

本資料は 年 月 日付けで登録区分、
変更する。 2001. 6. 6

[技術情報室]

TRU核種含有燃料取扱に係わる 線量当量評価（I）

1992年7月

動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2001

動力炉・核燃料開発事業団 東海事業所

技術開発推進部・技術管理室



限 定 資 料
PNC ~~2~~N 8410 92-199
1 9 9 2 年 7 月

TRU核種含有燃料取扱に係わる線量当量評価（I）

山本 偉政* ， 遠藤 秀男* ，
檜山 敏明* ， 佐藤 俊一** ，
山口 俊弘** ， 上村勝一郎* ，
長井修一朗***

要 旨

TRU核種含有燃料取扱時には、TRU核種から放出される γ 線、中性子線による被ばくの増加が懸念されることから、TRU核種含有燃料取扱時の線量当量評価を実施した。

本評価では、まずMOX燃料の線量当量評価に使用してきた解析手法がTRU核種含有燃料の線量当量評価に適用可能か否かを線量当量率測定データに基づき検証した。検証の結果、鉛しゃへいがある場合の計算精度に若干の問題点は残るが、MOX燃料の線量当量評価に使用してきた解析手法は、TRU核種含有燃料の線量当量評価に適用可能と判断した。

次に現状のプルトニウム燃料施設のグローブボックスにおいて、TRU核種含有燃料を取扱うことが可能か否かについて、しゃへい能力及び線量当量率の観点から評価した。その結果、現状のプルトニウム燃料施設のグローブボックスにおいてTRU核種含有燃料を取扱う場合、しゃへい能力及び線量当量率の両方の観点から、Amを含有するMOX燃料は、その含有量が2w/oであっても、300gのバッチサイズの製造は無理であると判断した。しかし粉末飛散のないあらかじめ固型化されているサンプル（例えばグリーンペレット）であり、鉛入りグローブ、ピンセットを使用すれば、少量なら取扱が可能であると思われる。

* 核燃料技術開発部 プルトニウム燃料開発室

** 核燃料技術開発部 プルトニウム燃料開発室（現プルトニウム燃料工場 製造加工部 製造課）

*** 核燃料技術開発部 プルトニウム燃料開発室（現燃料材料開発部）

目 次

1. 目的	1
2. 概要	1
3. 線量当量解析手法	1
4. 線量当量解析手法の検証	3
4.1 TRU線源の線量当量率測定	3
4.1.1 Am溶液の線量当量率測定	3
4.1.2 (Am, U) O ₂ ペレットの線量当量率測定	8
4.1.3 Np合金の線量当量率測定	10
4.2 測定データに基づく解析	11
4.3 考察	17
4.4 結論	19
5. TRU燃料取扱時の線量当量率評価	20
5.1 グローブボックスでの最大取扱量の評価	20
5.2 ペレット小規模製造時の線量当量率評価	24
5.3 「常陽」特殊燃料規模製造時の線量当量率評価	32
5.4 考察	42
5.5 結論	50
6. 参考文献	52

1. 目的

昭和63年10月に原子力委員会により策定された「群分離・消滅処理技術研究開発長期計画」の中で、長半減期TRU核種を分離し、原子炉、加速器等を用いて、消滅させる可能性を探るための研究を「オメガ計画」として実施している。

動燃事業団では、湿式核種分離研究及びFBRによる消滅処理研究を「FBR燃料サイクル技術の高度化」として、また乾式核種分離研究、加速器による消滅処理研究を「オメガ計画」の一環として実施している。

この中で我々は、TRU核種含有燃料（以下「TRU燃料」と言う）取扱時の問題としてTRU核種から放出されるガンマ線及び中性子線による被ばくの増加が懸念されることから、TRU燃料取扱時の線量当量評価を行った。

2. 概要

これまでTRU燃料取扱時の線量当量評価は行われていなかったことから、まずこれまでMOX燃料の線量当量評価に使用してきた線量当量解析手法（計算コード、核断面積ライブラリ等）がTRU燃料の線量当量評価に適用できるか否か検証を行う。検証に当っては、核開部プル開発室で分離・精製したAm溶液を線源とした線量当量率測定及びヨーロッパ共同体超ウラン元素研究所で行った（Am, U）O₂ペレット線源及びNp合金線源の線量当量率測定の各測定データと解析結果との比較評価を行うことで解析手法の妥当性を確認する。

次に、現状のプルトニウム燃料施設のグローブボックスにおいて、TRU燃料を取扱うことが、可能か否かについてしゃへい能力及び線量当量率の観点から評価するために以下に示す3つの評価を行った。

- (1) しゃへい能力の面から見たグローブボックスでの最大取扱量の評価
- (2) ペレット小規模の照射燃料製造時の全身・手部に対する線量当量率評価
- (3) 「常陽」特殊燃料規模の照射燃料製造時の全身・手部に対する線量当量率評価

3. 線量当量解析手法

今回の評価では、図-3.1に示す線量当量解析フローに従って評価を実施した。この解析手法は、基本的には昭和62年度よりプルトニウム燃料施設のしゃへい・被ばく解析に使用されてきている。

その内容としては、線源強度計算にORIGEN-2コード、エネルギー群変換にRENCONコード、中性子・ガンマ線の線束計算にANISNコード、線量当量率算出にDOSEコードを使用した。また、核断面積ライブラリとして、Np、Amの核断面積を収納し、平成3年に作成されたPSL-50ライブラリ⁽¹⁾を用いた。

本報告書では、この線量当量解析手法を使用して、各種の解析・評価を実施した。

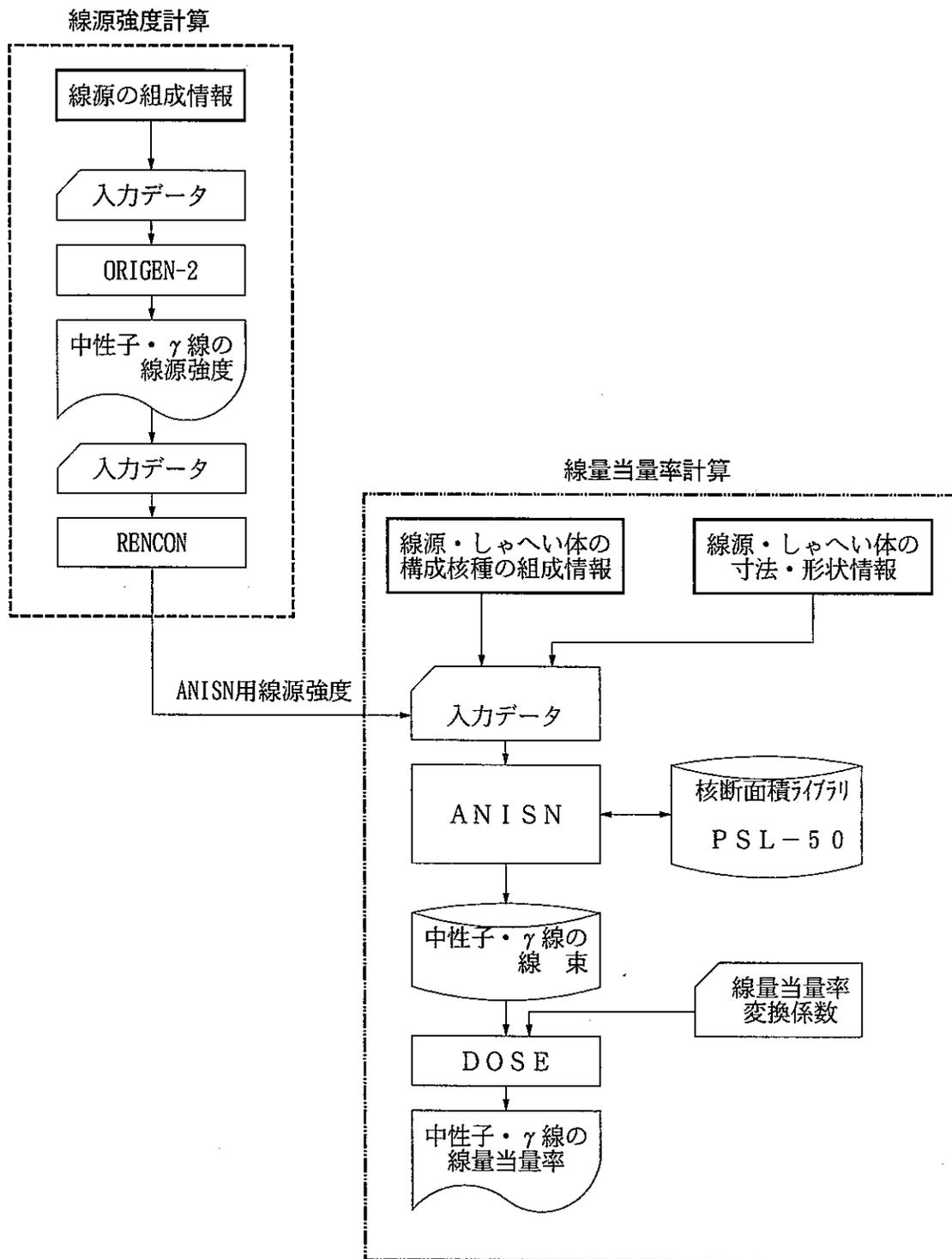


図-3.1 TRU燃料線量当量解析フロー

4. 線量当量解析手法の検証

4.1 TRU線源の線量当量率測定

4.1.1 Am溶液の線量当量率測定⁽³⁾

プルトニウム燃料開発室において、PuO₂を溶解し、Amを抽出した。このAm溶液を用いてプルトニウム燃料第一開発室R-135室で線量当量率測定を実施した。

(1) 溶液調整

Am標準溶液は、PuO₂粉末を硝酸で溶解後、イオン交換樹脂によりプルトニウムと分離精製し、さらにγスペクトル分析法により濃度を確定し、Stock Solutionとする。これより既知量を分取・希釈し、試験溶液とした。(図-4.1及び図-4.2参照)

