

JAERI-M

9263

放射性廃棄物容器としてのPIC容器の
安全性試験(II)

— PIC容器の樹脂固化体収納容器としての
適応性および遮蔽性試験 —

1981年1月

石崎 寛治郎*・土尻 滋・田村 保彦**・本田 忠博***
森山 昇・浅見 晃*・峯岸 敬一・和達 嘉樹
荒木 邦夫・天野 恕

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

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

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

放射性廃棄物容器としてのPIC容器の安全性試験（Ⅱ）

—PIC容器の樹脂固化体収納容器としての 適応性および遮蔽性試験—

日本原子力研究所東海研究所環境安全研究部

石崎寛治郎^{*}・土尻 滋・田村保彦^{**}・本田忠博^{***}

森山 昇・浅見 晃^{*}・峯岸敬一^{*}・和達嘉樹・荒木邦夫

天野 恵

(1980年12月11日受理)

日本原子力研究所と秩父セメント㈱で共同開発したPIC容器の放射性廃棄物プラスチック固化体への適応性を、主として、耐熱性の面から検討した。

使用したプラスチックは、熱可塑性樹脂としてポリエチレン、熱硬化性樹脂としてポリビニルエステルである。

- (1) PIC容器の、プラスチック固化体充填時の熱に対する最大の膨張および収縮ひずみは 55×10^{-6} と -180×10^{-6} で、材料の許容歪の2%以下に相当し十分な耐熱性を示した。
- (2) PIC容器のビルドアップ係数は $\mu\alpha$ で近似できた。
- (3) 輸送規準を満足する、200ℓ PIC容器の最大放射能収納量は140mCiであり、原子力発電所から発生する、放射性廃棄物の内、浄化系脱塩器の粉状樹脂については、更に遮蔽しなければならないが、主たる廃棄物である凝縮水浄化系脱塩器の粉状樹脂や濃縮廃液、粒状樹脂では、均一固化体の輸送容器としても使用可能である事が判明した。

* 秩父セメント株式会社

** 株式会社新潟鉄工所

*** 荘原インフィルコ株式会社

Safety Assessment of PIC Container Used for Radioactive Wastes (II)
—Application Tests of PIC Container to Plastic Solidified Wastes—

Kanjiro ISHIZAKI*, Shigeru DOJIRI, Yasuhiko TAMURA**,
Tadahiro HONDA***, Noboru MORIYAMA, Akira ASAMI*,
Keiichi MINEGISHI*, Yoshiki WADACHI, Kunio ARAKI
and Hiroshi AMANO

Division of Environmental Safety Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received December 11, 1980)

Applicability of PIC (Polymer-Impregnated-Concrete) container, developed by JAERI and Chichibu Cement Co. Ltd., to plastic solidified wastes was tested, mainly from thermal and shielding points of view.

Plastics used were polyethylene resin and polyvinyl ester as representative of thermoplastic and that of thermosetting one, respectively.

Results obtained were as follows.

- (1) Thermal expansion and shrinkage of PIC container owing to heat of curing were only 55×10^{-6} and -180×10^{-6} , within 2% of maximum permissible strain of PIC respectively, indicating that the container has a good property of heat resistance.
- (2) Build-up factor of the container can be approximated by μx , where μ is the linear absorption coefficient and x the thickness of the container wall.
- (3) So far as it satisfies the current transport regulations, the PIC container can include the maximum radioactivity of 140 mCi, dispersed uniformly in the plastics. Therefore, it serves not only as container but also as transportation cask, for plastic solidified radioactive wastes such as evaporator concentrate and ion exchange resins arisen from nuclear power plants, except for powdered resin from CUW filter.

Keywords: PIC Container, Radioactive Wastes, Shielding, Polyethylene, Polyvinyl Ester, Thermal Expansion, Thermal Shrinkage, Build-up Factor, Transportation Cask, Transport Regulation

* Chichibu Cement Co. Ltd.

** Niigata Engineering Co. Ltd.

*** Ebara Infilco Co. Ltd.

目 次

1. 序 論.....	1
2. 実験方法.....	2
2.1 供試 PIC 容器の作製と仕様.....	2
2.2 ポリエチレン固化体充填方法.....	2
2.3 ビニルエステル樹脂固化体充填方法.....	2
2.4 遮蔽能力の測定.....	3
3. 結果と考察.....	3
3.1 ポリエチレン固化時の PIC 容器および固化体の性状.....	3
3.2 ビニルエステル樹脂固化時の PIC 容器および固化体の性状.....	4
3.3 遮蔽能力の測定結果.....	5
3.4 PIC 容器のビルドアップ係数.....	5
3.5 PIC 容器に固化体として収納可能な放射能量.....	7
3.6 PIC 容器の実廃棄物への適応性.....	9
4. 総 括.....	10
参考文献.....	11

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental	2
2.1 Specification and Preparation of PIC Container	2
2.2 Packaging of Polyethylene Product	2
2.3 Packaging of Polyvinyl Ester Product	2
2.4 Measurement of Shielding Effect	3
3. Results and Discussions	3
3.1 Compatibility of Polyethylene and PIC Container at Charging	3
3.2 Compatibility of Polyvinyl Ester and PIC Container at Curing	4
3.3 Shielding Effect of PIC Container	5
3.4 Build-Up Factor of PIC Container	5
3.5 Maximum Radioactivity Content in PIC Container	7
3.6 Feasibility Assessment of PIC Container for Actual Radioactive Wastes	9
4. Conclusion	10
References	11

1. 序 論

核燃料サイクルの各段階で発生する放射性廃棄物を安全に処理処分することは、原子力の開発にとって欠かせない事柄である。

放射性廃棄物の処分に関しては、現在海洋処分と陸地処分が考えられており、いづれの場合にしろ放射性廃棄物の健全なパッケージ化が安全な処分上重要な課題となっている。

従来パッケージ化^{*}の問題は廃棄物それ自身の処理の問題に比べて軽視されていたようであったが、種々雑多な放射性廃棄物のパッケージ化に対処するにはドラム缶のみでは対応しきれなくなり、多重構造容器等の必要性が呼ばれ始めた。特に発電所においては廃棄物の発生量の低減化が重要な課題となり、廃棄物の発生量を低減化するための技術が開発され始めたが、その反面廃棄物の放射能濃度は高くなり、遮蔽能力のある容器の開発が要望されてきている。

また海洋投棄に際して国際原子力機関（IAEA）は1978年に特別許可を与えるための勧告を改訂¹⁾し、「投棄物のパッケージ化の方法を、放射能の浸出が合理的に達成できる範囲で最小にするように工夫すべきこと」としており、この面からも耐浸出性および耐久性のよい容器の開発が要望されている。

このような情勢に対処するための原研および秩父セメント㈱では、1975年より耐圧性、耐食性、耐熱性、耐浸出性および遮蔽性のよい多重構造容器の開発に着手し、プラスチックを含浸した強度の高いコンクリート容器（PIC容器）が上記の特性を満足することをつきとめ、その製造方法を確立すると同時に、耐久性に関する種々の確認試験を実施してきた。²⁾

前報の「放射性廃棄物容器としてのPIC容器の安全性試験（I）³⁾」では、主として浸出性および耐圧性の実証試験を高水圧浸出試験装置により実施した結果について述べた。

本報告では、主として放射性廃棄物の固化処理のなかで最も高い温度で容器に充填されると考えられるプラスチック固化（熱可塑性樹脂であるポリエチレンでは約160℃）に対する耐熱性を含めた適応性および遮蔽能力に対する確認試験の結果について述べる。遮蔽試験では均一固化体に対する遮蔽能力、ビルドアップ係数の検討、雑固体などで放射能が局在した場合に対する遮蔽能力および最大固化放射能量などを検討し、合わせて実廃棄物への適応性についての検討を行った。

我国では未だ多重構造容器についての基準は決まっておらず、今後の開発事項とされている。従って本研究は多重構造容器の規準化に資する面も多大であると考えられる。

*パッケージ化とは容器に収納された固化体をいう。

2. 実験方法

2.1 供試PIC容器の作製と仕様

容器は前報²⁾と同一の配合と方法で作製した鋼纖維補強ポリマー含浸コンクリート* 容器を使用した。ポリエチレン固化装置は 50ℓ ドラム缶に合せて設計してある、このため、プラスチック固化試験に用いた PIC 容器は 50ℓ ドラム缶に近い寸法を有するモデル容器（200ℓ ドラム缶の約 $\frac{2}{3}$ 寸法で、以後 60ℓ 容器と略記する。）とした。容器の寸法と形状は遮蔽能力の測定の項（図 2）に、コンクリートの示法配合と含浸重合工程を表 1 および図 1 に示す。

2.2 ポリエチレン固化体充填方法

PIC 容器に充填した熱可塑性樹脂の一種であるポリエチレン固化体は、中間規模のプラスチック固化実験装置を使用して製作した。本装置は 2 軸スクリュー型押出機を主体とした処理能力 10 kg/h の連続溶融固化装置で、主に模擬廃棄物調整供給系、遠心脱水系、乾燥処理系および連続溶融固化系から構成されている。模擬廃棄物は粉状樹脂 (Fe_2O_3 を 10 % 含む) と粒状樹脂を用い図 2 に示すプロセスによりポリエチレン固化体を製作した。ポリエチレンの注入状況を写真 1 に示す。

製作した粉状樹脂および粒状樹脂固化体の模擬廃棄物混入率と RI 混入量は、結果と合せて表 2 に示す。固化体中への廃棄物混入量は通常の混入率である 50% とした。実験はポリエチレン固化体の PIC 容器中の固化時の性状および RI 遮蔽性に主眼をおいて行った。固化プロセスに関しては、固化体の収縮ひずみを緩和するためポリエチレンを注入後保温器により 5 日程度徐冷しているが、本実験では室内放冷による急冷を行い PIC 容器との両立性を検討した。また、ポリエチレン注入後の PIC 容器外面の熱ひずみは、容器胴部外表面の中心の位置で、東京測器研究所製 TDS 256 DC 型自動ひずみ測定装置により測定した。

2.3 ビニルエステル樹脂固化体充填方法

PIC 容器に充填した熱硬化性樹脂の一種である不飽和ポリエステル系ビニルエステル樹脂固化体は中型実験装置を用いて製作した。本装置は 300, 1000 rpm の回転能力を有する 500 W のモータと 3 枚 2 段羽根付の攪拌棒からなっている。（写真 2 参照）

固化体は、予め助触媒を混合したビニルエステル樹脂中に模擬廃棄物を十分に混合しながら

* : 鋼纖維補強ポリマー含浸コンクリートは、英語で Steel Fiber Reinforced Polymer - Impregnated Concrete と称する。従って、SFPICTと略記するのが正しいが本報では単に PIC と記す。

添加して乳化させた後、触媒を加えてPIC容器中で作成した。

固化体は、模擬廃棄物として濃縮廃液と廃樹脂を想定したコールドによる水単独、粒状イオン交換樹脂およびRIを混入した粒状イオン交換樹脂の3個を製作した。固化体の配合量は結果と合せて表3に示す。

