなく、また、樹脂製の袋の破損に起因するような突起物等の混入がないことを確認した。これより、ポリ容器内の突起物混入に起因する影響については考えなくて良いと判断した。

②「貯蔵容器開封時の傷等」

1. 確認・調査事項

1.1 現地調査による開封時の傷付与の有無

2. 確認調査方法・内容

2.1 現地調査による貯蔵容器開封時の傷付与の有無

(1) 聞き取り調査

聞き取り調査の報告書から開封時の傷付与等の有無について情報収集をする。

(2) 現地調査

貯蔵容器内部の観察において、当該樹脂製の袋開封時の傷付与や貯蔵容器内側の傷の有無等について確認する。

3. 確認・調査結果

3.1 現地調査による開封時の傷付与の有無

(1) 聞き取り調査

傷付与に関する証言は得られなかった。

(2) 現地調査

事象発生時の当該樹脂製の袋の観察を行った結果、開封時に付与したと考えられる傷や貯蔵容器内側の傷等は認められなかった。

4. 評価結果

聞き取り調査から傷付与に関する証言は得られなかった。当該樹脂製の袋や貯蔵容器内側の観察を行った結果、開封時に付与したと考えられる傷がなかったこと、貯蔵容器内側には傷がなかったこと及びボルトを外した瞬間に樹脂製の袋が破裂したという状況から、貯蔵容器開封時の傷等に起因する影響については考えなくて良いと判断した。

γ線照射による樹脂製の袋の吸収線量評価

1. 確認・調査事項

貯蔵期間（平成8年10月～平成29年6月）中における貯蔵容器内に存在する核燃料物質（Pu及びその崩壊により生成するUとAmを含む。）の崩壊で放出されるγ線による樹脂製の袋の劣化を検討するために、樹脂製の袋の吸収線量を評価する。

2. 確認調査方法・内容

公表されているポリ容器、樹脂製の袋（2層）、貯蔵容器の形状、寸法及び材質に基づき、図7.1.2-1に示す計算体系を設定した。2層の樹脂製の袋は、内側はポリ容器の外面に、外側は貯蔵容器の内面に密着しているとした。

平成3年10月の時点で表7.1.2-1の組成の核燃料物質（Pu及びその崩壊により生成するUとAmを含む。）の混合物が、ポリ容器下部に充填されていたとし、その崩壊で放出されるγ線の挙動を粒子・重イオン輸送計算コードPHITS[1]を用いてシミュレーションし樹脂製の袋の吸収線量を計算した。γ線のエネルギー分布は、表7.1.2-1の組成に基づきDECDC2[2]のデータを用いて求め、崩壊による核燃料物質（Pu及びその崩壊により生成するUとAm含む。）組成の時間変化に伴うγ線のエネルギー分布の変化も考慮した。

3. 確認・調査結果

図7.1.2-2に、平成3年10月を起点とし、内側と外側の樹脂製の袋における吸収線量率の経過年数に対する変化を示す。線源となる核燃料物質（Pu及びその崩壊により生成するUとAmを含む。）の混合物により近い内側の樹脂製の袋が外側に比べて、より高い吸収線量率になる。平成8年7月に貯蔵容器の点検・更新作業が実施され樹脂製の袋が交換された記録を確認したことから、内側と外側、それぞれの吸収線量率の経過年数変化を5年目以降でフィッティングし、その積分から21年間の積算の吸収線量を算出し、内側樹脂製の袋：227 kGy、外側樹脂製の袋：108 kGyとの結果を得た。

4. 評価結果

貯蔵容器の内容物の形状や材質、核燃料物質（Pu及びその崩壊により生成するUとAmを含む。）混合物の組成の経過年数変化を考慮し、γ線による樹脂製の袋の吸収線量を計算シミュレーションにより評価した。得られた吸収線量を再現するγ線の照射実験により、貯蔵期間中の樹脂製の袋の照射劣化を評価することができると考えられる。

5. 参考文献

- [1] Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS, Version 2.52, J. Nucl. Sci. Technol. 50:9, 913-923 (2013)
- [2] Nuclear decay data for dosimetry calculation: Revised data of ICRP Publication 38, JAERI 1347 (2005)

表 7.1.2-1 収納されている可能性のある核燃料物質 (Pu 及びその崩壊により生成する U と Am を含む。) の放射能 (平成 3 年 10 月時点)

核種	放射能 (GBq)	核種	放射能 (GBq)
U-234	■	Pu-238	■
U-235	■	Pu-239	■
U-236	■	Pu-240	■
U-238	■	Pu-241	■
Am-241	■	Pu-242	■

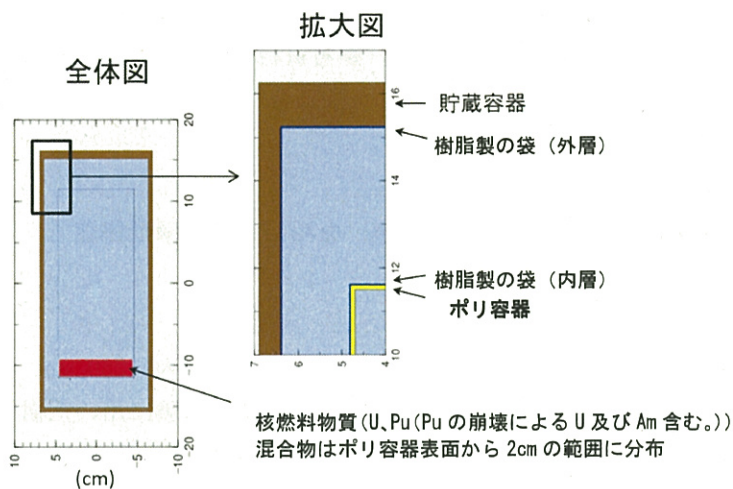


図 7.1.2-1 計算に用いたポリ容器、樹脂製の袋、貯蔵容器の寸法と核燃料物質 (Pu 及びその崩壊により生成する U と Am を含む。) 混合物の配置

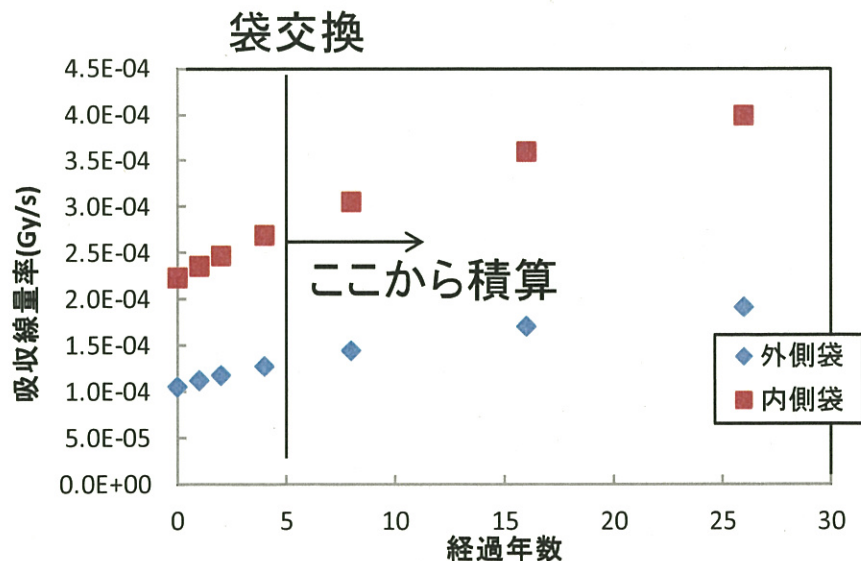


図 7.1.2-2 経過年数に対する吸収線量率の変化

核物質防護上の観点から ■ の箇所は非開示としています。

樹脂製の袋の強度評価

1. 確認・調査事項

1.1 γ 線照射後の樹脂製の袋（二重梱包）を用いた破裂挙動評価

事故後の調査において得られた当該樹脂製の袋に関する寸法等の情報を基に試験体系を設定して樹脂製の袋の破裂試験を実施した。また、量研 高崎研にて試験に用いた一重目及び二重目の樹脂製の袋に対してそれぞれ当該樹脂製の袋が貯蔵容器内で21年間照射された分に相当する γ 線照射を行うことにより、より事象発生時の状態に近い体系での試験を実施した。加えて、未照射の樹脂製の袋を用いた破裂試験についても実施し（後述の「参考資料：樹脂製の袋の強度評価」）、基本的な挙動を中心とした評価も実施した。

2. 確認調査方法・内容

2.1 γ 線照射後の樹脂製の袋（二重梱包）を用いた破裂挙動評価

(1) [検証試験]

1) 試料準備

準備した試験用の金属製容器の寸法（ ϕ 133 mm \times h 250 mm）が実際の貯蔵容器の寸法（入口径 ϕ 120 mm \times h 302 mm）と若干異なることから、試験に用いた樹脂製の袋の縮尺（溶着部の内寸）はこれらの寸法の比と破裂を生じた樹脂製の袋の寸法を比較して以下のとおりとした（図 7.1.3-1）。ここで破裂を生じた樹脂製の袋の寸法は本試験開始時期の関係から初期の調査において推定された寸法（溶着部の内寸、一重目：縦 450 mm \times 横 160 mm、二重目：縦 370 mm \times 横 205 mm）を参照したため、のちに確認した値とは若干異なる。また、試験時に二重梱包の袋をステンレス缶に装荷する際は袋を図 7.1.3-2 のようにした。

- ・一重目の縦：450 mm \times （250 mm / 302 mm） \approx 370 mm
- ・一重目の横：160 mm \times （133 mm / 120 mm） \approx 175 mm
- ・二重目の縦：370 mm \times （250 mm / 302 mm） \approx 310 mm
- ・二重目の横：205 mm \times （133 mm / 122 mm） \approx 230 mm

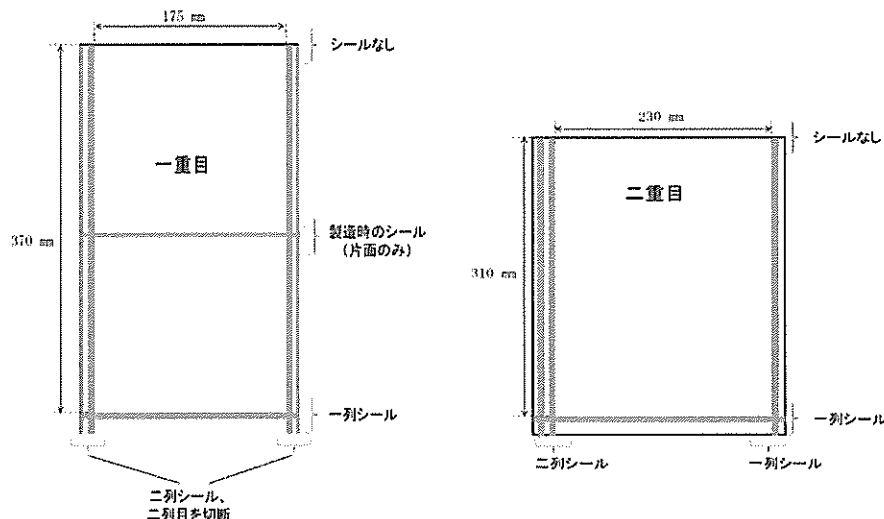


図 7.1.3-1 試験用樹脂製の袋の概略図（左図：一重目、右図：二重目）

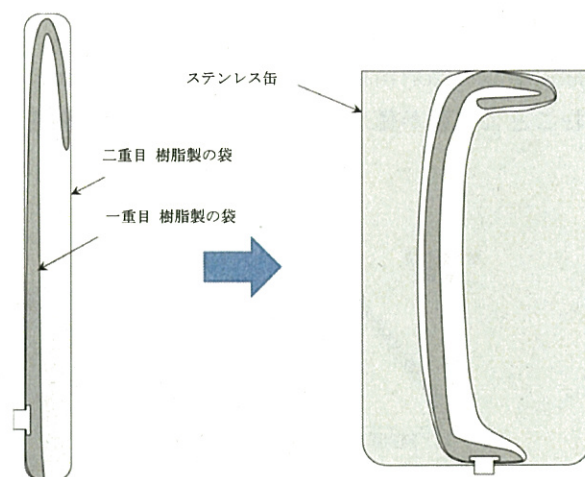


図 7.1.3-2 二重梱包の概略図

本試験で使用した照射済の樹脂製の袋は、上記の寸法で作製した袋を量研 高崎研の食品照射棟 第2セルにて照射した。一重目及び二重目の袋についてそれぞれ 6 kGy/h で 40 時間及び 20 時間の照射とし、一重目は 240 kGy、二重目は 120 kGy とした（それぞれの 21 年間分の照射量に相当）。

2) 破裂試験

① 試験①：二重梱包、蓋なし試験

試験①では二重梱包とした照射済樹脂製の袋をステンレス缶に収納し、蓋がない体系での破裂試験を実施した（図 7.1.3-3）。

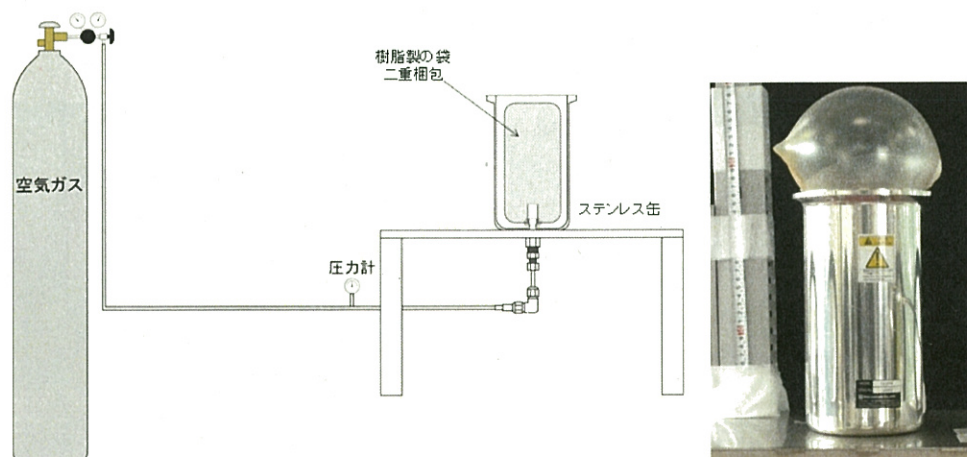


図 7.1.3-3 試験①の概略図と試験時の写真

② 試験②：二重梱包、蓋あり試験（チェーンで蓋を拘束）

試験②では二重梱包とした照射済樹脂製の袋をステンレス缶に収納し、蓋をチェーンで拘束し、樹脂製の袋が膨らむことより蓋が僅かに開く体系での破裂試験を実施した（図 7.1.3-4）。

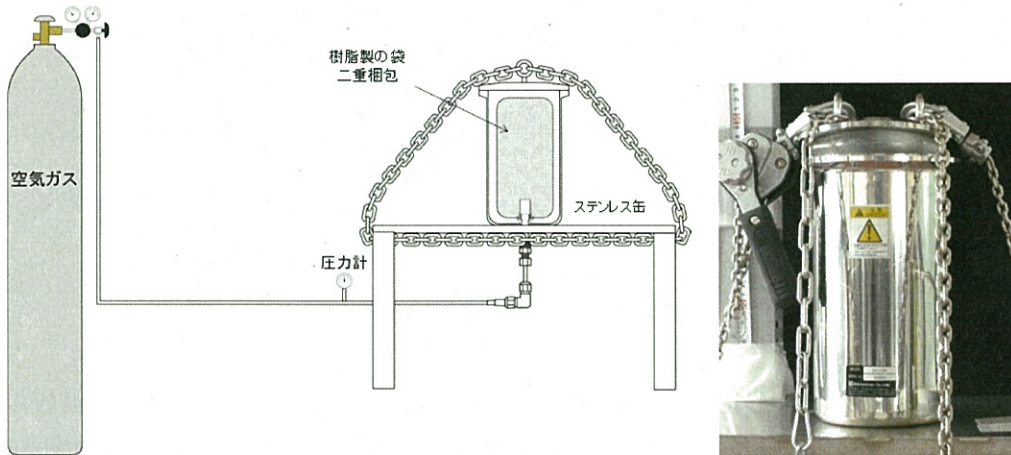


図 7.1.3-4 試験②の概略図と試験時の写真

③ 試験③：二重梱包、蓋あり試験（クランプリングで蓋を拘束）

試験③では二重梱包とした照射済樹脂製の袋をステンレス缶に収納し、蓋をクランプリングで拘束した。樹脂製の袋の膨らみでは蓋は開かず、クランプリング固定用の蝶ねじに取り付けたワイヤーを引っ張ることで、クランプリングが外れ、樹脂製の袋が急激に膨らむことにより蓋が外れる体系での破裂試験とした（図 7.1.3-5）。

