



JAEA-Technology

2009-020

転換施設の放射線環境評価 —解体設備のインベントリーと空間線量の評価—

Radiation Environment Account before Dismantling the Conversion Facilities

- Evaluation of the Uranium Inventory and Air Dose Rate
in the Dismantling Facilities -

島池 政満 横山 薫 池上 宗平 高橋 信雄 杉杖 典岳

Masamitsu SHIMAIKE, Kaoru YOKOYAMA, Sohei IKEGAMI

Nobuo TAKAHASHI and Noritake SUGITSUE

人形峠環境技術センター

環境保全技術開発部

Environmental Research and Development Department

Ningyo-toge Environmental Engineering Center

June 2009

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-
Technology

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

転換施設の放射線環境評価
－解体設備のインベントリーと空間線量の評価－

日本原子力研究開発機構 人形峠環境技術センター
環境保全技術開発部

島池 政満, 横山 薫※, 池上 宗平, 高橋 信雄, 杉杖 典岳

(2009年3月12日 受理)

製錬転換施設は「製錬転換施設廃止措置短期計画」にしたがって、平成20年度から48Y均質化設備、 UO_3 気送設備、捕集充填設備、二級品 UF_4 乾燥設備を解体している。解体前の評価として解体対象機器の γ 線計測を行い、放射能インベントリーを評価した。この結果から、解体作業を安全かつ合理的に実施するために、解体前にウラン回収の必要性を検討した。また、製錬転換施設では回収ウランを使用していることから、解体作業時の外部被ばく量に、回収ウランに含まれるウラン同位体が影響する。このため、回収ウランに含まれる空間線量へ影響する特徴的な核種を評価した。さらに、本報告書にまとめた解体実施前の γ 線計測データの解析結果をもとに核種挙動を整理することで、廃棄体確認の方法を検討することに利用できるよう考慮した。

Radiation Environment Account before Dismantling the Conversion Facilities
—Evaluation of the Uranium Inventory and Air Dose Rate in the Dismantling Facilities—

Masamitsu SHIMAIKE, Kaoru YOKOYAMA*, Sohei IKEGAMI, Nobuo TAKAHASHI
and Noritake SUGITSUE

Environmental Research and Development Department
Ningyo-toge Environmental Engineering Center
Japan Atomic Energy Agency
Kagamino-cho, Tomata-gun, Okayama-ken

(Received March 12, 2009)

At the reprocessed uranium conversion facilities, 48Y-cylinder homogenization treatment equipment, UO₃ pneumatic transport equipment, gas trapping and filling equipment and the second grade UF₄ drying equipment have been dismantled according to the schedule, in 2008 fiscal year. The gamma-ray measurement had been carried out before dismantlement to evaluate the radioactivity inventory. As a result, the uranium recovery work was forecasted for reasonable dismantlement. In addition, the feature nuclide affecting the results of the measurement on the air dose was evaluated. Additionally, as the waste data, gamma-ray analysis results are shown.

Keywords: Uranium, Reprocessed Uranium, Gamma-ray Measurement, Air Dose, Dismantling, Conversion Facilities

* Collaborating Engineer

目 次

1. 序論 -----	1
2. 解体対象 γ 線計測 -----	2
2.1 解体対象の Ge 検出器による γ 線計測 -----	2
2.1.1 γ 線測定装置 -----	2
2.1.2 γ 線測定条件 -----	2
2.1.3 測定位置 -----	2
2.1.4 γ 線計測結果 -----	4
2.2 解体対象の NaI 検出器による γ 線計測 -----	5
2.2.1 γ 線測定装置 -----	5
2.2.2 γ 線測定条件 -----	5
2.2.3 測定位置 -----	5
2.2.4 γ 線計測結果 -----	6
3. 核種評価 -----	7
3.1 核種の推定 -----	7
3.2 回収ウランからの γ 線ピーク -----	7
4. 機器内部インベントリー -----	9
5. 空間線量 -----	10
6. ウラン回収実施の必要性 -----	11
6.1 コールドトラップ -----	11
6.2 破碎機と乾燥機 -----	11
7. 回収ウランの空間線量への影響 -----	12
8. 工程内の核種分布評価 -----	14
9. 結論 -----	15
参考文献 -----	16

Contents

1. Introduction -----	1
2. Gamma-ray measurement intended for the dismantlement equipment -----	2
2.1 Gamma-ray measurement using Ge detector -----	2
2.1.1 Gamma-ray measurement device -----	2
2.1.2 Gamma-ray measurement condition -----	2
2.1.3 Measurement position -----	2
2.1.4 Gamma-ray measurement result -----	4
2.2 Gamma-ray measurement using NaI detector -----	5
2.2.1 Gamma-ray measurement device -----	5
2.2.2 Gamma-ray measurement condition -----	5
2.2.3 Measurement position -----	5
2.2.4 Gamma-ray measurement result -----	6
3. Radionuclide identification -----	7
3.1 Radionuclide Estimation -----	7
3.2 Gamma-ray emitted from Reprocessed uranium -----	7
4. Radioactivity inventory inside the equipment -----	9
5. Air dose -----	10
6. Necessity of uranium recovery -----	11
6.1 Cold Trap -----	11
6.2 Crusher and Drier -----	11
7. Reprocessed uranium influence for the air dose -----	12
8. Radionuclide distribution estimation in the process -----	14
9. Conclusion -----	15
References -----	16

表リスト

Table 2.1.1 コールドトラップ γ 線計数率(H701) -----	17
Table 2.1.2 コールドトラップ γ 線計数率(H702) -----	17
Table 2.1.3 コールドトラップ γ 線計数率(H703) -----	18
Table 2.1.4 コールドトラップ γ 線計数率(H704) -----	18
Table 2.2 破碎機 γ 線計数率 -----	19
Table 2.3 乾燥機 γ 線計数率 -----	19
Table 2.4 配管 γ 線計数率 -----	19
Table 3.1 UO_3 分析データ平均 -----	20
Table 3.2.1 γ 線エネルギー(^{232}U) -----	20
Table 3.2.2 γ 線エネルギー(^{236}U) -----	20
Table 3.3.1 ^{232}U 放射能 -----	21
Table 3.3.2 ^{236}U 放射能 -----	21
Table 3.4 γ 線エネルギー(^{237}Np) -----	22
Table 3.5 ^{237}Np 放射能 -----	22
Table 4.1.1 コールドトラップのウラン($^{235}\text{U} + ^{238}\text{U}$)付着密度 -----	23
Table 4.1.2 コールドトラップのウラン($^{235}\text{U} + ^{238}\text{U}$)付着量 -----	23
Table 4.2.1 コールドトラップのウラン(^{232}U)付着密度 -----	24
Table 4.2.2 コールドトラップのウラン(^{232}U)付着量 -----	24
Table 4.3.1 コールドトラップのネプツニウム(^{237}Np)付着密度 -----	25
Table 4.3.2 コールドトラップのネプツニウム(^{237}Np)付着量 -----	25
Table 4.4.1 破碎機のウラン($^{235}\text{U} + ^{238}\text{U}$)付着密度 -----	26
Table 4.4.2 破碎機ウラン($^{235}\text{U} + ^{238}\text{U}$)付着量 -----	26
Table 4.5.1 乾燥機のウラン($^{235}\text{U} + ^{238}\text{U}$)付着密度 -----	26
Table 4.5.2 乾燥機ウラン($^{235}\text{U} + ^{238}\text{U}$)付着量 -----	26
Table 4.6 配管のウラン・ネプツニウム付着密度 -----	26
Table 8.1 機器ごとのウラン・ネプツニウム付着量 -----	27
Table 8.2 機器ごとのウラン・ネプツニウム付着密度 -----	27

Table list

Table 2.1.1 Gamma-ray count rate from the cold trap (H701) -----	17
Table 2.1.2 Gamma-ray count rate from the cold trap (H702) -----	17
Table 2.1.3 Gamma-ray count rate from the cold trap (H703) -----	18
Table 2.1.4 Gamma-ray count rate from the cold trap (H704) -----	18
Table 2.2 Gamma-ray count rate from the crusher -----	19
Table 2.3 Gamma-ray count rate from the drier -----	19
Table 2.4 Gamma-ray count rate from the pipe -----	19
Table 3.1 UO ₃ analysis data average -----	20
Table 3.2.1 Gamma-ray energy (²³² U) -----	20
Table 3.2.2 Gamma-ray energy (²³⁶ U) -----	20
Table 3.3.1 ²³² U Radioactivity -----	21
Table 3.3.2 ²³⁶ U Radioactivity -----	21
Table 3.4 Gamma-ray energy (²³⁷ Np) -----	22
Table 3.5 ²³⁷ Np Radioactivity -----	22
Table 4.1.1 Uranium deposit density of the cold trap (²³⁵ U + ²³⁸ U) -----	23
Table 4.1.2 Uranium deposit of the cold trap (²³⁵ U + ²³⁸ U) -----	23
Table 4.2.1 Uranium deposit density of the cold trap (²³² U) -----	24
Table 4.2.2 Uranium deposit of the cold trap (²³² U) -----	24
Table 4.3.1 Neptunium deposit density of the cold trap (²³⁷ Np) -----	25
Table 4.3.2 Neptunium deposit of the cold trap (²³⁷ Np) -----	25
Table 4.4.1 Uranium deposit density of the crusher (²³⁵ U + ²³⁸ U) -----	26
Table 4.4.2 Uranium deposit of the crusher (²³⁵ U + ²³⁸ U) -----	26
Table 4.5.1 Uranium deposit density of the drier (²³⁵ U + ²³⁸ U) -----	26
Table 4.5.2 Uranium deposit of the drier (²³⁵ U + ²³⁸ U) -----	26
Table 4.6 Uranium and Neptunium deposit density inside the pipe -----	26
Table 8.1 Uranium deposit inside the equipment -----	27
Table 8.2 Uranium deposit density inside the equipment -----	27

図リスト

Fig.1.1 解体施設配置	28
Fig.2.1 コールドトラップ配置図と測定ポイント	29
Fig.2.2 破碎機測定ポイント	30
Fig.2.3 乾燥機測定ポイント	30
Fig.2.4 コールドトラップ γ 線スペクトル(測定ポイント:701-1)	31
Fig.2.5 破碎機 γ 線スペクトル(測定ポイント:121-1)	32
Fig.2.6 乾燥機 γ 線スペクトル(測定ポイント:130-1)	33
Fig.2.7 シリンダ処理室配管 γ 線スペクトル	34
Fig.2.8 コールドトラップ配管 γ 線スペクトル(測定ポイント 701-配管)	35
Fig.2.9 UF ₆ 充填室配管 γ 線スペクトル	36
Fig.2.10 シリンダ処理室・UF ₆ 充填室測定ポイント	37
Fig.2.11 コールドトラップ室測定ポイント	38
Fig.2.12 四フッ化ウラン供給室測定ポイント	39
Fig.2.13 シリンダ処理室・UF ₆ 充填室空間線量	40
Fig.2.14 コールドトラップ室空間線量	41
Fig.2.15 四フッ化ウラン供給室空間線量	42
Fig.4.1 コールドトラップウラン付着量計算モデル	43
Fig.4.2 破碎機ウラン付着量計算モデル	44
Fig.4.3 乾燥機ウラン付着量計算モデル	45
Fig.4.4 配管ウラン付着量計算モデル	46
Fig.4.5 Ge 検出器形状データ	46
Fig.5.1.1 コールドトラップ γ 線計数率(H701)	47
Fig.5.1.2 コールドトラップ γ 線計数率(H702)	48
Fig.5.1.3 コールドトラップ γ 線計数率(H703)	49
Fig.5.1.4 コールドトラップ γ 線計数率(H704)	50
Fig.5.2.1 コールドトラップ空間線量分布とウラン同位体分布(平面)	51
Fig.5.2.2 コールドトラップ空間線量分布とウラン同位体分布(高さ)	52
Fig.7.1 エネルギー範囲ごとの空間線量分布(コールドトラップ室)	53
Fig.7.2 コールドトラップ γ 線スペクトル(測定ポイント:1)	54

Figure list

Fig.1.1 Dismantlement equipment Layout -----	28
Fig.2.1 Layout and measurement point of the cold trap -----	29
Fig.2.2 Measurement point of the crusher -----	30
Fig.2.3 Measurement point of the drier -----	30
Fig.2.4 Gamma-ray spectrum from the cold trap (Measurement point : 701-1) -----	31
Fig.2.5 Gamma-ray spectrum from the crusher (Measurement point : 121-1) -----	32
Fig.2.6 Gamma-ray spectrum from the drier (Measurement point : 130-1) -----	33
Fig.2.7 Gamma-ray spectrum from the pipe of the cylinder processing room -----	34
Fig.2.8 Gamma-ray spectrum from the pipe of the cold trap room (Measurement point : 701- pipe) -----	35
Fig.2.9 Gamma-ray spectrum from the pipe of UF ₆ filling room -----	36
Fig.2.10 Measurement point of the cylinder processing room and UF ₆ filling room -----	37
Fig.2.11 Measurement point of the cold trap room -----	38
Fig.2.12 Measurement point of the UF ₄ feed chamber -----	39
Fig.2.13 Air dose of the cylinder processing room and UF ₆ filling room -----	40
Fig.2.14 Air dose of the cold trap room -----	41
Fig.2.15 Air dose of UF ₄ feed chamber -----	42
Fig.4.1 Calculation model of the uranium quantity inside the cold trap -----	43
Fig.4.2 Calculation model of the uranium quantity inside the crusher -----	44
Fig.4.3 Calculation model of the uranium quantity inside the drier -----	45
Fig.4.4 Calculation model of the uranium quantity inside the pipe -----	46
Fig.4.5 Configuration of Ge detector -----	46
Fig.5.1.1 Gamma-ray count rate from the cold trap (H701) -----	47
Fig.5.1.2 Gamma-ray count rate from the cold trap (H702) -----	48
Fig.5.1.3 Gamma-ray count rate from the cold trap (H703) -----	49
Fig.5.1.4 Gamma-ray count rate from the cold trap (H704) -----	50
Fig.5.2.1 Air dose of the cold trap and uranium deposit distribution (plane) -----	51
Fig.5.2.2 Air dose of the cold trap and uranium deposit distribution (vertical) -----	52
Fig.7.1 Air dose in each energy range (cold trap room) -----	53
Fig.7.2 Gamma-ray spectrum from the cold trap (Measurement point : 1) -----	54

写真リスト

Photo1.1 解体対象設備 ----- 55

Photograph list

Photo1.1 Dismantlement equipment ----- 55

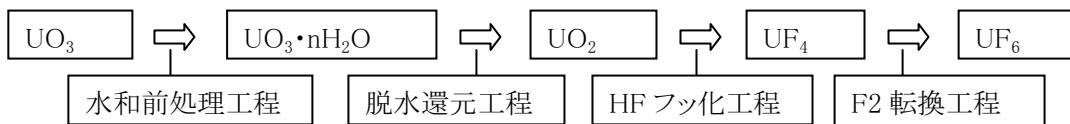
This is a blank page.

1. 序論

製錬転換施設では、「製錬転換施設廃止措置短期計画」にしたがって、日本で唯一の回収ウラン転換設備の解体・撤去を実施している。解体・撤去を安全かつ合理的に実施するためには、解体を行う設備のウランのインベントリーや設備周辺の空間線量などの放射線環境の調査を行うことが必要である。なお、平成 20 年度に解体・撤去する計画の設備は以下のとおりである。

設備	部屋名称(Photo1.1, Fig1.1 参照)	工程
48Y 均質化設備	シリンドラ処理室	回収ウランを使用した転換工程
UO ₃ 気送設備	フッ化沈殿室	
捕集充填設備	コールドトラップ室, UF ₆ 充填室	
二級品 UF ₄ 乾燥設備	四フッ化ウラン供給室, 四フッ化ウラン処理室	天然ウランを使用した乾燥工程

転換工程で、フッ化沈殿室の UO₃ 気送設備により原料(UO₃)が水和転換室(3)に送られ、UF₆への転換が行われる。製品(UF₆)については、水和転換室(2)からコールドトラップ室に送られる。その後、コールドトラップ室からUF₆充填室に送られシリンドラに充填される。UF₆が充填されたシリンドラはシリンドラ処理室に移動し、均質化が行われる。転換工程は次のとおりである。



転換施設の解体対象設備及び部屋について、以下の手順で放射線環境の調査を行った。

①解体を行う設備について、核種組成評価を目的として Ge 検出器を用いて γ 線計測を行う。一方、解体を行う設備及び設備が設置してある部屋について、空間線量評価を目的として NaI 検出器を用いて γ 線計測を行う。

②Ge 検出器を用いて得られた γ 線計測データから核種を推定し、各設備内のインベントリーを評価する。計算には MCNP コード¹⁾ を用いる。

③NaI 検出器を用いて得られた γ 線計測データから、各設備付近及び部屋での空間線量²⁾ を評価する。計算には、「SEIKO EG&G Gamma Studio 3rd Edition 空間線量分析プログラム (Peel-OFF 法)」を用いる。

このような手順で、各設備内のインベントリーと各設備付近及び部屋での空間線量から放射線量分布を評価し、解体作業前のウラン回収実施の必要性や、作業時の外部被ばく状況などを評価する。また、空間線量の評価から、製錬転換施設で使用した回収ウランに含まれる核種の中で、外部被ばくへ大きく影響する核種について検討し、回収ウランの影響について検討した。

2. 解体対象 γ 線計測

2.1 解体対象の Ge 検出器による γ 線計測

解体対象の Ge 検出器による γ 線計測を次の条件で行う。

2.1.1 γ 線測定装置

次の Ge 検出器により γ 線計測を行う。

Ge 検出器モデル	EG&G ORTEC GEM-30185-S
Ge 結晶のタイプ	高純度ゲルマニウム(HPGe), 同軸型

2.1.2 γ 線測定条件

- 測定時間 : 3000 秒／点

【設定理由】

解体対象機器ではウラン化合物を取り扱っており、 ^{235}U , ^{238}U などから放射される γ 線が主に計測される。 ^{235}U , ^{238}U などから放射される γ 線の計測はウラン濃縮施設で実施されている。³⁾ ^{235}U 濃度 0.3～4.0%の付着物を対象とした測定実績から γ 線測定時間は 2000～3000 秒において十分な精度が得られている。解体対象機器には天然に近い濃縮度のウランが付着していると推定されるため、 γ 線測定時間を 3000 秒に設定した。

2.1.3 測定位置

解体対象機器の名称と寸法は次のとおりである。このうち UO_3 気流輸送装置は UO_3 ポットの移動用ターンテーブルのみで、付着部位が無いため、また、ロボットはフード内に設置され、フード内でウランを開放して取り扱っているため、 γ 線装置が搬出できなくなることから測定不可である。また、予備破碎機はフード内に設置され、フード内でウランを開放して取り扱っているため、 γ 線装置が搬出できなくなることから測定不可である。

部屋名称	機器名称
シリンダ処理室	配管(25A)
フッ化沈殿室	UO_3 気流輸送装置、ロボット
コールドトラップ室	1 次コールドトラップ(Φ 1000mm × L4700mm)、 2 次コールドトラップ(Φ 450mm × L2500mm)、 配管(50A)
UF_6 充填室	配管(25A)
四フッ化ウラン供給室	予備破碎機
四フッ化ウラン処理室	破碎機(W1300mm × H1500mm)、 乾燥機(H2200mm × L4000mm)

Ge 検出器は機器に接近させて γ 線計測を行う。Ge 検出器を接近させている機器の面が平面的に広がり機器の内面にウラン化合物が付着する場合、Ge 検出器を中心にして 500mm 程度までの範囲に分布するウラン化合物の影響を受ける。そのため、ウラン化合物の分布を効率的に評価するため、機器内部でウランの分布に変化があまりないと考えられる部位では、測定位置の間隔を 500mm 以上にし、機器内部でウランの分布の変化が大きいと考えられる部位では、測定位置の間隔を 500mm 以下にして計測する。測定位置を Fig2.1～2.3 に示す。シリンド処理室、コールドトラップ室、UF₆ 充填室の配管については、Ge 検出器設置可能な位置で計測を行う。 γ 線計測点数は次のとおりである。

部屋名称	機器名称	機器	配管	備考	
シリンド処理室	配管	—	1 点	サンプル配管	回収ウラン
コールドトラップ室	1 次コールドトラップ	30 点	—	H701, H702	
	2 次コールドトラップ	18 点	—	H703, H704	
	配管		1 点	H701 ガス入口配管	
UF ₆ 充填室	配管	—	1 点	コールドトラップよりの液配管	天然ウラン
四フッ化ウラン処理室	破碎機	6 点	—	X-S121	
	乾燥機	12 点	—	X-S130	

2. 1. 4 γ 線計測結果

γ 線計測により得られた γ 線スペクトルを Fig2.4～2.9 に示す。Fig2.4～2.9 に示した γ 線スペクトルから次の γ 線ピークが検出される。⁴⁾ これらのピークは同じ核種から放射されるグループに分類できる。それぞれのグループから Ig(放出率)の高いピークをそのグループでの着目 γ 線ピークとする。なお、²¹²Pb と ²⁰⁸Tl については同じ親核種(²³²U または ²³⁶U)から生成しているため、Ig の高い、583.2keV を代表的な γ 線ピークとした。

