

JAERI-Research
2003-006

JP0350079



高温ヘリウム漏えい箇所特定システムの開発(共同研究)
第3報 放射線センサの開発

2003年3月

坂場 成昭・中澤 利雄・川崎 幸三・浦上 正雄*・最首 貞典*

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

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2003

編集兼発行 日本原子力研究所

高温ヘリウム漏えい箇所特定システムの開発(共同研究)
第3報 放射線センサの開発

日本原子力研究所大洗研究所高温工学試験研究炉開発部
坂場 成昭・中澤 利雄・川崎 幸三・浦上 正雄^{*}・最首 貞典^{*}

(2003年1月31日受理)

高温ヘリウム漏えい箇所特定システムの開発の最終段階として、小規模漏えい検知のための放射線センサを開発した。本研究では、漏えいしたヘリウムガス中に含まれるFPから漏えいを検知する方法に加え、微小な漏えいを検知するため、空気とヘリウムガスの放射線の阻止能差により漏えいを検出する新しい検出法(アクティブ検出法)を開発した。開発したアクティブ検出法では、微小漏えいとして想定した漏えい量 $0.2\text{cm}^3/\text{s}$ を、最短10分で検出可能であることが明らかとなった。

本研究は日本原子力研究所と日本原子力発電株式会社との共同研究に基づいて実施したものである。

大洗研究所：〒311-1394 茨城県東茨城郡大洗町成田町新堀 3607

^{*}日本原子力発電株式会社

**Research and Development for a High-temperature Helium-leak
Detection System (Joint Research)
-Part 3 Development of Radiation Sensors-**

**Nariaki SAKABA, Toshio NAKAZAWA, Kozo KAWASAKI,
Masao URAKAMI^{*} and Sadanori SAISYU^{*}**

**Department of HTTR Project
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashibaraki-gun, Ibaraki-ken**

(Received January 31, 2003)

In the final third stage of the research and development for a high-temperature helium-leak detection system, the radiation sensor was developed in order to detect very small helium leakage. Applying the radiation sensor, we proposed not only the direct detection method which uses the detection of FP gas in helium, but also the active method which uses the difference in the radiation absorption between helium and air. From obtained data it was found that we could detect $0.2 \text{ cm}^3/\text{s}$ leakage within 10 minutes by the active method.

Keywords: Leakage, Event, Helium, Coolant, Detector, Radiation Absorption, monitoring, HTGR, HTR, HTTR

This work has been performed in JAERI as a joint research with The Japan Atomic Power Company.

^{*} The Japan Atomic Power Company

目次

1. 緒言	1
2. 放射線センサの開発	2
2.1 概要	2
2.2 直接検出法の開発	3
2.3 アクティブ検出法の開発	17
3. 結言	64
謝辞	65
参考文献	65

Contents

1. Introduction	1
2. Development of Radiation Sensors	2
2.1 Summary	2
2.2 Direct Detection Method	3
2.3 Active Detection Method	17
3. Conclusion	64
Acknowledgement	65
Reference	65

This is a blank page.

1. 緒言

高温ガス炉の冷却材に使用されるヘリウムガスは、水や炭酸ガス等に比べ分子の大きさが小さいため一般的に漏えいボテンシャルは高く、またヘリウムガスは無色透明の気体であるため、微小な漏えいが万が一発生した場合には、漏えい箇所の特定は困難である。日本初の高温ガス炉 HTTR⁽¹⁾⁽²⁾は、2001年12月に定格出力を達成し、世界で初めて原子炉から850°Cの熱を取り出すことに成功した⁽³⁾⁽⁴⁾。今後 HTTR は本格運転を実施していく計画であるが、本格運転を行う上で、ヘリウムガス漏えいに対する早期検知は、安全・安定運転のために極めて重要である。

本研究は、高温ガス炉で適用可能な、高温環境下での高温ヘリウムガス漏えい箇所特定システムを開発し、漏えい箇所特定のための支援・特定アルゴリズム機能を有した知的システムの構築を図ることを目的とする。

本研究報告の第1報⁽⁵⁾では、開発の第一段階として、光ファイバによる高温ヘリウム漏えい検知技術の適用の可能性を調査するため、国内外における漏えい事故事例およびガス漏えい検知技術の調査を行った。漏えい事故事例の調査の結果から、シール部あるいは溶接部からの漏えい報告が多く、原子炉のプラント形式には必ずしも依存しない傾向があることが分かり、またガス漏えい検知技術調査から、多点同時計測が可能で、電磁波に対する耐ノイズ性が高い光ファイバ温度センサを選択することを決定した。具体的には、ヘリウムガスの漏えい検知に有用な手法と考えられる、放射線による空気とヘリウムの阻止能の違いを用いて、計数率の比率を定量評価する新しい方法を提案した。

第2報⁽⁶⁾では、光ファイバ温度センサの HTTR への適応性を検討した。光ファイバ温度センサは、漏えいしたヘリウムガスによる光ファイバの温度変化により漏えいの有無を検知する。ここでは、光ファイバ単体での検出方式に加えて、HTTR の高温機器用に保温材と一緒にした検出方式の検討を行った。試験の結果、設定した目標検出時間2時間に対して、漏えい量が 5.0~20.0cm³/s では、60min 以内に漏えいを検知し、特に 20cm³/s の漏えいではより早い検知が可能であった。また、HTTR におけるセンサの設置場所を検討し、スタンドバイプクロージャ、30/20MW 切替バルブ、ヘリウム循環機フィルタ等を候補に挙げた。

本報では、開発の最終段階として、さらに微小な漏えいを検知するため、開発目標を 0.2cm³/s と定め、放射線センサの開発を行った結果を報告する。

2. 放射線センサの開発

2.1 概要

放射線計測によるヘリウムガス漏えい検出法として、本研究では、以下に示す二つの方法を検討する。一つは、漏えいガスに含まれる FP による放射線を直接測定し、検出する方法（以下、「直接検出法」と呼ぶ）である。検出の概要を図 1 に示す。また、もう一方は、放射線を用いて漏えいガスの阻止能差（密度差）により漏えいを検出する方法（以下、「アクティブ検出法」と呼ぶ）である。検出の概要を図 2 に示す。アクティブ検出法では、放射線検出器としてプラスチックシンチレータを用い、その発光を光ファイバで伝送する型式とした。

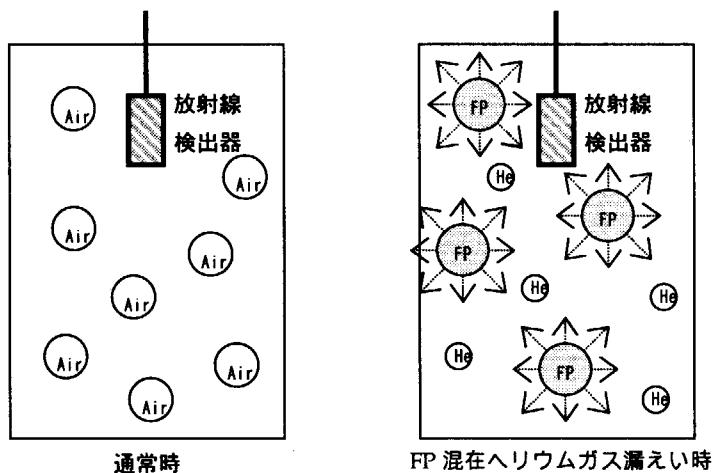


図 1 直接検出法

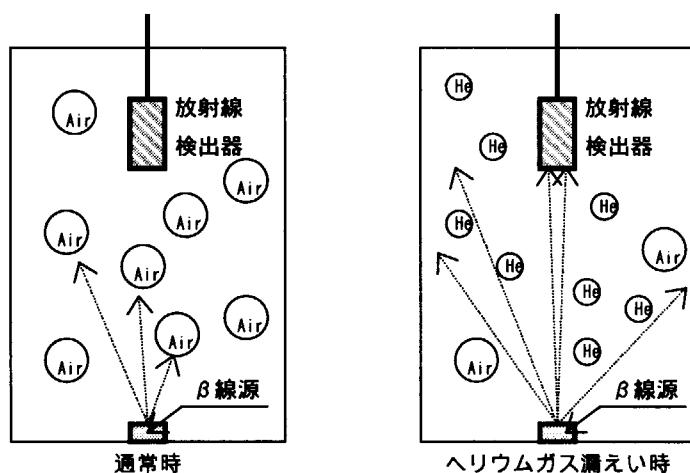


図 2 アクティブ検出法

2.2 直接検出法の開発

直接検出法は、漏えいガスを捕集器に集め、このガスに含まれる FP の放射能を直接検出する方法である。HTTR における 1 次ヘリウムサンプリングによる FP ガス濃度測定結果⁽⁷⁾から、1 次冷却材に含まれる FP ガス放射能濃度は、 10^{-3} (Bq/cm³) 程度である。このレベルの放射能を検知するには、検出部を大きく（感度向上）し、捕集器容積を大きくする（測定対象放射能を増やす）必要が有り、あまり現実的ではない。一般に測定が可能な下限は 10^0 (Bq/cm³) 程度である。また、原子炉出力 50%において約 180 (Bq/cm³) の濃度が見込まれることを考慮し、 $10^0 \sim 10^3$ (Bq/cm³) を検出範囲と定めた。

2.2.1 検出原理と概要

直接検出法は、容器に導かれた FP ガスの放射能を検出し、その計数率から放射能濃度 (Bq/cm³) を導き出す手法である。本開発では、検出器にはプラスチックシンチレータを用いたこととした。

ここで、得られる計数率 C (cps)

放射能濃度 A (Bq/cm³)

光子のみを考える場合は Bq を photon/s に置き換える

とすると、 A と C は比例関係にあり、

$$C = f \times A^{(8)} \quad (1)$$

と表される。ここで、比例定数 f は、検出器の幾何学的効率、エネルギー特性等で決まる検出効率であり、単位放射能あたりの計数率を意味する。 f をあらかじめ求めておけば、計数率から放射能濃度が逆算できる。通常 f を算出するにあたっては、実験において既知の放射能を測定して求めるのが一般的である。しかし、FP ガスを実験で扱うことは困難であるため、シミュレーションによって FP ガスの放射能による検出器の計数率を推定し、推定した計数率から検出限界放射能濃度を求ることとする。

シミュレーションコードとして放射線モンテカルロコードである EGS4 (the Electron Gamma Shower) を用いた。線源からの放射線が検出されるまでには、図 3 に示されるようなプロセスを経るが、EGS4 で計算できるのは、①線源発生から④検出器内での放射線の減衰までであり、⑤プラスチックシンチレータの発光効率、⑥発光してから光ファイバ端面への到達率、⑦光ファイバ内の減衰率、⑧光検出器の検出効率は計算できない。そのため、EGS4 では FP ガスの放射線がプラスチックシンチレータ内で吸収されるまでの計算を行い、その後については、密封線源を使用した試験により、⑤～⑧の各効率を総合した検出効率を求ることとする。

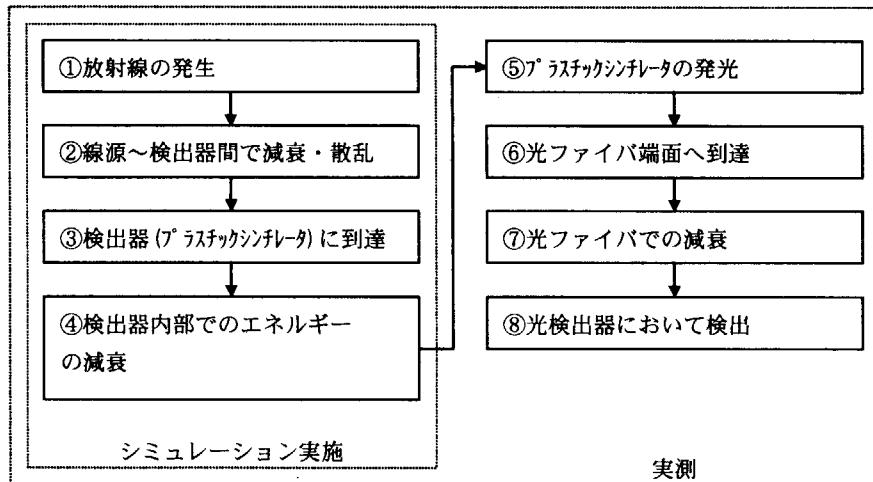


図3 放射線の発生から検出に至るプロセス

(1)式は、実測においてもシミュレーションにおいても成り立つため、以下が示される。

$$C_{\text{均・実測}} = f_{\text{均・実測}} \times A \quad (2)$$

$$C_{均\cdot EGS} = f_{均\cdot EGS} \times A \quad (3)$$

ここで、

A : 既知の放射能

$C_{\text{均・実測}}$ ：均質線源体系（FP ガス線源）における実測の計数率

$C_{均\cdot EGS}$: 均質線源体系 (FP ガス線源) における EGS4 の計数率

(2)式および(3)式より、

$$C_{\text{均}\cdot\text{实测}} = (f_{\text{均}\cdot\text{实测}} / f_{\text{均}\cdot EGS}) C_{\text{均}\cdot EGS} \quad (4)$$

同様に点線源体系では、

ここで、

$$C_{\text{点・実測}} = f_{\text{点・実測}} \times A \quad (5)$$

$$C_{\text{点} \cdot EGS} = f_{\text{点} \cdot EGS} \times A \quad (6)$$

$$C_{\text{点: 实测}} = \left(f_{\text{点: 实测}} / f_{\text{点: EGS}} \right) C_{\text{点: EGS}} \quad (7)$$

$C_{\text{点}}:$ 実測 : 点線源体系における実測の計数率

$C_{\text{点-EGS}}$: 点線源体系における EGS4 の計数率

(4)式右辺の ($f_{\text{均・実測}} / f_{\text{均・EGS}}$) と、(7)式右辺の ($f_{\text{点・実測}} / f_{\text{点・EGS}}$) が等しいと仮定し、 $C_{\text{均・実測}}$ を算出する。

$$(f_{\text{均・実測}} / f_{\text{均・EGS}}) = (f_{\text{点・実測}} / f_{\text{点・EGS}}) \quad (8)$$

$$f_{\text{均・実測}} = (f_{\text{点・実測}} / f_{\text{点・EGS}}) \times f_{\text{均・EGS}} \quad (9)$$

したがって、(2)式は(10)式のように書き換えることができる。

$$C_{\text{均・実測}} = (f_{\text{点・実測}} \times f_{\text{均・EGS}} / f_{\text{点・EGS}}) \times A \quad (10)$$

(10)式右辺の 3 つの f は EGS と実測で求めることができるので、 $C_{\text{均・実測}}$ は放射能濃度 A の関数として求めることが可能である。

2.2.2 点線源体系のシミュレーションと実測による換算係数の導出

実測とシミュレーション体系を図 4 に示す。検出器は容器の中心に配置し、線源は検出器の下側と横側の 2 ケースとした。

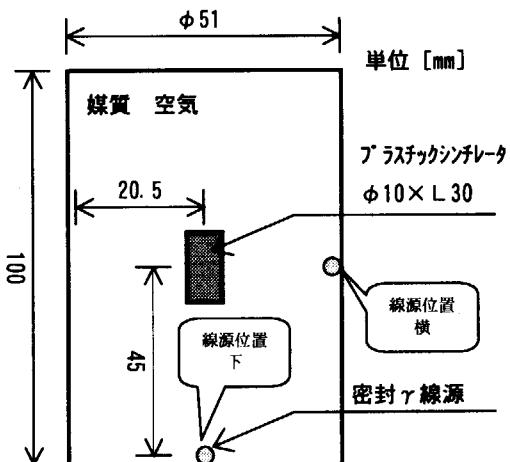


図 4 実測とシミュレーション体系（点線源体系）

(10)式の 3 つの f のうち、まず $f_{\text{点・EGS}}$ を求める。シミュレーションでは容器内のランダムな位置に光子を N 回発生させ、その光子がプラスチックシンチレータに到達しエネルギーが減衰した場合の、エネルギー損失量に対応する計数値を得る。図 5 にそのスペクトルとして、 ^{137}Cs を横配置した例を示す。

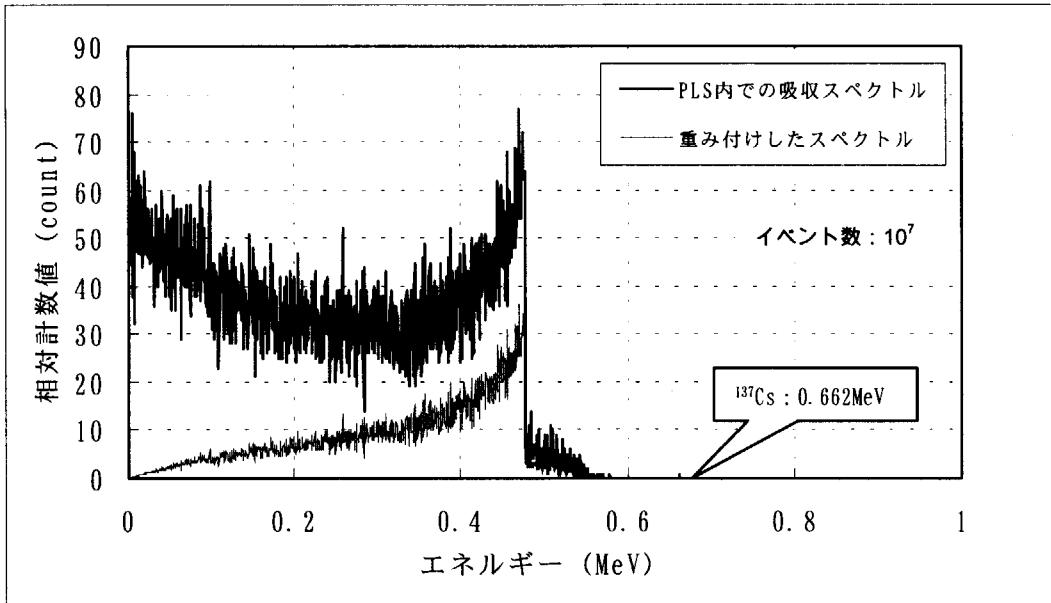


図5 プラスチックシンチレータ内のエネルギー吸収スペクトルの例 (^{137}Cs : 横配置)

図5の横軸に相当するプラスチックシンチレータ内のエネルギー損失量をEとすれば、

$$[\text{プラスチックシンチレータ内の発光強度}] \propto E \quad (11)$$

の関係があるため、プラスチックシンチレータ内のエネルギー損失量Eが大きい方が検出確率が高くなる。一方、シミュレーションで得られるカウントはプラスチックシンチレータ内のエネルギー損失量の大小に関係なく、プラスチックシンチレータ内でエネルギー損失した光子の数である。そこで、より実測条件に近づけるため、シミュレーションで得られる1photonあたりの計数 $f(E)$ をEで重み付けし、 $E=0$ から $E=E_{\max}$ まで積分した値を $f_{\text{点・EGS}}$ とする。

$$f_{\text{点・EGS}} = \int_0^{E_{\max}} E \cdot f(E) dE \quad (12)$$

すなわち、ある1個の光子がプラスチックシンチレータ内に入射する場合、そのエネルギー損失が1MeVの場合が1count、0.5MeVの場合は0.5count、2MeVの場合は2countとなる。なお、単位は通常用いるcountと区別するため、count·MeVと表記する。

次に、 $f_{\text{点・実測}}$ を求める。実測では、密封線源として ^{60}Co (9.28×10^5 (Bq))と ^{137}Cs (2.63×10^6 (Bq))を使用した。 f は1photonあたりの計数としているので、 $f_{\text{点・実測}}$ は以下のように求める。

$$f_{\text{点・実測}} = C_{\text{点・実測}} / (A \times \gamma \times \text{計測時間}) \quad (13)$$

γ : ガンマ線放出率 ((photon/s) / Bq)

表1に実測とシミュレーション結果を示す。

表1 点線源体系の実測とシミュレーション結果(直接検出法)

線源位置	核種	$f_{\text{点・EGS}}$ (Count·MeV / photon)	$f_{\text{点・実測}}$ (Count / photon)	$f_{\text{点・実測}} / f_{\text{点・EGS}}$
下	^{137}Cs	2.48E-04	4.20E-06	1.70E-02
下	^{60}Co	4.11E-04	1.51E-05	3.67E-02
横	^{137}Cs	8.89E-04	1.86E-05	2.09E-02
横	^{60}Co	1.39E-03	6.14E-05	4.40E-02

この結果を基に、 $f_{\text{点・実測}} / f_{\text{点・EGS}}$ を図6に示す。 $f_{\text{点・実測}} / f_{\text{点・EGS}}$ は、 γ 線エネルギーに対して、比例関係になると推察できる。線源位置2カ所と、核種2種類の計4点と原点を用いて最小二乗法フィッティングにより近似直線を求めた結果を(14)式に示す。

$$f_{\text{点・実測}} / f_{\text{点・EGS}} = 0.0315 \times E \quad (14)$$

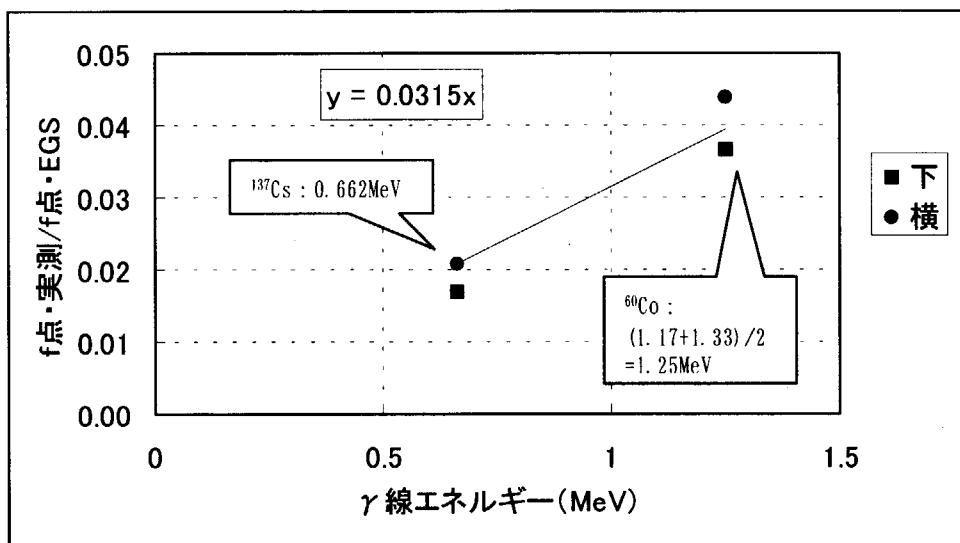


図6 実測・EGS の比較

2.2.3 均質線源体系のシミュレーションによる換算係数の導出

FP ガスの核種は、HTTR 原子炉出力 40,50,57,67% の場合の 1 次ヘリウムサンプリング結果⁽⁷⁾より、^{85m}Kr, ⁸⁷Kr, ⁸⁸Kr, ⁸⁹Kr, ¹³³Xe, ¹³⁵Xe, ^{135m}Xe, ¹³⁷Xe および ¹³⁸Xe の 9 核種をターゲットとする。これらのγ線エネルギーと放出率を表 2 に示す。これらの想定核種から発するガンマ線は 3MeV 以内にあるため、この範囲においてシミュレーションを実施した。

表2 FP ガス核種の γ 線エネルギーと放出率

85mKr		87Kr		88Kr		89Kr	
4.48 h		76.31 min		2.84 h		3.1 min	
MeV	%	MeV	%	MeV	%	MeV	%
0.15118	75.5	0.40258	2.0	0.02751	2.0	0.19746	2.1
0.30487	14.0	0.84544	49.2	0.16598	3.4	0.22090	22.5
		1.74050	7.3	0.19632	28.0	0.35606	4.7
		2.01190	2.9	0.36222	2.3	0.41142	2.9
		2.55480	9.2	0.83483	13.3	0.49751	7.5
		2.55810	3.9	1.52977	11.2	0.57696	6.3
				2.02984	4.6	0.58580	18.6
				2.03541	3.8	0.69624	2.0
				2.19584	13.5	0.73839	4.7
				2.23177	3.5	0.86708	6.7
				2.39211	35.0	0.90427	8.1
						1.10778	3.3
						1.32428	3.4
						1.47276	7.7
						1.53004	3.7
						1.53368	5.8
						1.69370	4.9
						2.86623	2.0
計	89.5	計(%)	74.4	計(%)	120.6	計(%)	116.9

133Xe		135Xe		135mXe		137Xe		138Xe	
5.245 d		9.09 h		15.29 min		3.83 min		14.17 min	
MeV	%	MeV	%	MeV	%	MeV	%	MeV	%
0.07955	0.2	0.24979	90.1	0.52657	81.2	0.45551	31.0	0.00485	0.2
0.08100	37.1	0.60819	2.9			0.84895	0.6	0.01085	0.7
0.16050	0.1					0.98225	0.2	0.15375	6.0
						1.11933	0.1	0.25831	31.5
						1.27323	0.2	0.39643	6.3
						1.78343	0.4	0.43449	20.3
						2.84980	0.2	1.76826	16.7
								2.00475	5.4
								2.01582	12.3
計	37.4	計(%)	93.0	計(%)	81.2	計(%)	32.8	計(%)	99.3

表 3 直接検出法におけるシミュレーション条件表

シミュレーションパラメータ		備 考
イベント数	4000000	
γ 線エネルギー	~ 3MeV	
容器寸法	v1 : $\phi 51\text{mm} \times H 100\text{mm}$ (214.50cm^3) v2 : $\phi 72\text{mm} \times H 100\text{mm}$ (427.51cm^3) v3 : $\phi 100\text{mm} \times H 100\text{mm}$ (824.67cm^3)	v1 : 点線源による実測を 実施
バックグラウンド	なし	

