

# 照射MOX燃料を用いたFP放出挙動試験

(試験報告)



2001年 5月

核燃料サイクル開発機構  
大洗工学センター

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

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

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

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

## 照射 MOX 燃料を用いた FP 放出挙動試験 (試験報告)

廣沢 孝志\*1)、佐藤 勇\*1)、両角 勝文\*1)、滑川 卓志\*1)  
高井 俊秀\*2)、中桐 俊男\*2)、宮原 信哉\*2)

### 要 旨

原子炉事故時に環境へ放出される核分裂生成物(FP)を中心とした放射性物質の種類と量(ソースターム)の評価を目的として、照射 MOX 燃料からの FP 放出挙動試験を実施した結果を報告する。

試験は2回実施しており、それぞれFP-1、FP-2と称す。試験時の加熱パターンはFP-1で室温→2000°C30分→3000°C30分、FP-2で室温→1500°C30分→2500°C30分であり、昇温速度はいずれも15K/sである。試料は燃焼度約65GWd/tの「常陽」照射 MOX 燃料(Pu濃度29wt%、初期O/M比1.99)から被覆管を除去したもの(重量約10g)を用いた。

試験時及び試験後において、付帯する分析機器(ガス質量分析、ガスクロマトグラフ、γ線スペクトロメトリ)でFP放出挙動を観察した結果は以下のとおりである。

(1)γ線スペクトロメトリでは主にCsの放出及びサンプリング部品への付着挙動を観察し、以下の結果を得た。

- Csは昇温と同時に急激に放出された。生成過程が異なるCs-134とCs-137とでは放出の量が最も多くなる時刻がずれており、これらの核種における燃料内分布の差異によるものと考えられる。
- Csのサンプリング管に対する付着量はサンプリング管温度600°C以下で著しく、試験体から放出される量が小さい時又は試験体温度が低い時は450°C付近でピークを持つことがわかった。
- Csの付着先は7割近くが焼結金属フィルタであり、これはFP-1とFP-2であまり変化がなかった。また、FP-1とFP-2においてサンプリング管と焼結金属フィルタに対する測定の計数率は同程度であった。
- Rh(Ru)-106及びEu-154は本試験では燃料からほとんど放出しなかったことがわかった。

(2)ガス分析では、主にKr、Xeの放出挙動を観察し、以下の結果を得た。

- Krについては放出ガスのガス分析においてバースト的濃度上昇が観測された。その後遅れてXeの緩やかな濃度上昇が計測されたが、この時間遅れはヨウ素フィルタである銀ゼオライトの影響であった。
- ペレット内からの全放出量は、XeはFP-1試験で $4.36 \times 10^{-5}$ mol/g、FP-2試験では $4.68 \times 10^{-5}$ mol/gであった。また、Xeの放出のピークは1,500°C～2,000°C付近にあると推定される。
- 本試験では、ペレット内に保持されたFPガス全量が放出したと推定され、全放出量のXe/Kr比は約9(FP-2試験結果)であった。

\*1)照射施設運転管理センター 燃料材料試験部 照射燃料試験室

\*2)要素技術開発部 熱化学安全試験グループ

## FP Release Behavior from Irradiated MOX Fuel

Hirosawa Takashi<sup>\*1)</sup>, Sato Isamu<sup>\*1)</sup>, Morozumi Katsuhumi<sup>\*1)</sup>, Namekawa Takashi<sup>\*1)</sup>  
Takai Toshihide<sup>\*2)</sup>, Nakagiri Toshio<sup>\*2)</sup>, Miyahara Shinya<sup>\*2)</sup>

## Abstract

Fission products (FPs) release tests from irradiated MOX fuel were performed in Alpha Gamma Facility (AGF) from viewpoint of "source term" evaluation. "Source term" means the species and the quantity of FPs and so on discharged to environment during nuclear reactor accidents.

The tests are carried out two times, which names are "FP-1" and "FP-2", respectively. In "FP-1" test, a fuel sample was heated for 30 minutes at 2000°C, and then for 30 minutes at 3000°C. In "FP-2", it did for 30 minutes at 1500°C, and then for 30 minutes at 2500°C. The heating rate is 15 K/sec for any heating processes. The samples (about 10g of weight) for the tests were irradiated to approximately 65 GWd/t in the experimental fast reactor, "Joyo", which cladding materials were removed. The Pu content and initial O/M ratio for each sample is 29 wt% and 1.99, respectively.

During and after the test, FP release behavior was observed with  $\gamma$  ray spectrometry, gas mass analysis and gas chromatograph.