核種	計測ピーク (keV)	Ig (%)	着目エネルギー (keV)
²³⁵ U	143.8	10.96	185.7
	163.4	5.08	
	185.7	57.20	
	202.1	1.08	
	205.3	5.01	
^{234m} Pa	258.2	0.0728	1001.0
	742.8	0.0800	
	766.4	0.2940	
	786.3	0.0485	
	1001.0	0.8370	
²¹² Pb	238.6	43.30	583.2
²⁰⁸ Tl	510.8	22.60	
	583.2	84.50	
	860.6	12.42	
	1592.0	DE	
²³³ Pa	300.3	6.62	312.2
	312.2	38.60	
	340.8	4.47	
	398.6	1.39	
	415.8	1.75	

各計測データから代表的な γ 線ピークの計数率を求めた。コールドトラップで計測した γ 線計数率を Table2.1.1～2.1.4 に示す。破碎機で計測した γ 線計数率を Table2.2 に示す。乾燥機で計測した γ 線計数率を Table2.3 に示す。また、配管(シリンドラ処理室配管、コールドトラップ H701 配管、UF₆ 充填室配管)で計測した γ 線計数率を Table2.4 に示す。

γ 線スペクトルの結果から、四フッ化ウラン処理室(破碎機、乾燥機)では、天然ウランのみのピークが検出され、シリンドラ処理室(配管)、コールドトラップ室(コールドトラップ、配管)、UF₆ 充填室(配管)では、回収ウランのピークが検出されることがわかる。

2. 2 解体対象の NaI 検出器による γ 線計測

解体対象の NaI 検出器による γ 線計測は次の条件で行う。

2. 2. 1 γ 線測定装置

NaI 検出器モデル	SCIONIX 社 76B76/3 型
NaI 結晶のタイプ	3" $\phi \times 3"$ シリンダ型 (76 × 76mm)

2. 2. 2 γ 線測定条件

- 測定高さ : FL + 1m
- NaI 検出器方向 : 上方向
- 遮へい体 : なし
- 測定時間 : 3000 秒／点

【設定理由】

NaI 検出器による γ 線計測では空間線量を評価する。そのため、測定高さ、NaI 検出器方向、遮へい体については放射能測定法シリーズ 20 空間 γ 線スペクトル測定法²⁾ にしたがって設定した。また、測定時間については、Ge 検出器と同じ測定時間とした。

2. 2. 3 測定位置

NaI 検出器による γ 線計測は、機器・配管の近傍と作業空間で行う。機器・配管計測は、機器・配管表面から 20cm の距離で実施した。この距離は、NaI 検出器をセットしてある架台を機器・配管に近接させた場合の値である。機器・配管表面から離れた作業空間では、空間線量の急激な変化はないと推定される。したがって、作業空間計測を効率的に実施するため、機器・配管表面と壁の間を 2 等分または 3 等分する位置で計測した。測定位置を Fig2.10～2.12 に示す。 γ 線計測点数は次のとおりである。

部屋名称	機器名称	機器・配管	作業空間	備考			
シリンダ処理室	48Y シリンダ均質化槽	—	9 点	1 次コールドトラップ上・下測定は、ポイント 1, 2, 7 の上・下 1m で実施	回収ウラン		
コールドトラップ室	1 次コールドトラップ	8 点	10 点				
	1 次コールドトラップ上・下	6 点					
	2 次コールドトラップ	12 点					
UF ₆ 充填室	—	2 点	6 点				
四フッ化ウラン供給室	予備破碎機	12 点	20 点		天然ウラン		

2. 2. 4 γ 線計測結果

γ 線計測データから計算した空間線量を Fig2.13～2.15 に示す。計算には、「SEIKO EG&G Gamma Studio 3rd Edition 空間線量分析プログラム(Peel-OFF 法)」を用いた。空間線量計算結果から以下のような特徴が得られる。

○ シリンダ処理室

配管の近傍は、NaI 検出器を設置できないため、作業空間のみで計測を実施した。空間線量は 111～125nGy/hr で、作業空間内ではほぼ均一に分布している。

○ コールドトラップ室

コールドトラップの近傍での空間線量は 127～329nGy/hr で分布し、作業空間の空間線量は 129～244nGy/hr で分布している。特に1次コールドトラップの UF₆ 気体入口付近で空間線量が大きな値を示している。

○ UF₆ 充填室

配管の近傍での空間線量は 173～278nGy/hr で分布し、作業空間の空間線量は 128～148nGy/hr で分布している。作業空間内では空間線量がほぼ均一に分布している。

○ 四フッ化ウラン供給室

機器の近傍での空間線量は 112～298nGy/hr で分布し、作業空間の空間線量は 106～179nGy/hr で分布している。特に小分けハウスの測定ポイント 30 付近で空間線量が大きな値を示している。

3. 核種評価

3. 1 核種の推定

2. 1. 4項で示した以下のような着目した γ 線ピークから、機器内部に付着している核種の推定結果を示す。 γ 線スペクトルは Fig2.4～2.9 に示してある。

着目エネルギー(keV)	核種
185.7	^{235}U
1001.0	$^{234\text{m}}\text{Pa}$ (^{238}U)
583.2	^{208}Tl (^{232}U)
312.2	^{233}Pa (^{237}Np)

Fig2.4 及び Fig 2.8 の γ 線スペクトルの定性的な評価から、コールドトラップ及びコールドトラップ周辺の配管にはウラン同位体 (^{232}U , ^{235}U , ^{238}U) とネプツニウム (^{237}Np) が付着していると推定できる。

Fig2.5～2.6 の γ 線スペクトルから、破碎機及び乾燥機にはウラン同位体 (^{235}U , ^{238}U) が付着していると推定できる。

Fig2.7 の γ 線スペクトルから、シリンド処理室の配管にはウラン同位体 (^{232}U , ^{235}U , ^{238}U) が付着していると推定できる。

Fig2.9 の γ 線スペクトルから、UF₆充填室の配管にはウラン同位体 (^{232}U , ^{235}U , ^{238}U) とネプツニウムが付着していると推定できる。

3. 2 回収ウランからの γ 線ピーク

3. 1項で、着目した γ 線エネルギーのうち、583.2 keV (^{208}Tl) 及び 312.2 keV (^{233}Pa) は回収ウランの子孫核種から放出される。回収ウラン転換工程での UO₃ 原料の分析データから測定された γ 線ピークを検証する。

UF₆ 転換試験は、中規模試験(1988 年度～1990 年度)と実用化規模試験(1991 年度～1999 年度)が行われた。⁵⁾ 中規模試験では、約 40t-U の回収ウランを転換した。このとき UO₃ の代表サンプルについての分析が行われている。

UO ₃ 収納容器	178
代表サンプル	32
UO ₃ 収納容器充填量	240kgU

実用化規模試験では、[フェーズ1](1991 年度～1997 年度)で約 214t-U の回収ウランを転換した。また、[フェーズ2](1998 年度～1999 年度)で約 79t-U の回収ウランを転換した。このとき UO_3 の代表サンプルについての分析が行われている。

UO_3 ポット	1724
代表サンプル	110
UO_3 ポット充填量	230kgU

サンプル分析値の平均を Table 3.1 に示す。この結果から、583.2 keV(^{208}Tl) は ^{232}U と ^{236}U の子孫核種から放出され、312.2 keV(^{233}Pa) は ^{237}Np の子孫核種から放出されていることがわかる。(Table 3.2～Table 3.5 参照)

なお、583.2 keV(^{208}Tl) については、 ^{232}U と ^{236}U の Table 3.1 に示した存在比と Table 3.3.1～2 に示した放射能から、 ^{232}U の子孫核種(^{208}Tl)から放出される γ 線ピークが主成分であることがわかる。

4. 機器内部インベントリー

各機器のウランインベントリーを計算する。このため、先ず、各機器の寸法・材質と Ge 検出器の位置から、各機器内部に付着するウランなどの核種から放射される γ 線が Ge 検出器に到達する確率を計算する。各機器の寸法・材質と Ge 検出器の位置を Fig4.1～4 に示す。また、Ge 検出器の寸法を Fig4.5 に示す。

ウランなどの核種から放射される γ 線が Ge 検出器に到達する確率の計算は MCNP コードを用いて行った。なお、ウランなどの核種は各機器の内面へ均一に分布しているとして、到達確率を計算した。

ここで計算した到達確率と核種(^{232}U , ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np)1gあたりの放射能から、核種 1g が機器内部の評価点に分布するとき Ge 検出器で計測される γ 線計数率の理論値を計算する。この γ 線計数率理論値と γ 線計数率実測値から機器内部に分布する核種の存在量を計算する。

なお、 ^{235}U から放射される 185.7keV と $^{234\text{m}}\text{Pa}$ (^{238}U)から放射される 1001.0keV については、定量したウラン線源の計測データから求めた補正係数を使って、効率を計算している。 ^{233}Pa (^{237}Np)から放射される 312.2keV については、185.7keV と 1001.0keV の係数から直線近似して補正係数を求め、効率を計算している。

各機器のウラン付着密度及びウラン付着量の計算結果を示す。

- コールドトラップのウラン($^{235}\text{U} + ^{238}\text{U}$)付着密度と付着量を Table4.1.1～2 に示す。コールドトラップのウラン(^{232}U)付着密度と付着量を Table4.2.1～2 に示す。コールドトラップのネプツニウム(^{237}Np)付着密度と付着量を Table4.3.1～2 に示す。
- 破碎機のウラン($^{235}\text{U} + ^{238}\text{U}$)付着密度と付着量を Table4.4.1～2 に示す。
- 乾燥機のウラン($^{235}\text{U} + ^{238}\text{U}$)付着密度と付着量を Table4.5.1～2 に示す。
- 配管(シリンダ処理室配管、コールドトラップ H701 配管、UF₆充填室配管)のウラン($^{235}\text{U} + ^{238}\text{U}$, ^{232}U)付着密度及びネプツニウム(^{237}Np)付着密度を Table4.6 に示す。

5. 空間線量

空間線量の分布を評価では、線源である機器のインベントリーとの対応を考慮した評価を行った。そのため、空間線量とインベントリーの両方の評価を行っているコールドトラップ室を対象として空間線量分布の特徴をまとめた。

空間線量はFig2.14に示した分布をとる。インベントリーについては、核種として ^{232}U , ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np が含まれる。 ^{232}U (^{208}Tl), ^{235}U , ^{238}U ($^{234\text{m}}\text{Pa}$), ^{237}Np (^{233}Pa)の γ 線計数率の分布をFig5.1.1～4に示す。

1次コールドトラップ H701, H702 については、位置 1 が UF_6 気体入口側で、位置 5 が UF_6 気体出口側である。また、高さ 1 が上部側で高さ 3 が下部側である。

2 次コールドトラップ H703, H704 については、位置 1 が UF_6 気体出口側で位置 3 が UF_6 気体入口側である。また、高さ 1 が上部側で高さ 3 が下部側である。

Fig2.14 に示した空間線量とコールドトラップ内のウランインベントリーを重ねた分布図をFig5.2.1 に示す。また、1次コールドトラップ H701 の高さ方向の空間線量とコールドトラップ内のウランインベントリーを重ねた図を Fig 5.2.2 に示す。Fig5.2.1～2 に示したウラン密度は $^{235}\text{U} + ^{238}\text{U}$ の密度である。ただし、Fig5.1.1～4 に示した γ 線計数率の分布から、 ^{232}U についても $^{235}\text{U} + ^{238}\text{U}$ と同じ分布で付着していると推定できる。

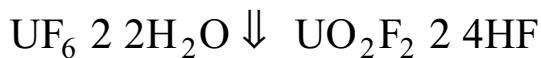
Fig5.2.1 の結果から、1次コールドトラップ H701, H702 の UF_6 気体入口側でコールドトラップ内のウラン密度が高く、その付近を中心に空間線量が高くなっている。また、Fig5.2.2 の結果から、1 次コールドトラップ H701 の UF_6 気体入口側の上部でコールドトラップ内のウラン密度が高く、その部位から離れるにしたがいウラン密度が減少していく。空間線量についても UF_6 気体入口側の上部で空間線量が高く、その部位から離れるにしたがい空間線量が減少していく。この結果から、コールドトラップ室における空間線量の分布は、コールドトラップ内のウラン同位体(^{232}U , ^{235}U , ^{238}U)のインベントリーで説明できると考えられる。

6. ウラン回収実施の必要性

回収ウランを使用した転換工程(コールドトラップ)と天然ウランを使用した乾燥工程(破碎機と乾燥機)の解体前の γ 線計測により機器に付着しているウラン量を計算した。機器解体の安全性の面からウラン回収の必要性を検討する。

6. 1 コールドトラップ

コールドトラップでは、UF₆ガスが固化してトラップされ、液化されて次の工程に進む。ところで、コールドトラップには、水蒸気が入っていることが推定される。UF₆と水蒸気(H₂O)が存在する場合、次の反応が起り、二フッ化ウラニル(UO₂F₂)が発生していると考えられる。



二フッ化ウラニル(UO₂F₂)は、水溶性であるため、解体前にコールドトラップの水洗浄によりウラン回収を実施することが妥当と考えられる。

6. 2 破碎機と乾燥機

破碎機と乾燥機は二級品 UF₄を乾燥させる工程のため、大量にウラン化合物が付着していると考えられる。Table4.4.2とTable4.5.2から、破碎機に5000gU程度、乾燥機に20000gU程度のウランが付着していると推定できる。

ところで、UF₄は比較的安定な化学形態であることから、破碎機、乾燥機にUF₄の化学形態のまま付着して存在していると推定される。しかし、解体時の被ばく低減の観点から解体前に、破碎機と乾燥機のウラン回収の検討が必要と考えられる。

7. 回収ウランの空間線量への影響

コールドトラップの空間線量について、エネルギー範囲ごとの γ 線の寄与をFig7.1に示す。また、NaI検出器で計測した γ 線スペクトルをFig7.2に示す。（ γ 線計測ポイントは、Fig2.11の測定ポイント1である。）エネルギー範囲ごとの空間線量から以下のことが推定できる。

○1次コールドトラップ近接

1次コールドトラップではGe検出器での γ 線計測結果からUF₆気体入口でウラン同位体(²³²U, ²³⁵U, ²³⁸U)の密度が高く、反対側のUF₆気体出口でウラン同位体の密度が低くなっている。UF₆気体入口付近の測定ポイント1, 26とUF₆気体出口付近の測定ポイント8を比較すると、エネルギー範囲2000–3000keVで測定ポイント1, 26の空間線量が高く、測定ポイント8の空間線量が低くなっていることがわかる。エネルギー範囲2000–3000keVに影響するのは、Fig7.2から、²⁰⁸Tlのピークである。

また、測定ポイント9, 10での空間線量は、250–499keVの γ 線の影響が大きいことがわかる。Ge検出器での γ 線計測結果から、ネプツニウム(²³⁷Np)がコールドトラップ(H701)の中央部分からUF₆気体出口にかけて高い密度で分布していることが評価されている。したがって、この測定ポイントでは、ネプツニウム(²³⁷Np)が崩壊するとき生成する²³³Paから放射される312.2keVなど γ 線のエネルギーが影響していると考えられる。

○2次コールドトラップ近接

Table4.1.1, Table4.2.1, Table4.3.1より、2次コールドトラップでは、ウラン付着密度及びネプツニウム付着密度が、1次コールドトラップに比較して低いため、全体的に空間線量の値が低くなっている。しかし、UF₆気体入口付近の測定ポイント4, 27とUF₆気体出口付近の測定ポイント16, 21の空間線量は、1次コールドトラップと同様の傾向を示す。

○作業空間

コールドトラップ室の作業空間のうち、壁際の測定ポイント14, 15, 20, 22はコールドトラップのUF₆気体入口から離れているため、コールドトラップ内に付着しているウラン同位体の影響が小さいと考えられる。測定ポイント14, 15, 20, 22のエネルギー範囲ごと空間線量は、エネルギー範囲1000–1999keVの値が高く、それ以外のエネルギー範囲の空間線量は低い。なお、エネルギー範囲1000–1999keVは壁のコンクリートに含まれる40Kの1460keVの γ 線エネルギーが影響していると考えられる。

測定ポイント28, 29, 30については、壁際ではあるが、コールドトラップのUF₆気体入口に近いため、コールドトラップ内に付着しているウラン同位体の影響を受けていると考えられる。

測定ポイント11, 13での空間線量は、250–499keVの γ 線の影響が大きいことがわかる。測定ポイントは、コールドトラップ(H701)表面からは50cm離れているがコールドトラップ(H701)の中央部

分から UF_6 気体出口にかけて高い密度で分布しているネプツニウム(^{237}Np)が影響していると考えられる。

これらの結果から、回収ウランを使用したことにより、 ^{232}U から生成した ^{208}Tl 及び ^{237}Np から生成した ^{233}Pa が空間線量に影響すると推定できる。

なお、 ^{208}Tl については自然に存在している。⁶⁾ しかし、量的にはコールドトラップ内に付着した回収ウランに含まれる ^{232}U から生成した ^{208}Tl が大きい。そのため、コールドトラップ室のエネルギー範囲 2000–3000keV の空間線量は、回収ウランに含まれる ^{232}U より生成した ^{208}Tl が主な要因である。

8. 工程内の核種分布評価

製錬転換施設内の解体・撤去により発生する解体物で、ウランとの接触があつたものについては最終的に、ウラン系廃棄物として埋設処分を行う計画としている。ウラン系廃棄物の埋設処分の方法等については、現時点では確定していないが、仮に、廃棄体による処分などを行う場合には、廃棄体としての技術的要件が満たされていることを検査する必要がある。⁷⁾ このために、機器解体時の核種分布挙動に関する知見が有効であることを踏まえ、解体実施前の γ 線計測データ解析結果は、解体物から製作した廃棄体の確認への活用ができるよう考慮し、解体実施前の γ 線計測データ解析結果を転換施設工程内の機器ごとに整理した。

その結果をTable8.1～2に示す。ただし、コールドトラップ室では、水洗浄を実施した場合、解体物の核種分布が除染前と大きく異なることが推定される。

9. 結論

製鍊転換施設の各設備内のインベントリーと各設備付近及び部屋での空間線量から放射線環境を評価した。この結果、コールドトラップの解体では、作業の安全上、水洗浄を実施することが妥当と結論した。

さらに、空間線量の評価から、製鍊転換施設で使用した回収ウランに含まれる核種の中で外部被ばくへ影響する核種について検討した。この結果、水洗浄などの除染を実施しない状態では、回収ウランから生成した、 ^{232}U や ^{237}Np が滞留する設備については、空間線量は ^{232}U から生成する ^{208}Tl 及び ^{237}Np から生成する ^{233}Pa が影響していると推定した。

また、廃棄体の確認に活用するデータとして、解体実施前の γ 線計測データ解析結果を転換施設工程内の機器ごとに整理した。ただし、除染を実施した場合には、解体物の核種分布が変化する。

参考文献

- 1) J.F.Briesmeister (Ed.) : “A general Monte Carlo N-particle code, version 4C – Manual”, LA-13709-M (2000).
- 2) 文部科学省 : “放射能測定法シリーズ 20 空間 γ 線スペクトル測定法” (平成 2 年)
- 3) 江間 晃, 横山 薫, 中塚 嘉明, 島池 政満, 杉杖 典岳 : “フッ化ヨウ素ガスによる系統除染技術開発”, JAEA- Technology 2008-037 (2008)
- 4) R.B.Firestone, L.P.Ekström LBNL Isotopes Project – LUNDS Universitet WWW Table of Radioactive Isotopes <http://ie.lbl.gov/toi/>
- 5) 天本 一平 : “ウラン転換技術開発”, サイクル機構技法 No.9, p.65–74 (2000)
- 6) 文部科学省 : “放射能測定法シリーズ 33 ゲルマニウム半導体検出器を用いた in-situ 測定法” (平成 20 年)
- 7) 独立行政法人 日本原子力研究開発機構:「私信」(平成 19 年)

Table2.1.1 コールドトラップ γ 線計数率(H701)

	γ 線計数率(cps)			
	185.7keV	312.2keV	583.2keV	1001keV
H701-1	8.307	7.77	3.70	3.224
H701-2	5.039	12.52	2.37	2.028
H701-3	1.881	8.13	1.11	1.074
H701-4	1.288	19.16	0.91	0.669
H701-5	1.063	19.66	0.90	0.517
H701-6	0.666	15.73	0.78	0.388
H701-7	0.654	44.53	0.76	0.390
H701-8	0.510	29.02	0.76	0.312
H701-9	0.346	20.39	0.72	0.234
H701-10	0.348	33.42	0.60	0.260
H701-11	0.248	20.83	0.55	0.198
H701-12	0.274	14.33	0.59	0.109
H701-13	0.545	41.45	0.74	0.225
H701-14	0.223	39.00	0.81	0.229
H701-15	0.321	34.16	0.97	0.145

Table2.1.2 コールドトラップ γ 線計数率(H702)