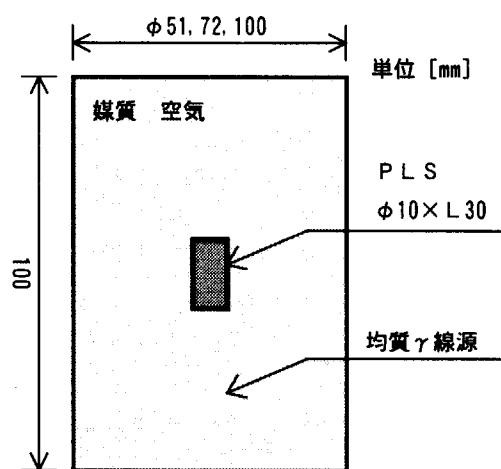


図 7 シミュレーション体系図

$f_{\text{均}, \text{EGS}}$ は容器内のランダムな位置に 1 photon 発生した場合の計数であり、(15)式で求める。

$$f_{\text{均}, \text{EGS}} = C_{\text{均}, \text{EGS}} / N \quad (15)$$

$f_{\text{均}, \text{EGS}}$ の容器内で発生する γ 線エネルギーを図 8 に示す。

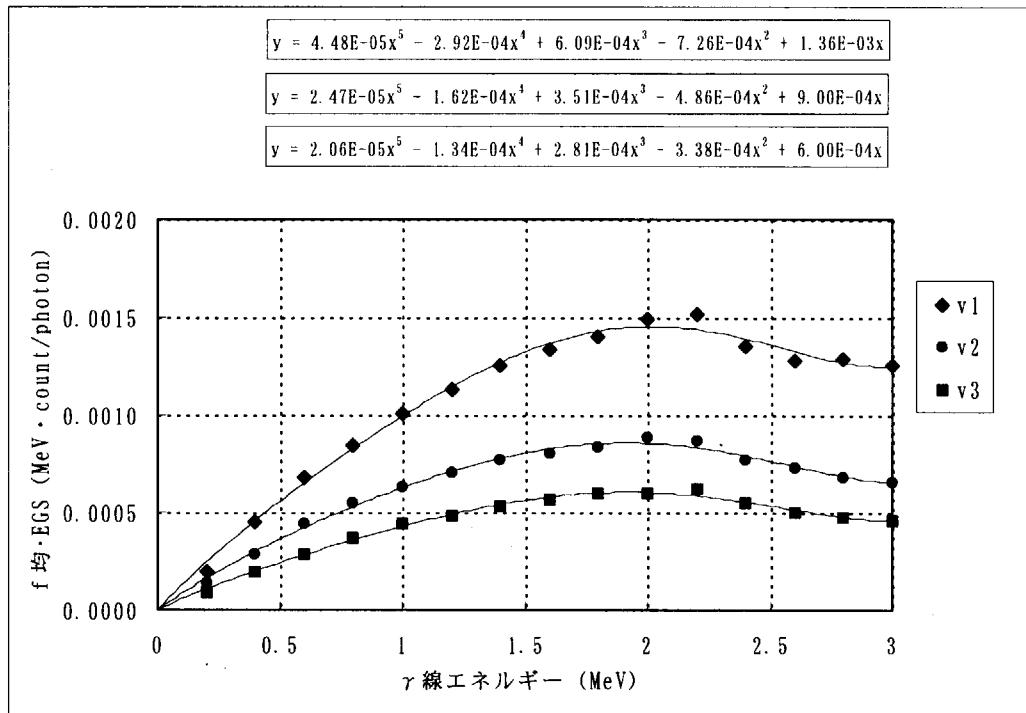


図 8 プラスチックシンチレータ感度のγ線エネルギー依存性

図 8 から、 $f_{\text{均}\cdot\text{EGS}}$ は容器内で発生するガンマ線エネルギーに依存し、原点を通る 5 次式でフィッティングした関数を $f_{\text{均}\cdot\text{EGS}}$ とし、捕集器ごとにこれを求めた。なお、これらは、 $0 < E < 3$ (MeV) の範囲でのみ適用する。

・ 容器 A の場合

$$\begin{aligned} f_{\text{均}\cdot\text{EGS}}(E) = & 4.48 \times 10^{-5} E^5 - 2.92 \times 10^{-4} E^4 + 6.09 \times 10^{-4} E^3 \\ & - 7.26 \times 10^{-4} E^2 + 1.36 \times 10^{-3} E \end{aligned} \quad (16)$$

・ 容器 B の場合

$$\begin{aligned} f_{\text{均}\cdot\text{EGS}}(E) = & 2.47 \times 10^{-5} E^5 - 1.62 \times 10^{-4} E^4 + 3.51 \times 10^{-4} E^3 \\ & - 4.86 \times 10^{-4} E^2 + 9.00 \times 10^{-4} E \end{aligned} \quad (17)$$

・ 容器 C の場合

$$\begin{aligned} f_{\text{均}\cdot\text{EGS}}(E) = & 2.06 \times 10^{-5} E^5 - 1.34 \times 10^{-4} E^4 + 2.81 \times 10^{-4} E^3 \\ & - 3.38 \times 10^{-4} E^2 + 6.00 \times 10^{-4} E \end{aligned} \quad (18)$$

2.2.4 検討結果

(10)式の右辺 ($f_{\text{点}\cdot\text{実測}} \times f_{\text{均}\cdot\text{EGS}} / f_{\text{点}\cdot\text{EGS}}$) 部分を f' とすれば、(14)式、(16)式、(17)式および(18)式から、 f' は発生する γ 線エネルギー E の関数となり、(10)式を次のように書

き換えることができる。

$$C_{\text{均・実測}} = f'(E) \times A \quad (19)$$

f' は、FP ガス線源が捕集容器内のランダムな位置に 1 photon 発生した場合の計数である。単一の想定核種 1 (Bq/cm³)あたりの計数率におすと、

$$V \times \sum_i \{ f'(E_i) \times \gamma(E_i) \} \quad (\text{cps} \cdot \text{MeV} / (\text{Bq/cm}^3)) \quad (20)$$

ここで、

E_i : 想定核種が放出する γ 線のエネルギー

γ : 放出率 ((photon/s) / Bq)

V : 容器の容積

検出限界計数率の評価式より、

$$n_d = \frac{k}{2} \left(\frac{k}{t_s} + \sqrt{\left(\frac{k}{t_s} \right)^2 + 4n_b \left(\frac{1}{t_s} + \frac{1}{t_b} \right)} \right) \quad (21)$$

ここで、 n_d : 検出限界計数率

n_b : バックグラウンドの計数率

t_s : 試料の計測時間

t_b : バックグラウンドの計測時間

k : 定数 (通常 $k=3$)

なお、バックグラウンド測定は測定対象 FP ガスの漏えいが始まる前の測定を意味し、試料の測定は FP ガスの漏えい開始後の測定を意味する。直接検出法ではある一定時間間隔で計数するので、 $t_s = t_b$ である。また、(19)式および(20)式から、検出限界放射能濃度 A は、

$$\begin{aligned} A &= \frac{n_d}{V \sum_i \{ f'(E_i) \cdot \gamma(E_i) \}} \\ &= \frac{1}{V \sum_i \{ f'(E_i) \cdot \gamma(E_i) \}} \times \frac{k}{2} \left(\frac{k}{t_s} + \sqrt{\left(\frac{k}{t_s} \right)^2 + 8n_b \left(\frac{1}{t_s} \right)} \right) \end{aligned} \quad (22)$$

となり、計測時間 t_s の関数で与えられる。

以上で、各捕集容器ごとに検出限界放射能濃度が求められる。バックグラウンドは実験室内での長時間測定結果(1.61E-02cps)を用いた。(22)式は、単一核種の場合の式であるが、実際は様々な核種のFPが混在しているので、存在する核種全体の放射能濃度 A_{all} は(23)式のように表せる。

$$A_{all} = \sum_j P_j \cdot A_j \quad (23)$$

ここで、 P_j ：核種 j の存在比

HTTRのサンプリング結果⁽⁷⁾から求めた、HTTRにおける想定核種の存在比を表4に示す。また、各捕集容器ごとの検出限界放射能濃度の、想定核種ごとの場合と存在比を加味した場合の評価を図9～図11に示す。

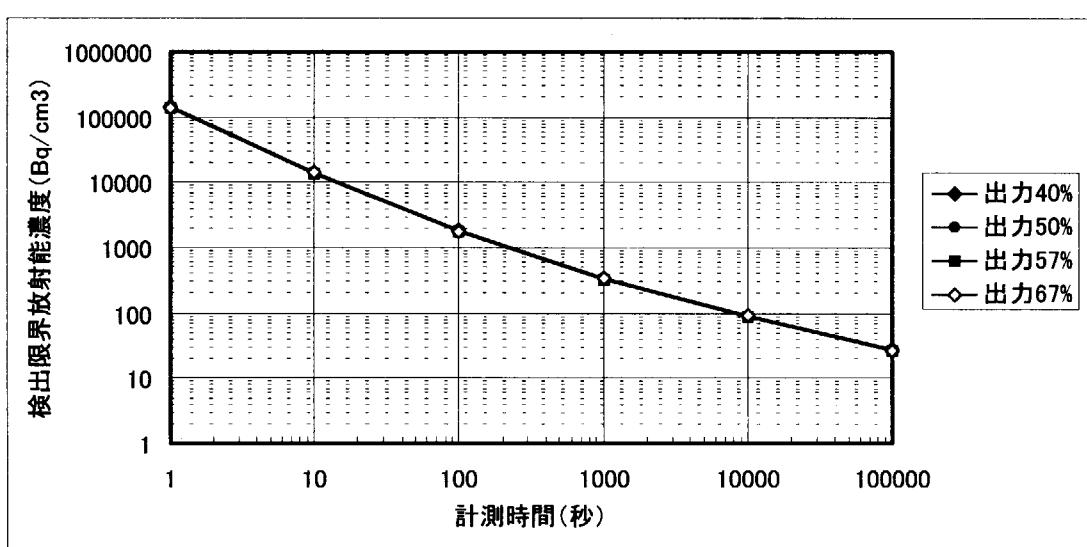
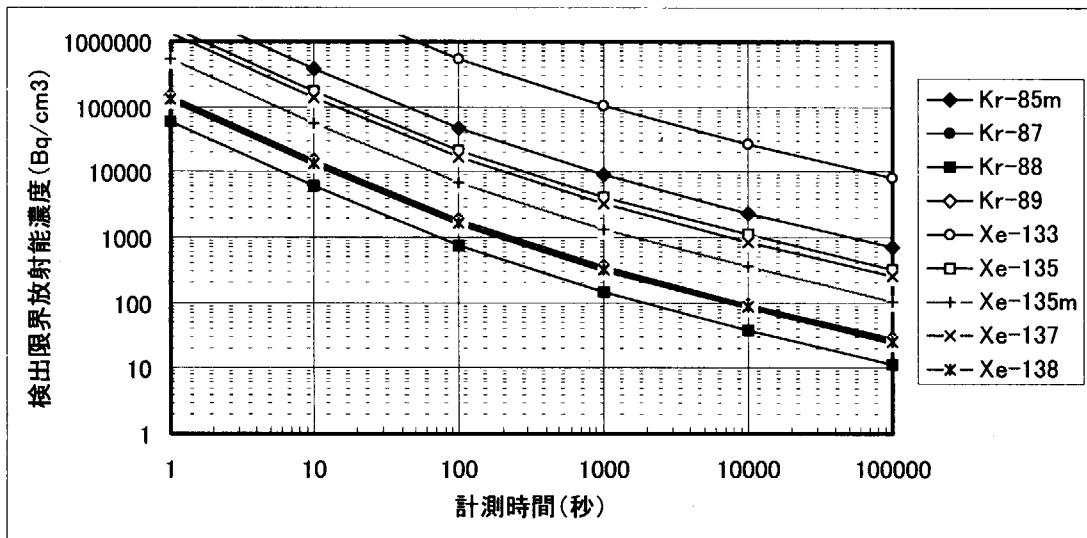
表4 HTTRにおける想定核種の存在比

想定核種 原子炉出力	^{85m}Kr	^{87}Kr	^{88}Kr	^{89}Kr	^{133}Xe	^{135}Xe	^{135m}Xe	^{137}Xe	^{138}Xe
40%	ND	0.09	0.24	0.20	ND	0.19	0.04	0.17	0.07
50%	ND	0.17	0.29	ND	ND	0.39	0.06	ND	0.10
57%	0.11	0.21	0.27	ND	ND	0.28	ND	ND	0.13
67%	0.10	0.17	0.27	ND	0.05	0.26	0.03	ND	0.12

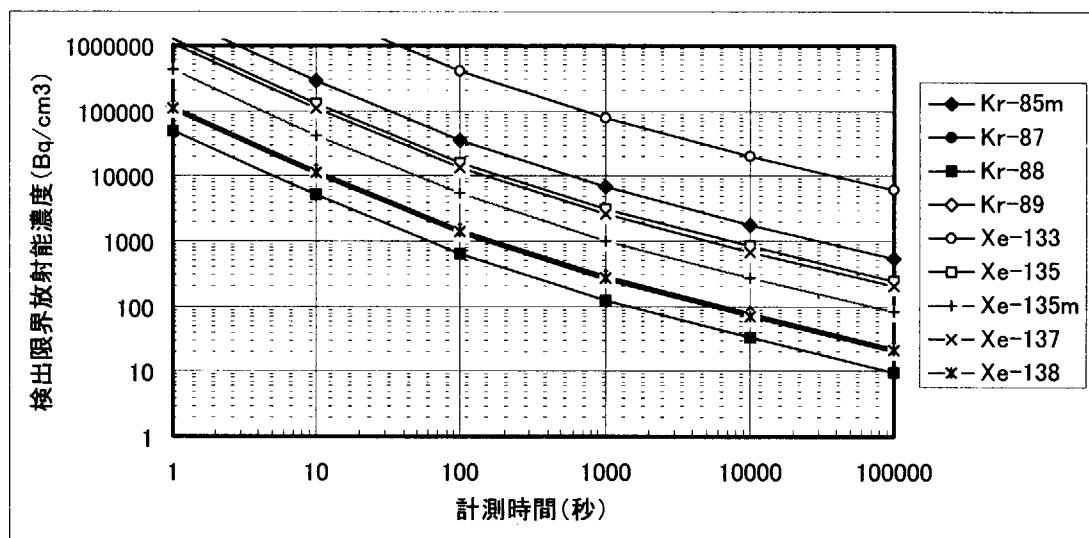
ND：検出下限以下

実機に適用する際には、バックグラウンド計数率 n_b は検出器を実際に設置する場所で測定し、求める必要がある。この値が大きい場合には、捕集器の周りに遮へいを設置する。

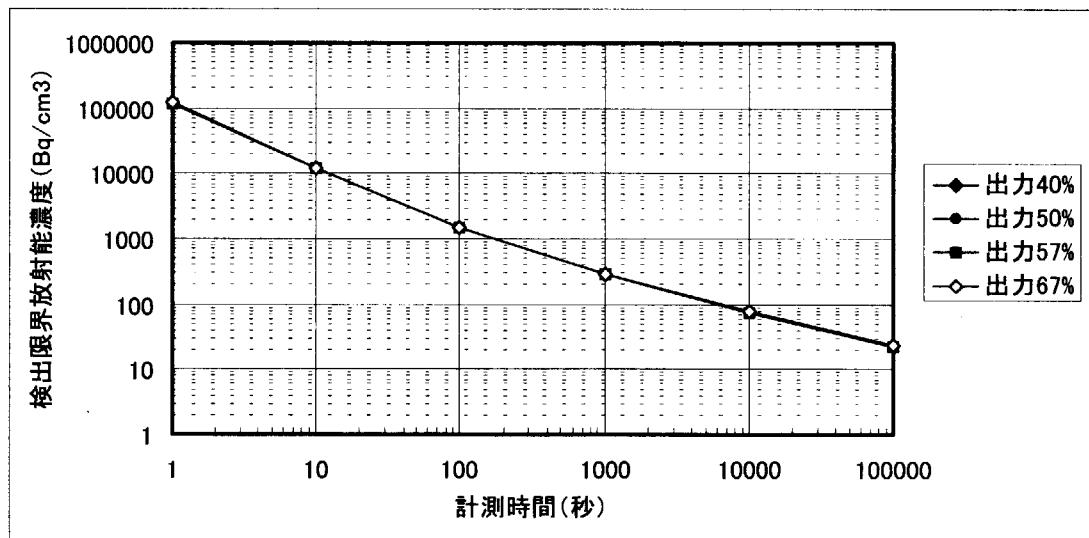
原子炉出力	運転管理濃度
40%	
50%	180 (Bq/cm ³)
57%	205 (Bq/cm ³)
67%	240 (Bq/cm ³)

図9 直接法の検出下限評価 <捕集容器 v1 (214.50cm³) >

原子炉出力	運転管理濃度
40%	
50%	180 (Bq/cm ³)
57%	205 (Bq/cm ³)
67%	240 (Bq/cm ³)



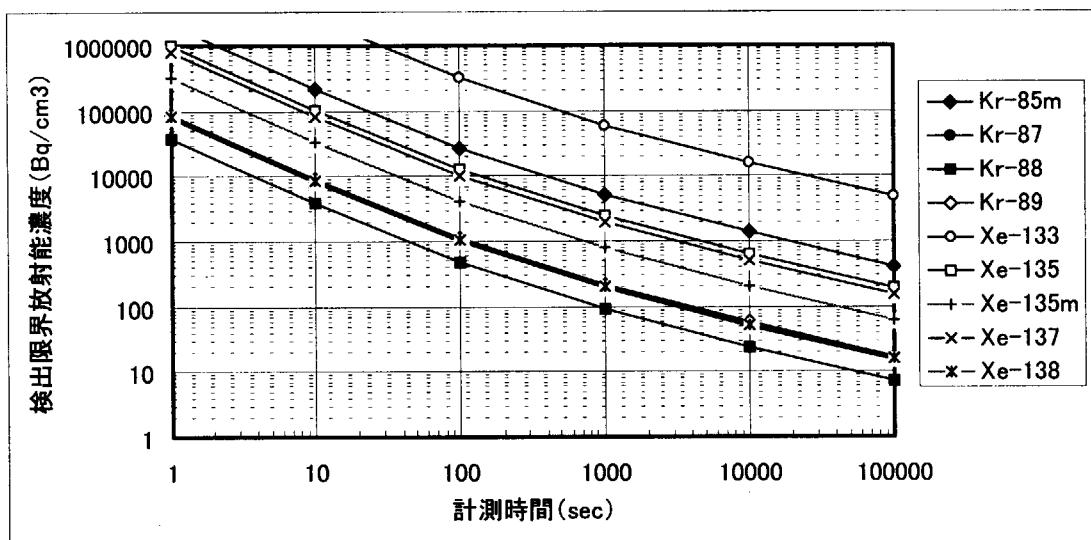
(a) 想定核種ごとの評価



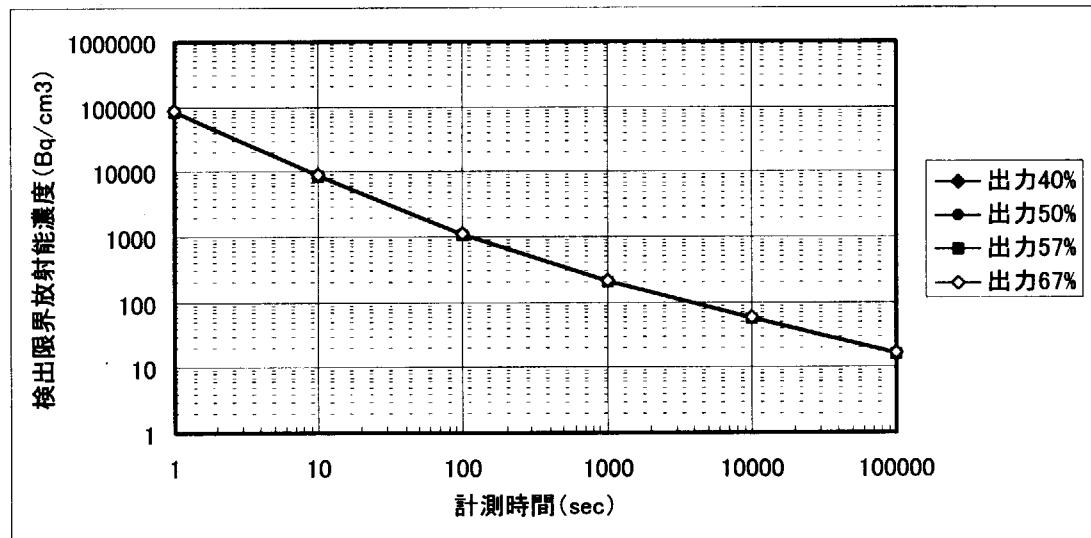
(b) 存在比を加味した評価

図 10 直接法の検出下限評価 <捕集容器 v2 (427.51cm³) >

原子炉出力	運転管理濃度
40%	
50%	180 (Bq/cm ³)
57%	205 (Bq/cm ³)
67%	240 (Bq/cm ³)



(a) 想定核種ごとの評価



(b) 存在比を加味した評価

図 11 直接法の検出下限評価 <捕集容器 v3 (824.67cm³) >

2.3 アクティブ検出法の開発

2.3.1 検出原理と概要

(1) 原理

アクティブ検出法による検出器は、漏えいしたヘリウムガスを捕集する容器と、その内部に対向配置する放射線源とその放射線を測定する検出器で構成するが、空気により満たされた捕集器内部にヘリウムガスが漏えいすると、捕集器内部のヘリウムガス濃度は上昇する。検出器内には、放射線検出器からある距離の位置に放射線源を配置する。漏えいによるヘリウムガス濃度の増加は、空気による放射線の減衰を減少させるため、検出器に到達する放射線は増加する。アクティブ検出法は、この放射線強度の変化を検出することによりヘリウムガスの漏えいを検知する。

(2) 開発概要

アクティブ検出法の開発は、以下の手順を経て実施する。

- ① シミュレーションによる検討
- ② シミュレーションを反映させた試験装置の設計・試作
- ③ 試作装置を用いた試験
- ④ 適用性評価

2.3.2 シミュレーションによるアクティブ法のヘリウムガス検出への適用性検討および簡易実験

(1) 検討手順

- ① ピーム線源による空気 / ヘリウムガスの遮へい効果の確認
パラメータ : β 線エネルギー (0.1 ~ 2MeV の線スペクトル)
線源 ~ 検出器間の距離
- ② 点線源 (点等方線源) による空気 / ヘリウムガスの遮へい効果の確認
パラメータ : β 線エネルギー (①の検討結果を反映して狭い範囲で実施)
線源 ~ 検出器間の距離
- ③ 核種の選択
- ④ 簡易実験による適用性確認

(2) ピーム線源による空気 / ヘリウムガスの遮へい効果の確認

媒質 (空気・ヘリウムガス) と検出器 (プラスチックシンチレータ) における、 β 線の挙動をシミュレーション (EGS4) を用いて計算した。入力条件は、体系の寸法・材質、 β 線エネルギー、イベント数であり、出力は検出器に到達した β 線のうち、エネルギーが減衰する β 線の個数である。ここで、プラスチックシンチレータ内での発光効率と発光した光が光ファイバに入射する効率は 1 とした。

アクティブ検出法によるヘリウムガス検知の可能性を探るため、検出器に対してピーム

状に放射線を入力し、媒質（空気）中のヘリウムガス濃度に対するプラスチックシンチレータでの検出特性を計算した。入力した β 線エネルギーは、簡単のため線スペクトルを入力した。図12にシミュレーション体系を示す。表5にビーム線源を入力した場合のシミュレーションパラメータを示す。図13にビーム線源を入力した場合のシミュレーション結果を示す。

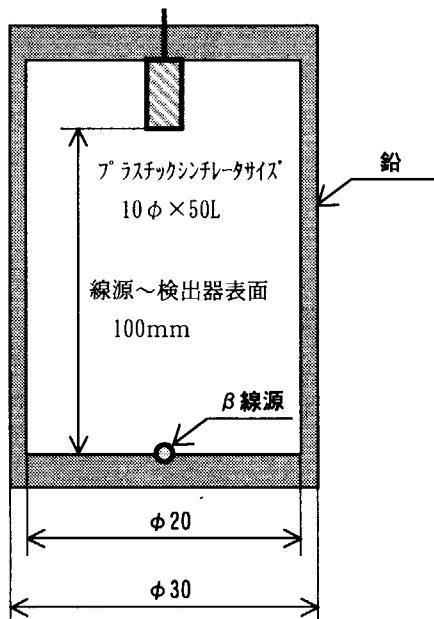


図12 シミュレーション体系

表5 シミュレーションパラメータ（ビーム線源）

ビーム線源	捕集器容器	円筒形、内径 $\phi 20\text{mm}$ 、鉛厚 5 mm
	線源～検出器表面 間の距離	100mm
	β 線エネルギー	0.1、0.2、0.4、1.0、2.0 (MeV)
	ヘリウムガス濃度	0～100 体積% (1気圧、約 20°C)、真空状態
	イベント数	10000

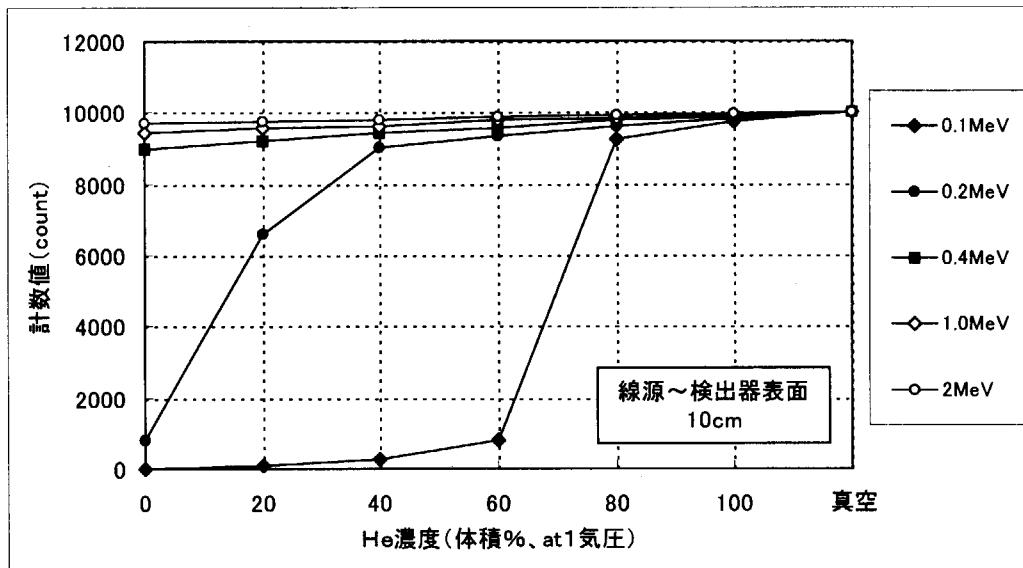


図 13 ピーム線源 (イベント数 10000)

ビーム線源でのシミュレーションの結果、 β 線のエネルギーが 0.2MeV 未満のエネルギーにおいてヘリウムガス濃度による計数変化が顕著に見受けられることがわかった。

(3) 点等方線源による空気 / ヘリウムガスの遮へい効果の確認

点等方線源を入力してシミュレーションを実施した。 β 線のエネルギーは 0.1~0.4MeV の範囲において計数の変化を計算した。表 6 に点等方線源を入力した場合のシミュレーションパラメータを示す。

表 6 シミュレーションパラメータ (点等方線源)

点等方線源	捕集器容器	円筒形、内径 ϕ 20mm
	線源～検出器表面 間の距離	100、150、200mm
	プラスチックシンチレーター サイズ	ϕ 10×H50 (mm)
	β 線エネルギー	0.1、0.125、0.15、0.175、0.2、0.4MeV
	ヘリウムガス濃度	0~100 体積% (1 気圧、約 20°C), 真空状態
	イベント数	500000

図 14 に点等方線源を入力した場合のシミュレーション結果を示す。ヘリウムガス / 空気比が増加するに従い検出器での計数が上昇する傾向が得られ、アクティブ法のヘリウムガス検出器への適用が可能である見込みを得た。また、線源から検出器間の距離が大きくなればなるほどヘリウムガスと空気の差が明確になるが、計数は減少するため誤差が大きくなることが予想できる。