ホット固化体の製作手順は下記の要領で実施した。

- (1) 試験前の容器重量を測定する。
- (2) 容器をフード内に設置し、治具をとりつける。
- (3) 樹脂6ℓおよび助触媒7mℓをPIC容器中に注入し、300 rpmで攪拌しながら水を飽和させたイオン交換樹脂約5ℓを徐々に添加して乳化させる。
- (4) ^{60}Co を直接注入(写真3参照)し、残りのイオン交換樹脂1ℓを徐々に添加した後、触媒90mℓを加え、数分間良く攪拌混合させる。
- (5) 以上の作業が終了したら直ちに攪拌棒を取りだして攪拌を停止する。この時ビニールシートをしいておき、その口にウエスを配置してRIの滴下拡散を防止する。
- (6) 固化体と容器外壁の温度変化をCA熱伝対により測定する。
- (7) 翌日蓋を接着して表面線量率と重量測定を行う。

2.4 遮蔽能力の測定

PIC容器の遮蔽能力の測定として、200ℓと60ℓのPIC容器について ^{60}Co 線源を図3に示す4または7の線源位置に設置(写真4参照)し、次いで容器表面および1mの位置の線量率を各10点測定した。使用した ^{60}Co 線源は日本アイソトープ協会から購入したものであり、23mm ϕ × 47mm^bのガラスびんの中に $^{60}\text{Co}(\text{NO}_3)_2$ として4.77mCi(液量0.625mℓ)含むものである。線量率の測定は、容器表面に密着して測定するため一般に使用されているGM管式サーベイメータ(富士電気社製NSM 15201型)により行った。(写真5参照)しかし、GM管の測定値が10mR/h以上の場合には精度が低下するため、電離箱式サーベイメータ(アロカ社製ICS 203型)を使用して求めた線量率補正曲線(図4)によりGMの測定値を測定した。

3. 結果と考察

3.1 ポリエチレン固化時のPIC容器および固化体の性状

PIC容器中のポリエチレン固化試験結果を表2に示す。2軸スクリューエクストルーダーからPIC容器中に注入される時のポリエチレンの温度は約160°Cであったが、PIC容器の外観に、ひび割れ時の肉眼観察上の異常はなく、最大の収縮ひずみが -180×10^{-6} 、膨張ひずみが 55×10^{-6} 程度を記録した。筆者らはすでに常温から200°Cの範囲でのPICの膨張・収縮がおよそ $15 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ であり、少なくとも 3000×10^{-6} 程度の膨張では全く異常のないこと

添加して乳化させた後、触媒を加えてPIC容器中で作成した。

固化体は、模擬廃棄物として濃縮廃液と廃樹脂を想定したコールドによる水単独、粒状イオン交換樹脂およびRIを混入した粒状イオン交換樹脂の3個を製作した。固化体の配合量は結果と合せて表3に示す。

ホット固化体の製作手順は下記の要領で実施した。

- (1) 試験前の容器重量を測定する。
- (2) 容器をフード内に設置し、治具をとりつける。
- (3) 樹脂6ℓおよび助触媒7mℓをPIC容器中に注入し、300 rpmで攪拌しながら水を飽和させたイオン交換樹脂約5ℓを徐々に添加して乳化させる。
- (4) ^{60}Co を直接注入(写真3参照)し、残りのイオン交換樹脂1ℓを徐々に添加した後、触媒90mℓを加え、数分間良く攪拌混合させる。
- (5) 以上の作業が終了したら直ちに攪拌棒を取りだして攪拌を停止する。この時ビニールシートをしいておき、その口にウエスを配置してRIの滴下拡散を防止する。
- (6) 固化体と容器外壁の温度変化をCA熱伝対により測定する。
- (7) 翌日蓋を接着して表面線量率と重量測定を行う。

2.4 遮蔽能力の測定

PIC容器の遮蔽能力の測定として、200ℓと60ℓのPIC容器について ^{60}Co 線源を図3に示す4または7の線源位置に設置(写真4参照)し、次いで容器表面および1mの位置の線量率を各10点測定した。使用した ^{60}Co 線源は日本アイソトープ協会から購入したものであり、23mm ϕ × 47mm^hのガラスびんの中に $^{60}\text{Co}(\text{NO}_3)_2$ として4.77mCi(液量0.625mℓ)含むものである。線量率の測定は、容器表面に密着して測定するため一般に使用されているGM管式サーベイメータ(富士電気社製NSM 15201型)により行った。(写真5参照)しかし、GM管の測定値が10mR/h以上の場合は精度が低下するため、電離箱式サーベイメータ(アロカ社製ICS 203型)を使用して求めた線量率補正曲線(図4)によりGMの測定値を測定した。

3. 結果と考察

3.1 ポリエチレン固化時のPIC容器および固化体の性状

PIC容器中のポリエチレン固化試験結果を表2に示す。2軸スクリューエクストルーダーからPIC容器中に注入される時のポリエチレンの温度は約160°Cであったが、PIC容器の外観に、ひび割れ時の肉眼観察上の異常はなく、最大の収縮ひずみが -180×10^{-6} 、膨張ひずみが 55×10^{-6} 程度を記録した。筆者らはすでに常温から200°Cの範囲でのPICの膨張・収縮がおよそ $15 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ であり、少なくとも 3000×10^{-6} 程度の膨張では全く異常のないこと

を報告している⁴⁾。したがって、ポリエチレン固化時のPIC容器の熱応力による膨張ひずみは、最大許容ひずみを 3000×10^{-6} としたときおよそ2%となり、無視できる程小さいと判定された。一方容器外壁面の温度は 33°C であった。

ポリエチレン固化体は、いずれも収縮によりPIC容器の内壁面からはく離していた。固化体の収縮はポリエチレン単独が最大（直径にしておよそ22 mm）であったが、固化体にクラックの発生は認められなかった（写真6参照）。模擬廃棄物を混入することによって収縮は小さくなつたが、粒状樹脂の上面中央部に小さなクラックが観察され、一方粉末樹脂固化体に関してはクラックの発生は認められなかった。粒状樹脂固化体に関してPIC容器からRIを含有した固化体を取り出し、容器内面の汚染検査を実施したところ、汚染のないことが確認された。すなわち、ポリエチレン固化体は冷却過程でRIを遊離しないことおよびPICとの付着力が低いことが判った。

以上の結果より、溶融ポリエチレン廃棄物を直接PIC容器中に注入して急冷固化したときに、容器は健全性を保持し、本実験ではドラム缶の場合に実施していたような、①容器内面への離型剤の塗付、②注入時の容器の加熱および③5日間程度実施していた徐冷などのはん雑な工程を省略しても支障のない見通しを得た。

3.2 ビニルエステル樹脂固化時のPIC容器および固化体の性状

ビニルエステル樹脂による放射性廃棄物の固化は、廃棄物中のRIを固定し飛散を防止すること、および安定した品質の固化体を得ることが肝要である。このためには、硬化時の発熱が悪影響を及ぼさないような硬化速度を得るに適した配合組成と、廃棄物を樹脂中に十分乳化させるような攪拌速度を確認する必要がある。

予備試験として、攪拌速度が 300 rpm 及び、1,000 rpm の条件でビニルエステルの固化試験を行って、ホット試験の操作手順を決定した。その結果目視による乳化状態に差がないので飛沫の発生しにくい攪拌速度の 300 rpm を選ぶこととした。ビニルエステル樹脂固化体の配合量と固化試験結果を表3に、固化時の反応温度曲線を図5～7に掲げる。

水を模擬廃液として使用した固化試験では、試験装置のホット試験に対する適合性を予見することと、攪拌時に飛沫の飛散がどの程度起こるかを調べる目的で実施した。その結果、混合物の注入量を約 12 ℥、攪拌機の回転数を 300 rpm として均一な固化体が作製でき、また飛沫の飛散も認められなかった。また、固化時は重合反応の最も活発な時期であるピーク反応温度の時間と仮定すると、水を使用した固化試験では 2 h となり、最高温度が 66.5°C、容器側面の最高温度が 2 h 遅れで 28.5°C となった。この反応経過から、本配合は本試験装置に適合するものと判定された。

粒状イオン交換樹脂の固化試験は、RIの注入方法を決定する目的で実施した。反応温度は 100°C になったが、固化体の外観はひび割れ、不均質な部分などが認められず良好であった。ホット試験では助触媒の添加量を減らして 100°C 以下を目標にした。RIの注入に関しては、飛散を防止するため模擬廃棄物を 80% 添加したところで注入し、さらに残りの廃棄物を添加混合することにした。

ホットの固化試験では約6 hで固化し固化体の最高温度も33 °Cとなり助触媒を10 mℓ使用して水を混入した固化実験よりもおだやかなものとなった。これは表3に示すように助触媒を7 mℓに減じたためと思われる。固化速度が遅くなると密度と粒径の大きい物質、たとえばイオン交換樹脂などの廃棄物は、分離凝聚して固化体の下部に沈降する傾向にあった。本試験結果によるとPIC容器側面の表面線量率（表4参照）は、容器の上部で13 mR/h、中央部で31 mR/h、中央部で31 mR/h、下部で18 mR/hの値を示した。この値は円筒形均一線源を仮定した場合の計算結果とよく一致した。のことより、固化所要時間は長かったにもかかわらず廃棄物の沈降はなく、良好で均一な固化体が得られたので適正な反応条件であることがわかった。固化時のPIC容器の側面温度は最高で34.5 °Cと低く、PIC容器の物性に与える影響は無視できることと判断された。

3.3 遮蔽能力の測定結果

^{60}Co を線源として用いて測定したPIC容器（図3参照）の遮蔽能力の測定結果を他のホット試験と合わせて表4に示す。測定は線源位置の対称位置における線量率を主として実測し、実験精度の正確さを期した。この対称位置における測定は同時に容器の均一性を調べるのにも役立った。

60 ℥容器中心部の線源位置(4)に関しては②と⑥、①と⑦、③と⑤が対称の位置になる。それらの表面線量率はそれぞれ、59と57 mR/h、21と20 mR/h、19と17 mR/hで±1 mR/hの範囲内で一致した。線源位置(2)と(6)は容器内壁にRIが偏在した場合を想定した実験である。この場合の対称の位置は(2)-(2)と(6)-(6)で、それぞれ205と205 mR/h、(2)-(6)と(6)-(2)で28と27 mR/h、(2)-(7)と(6)-(1)で17と17 mR/h、(2)-(5)と(6)-(3)で17と14 mR/hと一致した結果を得た。同様に他の線源位置およびビニルエステル均一固化体に関しても良好な対称性を示した。

200 ℥容器に関しては線源位置を4点とした。同様に測定値の対称性を検討した。線源(4)について対称となる②と⑥では23と20 mR/h、①と⑦では10と9 mR/h、③と⑤では2.4と2.6 mR/hとなり良い対応を示した。

同様に、(2)-(6)と(6)-(2)では11と11 mR/h、(2)-(5)と(6)-(3)は8.3と8.5 mR/hと良い対称性を示した。②と(6)-(6)のみは108と96 mR/hと大きい差が見られた一方、(2)-(8)と(6)-(10)におけるそれぞれ3.5と1.2 mR/hのように容器表面より1 mの位置における対称性は必ずしも良くないが、線量が低いため付近のRIの影響や障害物の影響などを受けるためであると思われる。