なお、Am溶液中のプルトニウムの残留量は、検出限界以下と推定される。

(2) 測定条件

① 測定器具

- (a) Am濃度測定 ; γ線スペクトロメトリ^{*1}
- (b) γ線線量当量率測定 ; 電離箱サーベイメータ^{*2}

② 測定年月日

- (a) 第1回 ; 平成2年4月23日
- (b) 第2回 ; 平成3年7月27日
- (c) 第3回 ; 平成3年10月14日

③ シャへい体

- (a) アクリル ; 1 cm厚
- (b) アクリル+鉛ガラス ; 各1 cm厚

④ 測定体系

図-4.3に示す。

*1 : 検出器は、NaIシンチレータであり、検量線に基づいて濃度を確定する。

*2 : エネルギー特性は、50keV~1.2MeV の範囲で照射線量に対して一定である。

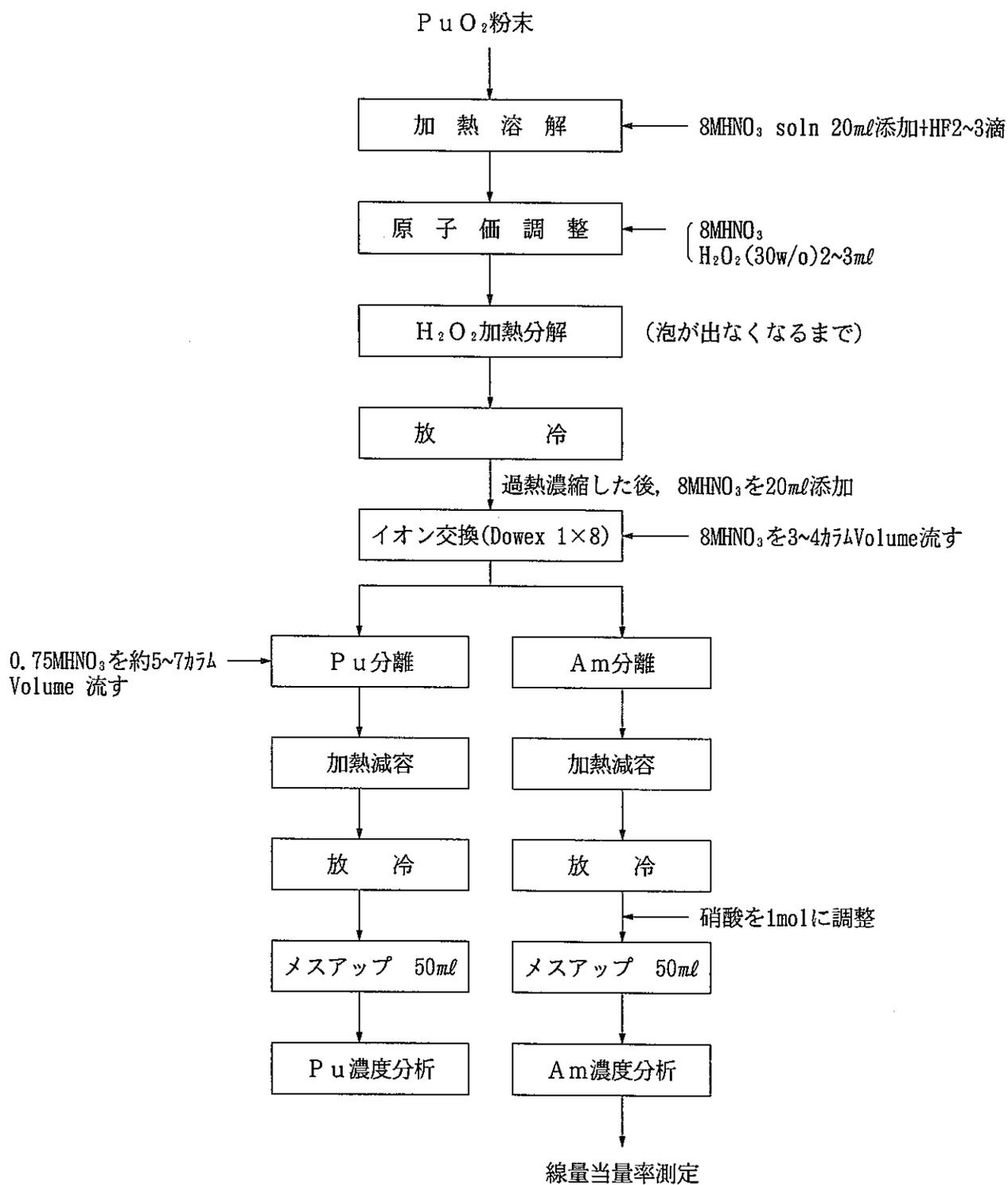


図-4.1 Am溶液の調整フロー

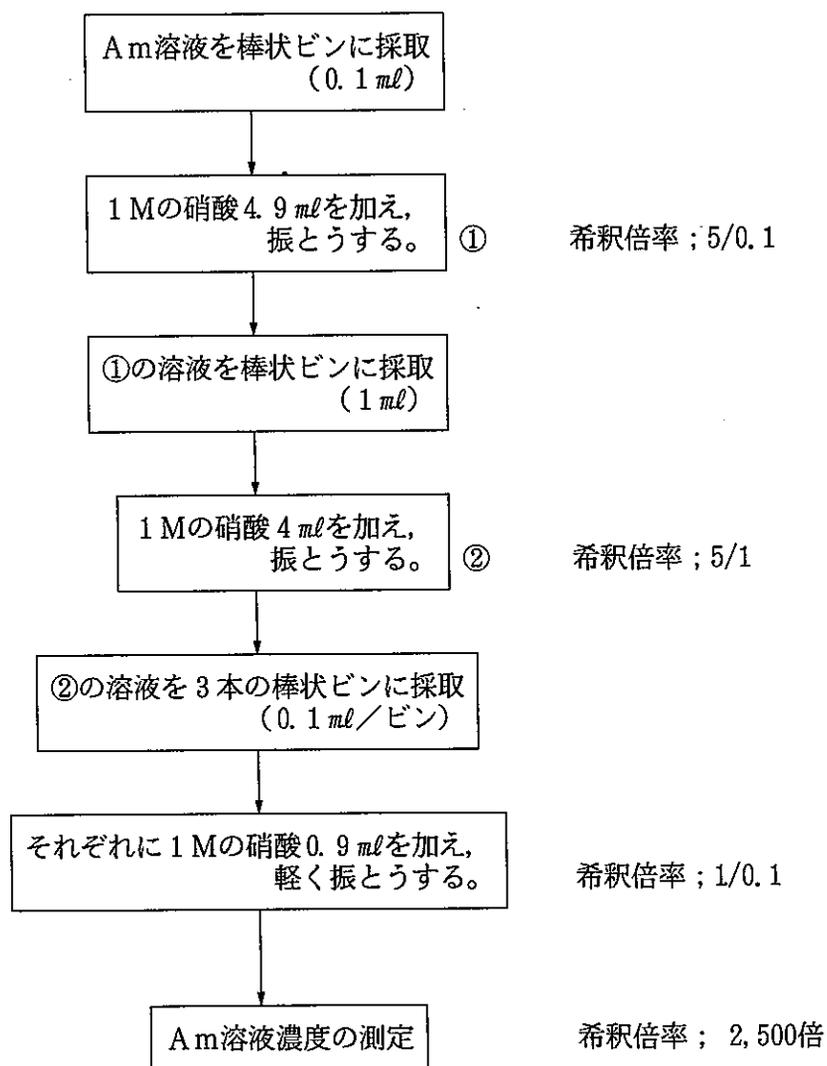
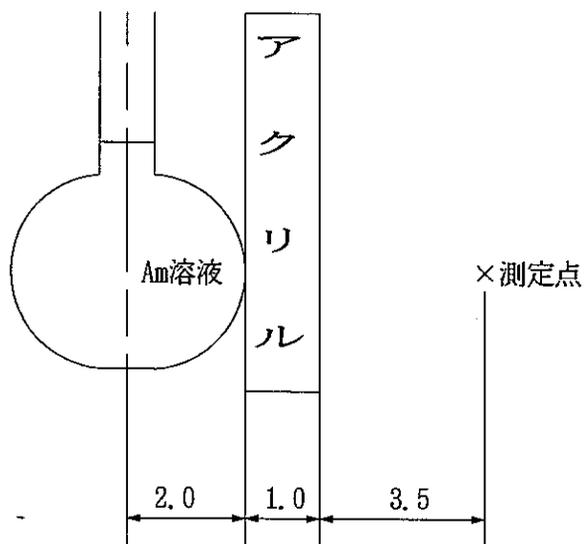
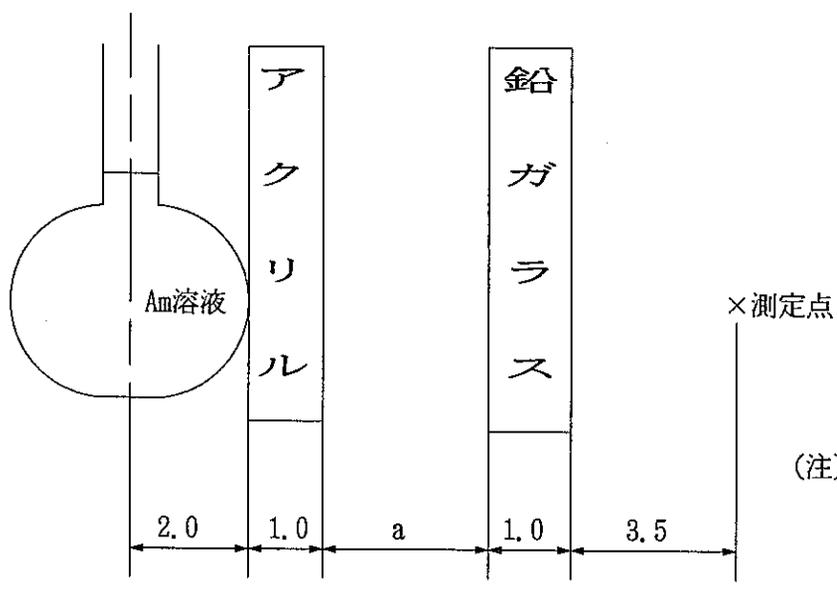


図-4.2 Am溶液のサンプリング方法



(注) 単位 ; cm

図-4.3(1) Am溶液の測定体系-1



(注) 単位 ; cm

a ; 1.5cm (第1回)
 ; 7.0cm (第2回)
 ; 10.6cm (第3回)

図-4.3(2) Am溶液の測定体系-2

(3) 線源組成

測定に使用したAm溶液の線源組成を以下の表に示す。

測定年月日 項目	第1回 (H2. 4. 23)	第2回 (H3. 7. 27)	第3回 (H3. 10. 14)
Am濃度 ($\mu\text{g}/\text{ml}$)	296.25	566.00	389.30
硝酸濃度 (mol)	1	1	1
線源体積 (ml)	23	24	24

(4) 線量当量率の測定結果

Am溶液線源の線量当量率測定結果を下表に示す。

測定 年月日	しゃへい 体	線源中心 からの距 離 (cm)	測定データ ($\mu\text{Sv}/\text{hr}$)		
			線量当量率(a)	バックグラウンド (b)	(a) - (b)
H2. 4. 23	アクリル (1 cm)	6.5	1980	29.00	1951.00
H3. 7. 27			2080	49.92	2030.08
H3. 10. 14			1040	24.20	1015.80
H2. 4. 23	アクリル (1cm) + 鉛ガラス (1cm)	9.0	5.9	3.6	2.30
H3. 7. 27		14.4	1.8	1.8	<1.00
H3. 10. 14		18.0	2.42	0.99	1.43

4.1.2 (Am, U) O₂ ペレットの線量当量率測定

ヨーロッパ共同体超ウラン元素研究所において、TRU燃料開発の一環として製造された (Am, U) O₂ ペレットを用いて線量当量率測定を実施した。

(1) 測定条件

① 測定器具

(a) γ 線線量当量率測定 ; 電離箱サーベイメータ

② シャへい体

(a) アクリル ; 1 cm厚

(b) アクリル+鉛 ; アクリル=1 cm厚, 鉛=0.3mm厚

③ 測定体系

図-4.4に示す。

(2) 線源組成

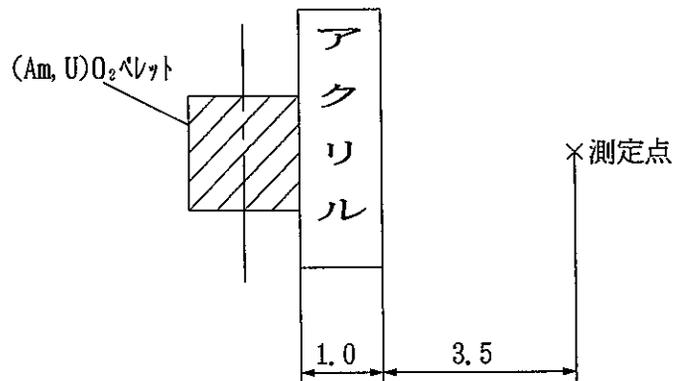
測定に使用した (Am, U) O₂ ペレットの線源組成を以下の表に示す。なお、ペレット密度及び ²³⁵U濃縮度については、未測定である。

No.	$\frac{\text{Am}}{\text{Am} + \text{U}}$	ペレット重量 (mg)	ペレット密度 (%T. D.)	ウラン濃縮度
1	47.5w/o	1,597	未測定	未測定
2				
3	5 w/o	140		
4	20w/o	144		
5	40w/o	130		

(3) 線量当量率の測定結果

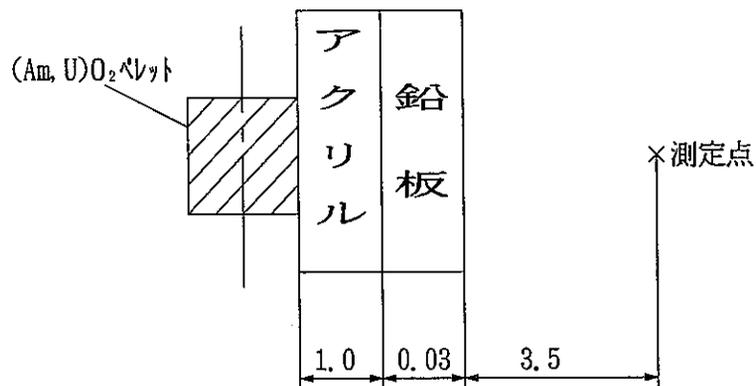
(Am, U) O₂ ペレット線源の線量当量率測定結果を下表に示す。ただし、No.2のケースのバックグラウンドについては、未測定であったため、暫定値を使用した。この暫定値は、No.1のケースとNo.2のケースの線量当量率の比をNo.1のケースのバックグラウンドに乗じた値とした。

No.	ペレット表面からの距離 (cm)	しゃへい体	測定データ ($\mu\text{Sv/hr}$)		
			線量当量率(a)	バックグラウンド (b)	(a) - (b)
1	4.5	アクリル	6264.0	348.0	5916.0
2	4.53	アクリル+鉛	417.6	23.0	394.6
3	4.5	アクリル	313.2	121.8	191.4
4			556.8	139.2	417.6
5			1392.0	121.8	1270.2



(注) 単位 ; cm

図-4.4(1) (Am, U) O₂ ペレットの測定体系-1



(注) 単位 ; cm

図-4.4(2) (Am, U) O₂ ペレットの測定体系-2

4.1.3 Np合金の線量当量率測定⁽⁶⁾

ヨーロッパ共同体超ウラン元素研究所において、TRU燃料開発の一環として製造されたNp合金を用いて線量当量率測定を実施した。

(1) 測定条件

① 測定器具

(a) γ 線線量当量率測定 ; 電離箱サーベイメータ

② しゃへい体 ; 無し (ガラス容器のみ)

③ 測定体系

図-4.5に示す。

(2) 線源組成

測定に使用したNp合金の線源組成を以下に示す。

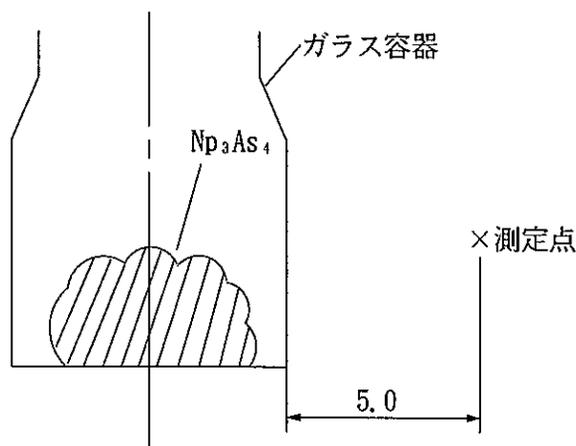
① 組成 ; Np_3As_4 合金 (合金密度; 100%)

② 線源重量 ; 約1.5g

(3) 線量当量率の測定結果

Np合金線源の線量当量率測定結果を下表に示す。

線源表面からの距離 (cm)	測定データ ($\mu\text{Sv/hr}$)		
	線量当量率(a)	バックグラウンド (b)	(a) - (b)
5.0	348.0	検出限界以下	348.0



(注) 単位 ; cm

図-4.5 Np合金の測定体系

4.2 測定データに基づく解析^{(2) (3)}

4.1で述べた測定データに基づき解析を実施した。

(1) 解析条件

測定データに基づく線量当量率の解析を行うための各種解析条件を以下に示す。

① 線源組成

4.1項で述べた測定データのうち、解析に使用した線源の組成及びしゃへい体を以下の表に示す。

No.	組成	形態	しゃへい体	密度 (g/cc)	解析体系	備考
1	Am(NO ₃) ₄	溶液	アクリル	1.031	図-4.6(1)	Am=296.25 μg/cc
2				1.032		Am=566.00 μg/cc
3				1.032		Am=389.30 μg/cc
4			アクリル + 鉛ガラス	1.031	図-4.6(2)	Am=296.25 μg/cc
5				1.032		Am=566.00 μg/cc
6				1.032		Am=389.30 μg/cc
7	(Am, U)O ₂	ペレット	アクリル	10.732	図-4.7(1)	Am/(Am+U)=47.5w/o
8			アクリル+鉛		図-4.7(2)	
9			アクリル	10.124	図-4.7(3)	Am/(Am+U)=5w/o
10			アクリル	10.218		Am/(Am+U)=20w/o
11			アクリル	10.345		Am/(Am+U)=40w/o
12	Np ₃ As ₄	合金	--	11.098	図-4.8	

上記の表中のNo.7~11については、ウランの組成を天然ウランと仮定した。また、密度については、金相写真観察より、No.7~8を92%T.D.とし、No.9~11を95%T.D.とした。

上記の表中の密度(g/cc)については、下記の方法により算出した。

(a) Am(NO₃)₄溶液⁽⁷⁾

$$\rho = 1.0 + 0.031 M_{\text{HNO}_3} + 0.146 \text{ Am}$$

ここで、 ρ ; 溶液密度 (g/cc)

M_{HNO_3} ; 硝酸のモル数 (N)

Am ; Amの濃度 (g/cc)

(b) (Am, U)O₂ペレット⁽⁸⁾

$$\dot{A}_{AmUO_2} = \dot{A}_{AmO_2} + (\dot{A}_{UO_2} - \dot{A}_{AmO_2}) \times wt_U$$

$$\rho = ((W_{UO_2} \times wt_U + W_{AmO_2} \times wt_{Am}) \times 4 + W_O \times 8) / A \times (10^8 / \dot{A}_{AmUO_2}) \times \rho_{TD}$$

ここで, \dot{A}_{AmUO_2} ; (Am, U)O₂の格子定数 \dot{A}_{AmO_2} ; AmO₂の格子定数 (5.376) \dot{A}_{UO_2} ; UO₂の格子定数 (5.468)wt_U ; Uの重量比W_{UO₂} ; Uの質量W_{AmO₂} ; Amの質量wt_{Am} ; Amの重量比W_O ; Oの質量 ρ_{TD} ; 密度 (%T. D.)A ; アボガドロ数 (6.02252 × 10²³)(c) Np₃As₄合金⁽⁸⁾

$$\dot{A}_{Np_3As_4} = \dot{A}_{U_3As_4} \times \dot{A}_{NpO_2} / \dot{A}_{UO_2}$$

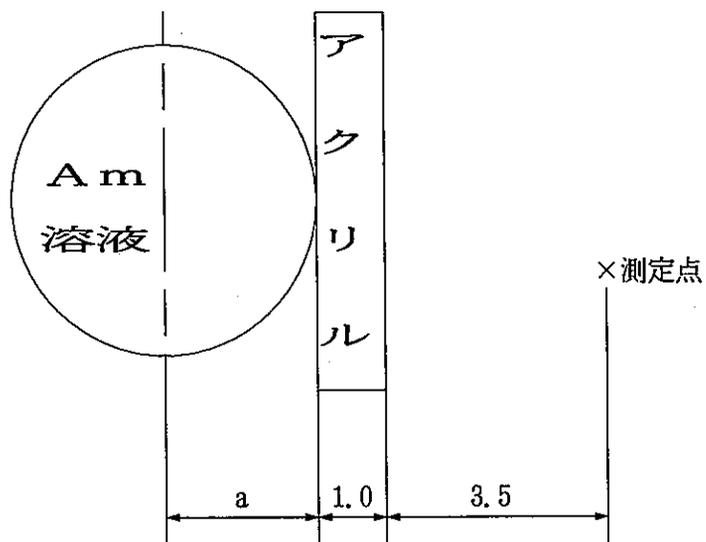
$$\rho = (W_{Np} \times 12 + W_{As} \times 16) / A \times (10^8 / \dot{A}_{Np_3As_4})$$

ここで, $\dot{A}_{Np_3As_4}$; Np₃As₄の格子定数 $\dot{A}_{U_3As_4}$; U₃As₄の格子定数 (8.510) \dot{A}_{NpO_2} ; NpO₂の格子定数 (5.434) \dot{A}_{UO_2} ; UO₂の格子定数 (5.468)W_{Np} ; Npの質量W_{As} ; Asの質量A ; アボガドロ数 (6.02252 × 10²³)

(注) Asについては, 断面積ライブラリに格納されていないため, 考慮しないこととする。

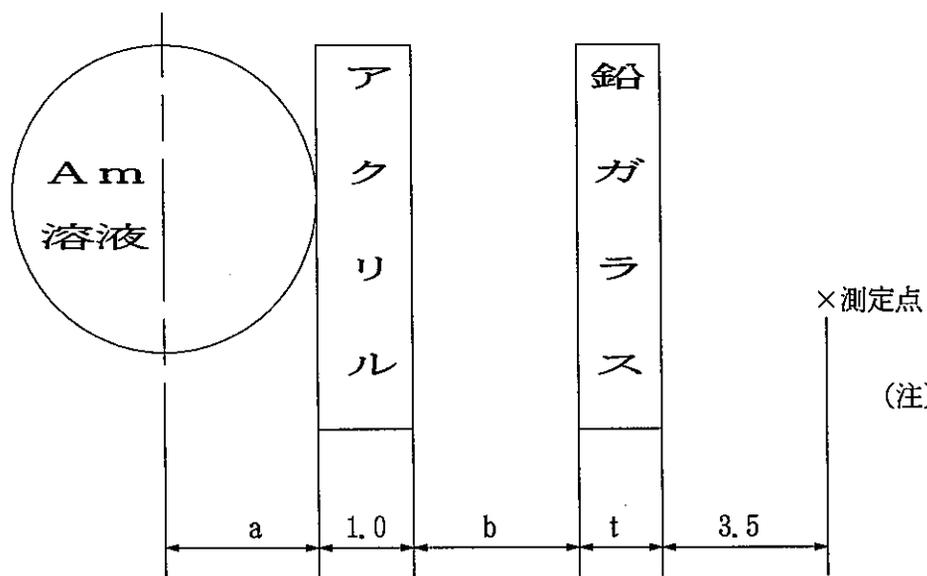
② 解析体系

図-4.6~図-4.8に示す。なお, 本評価では, 線源の大きさが小さいため, すべて同一体積の球体系にモデル化した。



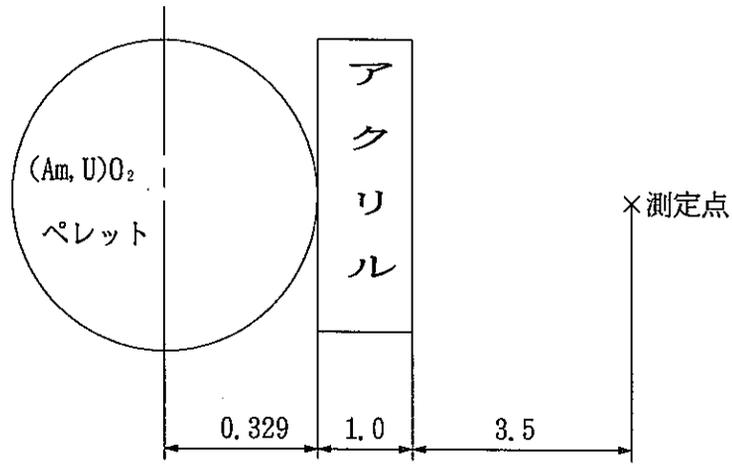
(注) ケ-ス1 ; $a=1.764\text{cm}$
 ケ-ス2 ; $a=1.789\text{cm}$
 ケ-ス3 ; $a=1.789\text{cm}$
 単位 ; cm