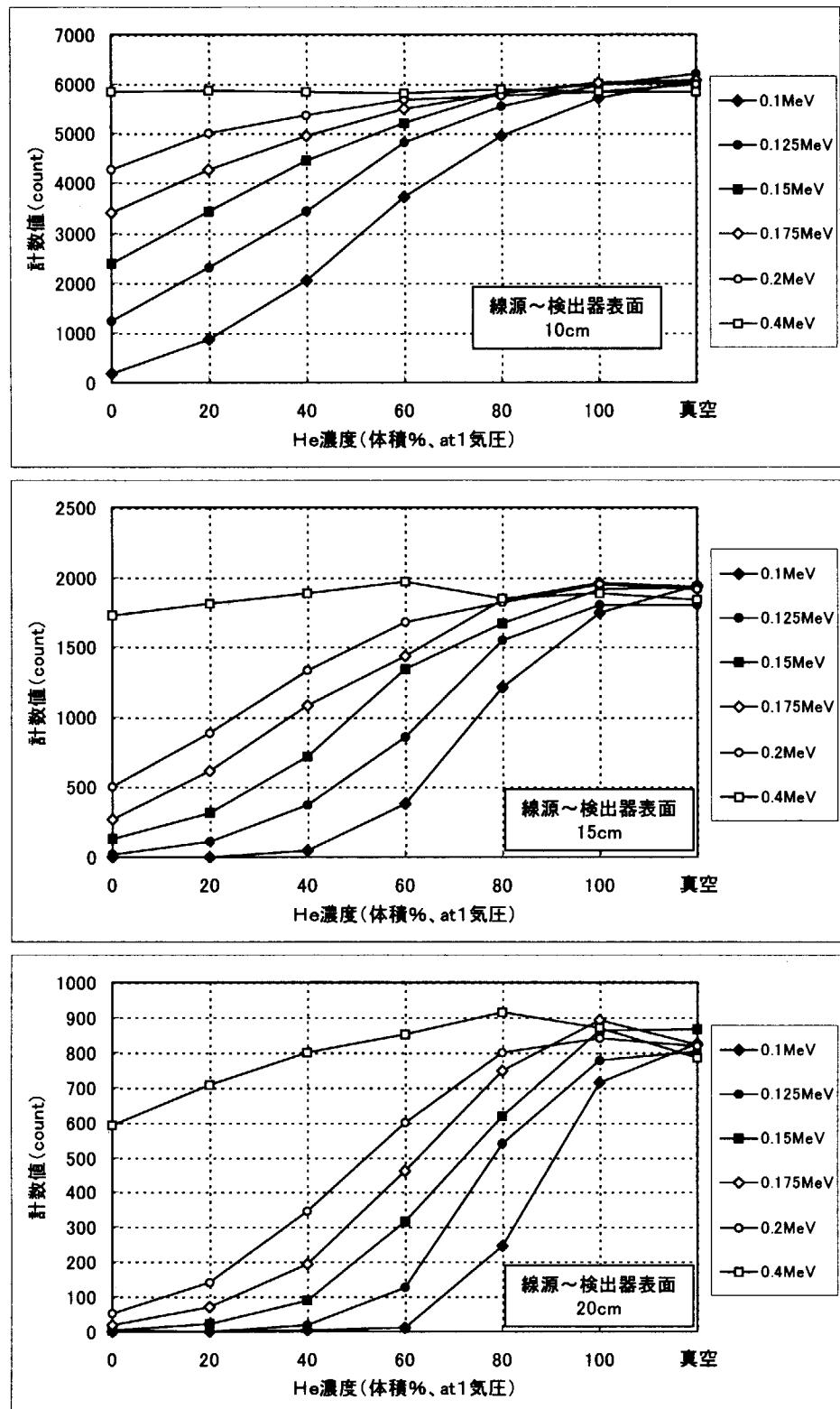


図 14 点等方線源 (イベント数 500000)

(4) 核種の選択

(3)において点等方線源においても、ヘリウムガス濃度による計数増加が見受けられることが分かったため、アクティブ法に使えそうな核種を以下の条件の下に検討した。

- 放射線種：β線がメインでガンマ線はほとんど放出しないこと（ガンマ線はヘリウムガス / 空気に関係なく透過するため）
- エネルギー：最大エネルギーが 1 MeV 以下であること（βマイナス崩壊に伴って放出されるβ線は連続スペクトルで、その平均エネルギーは最大エネルギーの約 1/3 である）
- 半減期：1 年以上

はじめに、これらの条件に見合う核種を抜粋した。表 7 に核種の一覧を示す。この中でエネルギーの低い核種と高い核種、また試験実施に当り比較的入手しやすい密封線原として、¹⁴⁷Pm、²⁰⁴Tl をそれぞれ選択した。本開発ではこの ¹⁴⁷Pm と ²⁰⁴Tl を用いて試作品の最適化を行う。

表 7 線源核種の選択

核種	β線最大 エネルギー	半減期	密封線源 入手先	選択 核種	備考
¹⁴ C	156 kev	5.73×10^3 y	輸入		
¹⁴⁷ Pm	224 keV	2.623y	国内	○	低エネルギー
³⁶ Cl	709 keV	3.01×10^5 y	輸入		
²⁰⁴ Tl	764 keV	3.78y	国内	○	高エネルギー
⁹⁹ Tc	294 keV	2.11×10^5 y	輸入		

(5) 簡易実験による適用性確認

プラスチックシンチレータを試作する前に、(4)までの検討結果を現象として確認するために、簡易実験を実施した。β線源として ²⁰⁴Tl (370 kBq) の密封線源を用い、β線検出器は GM 計数管を用いて測定した。線源から検出器間の距離は 22cm に設定した。実験体系を図 15 に、実験結果を表 8 に示す。

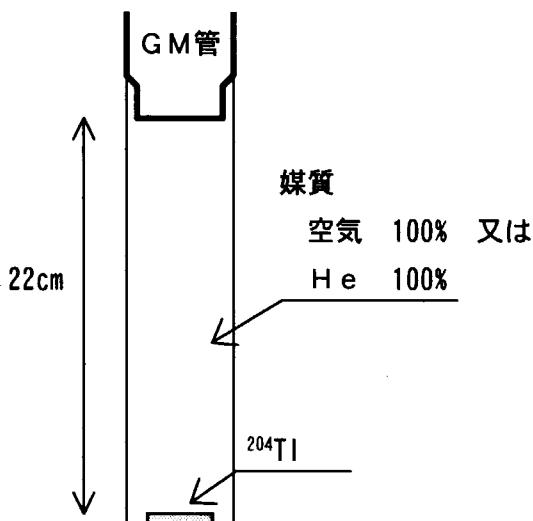


図 15 アクティブ法の事前検討における実験体系

表 8 アクティブ法の事前検討における実験結果

項目	計数 (120s)		計数率 (cps)		正味の計数率 (cps)	
	Count	1σ	cps	1σ	cps	1σ
バックグラウンド	130	11.4	1.1	0.1	-	-
線源 + 空気	10816	104.0	90.1	0.9	89.1	0.9
線源 + ヘリウムガス	26729	163.5	222.7	1.4	221.7	1.4

実験の結果、線源から検出器間の媒質が空気とヘリウムガスの場合を比較すると、ヘリウムガスの方が大きい計数を得られ、アクティブ法のヘリウムガスの漏えい検出器への適用の可能性が確認された。

2.3.3 試作

(1) 放射線計測装置の基本構成

本試験に用いた放射線計測装置の構成とパソコンおよび回路機器の外観を図 16 に示す。装置は主に捕集器部、伝送部、信号処理用回路機器、パソコンから構成されている。ヘリウムガスを集める捕集器にセンサであるプラスチックシンチレータと密封線源を配置し、密封線源からの放射線をプラスチックシンチレータが感知して、その発光信号が光ファイバで伝達される。発光信号は光電子増倍管で電気信号に変換され、信号処理を行いカウントされる仕組みである。試作は捕集器、プラスチックシンチレータおよび光ファイバについて実施した。

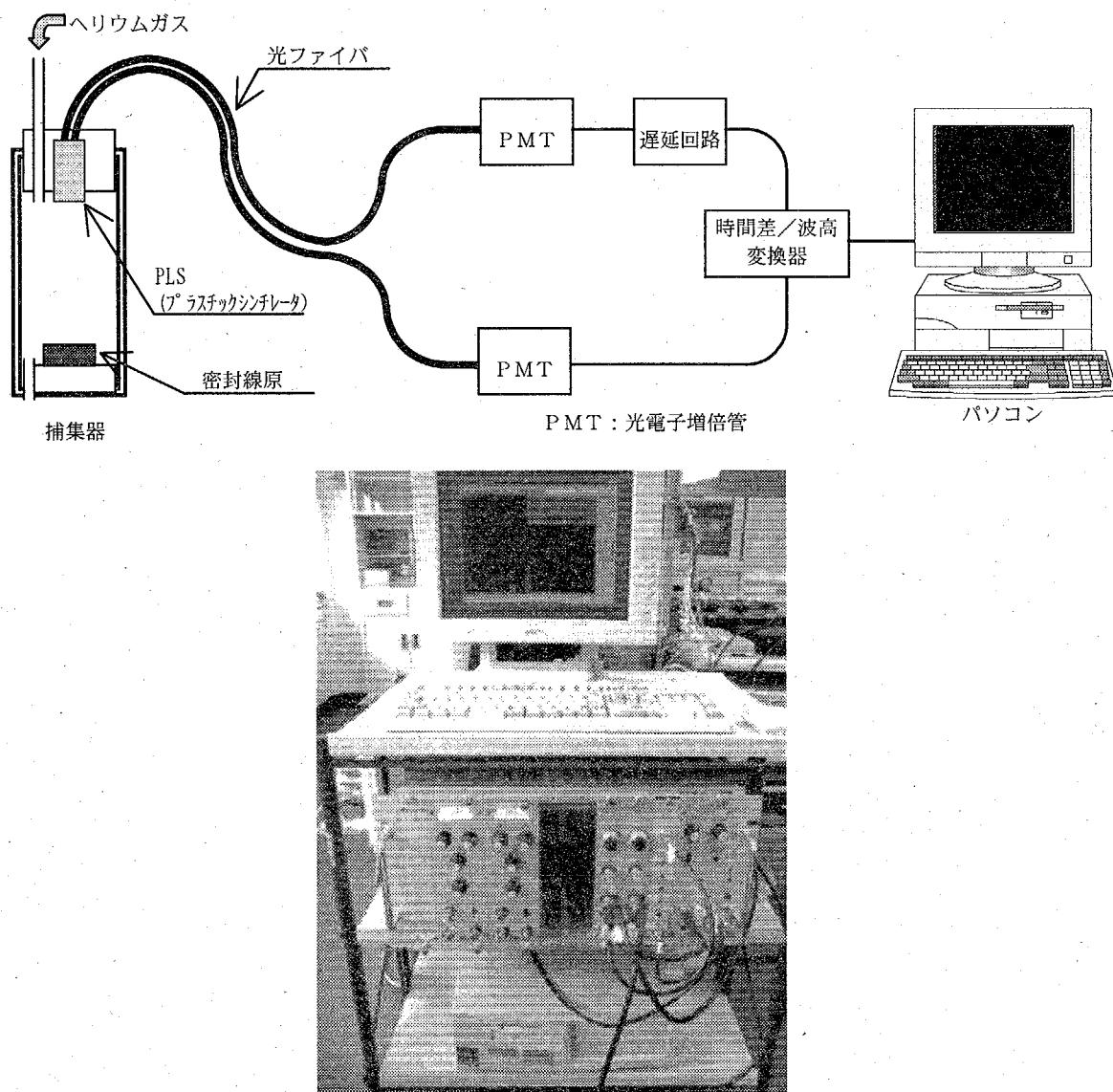


図 16 放射線計測装置の構成とパソコン / 回路機器の外観

(2) 放射線計測用試験治具（捕集器）

製作した捕集器の寸法を図 17 に、写真を図 18 に示す。捕集器はガスの導入口、エア抜穴を持つ円筒容器で、上下にセンサであるプラスチックシンチレータと線源を配置する。プラスチックシンチレータが発光体であることから容器の内部は完全遮光とした。プラスチックシンチレータと線源との距離は、調整部を取り換えることにより可変とし、プラスチックシンチレータと線源を交換するためにプラスチックシンチレータ部、線源設置部は

取外しが可能とした。試験に使用した線源の写真を図 19 に示す。

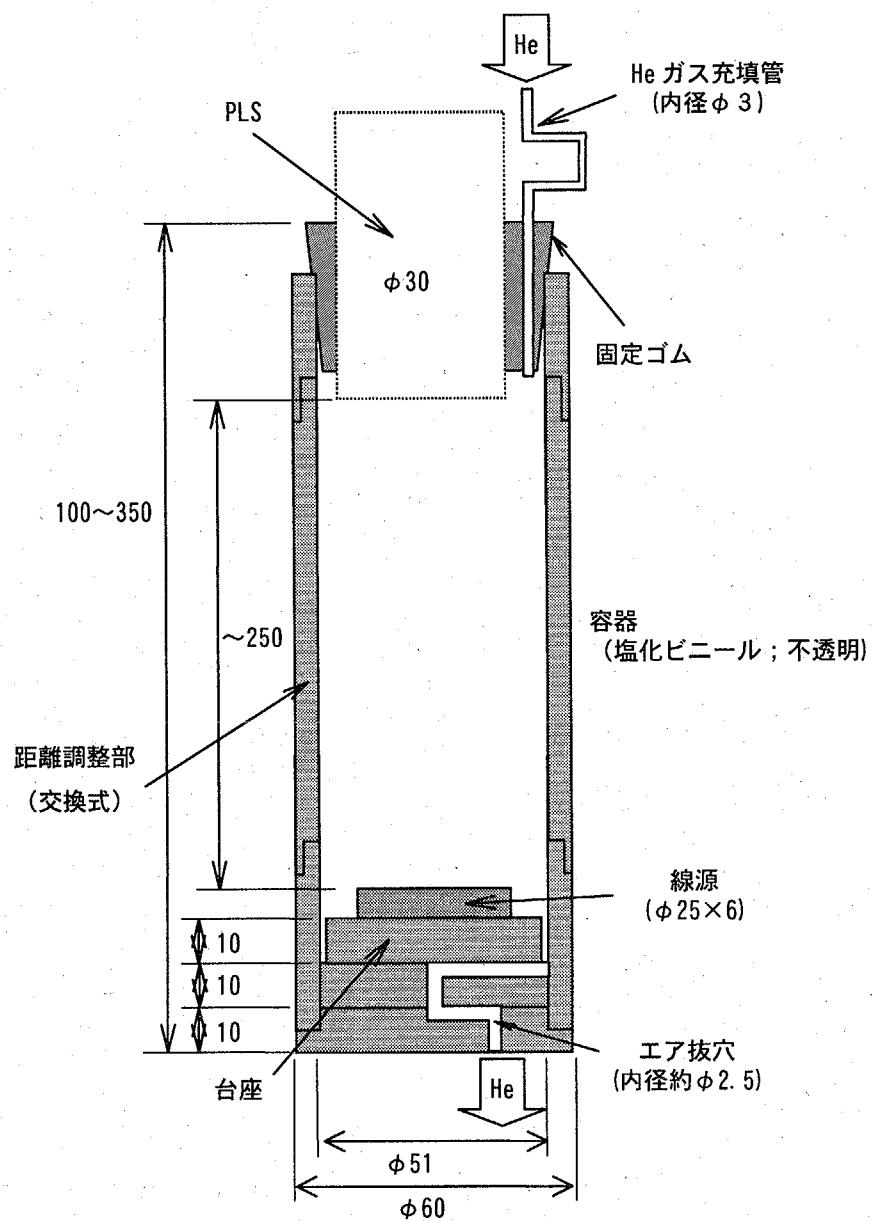


図 17 放射線計測用試験治具

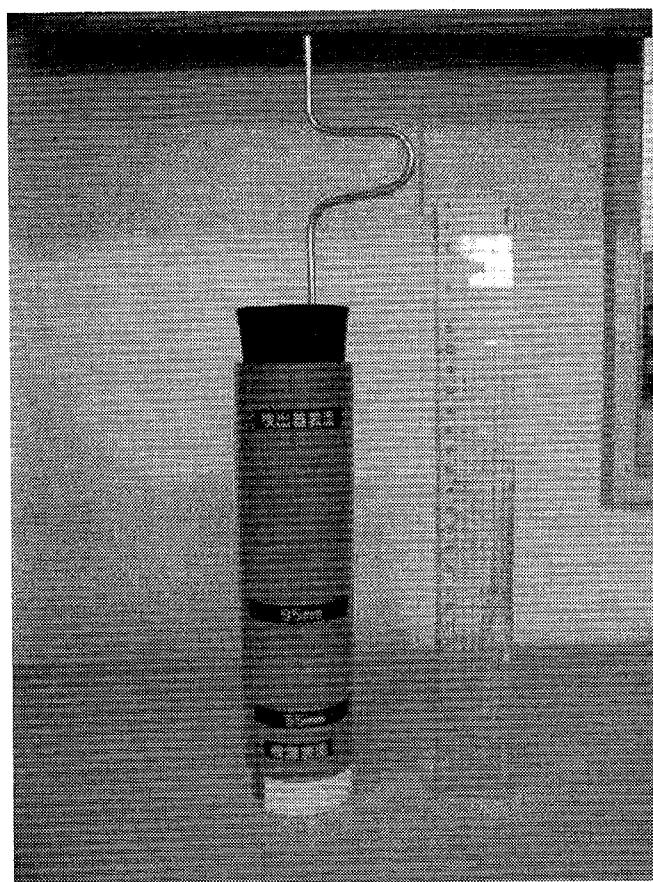


図 18 試験治具写真

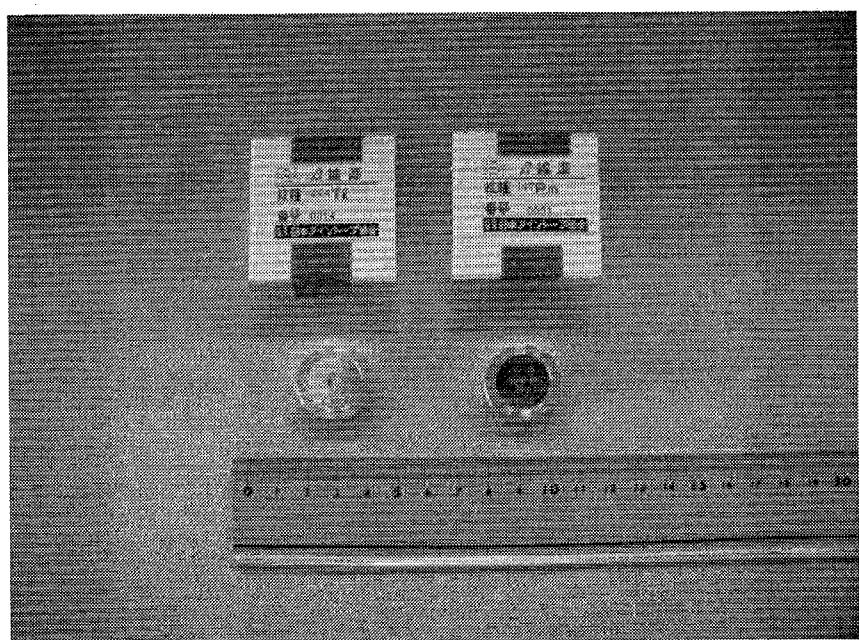


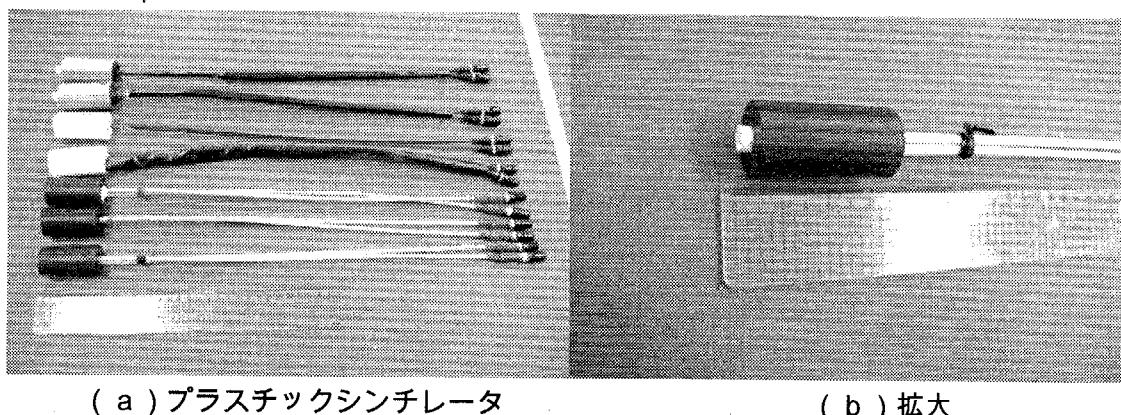
図 19 線源(左: ^{204}Tl 、右: ^{147}Pm)

(3) プラスチックシンチレータの形状寸法

プラスチックシンチレータの形状によって、プラスチックシンチレータ内での発光効率とその光がファイバに入射するまでの伝播損失が変化するため、最適形状を検討した。

プラスチックシンチレータの径が大きくなれば線源側に面した表面積は大きくなり入射放射線が増えることになるものの、入射後に発する光がプラスチックシンチレータ内部を伝播する距離は平均的に長くなりファイバでの集光効率は悪くなる。プラスチックシンチレータの厚みが薄くなれば、プラスチックシンチレータ表面からファイバまでの伝播距離は短くなるものの、ファイバの光入射角に相当する領域は狭くなる。

上記にプラスチックシンチレータ加工上の制約を考慮して、プラスチックシンチレータの径と厚みをパラメータとした5種類10個のプラスチックシンチレータを試作し、空気中の感度測定を実施した。試作したプラスチックシンチレータの写真を図20に示す。また、プラスチックシンチレータの寸法および測定したカウント数を、表9および図21にまとめた。各々の条件で3回ずつ測定を実施した。この結果、2つの線源核種を用いて得られた結果から高感度が得られたプラスチックシンチレータは、No.5であった。



(a) プラスチックシンチレータ

(b) 拡大

図20 プラスチックシンチレータ

表 9 プラスチックシンチレータ形状の比較

		Count						備考 空気100%	
核種		^{147}Prm (370kBq)			^{204}TI (370kBq)				
検出器 (シンチレータ)		測定時間100s			測定時間300s				
No.	形状	線源距離10mm			線源距離100mm				
No.5-1	10φ-2t	1018	1456	1326	1256	1265	1206		
-2		1328	1257	1249	1334	1380	1443		
No.6-1	5φ-2t	1280	1360	1428	990	1088	1192		
-2		655	662	638	672	668	651		
No.7-1	5φ-1t	941	1128	1062	884	1044	960		
-2		1275	1548	1653	887	1032	1117		
No.8-1	3φ-2t	1180	1407	1265	764	887	835		
-2		937	1009	1001	849	858	780		
No.10-1	10φ-1t	1237	1345	1359	1011	1183	1017		
-2		1033	1277	1175	791	920	877		

※各々の条件で 3 回測定

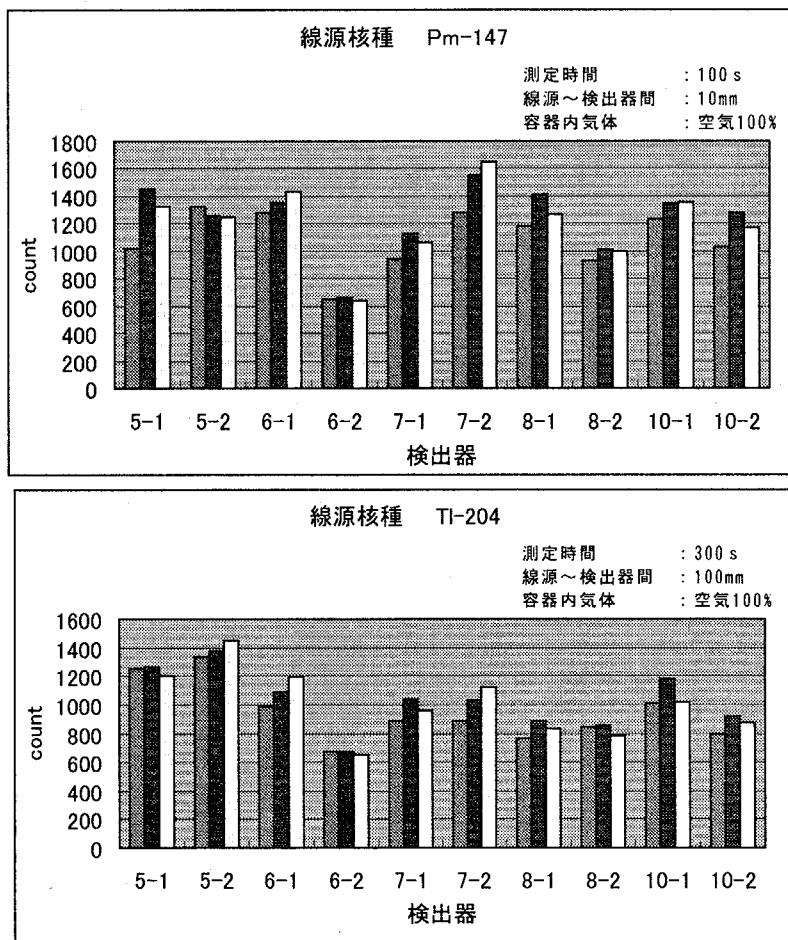


図 21 プラスチックシンチレータの比較

2.3.4 試験結果と評価

(1) 試験条件

試験条件を表 10 にまとめる。

表 10 アクティブ検出法における試験評価パラメータ

試験パラメータ		備考
β線源核種	2核種(平均エネルギー、半減期) Pm-147(224keV、2.623y) Tl-204(764keV、3.78y)	
ヘリウムガス流量	5種類 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0cm ³ /s	
検出器-線源間距離	5種類 Pm-147: 20, 40, 60, 80, 100mm Tl-204: 100, 125, 150, 175, 200mm	
センサ(検出器)	プラスチックシンチレータ(プラスチックシンチレータ)	10Φ-2t(mm)
捕集器	円筒形	
外部放射線の遮へい	遮へいなし	外部放射線影響なし

(2) 漏えい判定の概念

一定時間毎にアクティブ検出器内の計数を測定し、このときの計数の $\pm 3\sigma$ を誤差としてプロットする。ヘリウムガス漏えい前の計数で、計数プラス 3σ が最大となる値と、ヘリウムガスの漏えい後、計数が上昇し平衡に達した計数で、計数マイナス 3σ が最小となる値の差を、空気とヘリウムガスの計数差と定義する。両者の中間値をしきい値として設定し、計数マイナス 3σ が、しきい値よりも大きくなつた点をヘリウムガスの漏えいが発生したと判断する点とする。漏えい開始から、漏えい判定までの時間を検出時間とし、計数が平衡に達するまでの時間をヘリウムガスの充填時間とする。また、ヘリウムガス漏えい前までの計数(空気のときの計数)の平均値を N_0 、ヘリウムガス充填後の計数の平均値を N_1 として、この計数比 N_1/N_0 を増加率と呼ぶことにする。以上、概念を図 22 に示す。