以上の結果より、線源が正しい位置に設定でき、PIC容器が均一であったと考えられる。以後の考察では各対称位置の平均値を使用した。

3.4 PIC容器のビルドアップ係数

前章で求めた遮蔽能力の測定結果を一般的に表示するには容器内の線源強度と容器

表面の線量率との関係を求める必要がある。この場合容器の材質の線減弱係数と主として幾何学的形状に基づくビルドアップ係数とを実験的に或は理論的に求めなければならない。しかし同一実験でこの両者を決めるのは困難であり、またこの両者を理論的に求めるのも困難である。従って比較的誤差の小さい線減弱係数を組成の類似しているコンクリートの値を使用し、ビルドアップ係数を実験的に求め、容器表面の線量率と線源強度との関係を一般的な数式によって表わすことを試みた。

^{60}Co 標準線源の溶液は 0.625 ml であるので、点等方線源とみなせる。点等方線源の遮蔽計算は(1)式で与えられる。

$$X = C \frac{Q}{r^2} Be^{-\mu x} \quad (1)$$

ここで、

- X : 照射線量率 (Rh^{-1})
- C : γ 線放射定数 ($\text{Rh}^{-1} \text{mCi}^{-1}$ at 1 cm)
- Q : 線源強度 (mCi)
- r : 線源からの距離 (cm)
- B : ビルドアップ係数
- μ : 遮蔽物の線減弱係数 (cm^{-1})
- x : 遮蔽物の厚さ (cm)

μx については PIC は新しい複合材料であるため、各定数が既存の文献には記載されていない。本報告では $^{60}\text{Co} - \gamma$ 線の平均エネルギーを 1.25 MeV として、 $C = 13.2$ ⁵⁾ の値を用い、 μ/ρ としては普通コンクリートの値の 0.057⁶⁾ と同等であると仮定し PIC の ρ の実測値の 2.45 を用い μ を求めると 0.139 となる。

一方、ビルドアップ係数 B については種々の求め方がある。たとえば本研究と同様の 60 l のコンクリート ($\rho = 2.3$) 容器の値で近似すれば、相当する $\mu x = 1$ 付近では B は 2 程度の値であるとの報告⁷⁾ がある。また原子番号が高くない (約 30 以下) 場合 1 ~ 5 MeV 程度のエネルギーの時には $B = \mu x$ として概略計算できる⁸⁾ との報告もある。軽い物質に対しては 2 MeV より高い範囲と鉛のように重い物質に対しては、全エネルギー範囲にわたって、 $B = 1 + \mu x$ で求めることができるとの記述⁸⁾ もある。 $\mu x = 1$ の場合の B 値は μx を採るか $1 + \mu x$ を採るかで 1 ~ 2 となり、遮蔽計算を行うとき最大 100 % の誤差を生じる。

従って、PIC 容器に関するビルドアップ係数を実測値より求めることとした。(1)式を変形した(2)式に先に求めた μ 値 0.139 を使用し、ビルドアップ係数 B を μx 及び $\mu x + 1$ として算出して実験値から求めた値と共に図 8 に示した。計算は線源を容器の中心に設置した時の胴部と蓋部の中心について行った。得られた B 値は PIC 容器の胴部で 60 l 容器が 1.01, 200 l 容器が 1.42 であった。

$$B = \frac{X r^2}{CQ} e^{\mu x} \quad (2)$$

図8よりBの実測値は、 $1 + \mu_x$ より μ_x に近い値を示した。

従って以後P I C容器のB値として μ_x を採用して遮蔽計算を行っても大きな差は生じないものと考えられる。

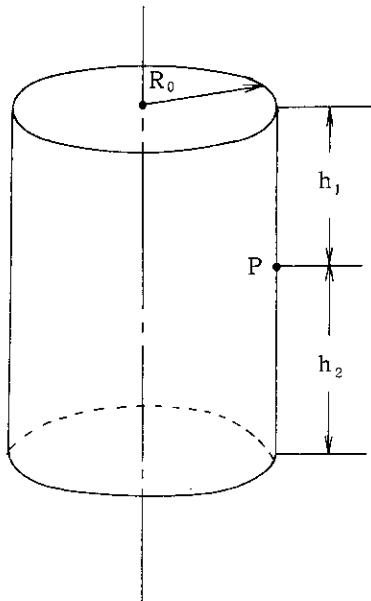
3.5 P I C容器に固化体として収納可能な放射能量

プラスチック中に均一固化した場合の固化体自身とP I C容器固化体の表面線量率を比較し、さらに最高表面線量率を200mR/hと仮定した60ℓの耐圧型P I C容器（設計耐圧強度500kg/cm²）の固化体として収納可能な放射能量を検討する。

ポリエチレン固化体の場合、6.10mCiの¹³⁷Csを60ℓP I C容器中に均一固化した時の最大表面線量率は、側面中央部の位置において10mR/hを示し、1mCi当たり1.64mR/hの線量率を得た。ビニルエステル固化体の場合⁶⁰Coを均一に固化すると6.77mR/h/mCiの線量率であったので、粒状樹脂中に混合された⁶⁰Co、¹³⁷Csの放射能量にこれらの単位mCi当たりの値を乗じて加算すると29.5mR/hとなり実測値の30mR/hと良く一致し、加成性の成立することが確認された。

一般的に円柱状固化体の表面線量率は次式によって計算できる。

P点のγ線束 ϕ は、



$$\phi = \frac{BSv}{4\mu_s} [G(\mu_s h_1, b) + G(\mu_s h_2, b)] \dots\dots\dots(3)$$

($b = 2R_0\mu_s$)

ここで、

ϕ : γ線束 (cm⁻² s⁻¹)

B : ビルドアップ係数

Sv : 線源強度 (cm⁻³ s⁻¹)

R₀ : 線源の半径 (cm)

μ_s : 固化体自身の線減弱係数 (cm⁻¹)

G : $\int_0^b F(\tan^{-1} \frac{a}{b'}, b') db'$

$\because F(\theta, b) = \int_0^\theta e^{-b} \sec \theta' d\theta'$

注) P点は容器側面の中心の位置とした。

計算によるとビニルエステル樹脂固化体自身の表面線量率は353mR/hとなった。この固化体を収納した壁厚8cmの60ℓP I C容器の表面線量率の実測値が31mR/hであるから、およそ1/11に遮蔽されることになる。

その理由は、P I C容器は肉厚の厚いコンクリートで作られているため、比較的大きな容器の割には収納量は少ないけれども、コンクリートの遮蔽効果と、線源中心からの距離の効果が相乗的に影響してくるためである。

一般的に円柱状線源の空間線量率は、次式によって計算できる。

P点のγ線束 ϕ は、

$$\phi = \frac{BSv R_0^2}{4(a+z)} [F(\theta_1, b_2) + F(\theta_2, b_2)] \dots\dots\dots\dots(4)$$

$$b_2 = b_1 + \mu s Z$$

ここで、

ϕ : γ線束 ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)

B : ビルドアップ係数

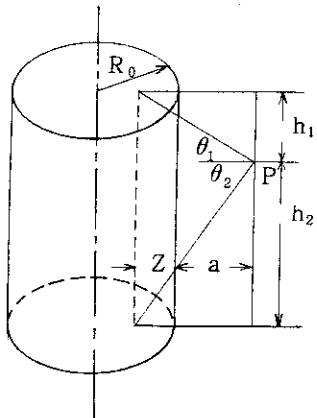
Sv : 線源強度 ($\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$)

R₀ : 線源の半径 (cm)

μs : 固化体自身の線減弱係数 (cm^{-1})

Z : 自己吸収距離

b₁ : μx



計算によると、P I C容器が無いときのP I C容器の表面に相当する位置での線量率は145mR/hであり、P I C容器に固化体を収納したときのP I C容器の表面線量率は、29mR/hになり実測値の31mR/hとよく一致する。

この結果から、⁶⁰Co封入放射能量と表面線量率の関係を求めて図9に示す。図より輸送規準の200mR/hまでR Iを均一固化すると仮定した場合、ドラム缶ビニルエスチル均一固化体は2.6mCiが限度となるが、60ℓのP I C容器内に固化すると27mCiまで混入可能である。PIC容器の代りにドラム缶を用いた場合は鉄板の肉厚が1.6mm程度であるので、ほとんど遮蔽を期待できない。P I C容器は、耐圧容器としての設計を行うと壁厚が厚くなつて内容積が減少するが、壁厚の遮蔽により封入放射能量を高くすることができるので、放射能濃度の高い廃棄物に有利である。実際のP I C容器の使用に当つてはこれらのバランスをとることが肝要である。

一方、60ℓ P I C容器について肉厚2.3cmの鉛容器の中に4.77mCiの線源を収納した場合の表面線量率は15mR/hとなる(表4の(7)-②, ⑥参照)から200mR/hまで収納するとした場合62mCiまで固化可能と推定された。

封入放射能量を決定する時、R Iの偏在する場合も検討しておく必要がある。図10, 11は60ℓと200ℓのP I C容器に関して点線源として容器内の中心、側面中心および底面の中心にR Iが偏在するような極端な場合を想定し封入放射能量と表面線量率の関係を図示した。200mR/hまで封入すると仮定した時のP I C容器中への⁶⁰Coの最大混入量を図より読みとて表5にまとめた。側面中心に偏在した場合が最も厳しく、中心に偏在した場合と比較して、60ℓの容器では1/4.7の9.2mCiに減少する。底面の中心に偏在した場合、表面線量率が最大となる容器側面の中心より底面と直線上にある位置である(1)-①において評価すべきである。60ℓの容器では中心に偏在した場合と同一となり、200ℓの容器については中心部の3割増しの57mCiとなる。従って、プラスチック、アスファルトなどに混入固化するときは良いが雑固化体への適用は注意を要する。

3.6 P I C 容器の実廃棄物への適応性

原子力発電所の運転に伴なって発生する放射性廃棄物は、濃縮廃液、イオン交換樹脂、フィルタ・スラッジ、雑固体、エア・フィルタ、制御棒やチャンネルボックスなどの放射化金属などであり、これら廃棄物の安全な処理処分法の開発と同時に発生量を低減化するための研究開発を踏まえて現在想定されている出力 110 万 kWe の発電所から発生する放射性廃棄物のうちプラスチック固化処理の対象となるものは濃縮廃液とイオン交換樹脂であり、これらの発生量と放射能濃度は表 6 の如く推定されている。

200ℓ の耐圧型 P I C 容器（設計耐圧強度 500 kg/cm²、内容積 51ℓ）を遮蔽性の観点からみてどの程度の放射能濃度の廃棄物を収納してもそのまま輸送容器として使用可能かということを検討してみる。計算は廃棄物を全て ⁶⁰Co と仮定した。前章では放射能が偏在した場合について論じたので、こゝでは均一固化体の場合について検討を行う。