(1)The  $\gamma$  ray spectrometry mainly revealed the release and adhesion on sampling parts of Cs. The results of these experiments are as follows;

- Cs suddenly was released from the sample as soon as the temperature was elevated. The peaks of Cs-134 and Cs-137 release rate are not identical. This probably results from difference of distribution between Cs-134 and Cs-137.
- The adhesion profile of Cs on the sampling tubes is a function of the sampling tube temperature, and the adhesion quantity is large at regions less than 600°C.
- About 70% of Cs releasing from the sample stuck on sintered metal filters for both FP-1 and FP-2 test. Cs quantities sticking on all of the sampling parts are identical for FP-1 and FP-2.
- Rh(Ru)-106 and Eu-154 were scarcely released from the samples.

(2)The gas analyses mainly revealed the release behavior of Kr and Xe. The results are summarized as follows;

- Kr suddenly was released from the sample as soon as the temperature was elevated. A direct data of gas mass analysis indicated that Xe was later released comparing Kr, but this time rag of release resulted from Ag-zeolite as an iodine filter. Therefore, Kr and Xe release behavior is approximately identical.
- The content of Xe in FP-1 sample was  $4.36 \times 10^{-5}$  mol/g, that in FP-2,  $4.68 \times 10^{-5}$  mol/g. The peak of Xe release might be located in about 1500 ~ 2000°C of the sample heating temperature.
- From the contents in the FP-2 sample, the Xe/Kr ratio was about 9.

---

\*1) Alpha Gamma Section, Fuels and Materials Division, Irradiation Center

\*2) Thermochemistry Safety Engineering Group, Advanced Technology Division

## 目 次

1. 序論	1
2. 試験装置の概要	2
2.1 サンプリング装置の概要	2
2.2 分析装置の概要	3
3. 供試材	4
3.1 試験対象燃料	4
3.2 試料数量	4
3.3 試料調製	4
4. 試験条件	5
4.1 加熱パターンとサンプリング系統の設定	5
4.1.1 FP-1 試験	5
4.1.2 FP-2 試験	5
4.2 $\gamma$ 線測定	6
4.2.1 オンライン測定	6
4.2.2 オフライン測定	7
(1) 燃料	7
(2) サンプリング管	7
(3) 焼結金属フィルタ	8
4.3 ガス分析	8
4.3.1 ガスマスによる分析	8
4.3.2 ガスクロによる分析	8
5. 結果	9
5.1 加熱試験時の装置性能	9
5.1.1 加熱温度	9
(1) 温度制御精度	9
(2) 温度計精度	9
5.1.2 温度勾配管温度	9
5.1.3 キャリアガス流量	9
5.2 放出FPの $\gamma$ 線計測結果	10
5.2.1 バックグラウンドの時間変化	10
5.2.2 オンライン測定	10
5.2.3 オフライン測定	11
(1) 焼結金属フィルタ試験体及びインベントリ評価試料に対する測定	11
(2) サンプリング管に対する測定	11
(3) 焼結金属フィルタに対する測定	12
5.2.4 相対量評価	12

5.3 放出FPガスのガス分析結果 .....	14
5.3.1 ガスマスによる測定結果 .....	14
(1) 加熱試験中における連続測定結果 .....	14
(2) FPガス放出履歴の補正と考察 .....	15
(3) サンプルングガスによる同位体組成分析結果 .....	16
5.3.2 ガスクロによるサンプルングガス測定結果 .....	16
5.3.3 ガス分析結果による放出FPガス定量評価 .....	16
6. まとめ .....	18
7. 謝辞 .....	20
8. 参考文献 .....	20

## 図表リスト

## - 表 -

表 3.1	PFD549 の主な照射実績	21
表 3.2	ペレット製造時仕様	21
表 4.1	FP-1、FP-2 の試験条件	22
表 4.2	$\gamma$ 線測定装置の検出器、増幅器及び高圧電源の主な仕様	23
表 4.3	$\gamma$ 線測定項目の整理	24
表 4.4	ガスクロ用サンプリングボトルの捕集タイミング	26
表 5.1	FP-1 及び FP-2 における A 系統ケーシングにおける Cs の計数率及びその差分値の時間変化	27
表 5.2	$\gamma$ 線放射 FP における放射能と収率の関係 (ORIGEN-2 データを参考)	28
表 5.3(1)	FP-1 試験体におけるピークサーチ結果と計数率	31
表 5.3(2)	FP-2 試験体におけるピークサーチ結果と計数率	32
表 5.4(1)	FP-1 のサンプリング管に対する 測定で得られたピークサーチ結果と計数率 (cps)	33
表 5.4(2)	FP-2 のサンプリング管に対する 測定で得られたピークサーチ結果と計数率 (cps)	34
表 5.5(1)	FP-1 のフィルタに対する 測定で得られたピークサーチ結果と計数率 (cps)	35
表 5.5(2)	FP-2 のフィルタに対する 測定で得られたピークサーチ結果と計数率 (cps)	36
表 5.6	$\gamma$ 線の減弱係数	37
表 5.7(1)	測定値からの相対量評価 (FP-1: インベントリ 評価用少量試料が無い場合参考値) (補正された計数率 (cps))	38
表 5.7(2)	測定値からの相対量評価 (FP-2) (補正された計数率 (cps))	39
表 5.8	FP-1 でのサンプリングボトル内捕集ガス (Kr) の同位体組成	40
表 5.9	FP-1 でのサンプリングボトル内捕集ガス (Xe) の同位体組成	40
表 5.10	FP-1 でのサンプリングボトル内捕集ガス (H) の同位体組成	41
表 5.11	FP-2 でのサンプリングボトル内捕集ガス (Xe) の同位体組成	41
表 5.12	FP-1 における FP ガス放出量	42
表 5.13	FP-2 における FP ガス放出量	42