	γ 線計数率(cps)			
	185.7keV	312.2keV	583.2keV	1001keV
H702-1	7.090	6.28	2.77	2.547
H702-2	4.951	8.61	2.00	1.793
H702-3	1.809	4.42	1.12	0.962
H702-4	0.997	7.14	0.78	0.542
H702-5	1.007	8.51	0.86	0.461
H702-6	0.626	8.66	0.87	0.330
H702-7	0.599	10.03	0.65	0.315
H702-8	0.691	11.43	0.73	0.252
H702-9	0.469	13.72	0.90	0.246
H702-10	0.427	10.71	0.63	0.257
H702-11	0.285	10.56	0.56	0.173
H702-12	0.398	10.57	0.68	0.131
H702-13	0.767	21.23	1.01	0.354
H702-14	0.549	20.67	1.05	0.288
H702-15	0.500	17.59	1.19	0.231

Table2.1.3 コールドトラップ γ 線計数率(H703)

	γ 線計数率(cps)			
	185.7keV	312.2keV	583.2keV	1001keV
H703-1	0.528	6.16	0.53	0.306
H703-2	0.400	8.67	0.54	0.260
H703-3	0.226	11.46	0.55	0.215
H703-4	1.650	7.23	0.85	0.485
H703-5	1.046	8.40	0.82	0.380
H703-6	0.691	10.57	0.69	0.299
H703-7	9.561	7.14	2.86	1.880
H703-8	10.005	8.95	3.19	1.946
H703-9	7.206	8.60	2.61	1.573

Table2.1.4 コールドトラップ γ 線計数率(H704)

	γ 線計数率(cps)			
	185.7keV	312.2keV	583.2keV	1001keV
H704-1	0.372	1.72	0.41	0.244
H704-2	0.255	2.70	0.48	0.253
H704-3	0.151	4.26	0.54	0.190
H704-4	0.439	3.72	0.57	0.280
H704-5	0.248	3.91	0.53	0.208
H704-6	0.220	4.25	0.50	0.161
H704-7	5.332	5.87	2.08	1.373
H704-8	5.348	7.89	2.27	1.335
H704-9	3.824	8.07	1.94	1.047

Table2.2 破碎機 γ 線計數率

	γ 線計數率(cps)	
	185.7keV	1001keV
121-1	17.94	7.08
121-2	40.82	13.88
121-3	49.00	15.09
121-4	0.84	2.96
121-5	0.18	2.96
121-6	3.43	9.37

Table2.3 乾燥機 γ 線計數率

	γ 線計數率(cps)	
	185.7keV	1001keV
130-1	127.98	78.54
130-2	87.30	80.48
130-3	291.62	403.33
130-4	224.36	323.08
130-5	12.77	33.01
130-6	13.26	20.46
130-7	4.56	5.55
130-8	5.01	4.94
130-9	6.61	5.90
130-10	10.33	9.75
130-11	11.62	14.18
130-12	22.92	17.54

Table2.4 配管 γ 線計數率

	γ 線計數率(cps)			
	185.7keV	312.2keV	583.2keV	1001keV
シリンド処理室配管	1.688	0.000	0.435	0.316
コールドトラップ室配管	7.364	1.994	1.668	1.887
UF ₆ 充填室配管	1.224	3.530	0.756	1.529

Table 3.1 UO_3 分析データ平均

	232U (ppb/U)	234U (%)	235U (%)	236U (%)	238U (%)	237Np (Bq/gu)
中規模試験	0.776	0.017	1.040	0.308	98.635	0.895
実用化規模試験	0.585	0.016	1.046	0.284	98.654	5.337

Table 3.2.1 γ 線エネルギー (^{232}U)

	Eg (keV)	Ig (%)
232U	57.766 5	0.1999 18
	129.065 1	0.0682 4
	270.245 2	0.00316 5
228Th	84.373 3	1.22 2
	215.983 5	0.254 3
224Ra	240.986 6	4.10 5
220Rn	549.76 4	0.114 17
216Po	804.9 5	0.0019 3
212Pb	238.632 2	43.3 4
	300.087 10	3.28 3
212Bi	727.330 9	6.58 5
	785.37 8	1.102 13
	1620.50 10	1.49 3
208Tl	277.351 10	6.31 9
	510.77 10	22.6 3
	583.191 2	84.5 7
	763.13 8	1.81 5
	860.564 5	12.42 10
	2614.533 13	99
	1592	DE

Table 3.2.2 γ 線エネルギー (^{236}U)

	Eg (keV)	Ig (%)
236U	112.75 2	0.019 2
232Th	140.86 2	0.021 4
228Ra	13.52 2	1.6
228Ac	129.065 1	2.42 9
	209.253 6	3.89 7
	270.245 2	3.46 6
	328.000 6	2.95 12
	338.320 3	11.27 19
	463.004 6	4.40 7
	794.947 5	4.25 7
	911.204 4	25.8 4
	964.766 10	4.99 9
	968.971 17	15.8 3
	1588.19 3	3.22 8
\downarrow		
228Th→224Ra		
\downarrow		
220Rn→216Po		
\downarrow		
212Pb→212Bi→208Tl		

Table 3.3.1 ^{232}U 放射能

	0 年	2 年	4 年	6 年	8 年	10 年	20 年	30 年
Tl208	0.00E+00	1.45E+11	2.13E+11	2.43E+11	2.55E+11	2.58E+11	2.41E+11	2.19E+11
Pb212	0.00E+00	4.04E+11	5.93E+11	6.77E+11	7.10E+11	7.19E+11	6.71E+11	6.10E+11
Bi212	0.00E+00	4.04E+11	5.93E+11	6.77E+11	7.10E+11	7.19E+11	6.71E+11	6.10E+11
Po212	0.00E+00	2.59E+11	3.80E+11	4.34E+11	4.55E+11	4.61E+11	4.30E+11	3.91E+11
Po216	0.00E+00	4.04E+11	5.93E+11	6.77E+11	7.10E+11	7.19E+11	6.71E+11	6.10E+11
Rn220	0.00E+00	4.04E+11	5.93E+11	6.77E+11	7.10E+11	7.19E+11	6.71E+11	6.10E+11
Ra224	0.00E+00	4.04E+11	5.93E+11	6.77E+11	7.10E+11	7.19E+11	6.71E+11	6.10E+11
Th228	0.00E+00	4.04E+11	5.92E+11	6.76E+11	7.09E+11	7.17E+11	6.71E+11	6.10E+11
U232	7.92E+11	7.77E+11	7.62E+11	7.48E+11	7.34E+11	7.20E+11	6.53E+11	5.93E+11

Table 3.3.2 ^{236}U 放射能

	0 年	2 年	4 年	6 年	8 年	10 年	20 年	30 年
Tl208	0.00E+00	1.69E-06	1.10E-05	3.06E-05	6.06E-05	1.00E-04	3.94E-04	7.72E-04
Pb212	0.00E+00	4.72E-06	3.06E-05	8.52E-05	1.69E-04	2.78E-04	1.10E-03	2.15E-03
Bi212	0.00E+00	4.72E-06	3.06E-05	8.52E-05	1.69E-04	2.78E-04	1.10E-03	2.15E-03
Po212	0.00E+00	3.02E-06	1.96E-05	5.46E-05	1.08E-04	1.78E-04	7.03E-04	1.38E-03
Po216	0.00E+00	4.72E-06	3.06E-05	8.52E-05	1.69E-04	2.78E-04	1.10E-03	2.15E-03
Rn220	0.00E+00	4.72E-06	3.06E-05	8.52E-05	1.69E-04	2.78E-04	1.10E-03	2.15E-03
Ra224	0.00E+00	4.72E-06	3.06E-05	8.52E-05	1.69E-04	2.78E-04	1.10E-03	2.15E-03
Ra228	0.00E+00	2.28E-05	8.56E-05	1.81E-04	3.02E-04	4.45E-04	1.36E-03	2.45E-03
Ac228	0.00E+00	2.28E-05	8.56E-05	1.81E-04	3.02E-04	4.45E-04	1.36E-03	2.45E-03
Th228	0.00E+00	4.72E-06	3.06E-05	8.52E-05	1.68E-04	2.78E-04	1.10E-03	2.15E-03
Th232	0.00E+00	2.36E-04	4.72E-04	7.09E-04	9.45E-04	1.18E-03	2.36E-03	3.54E-03
U236	2.39E+06							

Table 3.4 γ 線エネルギー(^{237}Np)

	Eg (keV)	Ig (%)		Eg (keV)	Ig (%)
^{237}Np	117.702 20	0.16 1	^{225}Ac	108.42 4	0.251 11
	143.249 20	0.43 2		111.54 3	0.317 14
	151.414 20	0.232 12		150.04 2	0.80 3
	194.95 3	0.184 10		157.26 2	0.360 22
	212.29 5	0.155 10		188.00 5	0.54 3
^{233}Pa	300.34 2	6.62 6	^{221}Fr	218.19 5	11.6 4
	312.17 2	38.6 4		410.7 2	0.14 4
	340.81 3	4.47 4	^{217}At	258.5	0.056 5
^{233}U	118.968 2	0.00406 4		593.1 2	0.0120 6
	146.345 2	0.00657 6	^{221}Ra	93.1 1	2.1 5
	164.522 2	0.00623 5		149.0 1	9.0 9
	291.354 4	0.00537 5		174.1 2	1.6 4
	317.16 1	0.00776 7	^{213}Bi	292.80 1	0.429 7
^{229}Th	136.990 4	1.18 3		440.46 1	26.1 3
	156.409 9	1.19 3	^{209}Tl	117.211 9	84.3 19
	193.509 4	4.4		465.130 18	96.9 19
	210.853 3	2.8 3		1567.09 3	99.8 19
^{225}Ra	40.09 5	30	^{213}Po	778.8 3	0.0048 5

Table 3.5 ^{237}Np 放射能

	0 年	2 年	4 年	6 年	8 年	10 年	20 年	30 年
TL209	0.00E+00	4.65E-04	1.91E-03	4.34E-03	7.74E-03	1.21E-02	4.81E-02	1.07E-01
PB209	0.00E+00	2.16E-02	8.85E-02	2.01E-01	3.59E-01	5.62E-01	2.23E+00	4.97E+00
BI213	0.00E+00	2.16E-02	8.85E-02	2.01E-01	3.59E-01	5.62E-01	2.23E+00	4.97E+00
PO213	0.00E+00	2.11E-02	8.66E-02	1.97E-01	3.51E-01	5.49E-01	2.18E+00	4.86E+00
AT217	0.00E+00	2.16E-02	8.85E-02	2.01E-01	3.59E-01	5.62E-01	2.23E+00	4.97E+00
FR221	0.00E+00	2.16E-02	8.85E-02	2.01E-01	3.59E-01	5.62E-01	2.23E+00	4.97E+00
RA225	0.00E+00	2.16E-02	8.85E-02	2.01E-01	3.59E-01	5.62E-01	2.23E+00	4.97E+00
AC225	0.00E+00	2.16E-02	8.85E-02	2.01E-01	3.59E-01	5.62E-01	2.23E+00	4.97E+00
TH229	0.00E+00	2.16E-02	8.85E-02	2.01E-01	3.59E-01	5.62E-01	2.23E+00	4.97E+00
PA233	0.00E+00	2.61E+07						
U233	0.00E+00	2.28E+02	4.68E+02	7.09E+02	9.49E+02	1.19E+03	2.33E+03	3.47E+03
NP237	2.61E+07							

Table4.1.1 コールドトラップのウラン($^{235}\text{U} + ^{238}\text{U}$)付着密度

	ウラン($^{235}\text{U} + ^{238}\text{U}$)付着密度(mgU/cm ²)			
	H701	H702	H703	H704
H70n-1	143.8	114.7	5.5	4.8
H70n-2	60.3	54.2	3.9	4.7
H70n-3	46.5	42.9	2.9	3.3
H70n-4	28.2	23.9	10.5	5.8
H70n-5	14.4	13.6	7.0	3.5
H70n-6	15.6	14.4	5.3	2.5
H70n-7	15.6	13.7	49.5	36.3
H70n-8	8.2	7.3	47.6	32.6
H70n-9	8.6	10.6	40.8	27.2
H70n-10	9.8	11.0	—	—
H70n-11	4.7	4.9	—	—
H70n-12	3.0	5.4	—	—
H70n-13	8.2	15.4	—	—
H70n-14	5.6	8.4	—	—
H70n-15	4.6	9.9	—	—

Table4.1.2 コールドトラップのウラン($^{235}\text{U} + ^{238}\text{U}$)付着量

	ウラン($^{235}\text{U} + ^{238}\text{U}$)付着量(gU)
H701	980
H702	910
H703	748
H704	523

Table4.2.1 コールドトラップのウラン(^{232}U)付着密度

	ウラン(^{232}U)付着密度 (mgU/cm ²)			
	H701	H702	H703	H704
H70n-1	6.73E-08	5.03E-08	8.21E-09	6.41E-09
H70n-2	3.44E-08	2.90E-08	6.98E-09	6.17E-09
H70n-3	2.03E-08	2.04E-08	8.59E-09	8.41E-09
H70n-4	1.65E-08	1.43E-08	1.33E-08	8.86E-09
H70n-5	1.31E-08	1.25E-08	1.06E-08	6.84E-09
H70n-6	1.43E-08	1.58E-08	1.08E-08	7.83E-09
H70n-7	1.38E-08	1.18E-08	4.46E-08	3.23E-08
H70n-8	1.10E-08	1.06E-08	4.13E-08	2.94E-08
H70n-9	1.30E-08	1.63E-08	4.06E-08	3.02E-08
H70n-10	1.09E-08	1.15E-08	—	—
H70n-11	7.99E-09	8.11E-09	—	—
H70n-12	1.08E-08	1.24E-08	—	—
H70n-13	1.35E-08	1.84E-08	—	—
H70n-14	1.18E-08	1.52E-08	—	—
H70n-15	1.77E-08	2.17E-08	—	—

Table4.2.2 コールドトラップのウラン(^{232}U)付着量

	ウラン(^{232}U)付着量 (gU)
H701	7.18E-07
H702	6.97E-07
H703	8.01E-07
H704	5.91E-07

Table4.3.1 コールドトラップのネプツニウム(^{237}Np)付着密度

	ネプツニウム(^{237}Np)付着密度 (mg/cm ²)			
	H701	H702	H703	H704
H70n-1	0.0028	0.0023	0.0017	0.0005
H70n-2	0.0037	0.0025	0.0022	0.0007
H70n-3	0.0029	0.0016	0.0031	0.0011
H70n-4	0.0069	0.0026	0.0019	0.0010
H70n-5	0.0058	0.0025	0.0021	0.0010
H70n-6	0.0057	0.0031	0.0028	0.0011
H70n-7	0.0161	0.0036	0.0019	0.0016
H70n-8	0.0085	0.0034	0.0022	0.0020
H70n-9	0.0074	0.0050	0.0023	0.0022
H70n-10	0.0121	0.0039	—	—
H70n-11	0.0061	0.0031	—	—
H70n-12	0.0052	0.0038	—	—
H70n-13	0.0150	0.0077	—	—
H70n-14	0.0115	0.0061	—	—
H70n-15	0.0124	0.0064	—	—

Table4.3.2 コールドトラップのネプツニウム(^{237}Np)付着量

	ネプツニウム(^{237}Np)付着量(g)
H701	0.317
H702	0.149
H703	0.088
H704	0.048

Table4.4.1 破碎機のウラン($^{235}\text{U} + ^{238}\text{U}$)付着密度

	ウラン($^{235}\text{U} + ^{238}\text{U}$)付着密度(mgU/cm ²)
121-1	121.1
121-2	237.7
121-3	258.5
121-4	35.8
121-5	35.8
121-6	113.6

Table4.4.2 破碎機ウラン($^{235}\text{U} + ^{238}\text{U}$)付着量

	ウラン($^{235}\text{U} + ^{238}\text{U}$)付着量(gU)
破碎機	4836

Table4.5.1 乾燥機のウラン($^{235}\text{U} + ^{238}\text{U}$)付着密度

	ウラン($^{235}\text{U} + ^{238}\text{U}$)付着密度(mgU/cm ²)
130-1	326.9
130-2	328.3
130-3	1644.5
130-4	1317.2
130-5	401.6
130-6	249.1
130-7	67.6
130-8	60.2
130-9	71.9
130-10	118.8
130-11	172.7
130-12	213.9

Table4.5.2 乾燥機ウラン($^{235}\text{U} + ^{238}\text{U}$)付着量

	ウラン($^{235}\text{U} + ^{238}\text{U}$)付着量(gU)
乾燥機	20990

Table4.6 配管のウラン・ネプツニウム付着密度

	ウラン・ネプツニウム付着密度(mgU/cm ²)		
	$^{235}\text{U} + ^{238}\text{U}$	^{232}U	^{237}Np
シリンド処理室-配管	3.0	1.753E-09	—
H701-配管	29.8	1.058E-08	1.828E-04
UF ₆ 充填室-配管	13.3	3.044E-09	1.997E-04

Table8.1 機器ごとのウラン・ネプツニウム付着量

部屋名称	機器名称	機器付着量(gU)		
		$^{235}\text{U}+^{238}\text{U}$	^{232}U	^{237}Np
シリンダ処理室	配管(サンプル配管)	—	—	—
コールドトラップ室	1次コールドトラップ(H701)	980	7.18E-07	0.317
	1次コールドトラップ(H702)	910	6.97E-07	0.149
	2次コールドトラップ(H703)	748	8.01E-07	0.0876
	2次コールドトラップ(H704)	523	5.91E-07	0.0481
	配管(H701 ガス入口配管)	—	—	—
UF ₆ 充填室	配管(COTよりの液配管)	—	—	—
四フッ化ウラン処理室	破碎機(X-S121)	4836	—	—
	乾燥機(X-S130)	20990	—	—

Table8.2 機器ごとのウラン・ネプツニウム付着密度

部屋名称	機器名称	機器付着密度(mgU/cm ²)		
		$^{235}\text{U}+^{238}\text{U}$	^{232}U	^{237}Np
シリンダ処理室	配管(サンプル配管)	3.0	1.753E-09	—
コールドトラップ室	1次コールドトラップ(H701)	3.0～143.8	8.0E-09～ 6.7E-08	2.8E-03～ 1.6E-02
	1次コールドトラップ(H702)	4.9～114.7	8.1E-09～ 5.0E-08	1.6E-03～ 7.7E-03
	2次コールドトラップ(H703)	2.9～49.5	7.0E-09～ 4.5E-08	1.7E-03～ 3.1E-03
	2次コールドトラップ(H704)	2.5～36.3	6.2E-09～ 3.2E-08	4.6E-04～ 2.2E-03
	配管(H701 ガス入口配管)	29.8	1.058E-08	1.828E-04
UF ₆ 充填室	配管(COTよりの液配管)	13.3	3.044E-09	1.997E-04
四フッ化ウラン処理室	破碎機(X-S121)	35.8～258.5	—	—
	乾燥機(X-S130)	60.2～1644.5	—	—