図-4.6(1) Am溶液の解析体系-1



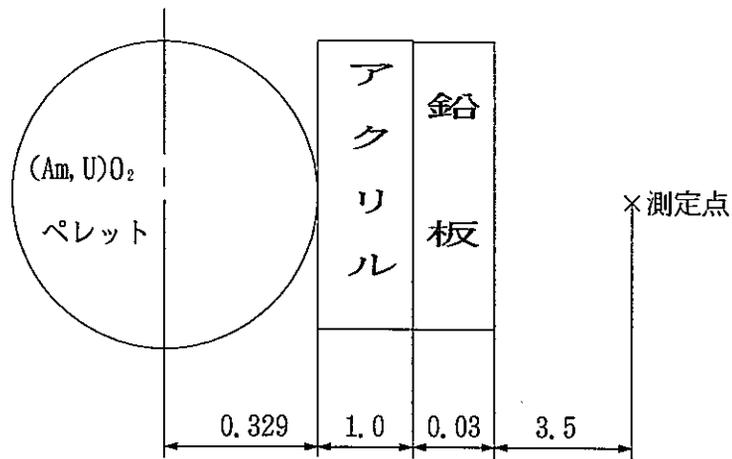
(注) ケ-ス4 ; $a=1.764\text{cm}$
 $b=1.5\text{cm}$
 $t=1.0\text{cm}$
 ケ-ス5 ; $a=1.789\text{cm}$
 $b=7.0\text{cm}$
 $t=0.9\text{cm}$
 ケ-ス6 ; $a=1.789\text{cm}$
 $b=10.6\text{cm}$
 $t=0.9\text{cm}$
 単位 ; cm

図-4.6(2) Am溶液の解析体系-2



(注) 単位 ; cm

図-4.7(1) (Am, U) O₂ ペレットの解析体系-1



(注) 単位 ; cm

図-4.7(2) (Am, U) O₂ ペレットの解析体系-2

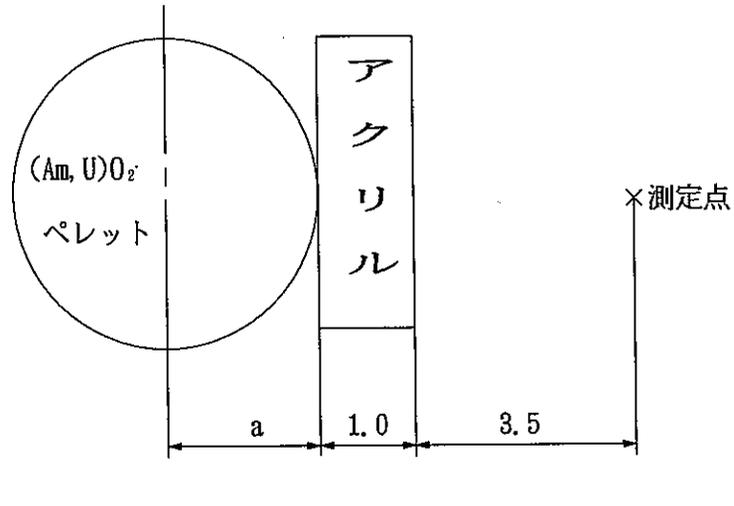


図-4.7(3) (Am, U) O₂ ペレットの解析体系-3

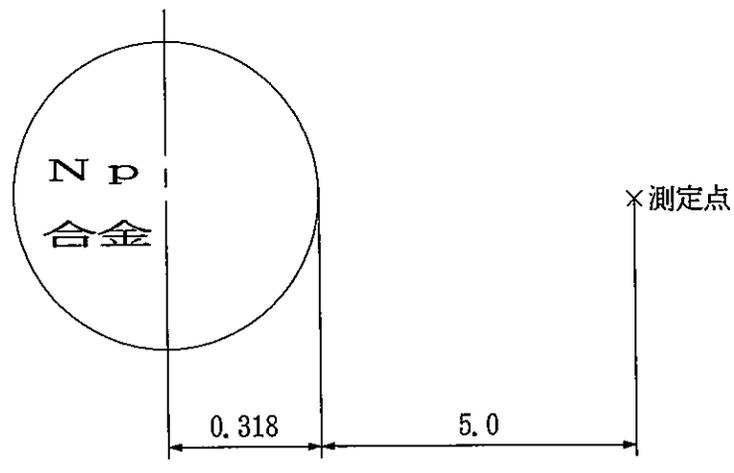


図-4.8 Np₃As₄ 合金の解析体系

(2) 解析結果

前述の解析条件に基づき、解析した結果と測定データの比較を表-4.1に示す。

表-4.1 解析結果と測定データの比較

No.	組成	しゃへい体	測定データ ($\mu\text{Sv/hr}$) (a)	解析結果 ($\mu\text{Sv/hr}$) (b)	(b)/(a)	備考
1	$\text{Am}(\text{NO}_3)_3$ 溶液	アクリル	1951.00	2439.83	1.25	$\text{Am}=296.25 \mu\text{g/cc}$
2			2030.08	4801.82	2.36	$\text{Am}=566.00 \mu\text{g/cc}$
3			1015.80	3264.43	3.21	$\text{Am}=389.30 \mu\text{g/cc}$
4		アクリル + 鉛ガラス	2.3	0.14	0.06	$\text{Am}=296.25 \mu\text{g/cc}$
5			0.1以下	0.13	1.3以上	$\text{Am}=566.00 \mu\text{g/cc}$
6			1.43	0.07	0.05	$\text{Am}=389.30 \mu\text{g/cc}$
7	$(\text{Am}, \text{U})\text{O}_2$ ペレット	アクリル	5916.0	23172.0	4.46	$\text{Am}/(\text{Am}+\text{U})=47.5\text{w/o}$
8		アクリル+鉛	394.6	4001.0	10.14	
9		アクリル	191.4	303.0	1.58	$\text{Am}/(\text{Am}+\text{U})=5\text{w/o}$
10			417.6	1430.0	3.42	$\text{Am}/(\text{Am}+\text{U})=20\text{w/o}$
11			1270.2	3542.0	2.79	$\text{Am}/(\text{Am}+\text{U})=40\text{w/o}$
12	Np_3As_4 合金	---	348.0	1532.0	4.40	

4.3 考 察

(1) Am溶液線源の場合

- ① シャへい体がアクリルのみの場合、ケースNo.1を除き、解析結果の方が測定データより、2～3倍高くなっている。しかし、ケースNo.1に比べてケースNo.3の方がAm濃度が高いにもかかわらず、ケースNo.1より測定結果が小さくなっている。また、下記の表-4.2に示すように、Am濃度の違いと解析結果の違いの比は良く一致していることから、測定データの間違い（Am濃度測定時希釈倍率の誤り）ではないかと考えられる。（図-4.2参照）

表-4.2 Am濃度の違いと解析結果の違いの比

ケ ー ス No.		1	2	3	比 率		
測 定 年 月 日		H2. 4. 23 (a)	H3. 7. 27 (b)	H3. 10. 14 (c)	(b)/(a)	(c)/(b)	
測定結果	Am濃度 ($\mu\text{g}/\text{cc}$)	296. 25	566. 00	389. 30	1. 91	0. 69	
解 析 結 果	線源強度 (n/sec-cc)	$2. 337 \times 10^7$	$4. 462 \times 10^7$	$3. 070 \times 10^7$	1. 91	0. 69	
	シャへい 体	アクリル ($\mu\text{Sv}/\text{hr}$)	2439. 83	4801. 82	3264. 43	1. 97	0. 68
		アクリル+鉛ガラス ($\mu\text{Sv}/\text{hr}$)	0. 0649* ¹	0. 1265* ¹ 0. 1004* ²	0. 069* ²	1. 95	0. 69

(注) *1: 線源中心からの距離=14.4cm

*2: 線源中心からの距離=18.0cm

- ② シャへい体がアクリル+鉛ガラスの場合、3回の測定について、アクリルの場合と異なり、Am濃度と線量当量率の間に相関は見られない。しかし、表-4.2に示すようにAm濃度の違いと解析結果の違いの比は良く一致している。（ケースNo.1については、上記①と同様の理由により除く。）この原因としては、Amから放出されるガンマ線のエネルギーが低いため、鉛ガラスによるシャへい効果が大きく、測定した場所のバックグラウンドと同じオーダーであることから、測定誤差の大きい領域での測定となったためと考えられる。（これは7ページの表に示すように、ケースNo.3の方がケースNo.2よりもAm濃度が低いにもかかわらず、測定結果が高くなっていることから推測される。）

(2) (Am, U) O₂ペレット線源の場合

(Am, U) O₂ペレット線源の場合、どのケースも測定データに比較して、解析結果が高めの評価となっている。これは、詳細な測定データ（密度、ウランの組成等）が得られなかったことを考慮すると妥当と考えられる。しかし、鉛板しゃへいのケースについては、他のケースに比べて特に高めの評価（10倍以上）となっている。これは、測定時のバックグラウンドの測定が未測定であったため、暫定値を使用したことによるものと考えられる。

(3) Np合金線源の場合

Np合金線源の場合も、解析結果の方が高くなっている。これは、Npより含有量の多いAsがライブラリに格納されていないため、解析時に考慮しなかったために自己しゃへい効果を少なく評価したためと考える。

4.4 結 論

(1) Am溶液線源の場合

- ① シャへい体がアクリルのみの場合、解析結果の方が測定データより、2～3倍高くなり、安全側の評価となった。これは、通常のMOX燃料の場合と同様であり、解析手法の妥当性が確認できた。
- ② シャへい体がアクリル+鉛ガラスの場合は、解析結果と測定データの関連が見られない。この原因としては、鉛ガラスによるシャへい効果が大きく、測定した場所のバックグラウンドと同じオーダーであることから測定誤差と考えられる。今後、バックグラウンドの低い場所でより詳細な測定を行う必要がある。

(2) (Am, U) O₂ペレット線源の場合

(Am, U) O₂ペレット線源の場合、どのケースも測定データに比較して、解析結果が1.5～4.5倍高くなっている。この解析については、詳細な測定データが得られなかったことを考慮すると、解析手法の妥当性は確認できたと言える。ただし、鉛シャへいのケースについては、10倍以上高く評価しており、これはバックグラウンドが未測定であったため、暫定値を使用したことによるものと考えられる。

(3) Np合金線源の場合

Np合金線源の場合は、解析結果の方が4.4倍も高くなっている。これは、Npより含有量の多いAsがライブラリに格納されていないため、解析時に無視をしたため自己シャへい効果を少なく評価したためと考える。なお、Asの代わりに質量数の近いCuを使用して解析したところ、553.6μSv/hrとなった。

以上の結論より若干問題点は残るが、これまでMOX燃料の線量当量率の解析に使用してきた解析手法(ORIGEN, ANISNコード, PSL-50ライブラリ)は、TRU含有燃料の線量当量解析に使用できると判断する。

5. TRU燃料取扱時の線量当量率評価

現状のプルトニウム燃料施設のグローブボックスにおいて、しゃへい能力及び線量当量率の観点から、TRU燃料を製造することが可能か否かについて、以下の3つの評価を行った。

- (1) しゃへい能力の面から見たグローブボックスでの最大取扱量の評価
- (2) ペレット小規模の照射燃料製造時の全身・手部に対する線量当量率評価
- (3) 「常陽」特殊燃料規模の照射燃料製造時の全身・手部に対する線量当量率評価

5.1 グローブボックスでの最大取扱量の評価⁽⁴⁾

現状のプルトニウム燃料施設のグローブボックスにおいて、TRU燃料を製造する場合の最大取扱量をしゃへい能力の面から評価した条件及び結果を以下に示す。

(1) 線源条件

本評価に使用した線源組成等の条件を以下に示す。

- ① 組成 : {
- (a) $(Pu_{0.3} + U_{0.7}) O_2$
 - (b) $(Pu_{0.28} + U_{0.7} + Am_{0.02}) O_2$
 - (c) $(Pu_{0.25} + U_{0.7} + Am_{0.05}) O_2$
 - (d) $(Pu_{0.28} + U_{0.7} + Np_{0.02}) O_2$
 - (e) $(Pu_{0.25} + U_{0.7} + Np_{0.05}) O_2$
 - (f) $(U_{0.5} + Am_{0.5}) O_2$
 - (g) $(U_{0.5} + Np_{0.5}) O_2$
 - (h) AmO_2
 - (i) NpO_2

② ^{235}U 濃縮度 : 0.717 w/o (天然ウラン)

③ Pu同位体比 : {

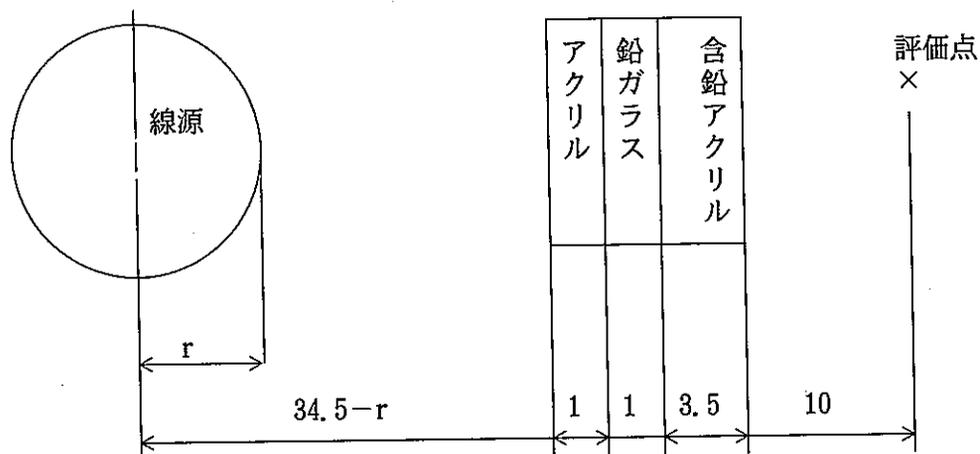
- $^{238}Pu = 1.2 w/o$
- $^{239}Pu = 65.6 w/o$
- $^{240}Pu = 22.3 w/o$
- $^{241}Pu = 8.8 w/o$
- $^{242}Pu = 2.1 w/o$

(組成が(a)のみ、精製後日数=1000日とする。)

④ 密度 : 2 g/cc (粉末を想定)

(2) 評価体系

図-5.1 に評価に使用する体系を示す。



(注) 単位 ; cm

図-5.1 最大取扱量の評価体系

(3) その他

評価に際して、最大取扱量としては、1つの線源と仮定し、粉末の飛散によるグローブボックスパネル内面への粉末の付着は考慮しないこととした。

(4) 評価結果

現状のプルトニウム燃料施設のグローブボックスにおけるしゃへい能力の観点から見た最大取扱量を表-5.1及び図-5.2に示す。なおこの時の制限値としては、パネル表面で線量当量率を法令値である1 mSv/週に相当する20 μ Sv/hrとした。