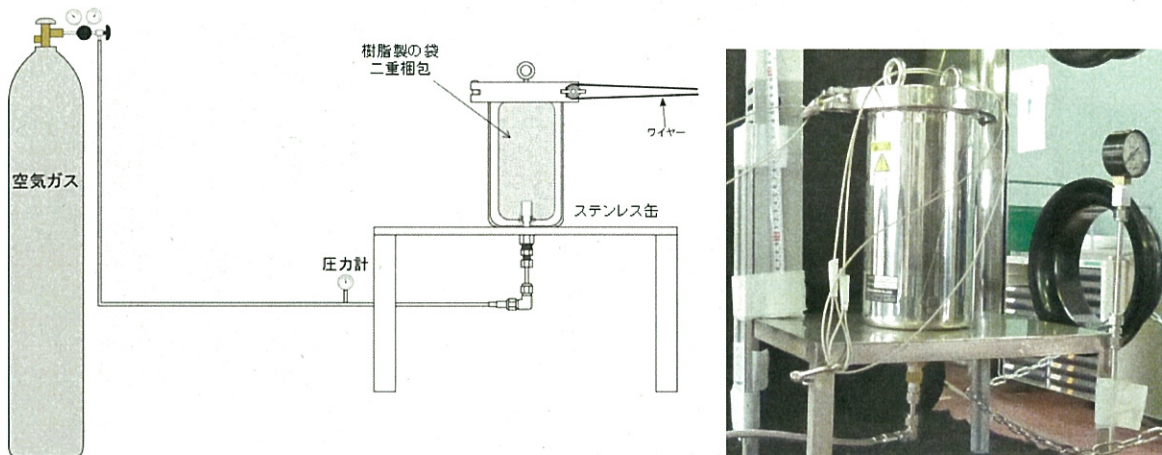


図 7.1.3-5 試験③の概略図と試験時の写真

3. 確認・調査結果

3.1 γ線照射後の樹脂製の袋（二重梱包）を用いた破裂挙動評価

(1) [検証試験]

1) 試験①：二重梱包、蓋なし試験

試験結果を表 7.1.3-1 に示す。

表 7.1.3-1 試験①の結果【二重梱包、蓋なし試験】

試験 No.	試験結果										破損位置
	破裂までの時間 (秒)		破裂時配管内絶対圧 (気圧) ^{※2}		破裂箇所		破裂箇所の形状		破裂箇所の大きさ (mm)		
1	510	290	1.4	1.8	A	A	直線	直線	110	100	
2	300	260	1.5	1.8	A	A	直線	直線	90	120	

※1 破線の左は一重目、右は二重目の結果

※2 測定した圧力は大気圧との差 (圧力計のゲージ圧) であり、ゲージ圧=(絶対圧-1 [気圧])/10 [MPa]である。

本条件では蓋がない上部から樹脂製の袋が大きくはみ出して膨らみ、二重目が破裂、その後、一重目が破裂した (図 7.1.3-6)。二重目、一重目ともに上部の中央部で破裂し、破裂箇所の形状は直線状であった。また、一重目と二重目の破裂により大きな破裂音が 2 回聞こえた。試験 No. 2 の破裂後の写真を図 7.1.3-7 に示す。蓋の拘束が無い条件では二重目、一重目がそれぞれ大気圧 +0.08 MPa (1.8 気圧)、大気圧+0.04~0.05 MPa (1.4~1.5 気圧) で破裂する結果を得た。

二重目が破裂する際は一重目も耐圧に寄与していることから、二重目の破裂する際の圧力が一重目のそれよりも高いと考えられる。これより、蓋の拘束が無い条件では樹脂製の袋の破裂には約 1.5 気圧以上の圧力が必要であると推測される。



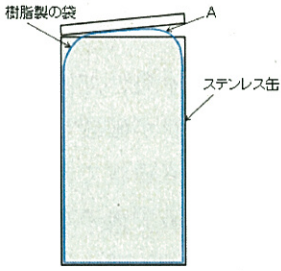
図 7.1.3-6 試験①-No. 2 の破裂直前の写真



図 7.1.3-7 試験①-No. 2 の試験後の写真（左図：二重目、右図：一重目）

- 2) 試験②：二重梱包、蓋あり試験（チェーンで蓋を拘束）
試験結果を表 7.1.3-2 に示す。

表 7.1.3-2 試験②の結果【二重梱包、蓋あり試験（チェーンで蓋を拘束）】

試験 No.	試験結果										破損位置 
	破裂までの時間 (秒)		破裂時配管内絶対圧 (気圧) ^{※2}		破裂箇所		破裂箇所の形状		破裂箇所の大きさ (mm)		
1	981	980	3.6	3.8	A	A	直線	直線	40	100	
2	595	590	2.6	2.8	A	A	直線	直線	32	105	
3	780	780	4.2	4.2	A	A	直線	直線	70	80	

※1 破線の左は一重目、右は二重目の結果

※2 測定した圧力は大気圧との差（圧力計のゲージ圧）であり、ゲージ圧=（絶対圧-1 [気圧]）/10 [MPa]である。

本条件では、二重目が破裂し、その後一重目が破裂するか、同時に破裂する結果となった（図 7.1.3-8）。試験 No. 1 の破裂後の写真を図 7.1.3-9 に示す。本試験では二重目、一重目ともにステンレス缶の蓋の隙間で膨らみが大きくなり、頂部の生地部分で破裂した。破裂箇所の形状は直線状になり、破裂時は一重目、二重目ともに大きな破裂音が聞こえた。二重目の破裂穴と一重目の破裂穴はほぼ重なっており、二重目の破裂穴から一重目が僅かに外に出ていた。本試験での破裂時の圧力は 2.6 気圧（ゲージ圧：0.16 MPa）から 4.2 気圧（ゲージ圧：0.32 MPa）と比較的に高い圧力が必要であること、破裂時の容器と蓋の隙間が小さいと破裂時のゲージ圧は大きくなる傾向があること、破裂時の圧力に大きな幅があることが分かった。

図 7.1.3-10 に試験②-No. 2 の破裂時に観測された煙の写真を示す（写真の右上部）。本試験において破裂時にこのような“煙”が観察されており、試験時の樹脂製の袋の内圧が高い場合には比較的明確に観察され、内圧が低い場合は観察しにくい傾向にあった。また、この煙は約 1 秒以内で拡散し見えなくなった。これは樹脂製の袋内の空気中に含まれる水蒸気が破裂する際の断熱膨張により急激に冷却されて水滴になり、その後、周囲の温度により再度水蒸気に戻り消えるためと考えられる。

上記、本試験における“煙”の発生については、「添付 6.4.7 貯蔵容器の蓋開封時の状況に関する作業員への聞き取り調査概要」の「(4) 破裂後の状況や処置について」において「破裂した時

に『モヤモヤした煙のようなもの』が見えたことに関して、煙草の煙のような白っぽい感じがした。ごく短い間だけパッと飛んで、すぐに拡散して見えなくなった。粉末という感じではなかった。」との証言と一致する。



図 7. 1. 3-8 試験②-No. 3 の破裂直前の写真

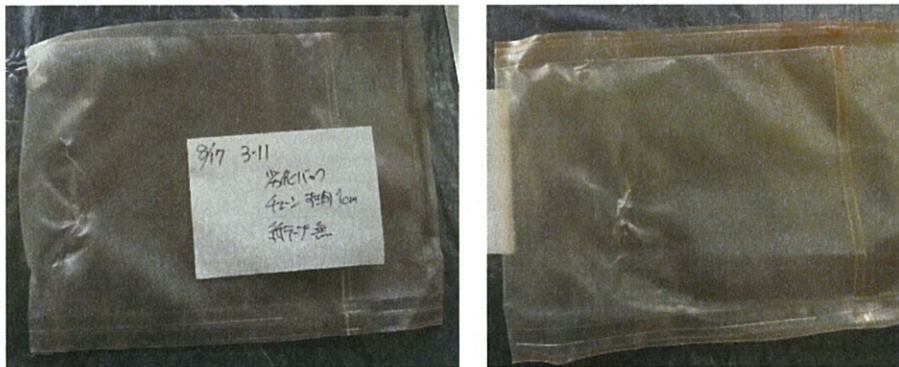


図 7. 1. 3-9 試験②-No. 1 の試験後の写真（左図：二重目，右図：一重目）

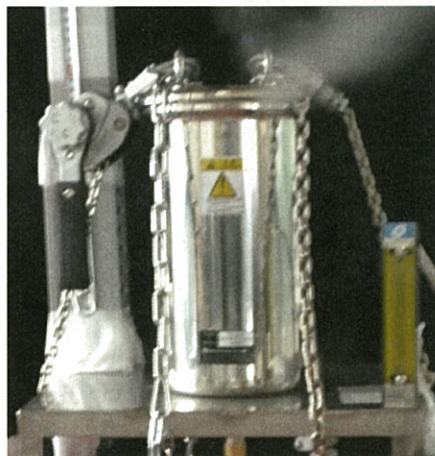


図 7. 1. 3-10 試験②-No. 2 の破裂時に観測された煙の写真

3) 試験③：二重梱包、蓋あり試験（クランプリングで蓋を拘束）

試験結果を表 7.1.3-3 に示す。

表 7.1.3-3 試験③の結果【二重梱包、蓋あり試験（クランプリングで蓋を拘束）】

試験 No.	試験結果										破損位置	
	破裂までの時間 (秒)		破裂時配管内絶対圧 (気圧) ^{※2}		破裂箇所		破裂箇所の形状		破裂箇所の大きさ (mm)		A	B
1	1	0	2.5	2.5	B	A	直線	直線	20	110		
2	無	0	無	2.6	無	A	無	放射	無	90		
3	無	0	無	2.8	無	A	無	放射	無	80		
4	0	0	4.0	4.0	B	A	直線	放射	200	90		
5	0	0	4.0	4.0	B	A	直線	放射	180	80		

※1 破線の左は一重目、右は二重目の結果

※2 測定した圧力は大気圧との差（圧力計のゲージ圧）であり、ゲージ圧=（絶対圧-1 [気圧]）/10 [MPa]である。

本試験ではクランプリング解除後、開放部で樹脂製の袋全体が大きくはみ出して膨らみ、二重目は上部中央付近で破損した。試験 No. 4 及び No. 5 では一重目が二重目とほぼ同時に破裂し、破裂音は1回であった。また、一重目の樹脂製の袋が縦方向の溶着部で大きく裂け、破裂事象発生時の状況と類似した袋の破損状態となったことを確認した。この際の圧力は4気圧（ゲージ圧：0.3 MPa）であった。破裂状況の例として試験 No. 4 の試験後の樹脂製の袋の写真を図 7.1.3-11 に、事象発生時の当該樹脂製の袋の観察結果を図 7.1.3-12 に示す。試験 No. 1 では2.5気圧（ゲージ圧：0.15 MPa）で一重目が溶着部から2 cm 程度の幅で破損し、試験 No. 2 及び No. 3 では2.6、2.8気圧でも破裂しないという結果になった。

上記の結果から、事象発生時の破裂状況に近い模擬試験において、破裂時の圧力としては2.5気圧付近の圧力を超えると破裂事象発生時の状況と類似した事象が発生し始めると推測され、また、4気圧付近では事象発生時の当該樹脂製の袋の破損状態を再現するような状態を確認できた。



図 7.1.3-11 試験③-No. 4 の試験後の写真（左図：二重目、右図：一重目）

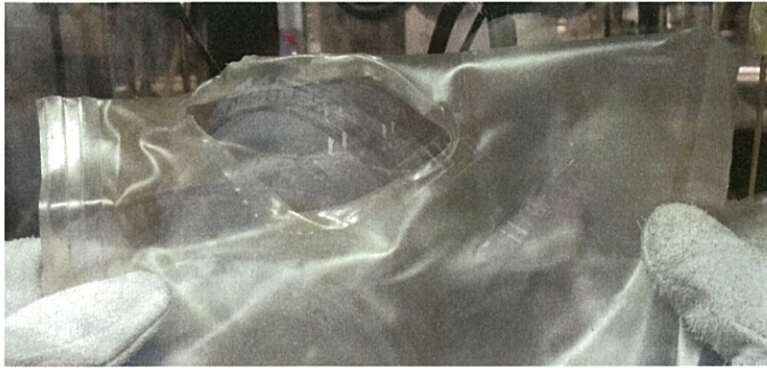


図 7.1.3-12 事象発生時の当該樹脂製の袋の観察結果（左図：二重目，右図：一重目）

4. 評価結果

4.1 γ線照射後の樹脂製の袋（二重）を用いた破裂挙動評価

本試験は、事象発生後の調査結果として、当該樹脂製の袋の寸法が得られたことから、これらの情報（一重目、二重目の当該樹脂製の袋の寸法等）を反映した試験を実施した。

本試験は量研 高崎研にて照射量が一重目は 240 kGy、二重目は 120 kGy（それぞれ、6 kGy/h×40、20 時間）の照射を行った樹脂製の袋を用いて実施した。機械的強度については「添付 7.1.1 ⑭樹脂製の袋のγ線による劣化」において評価されており、照射済樹脂製の袋の引張強さについては、240 kGy 照射された袋（一重目）が約 25 %の低下、120 kGy 照射された袋（二重目）が約 15 %の低下としている。また、破断伸びについては、240 kGy 照射された袋（一重目）が約 21 %の低下、120 kGy 照射された袋（二重目）が約 9 %の低下としている。これらは「添付 7.1.1 ⑭樹脂製の袋のγ線による劣化」に記載されている 360 kGy で照射された樹脂製の袋の引張強さや破断伸びも含めて比較するとそれぞれが照射量にほぼ比例して物性値が低下していることがわかる。

「試験①：二重梱包、蓋なし試験」では、蓋がない上部から樹脂製の袋が大きくはみ出して膨らみ、二重目が破裂、その後 10 秒程度の間において一重目が破裂した。二重目、一重目ともに上部の中央部で破裂し、破裂箇所の形状は直線状であった。また、一重目と二重目の破裂により大きな破裂音が 2 回聞こえた。蓋の拘束が無い条件では二重目、一重目がそれぞれ大気圧+0.08 MPa（1.8 気圧）、大気圧+0.04～0.05 MPa（1.4～1.5 気圧）で破裂する結果を得た。二重目が破裂する際は一重目も耐圧に寄与していることから、二重目の破裂する際の圧力が一重目のそれよりも高いと考えられる。

「試験②：二重梱包、蓋あり試験（チェーンで蓋を拘束）」では、二重目が破裂し、その後一重目が破裂する、もしくは同時に破裂する結果となった。破裂時は二重目、一重目ともにステンレス缶の蓋の隙間で膨らみが大きくなり、頂部の生地部分で破裂した。破裂箇所の形状は直線状になり、一重目と二重目の破裂により大きな破裂音が 2 回聞こえた。破裂時の圧力は 2.6 気圧（ゲージ圧：0.16 MPa）から 4.2 気圧（ゲージ圧：0.32 MPa）と比較的に高い圧力が必要であること、破裂時の容器と蓋の隙間が小さいと破裂時のゲージ圧は大きくなる傾向があること、破裂時の圧力に大きな幅があることが分かった。また、今回の試験において破裂後約 1 秒内において“煙”が観察されており、試験時の樹脂製の袋の内圧が高い場合には比較的明確に観察され、内圧が低い場合は観察しにくい傾向にあった。これは樹脂製の袋内の空気中に含まれる水蒸気が破裂する際の断熱膨張により急激に冷却されて水滴になり、その後、

周囲の温度により再度水蒸気に戻り消えるためと考えられる。

「試験③：二重梱包、蓋あり試験（クランプリングで蓋を拘束）」では、クランプリング解除後、開放部で樹脂製の袋全体が大きくはみ出して膨らみ、二重目は上部中央付近で破裂した。ゲージ圧が比較的高かった試験（絶対圧：4 気圧、ゲージ圧：0.3 MPa）では一重目が二重目とほぼ同時に破裂し、破裂音は一回であった。また、一重目の樹脂製の袋が縦方向の溶着部で大きく裂け、破裂事象発生時の状況と類似した袋の破損状態となったことを確認した。同様な試験結果は絶対圧：2.5 気圧（ゲージ圧：0.15 MPa）でも観察されたが、一重目が溶着部から 2 cm 程度の幅で破損しており、事象発生時に当該樹脂製の袋（一重目）が破損した際の破損部大きさに比べて小さい。また、これよりもゲージ圧が若干高い試験（絶対圧：2.6、2.8 気圧）では一重目の樹脂製の袋が膨らむだけで破裂しないという結果になった。これらより、2.5 気圧付近の圧力を超えると破裂事象発生時の状況と類似した事象が発生し始めると推測され、4 気圧付近では事象発生時に当該樹脂製の袋が破損した状態を再現するような状態を確認できた。

参考資料：樹脂製の袋の強度評価

1. 確認・調査事項

- 1.1 樹脂製の袋の耐圧性能
- 1.2 容器蓋開封時の樹脂製の袋の膨張状況

2. 確認調査方法・内容

2.1 樹脂製の袋の耐圧性能

(1) [評価・文献]

製造メーカーから標準品の強度データを入手した。

(2) [検証試験]

以下に示す要領で未照射の樹脂製の袋を用いて破裂試験を行い、耐圧評価を行った。

一つ目の試験として、シーラで溶着、密封した樹脂製の袋に、空気ガスのガスボンベを接続し、ガス配管には圧力計を接続し、ガスを注入して樹脂製の袋を破裂させる試験を行った。二つ目の試験として、当該破裂事象の写真を参考にその状況を模擬して、同様の樹脂製の袋を、底部に約φ20mmの穴をあけたステンレス缶（ステンレス缶内径が貯蔵容器入口径サイズに近いφ120mm×h220mm又は同内径が貯蔵容器内径サイズに近いφ133mm×h250mm）に収納し、ステンレス缶底部の穴を通して樹脂製の袋にガスを送り込む方法で破裂試験を行った。本試験はステンレス缶の蓋がない状態での試験とした。試験体系図を図7.1.3-参1に示す。