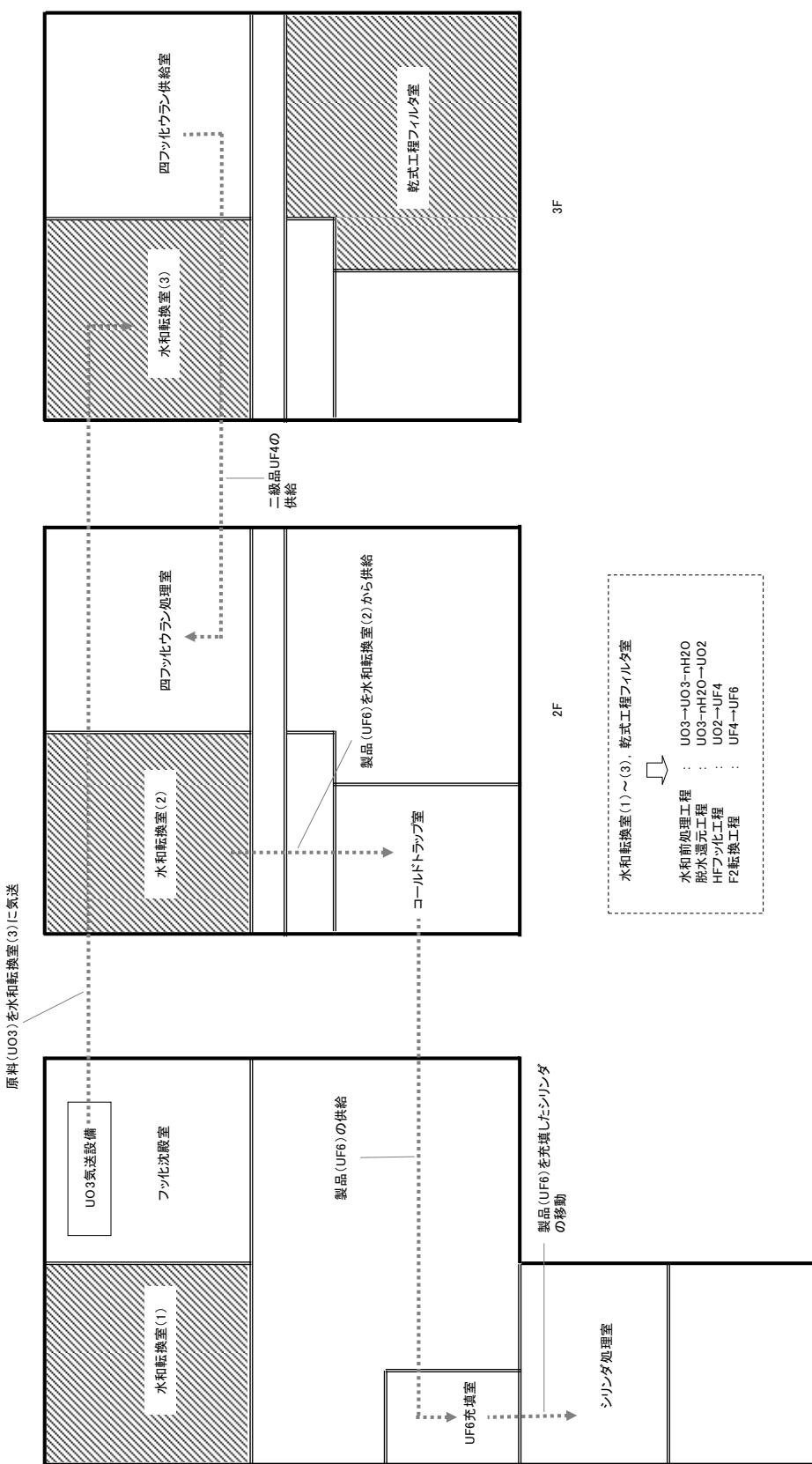


Fig1.1 角体施設設置配置

1F

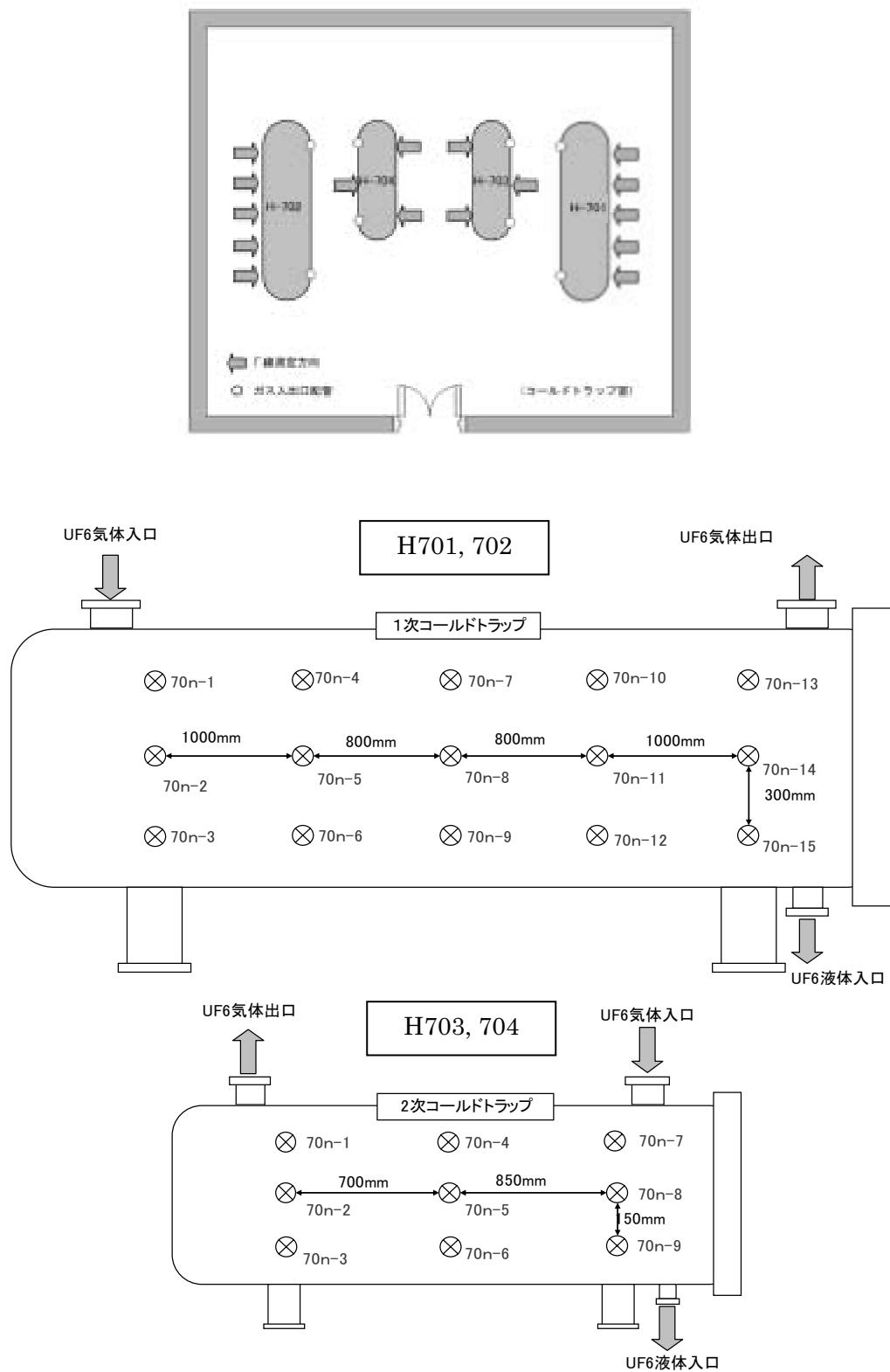


Fig2.1 コールドトラップ配置図と測定ポイント

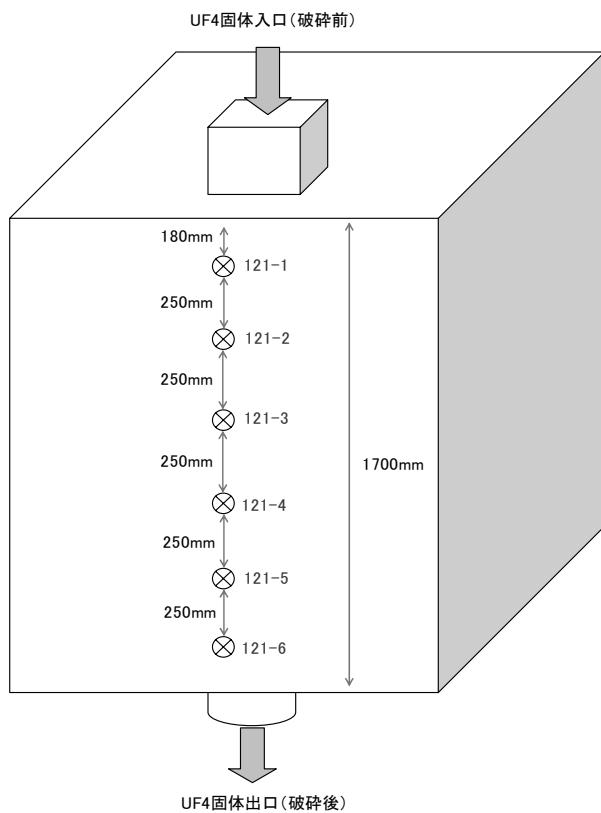


Fig2.2 破碎機測定ポイント

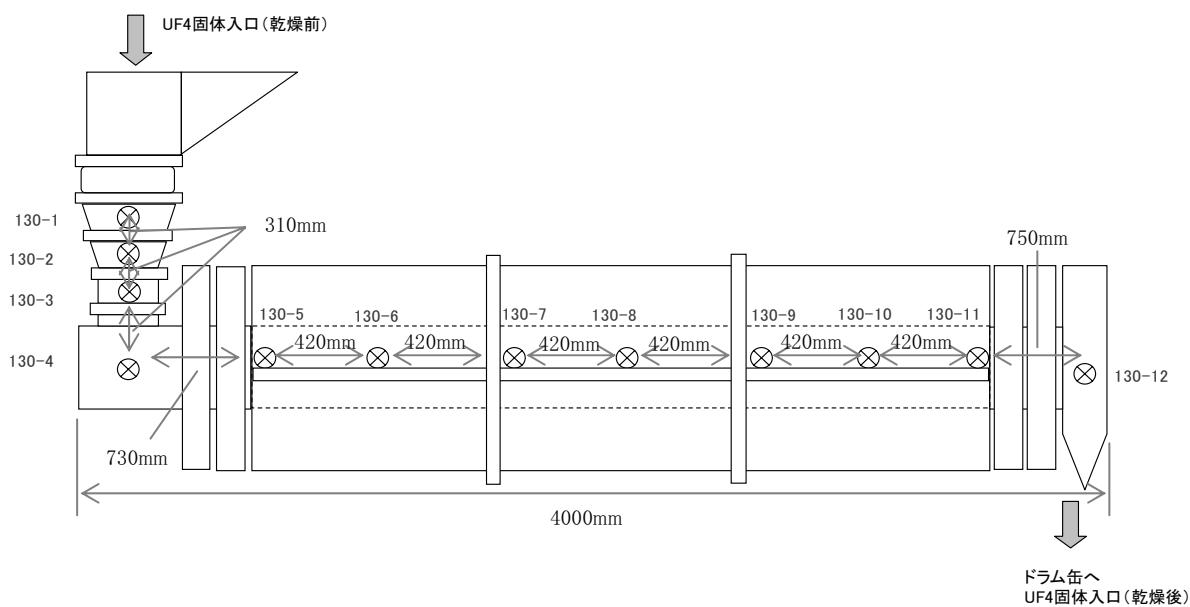
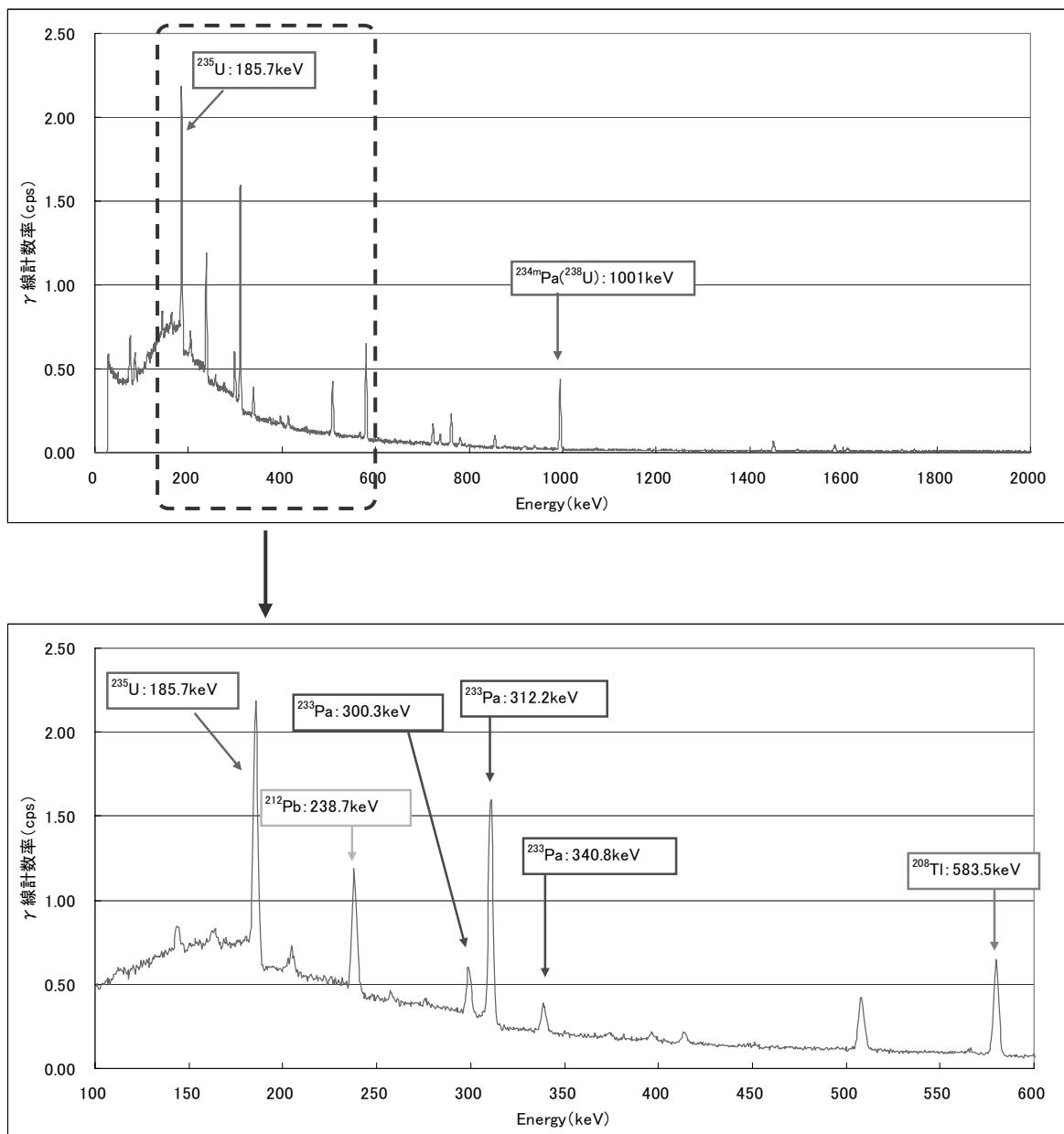


Fig2.3 乾燥機測定ポイント

Fig2.4 コールドトラップ γ 線スペクトル(測定ポイント 701-1)

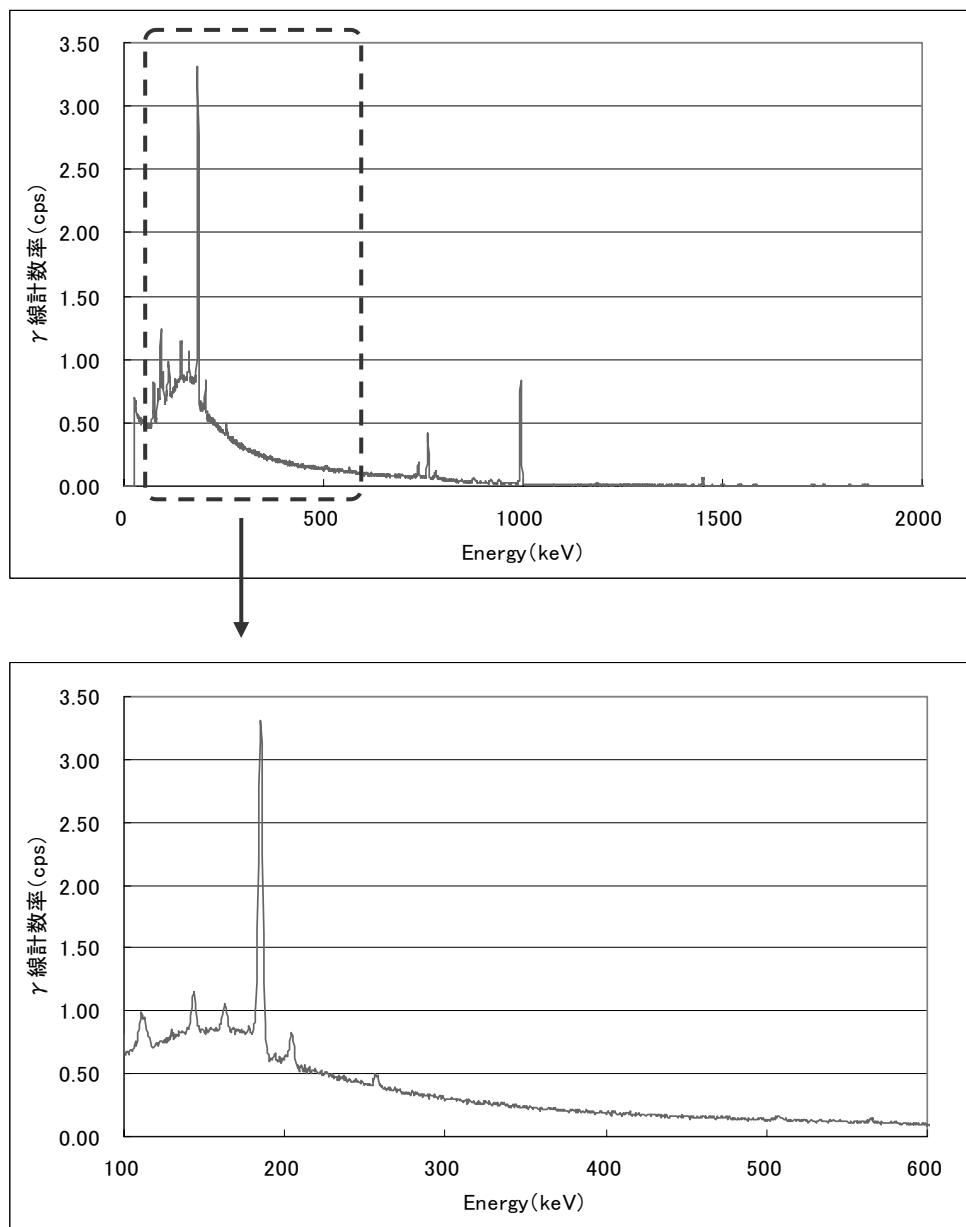


Fig2.5 破碎機 γ 線スペクトル(測定ポイント 121-1)

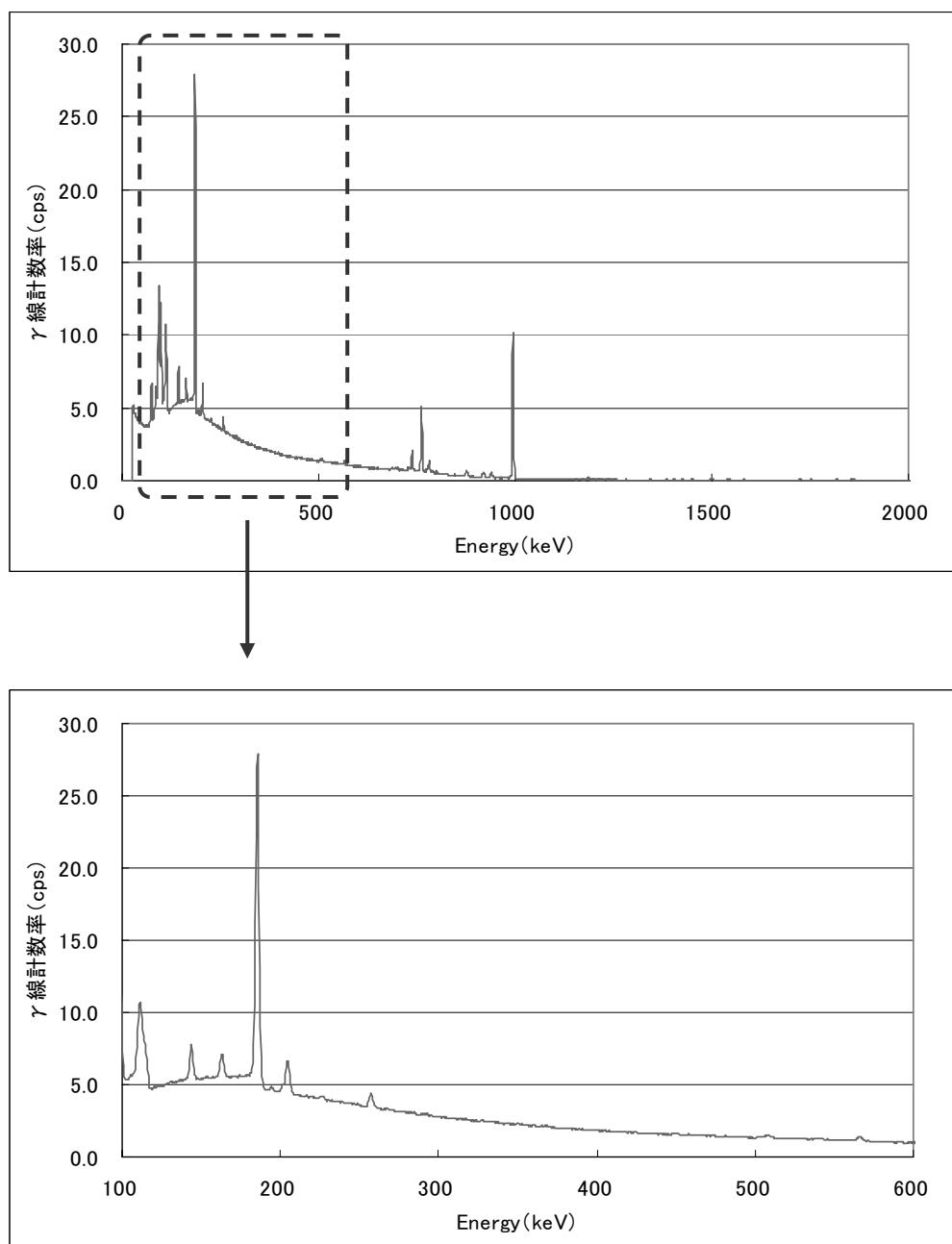


Fig2.6 乾燥機 γ 線スペクトル(測定ポイント 130-1)