線源強度 S_v の廃棄物を均一に P I C 容器に充填した場合の表面線量率（γ線束で表わす）は、中心線上で最大であり、S_v と表面線量率との関係は、

$$\phi = \frac{B S_v R_0^2}{2(a+z)} F(\theta, b_2)$$

ここで、

ϕ : γ線束 (cm⁻² sec⁻¹)

B : ビルドアップ係数

S_v : 線源強度 (cm⁻³ sec⁻¹)

R₀ : 線源の半径 (cm)

a : 線源表面と検出点との距離 (cm)

z : 自己吸収距離 (cm)

θ : 検出点から円柱体積線源をみる角度

b₂ : μx (μ は遮蔽体の線減弱係数、x はその厚さ)

$F(\theta, b) = \int_0^\theta e^{-b} \sec \theta' d\theta'$

であり、ビルドアップ係数としては点線源で実測した値 1.42 を採用した。

計算結果によると表面線量率 R (R/h) は、

$$R = 73 S_v (mCi/cm^3)$$

となる。輸送容器の規準値である表面線量率 200mR/h 以下、1m 離れて 10mR/h 以下を満足する放射能濃度 S_v の値は 2.7 μCi/mℓ であり、全体で 138 mCi となる。

表 6 から分るように濃縮廃液および粒状樹脂の放射能濃度はそれぞれ 1.6 および 1.4 μCi/g であり、これらを重量比 50:50 でポリエチレンにより固化すれば、これらポリエチレン固化体の放射能濃度は比重をほど 1 と仮定することにより、それぞれ 0.8 および 0.7 μCi/mℓ となり、P I C 容器のプラスチック固化体は輸送規準を十分に満足することになる。

粉状樹脂に関しては、「凝縮水浄化系脱塩器」で生ずるもののが最も発生量が多く、この場合の放射能濃度は 6.2 μCi/g である。これを 1.7 μCi/mℓ 以下にするには粉状樹脂とポリエチレンとの比を 1 : 1.3 (廃棄物混入量 43 %) としたポリエチレン固化体を作成すればよいことにな

なり、P I C容器は輸送規準を満足する。

一方、発生量の最も少ない浄化系脱塩器で発生する粉状樹脂は放射能濃度で $720 \mu\text{Ci}/\text{g}$ であり、この場合には別途に輸送容器が必要となる。

以上の如く P I C容器を使用する場合の利点は輸送容器としても役立つことであり、通常のドラム缶を使用した場合には輸送にあたって厚さ 2.5 cm の鉛遮蔽を施した輸送容器が必要になる。

これまでの結果から、P I C容器は優れた耐久性²⁾と遮蔽性および高い耐圧強度と不透水性を有しており、さらに耐熱性と耐久性⁴⁾および耐落下衝撃性も改善されているので処理処分用容器ばかりでなく輸送容器としての役割も十分果すものと考えられる。

4. 総括

- (1) 熱可塑性樹脂として P I C容器に対するポリエチレンによる固化注入実験を行った。約 160°C に加熱溶融したポリエチレンと模擬ホット廃棄物を P I C容器中に注入固化した結果、容器に外観上の異常はなく、また、最大の膨張および収縮ひずみは 55×10^{-6} と 180×10^{-6} を得た。この値は容器の最大許容歪に対して無視できる程度に小さい。
- (2) ポリエチレン固化体は収縮により P I C容器と固化体の間に空隙ができるが、冷却過程で R I を遊離することはない。
- (3) ポリエチレン固化に関して P I C容器を利用すると容器の内面に離型剤の塗布、注入時の容器の加熱および注入後の容器の徐冷工程を省略できる見通しを得た。
- (4) 熱硬化性樹脂として P I C容器に対する不飽和ポリエステル系ビニルエステル樹脂による固化試験を行った。ビニルエステル樹脂は配合割合によって固化時間が 1 ~ 6 時間に、固化温度が $33 \sim 100^\circ\text{C}$ まで変化した。この時の容器側面の温度は最高 34.5°C と低く、P I C容器は健全であった。
- (5) ホットのビニルエステル樹脂固化体は固化に約 6 時間を要したが、R I が分離沈降する現象は認められず、適正な配合組成と実験条件の選定を行えば P I C容器中で良好な固化体を作製できる見通しを得た。
- (6) 60ℓ と 200ℓ の P I C容器について ^{60}Co 線源 4.77mCi を使用した遮蔽試験結果、表面線量率は線源位置と良く対応した値を得て測定の正確さと P I C容器の均一性が確認された。
- (7) ^{60}Co 線源による P I C容器の遮蔽計算結果、P I C容器胴部のビルドアップ係数は、 60ℓ の P I C容器で 1.01、 200ℓ の P I C容器で 1.42 の値を得た。実測したビルドアップ係数は μx の値とは一致しており、P I C容器の遮蔽計算にこの値を採用しても誤差は小さいと考えられる。
- (8) ^{60}Co 4.58mCi のビニルエステル均一固化体に関して、固化体自身の表面線量率は計算により 353mR/h 、壁厚 8 cm の 60ℓ の P I C容器の表面で 31mR/h の実測値を得たので、3.5 の項で述べた如く、遮蔽効果と距離の効果の相乗的結果からおよそ $1/11$ に遮蔽される。輸送規則は容器表面で 200mR/h 以下と規定しているので、固化体自身では ^{60}Co 2.6mCi

なり、P I C容器は輸送規準を満足する。

一方、発生量の最も少ない浄化系脱塩器で発生する粉状樹脂は放射能濃度で $720 \mu\text{Ci}/\text{g}$ であり、この場合には別途に輸送容器が必要となる。

以上の如く P I C容器を使用する場合の利点は輸送容器としても役立つことであり、通常のドラム缶を使用した場合には輸送にあたって厚さ 2.5 cm の鉛遮蔽を施した輸送容器が必要になる。

これまでの結果から、P I C容器は優れた耐久性²⁾と遮蔽性および高い耐圧強度と不透水性を有しており、さらに耐熱性と耐久性⁴⁾および耐落下衝撃性も改善されているので処理処分用容器ばかりでなく輸送容器としての役割も十分果すものと考えられる。

4. 総括

- (1) 熱可塑性樹脂として P I C容器に対するポリエチレンによる固化注入実験を行った。約 160°C に加熱溶融したポリエチレンと模擬ホット廃棄物を P I C容器中に注入固化した結果、容器に外観上の異常はなく、また、最大の膨張および収縮ひずみは 55×10^{-6} と 180×10^{-6} を得た。この値は容器の最大許容歪に対して無視できる程度に小さい。
- (2) ポリエチレン固化体は収縮により P I C容器と固化体の間に空隙ができるが、冷却過程で RI を遊離することはない。
- (3) ポリエチレン固化に関して P I C容器を利用すると容器の内面に離型剤の塗布、注入時の容器の加熱および注入後の容器の徐冷工程を省略できる見通しを得た。
- (4) 熱硬化性樹脂として P I C容器に対する不飽和ポリエステル系ビニルエステル樹脂による固化試験を行った。ビニルエステル樹脂は配合割合によって固化時間が 1 ~ 6 時間に、固化温度が $33\sim100^\circ\text{C}$ まで変化した。この時の容器側面の温度は最高 34.5°C と低く、P I C容器は健全であった。
- (5) ホットのビニルエステル樹脂固化体は固化に約 6 時間を要したが、RI が分離沈降する現象は認められず、適正な配合組成と実験条件の選定を行えば P I C容器中で良好な固化体を作製できる見通しを得た。
- (6) 60ℓ と 200ℓ の P I C容器について ^{60}Co 線源 4.77mCi を使用した遮蔽試験結果、表面線量率は線源位置と良く対応した値を得て測定の正確さと P I C容器の均一性が確認された。
- (7) ^{60}Co 線源による P I C容器の遮蔽計算結果、P I C容器胴部のビルドアップ係数は、 60ℓ の P I C容器で 1.01、 200ℓ の P I C容器で 1.42 の値を得た。実測したビルドアップ係数は μx の値とは一致しており、P I C容器の遮蔽計算にこの値を採用しても誤差は小さいと考えられる。
- (8) ^{60}Co 4.58mCi のビニルエステル均一固化体に関して、固化体自身の表面線量率は計算により 353mR/h 、壁厚 8 cm の 60ℓ の P I C容器の表面で 31mR/h の実測値を得たので、3.5 の項で述べた如く、遮蔽効果と距離の効果の相乗的結果からおよそ $1/11$ に遮蔽される。輸送規則は容器表面で 200mR/h 以下と規定しているので、固化体自身では ^{60}Co 2.6mCi

が混入限度となるが、60ℓのP I C容器中に固化することによって27mCiまで混入可能となる。

- (9) 一容器当り固化体として収納可能な放射能量は容器内壁に偏在した場合が最小となり、これに反し均一固化した場合が最大となる。設計耐圧強度 500kg/cm²以上の耐圧型 200ℓのP I C容器では、放射能が偏在した場合側面では9.2mCi、底面では86mCi、中心部では43mCiの放射能を収納することができる。従って、収納量は対象とする廃棄物によって検討を要する。
- (10) 原子力発電所から発生する放射性廃棄物の内、プラスチック固化に適する廃棄物は濃縮廃液、粒状樹脂および粉状樹脂などである。輸送規準の200mR/hまで固化するとした場合、計算によると2.7μCi/mlまで均一固化できる。ポリエチレンと廃棄物の混合比を50:50とすると、濃縮廃液と粒状樹脂は輸送規準以下となり、濃縮フィルタの粒状樹脂は43%程度まで混入可能である。
- (11) P I C容器は優れた遮蔽性を有し、別途試験された高い耐圧強度と不透水性に耐熱性、耐火性および耐落下衝撃性を併せて考えると処理処分用容器ばかりでなく、輸送容器としても十分に使用できると結論される。

本研究の遂行にあたり、環境安全研究部、伊藤太郎次長、秩父セメント㈱ 須藤儀一部長に種々御指導頂きました。また固化体の作製および遮蔽性の測定に当っては、保健物理部 渡部孝三係長、松井智明氏、秩父セメント㈱ 神林文夫氏、新潟鉄工㈱ 栗田昂明課長、山本仁氏 早瀬雄司氏に種々御援助頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) IAEA GOV/1889, "The Agency's Responsibilities in Connection with the Convention of the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and other Matter", B. 1.3 (1978)
- 2) 石崎 他：放射性廃棄物容器としてのP I C容器の安全性試験(I), P I C容器の耐高水圧性と耐浸出性, JAERI-M (1980)
- 3) K. Araki, Y. Kasahara, G. Sudoh and K. Ishizaki : The Sixth International Congress of Radiation Research. Tokyo, Japan, B-22-10 (1979)
- 4) 石崎、笠原、浅見、笠井、須藤、荒木：セメント技術年報, Vol. 32, 315(1978)
- 5) 兵藤：“放射線遮蔽入門(第2版)”，産業図書, 55(1979)
- 6) Reactor Physics Constants, ANL-5800, 582(1963)
- 7) 中田、布施、竹内：運研報告 Vol. 11(12), 56(1962)
- 8) 江藤、飯田、田中、熊取、伊沢、吉沢：“放射線の防護”丸善出版, 275(1972)