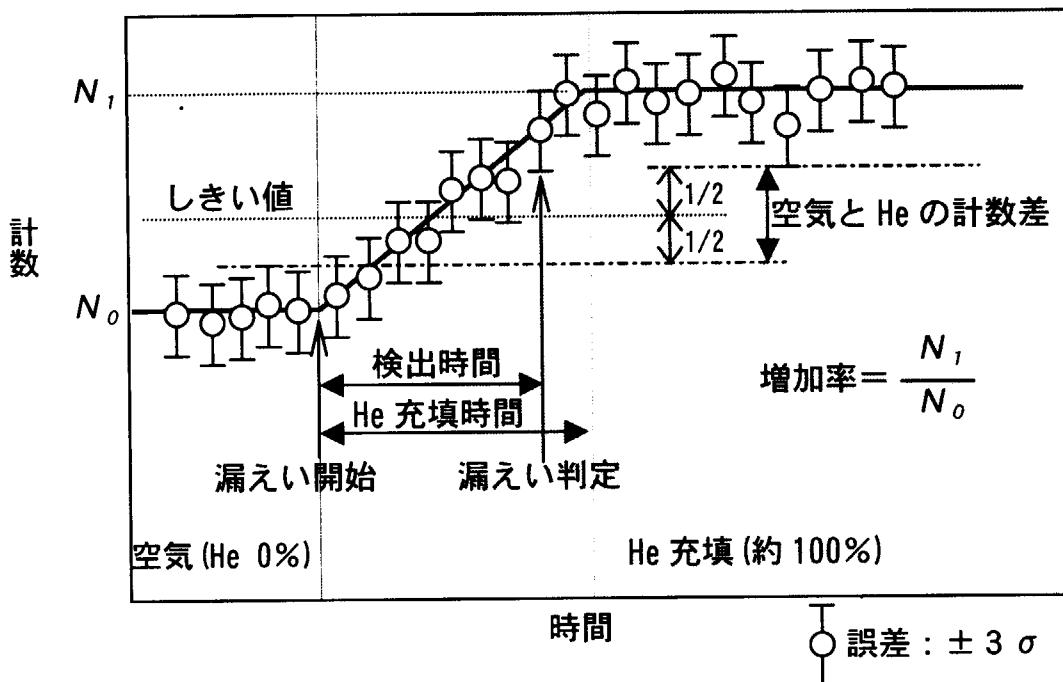


図 22 漏えい判定の概念

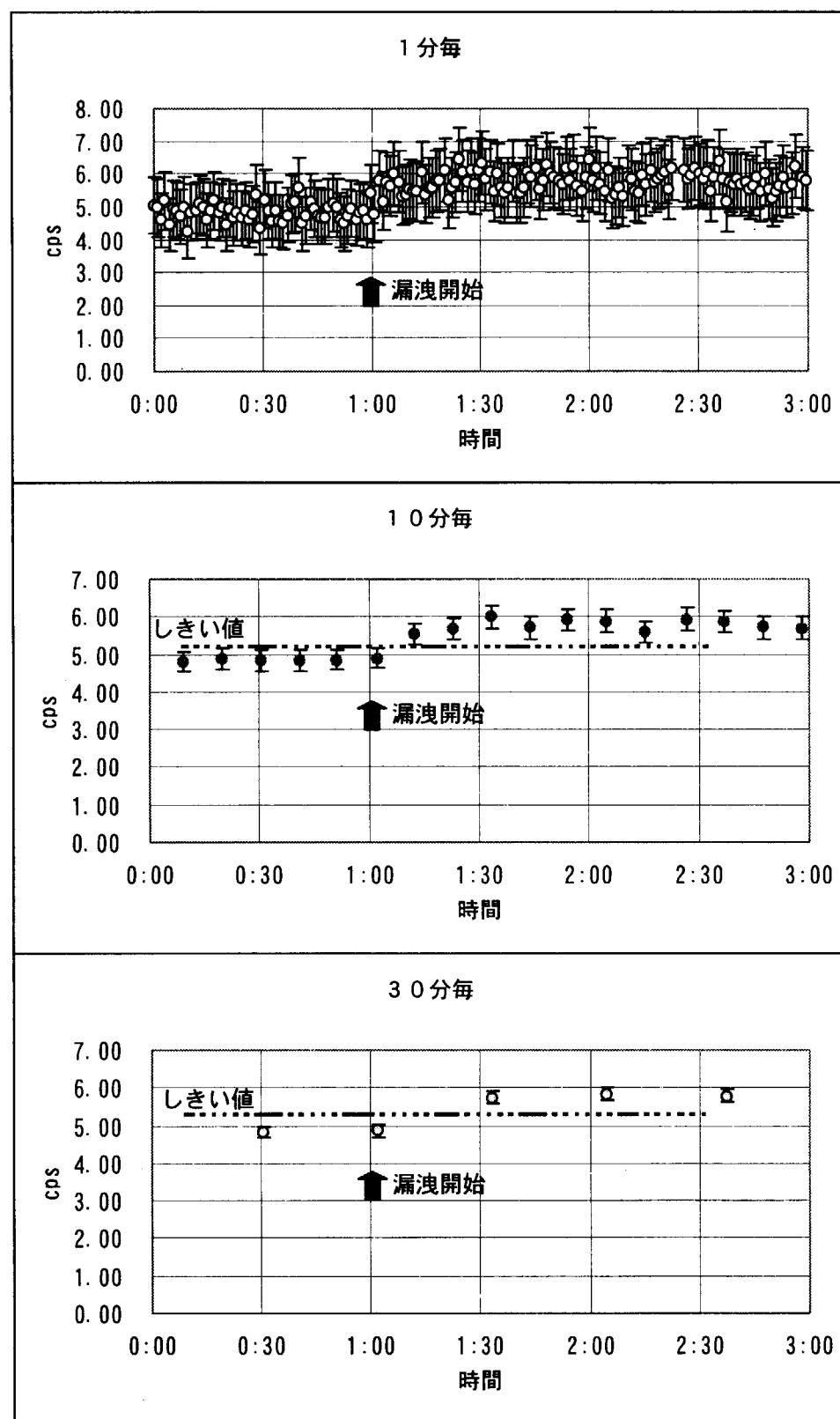
(3) 測定結果

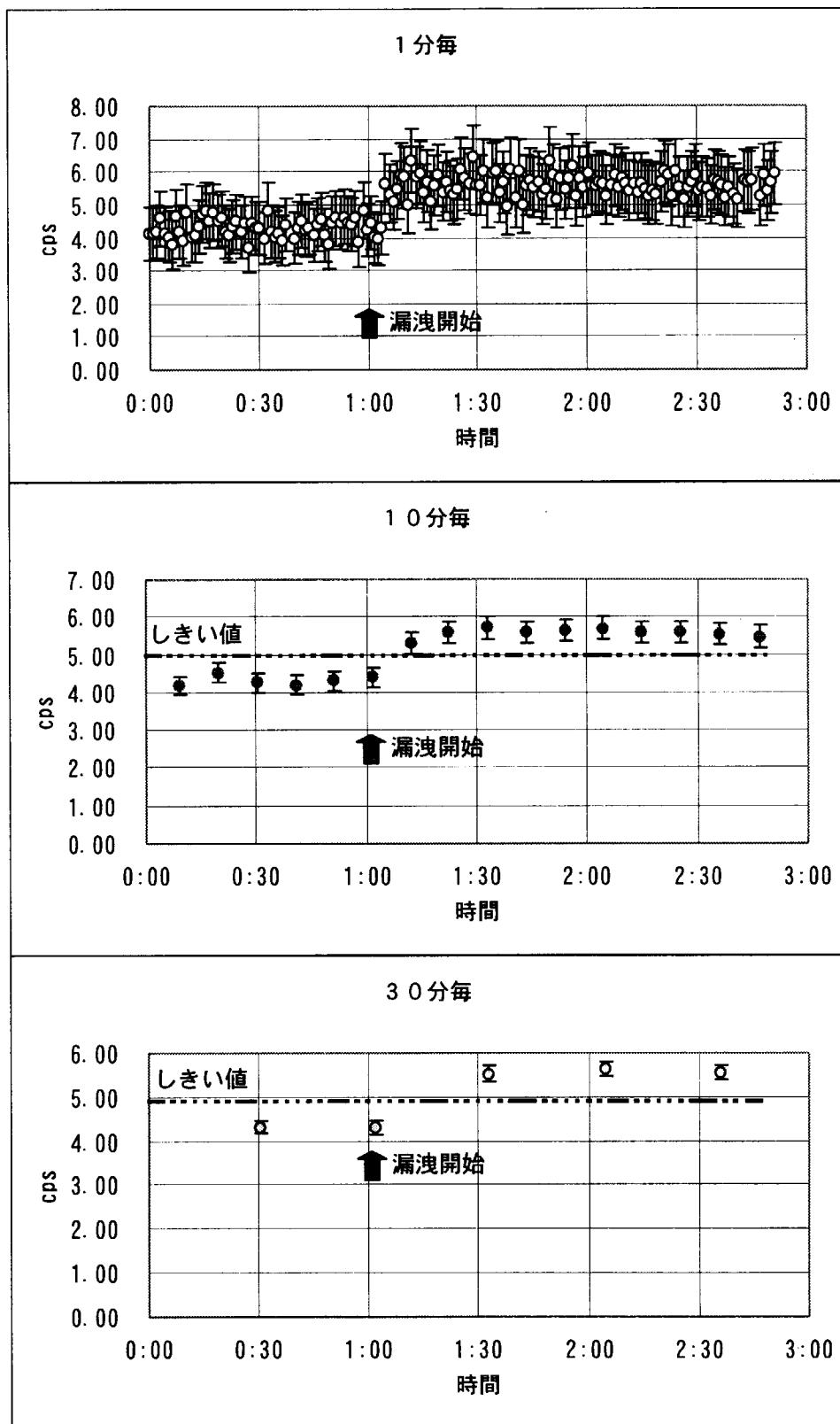
測定データの一例を図 23～図 38 に示す。各々 1 分、10 分、30 分毎の時間間隔で計数をプロットした。測定開始後一定の時間は空気のみの状態で測定し、ヘリウムガス漏えいを模擬してヘリウムガスを捕集器に流し込んでそのときの計数の変化をモニタした。しきい値が表示されていない図はヘリウムガス漏えいの有無が判定できないものである。

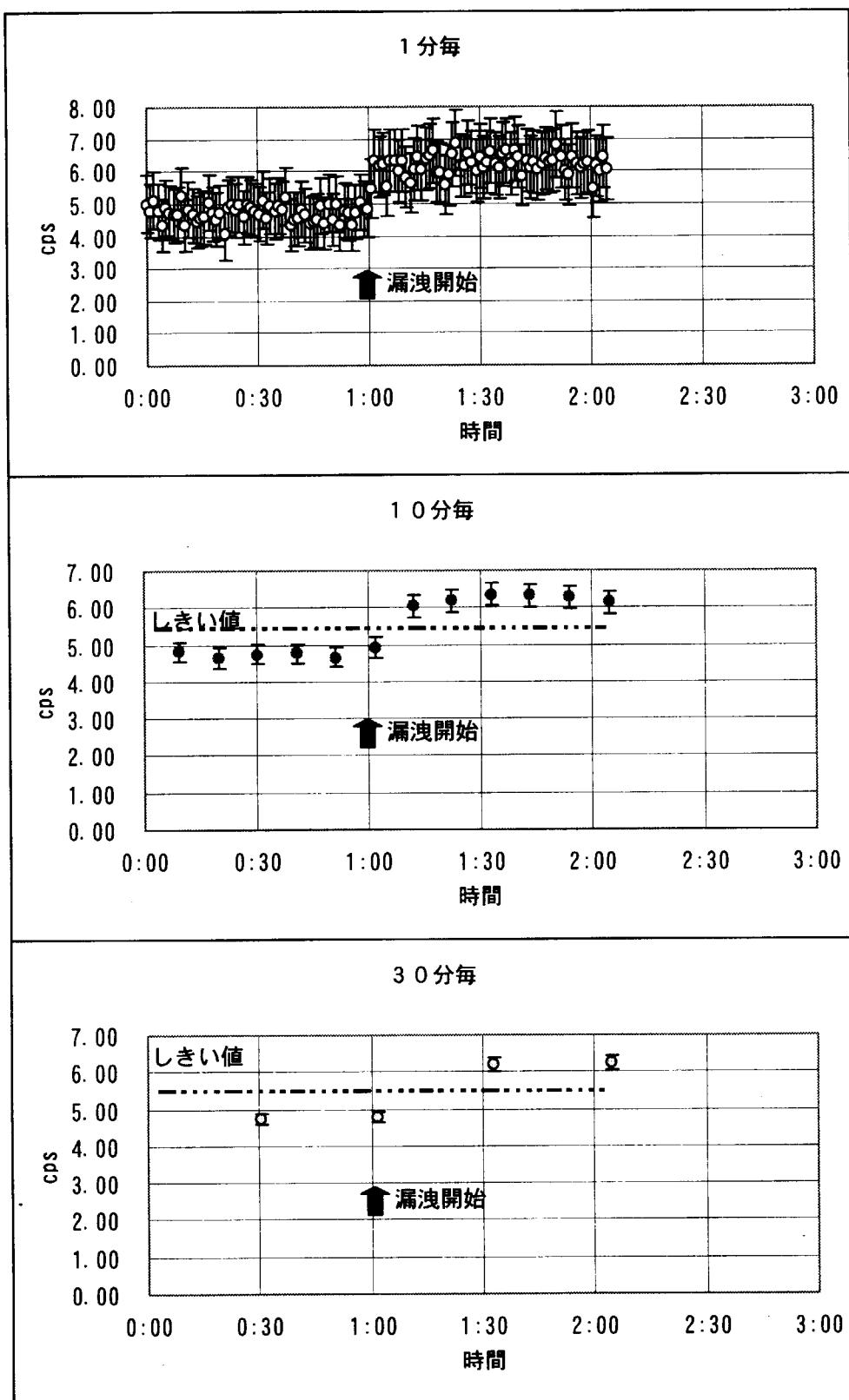
何れの条件下においてもヘリウムガス流入後に計数の増加が見られ、数分から数十分で計数はほぼ平衡に達した。なお、今回の試験条件において測定時間間隔を 30 分とすれば、何れの条件下でもヘリウムガス漏えいが判定可能であった。

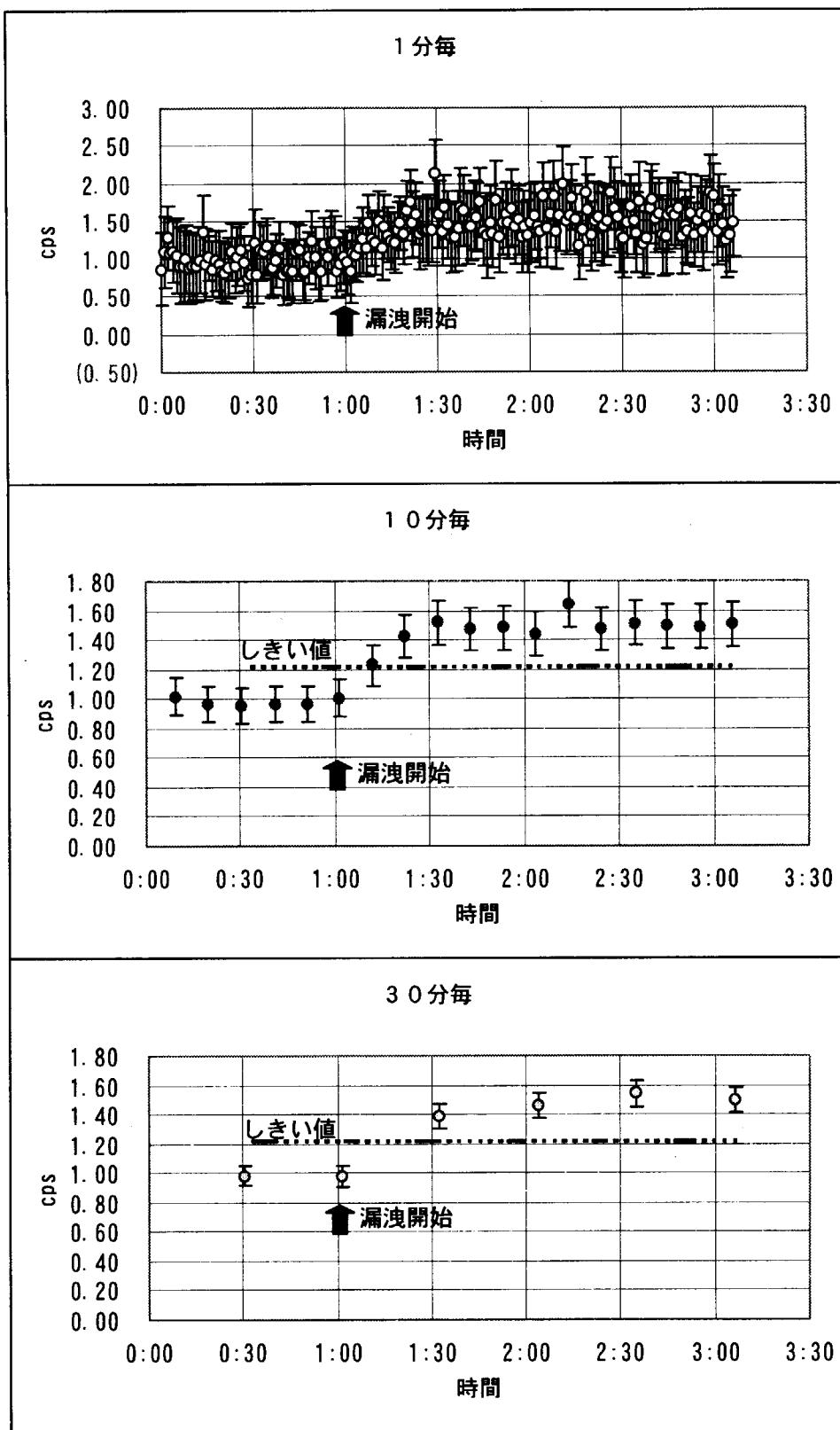
(4) 誤差について

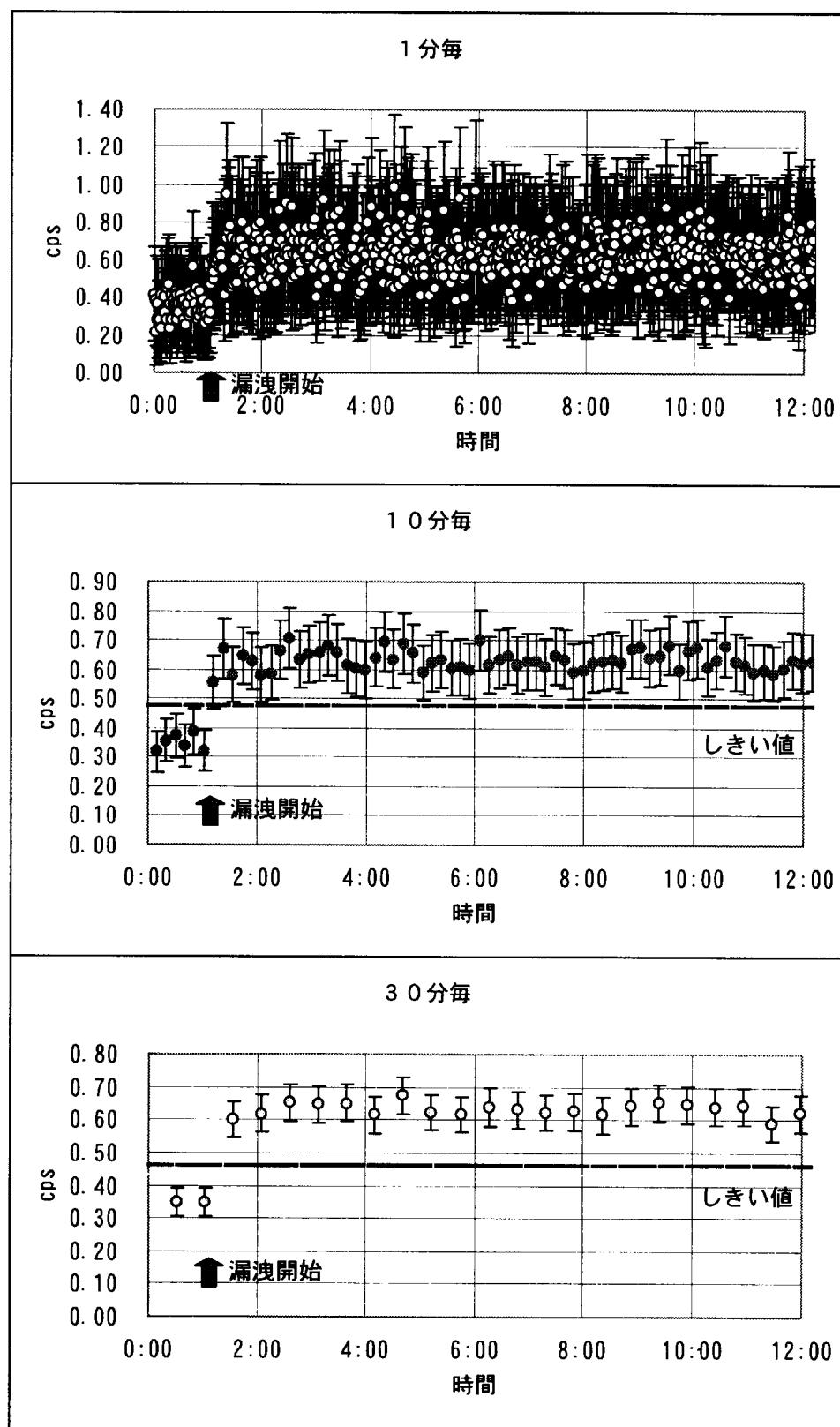
放射線の計測における、計数誤差の扱いは重要である。本研究の場合には、ヘリウムガスの漏えい判定という、原子炉の安全・安定運転には極めて重要な評価を行うため、十分な測定精度が必要である。そのため判定に用いる計数誤差は $\pm 3\sigma$ とした。測定誤差としてみれば計数自体以外にも誤差要因は考えられるが、計数誤差を $\pm 3\sigma$ としたことに加えて、空気およびヘリウムガス充填の各々安定状態で数十分から数時間、あるいは 10 時間以上の測定を行った評価(図 28)をしていること(データの点数が多く、それらのばらつきも含めて評価していること)により、本研究では十分な評価精度が得られていると考えている。