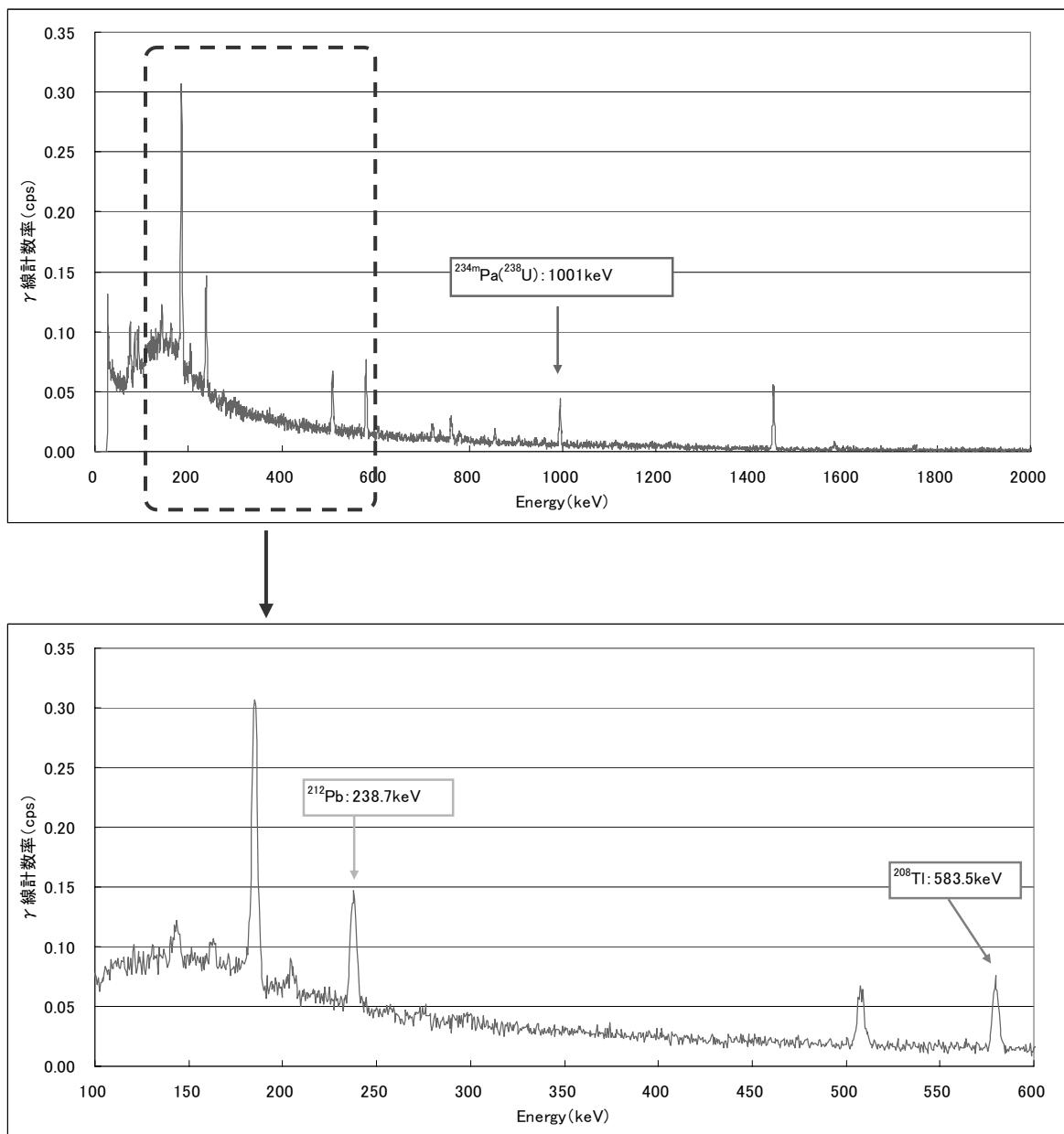


Fig2.7 シリンダ処理室配管 γ 線スペクトル

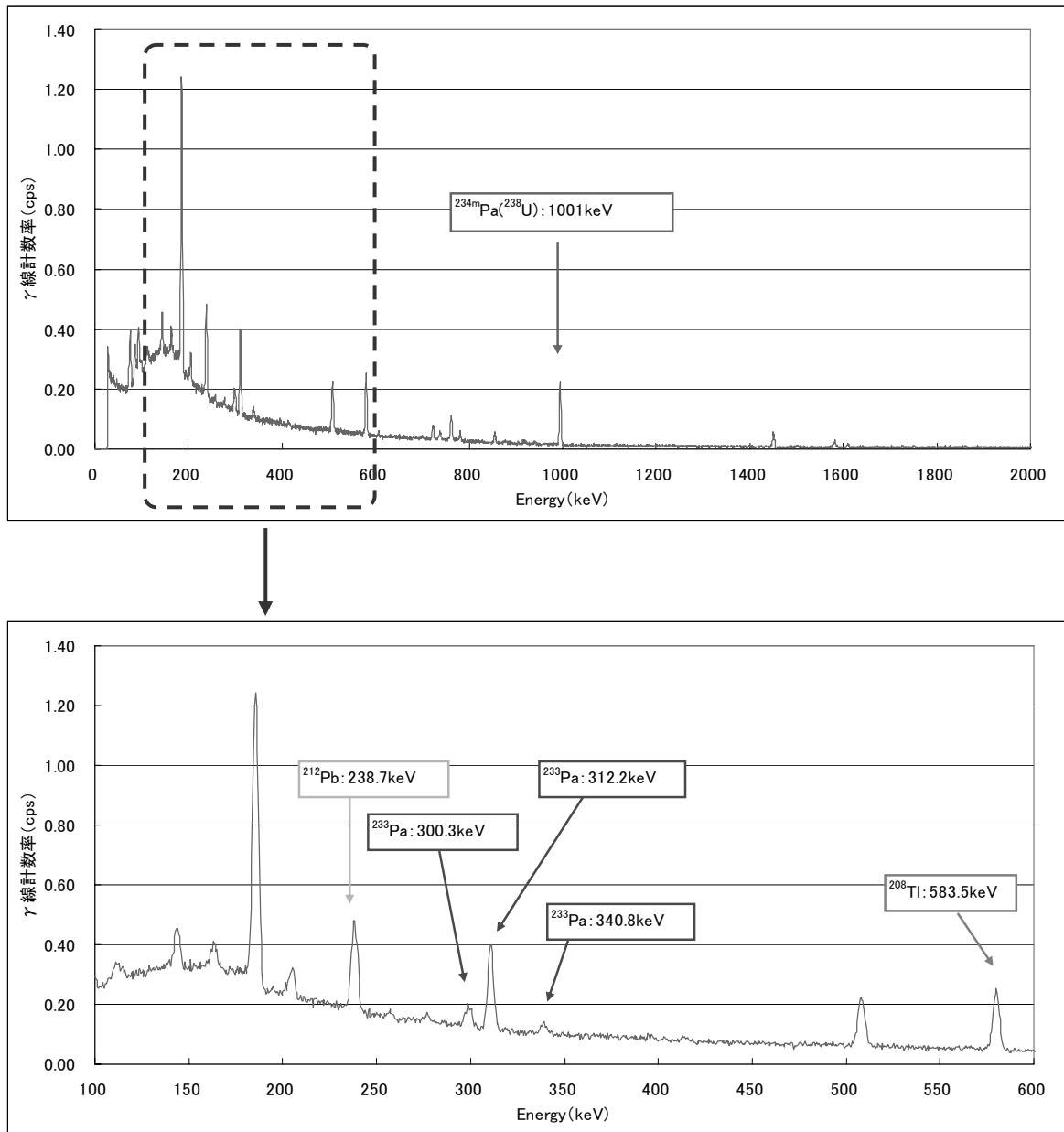


Fig2.8 コールドトラップ配管 γ 線スペクトル(測定ポイント 701-配管)