表-5.1 グローブボックスでの最大取扱量

燃料の組織	最大取扱量
$(\text{Pu}_{0.3} + \text{U}_{0.7})\text{O}_2$	5.0 kg
$(\text{Pu}_{0.28} + \text{U}_{0.7} + \text{Am}_{0.02})\text{O}_2$	4.3 kg
$(\text{Pu}_{0.25} + \text{U}_{0.7} + \text{Am}_{0.05})\text{O}_2$	3.0 kg
$(\text{Pu}_{0.28} + \text{U}_{0.7} + \text{Np}_{0.02})\text{O}_2$	5.5 kg
$(\text{Pu}_{0.25} + \text{U}_{0.7} + \text{Np}_{0.05})\text{O}_2$	6.0 kg
$(\text{U}_{0.5} + \text{Am}_{0.5})\text{O}_2$	0.5 kg
$(\text{U}_{0.5} + \text{Np}_{0.5})\text{O}_2$	10×10^3 kg
AmO_2	0.173kg
NpO_2	150kg

(注) 表中の最大取扱量は、グラフからの読み取り値

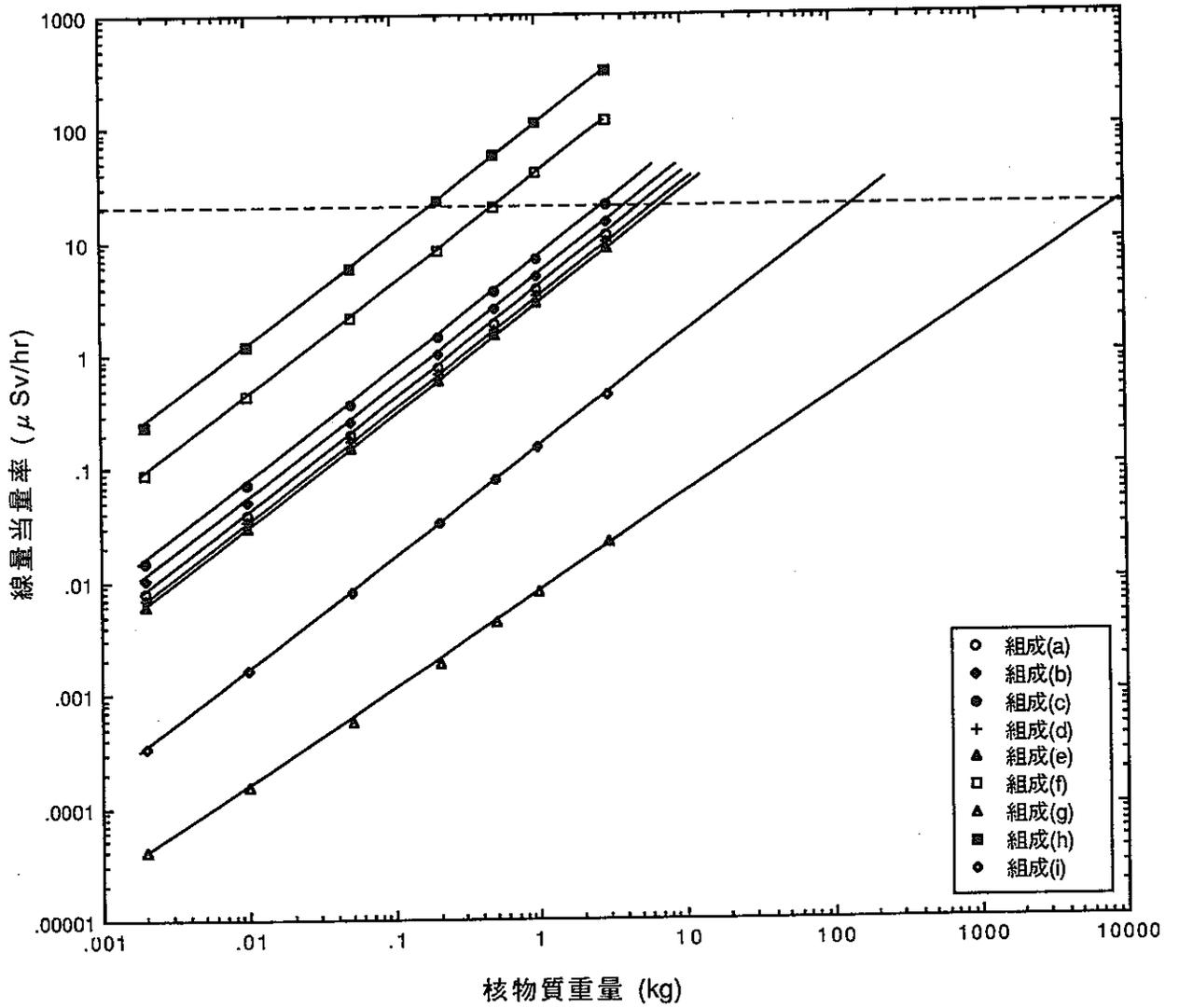


図-5.2 グローブボックスでの最大取扱量

5.2 ペレット小規模製造時の線量当量率評価⁽⁵⁾

プルトニウム燃料第一開発室R-129室において、ペレット小規模のTRU燃料を製造する場合の全身及び手部に対する線量当量率評価条件及び評価結果を以下に示す。

(1) 線源条件

本評価に使用した線源組成等の条件を以下に示す。

- ① 組成 : $\left\{ \begin{array}{l} \text{(a) } (\text{Pu}_{0.3} + \text{U}_{0.7}) \text{ O}_2 \\ \text{(b) } (\text{Pu}_{0.3} + \text{U}_{0.68} + \text{Am}_{0.02}) \text{ O}_2 \\ \text{(c) } (\text{Pu}_{0.3} + \text{U}_{0.65} + \text{Am}_{0.05}) \text{ O}_2 \\ \text{(d) } (\text{Pu}_{0.3} + \text{U}_{0.6} + \text{Am}_{0.1}) \text{ O}_2 \end{array} \right.$
- ② U同位体比 : $\left\{ \begin{array}{l} {}^{234}\text{U} = 0.005 \text{ W/o} \\ {}^{235}\text{U} = 0.717 \text{ W/o} \\ {}^{238}\text{U} = 99.278 \text{ W/o} \end{array} \right.$
- ③ Pu同位体比 : $\left\{ \begin{array}{l} {}^{238}\text{Pu} = 1.2 \text{ W/o} \\ {}^{239}\text{Pu} = 65.5 \text{ W/o} \\ {}^{240}\text{Pu} = 22.3 \text{ W/o} \\ {}^{241}\text{Pu} = 8.8 \text{ W/o} \\ {}^{242}\text{Pu} = 2.1 \text{ W/o} \end{array} \right.$
(組成が(a)のみ、精製後日数=1000日とする。)
- ④ Am同位体比 : ${}^{241}\text{Am} = 100 \text{ W/o}$
- ⑤ 密度 : $\left\{ \begin{array}{l} \text{(a) } 10.48 \text{ g/cc (焼結ペレット) ; 焼結炉, 研削機} \\ \text{(b) } 6.62 \text{ g/cc (グリーンペレット) ; 予備焼結炉} \\ \text{(c) } 2.00 \text{ g/cc (粉末) ; プリグ, ボールミル, 成形機} \end{array} \right.$
- ⑥ 取扱量 : 300gMOX

(2) 評価体系

図-5.3にR-129室の機器及び線源配置を示す。この配置に基づき、全身の評価には、図-5.4に示す評価体系を使用し、手部の評価には図-5.5に示す評価体系を使用した。なお、グローブはネオプレン製とした。

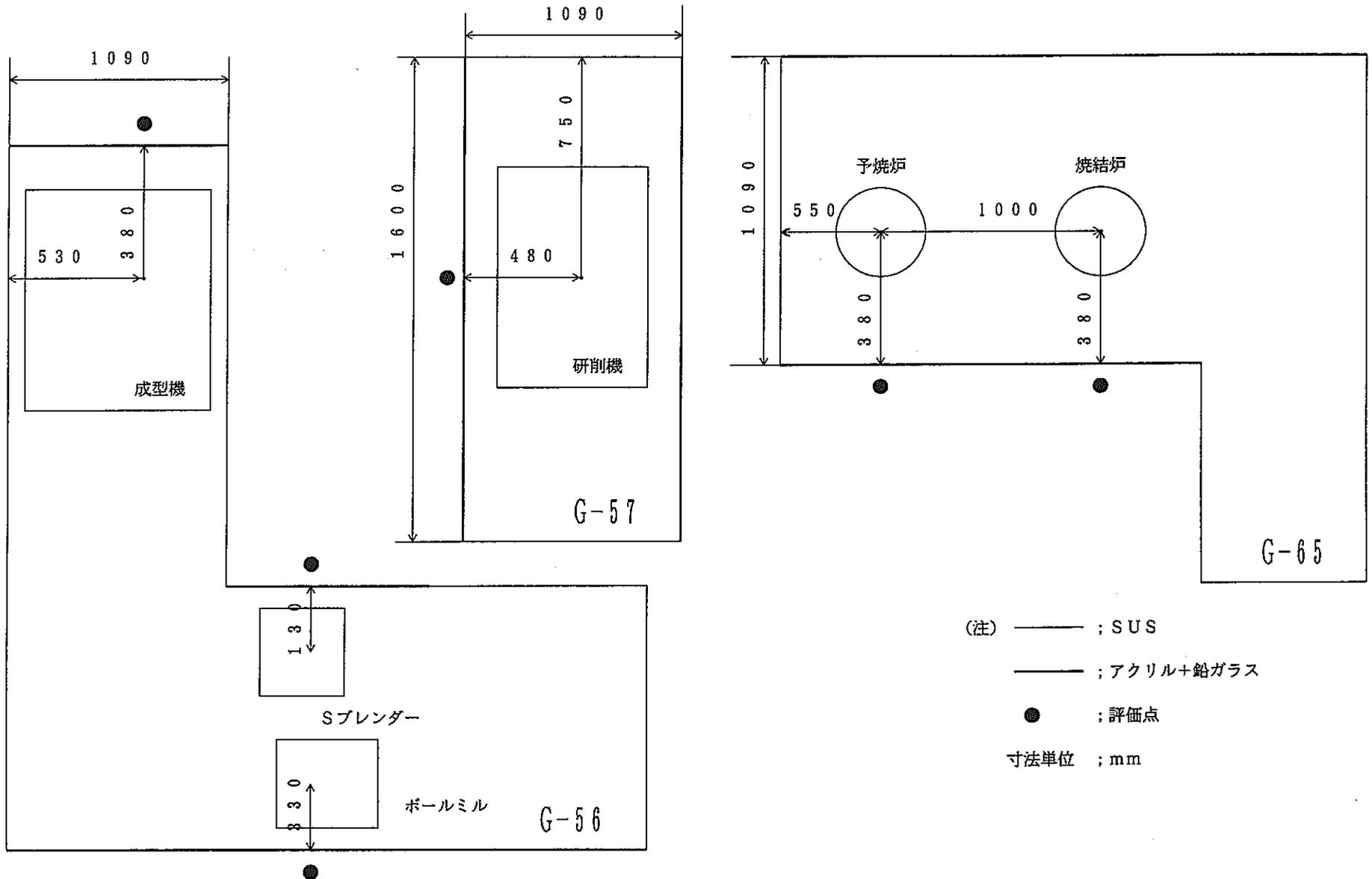


図-5.3 R-129室の機器及び線源配置

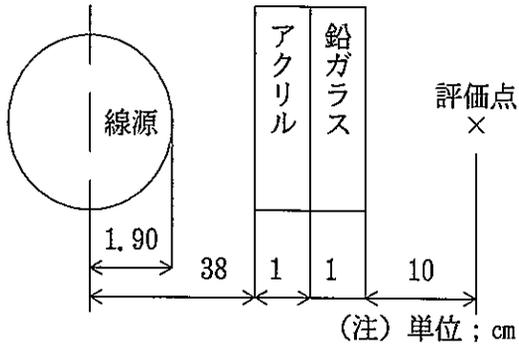


図-5.4(1) 焼結炉の評価体系

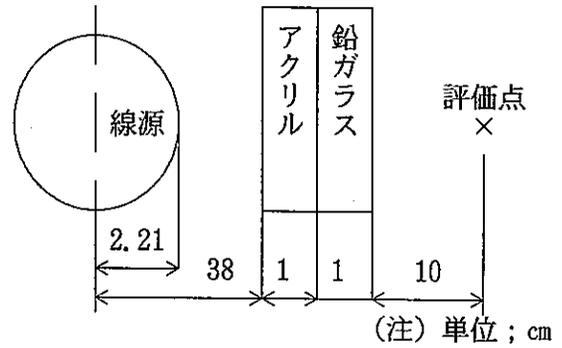


図-5.4(2) 予備焼結炉の評価体系

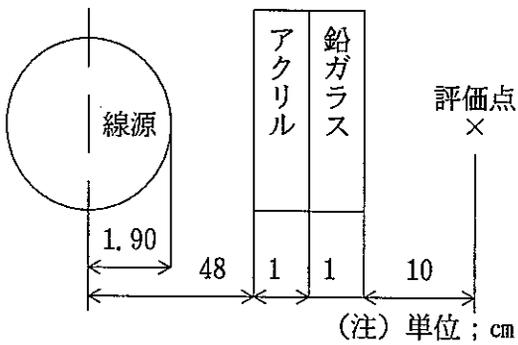


図-5.4(3) 研削機の評価体系

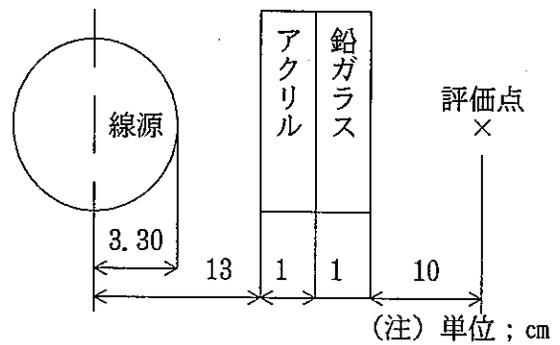


図-5.4(4) ブレンダーの評価体系

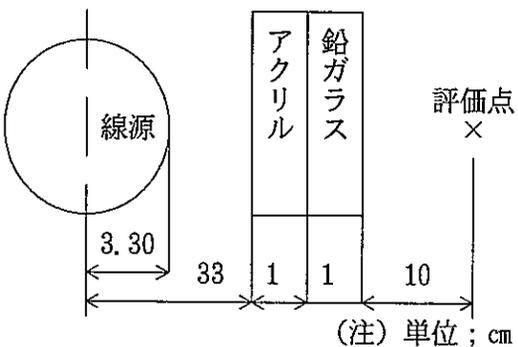


図-5.4(5) ボールミルの評価体系

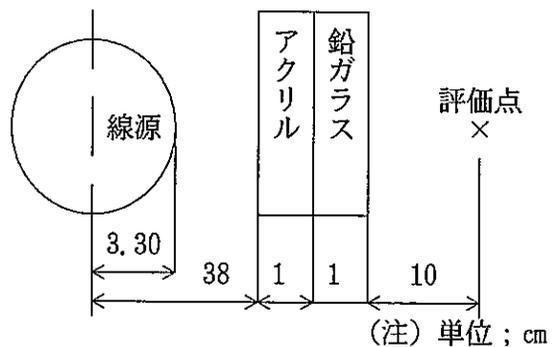


図-5.4(6) 成形機の評価体系

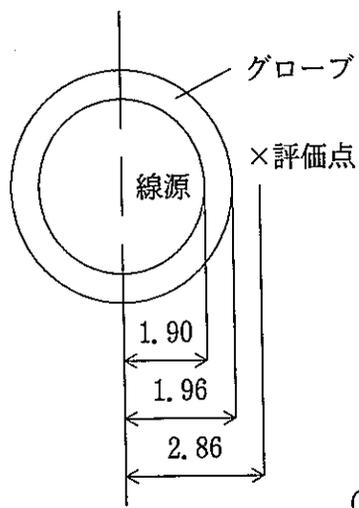


図-5.5(1) 焼結炉, 研削機の手部評価体系

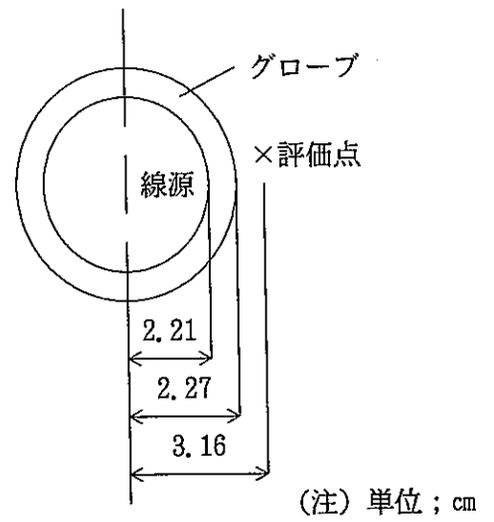


図-5.5(2) 予備焼結炉の手部評価体系

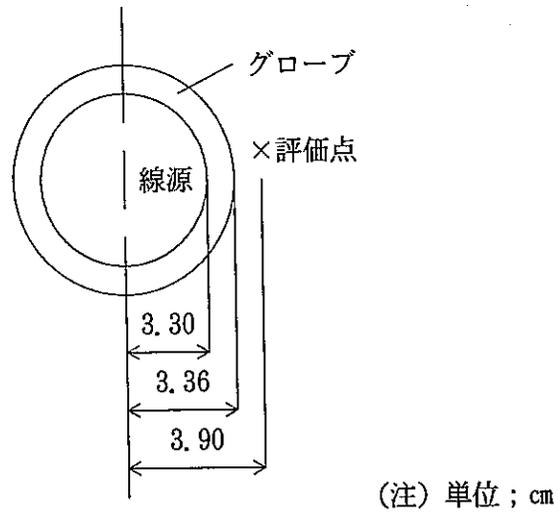


図-5.5(3) ブレンダー, ボールミル, 成型機の手部評価体系

(3) 評価結果

プルトニウム燃料第一開発室R-129室において、ペレット小規模の照射用TRU燃料を製造する場合の全身及び手部に対する線量当量率評価結果を表-5.2、表-5.3、図-5.6及び図-5.7に示す。