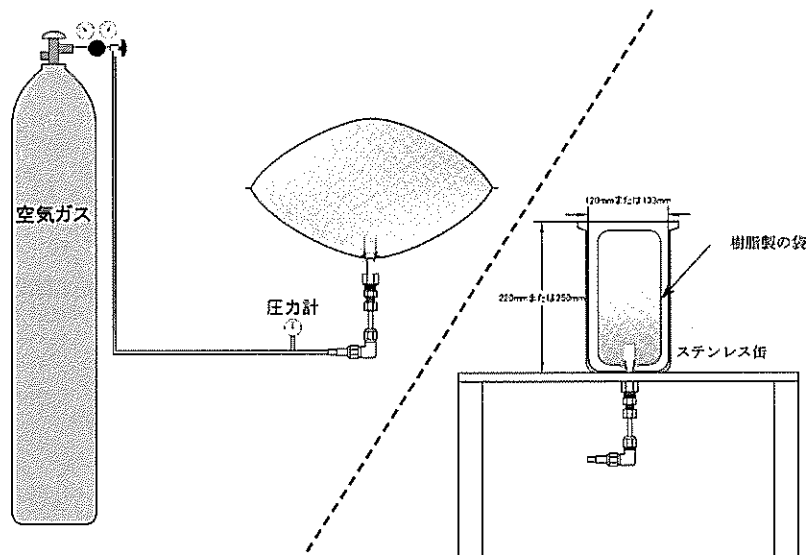


図 7.1.3-参 1 試験体系図

2.2 容器蓋開封時における樹脂製の袋の膨張状況

(1) [聞き取り調査]

聞き取り調査の報告書から容器蓋開封時の状況について情報収集した。

(2) [検証試験]

本試験では、ステンレス缶に蓋を追加し、上部の拘束も考慮した体系において、以下に示す要領で樹脂製の袋の破裂試験を行い、蓋開封時の膨張状況について評価した。

シーラで溶着した樹脂製の袋を、底にφ20 mmの穴をあけたステンレス缶（φ133 mm×h250 mm）に収納した。ステンレス缶の底の穴を通して樹脂製の袋に空気ガスのガスボンベを接続し、ガス配管に圧力計を接続した。聞き取り調査で得られた情報を考慮し、樹脂製の袋の膨らみにより僅かに蓋が空くように、ステンレス缶に蓋を乗せてチェーンで軽く拘束した。ガスを注入して樹脂製の袋が破裂するときの膨張の様子を記録し、破裂箇所の観察を行った。試験体系図を図 7.1.3-参 2 に示す。

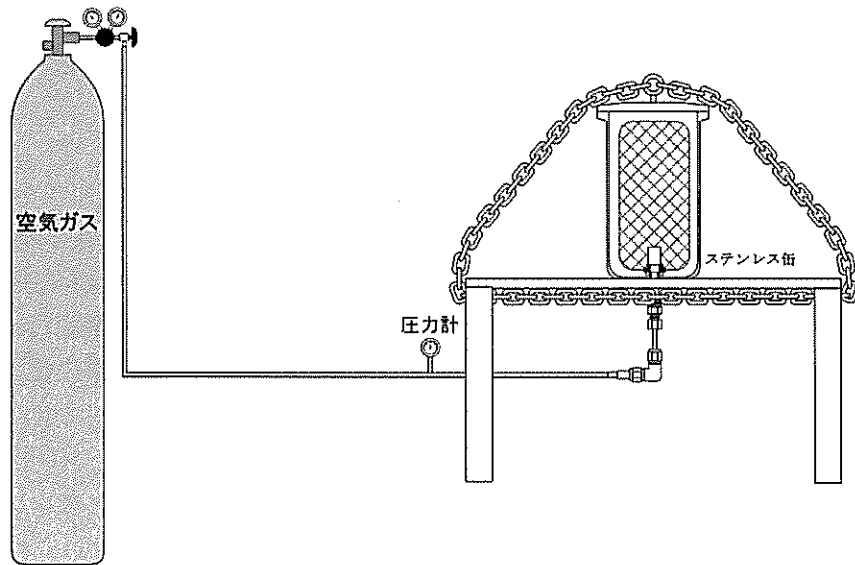


図 7.1.3-参 2 試験体系図

3. 確認・調査結果

3.1 樹脂製の袋の耐圧性能

(1) [評価・文献]

樹脂製の袋の構成素材である「PVC 梨地フィルム C32」の最近の物性仕様は製造メーカーにより表 7.1.3-参 1 のとおり規定されている。

表 7.1.3-参 1 「PVC 梨地フィルム C32」の物性仕様^{*1}

引張強度 [MPa]	14.7 以上
伸び [%]	200 以上

^{*1} JIS K 6732 準拠

また、樹脂製の袋の重ね溶着部及び底溶着部（図 7.1.3-参 3 参照）の強度物性値は製造メーカーにより測定されており、表 7.1.3-参 2 に示すとおりである。

表 7.1.3-参 2 PVC の引張強度*2

	測定結果(平均) [MPa]
重ね溶着部	9.08
底溶着部	6.80

*2 試験片は JIS K 6251 に規定するダンベル状 2 号形

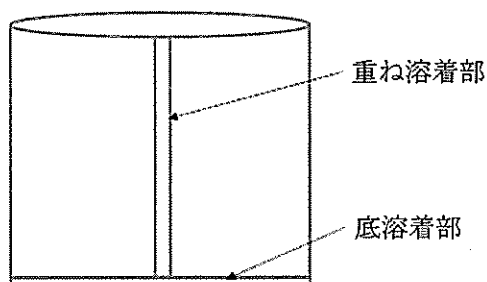


図 7.1.3-参 3 PVC バッグ (樹脂製の袋) 概略図

(2) [検証試験]

樹脂製の袋にガス配管を直接接続した試験では、加える空気圧 (1~6 kgf/cm²) をパラメータにして、試験を実施した。また、ステンレス缶を用いた試験では、サイズの異なる 2 種類のステンレス缶を用い、缶上部からはみ出る樹脂製の袋の寸法 (0~200 mm) 及び内部に加える空気圧 (1~6 kgf/cm²) をパラメータにして、試験を実施した。試験条件と結果の一覧を以下の表 7.1.3-参 3 に示す。また、表中の破裂箇所の詳細について図 7.1.3-参 4 に示す。

表 7.1.3-参 3 破裂試験条件と結果

No	ステンレス缶 寸法 φ×h[mm]	ステンレス 缶からはみ 出るバッグ 長さ[mm]	送入ガス 圧力 ^{*3} [kgf/cm ²]	破裂箇所 ※No.7~31にお いては図7.1.3- 参4のA~E	破裂箇所 の形状	破裂時 配管内 絶対圧 (気圧) ^{*4}	破損部の 大きさ [mm]	破損まで の時間 [秒]
1	なし	-	1.5	溶着部	穴	1.4	5	28
2	なし	-	3	溶着部	穴	1.8	5	10
3	なし	-	6	溶着部	穴	2.4	10	6
4	なし	-	1	溶着部	穴	1.4	2	34
5	なし	-	1	溶着部	穴	1.3	4	21
6	なし	-	1	溶着部	穴	1.3	3	44
7	120×220	20	1	A(生地部)	放射状	1.6	50	19
8	120×220	40	1	C(生地部)	放射状	1.6	50	25
9	120×220	50	1	C(生地部)	放射状	1.4	90	65
10	120×220	100	1	C(生地部)	直線	1.3	130	600
11	120×220	200	1	E(溶着部)	穴	1.2	1	540
12	120×220	50	3	C(生地部)	放射状	1.8	50	4
13	120×220	100	3	C(生地部)	放射状	1.6	70	10
14	120×220	100	3	C(生地部)	放射状	1.7	70	10
15	120×220	100	3	C(生地部)	放射状	1.7	100	11
16	120×220	50	6	C(生地部)	放射状	2.6	40	3
17	120×220	100	6	C(生地部)	放射状	2.6	90	5
18	120×220	100	6	C(生地部)	直線	2.4	100	4
19	120×220	100	6	C(生地部)	放射状	2.3	80	5
20	133×250	0	1	A(生地部)	放射状	1.5	60	75
21	133×250	100	1	C(生地部)	直線	1.4	130	680
22	133×250	100	1	C(生地部)	放射状	1.3	130	540
23	133×250	100	1	C(生地部)	直線	1.3	140	510
24	133×250	100	3	C(生地部)	放射状	1.6	100	16
25	133×250	100	3	C(生地部)	放射状	1.7	60	10
26	133×250	100	3	C(生地部)	放射状	1.7	110	16
27	133×250	0	3	A(生地部)	放射状	2.0	40	4
28	133×250	0	6	A(生地部)	放射状	2.4	40	4
29	133×250	100	6	C(生地部)	放射状	2.4	70	6
30	133×250	100	6	C(生地部)	放射状	2.5	110	7
31	133×250	100	6	C(生地部)	放射状	2.4	90	7

*3 ガスボンベのレギュレータの2次圧

*4 測定した圧力は大気圧との差(圧力計のゲージ圧)であり、ゲージ圧=(絶対圧-1気圧)/10 [MPa]である。

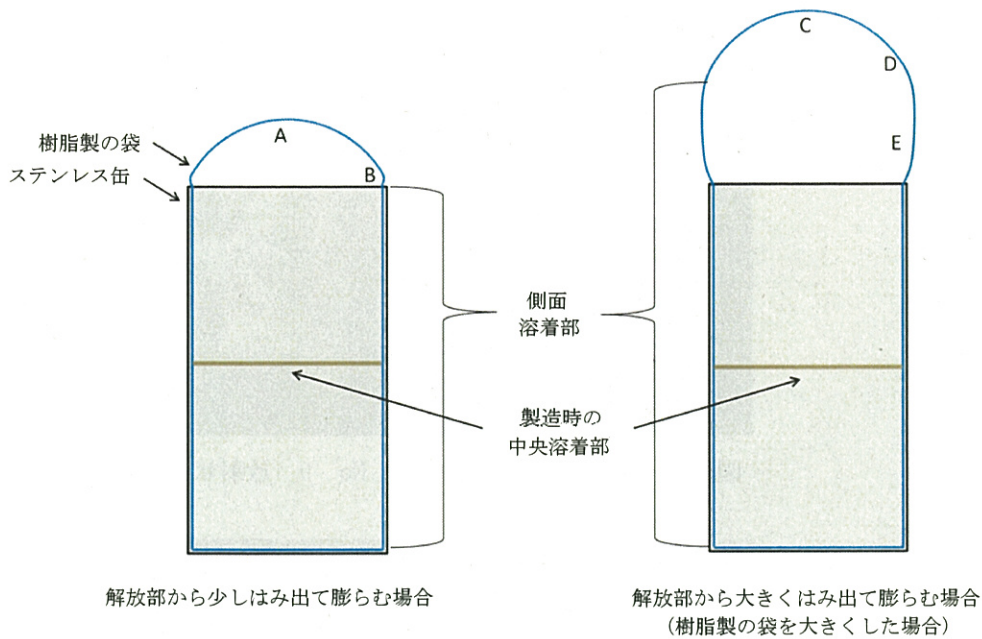


図 7.1.3-参 4 破裂箇所の概略図

樹脂製の袋にガス配管を直接接続した試験では、全ての試験において溶着部と生地部の境界付近に 2~10 mm 程度の穴が開き、ガスが抜けるという挙動であった。破裂直前の配管内の圧力は大気圧+0.032~0.14 MPa (1.32~2.4 気圧) であった。

ステンレス缶 (蓋なし) 内に装荷した樹脂製の袋にガスを送入すると、ステンレス缶内面で拘束された部分は膨らむことができないため、ステンレス缶上側の解放部で膨らんで破裂する結果となった。この際の破裂直前の配管内の圧力は大気圧+0.021~0.16 MPa (1.21~2.6 気圧) であった。

表 7.1.3-参 3 の破裂箇所の A 及び C は上部の中央付近(生地部)、B 及び D は上部の端(生地部)、E は側面の溶着部である。破裂状態の例として、No. 9 (放射状)、No. 10 (直線)、No. 11 (穴) の写真を図 7.1.3-参 5~図 7.1.3-参 7 に示す。

破裂箇所と破損形状について、ステンレス缶から大きくはみ出ない場合、側面すなわち溶着部がステンレス缶内面に拘束されるため、上部のみがドーム状に膨らんだ。その結果、ドーム状に膨らんだ中央付近 (A) から放射状に破裂した。また、ステンレス缶から大きくはみ出る場合もバッグ上部 (C) かつ生地部から破損するケースが多かったが、はみ出ている側面にも張力がかかることから、条件によっては破裂部の形状が穴空きや直線となるケースがあった。また、1 ケースのみではあるが溶着部と生地部の境界付近からの破損が観察された (No. 18)。この場合は小さな穴が空いてガス漏れする緩やかな破損挙動であった。また、形状が穴空きや直線となるケースは破損までの時間が長い (100 秒以上)、すなわち比較的ゆっくりと膨張した試験において観測された挙動であった。

表 7.1.3-参 3 の破裂時配管内圧力について、送入ガス圧力を高くして樹脂製の袋が膨らむ速度を速くすると、破裂時の内圧は大きくなる傾向が示された。6 kgf/cm² で急激にガスを送入した場合、破裂時の内圧は大気圧+0.14~0.16 MPa (2.4~2.6 気圧) となった。一方、送入ガス圧力が低く比較的緩やかにガスを送入した試験 (挿入ガス圧力: 1 kgf/cm²、破損までの時間: 100 秒以上、No. 10・No. 11・No. 21~23) では、破裂時の内圧は大気圧+0.021~0.035 MPa (1.21~1.35 気圧、平均 1.29 気圧) となった。



図 7.1.3-参 5 破裂状態の例 No. 9 (放射状)



図 7.1.3-参 6 破裂状態の例 No. 10 (直線)



図 7.1.3-参 7 破裂状態の例 No. 11 (穴)

3.2 容器蓋開封時における樹脂製の袋の膨張状況

(1) [聞き取り調査]

6本のボルトを緩めた際に蓋が押し上げられた。6本中4本を外し、残り2本のボルトを交互に少しずつ緩め、完全にボルトを抜き去る前に蓋が浮き上がり、破裂した。Oリングが容器本体の上端よりは上がった時点で「パン」と鳴った。蓋が容器本体から大きく離れてから「パン」と鳴ったわけではない。破裂音が聞こえ、蓋をフード内に置いた時点で、容器からバッグの一部がはみ出していた。個人の感覚によるが破裂音は「耳が痛くなるほど大きな音」であったと、作業員の1人から証言された。

(2) [検証試験]

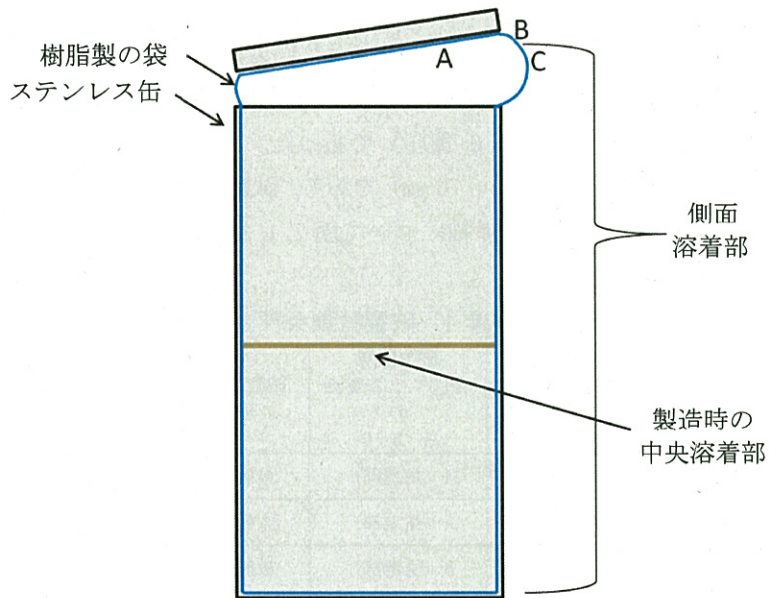
樹脂製の袋にガスを送入すると、ステンレス缶内面及び蓋で拘束された部分は膨らむことができないため、蓋が浮いてできた隙間から膨らみ、破裂する結果となった。この際の破裂直前の配管内の圧力は大気圧+0.1~0.3 MPa (2.0~4.0 気圧) であった。試験パラメータは送入ガス圧力 (2~6 kgf/cm²)、ステンレス缶と蓋の隙間 (20~70 mm) である。試験条件と結果の一覧を以下の表 7.1.3-参 4 に示す。また、表中の破裂箇所の詳細について図 7.1.3-参 8 に示す。