図 2.1	FP 放出挙動試験装置全体概略図	43
図 2.2	FP 放出挙動試験装置全体系統図	44
図 2.3	サンプリング装置及び分析装置系統図	45
図 3.1	試験対象ピンの炉心装荷位置及びピン軸方向切断位置	46
図 3.2	試験対象ピンの燃焼度分布	47
図 3.3	試料調整方法概略	48
図 3.4	試料調整した燃料の外観写真	49
図 4.1	FP-1、FP-2 の加熱パターン	50
図 4.2	$\gamma$ 線測定装置の構成図	51
図 4.3(1)	検出器と測定位置の関係(側面図)	52
図 4.3(2)	検出器と測定位置の関係(平面図)	53
図 4.4	A 系統ケーシングの構造とオンライン測定での測定領域	54
図 4.5	試験体、タングステンるつぼ、試料容器及び測定台アダプタ	55
図 4.6	サンプリング管、試料容器及び測定台アダプタ	56
図 4.7	フィルタ、試料容器及び測定台アダプタ	57
図 5.1	燃料加熱温度と加熱プログラムとの関係	58
図 5.2	燃料加熱温度とインバータ電源電流との関係	59
図 5.3	温度勾配管温度の直線性	60
図 5.4	燃料加熱時の勾配管温度の変化	61
図 5.5	サンプリングボトルへのガス捕集時の流量、圧力の変化	62
図 5.6	加熱試験中におけるガス供給流量、圧力の変化	63
図 5.7	加熱試験中におけるコールドトラップの温度変化	64
図 5.8	加熱試験中における冷却水流量の変化	65
図 5.9	加熱試験中における冷却水温度の変化	66
図 5.10	加熱試験中における加熱炉フランジ温度の変化	67
図 5.11	加熱炉フランジ温度と冷却水温度の関係	68
図 5.12	$\gamma$ 線測定装置で得られるバックグラウンドの時間変化	69
図 5.13	FP-1 オンライン測定 of $\gamma$ 線スペクトルの例(31 回目の測定)	70
図 5.14	A 系統に取り付けられた焼結金属フィルタケーシングにおける Cs の計数率時間変化(FP-1)	71
図 5.15	A 系統に取り付けられた焼結金属フィルタケーシングにおける Cs の計数率時間変化(FP-2)	72
図 5.16	A 系統に取り付けられた焼結金属フィルタケーシングにおける Cs の計数率増加分の時間変化(FP-1)	73
図 5.17	A 系統に取り付けられた焼結金属フィルタケーシングにおける Cs の計数率増加分の時間変化(FP-2)	74
図 5.18	試験後のタングステンるつぼ(FP-1)	75