図 23 ^{147}Pm (線源 ~ 検出器 20mm, He 流量 $0.2\text{cm}^3/\text{s}$) による試験結果

図 24 ^{147}Pm (線源 ~ 検出器 20mm, He 流量 $0.5\text{cm}^3/\text{s}$) による試験結果

図 25 ^{147}Pm (線源 ~ 検出器 20mm, He 流量 5.0cm³/s) による試験結果

図 26 ^{147}Pm (線源 ~ 検出器 40mm, He 流量 $0.2\text{cm}^3/\text{s}$) による試験結果

図 27 ^{147}Pm (線源 ~ 検出器 60mm, He 流量 $0.2\text{cm}^3/\text{s}$) による試験結果

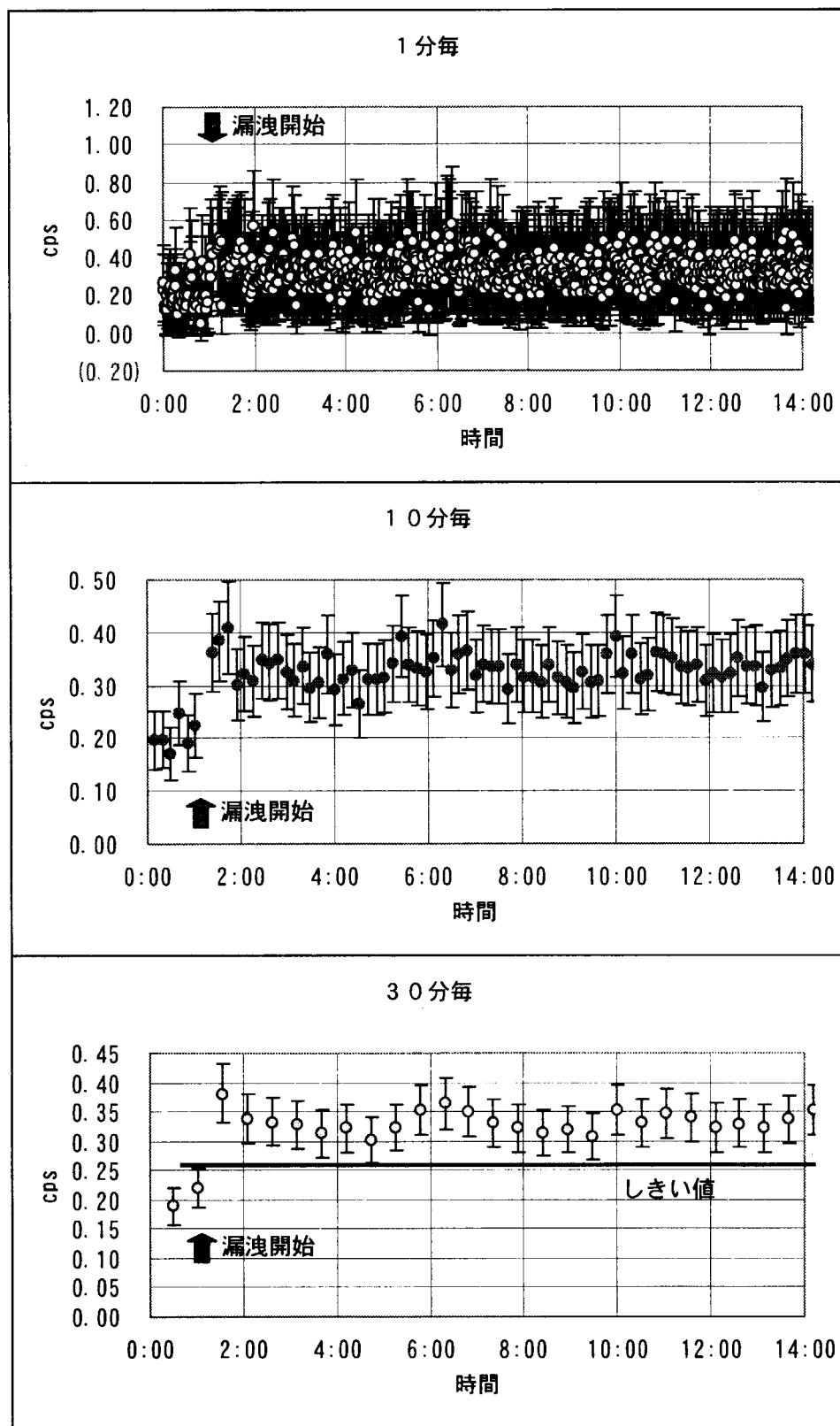
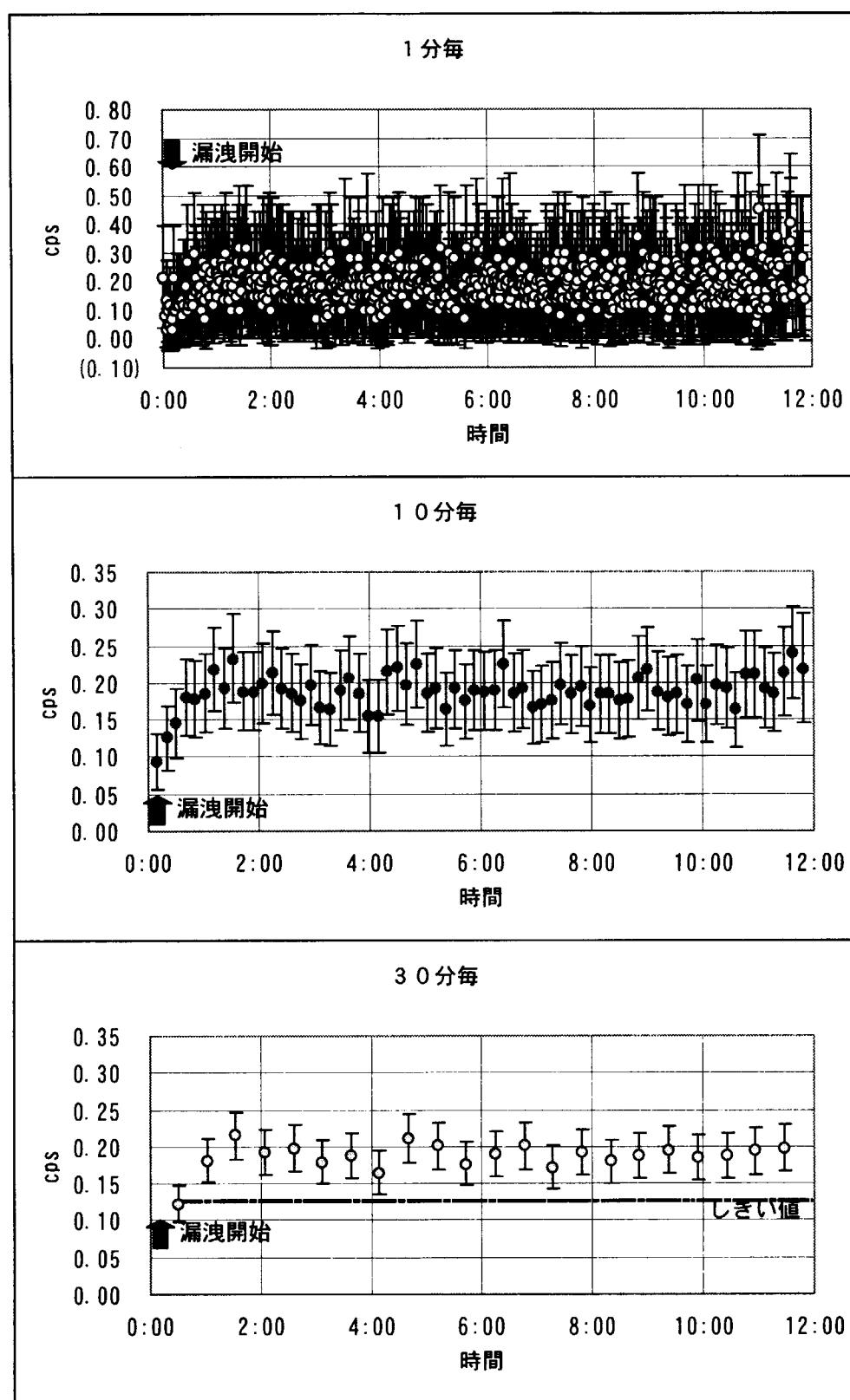
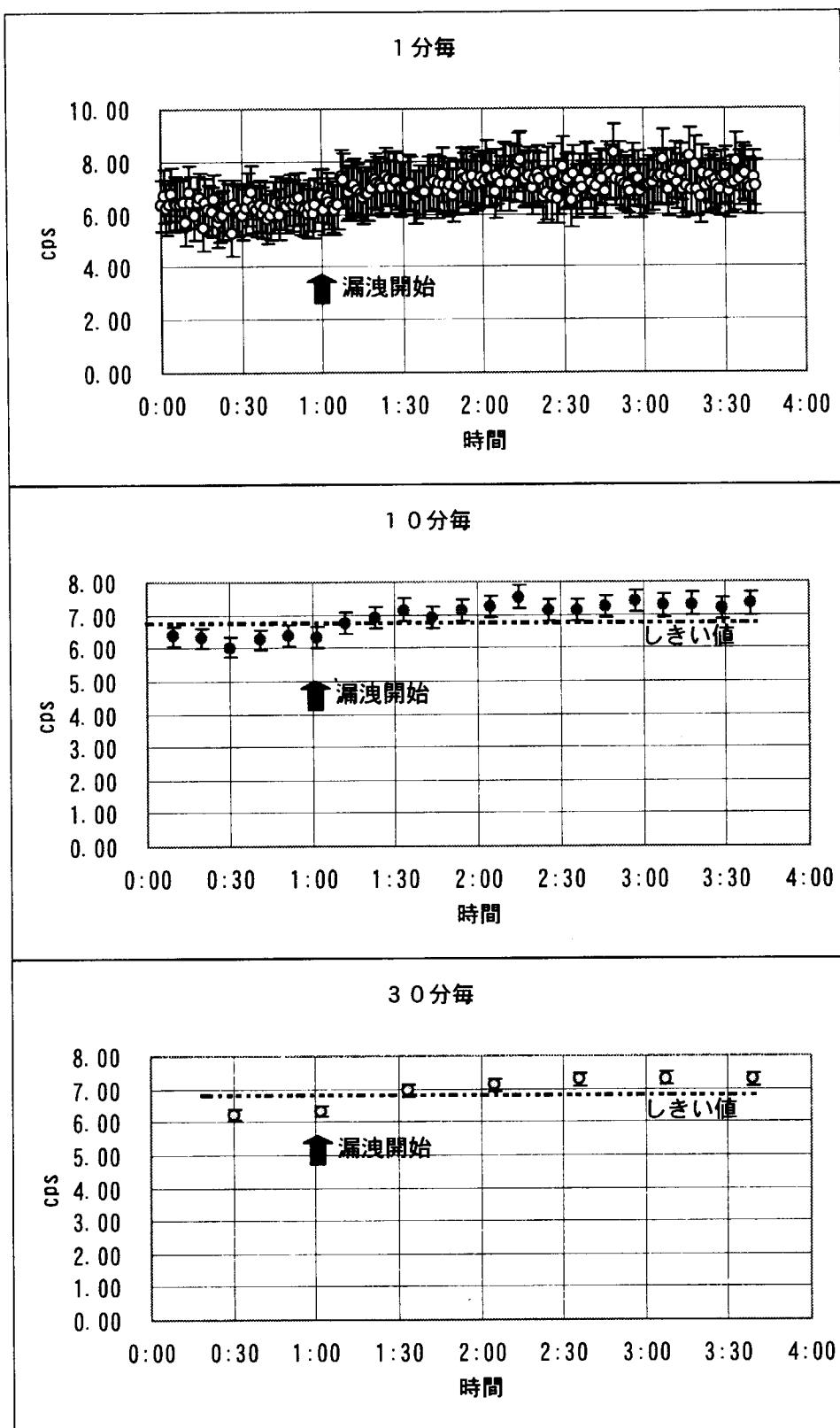
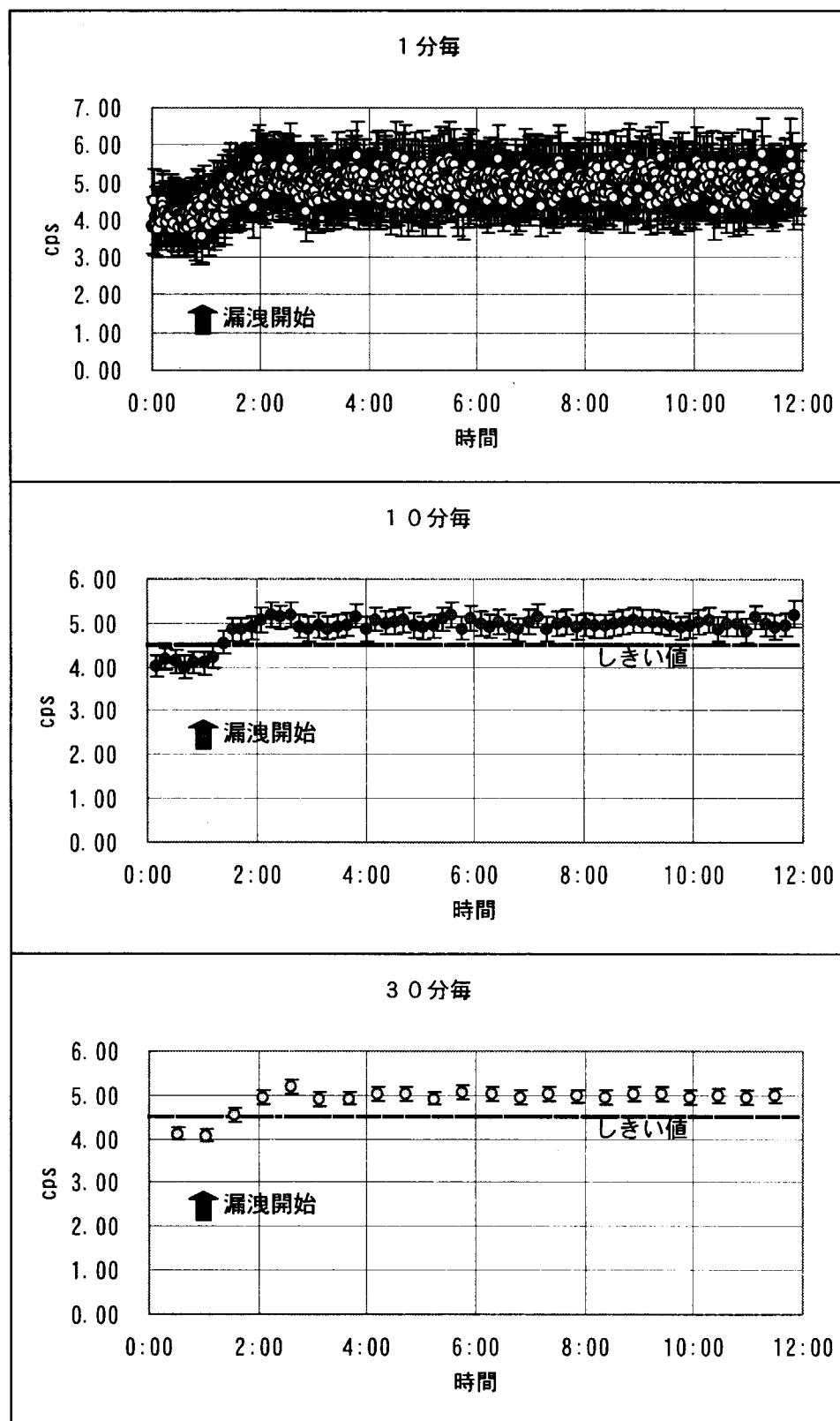
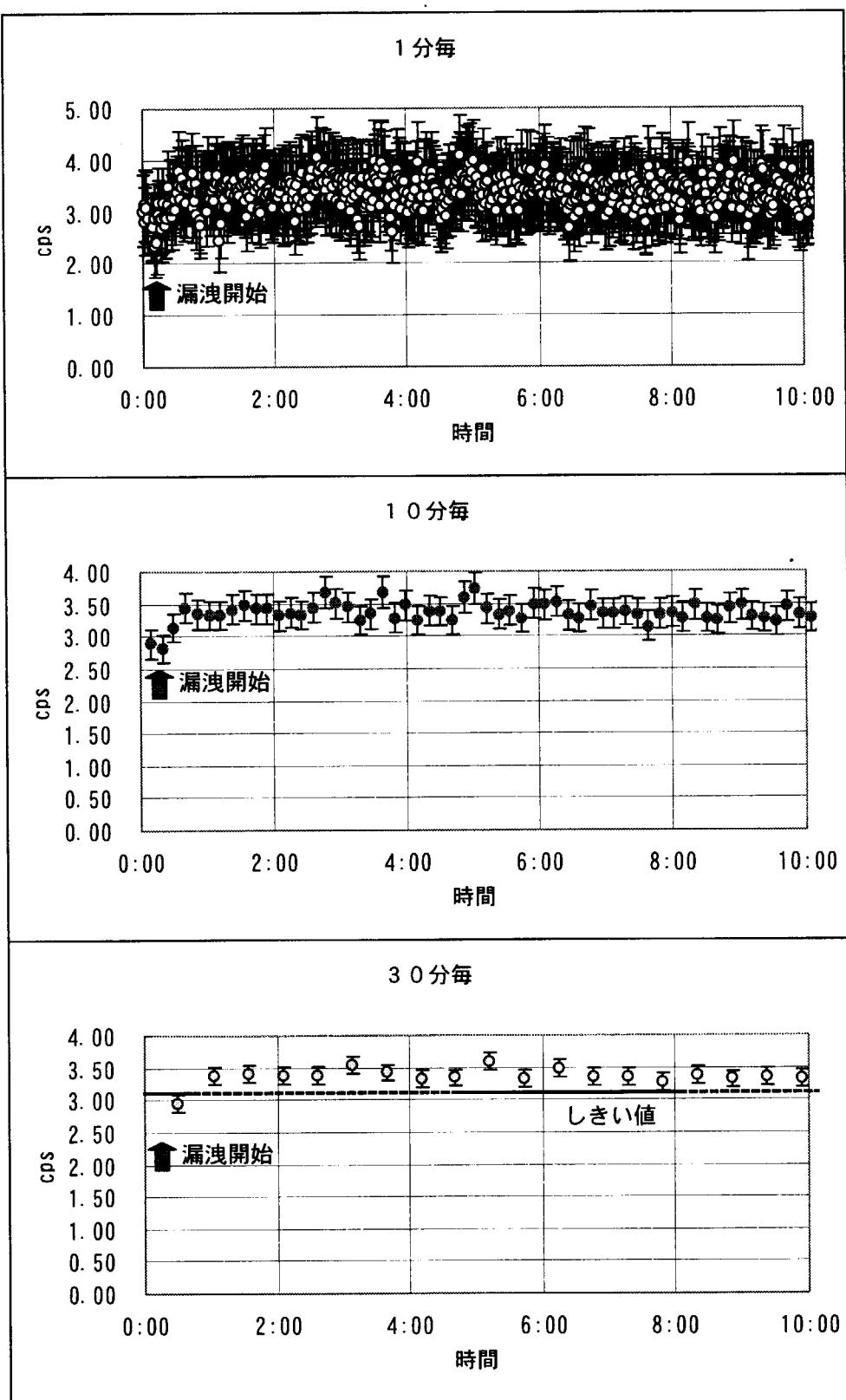


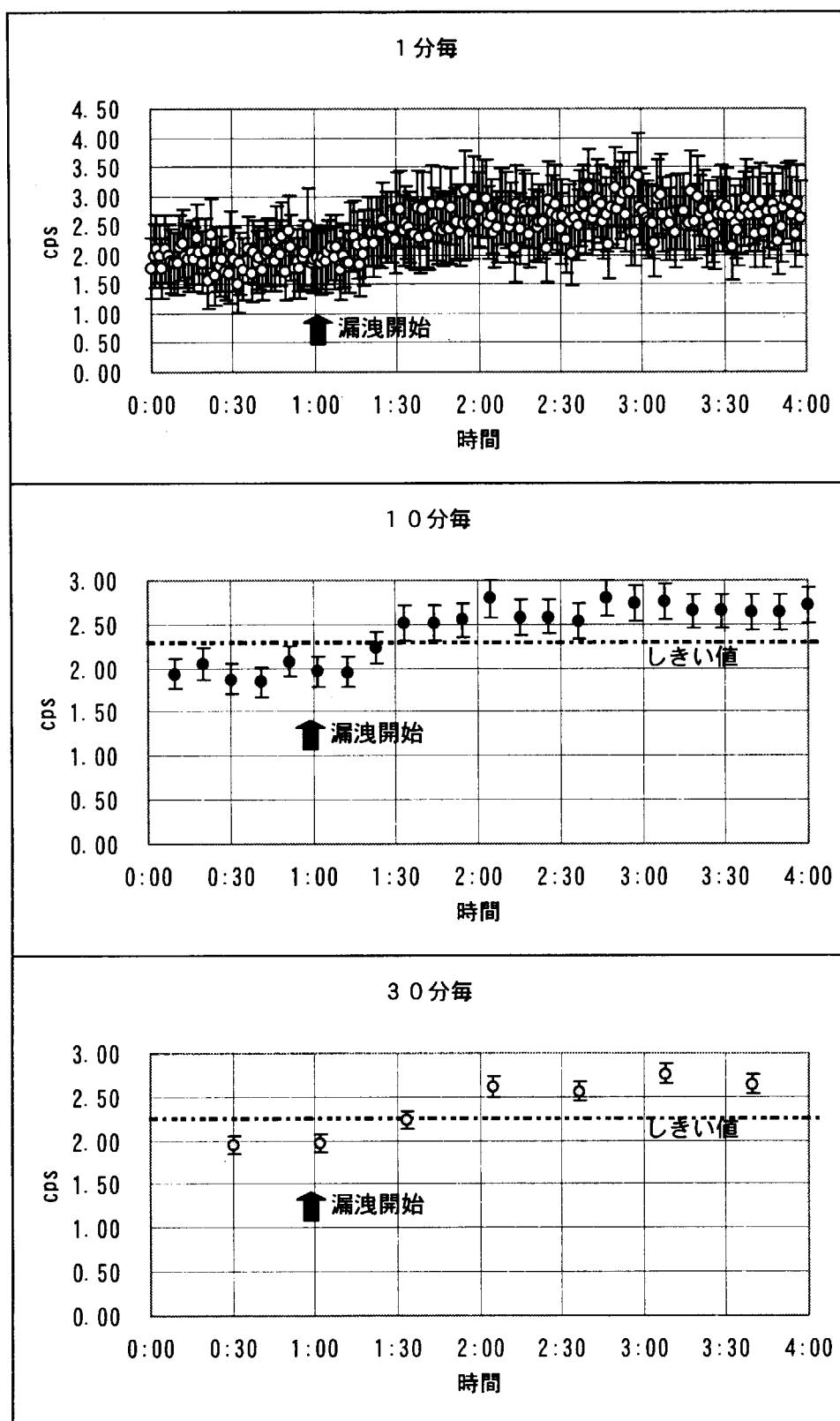
図 28 ^{147}Pm (線源 ~ 検出器 80mm, He 流量 $0.2\text{cm}^3/\text{s}$) による試験結果

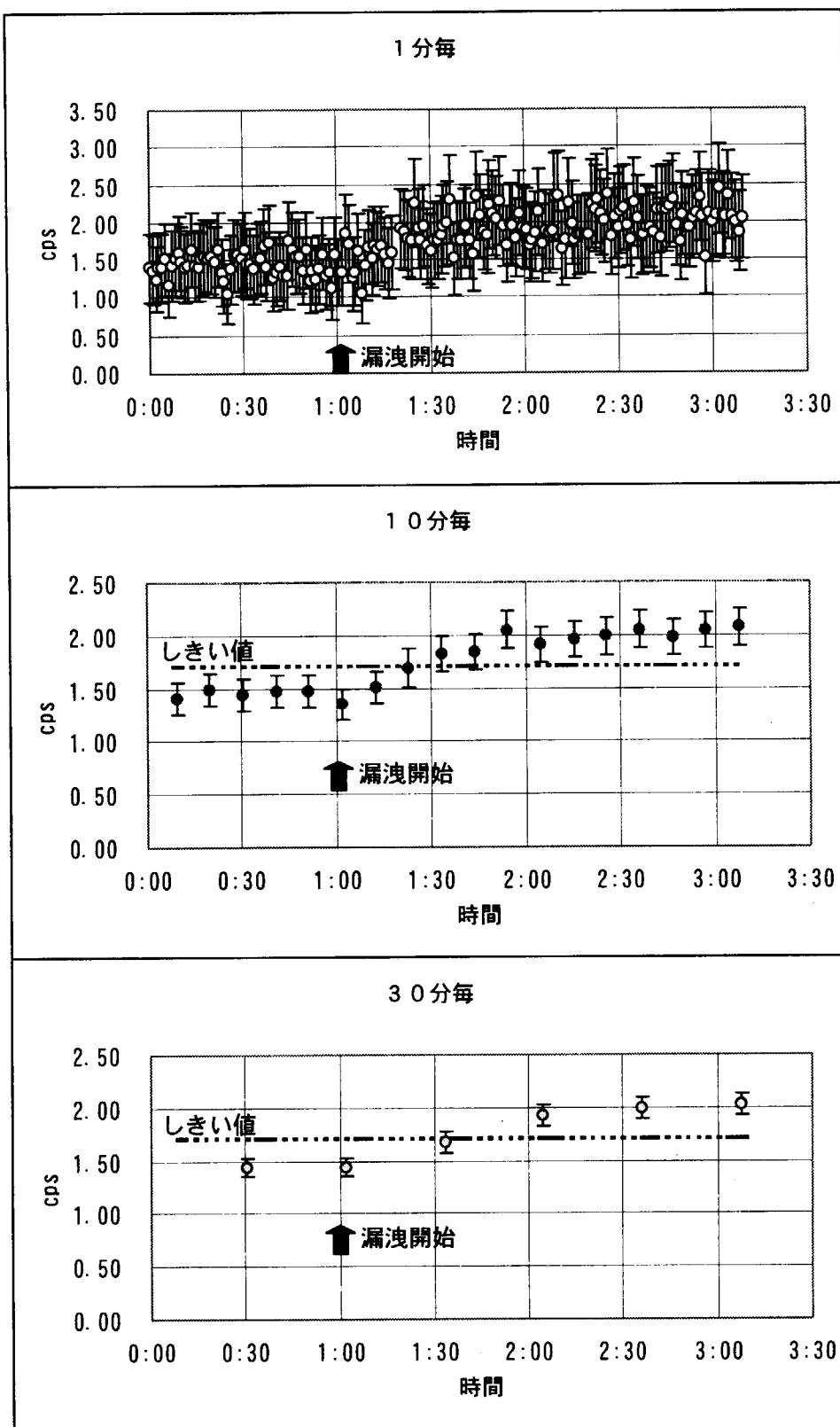
図 29 ^{147}Pm (線源 ~ 検出器 100mm, He 流量 $0.2\text{cm}^3/\text{s}$) による試験結果

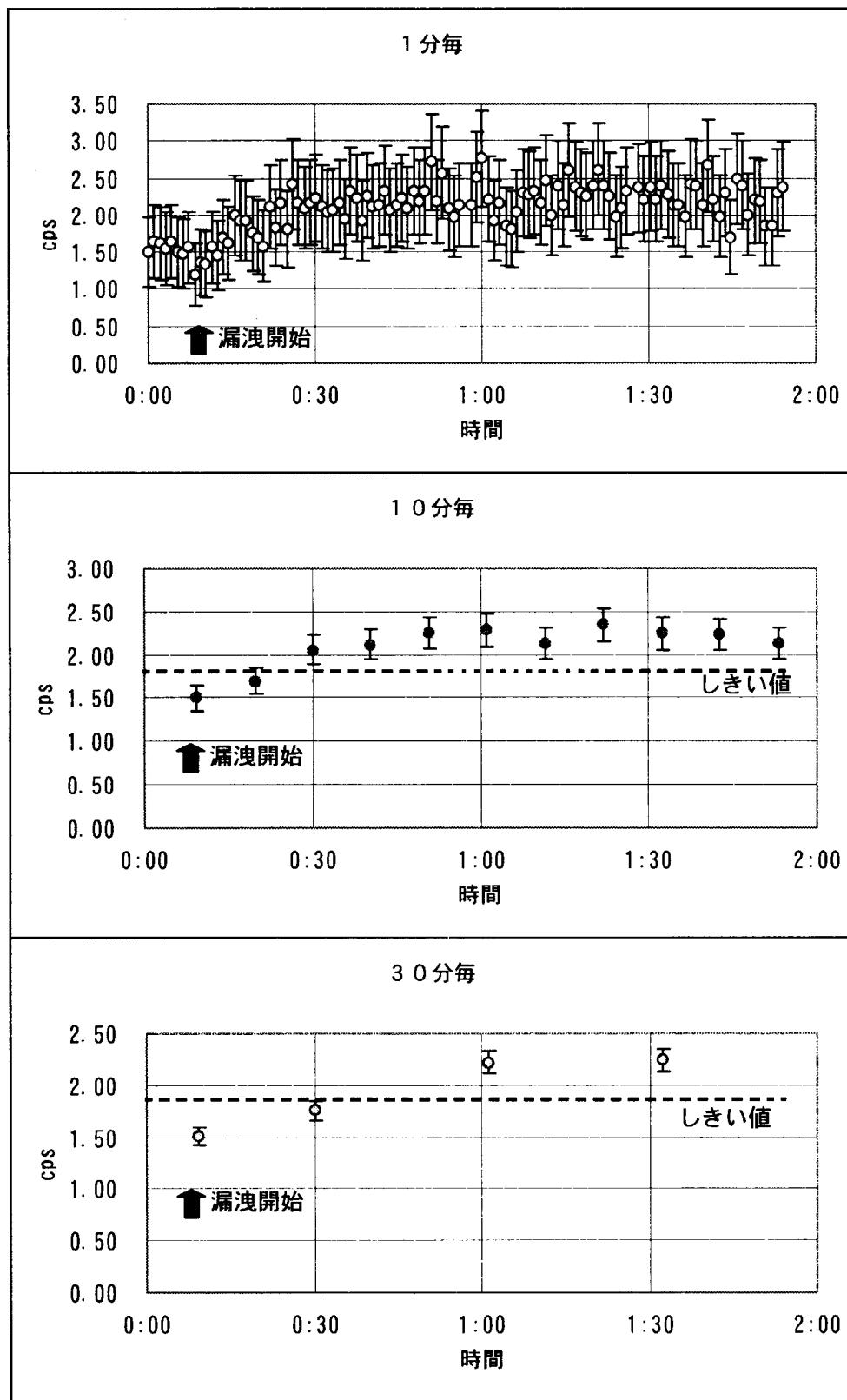
図 30 ^{204}TI (線源 ~ 検出器 100mm, He 流量 $0.2\text{cm}^3/\text{s}$) による試験結果