が混入限度となるが、60ℓのP I C容器中に固化することによって27mCiまで混入可能となる。

- (9) 一容器当り固化体として収納可能な放射能量は容器内壁に偏在した場合が最小となり、これに反し均一固化した場合が最大となる。設計耐圧強度500kg/cm²以上の耐圧型200ℓのP I C容器では、放射能が偏在した場合側面では9.2mCi、底面では86mCi、中心部では43mCiの放射能を収納することができる。従って、収納量は対象とする廃棄物によって検討を要する。
- (10) 原子力発電所から発生する放射性廃棄物の内、プラスチック固化に適する廃棄物は濃縮廃液、粒状樹脂および粉状樹脂などである。輸送規準の200mR/hまで固化するとした場合、計算によると2.7μCi/mℓまで均一固化できる。ポリエチレンと廃棄物の混合比を50:50とすると、濃縮廃液と粒状樹脂は輸送規準以下となり、濃縮フィルタの粒状樹脂は43%程度まで混入可能である。
- (11) P I C容器は優れた遮蔽性を有し、別途試験された高い耐圧強度と不透水性に耐熱性、耐火性および耐落下衝撃性を併せて考えると処理処分用容器ばかりでなく、輸送容器としても十分に使用できると結論される。

本研究の遂行にあたり、環境安全研究部、伊藤太郎次長、秩父セメント㈱ 須藤儀一部長に種々御指導頂きました。また固化体の作製および遮蔽性の測定に当っては、保健物理部 渡部孝三係長、松井智明氏、秩父セメント㈱ 神林文夫氏、新潟鉄工㈱ 栗田昂明課長、山本仁氏 早瀬雄司氏に種々御援助頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) IAEA GOV/1889, "The Agency's Responsibilities in Connection with the Convention of the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and other Matter", B. 1.3 (1978)
- 2) 石崎 他：放射性廃棄物容器としてのP I C容器の安全性試験(I), P I C容器の耐高水圧性と耐浸出性, JAERI-M (1980)
- 3) K. Araki, Y. Kasahara, G. Sudoh and K. Ishizaki : The Sixth International Congress of Radiation Research. Tokyo, Japan, B-22-10 (1979)
- 4) 石崎、笠原、浅見、笠井、須藤、荒木：セメント技術年報, Vol.32, 315(1978)
- 5) 兵藤：“放射線遮蔽入門(第2版)”，産業図書, 55(1979)
- 6) Reactor Physics Constants, ANL-5800, 582(1963)
- 7) 中田、布施、竹内：運研報告 Vol.11(12), 56(1962)
- 8) 江藤、飯田、田中、熊取、伊沢、吉沢：“放射線の防護”丸善出版, 275(1972)

表1 コンクリートの示法配合

最大骨 材寸法 (mm)	水セメン ト比 (%)	細骨 材率 (%)	スラ ンプ (cm)	空気量 (%)	単位重量 (kg/m ³)				
					水	セメント	砂	砂利	鋼纖維
10	43	60	8±1.5	2±0.5	237	550	871	579	117

(注) 各材料の比重は下記のとおり

セメント = 3.17 砂 = 2.64 砂利 = 2.63 鋼纖維 = 7.80

表2 密閉P I C容器中のポリエチレン固化試験結果

固化体の組成 (乾燥重量%)	R I 混入量 (mCi)	注入固化 体の重量 (kg)	容器の最 高温度 (°C)	最大ひず み (×10 ⁻⁶)	表面線量率 (mR/h)	
					胴部	蓋部
ポリエチレン 100		11.9	33	+ 48 - 182		
ポリエチレン 50 粉状樹脂 50	⁶⁰ Co 3.51 ¹³⁷ Cs 3.48	15.0	60*	+ 54 - 127	30	12
ポリエチレン 50 粒状樹脂 50	¹³⁷ Cs 6.10	14.5	30	+ 20 - 95**	10	3.5

(注) * : ポリエチレン注入時に容器の加熱ヒータを作動させた。

** : ポリエチレン注入前にひずみゲージの零調を行ったが、他の測定は注入後零調を行った。

表3 ビニルエスチル樹脂固化体の配合量と固化試験結果

混入模擬廢棄物の種類	固化化体の配合量					硬化時間*	固化体の最高温度(°C)	容器測面の最高温度(°C)	表面線量率(mR/h)
	RIの混入量(mCi)	ビニルエスチル樹脂(ℓ)	触媒(mℓ)	助触媒(mℓ)	廃棄物(ℓ)				
水	—	5	100	10	7.5	2	6.6.5 (4h)	2.8.5 (4h)	—
イオン交換樹脂*	—	6	90	10	6	1	100 (4h)	34.5 (4h)	—
イオン交換樹脂*	^{60}Co 4.72	6	90	7	6	6	3.3 (8h)	27.5 (8h)	肺部 31 蓋部 10

(注) *: イオン交換樹脂はカチオン／アニオノン＝ $2/1$ の組成とし、水中での樹脂容量 90 %のものを使用した。

**: 硬化時間は重合反応の最も活発なピーカー反応時間とした。

表4 PIC容器の遮蔽能力の測定結果

容器 サイズ ・ 測定条件	線源位置	表面線量率 (mR/h) の測定位置 ***										備 考
		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	
標準 線 源 PIC 容器 ${}^{60}\text{Co}$ (4.77mCi)	(1)	205	23	3.0	7.5	8	17	25	4.1	2.6	0.75	線源・測定位置図
	(2)	19	205	15	13	17	28	17	3.5	2.5	1.4	
	(3)	5.2	40	135	25	25	23	10	3.5	2.5	1.7	
	(4)	21	59	19	13	17	57	20	3.2	2.8	1.2	
	(5)	55	23	7.2	7.5	6.3	23	63	3.2	3.0	1.0	
	(6)	17	27	14	11	13	205	20	2.3	3.0	1.2	
	(7) ***	7.3	14	3.2	3.3	2.8	16	7.2	0.7	0.73	0.28	鉛容器により遮蔽
	(混練直後)	23	30	-	-	-	30	20	-	-	-	
	(硬化後蓋をした 状態)	19	31	13	10	12	31	18	2	2	0.65	他は全て 0.06 mR/h
	(硬化後)	23	35	-	-	-	35	20	-	-	-	アド内で測定 $\text{BG} = 0.2 \text{ mR/h}$,
標準 線 源 PIC 容器 ${}^{60}\text{Co}$ (4.58mCi)	(1)	19	31	13	10	12	31	18	2	2	0.65	
	(2)	7.0	108	8.5	8.4	8.3	11	8.5	3.3	1.0	1.7	
	(4)	10	23	11	11	10	20	9	2.5	1.5	2.5	
	(5)	17	11	2.4	4.8	2.6	11	16	2.2	0.42	1.9	
	(6)	8.7	11	8.5	9.7	8.0	96	7	1.7	0.55	2.7	
	${}^{60}\text{Co}$ 3.51 ${}^{137}\text{Cs}$ 3.48 mCi	-	30	-	12	-	-	-	2.5	-	-	ポリエチレン 50% Powdex 50% Fe_2O_3 混入
ポリエチレン均一固化 ウエスに吸着して封入 セメント固化	${}^{137}\text{Cs}$ 6.1 mCi	-	10	-	3.5	-	-	-	0.6	-	-	ポリエチレン 49.7% 粒状樹脂 50.3%
	${}^{134}\text{Cs}$ 4 mCi	-	14	8	1.8	-	-	-	-	-	-	耐圧容器, 500 kg/cm ² -24 h 加圧後, 常温常圧で浸出試験
	${}^{134}\text{Cs}$ 0.95 mCi	-	0.8	-	-	-	-	-	0.2	-	-	均圧容器, " "
200ℓ PIC 容器	${}^{134}\text{Cs}$ 9 mCi	-	9.5	-	7	-	-	-	1.2	-	-	セメント 620, 水 525, ナイキュライト 110 kg/m ³

(注) * , ** ; 線源位置と表面線量率の測定位置は、60ℓ PIC容器では図、200ℓ PIC容器では図
*** ; 鉛容器の寸法は次の通り。外直径 80×外高さ 130×内直径 35×内高さ 75 m/m₀ のとおりである。

表5 表面線量率を200mR/hとした時のP I C容器中への⁶⁰Coの最大混入量

容器サイズ	容器内の線源位置			プラスチック 均一固化体
	中心	側面中心	底面中心	
60ℓ P I C容器	16mCi	4.7mCi	41mCi* (16mCi)**	27mCi
200ℓ P I C容器	43mCi	9.2mCi	86mCi* (57mCi)**	—

(注) *: 容器側面中心部での値

**: 底面と一直線の位置での値

表6 原子力発電所から発生する濃縮廃液およびイオン交換樹脂

発生量と濃度の一例

1100 MW

廃棄物の種類	発生源	発生量		放射能濃度 (μ Ci/dry g)
		(Ton/年)	(Ton-dry/年)	
濃縮廃液	床ドレン	46	11.5	1.6 ¹⁾
	再生廃液	64	16	
粒状樹脂	脱塩器	171	17.1	1.4 ²⁾
	炉水浄化系 脱塩器	43.8	4.4	
粉状樹脂	復水フィルタ	361.5	36.2	720 ³⁾ 6.2 ²⁾