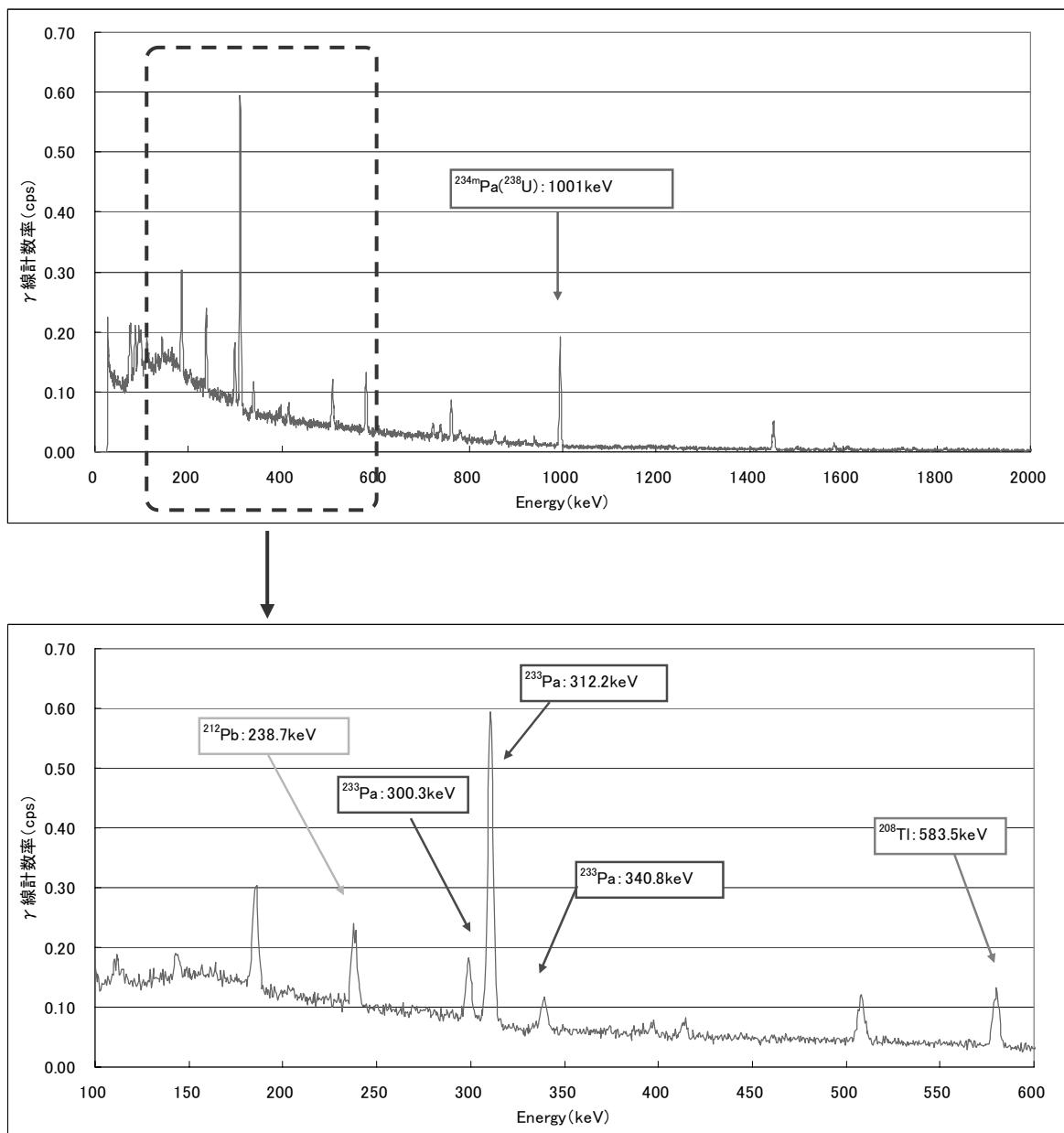


Fig2.9 UF_6 充填室配管 γ 線スペクトル

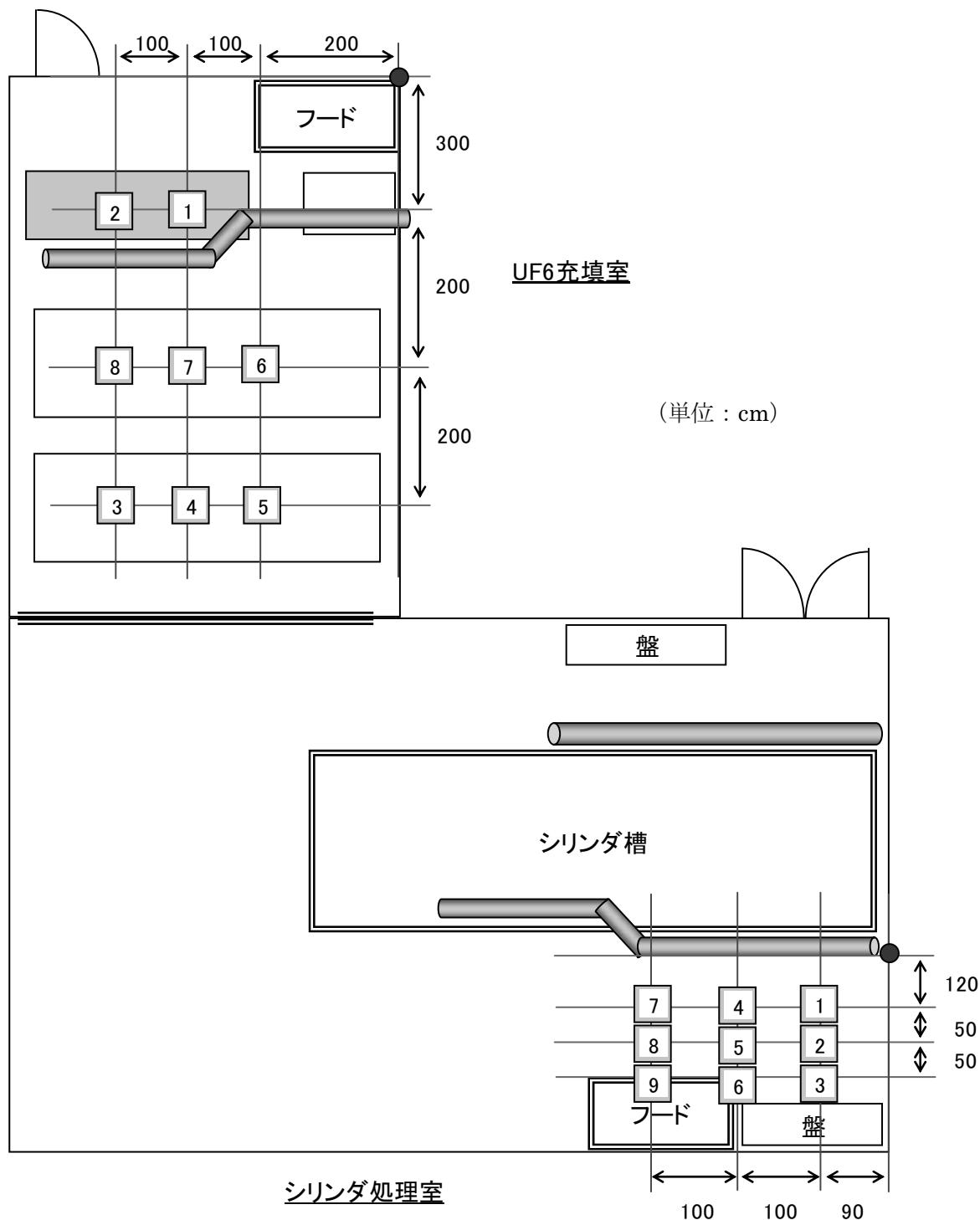


Fig2.10 シリンダ処理室・UF₆充填室測定ポイント

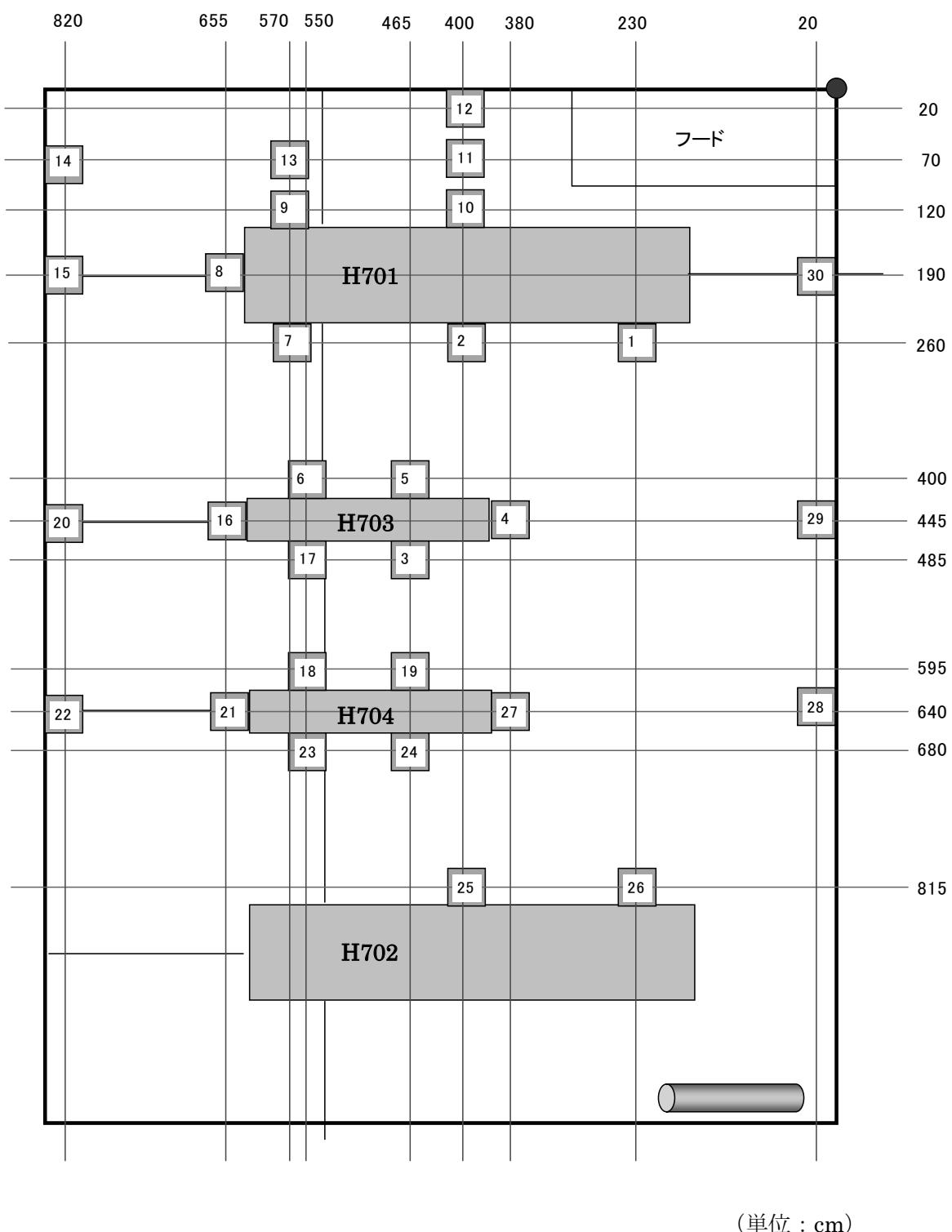


Fig.2.11 コールドトラップ室測定ポイント

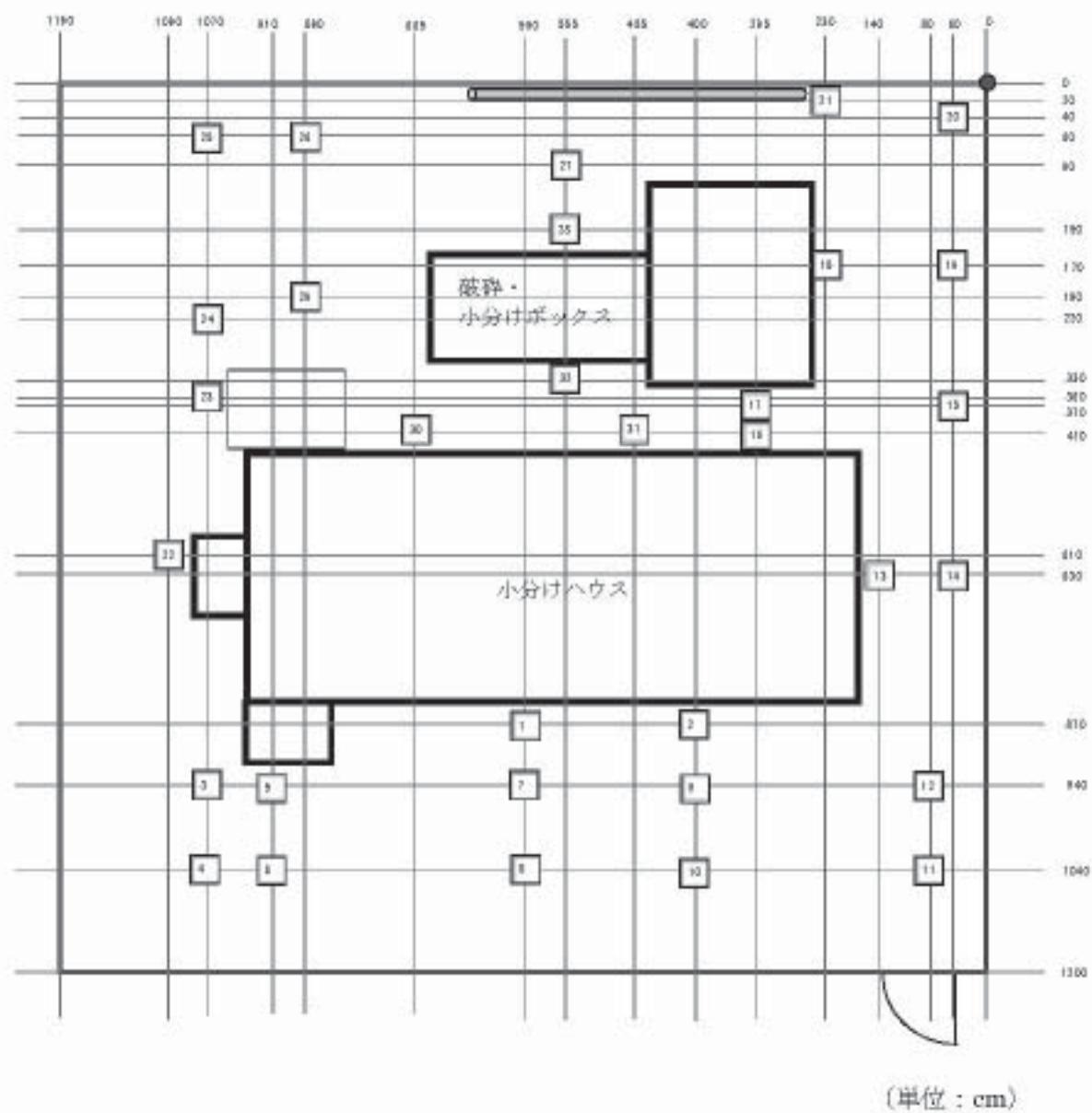


Fig2.12 四フッ化ウラン供給室測定ポイント

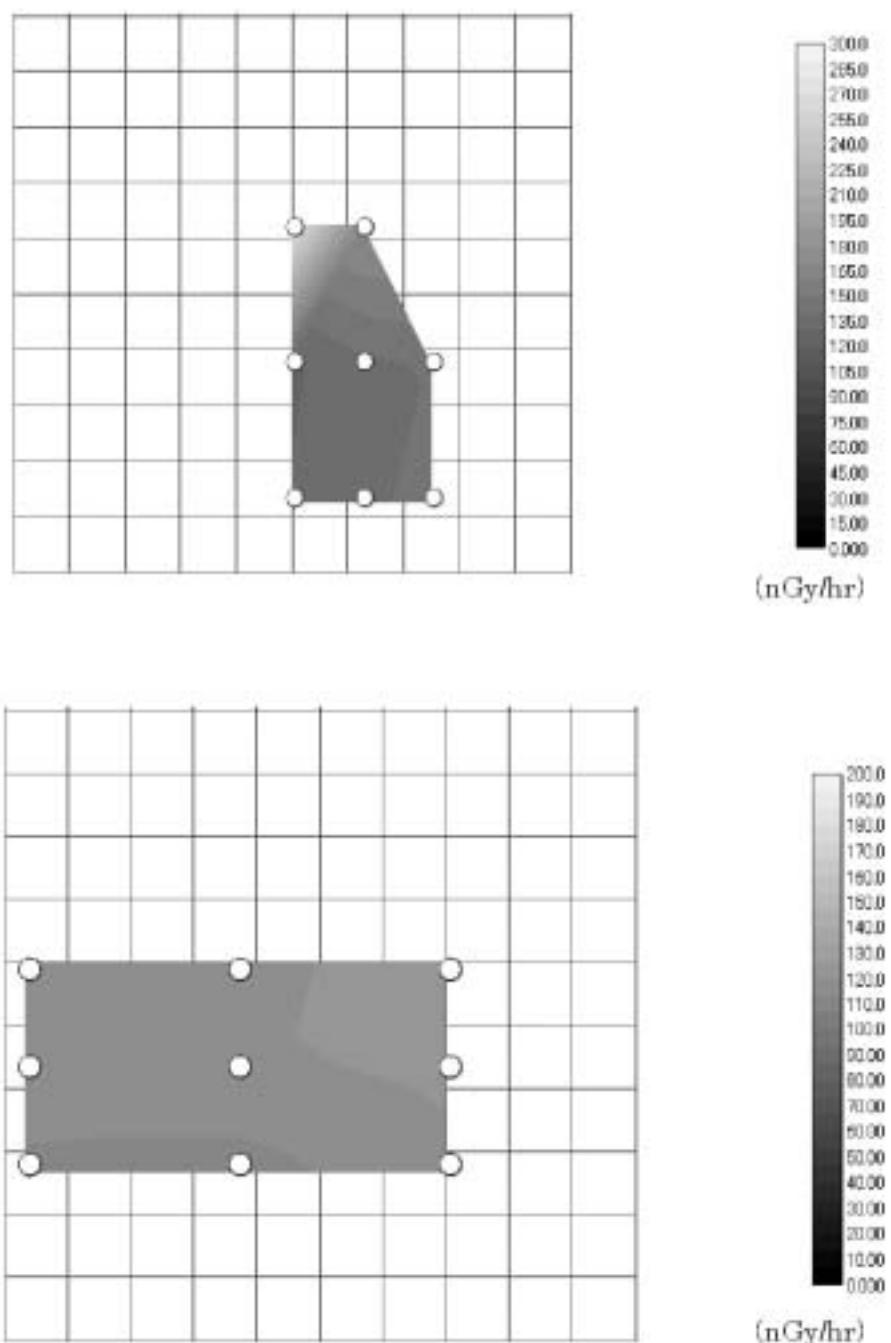


Fig2.13 シリンダ処理室・UF₆充填室空間線量

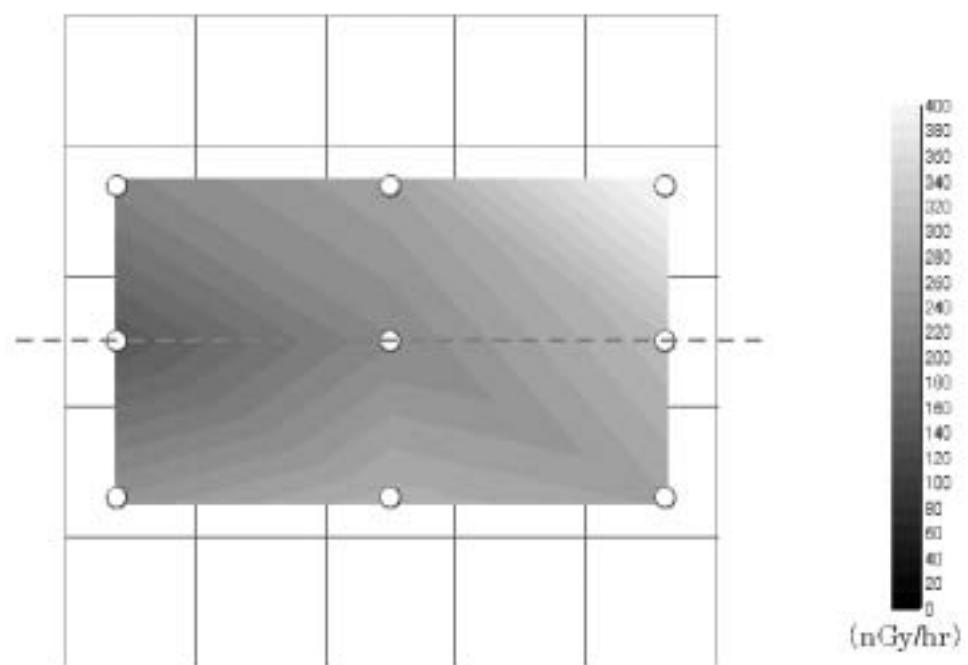
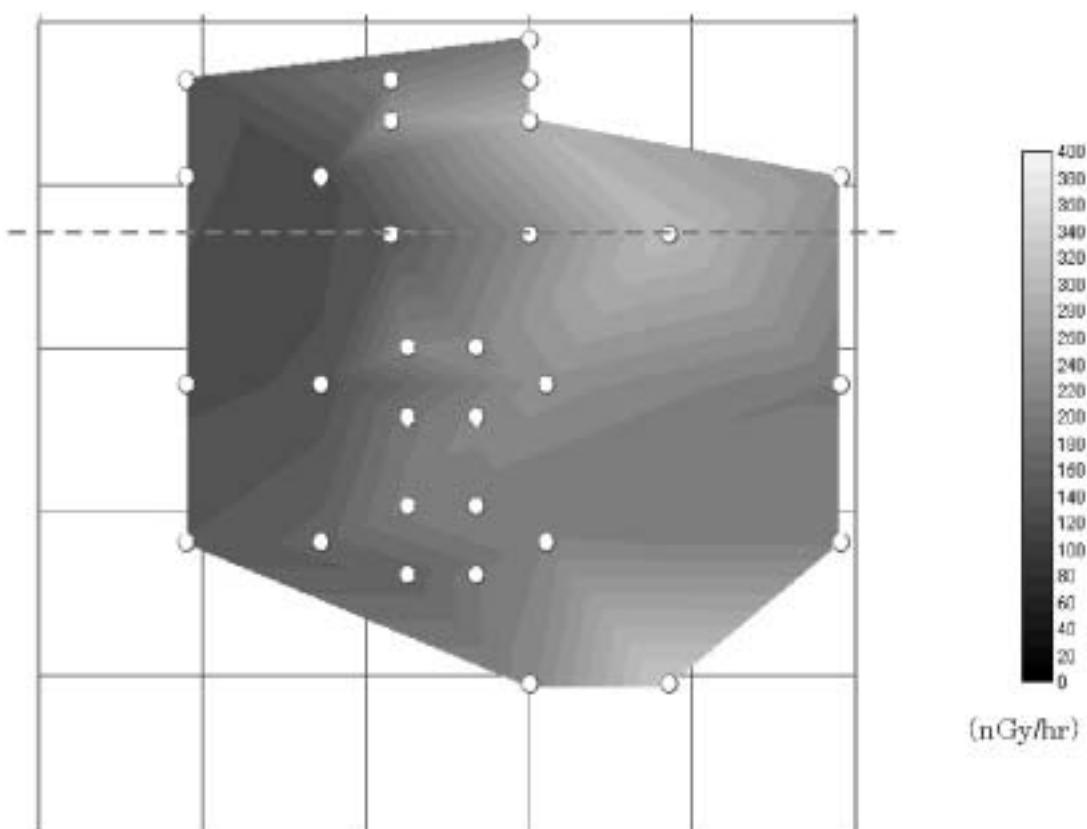