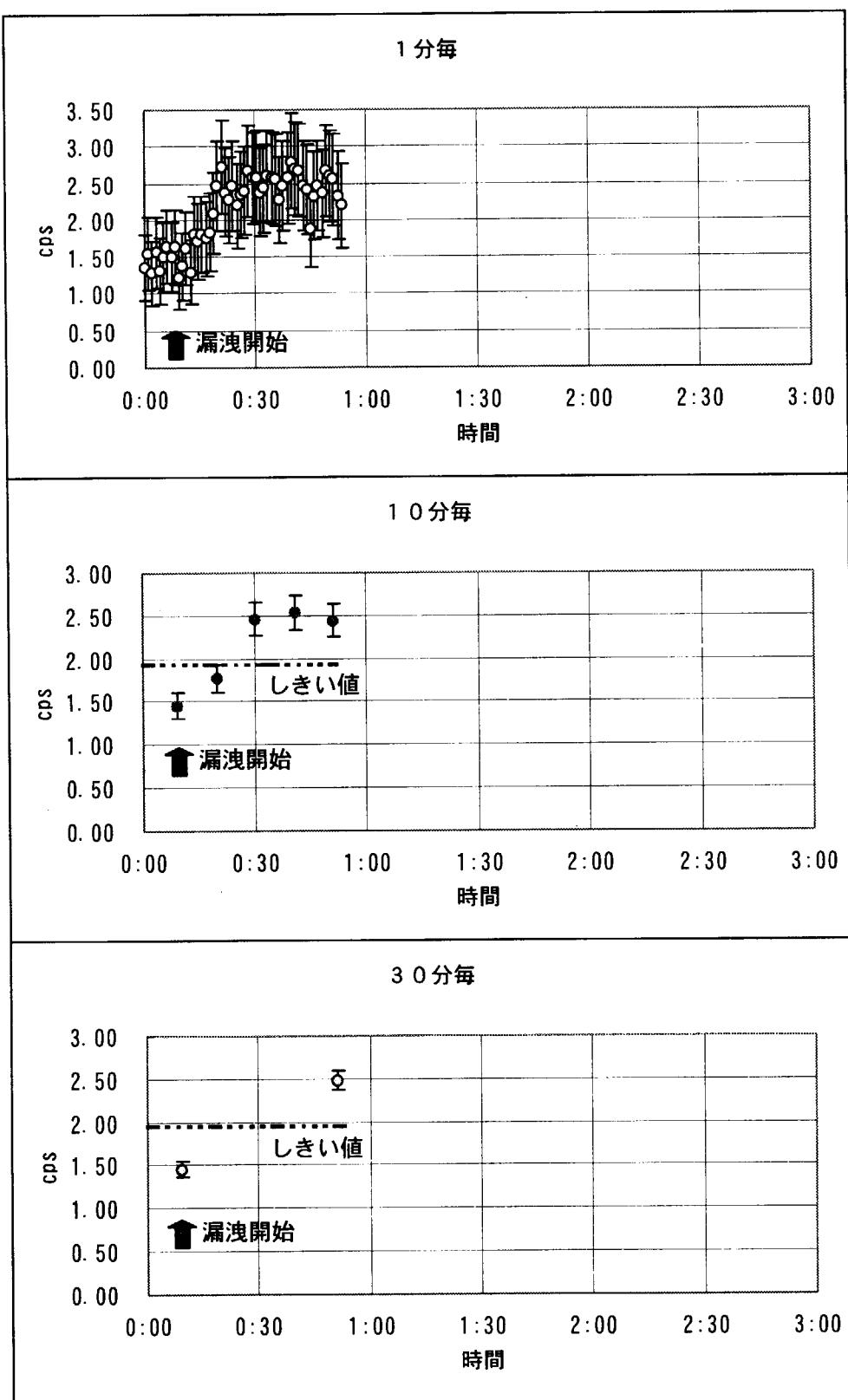
図 31 ^{204}TI (線源 ~ 検出器 125mm, He 流量 $0.2\text{cm}^3/\text{s}$) による試験結果

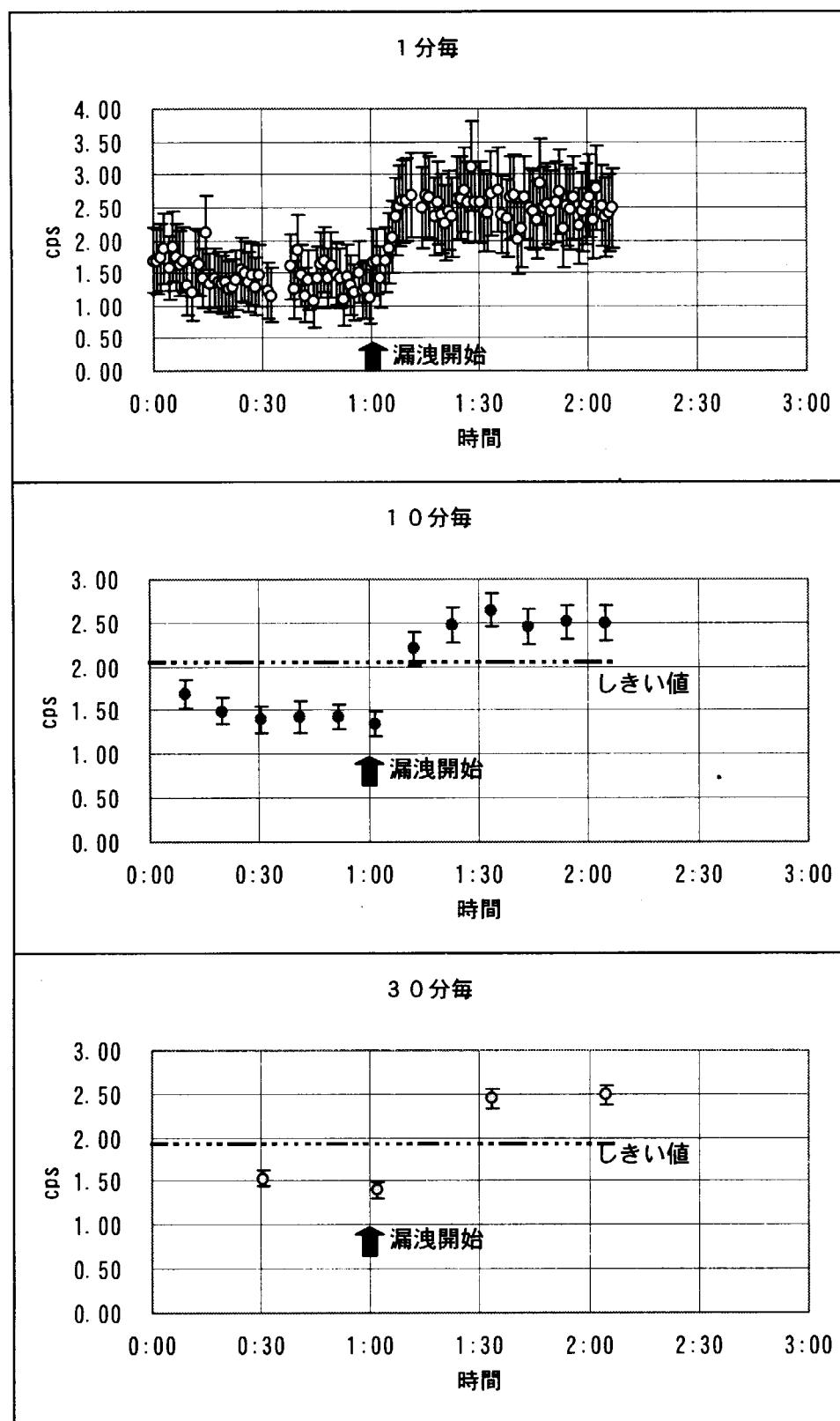
図 32 ^{204}TI (線源 ~ 検出器 150mm, He 流量 $0.2\text{cm}^3/\text{s}$) による試験結果

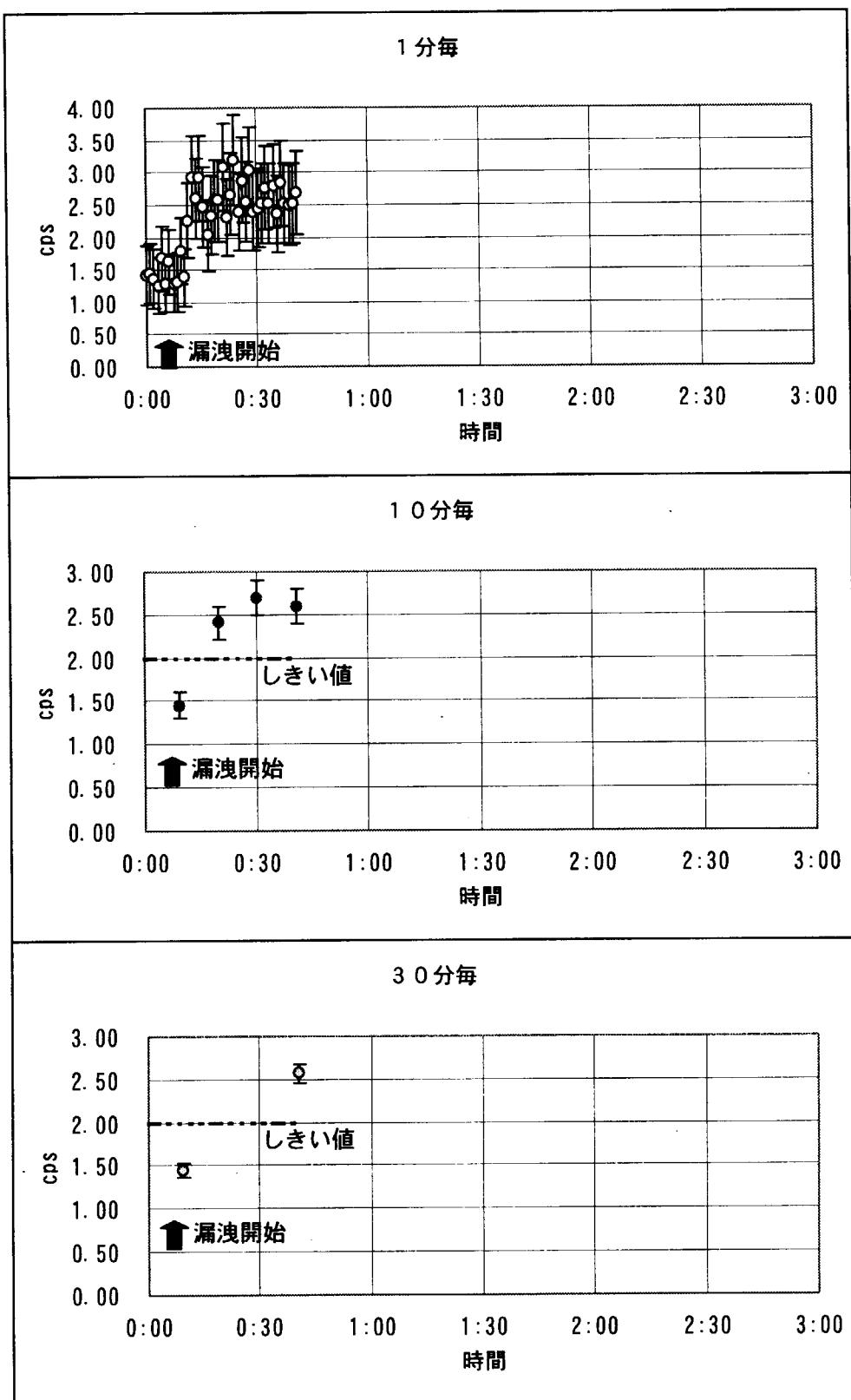
図 33 ^{204}TI (線源 ~ 検出器 175mm, He 流量 $0.2\text{cm}^3/\text{s}$) による試験結果

図 34 ^{204}TI (線源 ~ 検出器 200mm, He 流量 $0.2\text{cm}^3/\text{s}$) による試験結果

図 35 ^{204}TI (線源 ~ 検出器 200mm, He 流量 $0.5\text{cm}^3/\text{s}$) による試験結果

図 36 ^{204}TI (線源 ~ 検出器 200mm, He 流量 $1.0\text{cm}^3/\text{s}$) による試験結果

図 37 ^{204}TI (線源 ~ 検出器 200mm, He 流量 $2.0\text{cm}^3/\text{s}$) による試験結果

図 38 ^{204}TI (線源 ~ 検出器 200mm, He 流量 $5.0\text{cm}^3/\text{s}$) による試験結果

(5) 評価

① 線源-検出器間の距離

ヘリウムガス流量が最も小さい $0.2\text{cm}^3/\text{s}$ の場合に着目して、線源-検出器間の距離をパラメータとした評価を行った。図 39 に線源-検出器間の距離と初期計数率、空気とヘリウムガスでの計数の増加率を示す。測定時間間隔を 10 分とした場合である。初期計数率とは空気の計数率のことである。線源-検出器間の距離が長くなるに従いこの初期計数率はほぼログスケールで減少している。一方、増加率は線源-検出器間の距離が長くなるにしたがい値が増加しており、この傾向はシミュレーションと一致している。

図 40 に線源-検出器間の距離と初期計数率、ヘリウムガス充填時間を示す。線源-検出器間の距離が長くなるに従いヘリウムガス充填時間も長くなる。これは計数率変化から読みとっていることもあり、きれいな直線とはならなかつたがほぼ比例している。捕集器の構造上、線源-検出器間の距離と捕集器の内容積はほぼ比例関係にあるため予想できる結果であった。

図 41 および図 42 に線源-検出器間の距離と空気とヘリウムガスの計数差、検出時間、ヘリウムガス充填時間を示す。測定時間間隔は 10 分と 30 分の両方を示した。線源に ^{147}Pm を用いた場合、線源-検出器間の距離が短くなるに従い空気とヘリウムガスの計数差(3σ比)が大きくなつた。さらに測定時間間隔は 10 分では線源-検出器間の距離が 80mm、100mm の場合、ヘリウムガス漏えいの判別ができなかつた。すなわち線源-検出器間の距離が短い方がヘリウムガス漏えいの判別がより明確にできることを示している。一方、線源に ^{204}TI を用いた場合では線源-検出器間の距離が長くなるに従い空気とヘリウムガスの計数差(3σ比)が大きくなつた。

これらの結果から、線源に ^{147}Pm を用いた場合では線源-検出器間の距離を 20mm、線源に ^{204}TI を用いた場合では線源-検出器間の距離を 200mm の条件で、ヘリウムガスの流量評価を行うことにした。

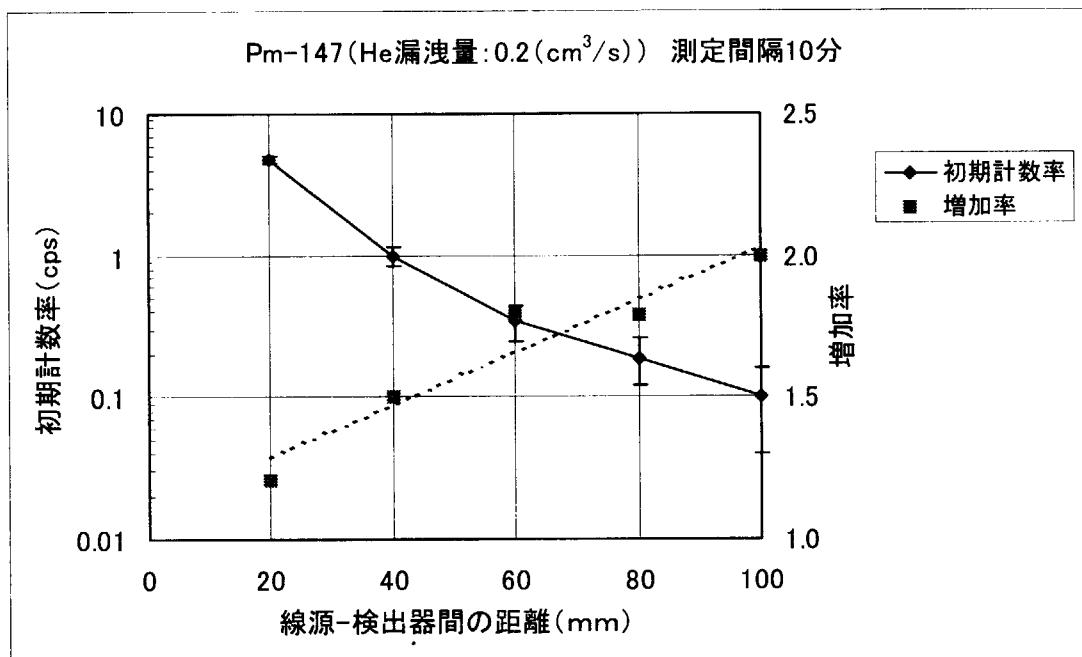
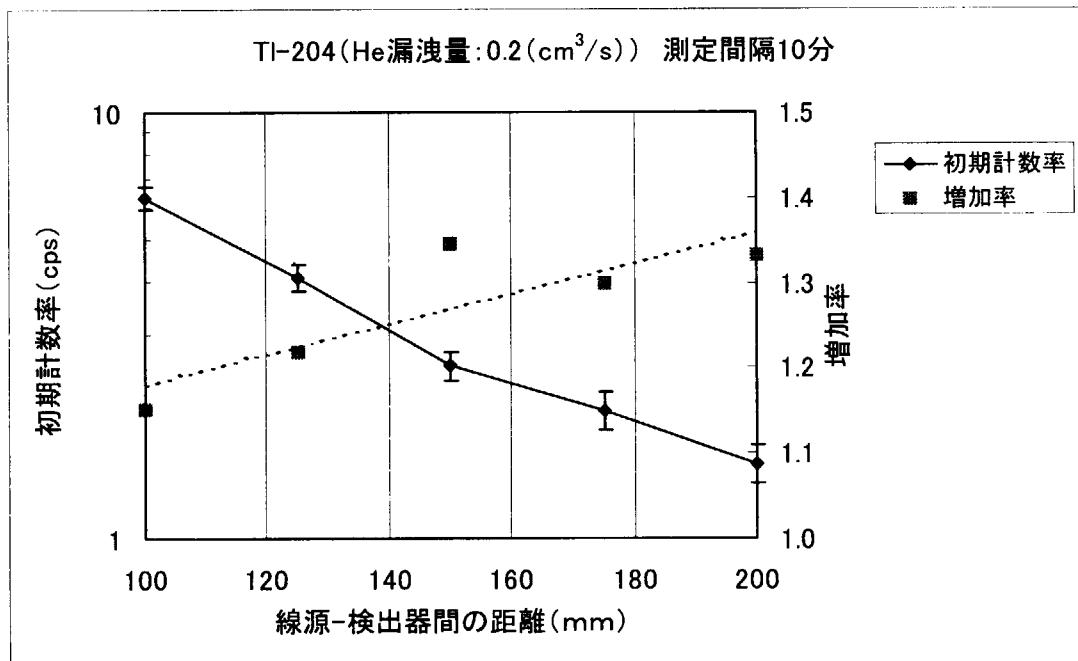
(a) ¹⁴⁷Pm(b) ²⁰⁴Tl

図 39 線源-検出器間の距離の変化(1)

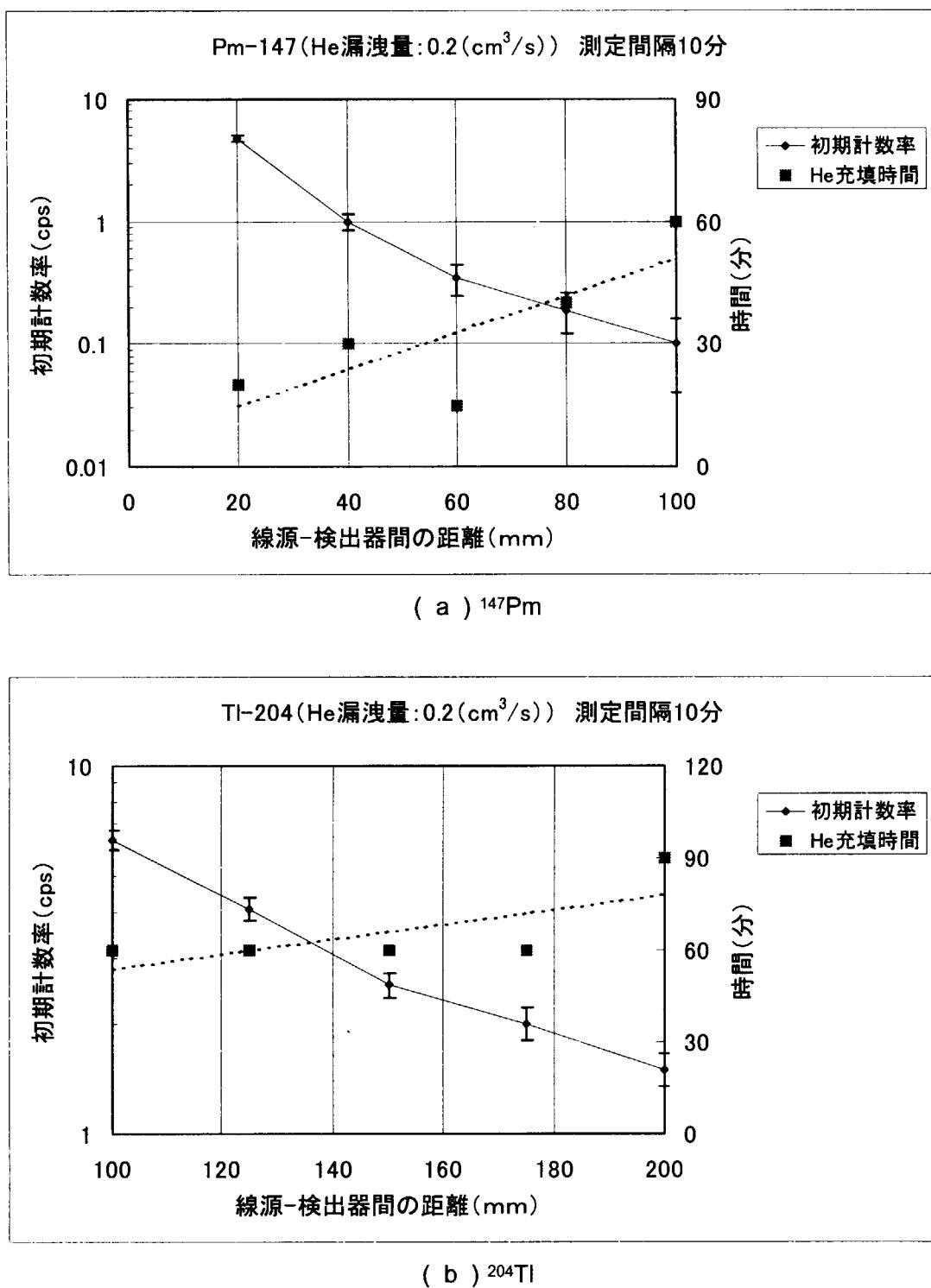
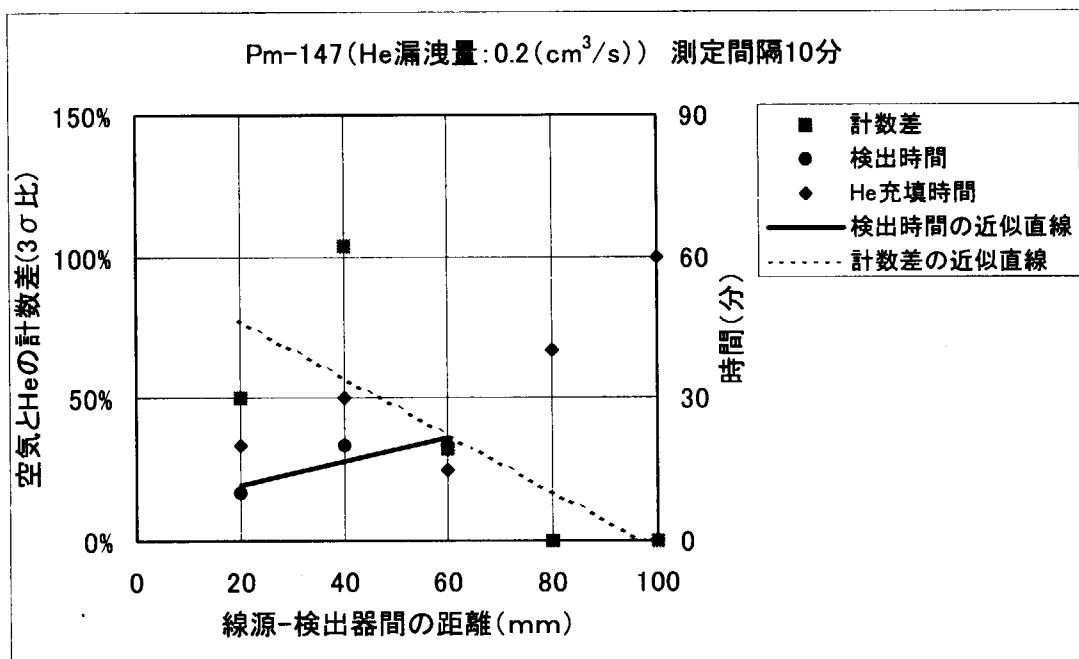
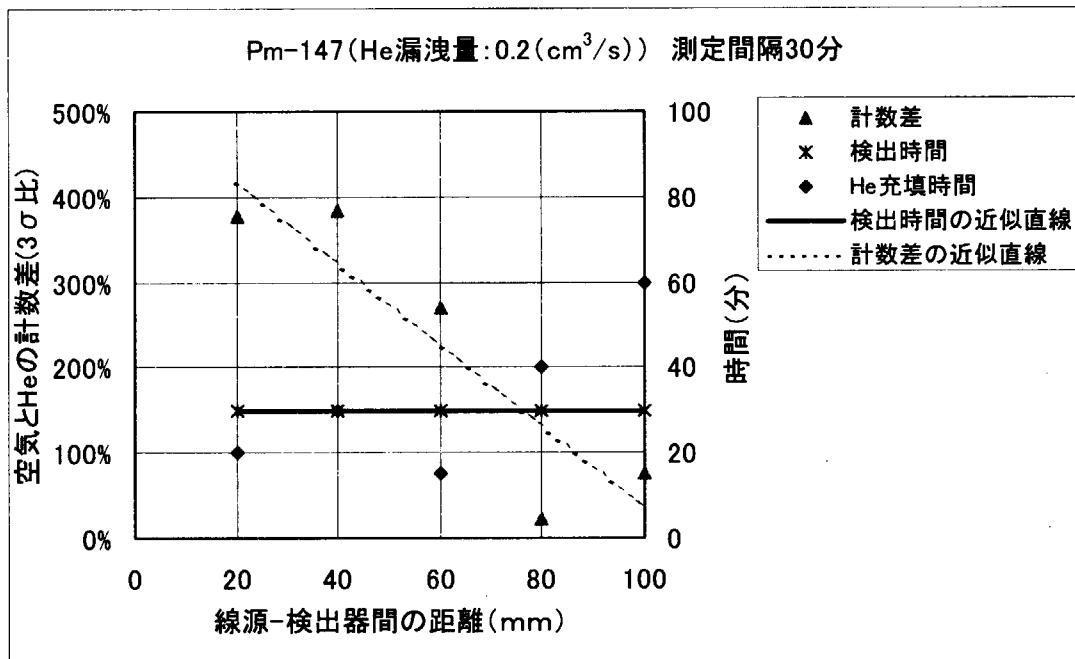


図 40 線源-検出器間の距離の変化(2)