1) 30日貯蔵

2) 5年貯蔵

3) 10年貯蔵

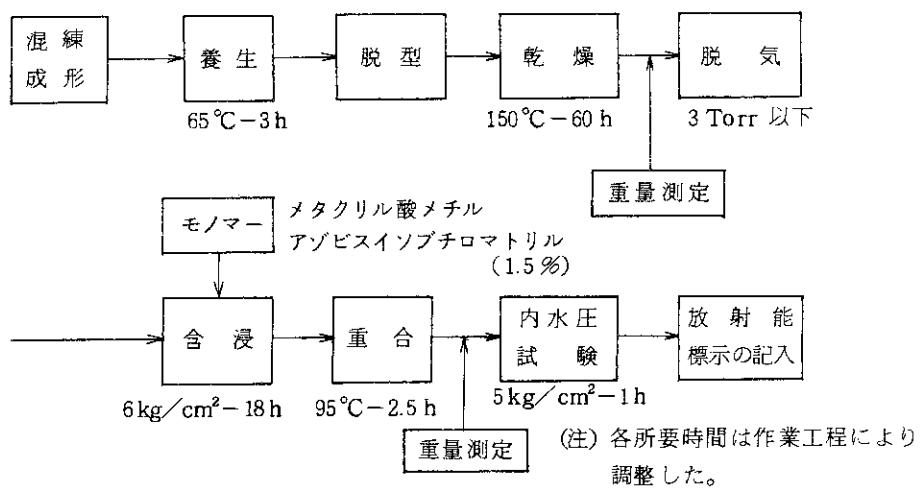


図1 PIC容器の製造工程図

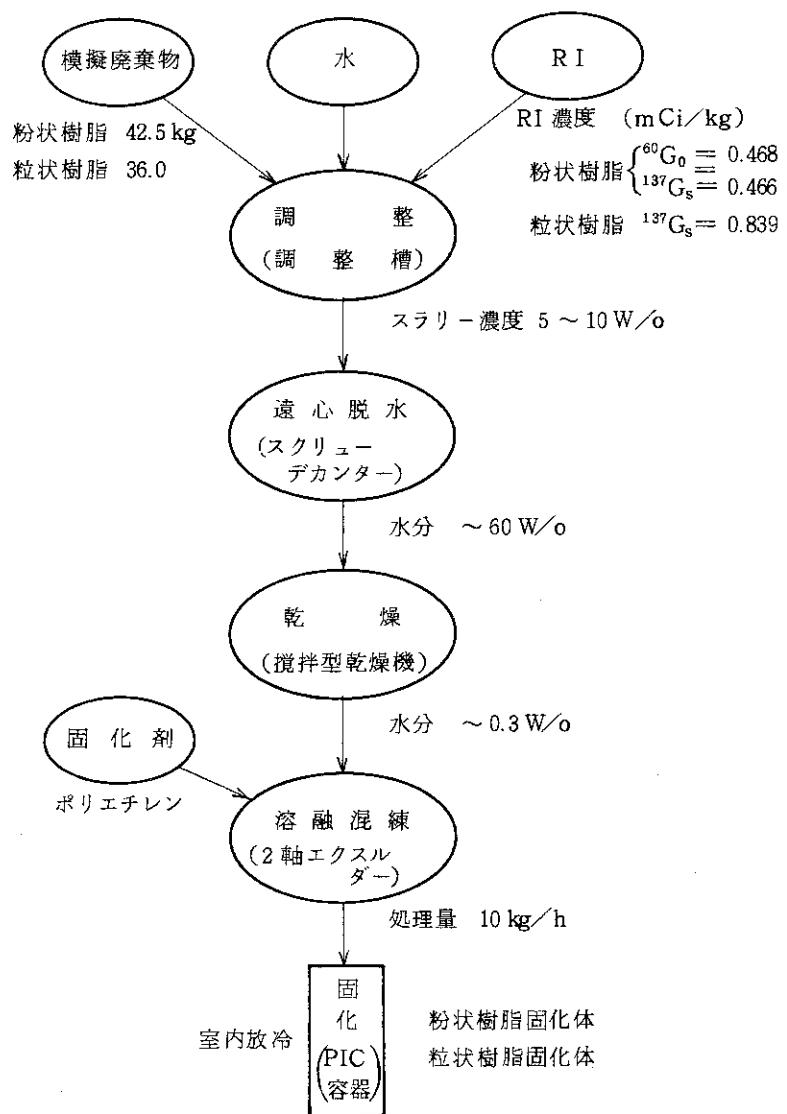


図2 ポリエチレン固化体の製作工程図

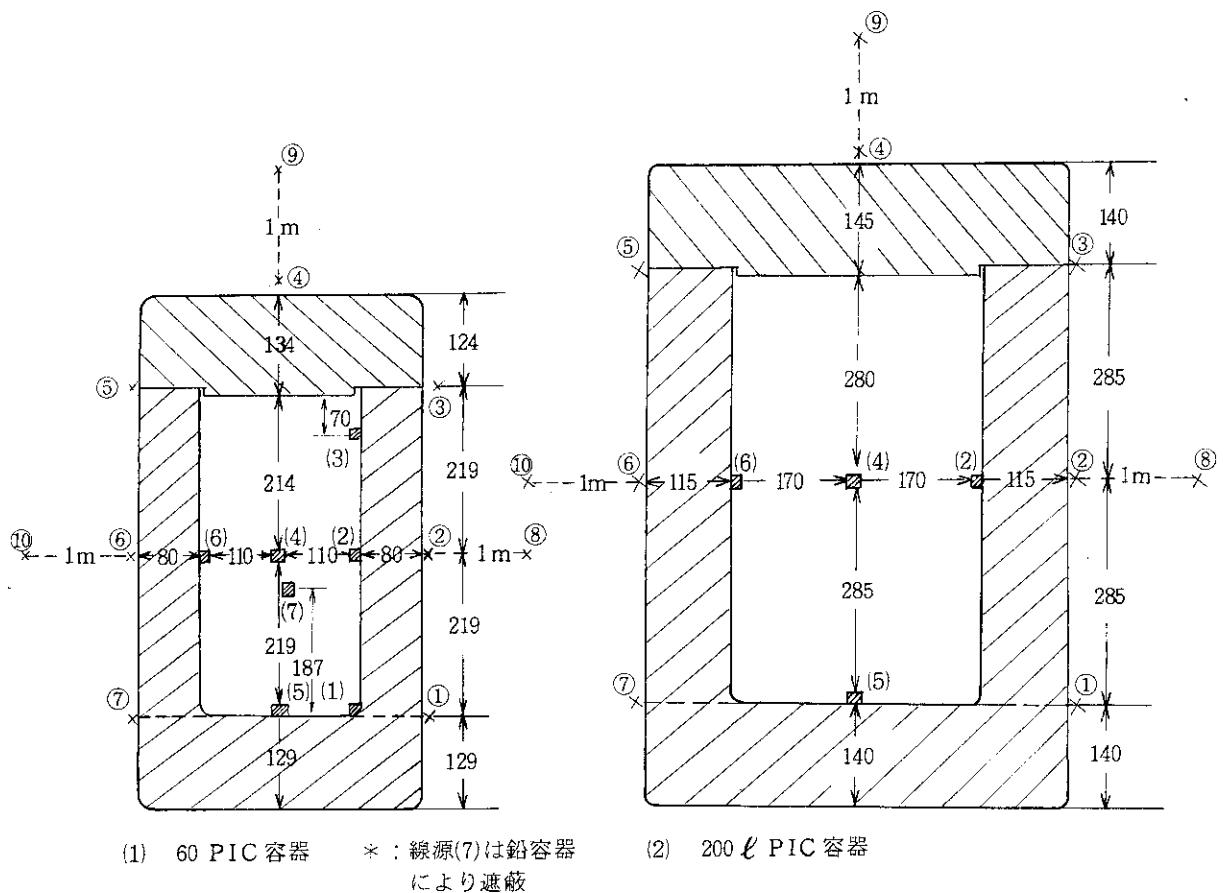


図3 PIC容器の遮蔽能力の測定における標準線源および表面線量率の
測定位置図
■: 線源位置 ×: 表面線量率の測定位置

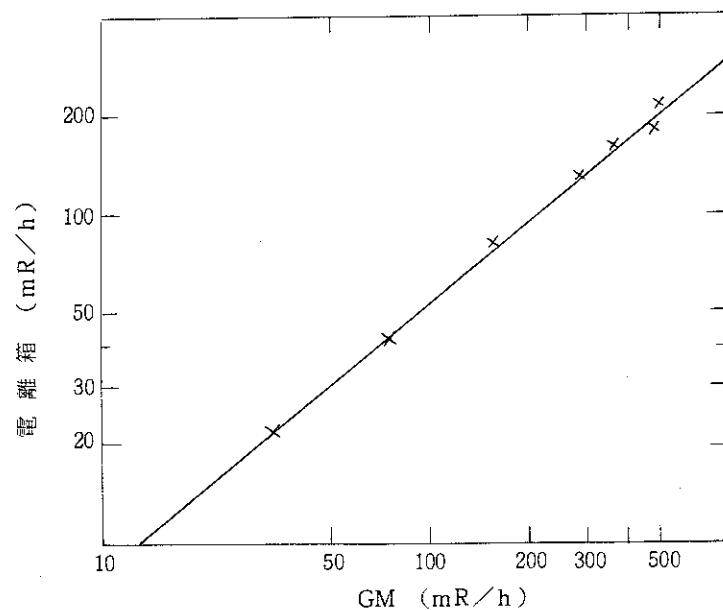