表 7.1.3-参 4 破裂試験条件と結果

No.	ステンレス缶 寸法 φ×h [mm]	ステンレス缶 からはみ出る バッグ長さ [mm]	送入ガス 圧力* ⁵ [kgf/cm ²]	蓋の 隙間 [mm]	破裂箇所 ※図 7.1.3-参 8 の A, B, C	破裂箇所 の形状	破裂時 配管内 絶対圧 (気圧)* ⁶	破損部の 大きさ [mm]	破損まで の時間 [秒]
1	133×250	100	2	70	A (生地部)	放射状	2.0	50	190
2	133×250	100	2	40	A (生地部)	放射状	2.4	30	230
3	133×250	100	2	35	B (生地部)	放射状	2.4	30	190
4	133×250	100	3	40	C (溶着部)	穴	2.4	10, 2	6
5	133×250	100	3	50	A~B (生地部)	直線	2.7	80	6
6	133×250	100	6	20	B (生地部)	放射状	4.0	20	5
7	133×250	100	6	40	B (生地部)	放射状	4.2	20	3
8	133×250	100	6	40	B (生地部)	放射状	4.2	25	4
9	133×250	100	6	40	A (生地部)	直線	4.4	55	5
10	133×250	100	6	35	B (生地部)	直線	4.5	45	6
11	133×250	100	6	35	A~B (生地部)	直線	4.5	70	6
12	133×250	-45	2	25	A (生地部)	直線	2.0	50	175
13	133×250	-50	2	30	A (生地部)	直線	2.2	50	230
14	133×250	-60	2	25	A (生地部)	直線	2.3	50	195

*⁵ ガスポンベのレギュレータの 2 次圧、*⁶ 配管に接続した圧力計の指示値

*⁶ 測定した圧力は大気圧との差 (圧力計のゲージ圧) であり、ゲージ圧=(絶対圧-1 気圧)/10 [MPa] である。



上方向を蓋に拘束されて膨らむ場合

図 7.1.3-参 8 破裂箇所の概略図

破裂箇所の A は生地部、B は溶着部に近い生地部、C は溶着部である。樹脂製の袋が膨張する様子と破損形状の例として、No. 9 (放射状)、No. 10 (穴)、No. 11 (直線) の写真を図 7.1.3-参 9～図 7.1.3-参 11 に示す。「3.1 樹脂製の袋の耐圧性能」に示した蓋なしの試験と比べると、穴や直線の破損形状になるケースが多くなっており、蓋の拘束が加わったためと考えられる。また、蓋なしの試験に比べて開口部が少ない分、樹脂製の袋のはみ出る部分が小さく、はみ出た部分が膨張して破裂に至り、破損部分も小さくなっている。また、蓋なしの試験に比べて破裂時の配管内圧力が比較的高くなった。

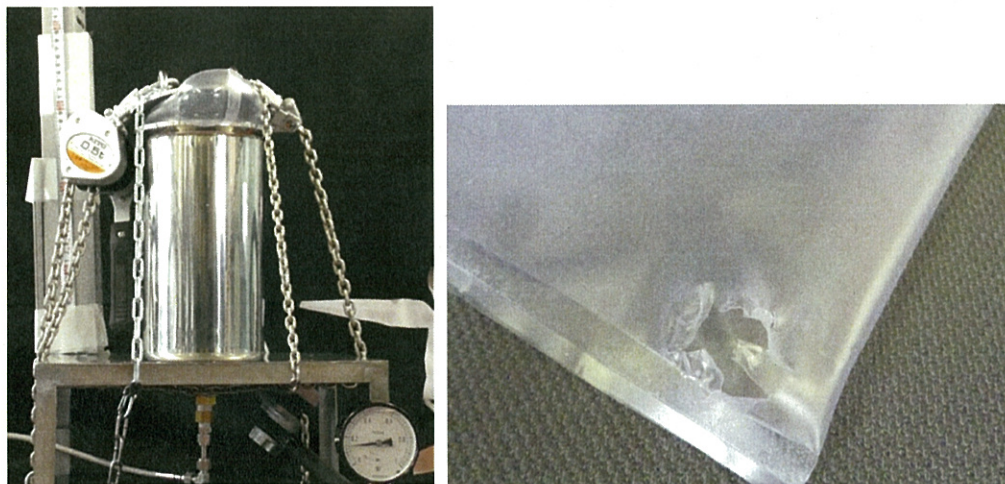


図 7.1.3-参 9 樹脂製の袋が膨張する様子と破損状態 No. 3 (放射状)

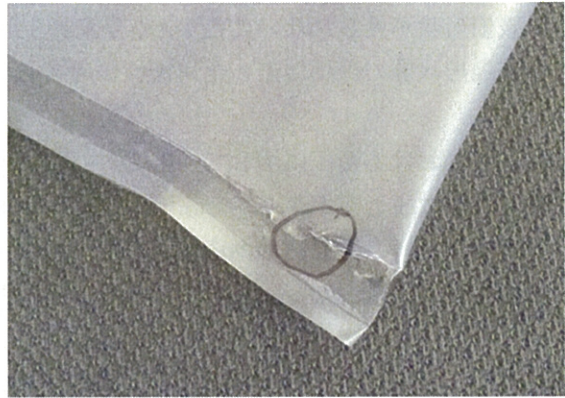


図 7.1.3-参 10 樹脂製の袋が膨張する様子と破損状態 No. 4 (穴)



図 7.1.3-参 11 樹脂製の袋が膨張する様子と破損状態 No. 5 (直線)

4. 評価結果

4.1 樹脂製の袋の耐圧性能

文献から得られる樹脂製の袋の引張強度は、加工が施されていない生地部に比べ、重ね溶着部及び底溶着部が弱い。また、引張試験では生地部が約 300 %の伸び(約 4 倍の長さ)を示すことが分かった。したがって、密閉した樹脂製の袋の内圧が上昇し、仮に理想的な球状に膨らんだとすると、樹脂製の袋の接線方向にかかる張力は全ての場所で同じと考えられ、引張強度が弱い溶着部が破損することになる。これは樹脂製の袋にガス配管を直接接続した試験において溶着部から破損した結果とよく合っている。

一方で、ステンレス缶に入った樹脂製の袋が膨らむ際の挙動は複雑であり、ステンレス缶内の壁面や蓋などの拘束部分が存在することから樹脂製の袋にかかる張力は場所によって様々なため、解析的な手法から破裂箇所や破裂時の内圧を評価することは困難である。

検証試験における破裂箇所と形状に関して、樹脂製の袋がステンレス缶から大きくはみ出すケース及びはみ出さないケースのいずれも破裂箇所は A 若しくは C で示す樹脂製の袋上部の中央付近(生地部)が多かった。これは、ステンレス缶の側面及び底面によって樹脂製の袋の膨張が制限されたため、ステンレス缶上部の開放部に膨張が進み、最も拘束部分から遠い樹脂製の袋上部の中央付近が膨張しやすかったことに起因すると考えられる。また、大きくはみ出すケースの場合は条件によって破損形状が穴空

きや直線となるケースがあり、これは破損までの時間が長い（100 秒以上）、すなわち比較的緩やかに膨張した試験において観測された挙動であった。事象発生時の樹脂製の袋の写真において破裂箇所放射状の破損形状が見られないことから、事象発生時の樹脂製の袋は比較的緩やかに膨張して破裂し、穴空きや直線形状等の破損に至った可能性が考えられる。

検証試験における耐圧に関して、送入ガス圧力が高い場合は圧力と流量の関係から樹脂製の袋内と配管内圧力の間に圧力差が生じてしまう。圧力差の小さい、送入ガス圧力が低く比較的緩やかにガスを送入した試験における破裂時の内圧は大気圧+0.021~0.035 MPa（1.21~1.35 気圧）であった。これより標準の樹脂製の袋は 1.20 気圧以上の内圧で破裂する可能性がある。

以上から、樹脂製の袋は生地部より溶着部の方が弱く破損しやすいが、破損は張力のかかり方に大きく依存する。当時の破裂事象時の写真情報から樹脂製の袋は貯蔵容器内で拘束されていたと推測され、少なくとも放射状の破損は見られない。これと検証試験の結果から事象発生時の樹脂製の袋は比較的緩やかに膨張して破裂した可能性が考えられる。また、標準の樹脂製の袋は 1.20 気圧以上の内圧で破裂すると推測される。

また、今後、現地調査を行い、破裂箇所や破損形状を特定して破裂に至る経緯を評価することが重要である。

4.2 容器蓋開封時における樹脂製の袋の膨張状況

聞き取り調査では、蓋を僅かに上げた段階で内部の樹脂製の袋が破裂したことを示す証言が得られていることから、樹脂製の袋の膨張は僅かで、比較的緩やかに進行したと考えられる。

検証試験において、樹脂製の袋の膨らみにより緩やかに蓋が開封されて、隙間から見えている箇所が破裂した。これは事象が発生した貯蔵容器の蓋の開封状況に近い試験であったと考えられる。一方で、検証試験では、標準の樹脂製の袋を用いたため伸びが大きいこと、ステンレス缶と蓋の隙間が 20~70mm と作業者の聞き取り調査記録での蓋の開度よりは大きめであったと推測されること、ステンレス缶と蓋の開口幅をチェーンで強制的に制限したことは、当時の破裂事象を再現できなかった点である。

検証試験では樹脂製の袋のサイズは一定とし、送入ガス圧力のみを変更した。送入ガス圧力と蓋とステンレス缶の隙間に関しては、送入ガス圧力が低いと隙間が大きくなる傾向が示されたが、断定できるほどではない（2 kgf/cm²：35~70 mm、6 kgf/cm²：20~40 mm）。一方、送入ガス圧力を高くして樹脂製の袋が膨らむ速度を速くすると、破裂時の内圧は明らかに大きくなる傾向を確認した。2 kgf/cm²でゆっくりとガスを送入した場合、破裂時の内圧は 2.0~2.4 気圧となり、6 kgf/cm²で急激にガスを送入した場合、破裂時の内圧は 3.2~4.0 気圧となった。この送入ガス圧力と破裂時の内圧の関係は、蓋なし場合の破裂試験結果と同様であるが、蓋がある場合の方が全体的に破裂時の内圧が高い。これは、隙間からはみ出して膨らんだ箇所の体積を球と見なした場合の直径（球相当径）で比較すると、蓋がない場合の試験で膨張した箇所の球相当径よりも蓋がある場合の球相当径が小さかったためと考えられる。一般的に、張力（樹脂製の袋に対して接線方向の力）が一定の場合、球相当径が小さい（曲率半径が小さい）場合の方が内圧（樹脂製の袋に対して垂直の力）は高くなる。破裂試験において蓋で上面を拘束した場合、解放された隙間が小さいため、隙間から小さくはみ出して膨らんだ。このため、球相当径が小さくなり破裂に必要な張力に達するためには高い内圧が必要になったと考えられる。

当時の破裂事象が起こったステンレス缶及び樹脂製の袋においては、Oリングが容器本体の上端よりは上がった時点で「パン」と鳴ったとの証言が得られている。したがって、試験条件よりも更に隙間が小さく、このような小さい隙間から樹脂製の袋がはみ出して破裂したとは考えにくい。本試験のNo. 12～No. 14は樹脂製の袋を短くして、蓋の隙間を20 mm～30 mmと小さくした試験である。このときの樹脂製の袋内圧は2.0気圧～2.3気圧と見積もられた。劣化した樹脂製の袋については標準品よりも強度や伸びが低下するため、破裂事象当時における樹脂製の袋の場合は僅かに蓋を押し上げた後、放射線や加圧による脆化により大きく伸びずに破裂したと推測される。現地調査によってステンレス缶の容積と樹脂製の袋の寸法を比較し、これらの比率を合わせた上で破裂試験を行い、破裂過程を確認することが必要と考える。

今回の破裂事象に対して原因究明のために実施した樹脂製の袋の破裂試験における配管内圧力の最大値、最小値について表7.1.3-参5にまとめた。送入ガス圧力が低い場合は樹脂製の袋内と配管内の間の圧力差が小さく、配管内圧力は袋内圧力とほぼ同等と考えられるが、送入ガス圧力が高い場合は圧力と流量の関係から樹脂製の袋内と配管内圧力の圧力差が大きく、配管内圧力は袋内の圧力よりも高い指示値を示していると考えられる。

表7.1.3-参5中での最小値(1.21気圧)は未照射樹脂製袋を用いた蓋なしステンレス缶で実施したものであり、溶着部に小さな穴が開いてガスが抜ける挙動を示した。一方で作業員の聞き取り調査記録では、作業員が破裂音を聞き、風圧を感じていることから袋が破裂していると考えられ、状況から小さな穴が開いたとは考えにくいことに注意する必要がある。また、最大値(4.0気圧)は未照射樹脂製袋を用いた蓋ありステンレス缶で実施したものであり、生地部が膨れて放射状に破裂する挙動を示した。この試験の送入ガス圧は高く、袋の内圧よりも高い圧力を指示していると考えられる。

表7.1.3-参5 各破裂試験条件と配管内圧の最大・最小値

ステンレス缶 有無	蓋有無	送入ガス 圧力 [kgf/cm ²]	破裂箇所	破裂箇所 の形状	配管内 ゲージ圧 [MPa]	配管内圧力 [atm]	
なし	-	1	溶着部	穴	0.03	1.3	内圧最小値
なし	-	6	溶着部	穴	0.14	2.4	内圧最大値
あり	なし	1	溶着部	穴	0.02	1.2	内圧最小値
あり	なし	6	生地部	放射	0.16	2.6	内圧最大値
あり	あり	2	生地部	直線	0.10	2.0	内圧最小値
あり	あり	6	生地部	放射	0.30	4.0	内圧最大値

樹脂製の袋の内圧計算

1. 確認・調査事項

樹脂製の袋の内圧上昇による破裂の推定シナリオに沿って、樹脂製の袋の内圧上昇の経時変化を計算した。

2. 確認調査方法・内容

2.1 内圧計算手順

本文 7.1 に記載の推定シナリオに沿って、樹脂製の袋及び貯蔵容器の O-リングを通した発生ガスの漏えいを考慮して、樹脂製の袋の内圧経時変化を計算した。計算モデル及び手順をそれぞれ図 7.1.4-1 及び図 7.1.4-2 に示す。エポキシ樹脂等からのガス発生 (①)、発生ガスによる樹脂製の袋の内圧上昇と樹脂製の袋を通した貯蔵容器内部への漏えい (②)、貯蔵容器内部の内圧上昇と貯蔵容器 O-リングを通した貯蔵容器外へのガスの漏えい (③)、その結果生じる樹脂製の袋の内圧変化と容積 (発生気体滞留可能体積) 変化、及び樹脂製の袋-貯蔵容器間領域の内圧変化と容積 (発生気体滞留可能体積) 変化 (④) を 1 日間の時間幅で行い、平成 8 年 7 月の貯蔵開始から平成 29 年 6 月の貯蔵容器開封までの 21 年間分の計算を繰り返した。

なお、ここで行った 1 日間の時間幅による計算の妥当性は、ガスの発生と樹脂製の袋の透過を考慮した解析解との比較により確認している。以下に①～④の各手順における計算の詳細を示す。

- ① α 線によるエポキシ樹脂及びポリ容器の分解ガス発生量を(1)式により計算した。

$$s_i = \frac{V_{gas,i}}{t_{tot}} \quad (1)$$

ここで、

s_i : 1日当たりのガス発生量 (cm³)

$V_{gas,i}$: ガス種 i の貯蔵開始 (平成 8 年 7 月) から貯蔵容器開封 (平成 29 年 6 月) までの全発生ガス量 (cm³)

t_{tot} : 貯蔵開始から貯蔵容器開封までの期間 (21 年間)

- ② 樹脂製の袋内部におけるガス種 i の貯蔵開始からの経過日数 t におけるガス分圧 $P_{pvc,i,t}$ を(2)式により計算した。(2)式の右辺第一項は $t-1$ 日におけるガス分圧、第二項は $t-1$ 日におけるガス量増分に対する分圧を示す。

なお、十分にゆっくりとした圧力変化の場合、ポリ容器の気密性はないと考えて良いため、本計算においてポリ容器は考慮していない。

$$P_{pvc,i,t} = P_{pvc,i,t-1} + \frac{s_i - GTR_{pvc,i} (P_{pvc,i,t-1} - P_{cont,i,t-1})}{V_{pvc,t-1}} P^0 \quad (2)$$

ここで、

t : 貯蔵開始からの経過日数 (日)

$P_{pvc,i,t}$: 樹脂製の袋内部におけるガス種 i の t 日における分圧 (atm)

$V_{pvc,t}$: 樹脂製の袋内部における t 日における発生気体滞留可能体積 (cm^3)

$GTR_{pvc,i}$: 樹脂製の袋に対するガス種 i の 1 日当たりの透過係数 (cm^3/atm)

$P_{cont,i,t}$: 樹脂製の袋-貯蔵容器間における t 日におけるガス種 i の分圧 (atm)

P^0 : 大気圧 (atm)

- ③ 樹脂製の袋-貯蔵容器間におけるガス種 i の t 日におけるガス分圧 $P_{cont,i,t}$ を (3) 式により計算した。(3) 式の右辺第一項は $t-1$ 日におけるガス分圧、第二項は $t-1$ 日におけるガス量増分に対する分圧を示す。

$$P_{cont,i,t} = P_{cont,i,t-1} + \frac{GTR_{pvc,i}(P_{pvc,i,t-1} - P_{cont,i,t-1}) - (GTR_{Oring,i}P_{cont,i,t-1})}{V_{cont,t-1}} P^0 \quad (3)$$

ここで、

$V_{cont,t}$: 樹脂製の袋-貯蔵容器間における t 日における発生気体滞留可能体積 (cm^3)

$GTR_{Oring,i}$: 貯蔵容器 O-リングに対するガス種 i の 1 日当たりの透過係数 (cm^3/atm)