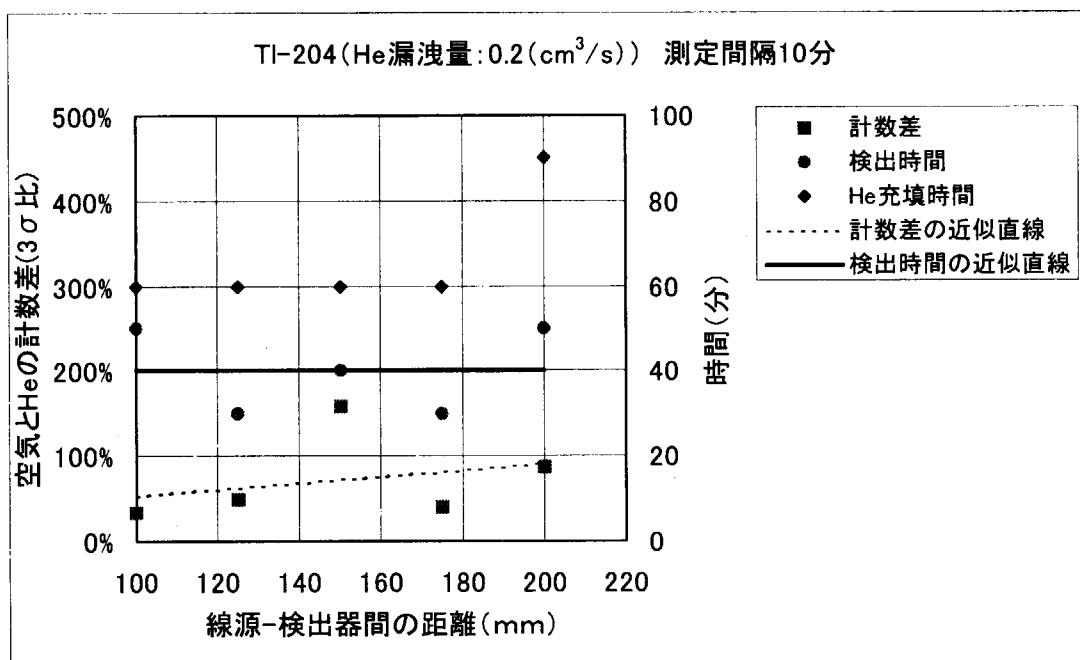


(a) 測定間隔 10 分

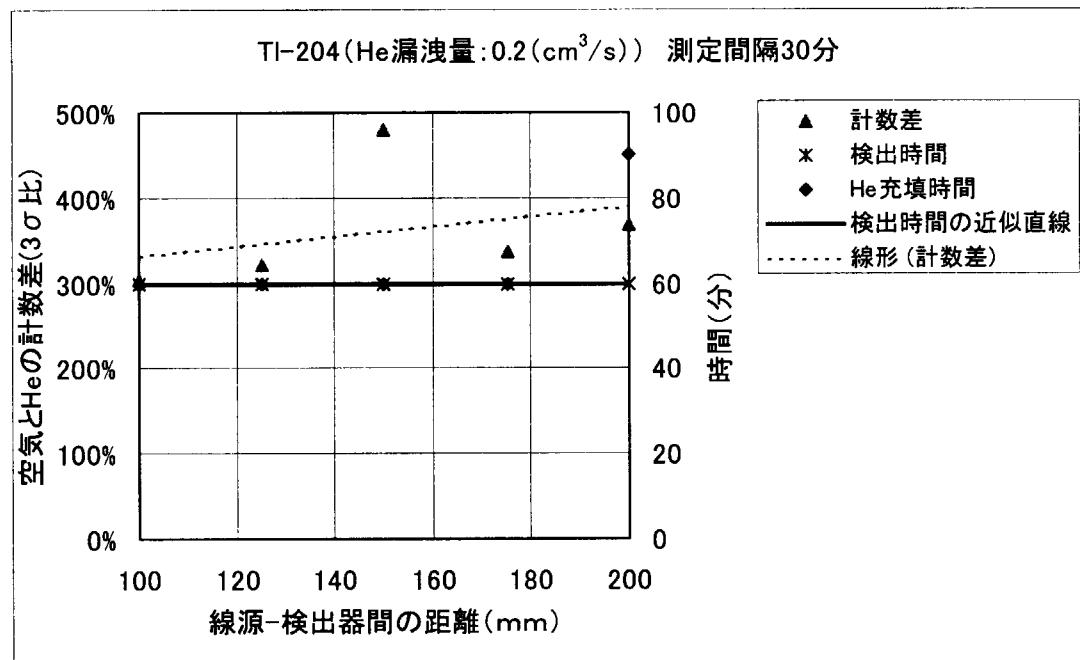


(b) 測定間隔 30 分

図 41 ¹⁴⁷Pm の線源-検出器間の距離特性



(a) 測定間隔 10 分



(b) 測定間隔 30 分

図 42 ²⁰⁴Tl の線源-検出器間の距離特性

② ヘリウムガス流量

ヘリウムガス流量を変化させた場合のヘリウムガス充填時間と、空気とヘリウムガスでの計数の増加率を図43に示す。ヘリウムガス充填時間については、捕集器の内容積がヘリウムガスで充填するまでの時間であるため、ヘリウムガス流量が大きくなれば短い時間で計数変化が現れる。このとき、ヘリウムガス流量に対する充填時間の関係近似式を求めた。この近似式から算出した逆算式より、充填時間からヘリウムガス流量を求める式が導出される((24)式～(27)式)。

^{147}Pm ; ヘリウムガス流量 S_H に対する充填時間 $T_{\text{full-Pm},20}$ の関係近似式

$$T_{\text{full-Pm},20} = 6.93 \times S_H^{-0.68} \quad (24)$$

これを逆算して、充填時間 $T_{\text{full-Pm},20}$ からヘリウムガス流量 S_H を求める式

$$S_H = (0.14 \times T_{\text{full-Pm},20})^{-1.47} \quad (25)$$

^{204}TI ; ヘリウムガス流量 S_H に対する充填時間 $T_{\text{full-Tl},200}$ の関係近似式

$$T_{\text{full-Tl},200} = 16.10 \times S_H^{-1.05} \quad (26)$$

これを逆算して、充填時間 $T_{\text{full-Tl}}$ からヘリウムガス流量 S_H を求める式

$$S_H = (0.06 \times T_{\text{full-Tl},200})^{-0.95} \quad (27)$$

また、空気とヘリウムガスでの計数の増加率はヘリウムガス流量によって変化していた。流量が少ない場合はその増加率は小さくなり、流量が多くなると増加率は上昇している。これはヘリウムガス流量が少ない場合は捕集器内でヘリウムガスが 100%になっていないことを示していると考えられる。この評価については④に後述するが、ヘリウムガスが捕集器に流入すると同時にわずかながら空気と置換されていることが確認された。ヘリウムガス流量が多い場合は流入するヘリウムガス量に比べ置換されるヘリウムガス量が無視できるが、ヘリウムガス流量が少ない場合は流入するヘリウムガス量に対して置換されるヘリウムガス量が大きくなるため、計数の増加率が変化する。

図44にヘリウムガス流量を変化させた場合のヘリウムガス充填時間と検出時間を示す。線源に ^{147}Pm を用いた場合では測定時間間隔 10 分、30 分の場合ともに検出時間に変化がなく、ヘリウムガス流量によらないとも取れる結果となった。実際にはもっと短い時間間隔での評価、ヘリウムガス流量が $0.2\text{cm}^3/\text{s}$ より小さい場合の評価が必要である。線源に ^{204}TI を用いた場合では、ヘリウムガス流量が小さくなるに従い検出時間は長くなった。このとき検出時間がヘリウムガス充填時間よりも早い場合は、ヘリウムガスが捕集器内に充填す

るよりも早い時間に漏えい検出が判別できており、すなわちヘリウムガスが流入してきて計数が上昇している途中でしきい値を越えて漏えい判別ができたことを示している。

線源に ^{204}TI を用いた場合、ヘリウムガス流量に対する検出時間は変化しているため両者の関係近似式を求めた。

^{204}TI , 10 分測定 :

ヘリウムガス流量 S_H に対する検出時間 $T_{\text{det-Tl},200,10}$ の関係近似式

$$T_{\text{det-Tl},200,10} = 18.21 \times S_H^{-0.50} \quad (28)$$

^{204}TI , 30 分測定 :

ヘリウムガス流量 S_H に対する検出時間 $T_{\text{det-Tl},200,30}$ の関係近似式

$$T_{\text{det-Tl},200,30} = 39.59 \times S_H^{-0.26} \quad (29)$$

この関係式は次項のヘリウムガス漏えい量の評価において用いる。なお、線源に ^{147}Pm を用いた場合は図 44(a)に示すように、試験範囲のヘリウムガス流量では検出時間に差異が無く、どの条件でも一定の時間でヘリウムガス漏えいが検出できた。そのためヘリウムガス流量に対する検出時間の関係式が定数となり、逆計算で検出時間からヘリウムガス流量を求めることができない。 ^{147}Pm の場合には測定時間間隔を短くした評価を行うなどが必要である。

図 45 にヘリウムガス流量を変化させた場合の空気とヘリウムガスの計数差、ヘリウムガス充填時間を示す。ヘリウムガス流量が減るに従い計数差も減っている。この計数差が 0% 以上であるということはヘリウムガス漏えいの判別が可能ということを意味する。この測定データから求めた近似直線でヘリウムガス流量が少ない場合まで範囲を広げると測定時間間隔 10 分の場合では線源が ^{147}Pm 、 ^{204}TI の何れでもヘリウムガス流量 $0.1\text{cm}^3/\text{s}$ までヘリウムガス漏えい判別ができる可能性がある。測定時間間隔 30 分の場合ではさらにヘリウムガス流量 $0.1\text{cm}^3/\text{s}$ より少い場合でもヘリウムガス漏えい判別が可能な値となるが、ヘリウムガス充填時間がこの領域で急激に増加するため現実的な時間内で検出することが困難になると考えられる。

線源が ^{204}TI の場合のヘリウムガス流量と検出時間、空気とヘリウムガスの計数差の関係を図 46 に示す。ここでは図 44(b)で求めた近似式を外挿した。測定時間間隔 10 分、30 分の場合ともにヘリウムガス流量 $0.1\text{cm}^3/\text{s}$ が約 1 時間で検出できる可能性がある。

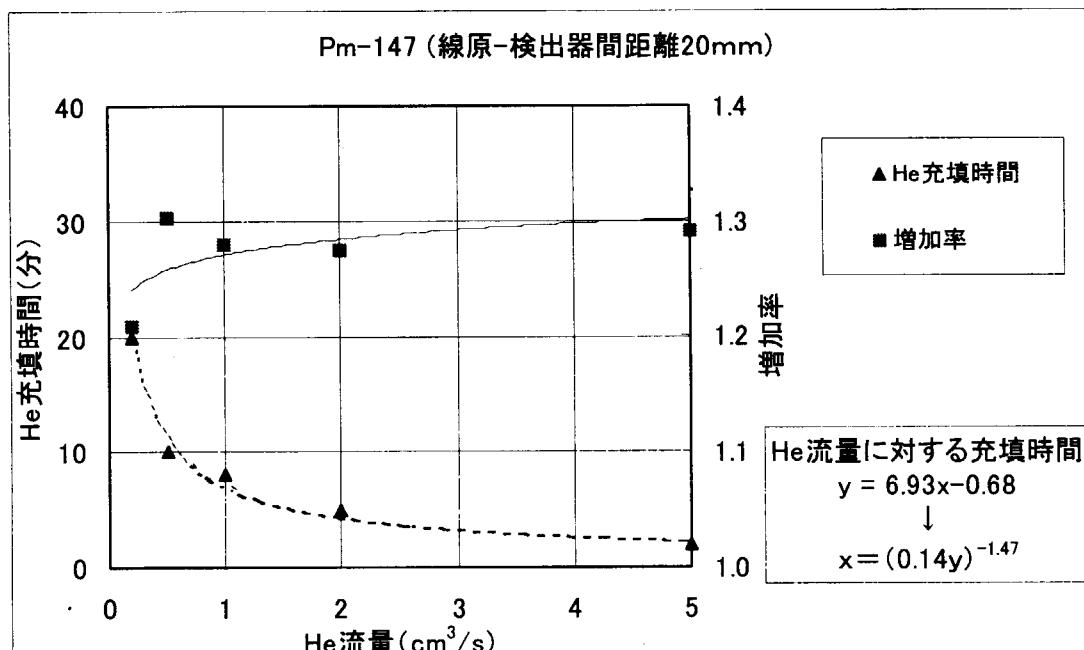
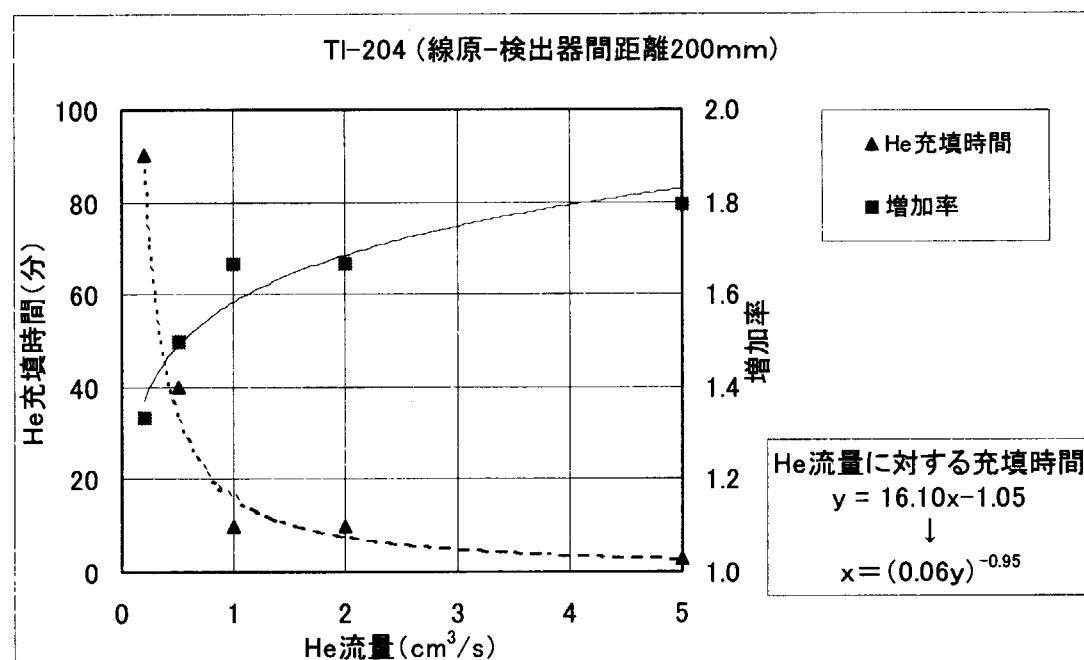
(a) ^{147}Pm (b) ^{204}TI

図 43 ヘリウムガス流量と充填時間の関係

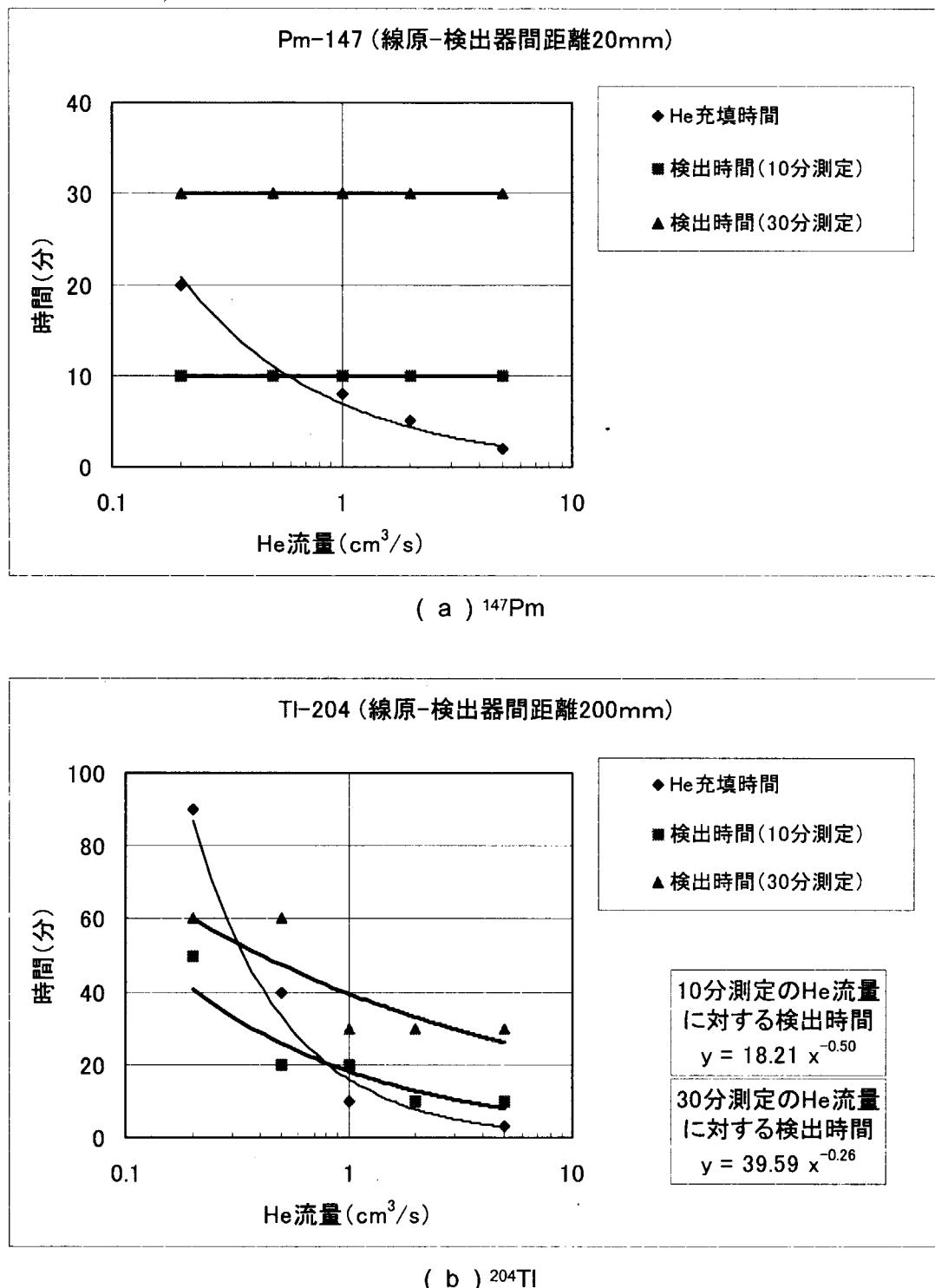


図 44 ヘリウムガス流量と充填時間、検出時間の関係

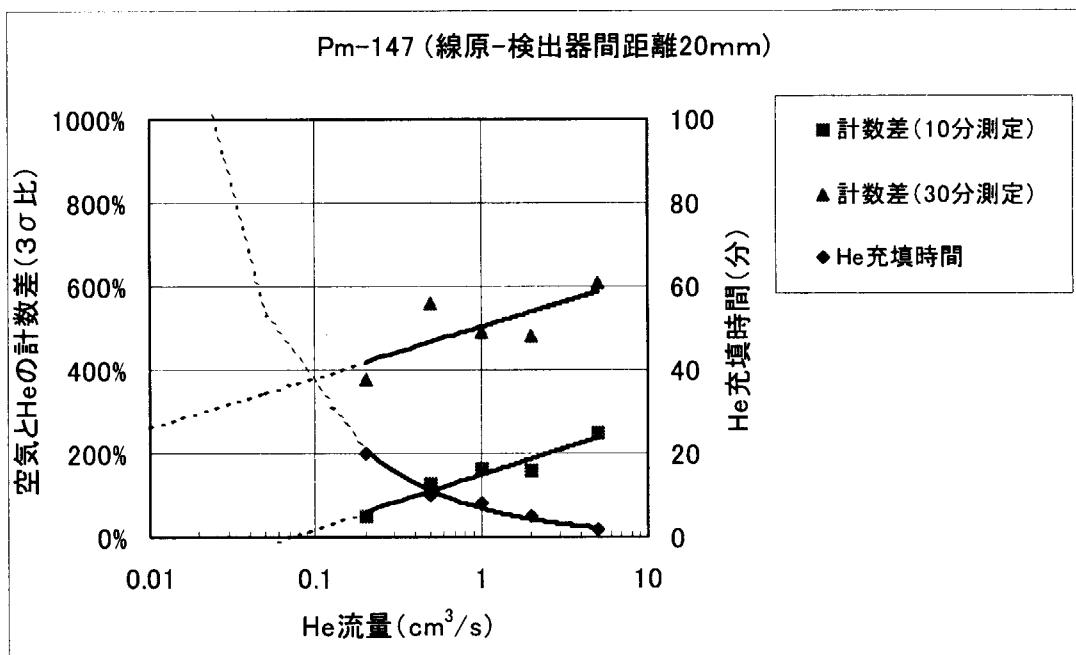
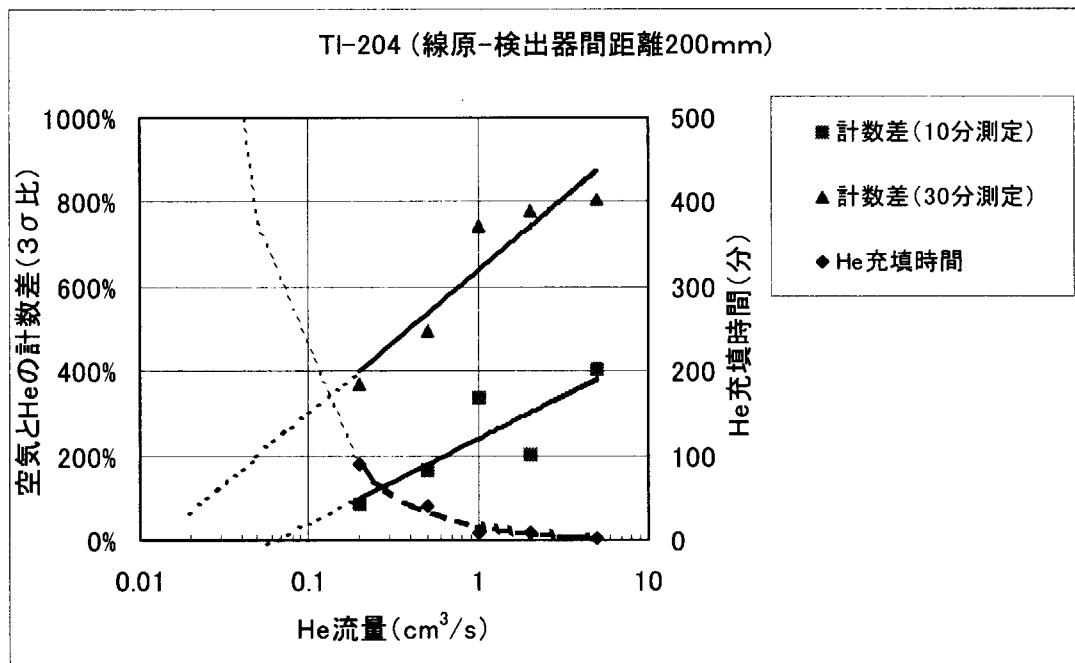
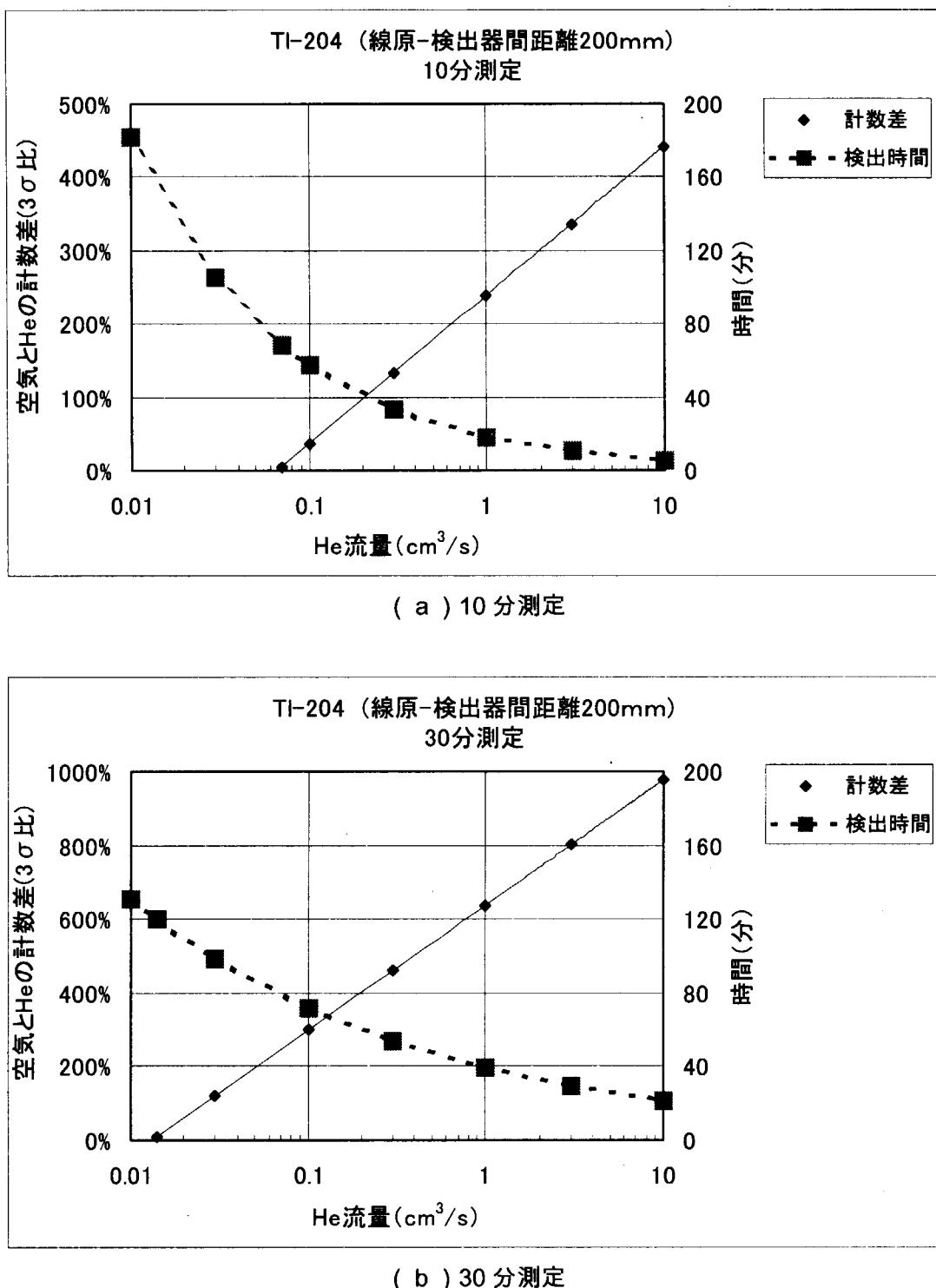
(a) ^{147}Pm (b) ^{204}TI

図45 ヘリウムガス流量と計数差の関係

図 46 ^{204}TI のヘリウムガス流量と計数差、検出時間の関係

③ ヘリウムガス漏えい量の評価

図 43 で求めたヘリウムガス充填時間からヘリウムガス流量を算出する近似式、(25)式および(27)式より、ヘリウムガス漏えい量が求まる。ヘリウムガスが一定の流量で漏えいしていると想定し、ヘリウムガス漏えい量は漏えい開始からある時間までに漏えいしたヘリウムガスの総量と定義すれば、ヘリウムガス流量と漏えい開始からの時間を積算したものがヘリウムガス漏えい量となる。したがって、ヘリウムガス充填時間までのヘリウムガス漏えい量は、ヘリウムガス流量とヘリウムガス充填時間の積で求まる。この関係式を(30)式、(31)式に示し、プロットしたグラフを図 47 に示す。ヘリウムガス充填時間が長くなるに従いヘリウムガス流量は減り、漏えい量は ^{147}Pm の場合では減少するが、 ^{204}TI の場合ではわずかに増加する。また、ヘリウムガスが充填された後はその一定の流量で漏えいしているものとすれば、ある時点でのヘリウムガス漏えい量は算出可能である。

^{147}Pm ; (25)式より、充填時間 $T_{\text{full-Pm}}$ であり、ヘリウムガス漏えい量 $V_{\text{Htfull,20}}$ は、

$$V_{\text{Htfull,20}} = T_{\text{full-Pm},20} \times (0.14 \times T_{\text{full-Pm},20})^{-1.47} \quad (30)$$

^{204}TI ; (37)式より、充填時間 $T_{\text{full-TI}}$ であり、ヘリウムガス漏えい量 $V_{\text{Htfull,200}}$ は、

$$V_{\text{Htfull,200}} = T_{\text{full-TI},200} \times (0.06 \times T_{\text{full-TI},200})^{-0.95} \quad (31)$$