Fig2.14 コールドトラップ室空間線量

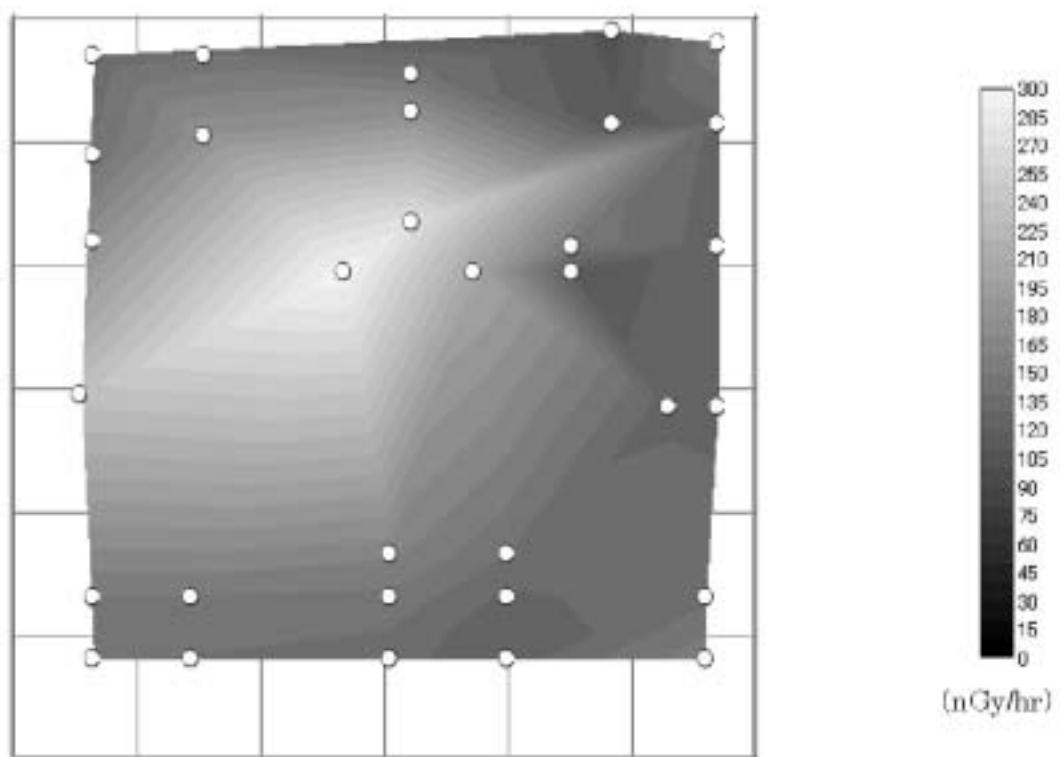


Fig2.15 四フッ化ウラン供給室空間線量

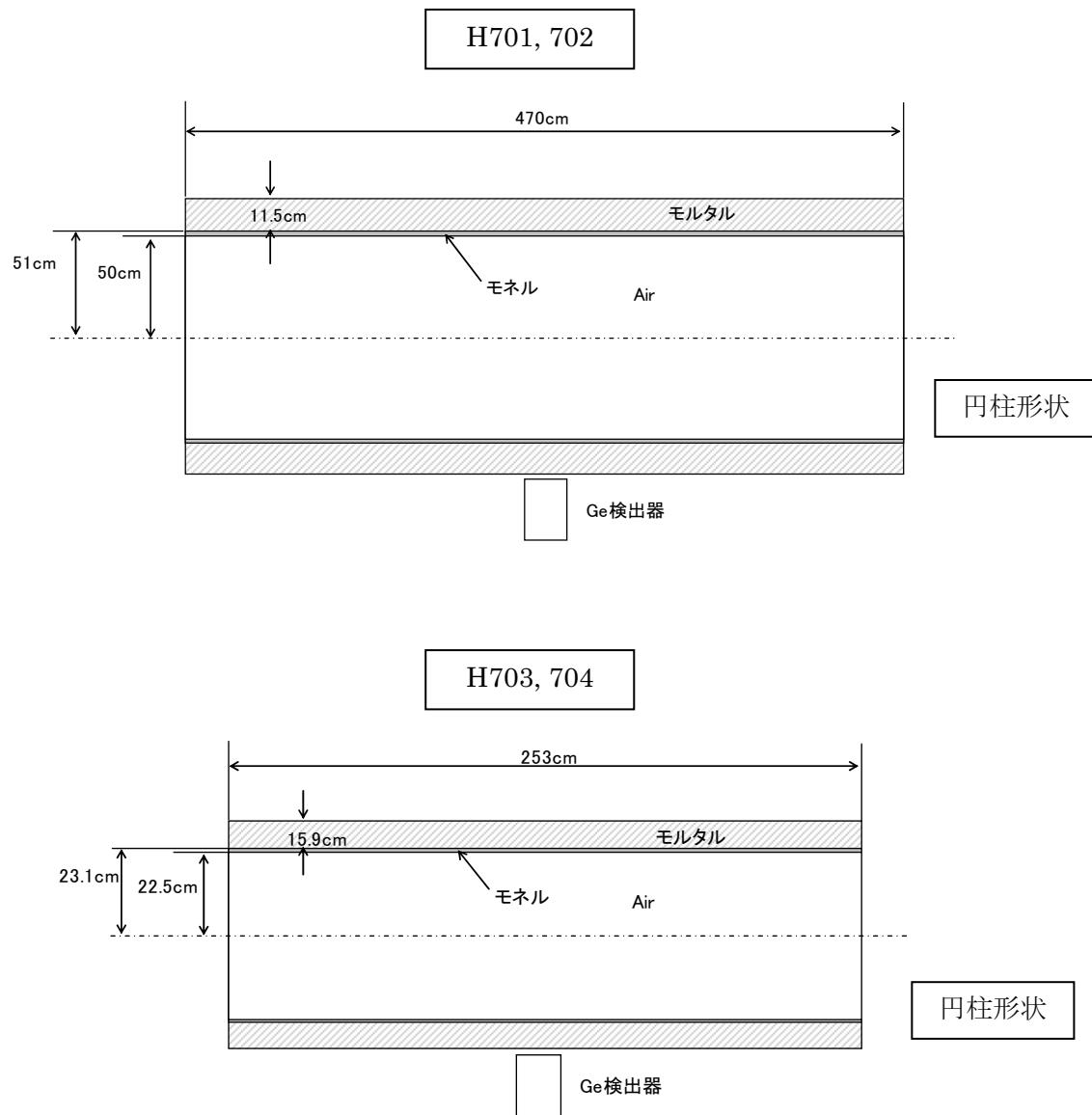


Fig 4.1 コールドトラップウラン付着量計算モデル

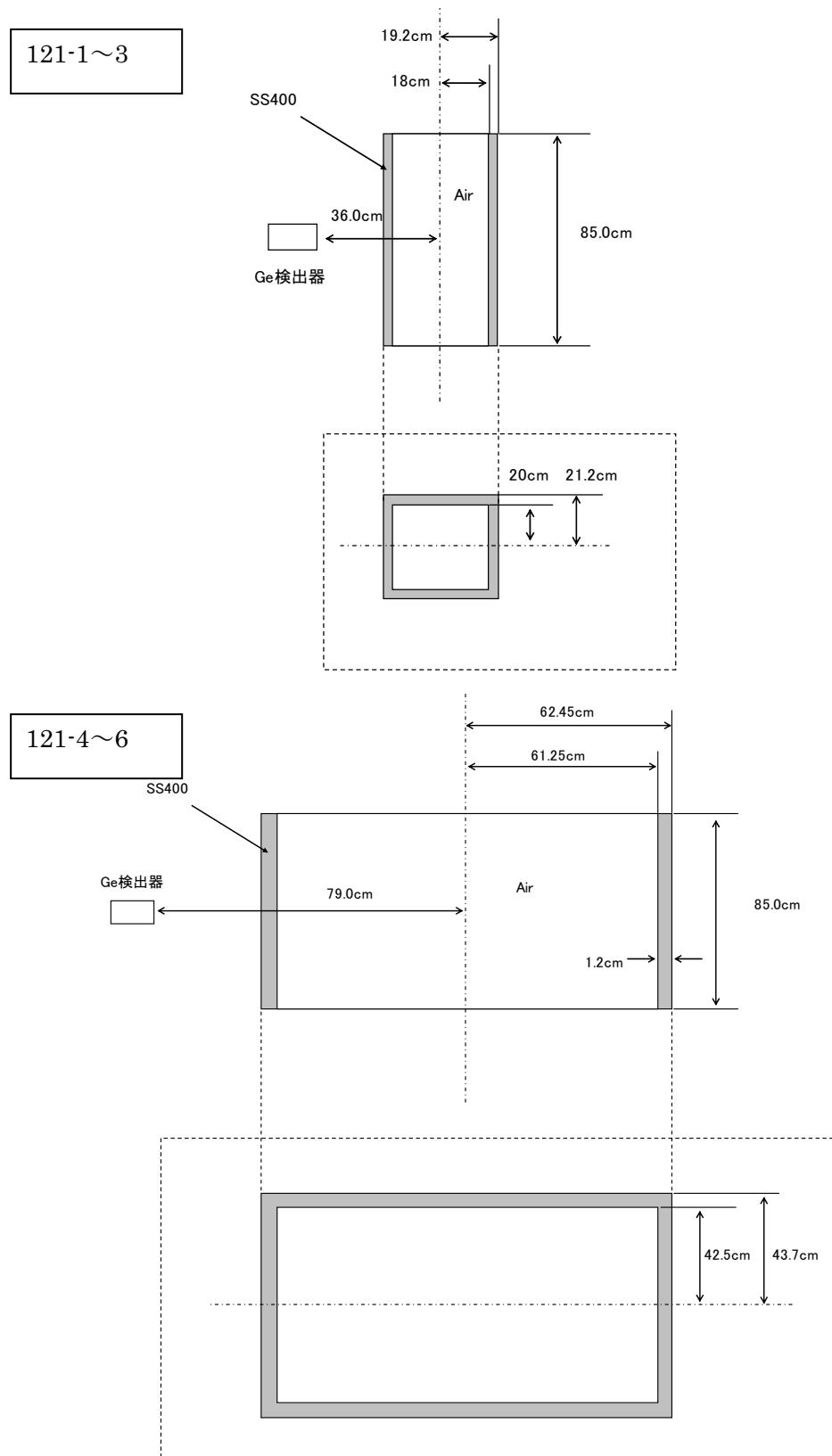


Fig 4.2 破碎機ウラン付着量計算モデル

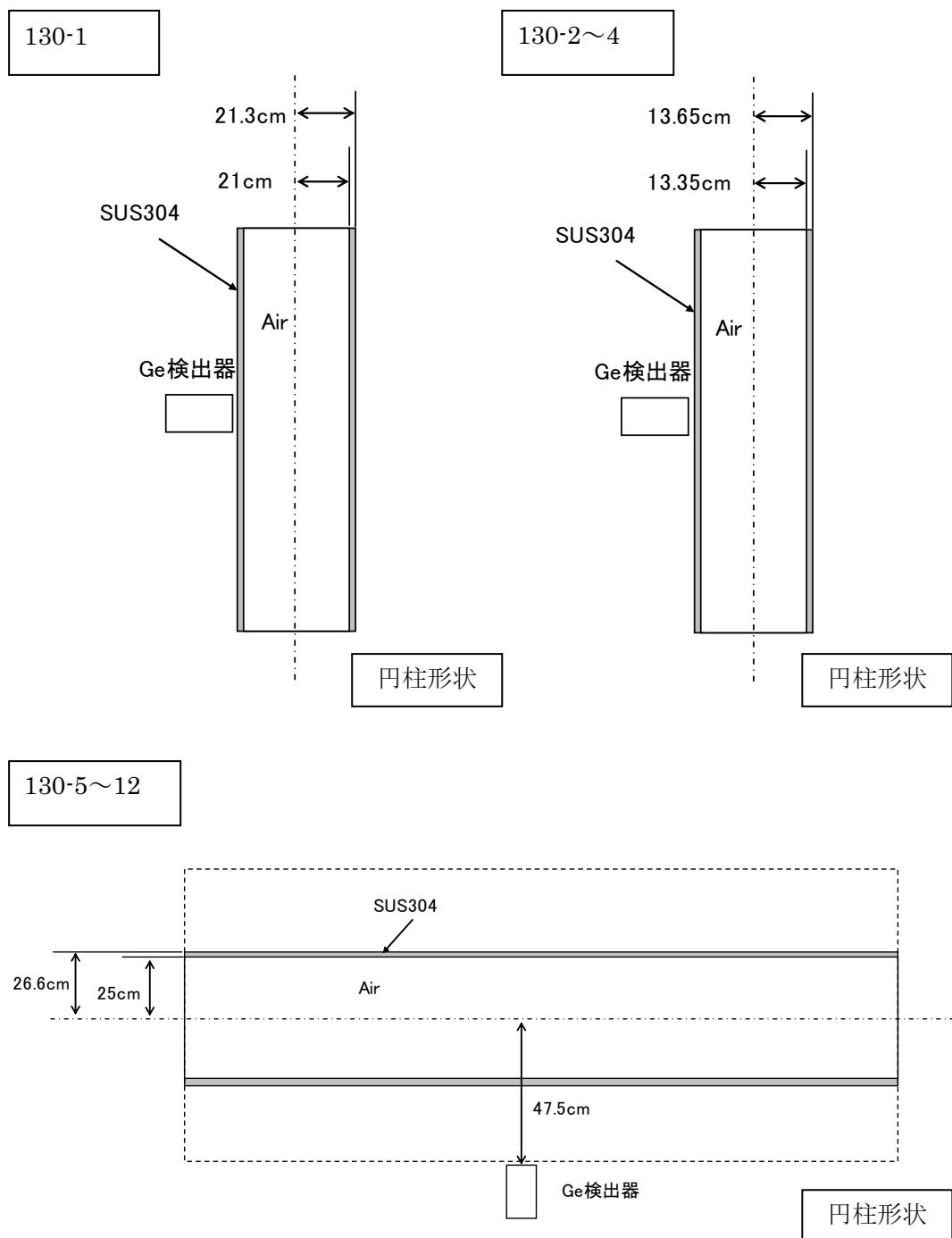


Fig 4.3 乾燥機ウラン付着量計算モデル

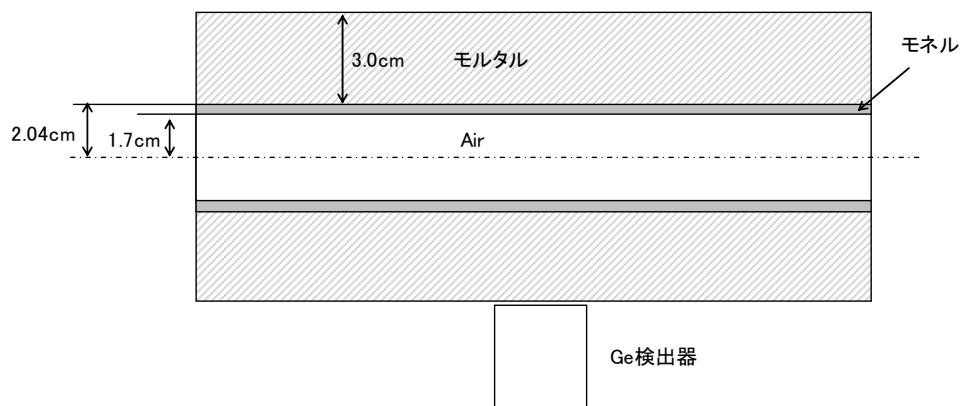


Fig 4.4 配管ウラン付着量計算モデル

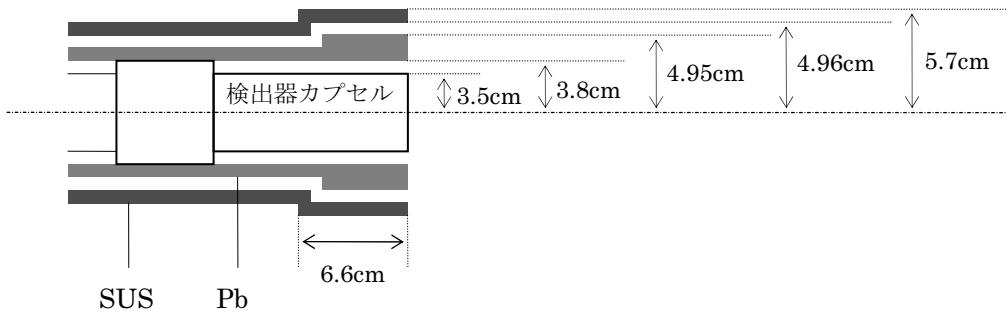
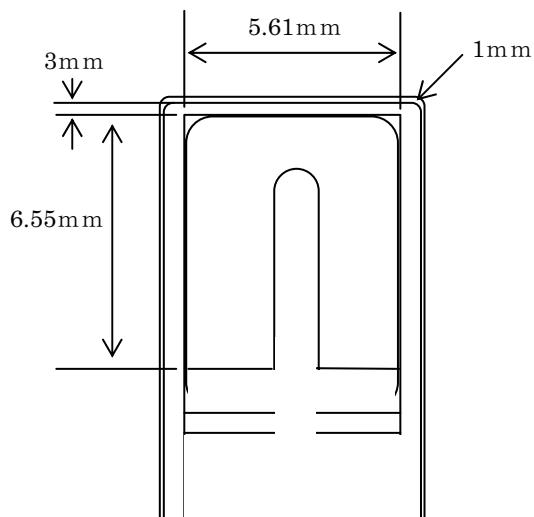


Fig 4.5 Ge 検出器形状データ

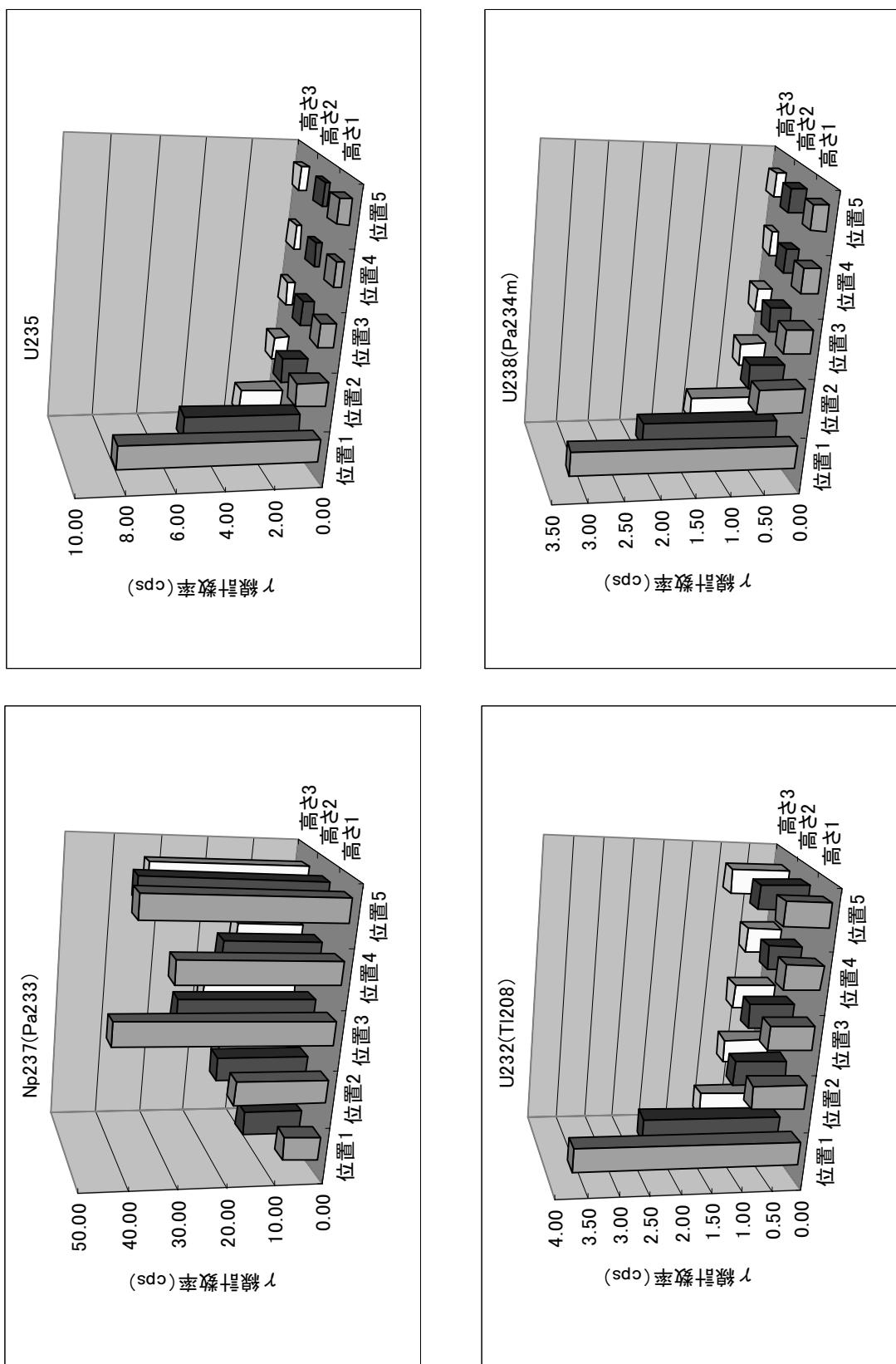


Fig5.1.1 コールドトラップ γ 線計数率(H701)

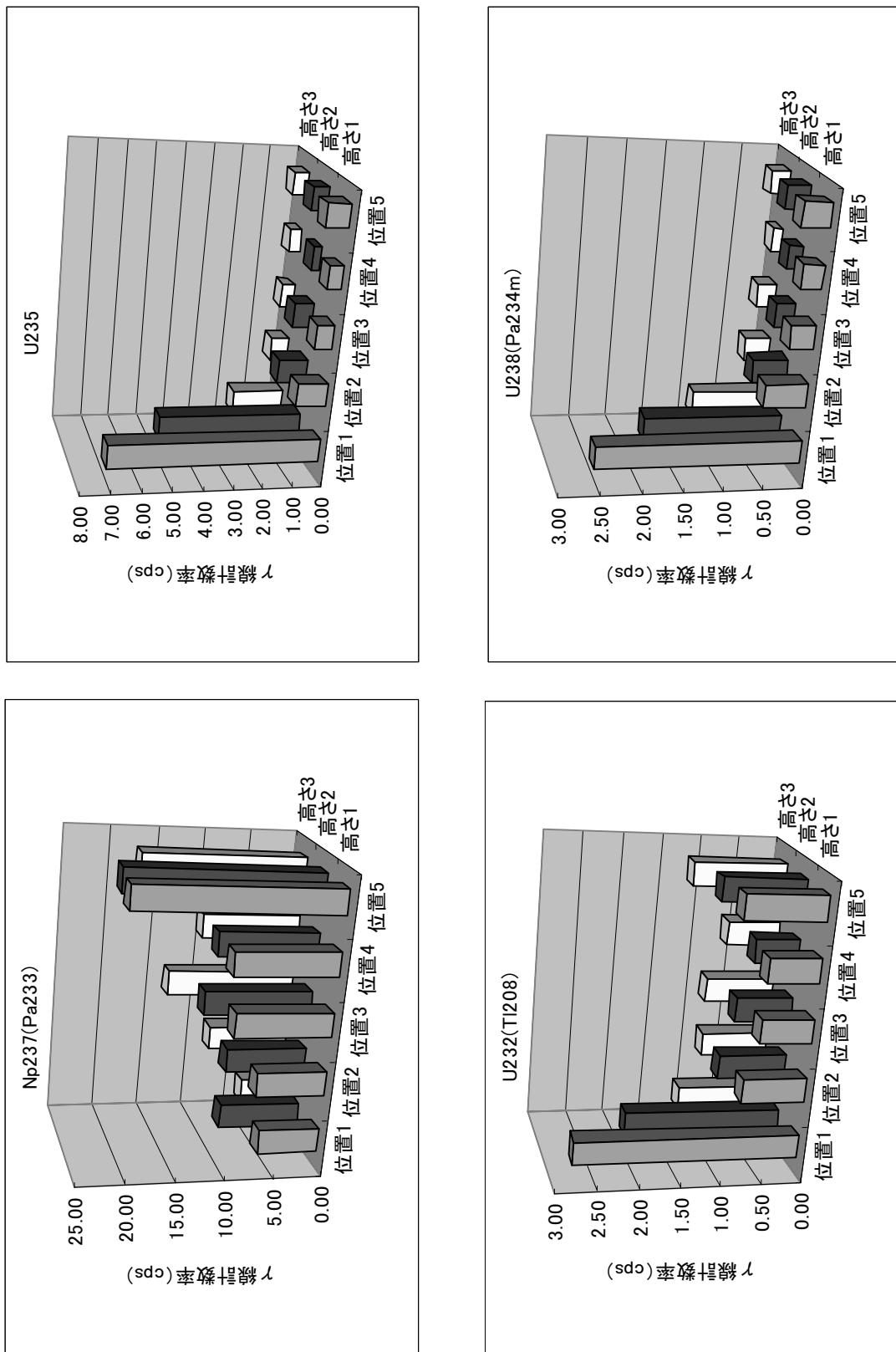


Fig5.1.2 コーランドラップ γ 線計数率(H702)

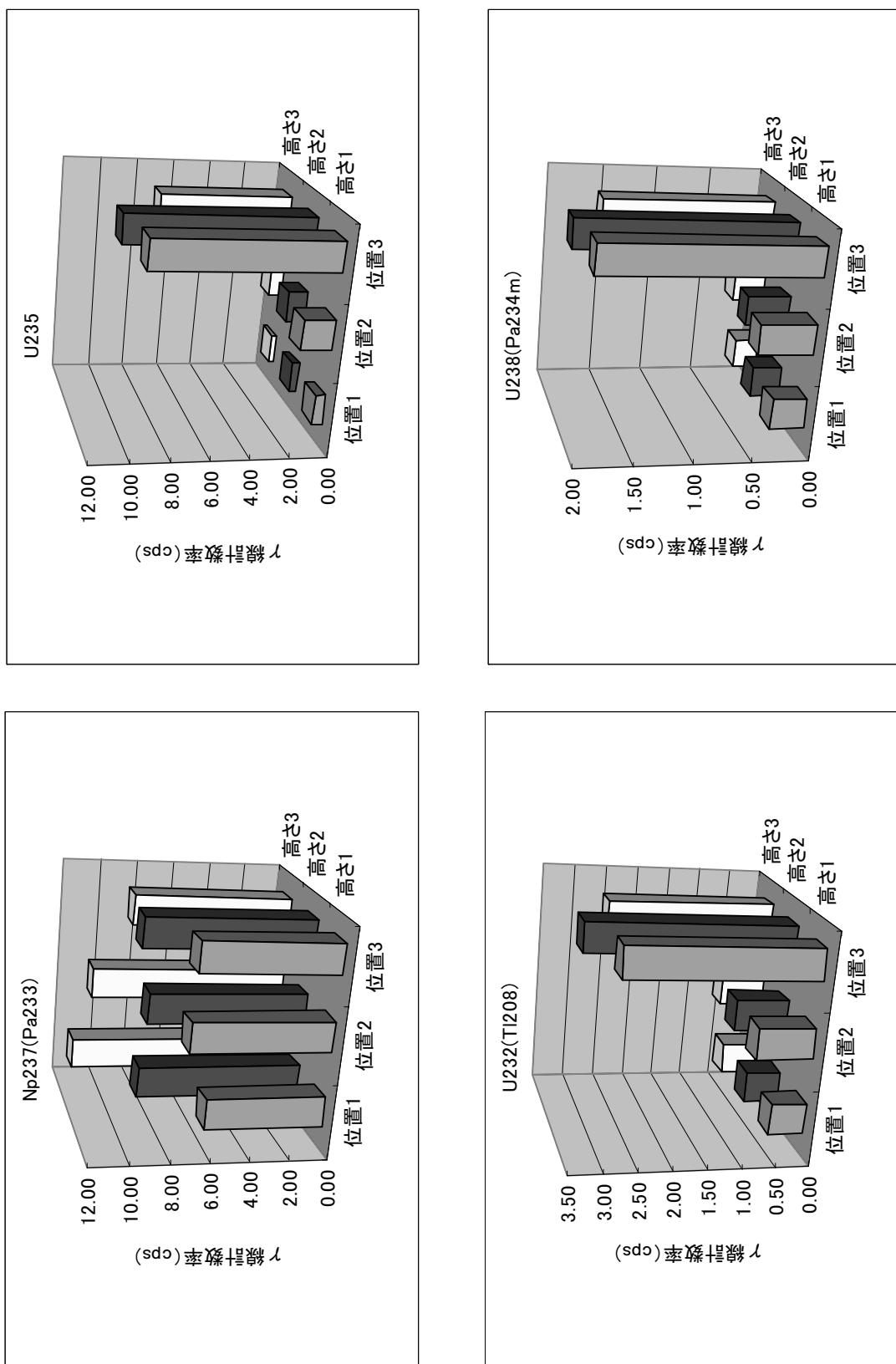


Fig5.1.3 コールドトラップ γ 線計数率 (H703)

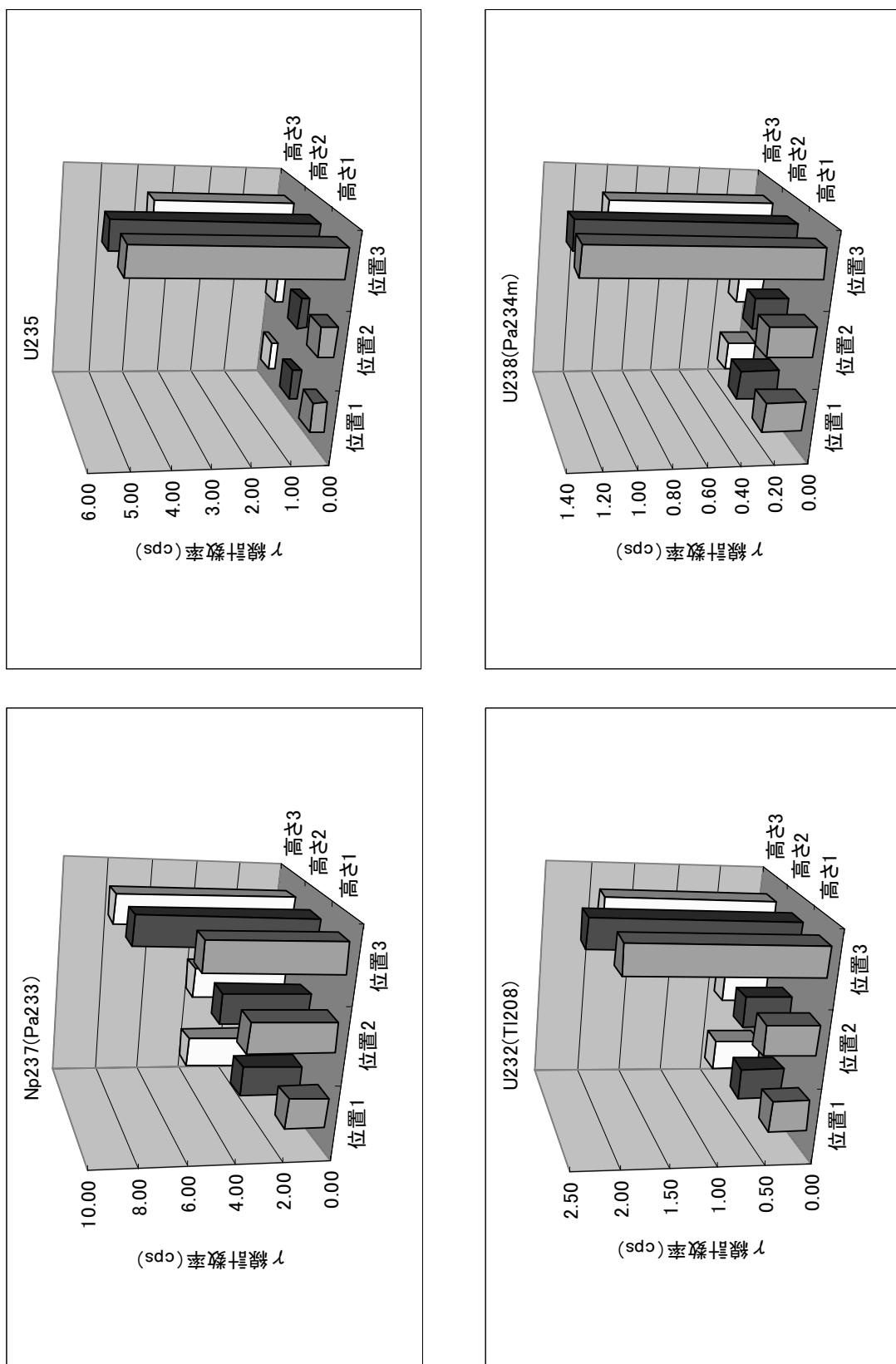


Fig5.1.4 コールドトラップ γ 線計数率(H704)