- ④ ②及び③のガス量変化(内圧変化)に応じた樹脂製の袋の容積(発生気体滞留可能体積)変化を(4)式に、樹脂製の袋-貯蔵容器間の容積(発生気体滞留可能体積)の変化を(5)式により計算した。

$$V_{pvc,t} = \frac{P_{pvc,t} V_{pvc,t-1}}{(P_{pvc,t} + P_{cont,t})/2} \quad (4)$$

$$V_{cont,t} = V^0 - V_{pvc,t} \quad (5)$$

ここで、

V^0 : 貯蔵容器内の発生気体滞留可能体積の最大値 (cm^3)

- ⑤ ①～④の計算を 21 年間分繰り返し、貯蔵容器開封時における樹脂製の袋の内圧を(6)式により計算した。

$$P_{pvc} = \sum_i \sum_t P_{pvc,i,t} \quad (6) \text{式}$$

ここで、

P_{pvc} : 貯蔵容器開封時における樹脂製の袋の内圧 (atm)

2.2 内圧計算条件

(1) ガス発生量計算条件

(1) 式で用いるガス発生量の計算条件を表 7.1.4-1 に示す。ガスの発生量は、内圧上昇への影響

度が大きいエポキシ樹脂の α 線分解によるガス発生量（添付 7.1.1 ② 表②-4）とポリ容器の α 線分解によるガス発生量（添付 7.1.1 ③）に示す標準状態（0°C、1 気圧）における値を 25°C、1 気圧に換算して用いた。Pu 粒子径及び Am 除去の有無をガス発生量計算におけるパラメータとし、内圧が最大となるケース A（21 年間で 87.0 L）、標準となるケース B（21 年間で 52.8 L）、内圧が最小となるケース C（21 年間で 24.6 L）の 3 つのケースについて計算を行った。

(2) 圧力計算条件

(2)～(5)式において圧力計算に用いる発生気体滞留可能体積を表 7.1.4-2 に示す。図 7.1.4-1 に示すように、発生したガスにより樹脂製の袋はほぼ貯蔵容器内容積一杯（3386 cm³）まで膨張するものとした。

なお、現地調査の結果より、樹脂製の袋の縦寸法が一重目のものの方が二重目の袋のものよりも長い為、二重目の樹脂製の袋頂部を一重目の樹脂製の袋が突き破っていたことが分かっているが、二重目の樹脂製の袋が破裂した時期については分からないため、計算においては、一重目と二重目の樹脂製の袋は容積が同一として一緒に膨張・伸長するものとした。

(3) 透過量計算条件

(2)、(3)式で用いる透過量計算条件を表 7.1.4-3 に示す。樹脂製の袋及び貯蔵容器 O-リングを通したガスの透過量は、水素ガス及びメタンガスの透過係数[1-4]をそれぞれ用いて計算した。ケース A においては、O-リングが高い圧力により貯蔵容器蓋-容器間の隙間（1 mm 幅）にはみ出した場合を想定し、漏えい面積を小さく設定した。ケース C においては、O-リングの透過係数が最大となる文献値を使用した。

なお、貯蔵容器内外において分圧が変わらない空気（窒素及び酸素）についての漏えいは考慮しなかった。

3. 確認・調査結果

図 7.1.4-3 及び表 7.1.4-2 にそれぞれ貯蔵期間中における樹脂製の袋の内圧経時変化（絶対圧）を計算した結果及び貯蔵容器開封時における内圧計算結果を示す。貯蔵容器開封時における内圧は、最大となるケース A で 24.6 気圧、最小となるケース C で 4.6 気圧となった。この内圧は、添付 7.1.3 に示す当該貯蔵容器開封時と同様な樹脂製の袋の破裂又は破損状況となる内圧である 2.5 気圧以上である。

なお、本計算で考慮したパラメータ以外にも、長時間の α 線照射により G 値が変化すること、エポキシ樹脂に含有される核燃料物質粉末自身の α 線の遮蔽効果、高圧下でのエポキシ樹脂内における発生ガスの保持、O-リングのシール性能劣化等、内圧上昇を抑制する因子がいくつかあるが、不確かさが大きくこれらを定量的に評価することは困難であり、本計算においては考慮しなかった。

4. 評価結果

計算条件に応じて評価値には大きな幅があるものの、エポキシ樹脂及びポリ容器の α 線分解により発生したガスにより内圧は上昇し、貯蔵容器開封時において、当該貯蔵容器開封時と同様な樹脂製の袋の破裂又は破損状況となる内圧である 2.5 気圧以上となった。

【参考文献】

- [1] 住友化学株式会社ホームページ, http://www.sumitomo-chem.co.jp/acryl/03tech/b3_gas.html
 [2] T.D. Stark, et al., Geosynthetics International, 2005, 12, No. 1
 [3] 桜シール株式会社ホームページ, <http://www.sakura-seal.co.jp/category/1981184.html>
 [4] 株式会社パッキンランドホームページ, <https://www.packing.co.jp/GOMU/kitaitoukaseil.htm>

表 7.1.4-1 ガス発生量の計算条件と計算結果

ケース	A	B	C	
エポキシ樹脂のα線分解によるガス発生 (添付 7.1.1 ②)	Pu 同位体組成		平均同位体組成	
	α線によるガス発生 の G 値		0.22	
	ガス組成*1		水素 83%、メタン 17%	
	平均粒子径	10 μm	20 μm	35 μm
	Am-241 除去	無	無	有
	21 年間のガス発生量*2	86.8 L (79.5 L)	52.6 L (48.2 L)	24.4 L (22.4 L)
ポリ容器のα線分解による ガス発生 (添付 7.1.1 ③)	21 年間のガス発生量*2		0.20 L (0.18 L)	
21 年間のガス発生量合計		87.0 L	52.8 L	24.6 L

*1：水素以外のガスとしては、検証試験（添付 7.1.1 ②及び③）の結果から得られたガス種のうち、0-リングの透過係数の低いメタンを設定[3]

*2：25℃、1気圧におけるガス発生量（括弧内は標準状態 0℃、1気圧における値）

表 7.1.4-2 圧力計算条件

ケース		A	B	C
樹脂製の袋	貯蔵開始時の発生気体 滞留可能体積 (初期値) *1	1156 cm ³		
	最大の発生気体滞留 可能体積*2	3386 cm ³		
樹脂製の袋-貯蔵容器間	貯蔵開始時の発生気体 滞留可能体積*3 (初期値)	2332 cm ³		
貯蔵容器	発生気体滞留可能体積	3486 cm ³		

*1 : 一重目の樹脂製の袋がポリ容器に密着しているとして、ポリ容器の内容積 ($(9.2/2)^2 \times \pi \times 22.8 = 1516 \text{ cm}^3$) からエポキシ樹脂 (360 cm³ : 添付 7.1.1 ①) の体積を差し引いた体積

*2 : 貯蔵容器内における発生気体滞留可能体積 (3486 cm³ : 添付 7.1.1 ①) に対して樹脂製の袋-貯蔵容器間に 100 cm³ の空間領域が残ると設定

*3 : 貯蔵容器内容積 (3927 cm³) からポリ容器外容積 ($(9.4/2)^2 \times \pi \times 23.0 = 1595 \text{ cm}^3$) を差し引いた体積

表 7.1.4-3 透過量計算条件

ケース		A	B	C
樹脂製の袋	ガス透過係数*1	2.7×10 ⁻¹⁰ (水素 [1]) 3.0×10 ⁻¹² (メタン [2])		
	漏えい面積*2	1620 cm ²		
	厚さ*3	0.6 mm		
貯蔵容器 (O-リング)	ガス透過係数*4	1.4×10 ⁻⁹ (水素 [3]) 3.3×10 ⁻¹⁰ (メタン[3])	3.9×10 ⁻⁹ (水素 [4]) 3.3×10 ⁻¹⁰ (メタン[3])	
	漏えい面積*5	3.8 cm ² (1 mm 幅)	18.9 cm ² (5 mm 幅)	
	厚さ*6	5.1 mm		

*1：単位は cc cm/cm² s 10mmHg

*2：一重目の樹脂製の袋の表面積 (18×45×2 = 1620 cm²) を設定

*3：一重目と二重目の樹脂製の袋は膨張して一体となるため、樹脂製の袋の厚さに対して2倍の値 (0.3 mm×2 = 0.6 mm) を設定

*4：単位は cc cm/cm² s 10mmHg

*5：貯蔵容器の寸法からO-リング装着時の幅を設定

最大ケースにおいては、高圧により蓋-容器間の溝 (1mm 幅) にO-リングがはみ出した場合を想定

*6：O-リングが幅5mmの溝内に圧縮された場合において、O-リング (φ5.7 mm) 断面積と等価になるような厚みを設定 ((5.7/2)²×π÷5)

表 7.1.4-4 貯蔵容器開封時 (貯蔵開始後約21年) における樹脂製の袋の内圧計算結果

ケース	内圧：絶対圧 (気圧)	樹脂製の袋の 状態*1
A	24.6	破裂
B	12.4	破裂
C	4.6	破裂

*1：検証試験において得られた当該貯蔵容器開封時と同様な樹脂製の袋の破裂又は破損状況となる内圧は2.5気圧以上

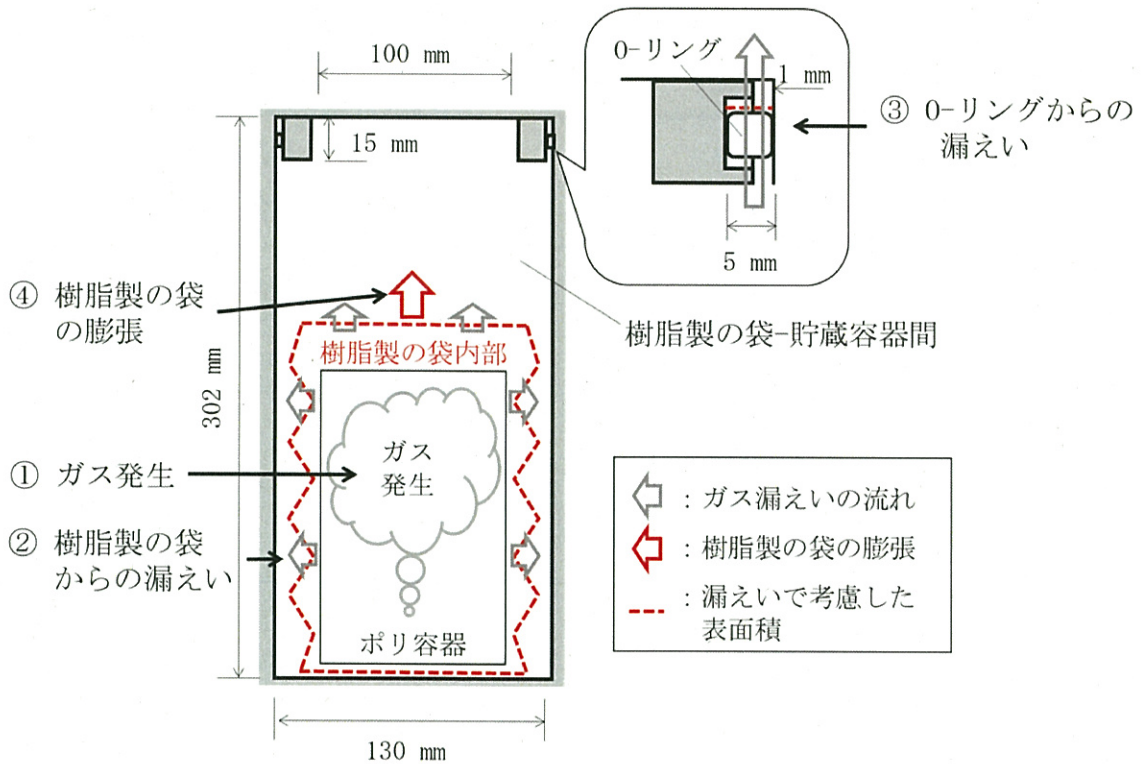


図 7.1.4-1 樹脂製の袋及び貯蔵容器の内圧計算モデル

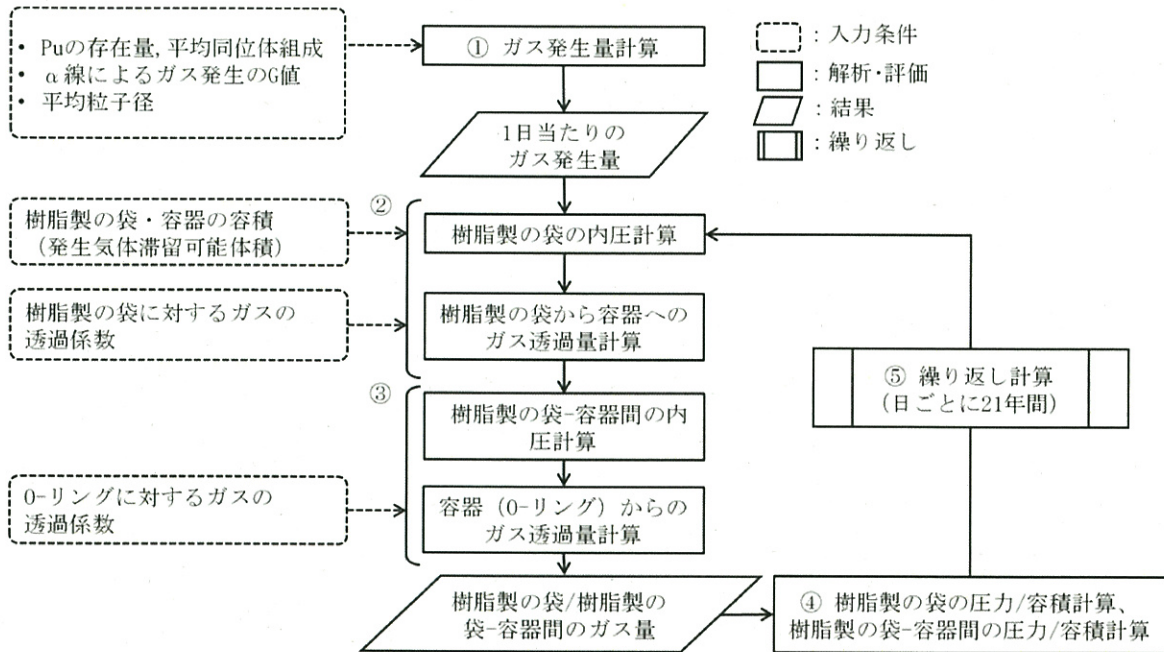


図 7.1.4-2 樹脂製の袋及び貯蔵容器の内圧計算手順

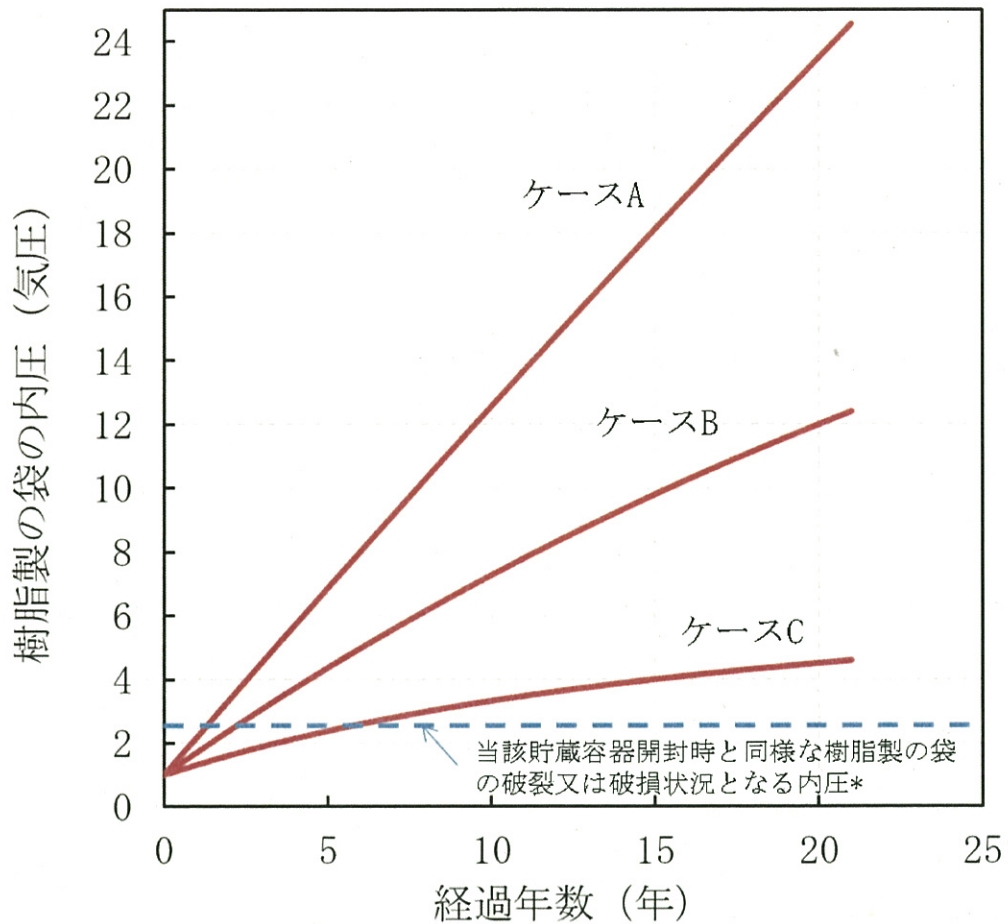


図 7.1.4-3 貯蔵開始後約 21 年間の樹脂製の袋の内圧経時変化計算結果

*: 破裂試験において、当該貯蔵容器開封時と同様な樹脂製の袋の破裂又は破損状況となる内圧は、2.5 気圧程度以上であった。同様の状況等に起因する誤差があると考えられ、およそ 2.5 気圧以上で破裂すると考えている。この破裂圧力は、21 年間の貯蔵期間中の γ 線照射による袋の劣化を模擬した状態に相当する。