表-5.2 全身に対する線量当量率の評価結果

単位; $\mu\text{Sv/hr}$

対象機器	線源組成	(a)	(b)	(c)	(d)
	線種	(MOX)	(MOX+Am2w/o)	(MOX+Am5w/o)	(MOX+Am10w/o)
焼結炉	中性子線	1.699	2.302	3.344	5.074
	ガンマ線	0.500	1.110	2.236	4.243
	合計	2.199	3.412	5.580	9.317
予焼炉	中性子線	1.716	2.326	3.380	5.131
	ガンマ線	0.636	1.420	2.856	5.403
	合計	2.352	3.746	6.236	10.534
研削機	中性子線	1.191	1.614	2.344	3.556
	ガンマ線	0.347	0.772	1.554	2.950
	合計	1.538	2.386	3.898	6.506
ブレンダー	中性子線	6.888	9.337	13.580	20.630
	ガンマ線	4.375	9.712	19.410	36.290
	合計	11.263	19.049	32.990	56.920
ボールミル	中性子線	2.172	2.943	4.279	6.503
	ガンマ線	1.358	3.015	6.025	11.260
	合計	3.530	5.958	10.304	17.763
成形機	中性子線	1.768	2.396	3.483	5.294
	ガンマ線	1.101	2.444	4.884	9.131
	合計	2.869	4.840	8.367	14.425

(注) 原子炉等規制法に基づく制限値; $20 \mu\text{Sv/hr}$

表-5.3 手部に対する線量当量率の評価結果

単位;mSv/hr

対象機器	線源組織	(a)	(b)	(c)	(d)
	線種	(MOX)	(MOX+Am2w/o)	(MOX+Am5w/o)	(MOX+Am10w/o)
焼結炉 研削機	中性子線	0.486	0.656	0.948	1.434
	ガンマ線	11.20	55.67	138.5	289.0
	合計	11.686	56.326	139.448	290.434
予焼炉	中性子線	0.403	0.544	0.786	1.190
	ガンマ線	12.65	61.60	152.7	318.0
	合計	13.053	62.144	153.486	319.190
ブレンダ ボールミル 成形機	中性子線	0.289	0.390	0.565	0.855
	ガンマ線	17.70	80.57	197.5	409.1
	合計	17.989	80.960	198.065	409.955

(注) 原因調査レベル; 37mSv/3ヶ月

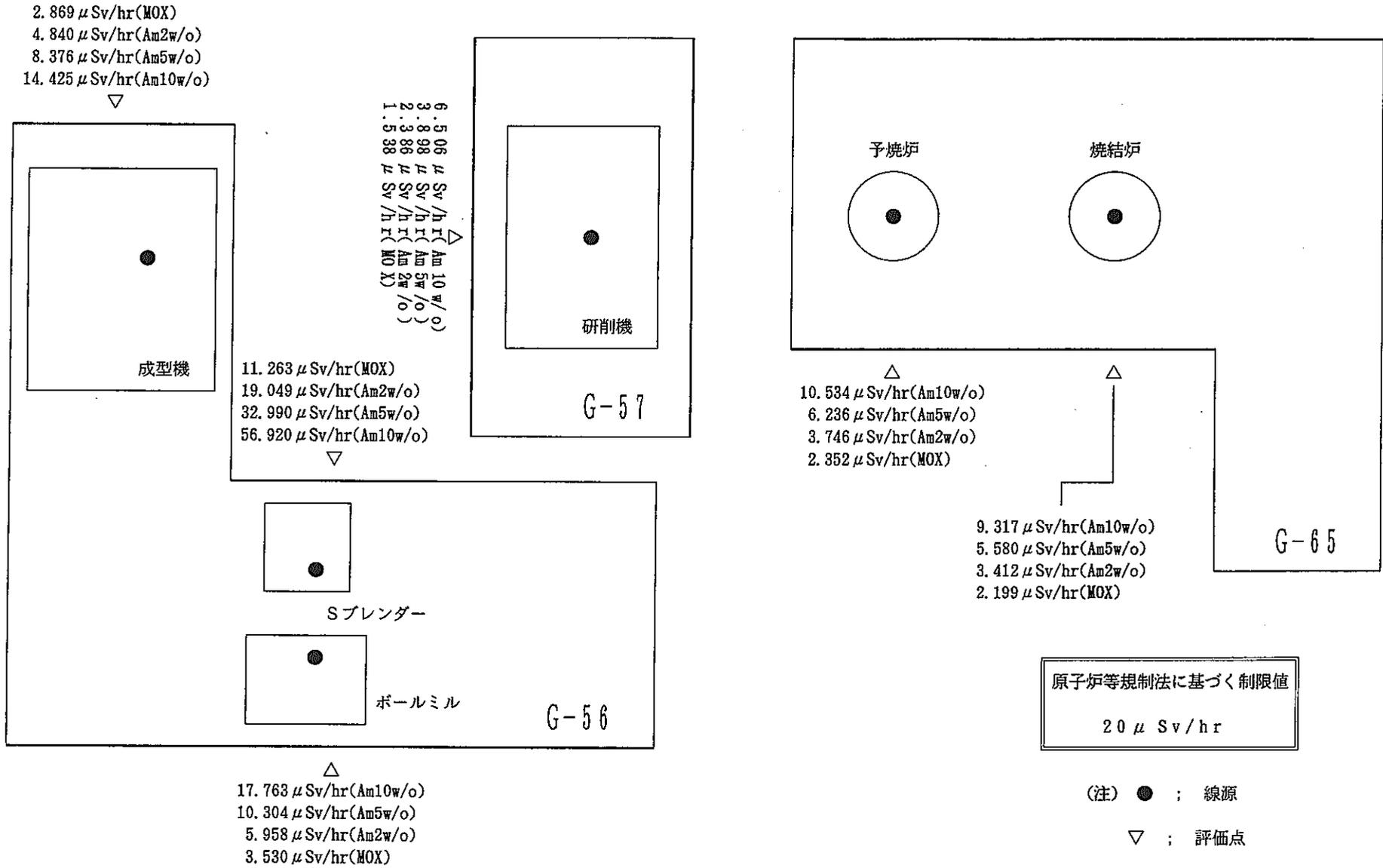


図-5.6 全身に対する線量当量率の評価結果

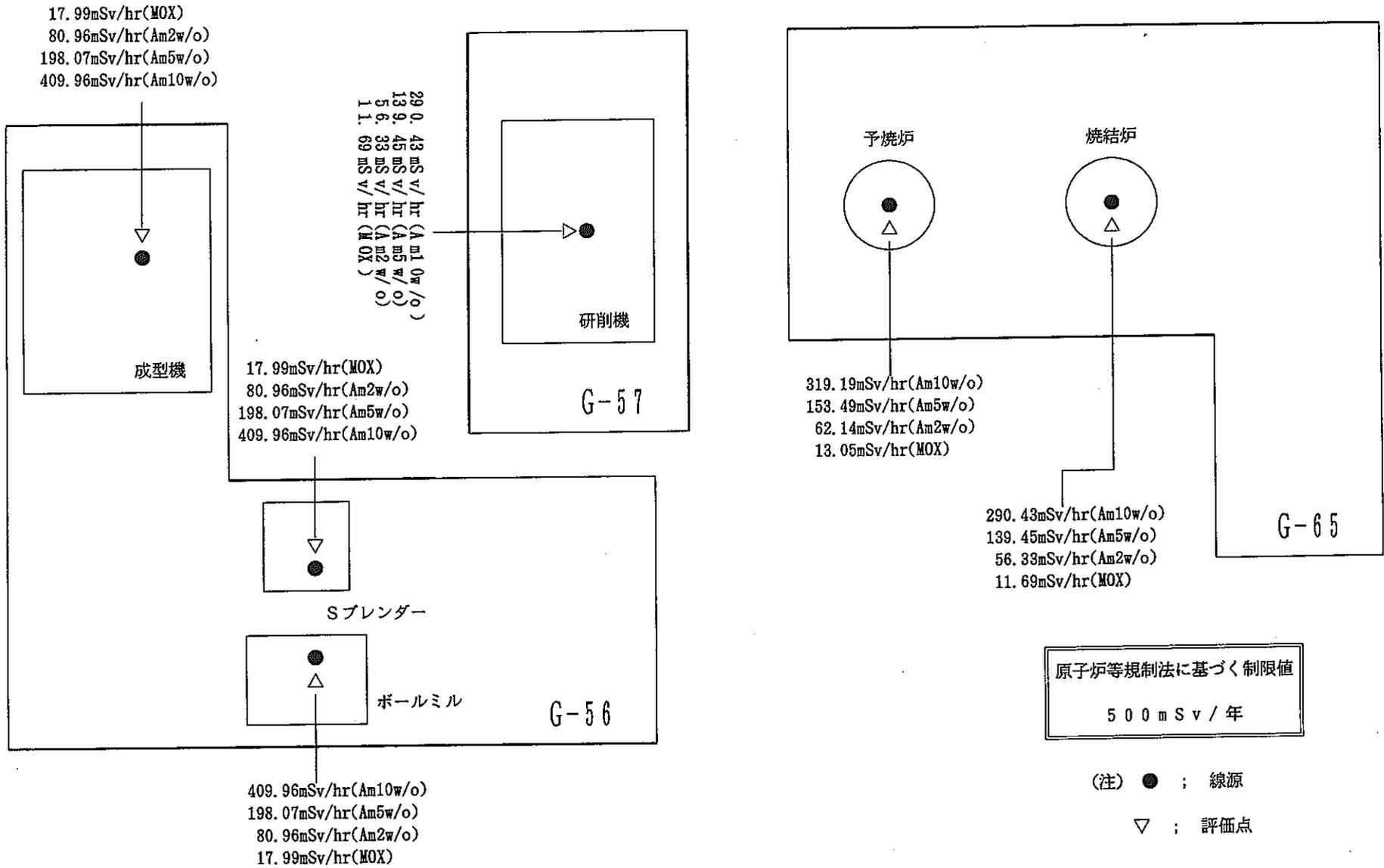


図 - 5.7 手部に対する線量当量率の評価結果

5.3 「常陽」特殊燃料規模製造時の線量当量率評価

プルトニウム燃料第一開発室R-125室等で製造している「常陽」特殊燃料と同等の規模（3 kgMOX バッチ）でTRU燃料を製造する場合の全身及び手部に対する線量当量率の評価条件及び結果を以下に示す。

(1) 評価工程

- | | | | |
|----------|---|-----------------|------------------|
| ① 製造工程 : | ⎧ | (a) 混合工程 | (取扱量 ; 3kgMOX) |
| | | (b) 成型工程 | (取扱量 ; 300gMOX) |
| | | (c) 予備焼結工程 | (取扱量 ; 3kgMOX) |
| | | (d) 焼結・ペレット検査工程 | (取扱量 ; 3kgMOX) |
| | | (e) 研削工程 | (取扱量 ; 1kgMOX) |
| ② 加工工程 : | ⎧ | (a) ペレット充填工程 | (取扱量 ; ペレット1列) |
| | | (b) 燃料要素 | (取扱量 ; 燃料ピン1本) |
| | | (c) 燃料集合体 | (取扱量 ; 集合体1体) |
| ③ 分析工程 : | ⎧ | (a) 溶液 | (取扱量 ; 150mgMOX) |
| | | (b) 粉末 | (取扱量 ; 2gMOX) |
| | | (c) ペレット | (取扱量 ; 1.6gMOX) |

(2) 線源条件

- | | | |
|------------|---|-----------------------------------------------|
| ① 組成 : | ⎧ | (a) $(P u_{0.3} + U_{0.7}) O_2$ |
| | | (b) $(P u_{0.3} + U_{0.68} + A m_{0.02}) O_2$ |
| | | (c) $(P u_{0.3} + U_{0.65} + A m_{0.05}) O_2$ |
| | | (d) $(P u_{0.3} + U_{0.6} + A m_{0.1}) O_2$ |
| | | (e) $(P u_{0.3} + U_{0.68} + N p_{0.02}) O_2$ |
| | | (f) $(P u_{0.3} + U_{0.65} + N p_{0.05}) O_2$ |
| | | (g) $(P u_{0.3} + U_{0.6} + N p_{0.1}) O_2$ |
| ② U同位体比 : | ⎧ | $^{235}U = 0.717 \text{ w/o}$ |
| | | $^{238}U = 99.283 \text{ w/o}$ |
| ③ Pu同位体比 : | ⎧ | $^{238}Pu = 1.2 \text{ w/o}$ |
| | | $^{239}Pu = 65.6 \text{ w/o}$ |
| | | $^{240}Pu = 22.3 \text{ w/o}$ |
| | | $^{241}Pu = 8.8 \text{ w/o}$ |
| | | $^{242}Pu = 2.1 \text{ w/o}$ |

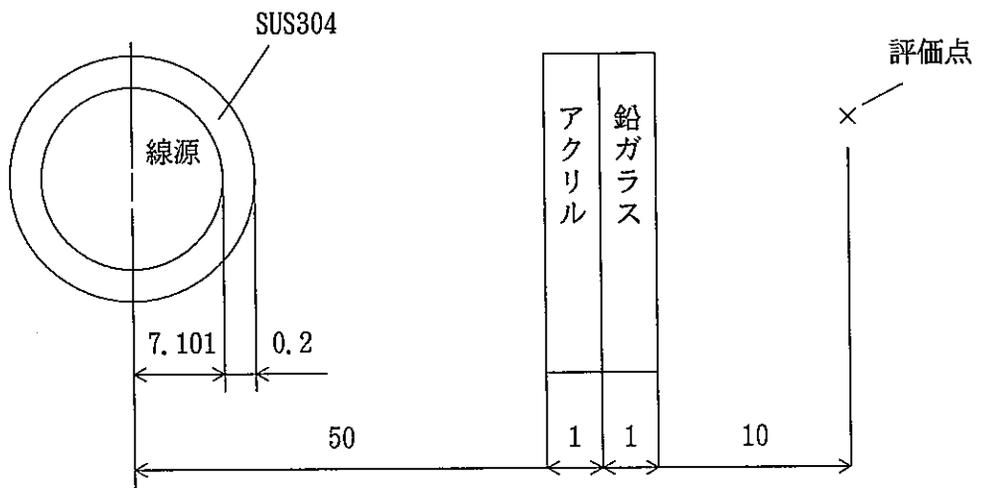
(組織が(a)のみ分離精製後日数=1000日とする。)

④ Am同位体比 : $\left\{ \begin{array}{l} {}^{241}\text{Am} = 84.38 \text{ w/o} \\ {}^{242}\text{Am} = 1.92 \text{ w/o} \\ {}^{243}\text{Am} = 13.70 \text{ w/o} \end{array} \right.$

⑤ Np同位体比 : ${}^{237}\text{Np} = 100 \text{ w/o}$

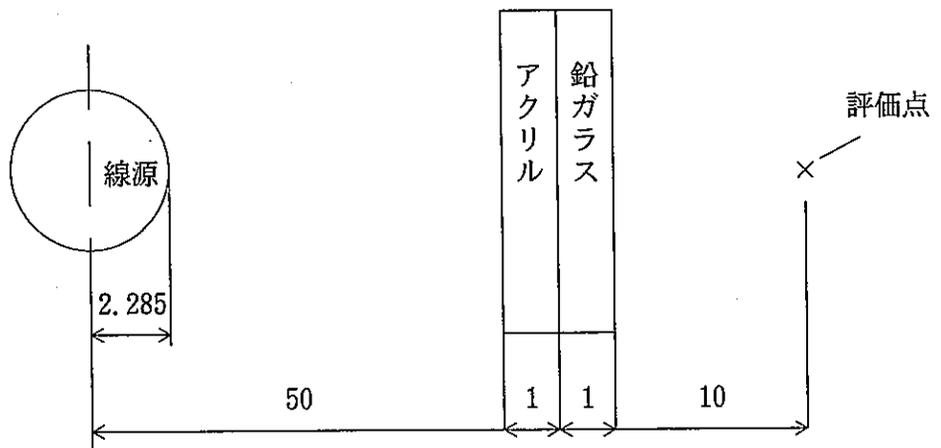
(3) 評価体系

(1)で示した各工程ごとの評価体系を以下に示す。ここで図-5.8(1)~(11)の評価体系は、全身の評価、図-5.9(1)~(11)評価体系は、手部の評価に使用した。なお、グローブは分析工程を除き、鉛入りグローブとした。