次にヘリウムガスの充填時間ではなく、検出時間から求めたヘリウムガス流量と漏えい量の関係を図 48 に示す。図 44(b)で算出した線源が ^{204}TI の場合のヘリウムガス流量と検出時間の近似式、(28)式および(29)式から逆算した。ここでは検出時間は測定時間間隔毎しか取れないため、算出するヘリウムガス流量、漏えい量もとびとびの値となる。このため算出値は大きな誤差を持つことになる。

^{204}TI , 10 分測定；

(28)式より、検出時間 $T_{\text{det-TI},200,10}$ であり、ヘリウムガス漏えい量 $V_{\text{Hdet-TI},200,10}$ は

$$V_{\text{Hdet-TI},200,10} = (0.055 \times T_{\text{det-TI},200,10})^{-2.00} \quad (32)$$

^{204}TI , 30 分測定；

(29)式より、検出時間 $T_{\text{det-TI},200,30}$ であり、ヘリウムガス漏えい量 $V_{\text{Hdet-TI},200,30}$ は

$$V_{\text{Hdet-TI},200,30} = (0.025 \times T_{\text{det-TI},200,30})^{-3.85} \quad (33)$$

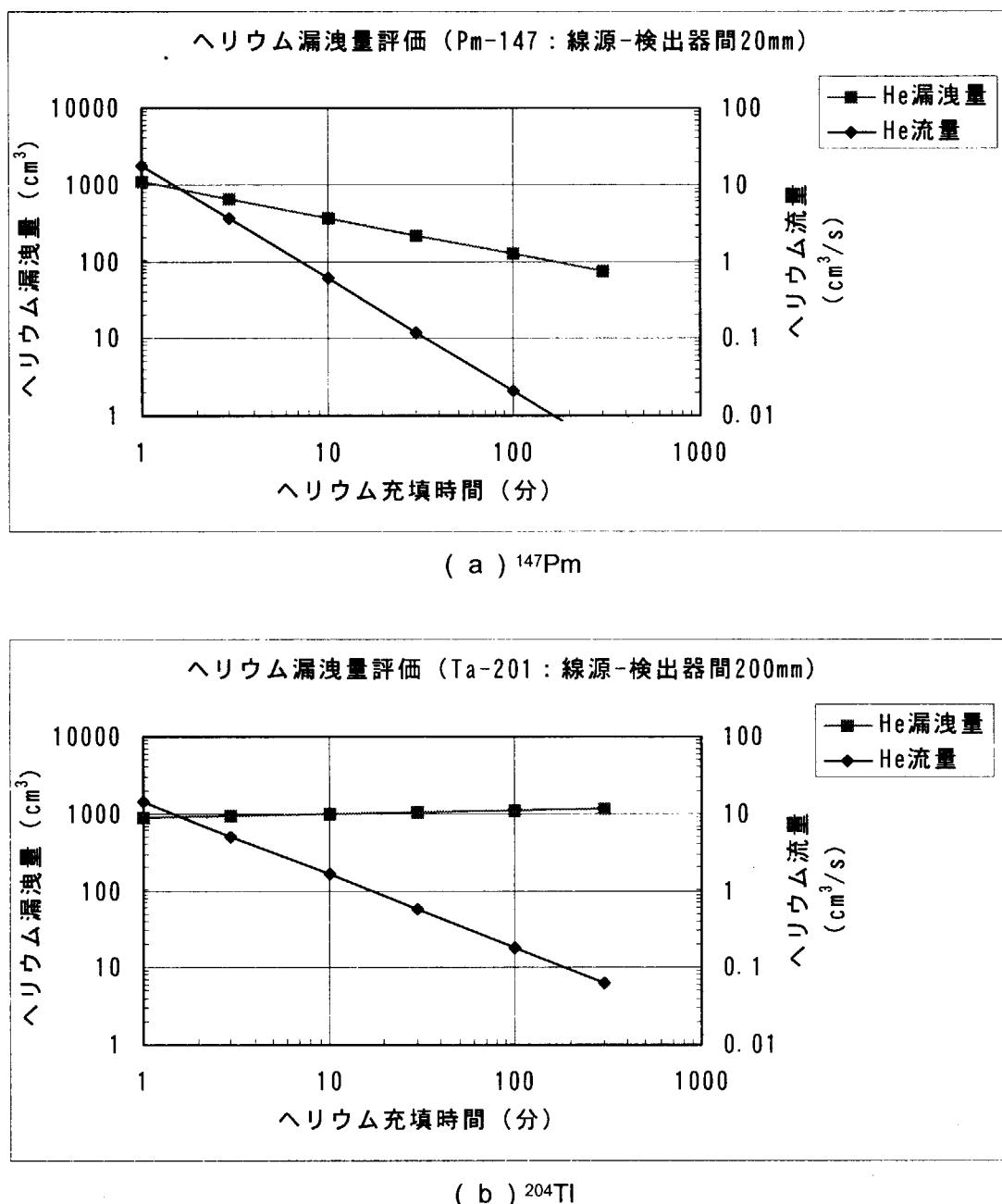
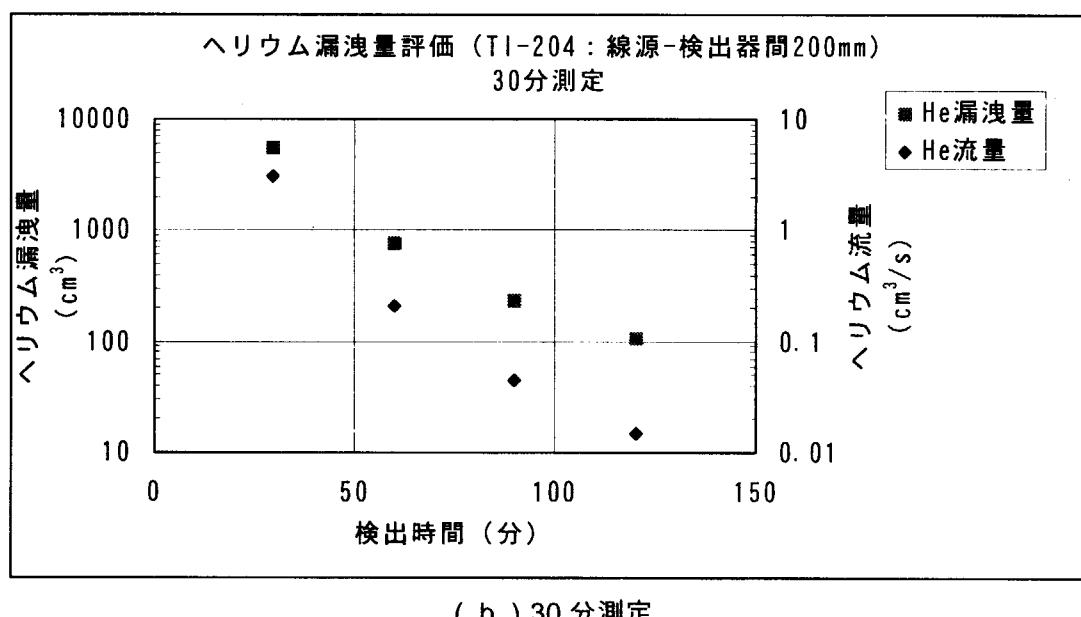
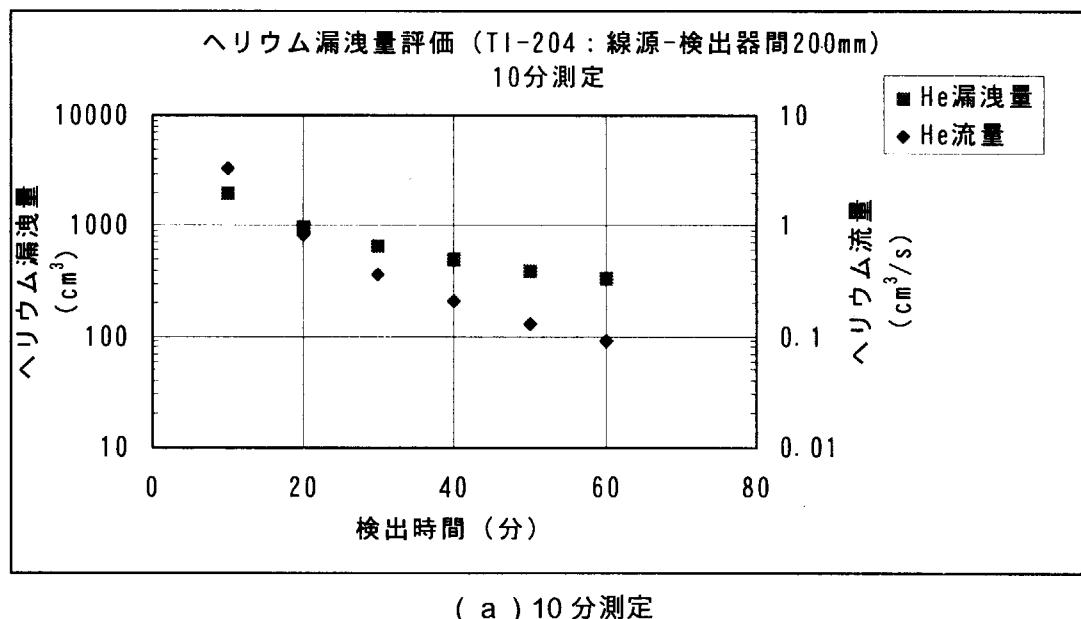


図47 充填時間から算出したヘリウムガス流量と漏えい量

図 48 検出時間から算出したヘリウムガス流量と漏えい量 (^{204}TI)

④ 検出器の最適構造

捕集器を密閉構造にしなければヘリウムガスは空気と置換してしまう。その置換される量が漏えいによって捕集器に流入するヘリウムガスの量よりも多くなる場合には、ヘリウムガス漏えい検出が困難となる可能性がある。一方、捕集器を完全に密閉構造にすると出口がなくなるため漏えいポテンシャルを持つ部位から捕集器へヘリウムガスを集めることができなくなる。そこで使用した捕集器のヘリウムガスと空気の置換している量を確認するため次の試験を行った。

捕集器にヘリウムガスを充填させた状態で放置して、計数変化がどのように推移するかを測定した。図49にその測定データを示す。その結果、ヘリウムガス充填状態では増加していた計数率が放置開始から約10時間で初期計数率とほぼ等しい値に戻った。すなわち約10時間でヘリウムガスは捕集器からほぼ全て置換されたと考えられる。

これによりヘリウムガス流量が多い場合に比較してヘリウムガス流量が少ない場合は、捕集器内にヘリウムガスが充填されても常にわずかながら空気と置換されるため、空気とヘリウムガスでの計数の増加率が小さな値を示す理由が示された。本試験においては、ヘリウムガス充填時間は最大90分程度と10時間に比べ短いため大きな影響はなかった。

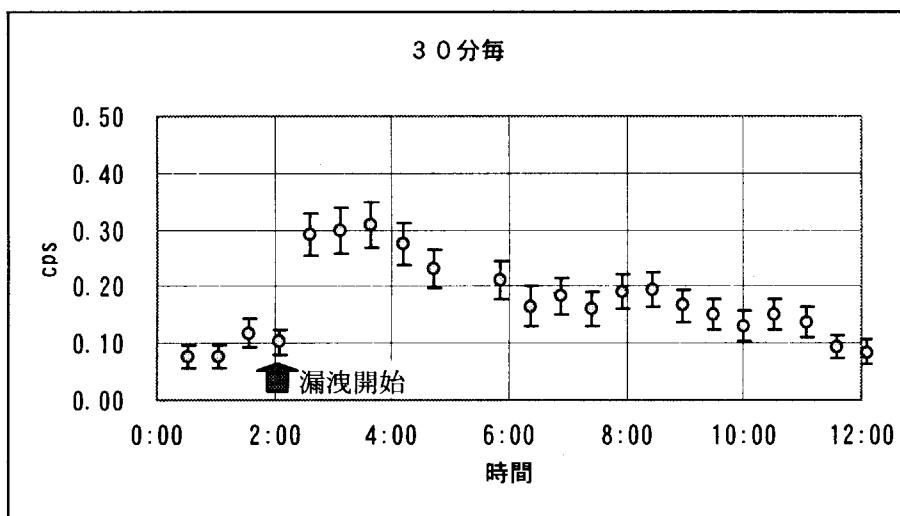


図49 ヘリウム充填状態で放置した場合の計数変化 (^{147}Pm : 線源-検出器間距離 200mm)

空気の置換に対する改良案として、捕集器の基本構造は今回の試作した捕集器と同様とするが、ヘリウムガスは空気よりも軽い気体であることを利用し、測定する領域にヘリウムガスを集約させるように線源を上部に底上げする。これにより捕集器の底に設けた工アバット穴の位置から測定領域が離れることになり、空気との置換の影響が測定領域では最小限になる。

改良結果の確認のため、両者の条件で測定試験を実施した。図50に実施した試験の治具を並べて示す。また、この試験の測定データを図51に示す。試験の結果、今回の試験治具

では初期計数率が約 0.1cps からヘリウムガス充填後は約 0.2cps まで上昇したのに対して、改良治具では初期計数率が約 0.1cps からヘリウムガス充填後は約 0.3cps まで上昇し、改良の効果が確認できた。

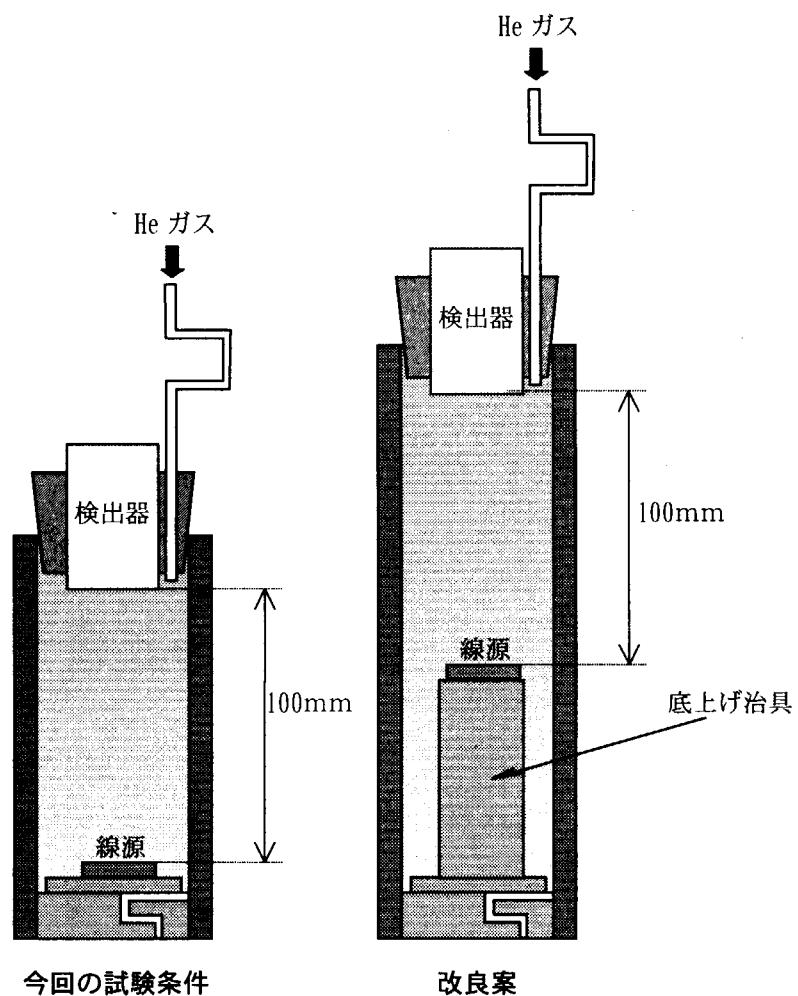
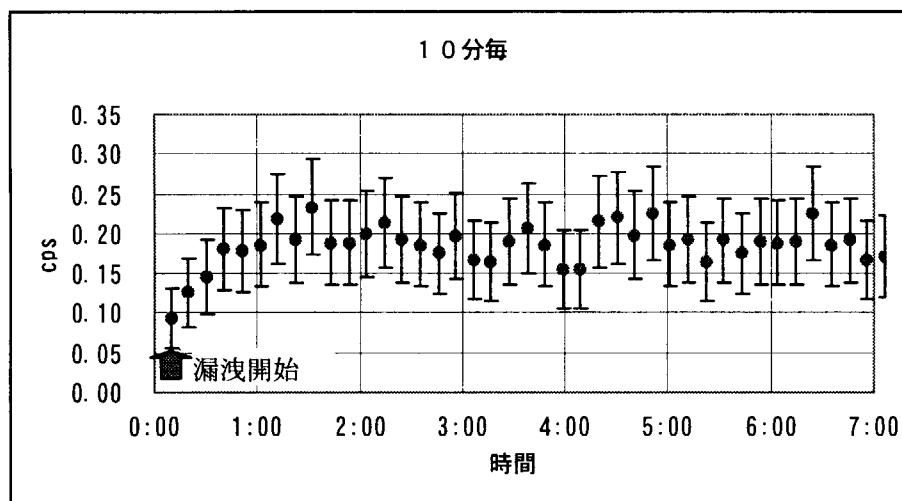
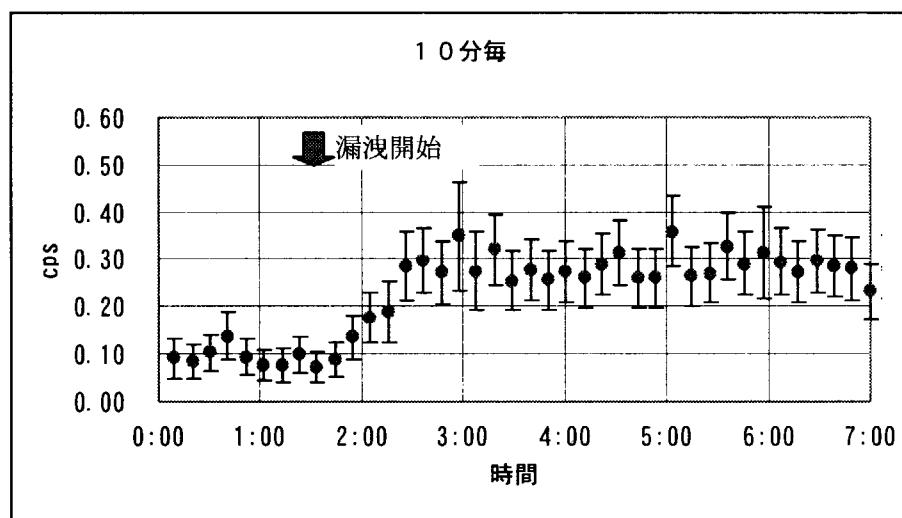


図 50 今回の試験治具と改良治具



(a) 今回の試験治具



(b) 改良治具

図 51 今回の試験治具と改良治具での測定データ (^{147}Pm : 線源-検出器間距離 100mm)

⑤ 今後の課題

今後の課題として以下が挙げられる。

・測定範囲および測定条件

本研究ではヘリウムガス流量は $0.2 \sim 5.0 \text{cm}^3/\text{s}$ の範囲とした。評価した検出下限の $0.1 \text{cm}^3/\text{s}$ もしくはそれ以下の場合の検討を行うことにより、さらに微少な漏えい検知の可能性を探る。これは、検出下限以下のヘリウムガスの漏えいが継続している場合を想定したとき有効となる。

・実機における成立性の詳細検討

本研究で基本性能の確認を実施したが、実用化のためには、実機における適用性の検討が必要である。検討の内容としては、ユーティリティの有無、放射線バックグラウンド、温度・湿度・振動等の耐現場環境性、長期安定性、測定値の検証等に加えて、特に定期点検等を考慮した配置設計の検討は重要である。

・FP ガスの影響検討

ヘリウムガスが漏えいする場合、ガス中に FP ガスを含んでいる可能性がある。本装置が定常状態（空気雰囲気）との差異により漏えい検出を行う方式であるため、ヘリウムガスの漏えいと同時に FP ガスが混入した場合、計数率がより早く増加する。したがって、漏えい検知に要する時間は短縮されるため、FP ガスはバックグラウンドとして評価する必要はないと考えられるが、定量的な評価については実機を用いて実施する必要がある。

3. 結言

本研究では放射線を用いたヘリウム漏えい検出器として、直接検出法とアクティブ検出法の2種類の検出法を提案し、各々について基本性能を評価した。

(1) 直接検出法

直接検出方は、ヘリウムガスに含まれる放射性物質から放出される放射線をプラスチックシンチレータにより放射能濃度を求め、ヘリウムガスの漏えいを検知する方法である。放射能濃度の検出限界をシミュレーションにより評価したところ、 $100\text{Bq}/\text{cm}^3$ の測定に1~3時間が必要である。

(2) アクティブ検出法

アクティブ検出法は、空気中とヘリウムガス中の放射線の阻止能差を利用して、設置した線源からの放射線量の変化によりヘリウムガスの漏えいを検知する方法である。シミュレーションと試験評価により、ヘリウム流量の検出限界、検出時間、漏えい量を評価した。 ^{147}Pm と ^{204}TI を用いた漏えい検出器を製作し、試験評価を実施したところ、以下の知見を得た。

- 流量 $0.2 \sim 5.0\text{cm}^3/\text{s}$ のヘリウムガスの漏えいが検出できた。
- ^{147}Pm を用いた場合、線源-検出器間の距離は 20mm が最適であることを確認し、このときヘリウムガス流量 $0.2\text{cm}^3/\text{s}$ の検出時間は最短 10 分であった。
- ヘリウムガス流量は $0.1\text{cm}^3/\text{s}$ を検出できる可能性がある。
- TI-204 を用いた場合、線源-検出器間の距離は 200mm が最適であることを確認し、漏えい検出時間からヘリウム漏えい量の評価式を求めた。

また、ヘリウム漏えい検出器の構造の最適化検討を行った。検出対象であるヘリウムガスの特性から、捕集器に集められるヘリウムガスが外部の空気と置換されにくい構造とする必要があり、そのためには放射線検出器と線源を捕集器の上部に設置してヘリウムガスが容器内部に溜まりやすくすることが重要であることがわかった。

今後の課題として、測定範囲および測定条件の拡大検討、実機における成立性の詳細検討、FPガスの影響検討が挙げられる。

本研究は、今後高温ガス炉におけるヘリウムガスの漏えい検知のため、漏えい量の短時間同定同定および漏えい箇所の特定の一助となることが期待できる。

なお本研究は、2000年度の日本原子力発電株との共同研究「高温ヘリウム漏えい箇所特定システムの開発」として実施されたものである。

謝辞

本研究の実施にあたり、貴重なご助言を頂い日本原子力研究所大洗研究所長（前高温工学試験研究炉開発部長）馬場治氏、研究主幹（前同部次長）大久保実氏に深く感謝いたします。また本報をまとめるにあたり貴重なご助言を頂いた同部長藤川正剛氏、同部次長林秀行氏、HTTR 技術開発室長伊与久達夫氏、および査読頂いた核熱利用研究部石原正博主任研究員に深く感謝いたします。また、実施にあたりご尽力頂いた、株日立製作所古内博氏および浅野保氏に深謝いたします。

参考文献

- (1) 原研：“日本原子力研究所大洗研究所設置許可申請書「HTTR（高温工学試験研究炉）原子炉施設の設置」”(1989).
- (2) 斎藤伸三他：“高温工学試験研究炉の設計と研究開発”,原子力誌,32[9],847-871(1990).
- (3) 藤川正剛他：“HTTR（高温工学試験研究炉）の出力上昇試験”, 原子力誌, 1[4], 361-372 (2002).
- (4) 中川繁昭他：“高温工学試験研究炉の出力上昇試験－試験経過及び結果の概要－”(2002).
- (5) 坂場成昭他:JAERI-Review 2002-041, “高温ヘリウム漏えい箇所特定システムの開発（共同研究）第1報 漏えい事故事例およびガス漏えい検知技術の調査”(2002).
- (6) 坂場成昭他:JAERI-Tech 2003-041, “高温ヘリウム漏えい箇所特定システムの開発（共同研究）第2報 光ファイバ温度センサの HTTR への適応性の検討”(2002).
- (7) 沢和弘他:JAERI-Research 2001-002, “HTTR 出力上昇試験における燃料及び核分裂生成物挙動の検討（その 1:15MWまでの結果）”(2001).
- (8) 石川友清編, 放射線概論,通商産業研究社(1996).

This is a blank page.

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}
力	ニュートン	N	$m \cdot kg/s^2$
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m^2
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	$N \cdot m$
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	$A \cdot s$
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	$V \cdot s$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	$cd \cdot sr$
照度	ルクス	lx	lm/m^2
放射能	ベクレル	Bq	s^{-1}
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トントン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10^{18}	エクサ	E
10^{15}	ペタ	P
10^{12}	テラ	T
10^9	ギガ	G
10^6	メガ	M
10^3	キロ	k
10^2	ヘクト	h
10^1	デカ	da
10^{-1}	デシ	d
10^{-2}	センチ	c
10^{-3}	ミリ	m
10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-9}	ナノ	n
10^{-12}	ピコ	p
10^{-15}	フェムト	f
10^{-18}	アト	a

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリ	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

(注)

1. 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。

2. 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。

3. barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリに分類されている。

4. EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリに入れている。

換算表

力	N($=10^5$ dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

粘度 $1 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 10 \text{ P(ボアズ)} (\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s}))$

動粘度 $1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)} (\text{cm}^2/\text{s})$

圧力	MPa($=10 \text{ bar}$)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062×10^3	145.038
0.0980665	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
0.101325	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
1.33322×10^{-4}	1.35951×10^{-3}	1.31579×10^{-3}	1	1.93368×10^{-2}	
6.89476×10^{-3}	7.03070×10^{-2}	6.80460×10^{-2}	51.7149	1	

エネルギー・仕事・熱量	J($=10^7$ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)
1	0.101972	2.77778×10^{-7}	0.238889	9.47813×10^{-4}	0.737562	6.24150×10^{18}	$= 4.184 \text{ J (熱化学)}$	
9.80665	1	2.72407×10^{-6}	2.34270	9.29487×10^{-3}	7.23301	6.12082×10^{19}	$= 4.1855 \text{ J (15 } ^\circ\text{C)}$	
3.6×10^6	3.67098×10^5	1	8.59999×10^3	3412.13	2.65522×10^6	2.24694×10^{25}	$= 4.1868 \text{ J (国際蒸気表)}$	
4.18605	0.426858	1.16279×10^{-6}	1	3.96759×10^{-3}	3.08747	2.61272×10^{19}	仕事率 1 PS(仮馬力)	
1055.06	107.586	2.93072×10^{-4}	252.042	1	778.172	6.58515×10^{21}	$= 75 \text{ kgf} \cdot \text{m/s}$	
1.35582	0.138255	3.76616×10^{-7}	0.323890	1.28506×10^{-3}	1	8.46233×10^{18}	$= 735.499 \text{ W}$	
1.60218×10^{-19}	1.63377×10^{-20}	4.45050×10^{-26}	3.82743×10^{-20}	1.51857×10^{-22}	1.18171×10^{-19}	1		

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
1	2.70270 $\times 10^{-11}$	1	1	100	
3.7×10^{10}	1		0.01	1	

照射線量	C/kg	R
1	3876	
2.58×10^{-4}	1	

線量当量	Sv	rem
1	100	
0.01	1	

(86年12月26日現在)