【参考】樹脂製の袋内圧の増減要因について

樹脂製の袋の内圧計算においては、現状で分かっている範囲の定量的条件を前提とした結果を示したが、不確かさが大きく影響度合いを定量的に示すことが困難な以下の条件は、圧力計算では考慮しなかった。

- 1) G 値の経時変化
- 2) 核燃料物質自身の遮蔽効果
- 3) 発生ガスによる樹脂固化物内での気泡形成（樹脂固化物内での保持）
- 4) O-リングのシール性能劣化

上記は、何れも樹脂製の袋内部の圧力を下げる方向にあると考えられる。各々についての概説を以下に記載する。

1) G 値の経時変化

今回の評価では、エポキシ樹脂への He 照射試験から G 値として 0.22（添付 7.1.1 ②）を使用しており、この G 値は貯蔵容器への貯蔵から樹脂製の袋の破裂に至る約 21 年間一定であると仮定している。実際は、粒子径の周囲 40 μm （エポキシ樹脂中における α 線の飛程）の範囲において、照射量増加とともに分解してガスを発生させる樹脂量が減少し、G 値は緩やかに減少していくものと考えられる。

2) 核燃料物質自身の遮蔽効果

α 線のエポキシ樹脂における飛程を考慮すると、粒子が密に存在している場合には、放出された α 線はほかの粒子に衝突しエネルギーを吸収される割合が多くなり、ガスの発生量は低くなる。実際は、多少なりともこの効果があると考えられるが、エポキシ樹脂中の核燃料物質の分布（ミクロ的な分布）を正確に評価することは困難である。

3) 発生ガスの樹脂固化物内での気泡形成

添付 7.1.1 「②混入有機物」において、 Cm-244 を含有した酸化物粉末とエポキシ樹脂を混合し、 α 線分解による樹脂の重量減少と密閉状態でのガス発生による圧力上昇を直接的に観察している。得られた結果から「密閉の加圧下では、樹脂内で発生したガス分子が外部に放出されにくく、樹脂内でミクロな気泡を形成していることが示唆される。」と考察している。実際は、多少なりともこの効果があったと考えられるが、高圧における樹脂中のガス保持量を正確に評価することは困難である。

4) O-リングのシール性能劣化

O-リングが物理的に破損するとそのシール性能は劣化する。O-リングの物理的破損要因としては、経時劣化、放射線照射による劣化、はみ出し現象^{*1}等が考えられる。発生時期は不明であるが現地調査（添付 6.4.5）において貯蔵容器 O-リングに亀裂が観察されている。これらの劣化は比較的緩やかに（徐々に）シール性能劣化への影響を及ぼすものと考えられる。しかし、発生程度や時期などは環境条件等によって大きく異なり、その効果も不明である。

- *1) シール対象とする部分からの圧力により O-リングが溝の隙間に噛み込んでしまう現象で、この現象が進行すると O-リングがむしれて破損する。

放射性物質の摂取に至った原因の推定

本事象に係る作業員が放射性物質を摂取するに至った原因を推定するため、要因分析図（図 7.2-1 参照）で要因を分析するとともに、作業員に係る個別の要因に対しては、作業員の放射線状況を整理し（表 7.2.1-1 参照）、調査及び検討を行った。表 7.2.1-2 に作業員ごとの放射性物質の摂取に至った推定原因を示す。

表 7.2.1-1 作業員の放射線状況

作業員	室内での行動	汚染状況	鼻スマイ	防護具脱装着及び除染の状況	半面マスク	半面マスクの汚染状況
A	破裂時 ・汚染源から離れた場所 ・拡散したPu等ダストにより汚染した。	防護具脱装着前 ・最大 100 cpm (0.33Bq/cm ²) (α線、特殊作業帽子)	不検出	グリーンハウス1で特殊作業衣を脱装してから半面マスクを外す。 ・身体汚染がないため、身体除染無し。 ・グリーンハウス2を出て鼻スマイ採取	伝声板付半面マスク使用 ・マスクマンテテストの経験有り。 ・マスクマンテテストを受けたマスク使用 ・しめひもは伸縮性が弱まっていた。	作業時マスク ・作業中マスクに放射性物質の侵入の痕跡は認められない。
	破裂後 ・電話等で室外と連絡した。	防護具脱装着後 ・身体汚染無し。				
B	破裂時 ・汚染源にやや近い場所、腹部に風圧を感じた。 ・Pu等ダストを直接浴びて汚染した。	防護具脱装着前 ・最大 3,000 cpm (9.7Bq/cm ²) (α線、特殊作業衣)	不検出	グリーンハウス1で半面マスクを交換。頭部及び顔面に汚染があった。 グリーンハウス2を出て鼻スマイ採取 ・シャワー室で除染(途中からシャワーの流量が減少したためホース使用)	伝声板付半面マスク使用 ・マスクマンテテストの経験有り。 ・マスクマンテテストを受けたマスクではなかった。 ・しめひもは正常であった。	作業時マスク ・放射性物質のろ過材透過はなかった。 ・接顔部に汚染有り。
	破裂後 ・あまり動き回らず、立った姿勢でいた。	防護具脱装着後 ・頭部及び顔面汚染 (1.7Bq/cm ²) (α線)				
C	破裂時 ・汚染源から離れた場所 ・拡散したPu等ダストにより汚染した。	防護具脱装着前 ・最大 1,000 cpm (3.3Bq/cm ²) (α線、特殊作業帽子)	13 Bq (α線)	グリーンハウス1で半面マスクを交換。頭部及び顔面に汚染があった。 グリーンハウス2を出て鼻スマイ採取 ・シャワー室で除染	伝声板付半面マスク使用 ・マスクマンテテストの経験無し。 ・しめひもは伸縮性が弱まっていた。	作業時マスク ・放射性物質のろ過材透過はなかった。 ・接顔部、吸気弁下流側、排気弁上流側に汚染有り。
	破裂後 ・動き回らず、立った姿勢でいた。	防護具脱装着後 ・頭部及び顔面汚染				
D	破裂時 ・汚染源に近い場所、太ももに風圧を感じた。 ・Pu等ダストを直接浴び汚染した。	防護具脱装着前 ・最大 1,800 cpm (5.8Bq/cm ²) (α線、特殊作業衣)	3 Bq (α線)	グリーンハウス1で半面マスクを交換。頭部及び顔面に汚染があった。 グリーンハウス2を出て鼻スマイ採取 ・シャワー室で除染(ホース使用)	伝声板付半面マスク使用 ・マスクマンテテストの経験有り。 ・マスクマンテテストを受けたマスク使用 ・しめひもは正常であった。	作業時マスク ・放射性物質のろ過材透過はなかった。 ・接顔部、吸気弁下流側、排気弁上流側に汚染有り。
	破裂後 ・電話等で室外と連絡 ・監視カメラの調整	防護具脱装着後 ・頭部及び顔面汚染 (1.7Bq/cm ²) (α線)				
E	破裂時 ・汚染源に最も近い場所、腹部に風圧を感じた。 ・Pu等ダストを直接浴び汚染した。	防護具脱装着前 ・最大 100,000 cpm (322Bq/cm ²) 以上 (α線、特殊作業衣)	24 Bq (α線)	グリーンハウス1で半面マスクを交換。頭部及び顔面に汚染があった。 グリーンハウス2を出て鼻スマイ採取 ・シャワー室で除染(ホース使用)	伝声板付半面マスク使用 ・マスクマンテテストの経験有り。 ・マスクマンテテストを受けたマスクではなかった。 ・しめひもは正常であった。	作業時マスク ・放射性物質のろ過材透過はなかった。 ・接顔部、吸気弁下流側、排気弁上流側に高い汚染有り。 ・接顔部の左頬部及び顎部に高い汚染有り。面体全体が広く汚染。
	破裂後 ・動き回らず、立った姿勢でいた。	防護具脱装着後 ・頭部及び顔面汚染 (81Bq/cm ²) (α線)				

表 7.2.1-2 内部被ばくに至った経路の推定結果

作業員	樹脂製の袋の破裂時の放射性物質の摂取	108号室での放射性物質の摂取	脱装及び除染時の放射性物質の摂取	
A	(破裂に伴う密着性の低下) ・フードから離れた場所におり、飛散したPu等のダストを直接浴びていない。このことから、放射性物質の吸入摂取の可能性が低い。	(会話等による密着性の低下) ・作業時の半面マスクに汚染は検出されなかった。しかしながら、室内の会話に加え、電話等による外部との連絡を行っており、作業時の半面マスクの「しめひも」の伸縮性が弱まっていたことを確認した。これらのことから、密着性が低下し、特殊作業衣等の体表面の放射性物質が半面マスク内に侵入して吸入摂取した可能性がある。 (発汗等による密着性の低下) ・作業時の半面マスクに汚染は検出されなかった。しかしながら、発汗等を感じていた。半面マスクの「しめひも」の伸縮性が弱まっていたことを確認した。これらのことから、密着性が低下し、特殊作業衣等の体表面の放射性物質が半面マスク内に侵入して吸入摂取した可能性がある。	(半面マスク着脱時等の吸入摂取) ・脱装後の身体に汚染はなかった。このことから、半面マスク着脱時及び鼻スミヤ採取時の放射性物質の吸入摂取の可能性は低い。	×
B	(破裂に伴う密着性の低下) ・フードに近い場所において、飛散したPu等のダストを直接浴びていない。破裂時に顔を背けた。作業時の半面マスクの接顔部に汚染がある。これらのことから、密着性が低下し、放射性物質を吸入摂取した可能性が高い。	(会話等による密着性の低下) ・作業時の半面マスクの接顔部に汚染がある。室内での会話を行って吸入摂取したことから、密着性が低下し、顔面等の放射性物質が半面マスク内に侵入して吸入摂取した可能性が高い。 (発汗等による密着性の低下) ・作業時の半面マスクの接顔部に汚染がある。発汗等を感じている。これらのことから、密着性が低下し、顔面等の放射性物質が半面マスク内に侵入して吸入摂取した可能性が高い。	(半面マスク交換時等の吸入摂取) ・半面マスク交換時及び鼻スミヤ採取時には息を止めていた。しかしながら、交換後の半面マスク面体の接顔部に汚染がある。これらのことから、半面マスク交換後に放射性物質を吸入摂取した可能性がある。	△
C	(破裂に伴う密着性の低下) ・作業員Bの後ろにいたため、飛散したPu等のダストを直接浴びていない。このことから、放射性物質の吸入摂取の可能性が低い。	(会話等による密着性の低下) ・作業時の半面マスクの接顔部に汚染がある。室内での会話を行って吸入摂取したことから、密着性が低下し、顔面等の放射性物質が半面マスク内に侵入して吸入摂取した可能性が高い。 (発汗等による密着性の低下) ・作業中半面マスクの接顔部、吸気弁下流側、排気弁上流側に汚染がある。接顔部隙間から放射性物質の侵入の痕跡が認められる。半面マスクの「しめひも」の伸縮性が弱まっていたことを確認した。これらのことから、密着性が低下し、顔面等の放射性物質が半面マスク内に侵入して吸入摂取した可能性が高い。	(半面マスク交換時等の吸入摂取) ・半面マスク交換時及び鼻スミヤ採取時には息を止めていた。しかしながら、交換後の半面マスク面体の接顔部に汚染がある。これらのことから、半面マスク交換後に放射性物質を吸入摂取した可能性がある。	△
D	(破裂に伴う密着性の低下) ・フードに近い場所において、風圧を感じ、飛散したPu等のダストを直接浴びている。作業時の半面マスクの接顔部に汚染がある。また、作業時の半面マスクの接顔部に汚染がある。このことから、密着性が低下し、放射性物質を吸入摂取した可能性がある。	(会話等による密着性の低下) ・作業時の半面マスクの接顔部に汚染がある。室内での会話、電話等での室外との連絡を行って吸入摂取した可能性が高い。 (発汗等による密着性の低下) ・作業中半面マスクの接顔部、吸気弁下流側、排気弁上流側に汚染がある。接顔部隙間から放射性物質の侵入の痕跡が認められる。発汗等を感じている。これらのことから、密着性が低下し、顔面等の放射性物質が半面マスク内に侵入して吸入摂取した可能性が高い。	(半面マスク交換時等の吸入摂取) ・半面マスク交換時及び鼻スミヤ採取時には息を止めていた。しかしながら、交換後の半面マスク面体の接顔部に汚染がある。これらのことから、半面マスク交換後に放射性物質を吸入摂取した可能性がある。	△
E	(破裂に伴う密着性の低下) ・フード前の最も汚染源に近い場所において、風圧を感じ、飛散したPu等のダストを直接浴び、高い顔面汚染(25,000 cpm)がある。また、作業時の半面マスクの面体下部の左側部分に高い汚染がある。これらのことから、飛散したPu等の粒子がマスクに入り込み、放射性物質を吸入摂取した可能性が高い。	(会話等による密着性の低下) ・作業時の半面マスクの接顔部に汚染がある。室内での会話を行って吸入摂取したことから、密着性が低下し、顔面等の放射性物質が半面マスク内に侵入して吸入摂取した可能性が高い。 (発汗等による密着性の低下) ・作業中半面マスクの接顔部、吸気弁下流側、排気弁上流側に汚染がある。接顔部隙間から放射性物質の侵入の痕跡が認められる。発汗等を感じている。これらのことから、密着性が低下し、顔面等の放射性物質が半面マスク内に侵入して吸入摂取した可能性が高い。	(半面マスク交換時等の吸入摂取) ・半面マスク交換時及び鼻スミヤ採取時には息を止めていた。しかしながら、交換後の半面マスク面体の接顔部に汚染がある。これらのことから、半面マスク交換後に放射性物質を吸入摂取した可能性がある。	△

○:被ばくの経路として可能性が高いと評価したもの △:可能性が低いと評価したもの ◎:○のうち、経路限度との関係で最も重く評価したものを ◎:○のうち、経路と評価したもの

事故の発生に影響したと推定される事項の事実関係

文書類の調査及び関係者への聞き取り調査を基に、事故の発生に影響したと考えられる事項について、事実関係を整理した。

(1) 燃料研究棟の管理体制（昭和 51 年から平成 29 年 4 月までの組織の変遷）

燃料研究棟は、昭和 49 年 2 月高速増殖炉用炭化物及び窒化物燃料の研究開発のために日本原子力研究所大洗研究所（当時）に建設された。

昭和 51 年、保安規定制定と併せ、保安に係る業務を行う大洗研究所管理部プルトニウム技術開発室を設置するとともに、炭窒化物燃料等の研究開発を所掌する東海研究所燃料工学部プルトニウム燃料研究室の室員をプルトニウム技術開発室の兼務とした。プルトニウム燃料研究室は、燃料研究棟における炭窒化物燃料等の物性研究を担当していた。プルトニウム技術開発室は、燃料研究棟の施設管理のほか、核燃料物質の管理として、実験済試料からの核燃料物質の分離、核燃料物質の保管、計量管理等を担当していた。

燃料研究棟を所管していた組織及びプルトニウム技術開発室に兼務者として駐在していたプルトニウム燃料研究室の組織の変遷を表 8. 1. 1-1 に示す。

(2) 貯蔵容器 No. 1010 に核燃料物質を貯蔵した経緯

① 貯蔵容器 No. 1010 に核燃料物質を貯蔵し平成 29 年 6 月 6 日に蓋を開けるまでの当該貯蔵容器に関する経緯

- ・プルトニウム燃料研究室では、空気雰囲気グローブボックスに設置された X 線回折装置で炭窒化物燃料等の格子定数の測定等を行っていたが、炭窒化物燃料等は、空気中で不安定であることから、当該試料を変質させることなく測定する必要があった。当時、安定した X 線回折測定試料を作製するため、不活性ガス雰囲気グローブボックス中で少量の粉末試料とエポキシ樹脂を混合し試料板にモールド（鋳造）する方法が考案された。この作成方法については、「 α 、 γ 放射線照射損傷に対して強いエポキシ樹脂で粉末状の燃料を被膜・結合することで空気中において変質しにくく、粉末粒子も飛散しにくい」と報告されている。プルトニウム燃料研究室では、炭窒化物燃料等だけでなく、酸化燃料の X 線回折測定試料作製でもこの方法が標準的に適用され、多数の X 線回折測定試料の作製と実験を実施した。
- ・X 線回折測定済試料は、プルトニウム技術開発室が受け取り、必要な処理をして貯蔵することとなっていた。プルトニウム技術開発室では、エポキシ樹脂と核燃料物質を分離し、核燃料物質を安定化（酸化加熱処理）するため、昭和 55 年頃まで酸化加熱処理の試験を実施している。この目的は、炭窒化物燃料等の安定化処理と、実験済試料の減容等であった。
- ・その後、昭和 58 年 6 月から昭和 61 年 5 月にかけて本格的に X 線回折測定済試料の安定化・減容化を目的とする酸化加熱処理を実施した。昭和 62 年 3 月に X 線回折測定済試料のアルミ製の外枠からエポキシ樹脂部を打ち抜き除去して集約し酸化加熱処理に備えたが、その後は X 線回折測定済試料を酸化加熱処理した記録はない。当時、プルトニウム技術開発室では、冷温焼却法による α 焼却