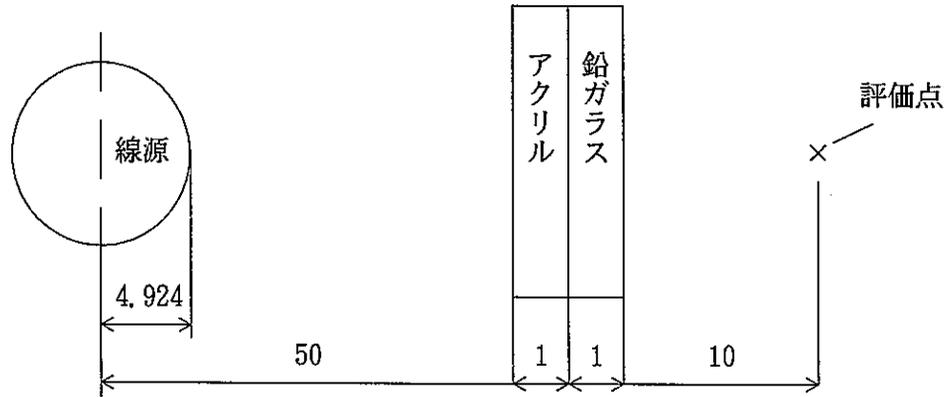
(注) 単位 ; cm

図-5.8(1) 混合工程の評価体系



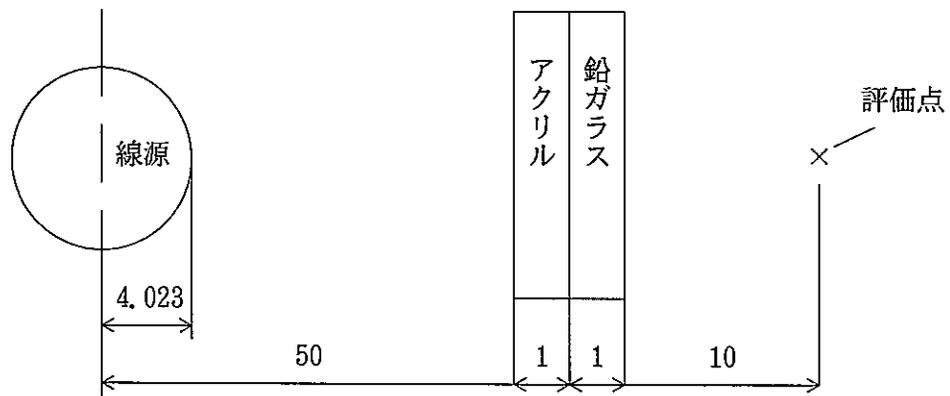
(注) 単位 ; cm

図-5.8(2) 成形工程の評価体系



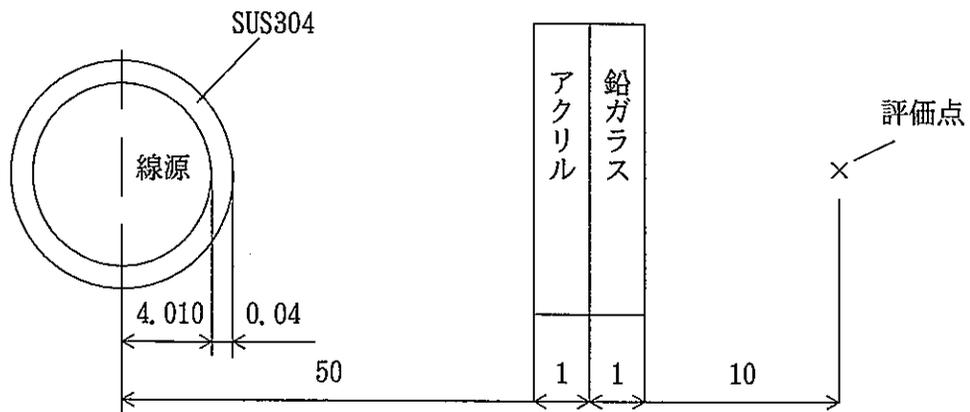
(注) 単位 ; cm

図-5.8(3) 予備焼結工程の評価体系



(注) 単位 ; cm

図-5.8(4) 焼結・ペレット検査工程の評価体系



(注) 単位 ; cm

図-5.8(5) 研削工程の評価体系

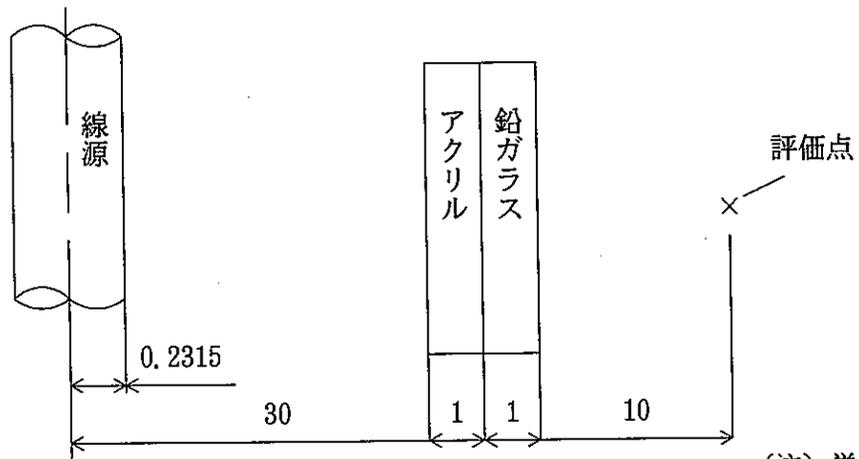


図-5.8(6) ペレット充填工程の評価体系

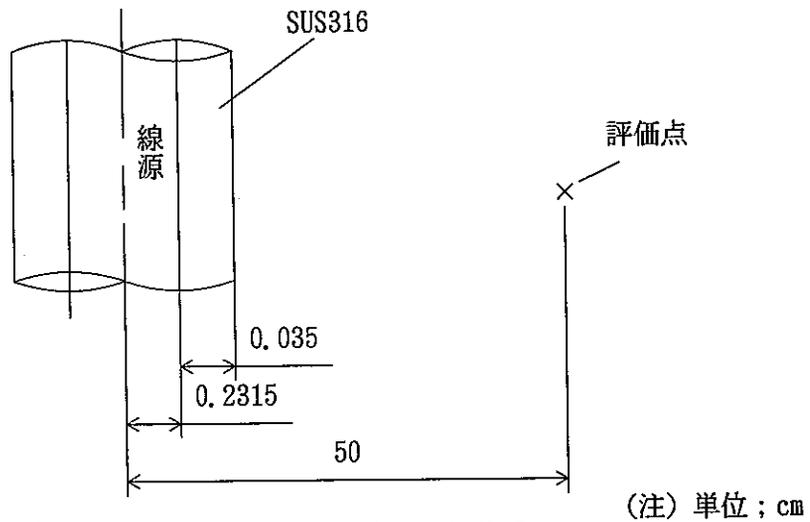


図-5.8(7) 燃料要素の評価体系

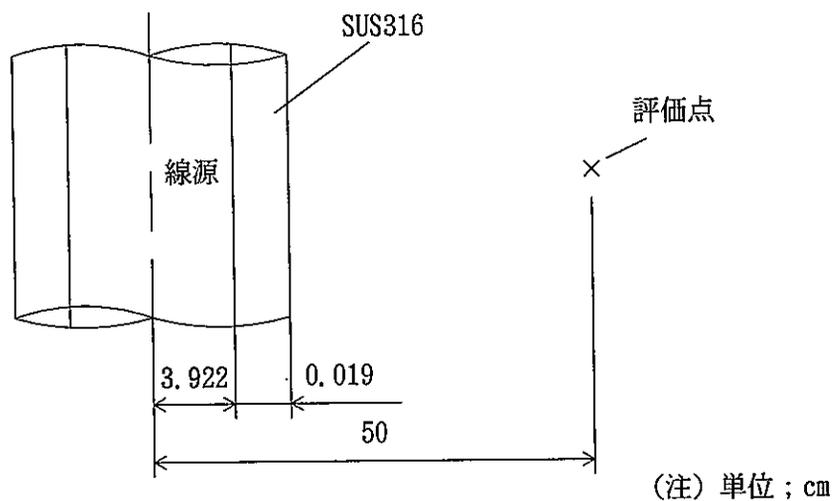


図-5.8(8) 燃料集合体の評価体系

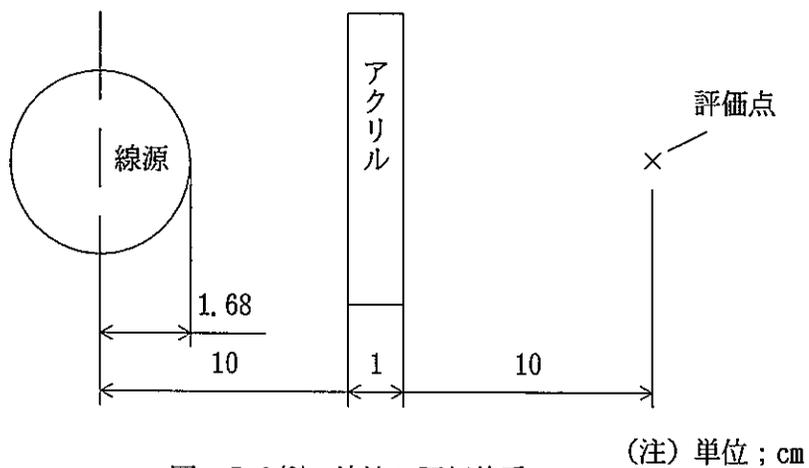


図-5.8(9) 溶液の評価体系

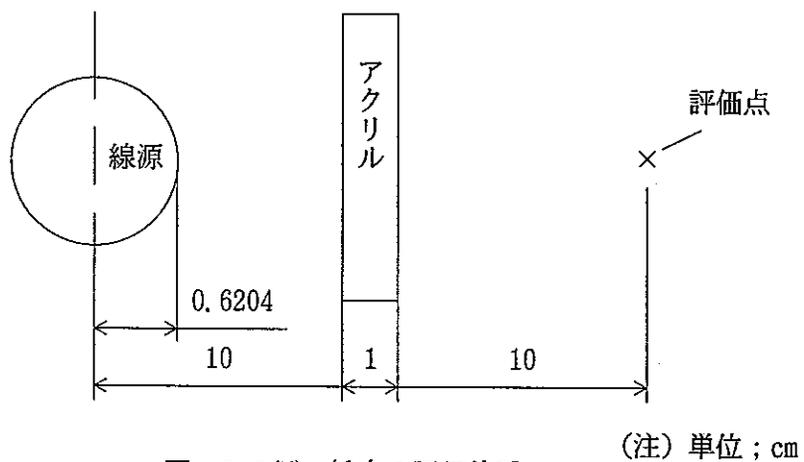


図-5.8(10) 粉末の評価体系

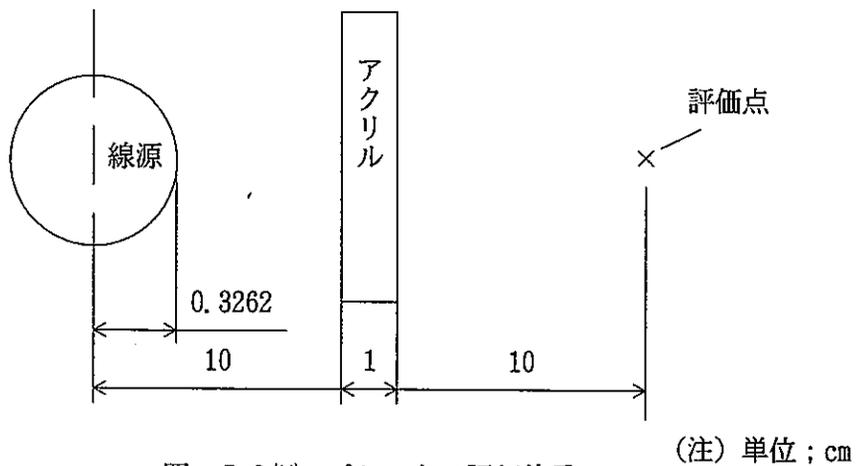


図-5.8(11) ペレットの評価体系

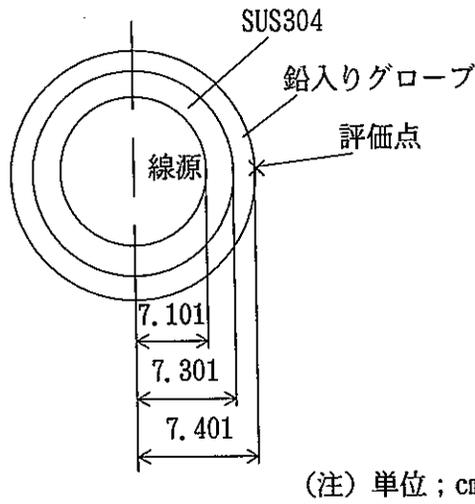


図-5.9(1) 混合工程の手部評価体系

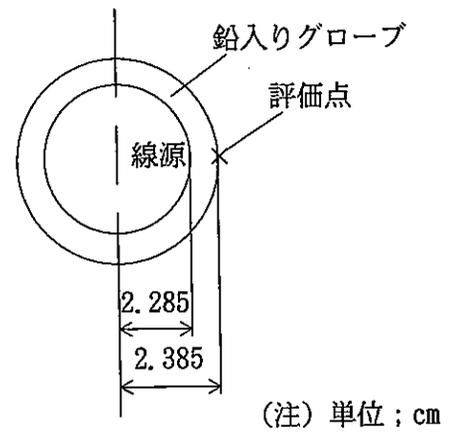


図-5.9(2) 成形工程の手部評価体系

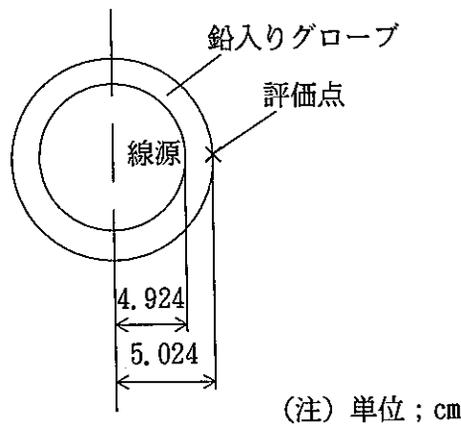


図-5.9(3) 予備焼結工程の手部評価体系

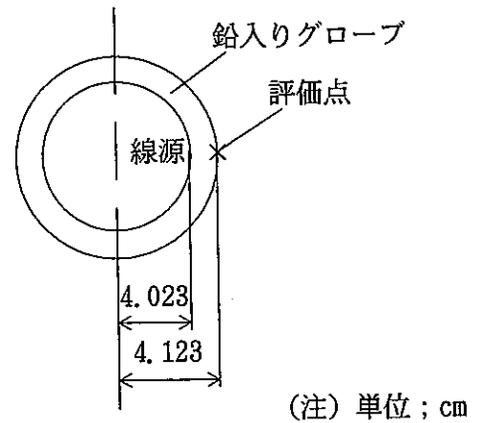


図-5.9(4) 焼結・ペレット検査工程の手部評価体系

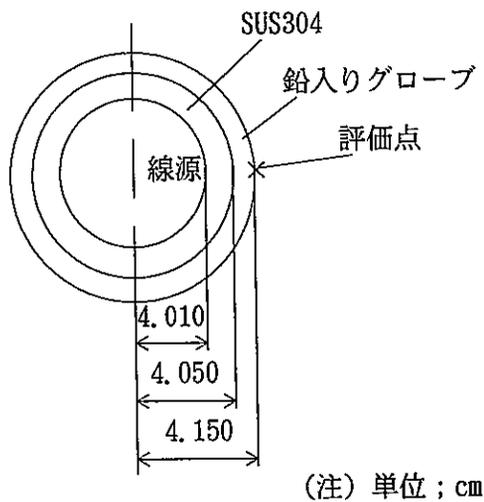


図-5.9(5) 研削工程の手部評価体系

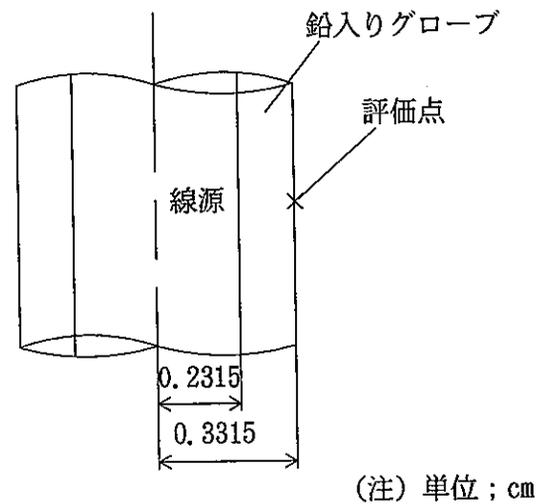


図-5.9(6) ペレット充填工程の手部評価体系

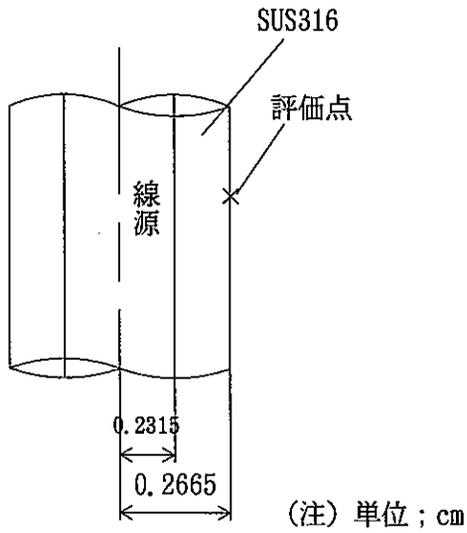


図-5.9(7) 燃料要素の手部評価体系

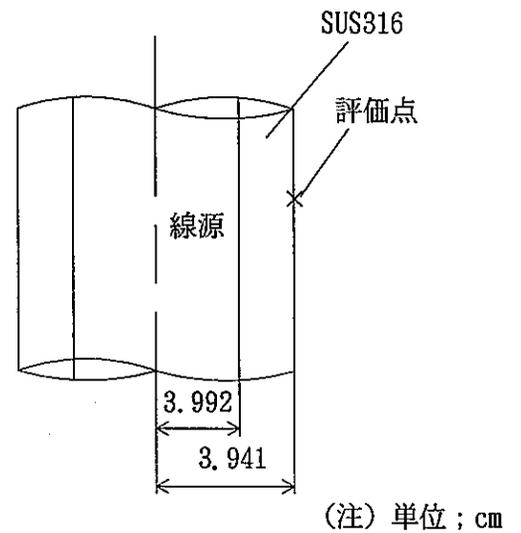


図-5.9(8) 燃料集合体の手部評価体系

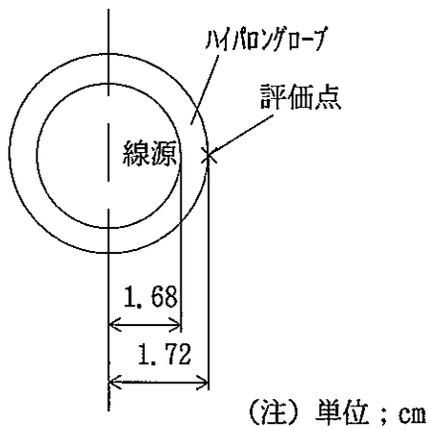


図-5.9(9) 溶液の手部評価体系

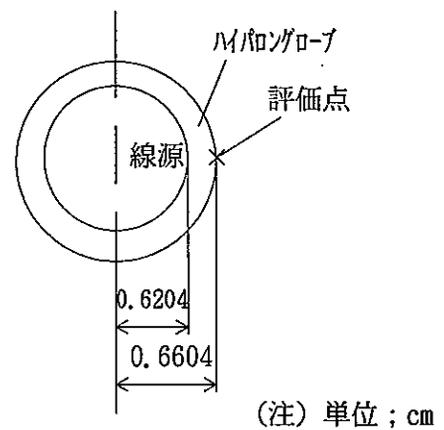


図-5.9(10) 粉末の手部評価体系

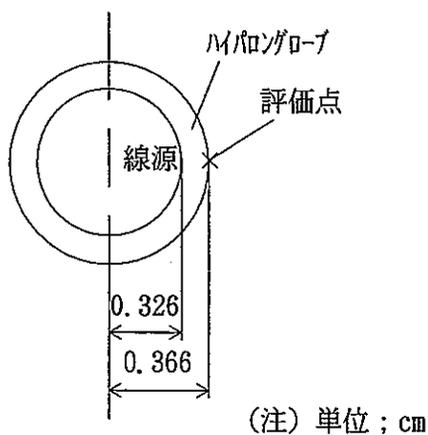


図-5.9(11) ペレットの手部評価体系

(3) 評価結果

プルトニウム燃料第一開発室R-125室等で製造されている「常陽」特殊燃料規模の照射TRU燃料を製造する場合の全身及び手部に対する線量当量率の評価結果を表-5.4及び表-5.5に示す。

表-5.4 全身に対する線量当量率の評価結果

単位； $\mu\text{Sv/h}$

工程	線種	MOX	Am 2%	Am 5%	Am 10%	Np 2%	Np 5%	Np 10%
混合	n	11.25	14.53	20.41	30.18	10.60	10.59	10.57
	γ	5.680	6.591	13.79	26.57	2.015	2.093	2.234
	T	16.930	21.121	34.20	56.75	12.615	12.683	12.804
成形 (プレス)	n	1.134	1.464	2.057	3.402	1.068	1.067	1.066
	γ	0.702	0.789	1.651	3.176	0.242	0.252	0.269
	T	1.836	2.253	3.708	6.218	1.310	1.319	1.335
研削	n	10.17	13.13	18.41	27.14	9.570	9.543	9.499
	γ	2.266	2.695	5.648	10.96	0.836	0.870	0.932
	T	12.436	15.825	24.058	38.10	10.406	10.413	10.431
予備 焼結	n	10.80	13.94	19.57	28.89	10.17	10.15	10.12
	γ	3.486	4.092	8.587	16.64	1.257	1.309	1.403
	T	14.286	18.032	28.157	45.53	11.427	11.459	11.523
焼結 ペレット 検査	n	10.29	13.27	18.61	27.44	9.677	9.650	9.606
	γ	2.374	2.807	5.884	11.42	0.870	0.906	0.971
	T	12.664	16.077	24.494	38.86	10.547	10.556	10.577
燃料 要素	n	1.775	2.283	3.195	4.710	1.675	1.674	1.674
	γ	65.39	310.5	796.8	1670.0	2.279	2.660	3.346
	T	67.165	312.783	799.995	1671.71	3.954	4.334	5.020
ペレット 充填	n	1.589	2.058	2.898	4.297	1.497	1.497	1.496
	γ	1.927	1.920	3.938	7.406	0.614	0.634	0.670
	T	3.516	3.978	6.836	11.703	2.111	2.131	2.166

工程	線種	MOX	Am 2%	Am 5%	Am 10%	Np 2%	Np 5%	Np 10%
燃料 集合体	n	194.2	249.7	348.9	513.6	182.9	182.6	182.0
	γ	1391.0	6620.0	16980.0	35750.0	55.41	63.23	77.42
	T	1585.2	6869.7	17328.9	36236.6	238.31	245.83	259.42
分析 粉末	n	0.067	0.087	0.122	0.180	0.063	0.063	0.063
	γ	23.56	92.33	226.0	467.6	7.609	7.901	8.428
	T	23.627	92.417	226.122	467.780	7.672	7.964	8.491
分析 ペレット	n	0.053	0.069	0.097	0.143	0.050	0.050	0.050
	γ	6.688	25.98	63.67	131.9	2.132	2.216	2.367
	T	6.741	26.049	63.767	132.043	2.182	2.266	2.417
分析 溶液	n	0.005	0.006	0.008	0.013	0.004	0.004	0.004
	γ	22.31	75.06	172.7	336.8	10.35	10.44	10.59
	T	22.315	75.066	172.708	336.813	10.354	10.444	10.594

表-5.5 手部に対する線量当量率の評価結果

単位 ; mSv/hr

工程	線種	MOX	Am 2%	Am 5%	Am 10%	Np 2%	Np 5%	Np 10%
混合	n	0.798	1.026	1.435	2.116	0.753	0.752	0.751
	γ	1.581	3.638	8.947	18.64	0.280	0.301	0.339
	T	2.379	4.664	10.382	20.656	1.033	1.053	1.090
成形 (プレス)	n	1.037	1.334	1.865	2.749	0.978	0.977	0.976
	γ	5.936	23.61	60.14	126.3	0.471	0.514	0.592
	T	6.973	24.944	62.005	129.049	1.449	1.491	1.568
研削	n	1.629	2.094	2.924	4.297	1.534	1.530	1.523
	γ	2.504	9.450	23.99	50.32	0.246	0.268	0.308
	T	4.133	11.544	26.914	54.617	1.780	1.798	1.831
予備 焼結	n	2.258	2.902	4.054	5.966	2.125	2.121	2.115
	γ	6.121	23.86	60.68	127.4	1.013	1.124	1.325
	T	8.379	26.762	64.734	133.366	3.138	3.245	3.440