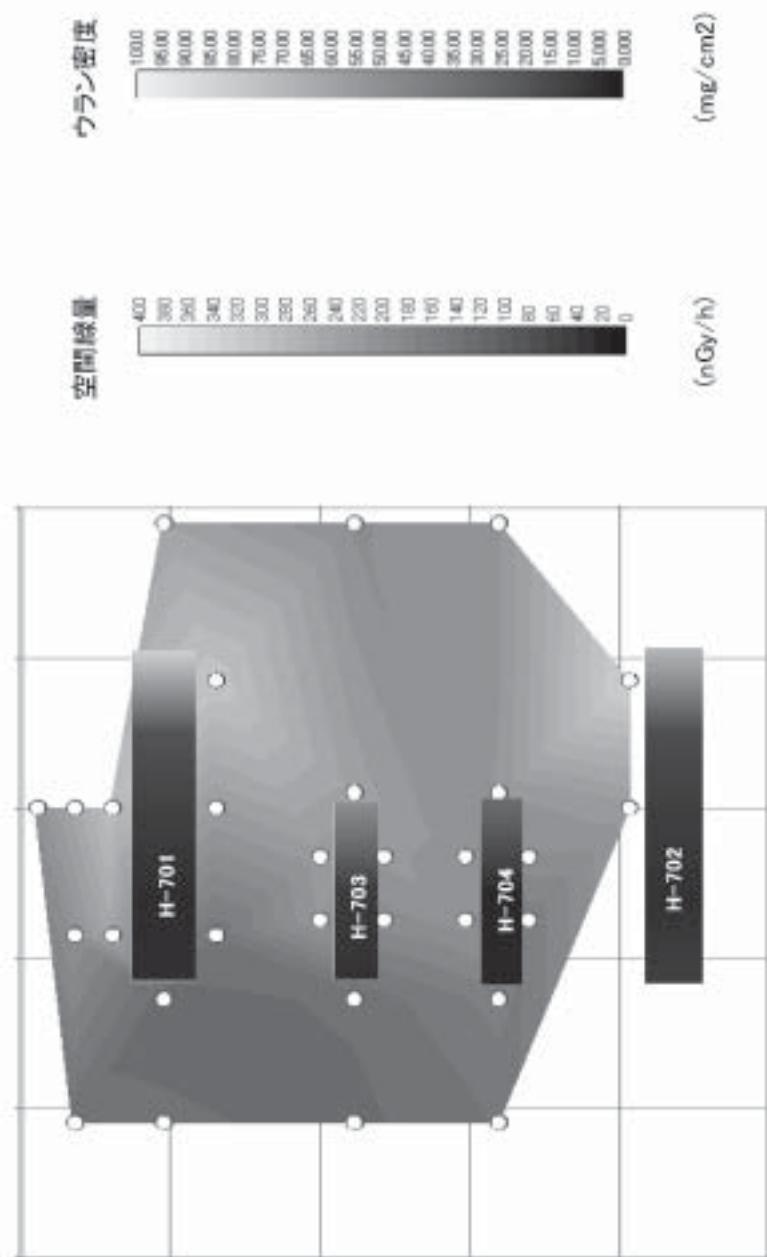
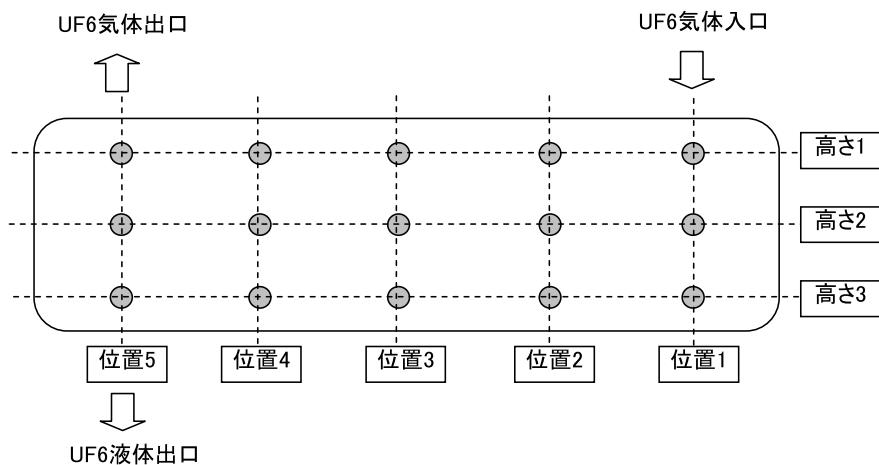
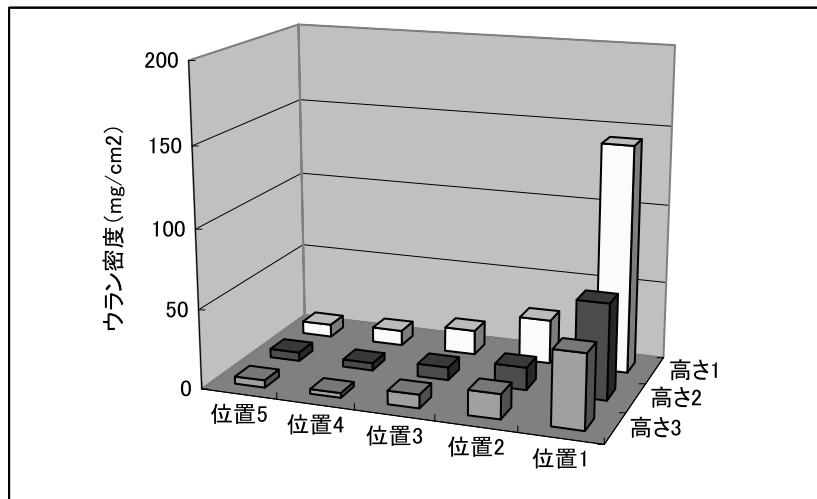


Fig5.2.1 コールドトラップ空間線量分布とウラン同位体分布(平面)



1次コールドトラップのインベントリー



1次コールドトラップの空間線量

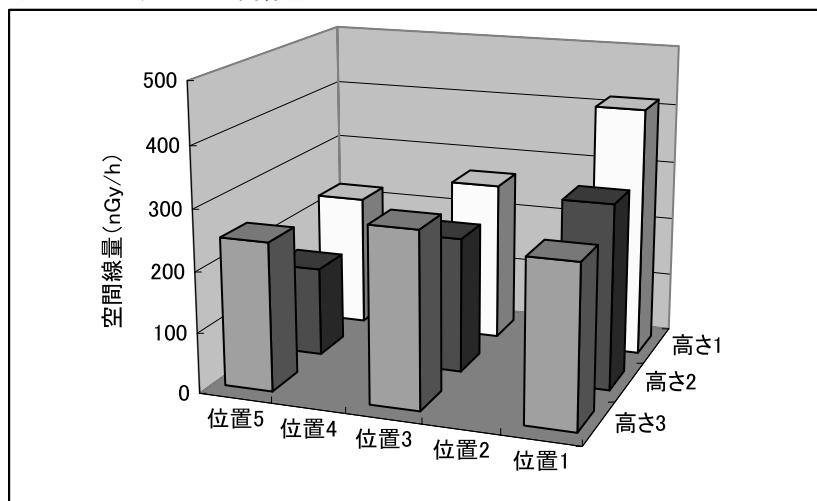
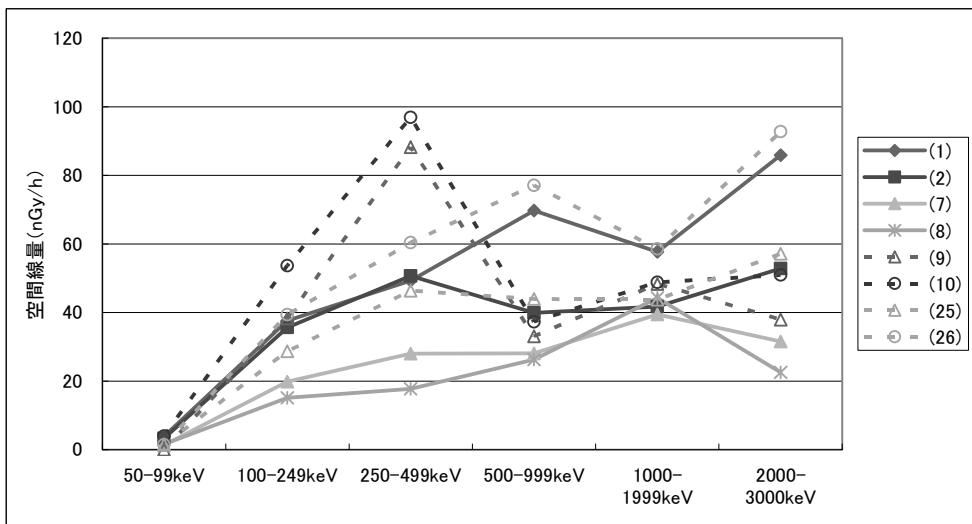
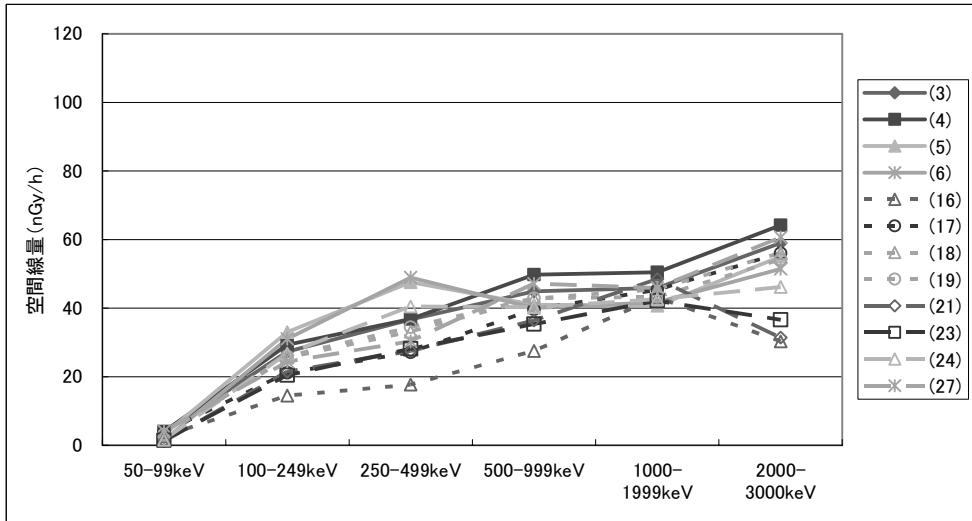


Fig5.2.2 コールドトラップ空間線量分布とウラン同位体分布(高さ)

1次コールドトラップ近接



2次コールドトラップ近接



作業空間

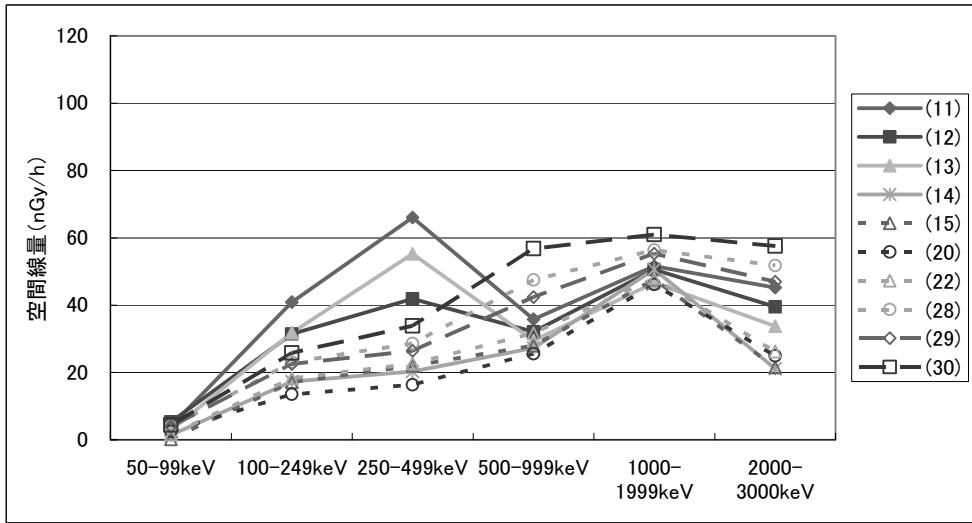


Fig7.1 エネルギー範囲ごとの空間線量分布(コールドトラップ室)

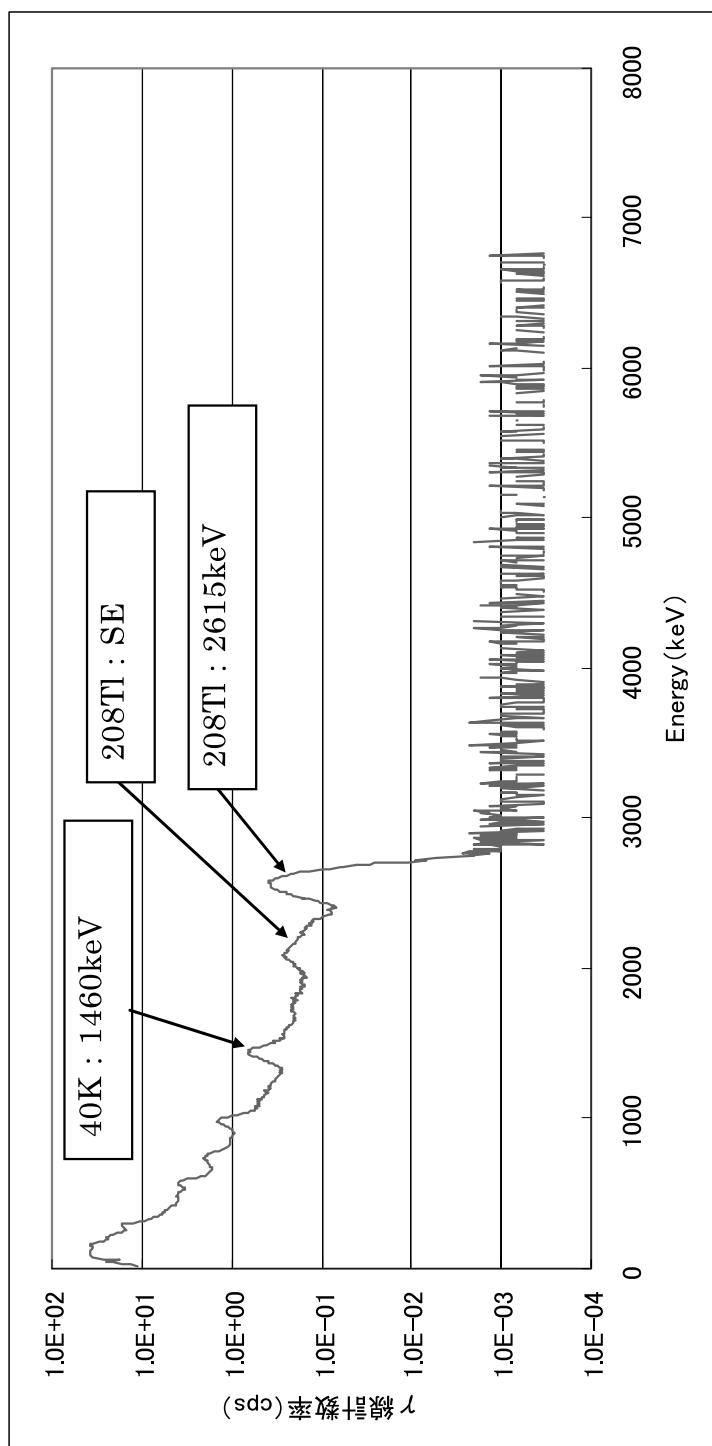


Fig7.2 ユールドトラップ γ 線スペクトル(測定ボイント:1)

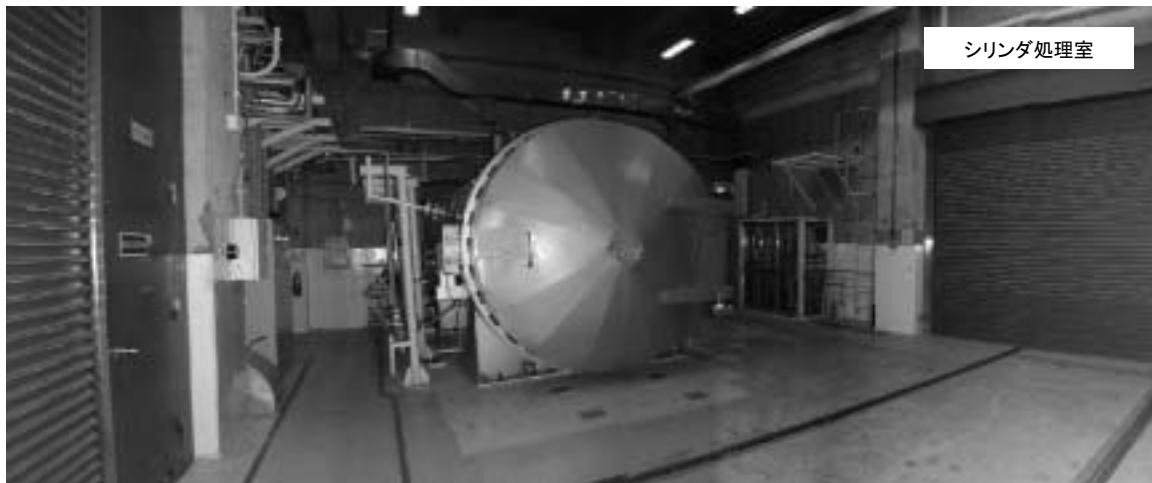


Photo1.1 解体対象設備

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位	
基本量	SI 基本単位
名称	記号
長さ	メートル
質量	キログラム
時間	秒
電流	アンペア
熱力学温度	ケルビン
物質量	モル
光度	カンデラ

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	メートル	m ⁻¹
密度、質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a)	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の) 1	1
比透磁率 ^(b)	(数字の) 1	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) とも呼ばれる。

(b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ²
仕事を、工率、放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷、電気量	クーロン	C		s A
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラード	F	C/V	m ² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	m ² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束密度	ウエーブ	Wb	Vs	kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリリー	H	Wb/A	m ² kg s ² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C	K	
光束度	ルーメン	lm	cd sr ^(f)	cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
吸収線量、比エネルギー分率、カーマ	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
線量当量、周辺線量当量、方向性線量当量、個人線量当量	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。

(b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。

(c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。

(d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。

(e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す數値はどちらの単位で表しても同じである。

(f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で "radioactivity" と記される。

(g) 単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表面張力	ニュートン每メートル	N/m	kg s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱流密度、放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
熱容量、エンタルピー	ジュール每ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比熱容量、比エンタルピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
熱伝導率	ワット每メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール每立方メートル	J/m ³	m ¹ kg s ²
電界の強さ	ボルト每メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	クーロン每立方メートル	C/m ³	m ⁻³ sA
電面密度、電気変位	クーロン每平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
誘電率	フーリエラード每メートル	F/m	m ⁻² sA
透磁率	ヘンリー每メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール每モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
モルエントロピー、モル熱容量	ジュール每モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
照射線量(X線及びγ線)	クーロン每キログラム	C/kg	kg ⁻¹ sA
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射強度	ワット每ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
放射輝度	ワット每平方メートル每ステラジアン	W/(m ² sr)	m ³ m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
醇素活性濃度	カタール每立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ⁻²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼット	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L	1L=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で表される数値

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm ²) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパー	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルリ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	fm	1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット	Torr	1メートル系カラット=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1 cal=4.1858J (15°Cカロリー), 4.1868J ((IT)カロリー)
ミクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