炉の開発（当該装置は昭和 62 年に施設検査合格）を進めており、プルトニウム技術開発室長 A（昭和 51 年度～平成元年度）は、炭窒化物燃料の酸化加熱処理を必要と認識していたが、当該 α 焼却炉で酸化加熱処理することを前提に従来の方法での酸化加熱処理を一時中断していたと推測される。一方、当時の室長代理（後任のプルトニウム技術開発室長 B（平成 2 年度～平成 7 年度））は、プルトニウム燃料研究室在籍時に、上記の X 線回折測定試料にエポキシ樹脂を活用することを考案した者であり、その技術報告の中で「空気中において変質しにくい」との考察から、エポキシ樹脂で固定した X 線回折測定試料の安定化処理は不要と考えていたと推測される。加えて、新設の α 焼却炉は実績が少なくグローブボックスの火災につながるおそれがあると考え、その本格運用には消極的であった。 α 焼却炉は昭和 62 年の施設検査合格後もホットインすることなく、使用されることはなかった。また、昭和 61 年を最後に酸化加熱処理が行われていない背景として、上述の貯蔵容量の不足という課題に対し、当初 12 個であった貯蔵容器に 68 個の増設が行われ合計 80 個となり、その使用開始により、X 線回折測定試料の減容処理が喫緊の課題ではなくなったことも背景にあると推察される。以上の経緯により、X 線回折測定試料から打ち抜き除去したエポキシ樹脂部は、酸化加熱処理されることなく蓄積し、グローブボックス内での保管が継続されたものと推測される。

- ・一方、X 線回折測定試料を作製し実験を行っていたプルトニウム燃料研究室の研究者は、「燃料研究棟で発生する X 線回折測定試料のほとんどが炭窒化物燃料等であるため、貯蔵保管するものは核燃料物質を回収するために X 線回折測定試料からエポキシ樹脂部を外して焼却している」と考えていた。
- ・プルトニウム技術開発室は、昭和 59 年 9 月から同年 12 月にかけて、核燃料物質貯蔵容器点検作業を実施した。その際、塩化ビニル製の容器の損傷や樹脂製の袋と思われるものの劣化が散見されたことから、使用していた塩化ビニル製容器の金属製容器への交換や樹脂製の袋の交換を実施している。
- ・プルトニウム技術開発室長が A から B に交代となった後、平成 3 年 10 月にグローブボックス内で保管されていた X 線回折測定試料が、酸化加熱処理されずにポリ容器に入れられ、樹脂製の袋（二重）に封入され、貯蔵容器 No. 1010 に保管されたものと推測される。このとき、当時の放射線安全取扱手引の「3.3.4 貯蔵」の項に貯蔵時の条件（全 4 項目）の一つとして「放射線分解によるガス圧の上昇に十分注意する」との記載はあったが、貯蔵に当たって当該条件に配慮した対応が検討された形跡は認められなかった。
- ・その後、X 線回折測定試料を適切な処理を施すことなく長期間貯蔵することとなったが、調査の結果、平成 3 年の貯蔵開始から平成 29 年 6 月 6 日の事故発生までの間に、貯蔵容器 No. 1010 が 1 回開放された記録が残っている。
- ・平成 7 年 8 月に定期 IAEA 査察の準備として、貯蔵容器（61 個）内の状況（内容物の材質、厚さ及び密封状態）確認を行った旨の記述が当時の月報にあった。確認結果に関する情報は記録されていないが、後述の開放となった点検・再梱包対応から推察すると、この開放の際に、一部の貯蔵容器の内容物で樹脂製の袋の変色等が確認されたものと考えられる。ただし、この時、貯蔵容器 No. 1010 を開封した明確な記録はなかった。
- ・平成 7 年 11 月の IAEA 査察対応において、貯蔵容器中の Pu 量の抜き打ちでの秤量要請があったが、秤量準備等の理由から即応できず、非破壊計量測定で代替されている。このときのプルトニウム技

術開発室長 B は、次回は蓋を開けて秤量する必要があるため、貯蔵容器の内容物確認と、内容物の再梱包を計画したものと推察される。平成 8 年 5 月～7 月及び平成 9 年 2 月に後任の室長 C の下で、空容器を除く 64 個の貯蔵容器の内容物確認・再梱包が行われ、この時に貯蔵容器 No. 1010 を開放した記録の存在が平成 29 年 7 月 14 日に確認された。この点検の結果、貯蔵容器 No. 1010 は、内容物のポリ容器が損傷し、樹脂製の袋が膨張しているなどの異常が確認された。しかし、その点検作業の目的がポリ容器及び樹脂製の袋の交換（梱包更新）であったため、貯蔵方法は変更されず、異常発生の原因検討や容器の材質変更等の見直しは行われなかったと推測される。さらに、点検結果は貯蔵容器ごとに表にまとめられたが、記録として保管されず、情報継承がなされなかった。

- ・その後、当該貯蔵容器 No. 1010 は、平成 29 年 6 月 6 日まで蓋を開けられることはなかった。

以上の調査結果に基づき整理した酸化加熱処理の技術開発と核燃料物質（X 線回折測定済試料）の貯蔵に関する変遷を図 8.1.1-1 に示す。

② Pu 貯蔵に係る安全情報の入手に関する経緯

- ・米国エネルギー省（DOE）は、所管する各施設において少なくとも 50% の Pu を含む金属並びに酸化物や Pu を含む物質を安全に長期貯蔵（最終処分まで）するための安定化処理に関する基本的な要件をまとめた DOE-STD レポートを 1994 年（平成 6 年）に刊行し、1996 年（平成 8 年）改訂版では対象を Pu 含有率 30% 以上に拡大し、その後も改訂が続けられ、現在の最新版を 2012 年（平成 24 年）に刊行している。

当該報告書には、金属又は合金状態の物質に関して、(a) 比表面積が $1 \text{ cm}^2/\text{g}$ 未満であること、(b) 箔、切りくず、ワイヤーは梱包しないこと、(c) 腐食生成物（酸化物）、溶液、有機物を含まないこと、酸化物に関して、(a) 少なくとも $950 \text{ }^\circ\text{C}$ 及び少なくとも 2 時間は加熱して安定化させること、(b) 含水率を測定し、梱包時には 0.5 wt% 未満であること、(c) 塩化物を含む疑いのある酸化物は、相対湿度 15% 未満であることなどの要件が示されている。

- ・IAEA は、Pu の種類と量、その物質に関する潜在的な危険性、大量の Pu の取扱や貯蔵に関連する安全上考慮すべきことなどをまとめた IAEA Safety Report を 1998 年（平成 10 年）に刊行している。当該報告書には、継続的に注意を払う必要があることとして、(a) 質量管理及び形状管理ができていないこと、(b) 長期間貯蔵（1 年以上）する場合、Pu は、酸化物（ PuO_2 ）、金属、安定した合金又は安定した化合物として、密封容器に保管すること、その際、真空や乾燥した不活性雰囲気のような適切な雰囲気となっていること、(c) 貯蔵容器には有機物を含まないこと、(d) 継続的なモニタリング、サーベランス、保守ができることなどの要件が示されている。
- ・しかし、これらの情報は、平成 3 年の当該貯蔵容器 No. 1010 の貯蔵開始後のものであったこと、平成 8 年の貯蔵容器点検時も再梱包が目的であったことから、その後の燃料研究棟での貯蔵容器を用いた核燃料物質の貯蔵管理に反映されていなかった。

③ 核燃料物質の不適切な管理に関する経緯

- ・原子力科学研究所の平成 28 年度第 3 四半期使用施設保安検査（平成 28 年 11 月 14 日～12 月 2 日）において、核燃料物質の不適切な管理に関する指摘を受け、11 月 29 日に安全・核セキュリティ統括部から各拠点に核燃料物質の不適切な管理状況について調査指示が行われた。その後の核燃料サイクル工学研究所の平成 28 年度第 3 四半期使用施設保安検査（平成 28 年 12 月 7 日～12 日）にお

いても核燃料物質の不適切な管理に関する指摘を受けたことから、原子力機構内にて核燃料物質の不適切な管理に係る改善について検討を進めていた。

- ・その中で、核燃料サイクル工学研究所プルトニウム燃料技術開発センターは、「燃料技術開発課所掌グローブボックス（プルトニウム燃料第一開発室（Pu-1）、プルトニウム燃料第二開発室（Pu-2））内における核燃料物質の不適切な管理」に係る改善について資料をとりまとめ、平成 29 年 1 月 26 日に原子力規制庁と面談を行った。
- ・この資料は、核燃料物質の不適切な管理（長期間グローブボックスに保管していたこと）に関する改善計画をまとめたもので、この資料の中で「貯蔵庫における保管が好ましくないが、直ちに処理することができないアイテム（澱物と記録されたもの、樹脂製の袋の膨れにより戻されたもの）については状態の変化を監視することとし、既存のグローブボックスを貯蔵設備に転用して対象アイテムを監視しながら保管することが必要である」ことを説明した。
- ・この面談で提示した資料は、安全・核セキュリティ統括部から各拠点の関係者に電子メールで情報共有され、情報を受信した大洗研究開発センター安全管理部施設安全課長は、福島燃料材料試験部関係者に電子メールで情報提供（メール転送）した。燃料試験課は、電子メールを受信し情報を入手したものの、面談結果の周知であり、本文に当該事項に関する記載がなかったため、添付された資料に記載された「樹脂製の袋の膨れ」について認識できなかった。
- ・その後、核燃料サイクル工学研究所プルトニウム燃料技術開発センターは、先の面談でグローブボックスを貯蔵施設とすることについて追加説明を求められたことから、平成 29 年 2 月 9 日に原子力規制庁と面談を行った。この面談で提出した資料には、アイテム「6476」について、「樹脂製の袋の膨れのため貯蔵庫から戻されたもので、履歴不明のスクラップが含まれていることから、含有する有機物の放射線分解ガスによって樹脂製の袋の膨れが生じたことが考えられる」との記載があった。
- ・安全・核セキュリティ統括部は、当該資料に樹脂製の袋の膨れについての補足説明があるものの、その面談の趣旨が「グローブボックスを貯蔵設備に変更する」という観点での説明であったことから、各拠点の関係者への情報提供を行わなかった。

(3) 平成 29 年 6 月 6 日に貯蔵容器 No. 1010 の蓋を開け破裂に至った経緯

① 核燃料物質の不適切な管理の是正（計画段階）に関する経緯

- ・燃料試験課は、原子力科学研究所及びその後の核燃料サイクル工学研究所の核燃料物質の不適切な管理に関する保安検査での指摘（(2)③の経緯を参照）を受け、燃料研究棟の核燃料物質の状況を調査したところ、同様の状況であることを確認した。
- ・燃料試験課は、燃料研究棟本体施設・特定施設共通作業要領の軽微異常報告書作成要領に基づき、平成 28 年 12 月 7 日に軽微異常報告書（グローブボックス及びフード内における核燃料物質の不適切な管理）を発行した。
- ・平成 28 年 12 月 12 日に大洗研究開発センターで開催された平成 28 年度第 34 回不適合管理分科会において、不適合管理分科会登録票（グローブボックス及びフード内における核燃料物質の不適切な管理）が審議された。この際、不適合管理分科会において部内管理であるランク C の不適合事象と判断された。
- ・燃料試験課は、当該事象について不適合報告書（ランク C）を起案（平成 28 年 12 月 22 日部長承認）

するとともに、平成 29 年 1 月 11 日、AGS メモ（燃料研究棟における核燃料物質の不適切な管理の改善計画）を発行し、改善方針、処理分類及び改善スケジュールを明確にした。この中で不適合の除去として、「グローブボックス及びフードに保管され不適切な管理状態にある核燃料物質について、処理（安定化）が不要なものは平成 29 年 6 月末を目途に処理し、処理（安定化）が必要なものは平成 29 年 12 月末を目途に処理し、貯蔵施設に貯蔵又は廃棄施設に廃棄する」こととした。

- 平成 28 年 12 月 26 日の原子力規制庁との面談の結果、保安規定違反の疑義があるとの指摘を受けたことから、不適合報告書（ランク C）を策定していた当該事象について、燃料試験課長は、平成 29 年 1 月 12 日に所長の承認を必要とする不適合報告書（ランク B）を起案（平成 29 年 1 月 31 日 所長承認）した。
- 燃料試験課は、前述した AGS メモ（燃料研究棟における核燃料物質の不適切な管理の改善計画）及びその後発行した AGS メモ（燃料研究棟における核燃料物質の不適切な管理の改善に係る集番・容器変更計画）に基づき、平成 28 年度は作業期間を平成 29 年 1 月 19 日～3 月 31 日（平成 29 年 1 月 17 日付け）、平成 29 年度は作業期間を平成 29 年 4 月 6 日～4 月 28 日（平成 29 年 4 月 5 日付け）、平成 29 年 5 月 1 日～5 月 31 日（平成 29 年 4 月 24 日付け）及び平成 29 年 6 月 1 日～6 月 30 日（平成 29 年 5 月 24 日付け）として、それぞれ「放射線作業連絡票」を作成し、作業を実施した。
- 本作業に当たり、グローブボックス等に存在する核燃料物質のうち使用していないものを全て貯蔵設備に収納するためには、既に貯蔵容器に貯蔵されている核燃料物質の整理・集番（取扱要素の再編成）によって貯蔵容器の空きを作る必要があった。貯蔵容器の開封・内部点検や核燃料物質の整理・収納の作業場所については、使用変更許可申請書のフード（H-1）の使用目的及び使用方法に「貯蔵容器点検等の作業を行う」との記載があり、その作業には同使用許可変更の経緯から「密封線源等の処理として貯蔵容器等から核燃料物質を取り出す場合の汚染検査」が含まれることから、フード（H-1）での作業を計画した。
- 一方、燃料研究棟本体施設作業要領には、フードの安全作業などの一般的な事項は記述されているが、前項の貯蔵容器点検（フードで貯蔵容器の蓋を開放して内容物を確認すること）に加え、整理・集番によって貯蔵容器の空きを作る作業等の具体的な手順は明確になっていなかった。
- 作業計画立案に当たり、1 回の作業又は 1 週間以内の連続作業の実効線量が 1 mSv を超える場合には、「放射線作業届」を作成する必要がある。燃料試験課では、平成 29 年 6 月の作業に伴う線量の検討として、事前の作業環境の放射線測定（5 月 11 日）の結果により、本作業で使用する各グローブボックス及びフードは、表面線量率が 20 μ Sv/h 以下であると評価するとともに、平成 29 年 1 月以前（不適合除去前）に実施した同種・類似の作業の実績・作業経験に基づき、当該作業の線量は 0.1mSv 未満と評価した。このため「放射線作業届」は作成せず、「放射線作業連絡票」にて計画を起案した。

なお、不適合の除去に係る平成 29 年 1 月～5 月の作業でも、同様の理由で「放射線作業届」は作成せず、「放射線作業連絡票」にて計画起案し、作業を実施している。

- また、大洗研究開発センターでは、「日常的に反復・継続して行われることが少ないため作業員が習熟する機会が少ない作業」を「非定常作業」と定義し、その定義に該当する場合には「非定常作業計画書」を作成し、作業手順等を検討・確認していくこととしている。燃料試験課では、核燃料物質等の取扱作業は過去 5 年間に 6 回（直近は平成 28 年 3 月）実施していること、また、フードでの貯蔵容器の取扱いは、核燃料物質の棚卸しとして年 1 回定期的に行っていることから、当該

作業は「定常作業」であると判断し、「非定常作業計画書」は作成しなかった。また、平成 29 年 1 月～5 月の同作業でも「非定常作業計画書」は作成せず、定常作業として計画起案し、作業を実施した。

なお、当該貯蔵容器の蓋を約 20 年間開けていなかったことについて、過去に蓋を開けたことがあるという認識はあったものの、当該期間開けていなかったという認識はなかった。