工 程	線 種	MOX	Am 2%	Am 5%	Am 10%	Np 2%	Np 5%	Np 10%
焼 結 ペレット 検査	n	3.363	4.321	6.034	8.866	3.167	3.158	3.144
	γ	6.356	24.68	62.73	131.7	0.580	0.629	0.718
	T	9.719	29.001	68.764	140.566	3.747	3.787	3.862
燃 料 要 素	n	0.154	0.198	0.277	0.408	0.145	0.145	0.145
	γ	4.832	22.78	58.44	123.0	0.180	0.208	0.260
	T	4.986	22.978	58.717	123.408	0.325	0.353	0.405
ペレット 充 填	n	0.272	0.349	0.489	0.722	0.256	0.256	0.256
	γ	4.447	18.67	47.71	100.2	0.260	0.288	0.338
	T	4.719	19.019	48.199	100.922	0.516	0.544	0.594
燃 料 集 合 体	n	2.079	2.673	3.736	5.498	1.959	1.955	1.949
	γ	14.98	71.18	182.6	384.4	0.602	0.687	0.840
	T	17.059	73.853	186.336	389.898	2.561	2.642	2.789
分 析 粉 末	n	0.078	0.101	0.141	0.208	0.074	0.074	0.074
	γ	39.44	130.1	305.5	622.3	19.14	19.81	21.03
	T	39.518	130.201	305.641	622.508	19.214	19.884	21.104
分 析 ペレット	n	0.188	0.242	0.338	0.499	0.177	0.177	0.177
	γ	33.82	110.1	258.2	526.5	16.48	17.07	18.13
	T	34.008	110.342	258.538	526.999	16.657	17.247	18.307
分 析 溶 液	n	0.001	0.001	0.002	0.003	0.001	0.001	0.001
	γ	7.512	20.65	44.80	85.44	4.663	4.699	4.760
	T	7.513	20.651	44.802	85.443	4.664	4.700	4.761

5.4 考 察

現状のプルトニウム燃料施設のグローブボックスにおいて、TRU燃料を製造することが可能か否かをしゃへい能力及び線量当量率の観点から評価した結果に対する考察を以下に示す。

(1) グローブボックスでの最大取扱量の評価

現状のプルトニウム燃料施設のグローブボックス（しゃへい材=鉛ガラス(1cm厚)及び含鉛アクリル(3.5cm厚さ)）でTRU燃料を取扱う場合、しゃへい材外面での線量当量率を法令値である1mSv/週に相当する $20\mu\text{Sv/hr}$ 以下にするには、Amを含有する組成の燃料について、Amによるガンマ線の大幅な増加を抑えるために通常のMOX燃料と比べ最大取扱量を少なくする必要がある。特に、 $(\text{Am}_{0.5}, \text{U}_{0.5})\text{O}_2$ 及び AmO_2 の組成については、最大取扱量をそれぞれ、約1/10, 3/100に減少させないと法令値を超えてしまうが、この取扱量では実際の燃料製造は不可能であると思われる。しかし、Npを含有する組成の燃料については、通常のMOX燃料よりも多少多めの量を取扱うことが可能となる。

ただし、今回の評価では取り扱う線源は1箇所にとまっていると仮定し、粉末が飛散し、グローブボックスパネル内面に付着することは考慮していない。これを考慮すると、実際の線量当量率は、より大きくなると予想される。（ヨーロッパ超ウラン元素研究所での実績では、 $(\text{Am}_{0.5}, \text{U}_{0.5})\text{O}_2$ 組成の粉末が飛散した場合、ガンマ線量当量率が約200mrem/hrまで上昇した。）

(2) ペレット数個規模製造時の線量当量率評価

通常のMOX燃料による線量当量率を1とした場合の²⁴¹Am含有燃料による全身、手部に対する線量当量率の比をそれぞれ表-5.6及び表-5.7に示す。

表-5.6 全身に対する線量当量率の比較

対象機器	線源組成	(a)	(b)	(c)	(d)
	線種	(MOX)	(MOX+Am2w/o)	(MOX+Am5w/o)	(MOX+Am10w/o)
焼結炉	中性子線	1.00	1.38	2.00	3.04
	ガンマ線	1.00	2.22	4.48	8.50
	合計	1.00	1.55	2.54	4.24
予焼炉	中性子線	1.00	1.36	1.97	2.99
	ガンマ線	1.00	2.23	4.49	8.49
	合計	1.00	1.59	2.65	4.48
研削機	中性子線	1.00	1.36	1.97	2.99
	ガンマ線	1.00	2.23	4.48	8.50
	合計	1.00	1.55	2.53	4.23
ブレンダ	中性子線	1.00	1.36	1.97	3.00
	ガンマ線	1.00	2.22	4.44	8.29
	合計	1.00	1.69	2.93	5.06
ボールミル	中性子線	1.00	1.35	1.97	2.99
	ガンマ線	1.00	2.22	4.44	8.29
	合計	1.00	1.69	2.92	5.03
成形機	中性子線	1.00	1.36	1.97	2.99
	ガンマ線	1.00	2.22	4.44	8.29
	合計	1.00	1.69	2.92	5.03

表-5.7 手部に対する線量当量率の比較

対象機器	線源組成	(a)	(b)	(c)	(d)
	線種	(MOX)	(MOX+Am2w/o)	(MOX+Am5w/o)	(MOX+Am10w/o)
焼結炉 研削機	中性子線	1.00	1.35	1.95	2.95
	ガンマ線	1.00	4.97	10.37	25.80
	合計	1.00	4.82	11.92	24.84
予焼炉	中性子線	1.00	1.35	1.95	2.95
	ガンマ線	1.00	4.87	12.07	25.14
	合計	1.00	4.76	11.76	24.46
ブレンダ ボールミル 成形機	中性子線	1.00	1.35	1.95	2.96
	ガンマ線	1.00	4.55	11.58	23.11
合計	1.00	4.50	11.01	22.79	

これらの表より、 ^{241}Am を含有する燃料は、通常のMOX燃料に比べ線量当量率が、

- ① $^{241}\text{Am}2\text{w/o}$ 添加の場合、全身で約1.5倍、手部で約4.5倍
- ② $^{241}\text{Am}5\text{w/o}$ 添加の場合、全身で約2.5~3倍、手部で約10倍
- ③ $^{241}\text{Am}10\text{w/o}$ 添加の場合、全身で約4~5倍、手部で約24倍

となる。

このことより、粉末状態のTRU燃料については、混合工程（ブレンダー）の $^{241}\text{Am}5\text{w/o}$ 添加及び $^{241}\text{Am}10\text{w/o}$ 添加燃料を取扱う場合の線量当量率はそれぞれ $33\mu\text{Sv/hr}$ 、 $57\mu\text{Sv/hr}$ となる。これは、法令値である 1mSv/週 に相当する $20\mu\text{Sv/hr}$ を超えてしまうため取扱うことができない。粉末の飛散によるグローブボックスパネル内面への粉末の付着を考慮すると、全身に対する線量当量率はさらに増加する。また、TRU燃料のAmの濃度調製は既に終了したのものとして評価したが、この濃度調製をグローブボックス内で行う場合には単体の AmO_2 を取扱う必要があり、線量当量率は極端に増加すると考えられる。

次に、手部被ばくの観点からみると、全身に対する手部の線量当量率の比は表-5.8のようになる。

表-5.8 全身に対する手部の線量当量率の比

線源組成 対象機器	(a) (MOX)	(b) (MOX+Am2w/o)	(c) (MOX+Am5w/o)	(d) (MOX+Am10w/o)
焼結炉	5,318	16,509 (3.10)	24,982 (4.70)	31,169 (5.86)
予焼炉	5,548	16,588 (2.99)	24,615 (4.44)	30,313 (5.46)
研削機	7,600	23,608 (3.10)	35,762 (4.70)	44,636 (5.87)
ブレンダー	1,598	4,250 (2.66)	6,005 (3.76)	7,203 (4.51)
ボールミル	5,096	13,588 (2.67)	19,233 (3.77)	23,086 (4.53)
成形機	6,270	16,727 (2.67)	23,676 (3.78)	28,413 (4.37)