図4 電離箱によるGMの線量率補正曲線

測定日 1980年6月25～26日

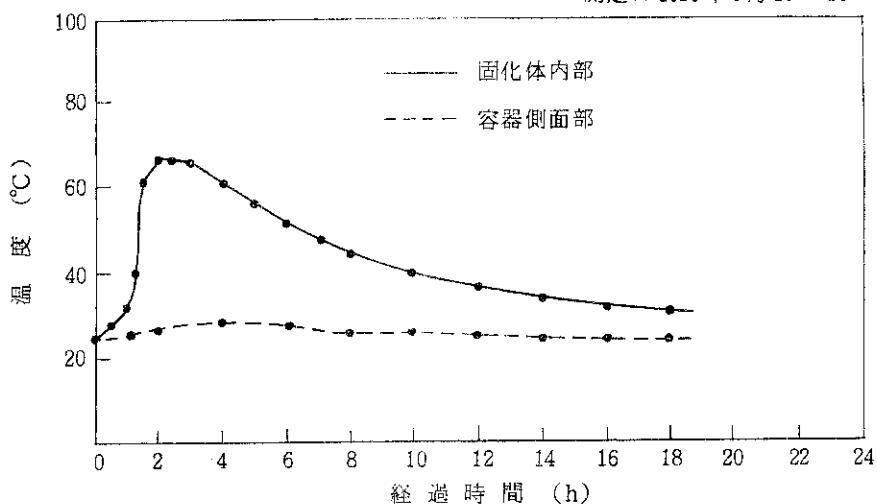


図5 水のビニルエスチル樹脂による固化時の反応温度曲線

測定日 1980年6月26～27日

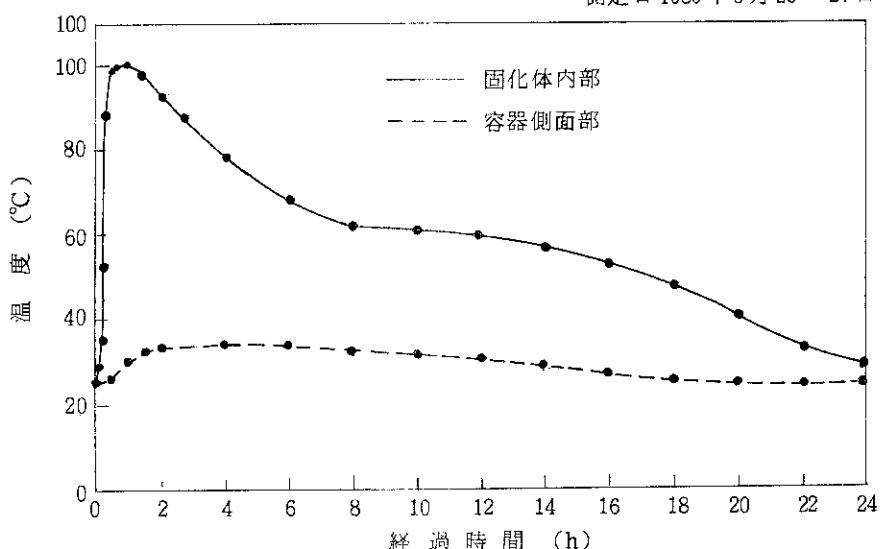
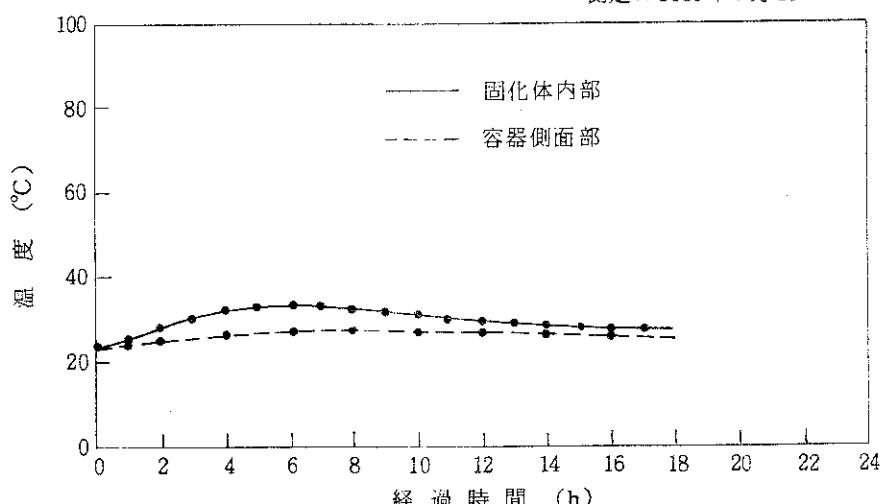
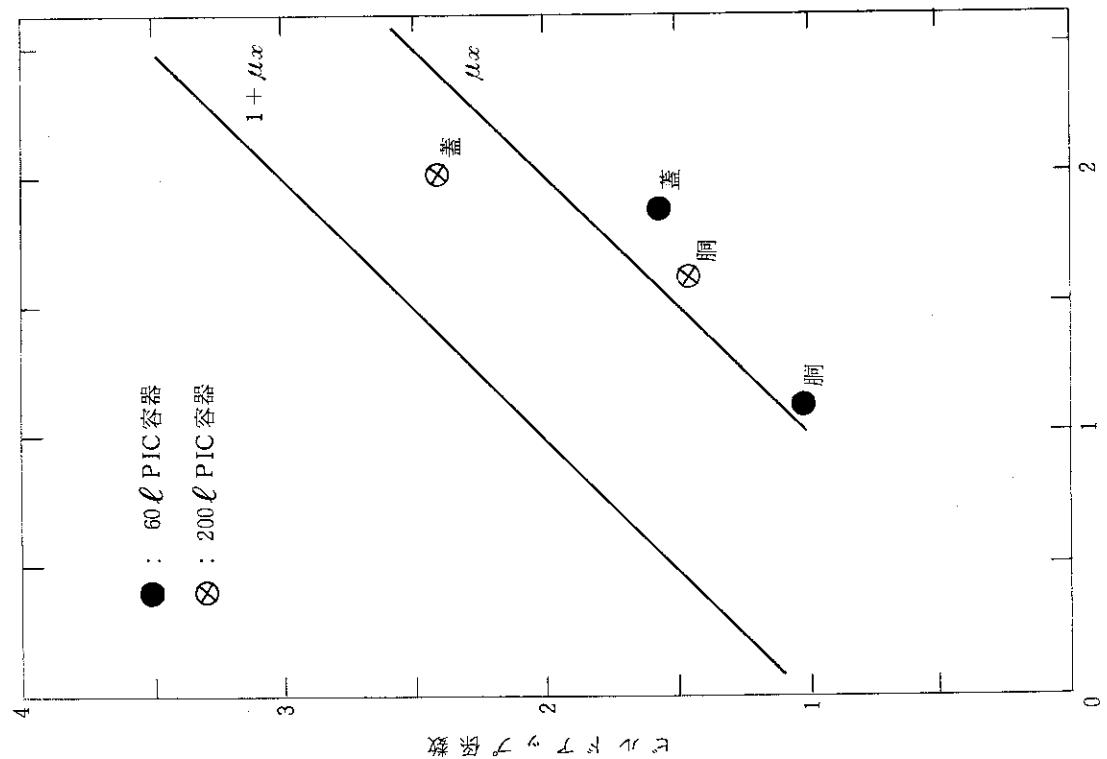
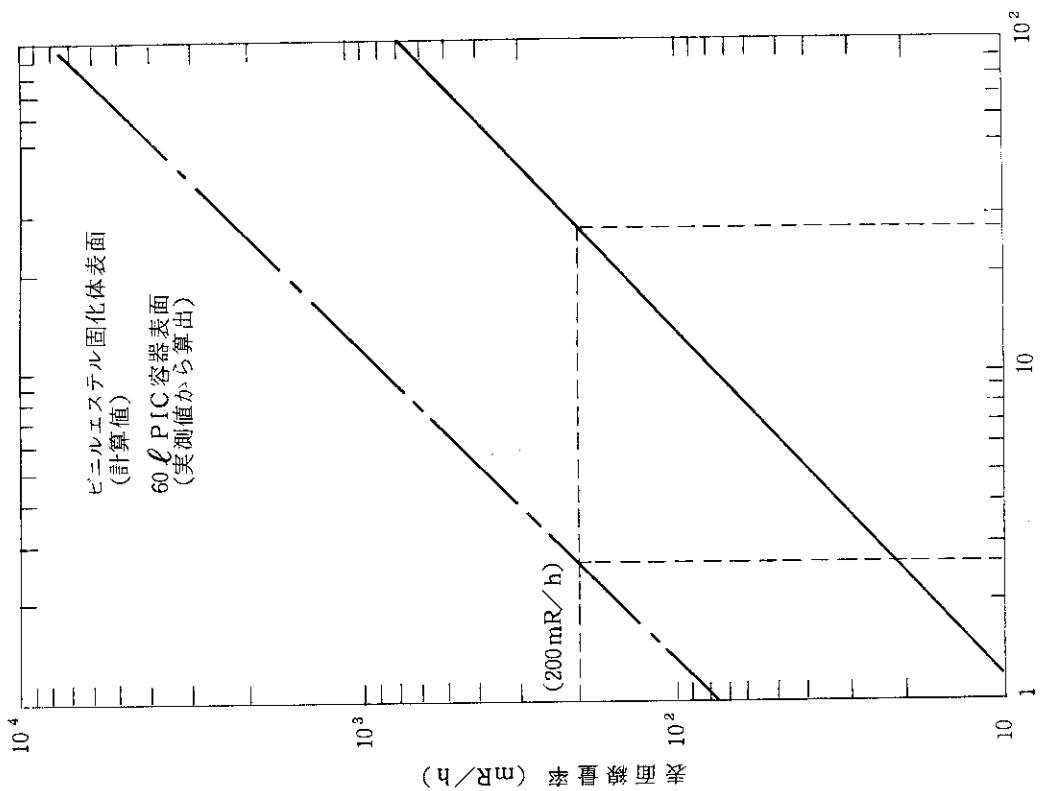