- ・燃料研究棟に存在する核燃料物質に関する情報については、別途、燃料研究棟の廃止措置に向けた協議（平成 28 年 9 月 26 日）の中でそれらの安定化処理について議論がなされたが、「貯蔵容器内の核燃料物質は安定化処理がなされているか、金属製の容器にアルゴンガスを封入し保管している」との前提で、安定化処理の対象は、貯蔵容器の内容物ではなく、グローブボックス内に保管されている核燃料物質のみとされた。また、燃料試験課では、その情報に加え、作業計画段階でニトロセルロースの劣化・変質による発火の危険性を懸念し、同種の材料が使われていないことを、現在勤務する実験実施者に確認していた。以上から、燃料試験課では、「貯蔵設備内の核燃料物質は必要な安定化処置が行われた上で貯蔵されており、その取扱上のリスクは、グローブボックス内の安定化処理が必要な核燃料物質に比べて低い」との認識（思い込み）を持った。
 - ・また、燃料試験課では、一部の貯蔵容器が少なくとも数年以上点検されていなかったことから、材質劣化等による局所的な汚染の可能性については注意していたものの、通常の汚染検査等で対応可能なものとの認識にとどまり、樹脂製の袋が破裂して室内全域に核燃料物質が飛散するような大規模汚染は想定していなかった。
 - ・以上の貯蔵容器の内容物に関する事前調査を踏まえ、今回の作業計画立案に当たり、燃料研究棟本体施設・特定施設共通作業要領に定める一般安全チェックリストやリスクアセスメント等において、破裂・飛散等のリスクを「該当なし」と判断した。また、放射線作業に当たって、被ばく低減措置として汚染検査や発見時の連絡、作業前 TBM による作業時間の短縮等に配慮するとともに、個人被ばく管理用機器として OSL バッジ装着と貯蔵室等での作業員のポケット線量計装着、防護装備として半面マスク装着、特殊作業衣等を基本装備とすることを計画した。このように、燃料試験課では、破裂・飛散による大規模汚染の事故を想定できず、その防護策について十分な検討はなされなかった。
 - ・燃料試験課では、上記の計画を承認し、全 80 個の貯蔵容器のうち、事故発生前日までに 28 個の点検、空きスペースの整理等の作業を実施した。
- ② 核燃料物質の不適切な管理の是正（当日の作業）に関する経緯（樹脂製の袋が破裂するまで）
- ・平成 29 年 6 月 6 日に作業員 5 人は、前項①のとおり、放射線作業連絡票に従い、密封状態の核燃料物質を取り扱う一般的な防護装備等を装着して作業に着手した。
 - ・当日は、貯蔵容器 No. 1007、1008、1010 のほか、これまでに確認した No. 1009、1025 も確認した。
 - ・作業員 E が、貯蔵容器 No. 1010 の蓋を開ける作業に当たった。最初に貯蔵容器の 6 本のボルトを緩めた際に蓋が持ち上がってきた。さらに、4 本を対角線上に外した後、残りの 2 本のボルトを緩めた際に、貯蔵容器の内圧が抜ける音が「シュ」とした。作業員 E は、一般知識として、室温が比較的高いときに貯蔵容器の中から空気が抜けたのではないかと思い、蓋と貯蔵容器本体の隙間全周についてスミヤをとった。貯蔵容器に汚染が無かったことから、その内部の樹脂製の袋は破れていないと考え、作業を継続した。このとき、作業員 E は、樹脂製の袋の膨らみが破裂に至るほどの加圧状態にあるとは思っていなかった。

- ・作業員 E が片手で蓋を持ちながら、残り 2 本のボルト（最後の 1 本）を外したと同時に樹脂製の袋が破裂した。

(4) 事故後、発災現場及び燃料研究棟から作業員を退出させた経緯

① 作業員 5 名を 108 号室から退出させるまでに 3 時間を要したことに関する経緯

- ・6月6日の11時15分頃に事故が発生し、発災場所にいた作業員は速やかに通報連絡を行い、その後、現場指揮所と連絡を取って事故の状況を伝えた。現地対策本部及び現場指揮所においては、発災場所の作業員との連絡により、負傷者がいないことなどを確認するとともに、作業員の足下の空間線量率が $70 \mu\text{Sv/h}$ 程度であったこと、108号室内のPuダストモニタの値が空气中濃度限度の10分の1未満であり、事故発生直後は平常値であったこと、内部被ばく防護装備として半面マスクを着用していたことなどから、放射線安全取扱手引に定める「緊急避難時の目安」（実効線量 15mSv ）を超えるおそれはないと判断し、汚染拡大防止措置（グリーンハウス設置）を優先することとした。
- ・グリーンハウス設置の指示は11時54分頃、グリーンハウスの設置完了は14時29分頃であり、設置指示から設置完了までに約2時間半を要した。その前半は、①設置場所の検討及び汚染検査、②設置寸法の検討及びそれに合う資材選定の準備であり、約1時間を要した。グリーンハウスの資材は、燃料研究棟の最寄りの照射燃料試験施設に共用資材として保管しているため、資材準備には車両への積み込み、積み下ろし及び運搬の時間も含まれる。後半の③グリーンハウス組立ては、現物合わせを行いながらであったが、1時間15分程度であり、急ぐ必要がない通常の設営作業よりむしろ短時間で完了した。
- ・グリーンハウス設置完了後、14時30分から作業員は速やかに108号室からの退出を開始しているが、事故発生（11時15分頃）から最初の作業員退出開始までに約3時間の時間を要した。室内に居る間、作業員は、自身の移動による室内の汚染拡大を抑制するため、室内を退出するまで自身の立ち位置に待機していた。

② 作業員の防護具を脱装した時の経緯

- ・108号室からは、作業員 A、B、C、D、E の順に退出した。作業員 A は、特殊作業衣及び帽子の汚染レベルは低く、これら脱装後に半面マスクを外し、退出を完了した。脱装後の頭部、顔面等の身体には汚染は検出されていなかった。
- ・作業員 B、作業員 C、作業員 D 及び作業員 E の 4 名は、グリーンハウス 1 で半面マスクを交換したが、顔面の拭き取りや汚染を固定するなどの措置は行っていなかった。また、グリーンハウス 2 を出てから除染開始までの間に鼻スマヤを採取した。
- ・なお、交換後の半面マスク面体の顔面との接触部にも汚染が検出された。これは、7.2 の推定原因の調査において、会話、発汗等により半面マスクの密着性が低下し、吸入摂取に至った可能性が高いとしていることから、脱装前の時点で既に半面マスク内に汚染が存在していたためと思われる。

③ 除染用シャワーが機能しなかったことに関する経緯

- ・燃料研究棟の除染用シャワーは、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施行規則第 14 条の 7（使用施設の基準）の(5)に「汚染検査室を設けること」が定められており、当該汚染検査室に除染のための洗浄設備を設けている。当該設備の点検について、3 か月巡視点検として年 4 回実施しており、このうち 2 回を大洗研究開発研究センター放射線障害予防規程に基づく定期自主検査結果として報告している。

- ・上水の減圧弁の水圧が安定せず水の出方が思わしくなかったが、主要な供給先である給湯室、トイレの手洗い等の使用に問題なかったことから、減圧弁を利用し続けた（燃料試験課員は、予備の減圧弁を準備していたが、故障するまでは交換しないと判断していた。）。
- ・除染用シャワーの点検は、シャワーから水が出ることを確認するのみで、一定時間の使用に耐えられるかどうかの確認ではなかったため、減圧弁の不調による影響を確認することができなかった。
- ・除染用シャワーを用いた身体除染は、汚染が検出された4人の作業員に対して行われた。作業員はB、C、E、Dの順番で除染用シャワー室に入り、一人で除染を行った。作業員Bは、最初の1～2分間は除染用シャワーが使用できたが、その後使えなくなったため、除染の補助者が機械室（非管理区域）の工業用水口（ろ過水）にホースを接続して燃料研究棟の除染用シャワー室まで引き伸ばし、作業員一人でホースを持ちながら除染を行った。作業員Cは、除染用シャワーが回復したため、シャワーを用いて除染することができた。作業員E及びDは、再び除染用シャワーが使えなくなったため、当該ホースを用いて一人で除染を行った。
- ・作業員の除染が終わる度に、除染用シャワー室にいた補助者や放射線管理第2課員によって身体の汚染検査が行われ、汚染が残存している場合は除染を繰り返した。
- ・作業員の身体汚染がほぼなくなった段階で、放射線管理第2課員が身体サーベイを行った結果、 α 、 β とも検出下限値未満であることが確認され、作業員は燃料研究棟の管理区域を退出した。

表8.1.1-1 燃料研究棟で業務を実施していた組織の変遷 (1/2)

年月		燃料研究棟施設管理部署の変遷	燃料研究棟研究主体部署の変遷
昭和49年	2月	燃料研究棟設置	東海研究所 燃料工学部 プルトニウム燃料研究室 (S42. 11. 1～S63. 3. 31)
	4月		
	10月		
昭和50年	4月		
	10月		
昭和51年	6月		
	10月	大洗研究所 管理部 プルトニウム技術開発室 (S51. 6. 1～H17. 9. 30)	
昭和52年	4月		
	10月		
昭和53年	4月		
	10月		
昭和54年	4月		
	10月		
昭和55年	4月		
	10月		
昭和56年	4月		
	10月		
昭和57年	4月		
	10月		
昭和58年	4月		
	10月		
昭和59年	4月		
	10月		
昭和60年	4月		
	10月		
昭和61年	4月		
	10月		
昭和62年	4月		
	10月		
昭和63年	4月	東海研究所 燃料・材料工学部 プルトニウム燃料研究室 (S63. 4. 1～H5. 3. 31)	
	10月		
平成元年	4月		
	10月		
平成2年	4月		
	10月		
平成3年	4月		
	10月		
平成4年	4月		
	10月		
平成5年	4月	東海研究所 燃料研究部 TRU燃料研究室 (H5. 4. 1～H10. 4. 8)	
	10月		
平成6年	4月		
	10月		
平成7年	4月		
	10月		
平成8年	4月	東海研究所 エネルギーシステム研究部 新型燃料燃焼研究室 (H10. 4. 9～H11. 3. 3. 1)	
	10月		
平成9年	4月		
	10月		
平成10年	4月	東海研究所 エネルギーシステム研究部 新型燃料燃焼研究室 (H10. 4. 9～H11. 3. 3. 1)	
	10月		

日本原子力研究所

表8.1.1-1 燃料研究棟で業務を実施していた組織の変遷 (2/2)

年月	燃料研究棟施設管理部署の変遷	燃料研究棟研究主体部署の変遷		
平成11年	大洗研究所 管理部 プルトニウム技術開発室 (S51.6.1~H17.9.30)	東海研究所 エネルギーシステム研究部 新型燃料燃焼研究グループ (H11.4.1~H17.9.30)	日本原子力研究所	
				4月
10月				
平成12年				4月
				10月
平成13年				4月
				10月
平成14年				4月
				10月
平成15年				4月
	10月			
平成16年	4月			
平成17年	10月	原子力機構発足	日本原子力研究開発機構	
平成18年	大洗研究開発センター 燃料材料試験部 ¹⁾ 燃料製造試験課 (H17.10.1~H23.3.31)	原子力基礎工学研究部門 燃料・材料工学ユニット 超ウラン元素燃料挙動評価研究グループ (H17.10.1~H18.9.30)		
				4月
10月				
平成19年		4月		原子力基礎工学研究部門 燃料・材料工学ユニット 超ウラン元素燃料高温化学研究グループ (H18.10.1~H24.3.31)
平成20年		4月		
平成21年		4月		
平成22年		4月		
	10月			
平成23年	4月	原子力基礎工学研究部門 燃料・材料工学ユニット 燃料高温科学研究グループ (H24.4.1~H26.3.31)		
				10月
平成24年	4月		大洗研究開発センター 福島燃料材料試験部 ³⁾ 燃料試験課(H24.10.1~H26.3.31)	
				10月
平成25年	4月		原子力科学研究部門 原子力基礎工学研究センター 燃料・材料工学ユニット 燃料高温科学研究グループ (H26.4.1~H27.3.31)	
				10月
平成26年	4月			福島研究開発部門 ⁴⁾ 大洗研究開発センター 福島燃料材料試験部 燃料試験課(H26.4.1~H28.3.31)
平成27年	4月			原子力科学研究部門 原子力基礎工学研究センター 燃料・材料工学ディビジョン 燃料高温科学研究グループ (H27.4.1~現在)
平成28年	4月			
		10月		
平成29年	4月	高速炉研究開発部門 ⁵⁾ 大洗研究開発センター 福島燃料材料試験部 燃料試験課(H28.4.1~現在)		

- 1) 法人統合時、核燃料サイクル開発機構の組織であった燃料材料試験部へ移設
- 2) 燃料製造試験課廃止。既存の燃料試験課へ燃料研究棟施設管理業務を移設
- 3) 部名変更
- 4) 部門制への移行
- 5) 福島燃料材料試験部の他部門への移設

年	昭和						平成																													
	57	58	59	60	61	62	63	元年	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	22	23	24	26	27	28	29			
【燃料研究棟】					室長A				室長B							室長C		室長D		室長E		室長F		室長G												
歴代の アルトニウム技術開発室長 ・H17.10から燃料製造課 ・H23.4から燃料試験課																																				
1. 実験済核燃料物質 (スクラップ)の酸化処理																																				
2. Pu・U混合炭化物等の 酸化加熱処理																																				
3. 冷温焼却法によるα 焼却炉の技術開発 (エポキシ樹脂の効果 的な処理方法)																																				
4. 貯蔵容器No.1010へ のX線回折用試料の封 入																																				
5. 貯蔵容器の点検等																																				

図8.1.1-1 酸化加熱処理の技術開発と核燃料物質(X線回折測定済試料)の貯蔵に関する変遷

平成 29 年 6 月 8 日

児玉

理事長指示

○大洗燃料研究棟での内部被ばくを踏まえて、全役員は配下職員全員に以下の事を本日中に周知・徹底すること

① 安全最優先の再徹底

- ・ 核燃料物質の取扱う際に、安全確保がされていることを再確認すること
- ・ 同様の事故を発生させないため、核燃料物質を扱う類似の全作業を別途指示があるまで停止すること

② 原子力の専門家集団としての社会的責任

- ・ 専門家としての自覚をもち、自らの行動が社会的責任を有することを再認識すること

③ 危険予知活動の徹底

- ・ 潜在的なリスクを考え、リスク低減を図り行動することを徹底すること

○また、「自らのマネジメントに改善すべき点はないか?」、「ガバナンスが効いていない点はないか?」を至急再点検のこと

○本件、機構の存続にも影響を及ぼす重大な、深刻な事態と認識して最優先項目として上記の対応をすること

○具体的な作業にあたっては、各現場に下記を指示すること

- ・ 放射性物質を取り扱う自覚と緊張感を持つこと
- ・ 施設・設備、作業環境、作業手順を徹底的に点検した上で作業に入ること
- ・ 管理者は上記ができていない作業は許可しないこと

以上

核燃料物質の貯蔵、取扱作業等に関する総点検の結果について

1. 法令報告（第2報）の概要と調査結果の追加

大洗研究開発センターで発生した燃料研究棟における汚染について、現場復旧及び原因究明のための作業を続けているところであるが、類似事象の再発防止の観点から、現状で把握されている原因や管理上の問題点を踏まえ、機構全体における核燃料物質の貯蔵、取扱作業等の管理状況を再確認するため総点検を実施した。

法令報告（第2報）においては、機構の有する核燃料物質を貯蔵又は保管している容器（以下「貯蔵容器等」という。）を対象に、Puと有機物との混在等により、燃料研究棟で破裂した当該貯蔵容器と同様の可能性があるものを幅広く抽出し、概略は以下のとおりであった。

- ① 対象とする貯蔵容器等の総数は、13,878個
(大洗センターの燃料研究棟と照射燃料試験施設のものとは含まない。)
- ② ①のうち、Puを含む貯蔵容器等であって、有機物の混在又は樹脂製の袋や容器に封入されているおそれがあり、貯蔵容器等内の点検が実施されていないもの（当該容器と同様の可能性があるもの）は、349個

ただし、法令報告（第2報）の時点では、大洗研究開発センターの照射燃料試験施設及び燃料研究棟の貯蔵容器等については、燃料研究棟の現場復旧等の作業を優先するため、集計に含まれていなかった。

この2施設の貯蔵容器等を追加すると、総数は14,770個、燃料研究棟で破裂した当該貯蔵容器と同様の可能性があるものは470個となった。

2. 抽出したもの（470個）の保管状況等

燃料研究棟で破裂した当該貯蔵容器と同様の可能性があるものとして抽出した470個について、各々保管状況やガス発生等の観点で確認、評価し、以下のとおり整理した。

- ① 燃料研究棟にある同種の容器45個については、所定の貯蔵庫に識別して安全に保管されている。これらについては、別途記録等を詳細に確認しており、原因究明の結果と再発防止対策を踏まえ、適切に対応していく。
- ② 燃料研究棟以外にある貯蔵容器等のうちセル、グローブボックスで保管されている290個については、ガス発生のおそれや破裂のおそれ、破裂した場合の危険性の観点で確認、評価し、安全に保管されていることを確認した。
- ③ 燃料研究棟以外にある貯蔵容器等のうち99個については、以下に示すように内容物及び管理状況を確認した。
 - i) ガス発生のおそれのないもの（核燃料物質と有機物が直接接触していない）が19個
 - ii) ガスの発生を定期点検等で確認しているもの（貯蔵容器等が樹脂製の袋に封入等）が41個
 - iii) 低Pu富化度のペレットでありガス発生のおそれは低いものが39個
- ④ 極少量（Pu量；数十 μg 以下）のPuを含む標準溶液等（アンプルに入った市販品等）が36個

3. 追加調査の実施

燃料研究棟の当該貯蔵容器の破裂の原因が α 線によるエポキシ樹脂の放射線分解に伴うガスの発生であることから、 α 線の放出に着目して追加調査を行った。

具体的には、原子力機構において取扱量が少量であることから総点検の対象としていなかった核燃料物質以外の α 線放出核種やUの同位体のうち比放射能がPuと大差ないU-233を含む貯蔵容器等について、ガス発生のおそれや破裂のおそれ、破裂した場合の危険性の観点で確認、評価し、現在の保管状況で安全に保管されていることを確認した。

4. まとめ

燃料研究棟にある同種の容器については、今回の事故が発生するまでに開封したものも含めて、別途記録等を詳細に確認しており、原因究明の結果と再発防止対策を踏まえ、適切に対応していく。また、その他の貯蔵容器等については、現在の保管状況で喫緊の対策を要するものはなかったが、核燃料物質の貯蔵又は保管に係る核燃料物質の管理の改善を図っていく。