(注) ()内は、MOX燃料との比
中性子線+ガンマ線の合計

この表より、全身に対する手部の線量当量率の比は通常のMOX燃料を1とすると、

- ① $^{241}\text{Am}2\text{w/o}$ 添加の場合, 2.6～3.1倍
- ② $^{241}\text{Am}5\text{w/o}$ 添加の場合, 3.7～4.7倍
- ③ $^{241}\text{Am}10\text{w/o}$ 添加の場合, 4.3～5.8倍

となる。

このようにAmの添加率増加に伴い線量当量率の比が増加している原因としては、全身の線量当量率の評価では鉛ガラスがあるのに対して、手部の評価ではネオプレン製グローブのみであるためと考えられる。このネオプレン製グローブにはしゃへい効果がないため、全身に対する手部の線量当量率の比がMOX燃料に比べて高くなり、制限値を超える恐れが生じる。（特に、粉末混合工程に対する線量当量率は198mSv/hr（表-5.3参照）であり、これは10分の作業で33mSvとなるため、すぐに手部の3ヶ月の原因調査レベルである37mSv/3ヶ月を超えてしまうことになる。）

しかし、粉末飛散のない固体サンプル（例えば成形済のグリーンペレット）であり、手部被ばくの低減化（鉛入りグローブ、ピンセットの使用）を施し、少量ならば、ハンドリング可能な領域があると思われる。

(3) 「常陽」特殊燃料規模製造時の線量当量率評価

通常のMOX燃料による線量当量率を1とした場合のTRU燃料による全身、手部位に対する線量当量率の比をそれぞれ表-5.9, 表-5.10に示す。

表-5.9 全身に対する線量当量率の比較

工 程	線種	MOX MOX	Am 2 % MOX	Am 5 % MOX	Am10% MOX	Np 2 % MOX	Np 5 % MOX	Np10% MOX
混 合	n	1.000	1.292	1.814	2.683	0.942	0.941	0.940
	γ		1.160	2.428	4.678	0.355	0.368	0.393
	T		1.247	2.020	3.352	0.745	0.749	0.756
成 形 (プレス)	n	1.000	1.291	1.814	2.683	0.942	0.941	0.940
	γ		1.125	2.353	4.526	0.345	0.359	0.384
	T		1.227	2.020	3.387	0.714	0.718	0.727
研 削	n	1.000	1.291	1.810	2.669	0.941	0.938	0.934
	γ		1.189	2.492	4.837	0.369	0.384	0.411
	T		1.273	1.934	3.063	0.837	0.837	0.838
予 備 焼 結	n	1.000	1.291	1.812	2.675	0.942	0.940	0.937
	γ		1.174	2.463	4.773	0.361	0.376	0.402
	T		1.262	1.971	3.186	0.800	0.802	0.806
焼 結 ペレット 検査	n	1.000	1.290	1.809	2.667	0.940	0.938	0.934
	γ		1.182	2.479	4.810	0.366	0.382	0.409
	T		1.270	1.934	3.070	0.833	0.834	0.836
燃 料 要 素	n	1.000	1.286	1.800	2.654	0.944	0.943	0.943
	γ		4.748	12.185	25.540	0.035	0.041	0.051
	T		4.657	11.910	24.937	0.059	0.065	0.075
ペレット 充 填	n	1.000	1.295	1.824	2.704	0.942	0.942	0.941
	γ		0.996	2.044	3.843	0.318	0.329	0.347
	T		1.131	1.944	3.328	0.600	0.606	0.616
燃 料 集 合 体	n	1.000	1.286	1.797	2.645	0.942	0.940	0.937
	γ		4.759	12.207	25.701	0.040	0.045	0.056
	T		4.334	10.934	22.877	0.150	0.155	0.164
分 析 粉 末	n	1.000	1.290	1.812	2.680	0.943	0.943	0.943
	γ		3.919	9.593	19.847	0.323	0.335	0.358
	T		3.911	9.568	19.797	0.325	0.337	0.359
分 析 ペレット	n	1.000	1.290	1.811	2.679	0.943	0.943	0.942
	γ		3.885	9.520	19.722	0.319	0.331	0.354
	T		3.864	9.460	19.582	0.324	0.336	0.359
分 析 溶 液	n	1.000	1.295	1.824	2.704	0.942	0.942	0.942
	γ		3.364	7.741	15.096	0.464	0.468	0.475
	T		3.365	7.741	15.096	0.464	0.468	0.475

表-5.10 手部に対する線量当量率の比較

工 程	線種	MOX MOX	Am 2 % MOX	Am 5 % MOX	Am10% MOX	Np 2 % MOX	Np 5 % MOX	Np10% MOX
混 合	n	1.000	1.286	1.798	2.651	0.943	0.942	0.941
	γ		2.301	5.659	11.727	0.177	0.190	0.214
	T		1.960	4.363	8.684	0.434	0.443	0.458
成 形 (プレス)	n	1.000	1.286	1.798	2.651	0.943	0.943	0.941
	γ		3.977	10.131	21.277	0.079	0.087	0.100
	T		3.577	8.893	18.500	0.208	0.214	0.225
研 削	n	1.000	1.285	1.795	2.638	0.942	0.939	0.935
	γ		3.774	9.581	20.096	0.097	0.107	0.123
	T		2.792	6.511	13.216	0.431	0.435	0.443
予 備 焼 結	n	1.000	1.285	1.795	2.642	0.941	0.939	0.937
	γ		3.898	9.913	20.814	0.165	0.184	0.216
	T		3.194	7.725	15.921	0.375	0.387	0.411
焼 結 ペレット 検査	n	1.000	1.285	1.794	2.636	0.942	0.939	0.935
	γ		3.883	9.869	20.721	0.091	0.099	0.113
	T		2.984	7.075	14.467	0.386	0.390	0.397
燃 料 要素	n	1.000	1.287	1.801	2.657	0.944	0.943	0.943
	γ		4.714	12.094	25.455	0.037	0.043	0.054
	T		4.609	11.777	24.749	0.065	0.071	0.081
ペレット 充 填	n	1.000	1.287	1.801	2.659	0.944	0.943	0.943
	γ		4.198	10.729	22.532	0.058	0.065	0.076
	T		4.031	10.214	21.382	0.109	0.115	0.126
燃 料 集合体	n	1.000	1.286	1.797	2.645	0.942	0.940	0.937
	γ		4.752	12.190	25.661	0.040	0.046	0.056
	T		4.329	10.920	22.855	0.150	0.155	0.163
分 析 粉末	n	1.000	1.287	1.800	2.657	0.944	0.944	0.944
	γ		3.299	7.746	15.778	0.485	0.502	0.533
	T		3.295	7.733	15.752	0.486	0.503	0.534
分 析 ペレット	n	1.000	1.286	1.799	2.655	0.944	0.943	0.943
	γ		3.255	7.635	15.568	0.487	0.505	0.536
	T		3.243	7.601	15.495	0.490	0.507	0.538
分 析 溶液	n	1.000	1.291	1.813	2.682	0.943	0.943	0.943
	γ		2.749	5.964	11.374	0.621	0.626	0.634
	T		2.749	5.963	11.372	0.621	0.626	0.634

これらの表より、TRU燃料は、MOX燃料に比べ線量当量率が、

- ① $^{241}\text{Am}2\text{w/o}$ 添加の場合、全身で1.22~4.65倍、手部で1.96~4.61倍
- ② $^{241}\text{Am}5\text{w/o}$ 添加の場合、全身で1.93~11.91倍、手部で4.36~11.77倍
- ③ $^{241}\text{Am}10\text{w/o}$ 添加の場合、全身で3.06~24.93倍、手部で8.68~24.74倍
- ④ $^{237}\text{Np}2\text{w/o}$ 添加の場合、全身で0.06~0.83倍、手部で0.06~0.62倍
- ⑤ $^{237}\text{Np}5\text{w/o}$ 添加の場合、全身で0.06~0.83倍、手部で0.07~0.62倍
- ⑥ $^{237}\text{Np}10\text{w/o}$ 添加の場合、全身で0.07~0.83倍、手部で0.08~0.63倍

となる。

このように、Amを含有する燃料の線量当量率が通常のMOX燃料の線量当量率に対する倍率は、前項(2)のペレット数個規模の製造に比べて小さいが、取扱量が10倍多いことにより通常のMOX燃料の線量当量率が高いために全身に対する線量当量率が法令値である1mSv/週に相当する20 μ Sv/hrを超える工程がある。(例；混合工程でAm2w/o添加の場合で21 μ Sv/hr)

また、今回評価した全身に対する線量当量率を用いて、通常のMOX燃料を使用した照射燃料製造実績からの作業時間を考慮した被ばく線量当量を推定すると表-5.11のようになる。

表-5.11 被ばく線量当量の推定

工 程	作業時間(hr)	MOX	Am 2%	Am 5%	Am10%	Np 2%	Np 5%	Np10%
混 合	1.5	25.4	31.7	51.3	85.1	18.9	19.0	19.2
成 形 (プレス)	10.0	18.4	22.5	37.1	62.2	13.1	13.2	13.4
予備焼結	0.5	7.1	9.0	14.1	22.8	5.7	5.7	5.8
焼 結	0.5	6.3	8.0	12.2	19.4	5.3	5.3	5.3
研 削	10.0	124.4	158.3	240.6	381.0	104.1	104.1	104.3
ペレット検査	10.0	126.6	160.8	244.9	388.6	105.5	105.6	105.8
ペレット充填	5.0	17.6	19.9	34.2	58.5	10.6	10.7	10.8
燃料要素	2.5	167.9	782.0	2000.0	4179.3	9.9	10.8	12.6
分 析 (粉末)	6.0	141.8	554.5	1356.7	2806.7	46.0	47.8	50.9
分 析 (ペレット)	5.5	37.1	143.3	350.7	726.2	12.0	12.5	13.3
分 析 (溶液)	6.0	133.9	450.4	1036.2	2020.9	62.1	62.7	63.6
合 計	57.5	806.5	2340.4	5378.0	10750.7	393.2	397.4	405.0

(注) 単位 ; μ Sv
取扱量 ; 3kgMOX

この表より、しゃへい材（鉛ガラス）のない工程（加工工程、分析工程）についてAm含有によるガンマ線の大幅な増加に伴い、全身の推定被ばく線量当量が増加している。

なお、この評価では照射燃料製造時に被ばくの大きい造粒、分級、仮成形工程が考慮されていないため、これらを考慮するとさらに被ばく線量当量は増加すると考えられる。

一方、手部に対する線量当量率のみに着目すれば、R-129室の混合工程（Am₂w/o添加燃料）における手部の線量当量率は198mSv/hrであるのに対し、取扱量が10倍に増加してもR-125室の混合工程では4.6mSv/hrである。これはR-125室のグローブボックスのグローブが鉛入りグローブであるためAmの添加による低エネルギーのガンマ線をしゃへいするからである。この線量当量率では、原因調査レベルである37mSv/3ヶ月まで8時間（R-129室では、10分）作業を行うことが可能である。

上記のことから、取扱量を評価条件である3kgMOXより少なくすることにより、R-125室においてAmを含有する燃料の製造を行うことは可能であると思われる。しかし今回の評価では、粉末の飛散によるグローブボックスパネル内面への粉末の付着及びTRU燃料中のAmの添加率の調製については考慮していないため、これらを考慮すると線量当量率はより増加する。さらに、全身に対する線量当量率評価の際に鉛ガラスの取付けてあるグローブボックスのパネルではない面（SUS 4mmt）、ビニルバッグ・グローブのポート部についての評価は行っていないため、これらを含めた評価を行うと線量当量率は増加し、Amを含有するTRU燃料の取扱いができなくなると考えられる。しかし、Npを含有する燃料の製造については、線量当量率の観点から製造に対して支障はないと思われる。

5.5 結論

(1) グローブボックスでの最大取扱量の評価

現状のプルトニウム燃料施設のグローブボックスで考えられる最大のしゃへい（しゃへい材=鉛ガラス(1cm厚)及び含鉛アクリル(3.5cm厚)）でTRU燃料を取扱う場合、Amを含有する組成の燃料についてのしゃへい材外面での線量当量率を法令値である1mSv/週に相当する $20\mu\text{Sv/hr}$ 以下に抑えるための最大取扱量は、通常のMOX燃料より少なくしなくてはならない。特に $(\text{Am}_{0.5}, \text{U}_{0.5})\text{O}_2$ 及び AmO_2 の組成の場合、通常のMOX燃料の最大取扱量が5kgMOXであるのに対して、それぞれ約1/10(500gMOX), 3/100(173gMOX)に減少させる必要がある。

また、Npを含有する組成については、通常のMOX燃料よりも取扱量を多くすることが可能である。

なお、粉末の飛散によるグローブボックスパネル内面への粉末の付着を考慮すると、線量当量率は相当増加することが予想される。

(2) ペレット小規模製造時の線量当量率評価

プルトニウム燃料第一開発室R-129室のグローブボックスではペレット小規模(300gMOX)の製造であっても、 ^{241}Am を5w/o以上含有する燃料は、線量当量率の観点から製造できない。しかし、粉末飛散のない固体サンプル(例えば成形済のグリーンペレット)であり、手部被ばくの低減(鉛入りグローブ、ピンセットの使用)を施せば、少量ならハンドリングが可能な領域があると思われる。

(3) 「常陽」特殊燃料規模製造時の線量当量率評価

プルトニウム燃料第一開発室R-125室等に設置されているグローブボックスにおいて、「常陽」特殊燃料規模(3kgMOX/バッチ)の製造を行う場合、TRU燃料の製造は考察で述べた通り、Amを含有する燃料の線量当量率の通常のMOX燃料の線量当量率に対する倍率は、前項(2)のペレット数個規模の製造に比べて小さいが、取扱量が10倍多いことにより通常のMOX燃料の線量当量が高いために全身に対する線量当量率が法令値である1mSv/週に相当する $20\mu\text{Sv/hr}$ を超える工程がある。(例;混合工程でAm2w/o添加の場合で $21\mu\text{Sv/hr}$)

また、今回評価した全身に対する線量当量率を用いて、通常のMOX燃料を使用した照射燃料製造実績からの作業時間を考慮した被ばく線量当量を推定すると、しゃへい材(鉛ガラス)のない工程(加工工程、分析工程)についてAm含有によるガンマ線の大幅な増加に伴い、全身の推定被ばく線量当量が増加している。

一方、手部に対する線量当量率のみに着目すれば、R-125室の混合工程では、グローブボックスのグローブが鉛入りグローブであるため、 4.6mSv/hr である。この

線量当量率では、原因調査レベルである37mSv/3ヶ月まで8時間（R-129室では、10分）作業を行うことが可能である。

しかし、粉末の飛散によるグローブボックスパネル内面への粉末の付着及びTRU燃料中のAm濃度の調整をグローブボックス内で行うことを考慮すると線量当量率は極端に増加する。さらに、全身に対する線量当量率評価の際に鉛ガラスの取付けてあるグローブボックスのパネルではない面（SUS4mmt）、ビニルバッグ、グローブのポート部についてを含めた評価を行うとAm増加により線量当量率は増加し、Amを含有するTRU燃料の取扱いができないと考えられる。

また、前項(2)では粉末飛散のない固体サンプル少量（ペレット数個程度）ならばハンドリングが可能な領域があると思われるが、「常陽」特殊燃料規模の製造時の場合は、取扱量が多いためハンドリングは不可能である。

なお、Npを含有する燃料の製造について線量当量率の点では、通常のMOX燃料より低く、製造に対して支障はない。

6. 参考文献

- (1) 飛田他；「しゃへい評価用中性子・ガンマ線結合50群核断面積ライブラリ“PSL-50”の開発」，PNC PN8410 91-073 (1991年2月)
- (2) 山本，飛田他；「Am溶液の線量率測定試験に基づくしゃへい解析法の検証(1)」，プル開-02-020
- (3) 山本他；「Am溶液の線量率測定(2)」，プル開-03-163
；「Am溶液の線量率測定(3)」，プル開-03-189
；「Am溶液の線量率測定試験に基づくしゃへい解析法の検証」，プル開-03-263
- (4) 飛田，山本他；「TRU添加MOX燃料による被ばく評価について」，プル開-02-098
- (5) 山本他；「R-129室においてTRU燃料を取扱う際の被ばく評価」，プル開-02-181
- (6) 遠藤；「Np合金の表面線量率測定結果について」，プル開-02-188
；「(Am, U)O₂ (Am/(Am+U)=0.475)の表面線量率及び取扱い後の被ばく結果について」，プル開-02-164
- (7) R. D. Carter, G. R. Kiel, K. R. Ridgway ;
「ARH-600 vol.2 Rev.1 Criticality Handbook vol. II PP. II.C.3-1 」1969年
- (8) J. C. Bailar, Jr, H. J. Emeleus, Sir Ronald Nyholm, A. F. Trotman, Dickenson ;
「Comprehensive Inorganic Chemistry vol.5 」，1973年