図6 イオン交換樹脂のビニルエスチル樹脂による固化時の反応温度曲線

測定日 1980年7月10～11日

図7 ⁶⁰Co混入イオン交換樹脂のビニルエスチル樹脂による固化時の反応温度曲線

図 8 PIC 容器の μ_x とビルドアップ係数の関係図 9 ビニルエスチル均一固化体の ^{60}Co 封入放射能量と表面線量率の関係

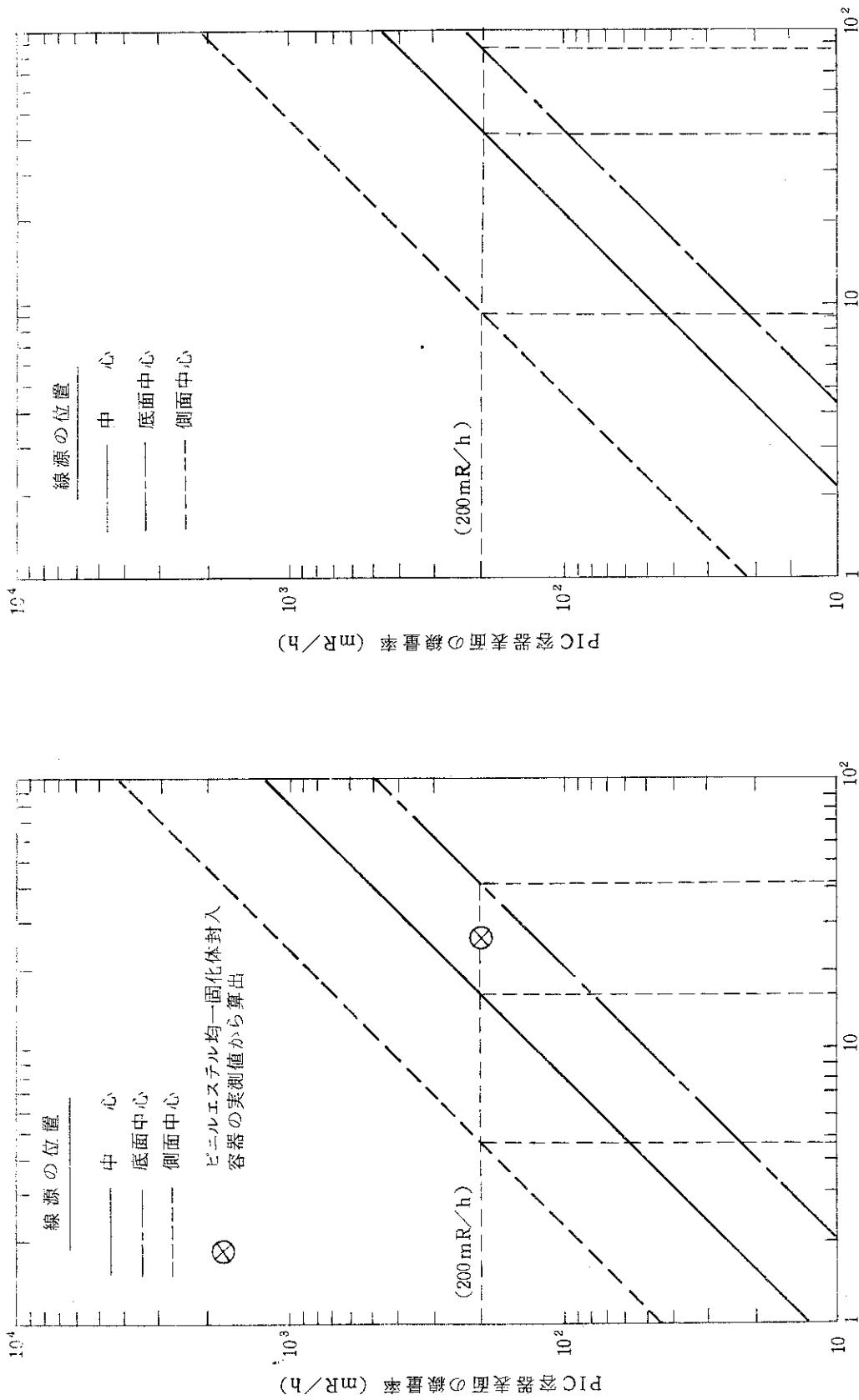


図 11 200 ℥ PIC 容器内に ^{60}Co 線源が偏在している場合の
容器側面中心部の線量率

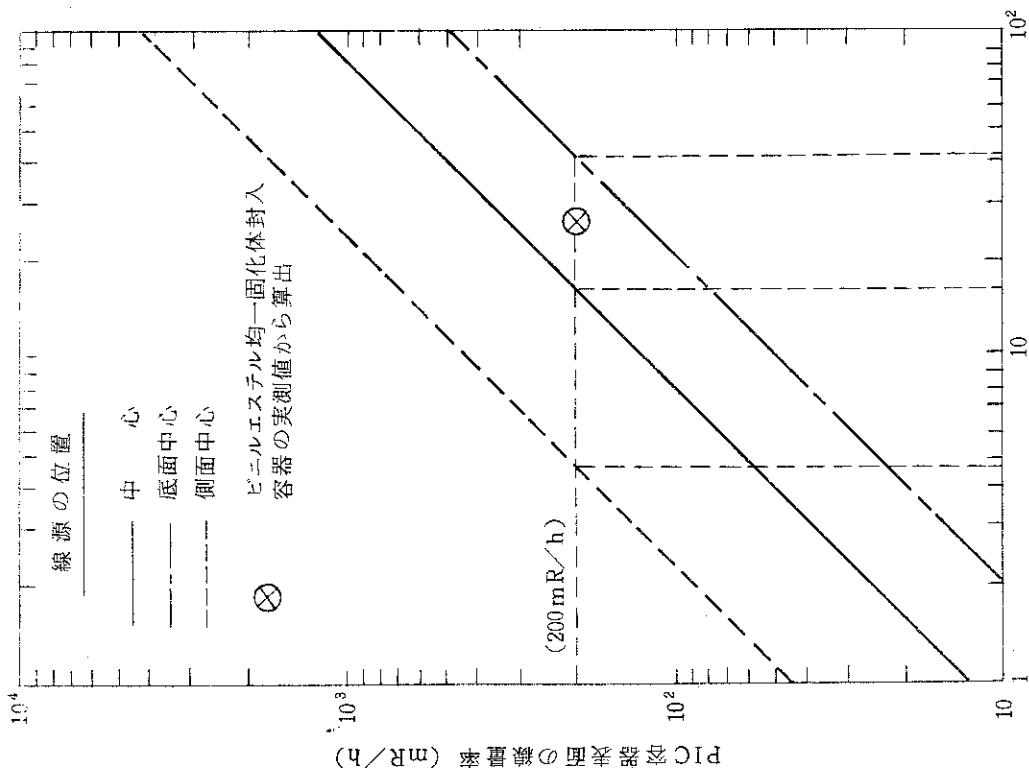


図 10 60 ℥ PIC 容器内に ^{60}Co 線源が偏在している場合の
容器側面中心部の線量率

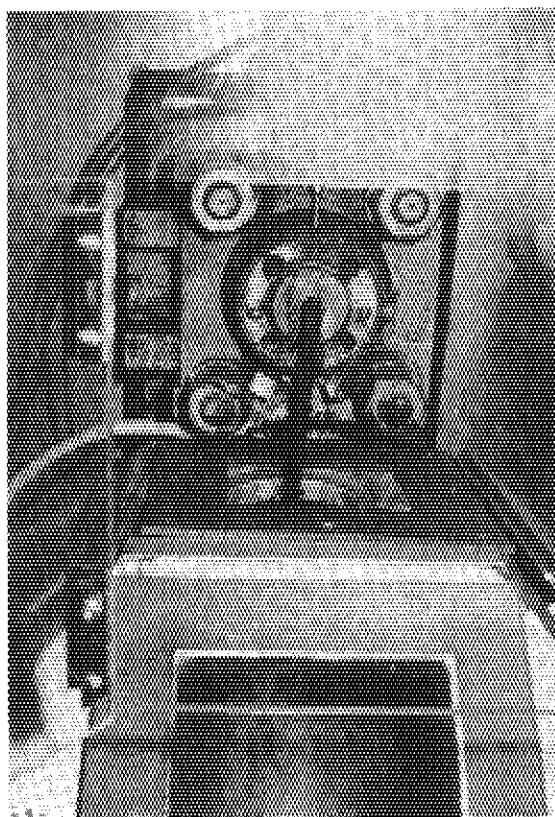


写真1 PIC容器中のポリエチレン／
粒状樹脂溶融物の注入状況

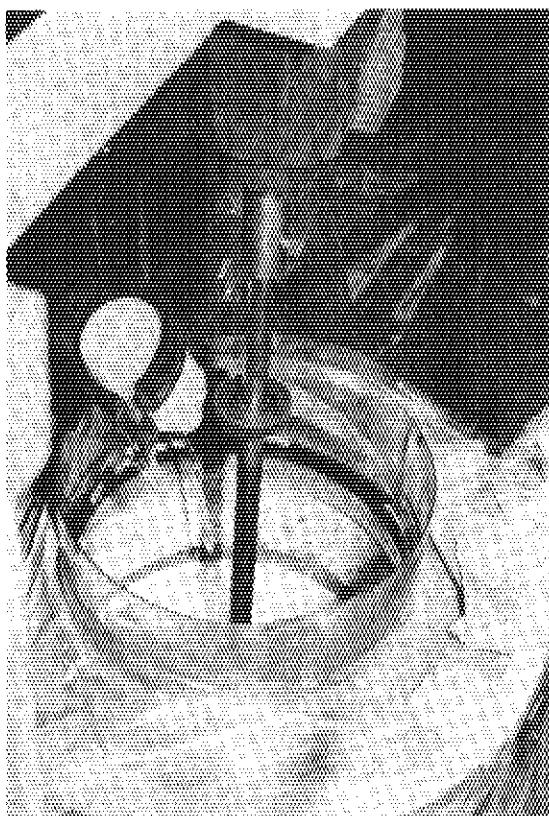


写真3 ピニエスチル樹脂／粒状樹脂
中に⁶⁰Co (4.58mCi)を注入し
ている様子

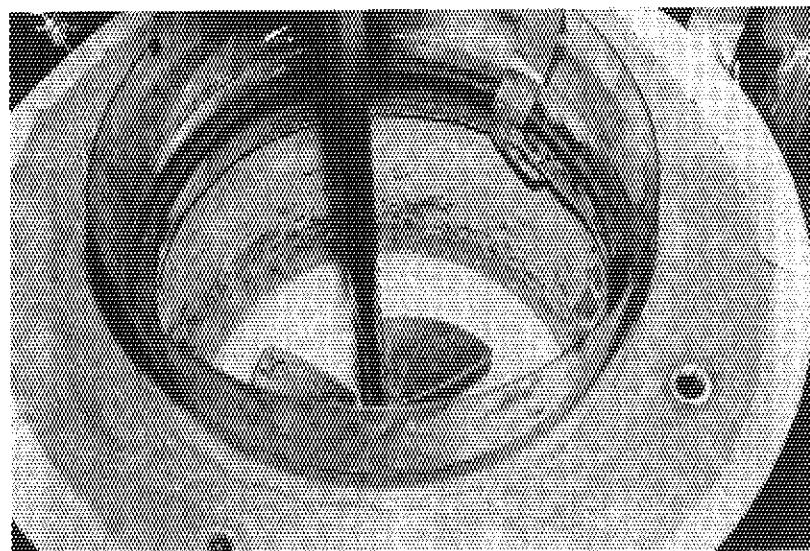


写真2 ビニルエステル樹脂(粒状樹脂を含む)
の乳化状況

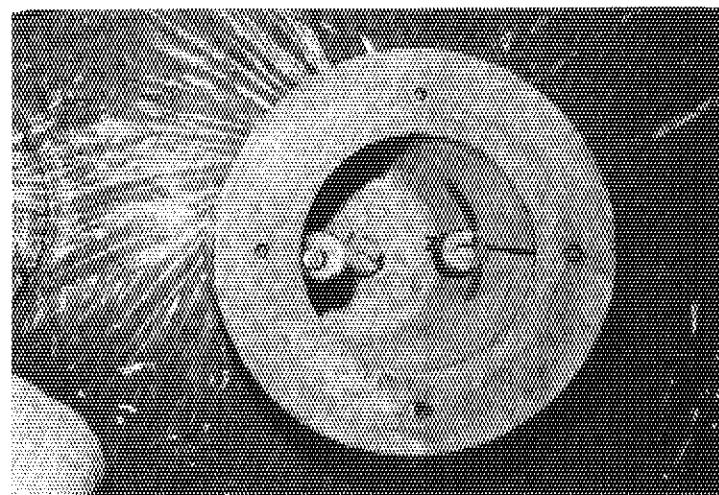


写真 4 PIC 容器中に ^{60}Co 線源を設置した状況

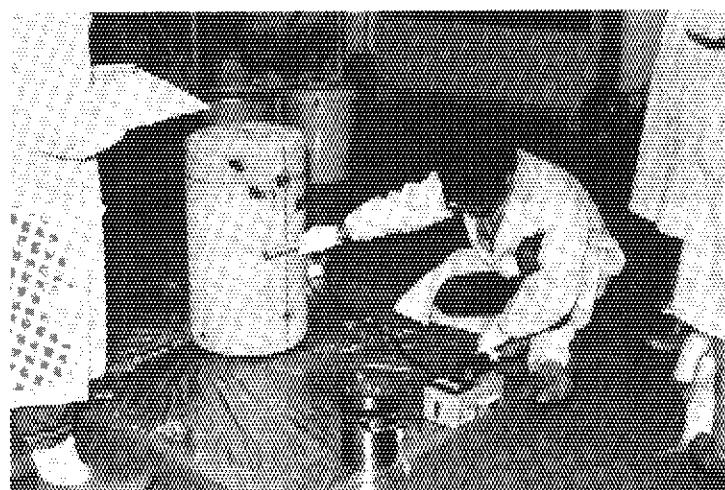


写真 5 GM 管式サーベイメータにより PIC 容器の表面線量率を測定している状況

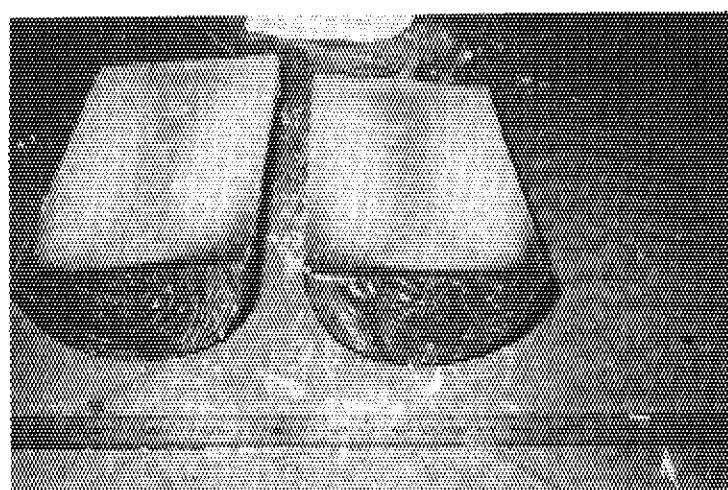


写真 6 $\frac{1}{2}$ に切断したポリエチレン固化体