図 5. 19	FP-1 の試験体における $\gamma$ 線スペクトル	76
図 5. 20	FP-2 の試験体における $\gamma$ 線スペクトル	76
図 5. 21	FP-1 の試験体における $\gamma$ 線スペクトルピークサーチ結果	77
図 5. 22	FP-1 の A 系統サンプリング管における $\gamma$ 線スペクトルピークサーチ結果の例	78
図 5. 23(1)	FP-1 の A 系統(2000°C保持)における サンプリング管に付着した FP の計数率	79
図 5. 23(2)	FP-1 の B 系統(3000°C保持)における サンプリング管に付着した FP の計数率	79
図 5. 23(3)	FP-2 の A 系統(1500°C保持)における サンプリング管に付着した FP の計数率	80
図 5. 23(4)	FP-2 の B 系統(2500°C保持)における サンプリング管に付着した FP の計数率	80
図 5. 24(1)	FP-1 の A 系統における焼結金属フィルタの様相	81
図 5. 24(2)	FP-1 の B 系統における焼結金属フィルタの様相	82
図 5. 24(3)	FP-2 の A 系統における焼結金属フィルタの様相	83
図 5. 24(4)	FP-2 の B 系統における焼結金属フィルタの様相	84
図 5. 25(1)	FP-2 の A 系統(1500°C保持) 焼結金属フィルタにおける $\gamma$ 線スペクトルピークサーチ結果の例	85
図 5. 25(2)	FP-2 の B 系統(2500°C保持) 焼結金属フィルタにおける $\gamma$ 線スペクトルピークサーチ結果の例	86
図 5. 26(1)	FP-1 の A 系統(2000°C保持)における 焼結金属フィルタに付着した FP の計数率	87
図 5. 26(2)	FP-1 の B 系統(3000°C保持)における 焼結金属フィルタに付着した FP の計数率	87
図 5. 26(3)	FP-2 の A 系統(1500°C保持)における 焼結金属フィルタに付着した FP の計数率	88
図 5. 26(4)	FP-2 の B 系統(2500°C保持)における 焼結金属フィルタに付着した FP の計数率	88
図 5. 27(1)	FP-1 の A 系統(2000°C保持)における 放出核種のサンプリング管及びフィルタでのマスバランス	89
図 5. 27(2)	FP-1 の B 系統(3000°C保持)における 放出核種のサンプリング管及びフィルタでのマスバランス	89
図 5. 27(3)	FP-2 の A 系統(1500°C保持)における 放出核種のサンプリング管及びフィルタでのマスバランス	90
図 5. 27(4)	FP-2 の B 系統(2500°C保持)における 放出核種のサンプリング管及びフィルタでのマスバランス	90
図 5. 28(1)	FP-1 における Cs-137 のマスバランス	91
図 5. 28(2)	FP-2 における Cs-137 のマスバランス	91

図 5. 29 (1)	FP-2 における Cs-137 の試験前後のマスバランス	92
図 5. 29 (2)	FP-2 における Cs-134 の試験前後のマスバランス	92
図 5. 30 (1)	FP-1、FP-2 での Cs-137 のマスバランスの比較	93
図 5. 30 (2)	FP-1、FP-2 での Cs-134 のマスバランスの比較	93
図 5. 31	燃料加熱温度とキャリアガス中の放出 FP ガス濃度との関係 (ガスマスオンライン分析結果)	94
図 5. 32	ヨウ素フィルタ (銀ゼオライト) の FP ガス放出履歴への影響	95
図 5. 33	加熱炉部で放出後、ガスマスで検出されるまでの時間遅れ (コールド試験結果)	96
図 5. 34	燃料加熱温度とキャリアガス中の放出 FP ガス濃度との関係 (ガスクロ分析結果)	97
図 5. 35	ガスマス 1 分間平均値のガスクロ値による濃度補正結果	98
図 5. 36	FP ガス放出量 (算出結果)	99
図 5. 37	EPMA 分析結果を用いて評価した Xe 量と本試験結果の比較	100
図 5. 38	各温度範囲における FP ガス放出割合	100

## 1. 序 論

原子炉事故時に環境へ放出される核分裂生成物（以下、「FP」とする。）を中心とした放射性物質の種類とその量（以下、「ソースターム」とする。）を評価することを主目的に、照射燃料試験施設（以下、「AGF」とする。）のホットセル内に FP 放出挙動試験装置を設置し、照射燃料を用いた試験を進めている。

高速増殖炉（以下、「FBR」とする。）は軽水炉と比較して燃焼度が高く、事故事象の大部分が燃料の熔融を伴うなどの特徴があるが、そのソースターム評価は、これまで FBR における実験データが非常に限られているため、過度に保守的な仮定を用いた評価を行ってきた。しかし、今後 FBR プラントの大型化や燃料の長寿命化を視野に入れた場合、原子炉内の FP 蓄積量が増大することにより、今までと同じ仮定を用いたソースターム評価に基づいて設計を行うと、安全評価上からの成立性にも影響を及ぼす可能性がある。そこで、ソースタームを現実的に評価することは、合理的に FBR プラントの設計を行うための重要な課題となっている。

本実験の対象である燃料からの FP 放出現象は、事故時に FP 等が炉外の環境中へ放出するまでの原子炉内移行プロセスの最も初期の事象であり、FP が外部に放出されるまでの挙動全体に大きく影響する最も重要な現象である。また、FP ガスや揮発性 FP の放出挙動については、原子炉の定常運転または過渡運転状態時の燃料スエリングや FCCI、FCMI のような燃料挙動を評価するうえでも非常に重要である。

実施した試験は、FP 放出挙動試験装置を設置して最初の照射燃料を用いた試験であり、“FP-1”と“FP-2”の 2 回の試験の結果報告である。報告内容については、最初の照射燃料試験という観点から、加熱試験時の装置の性能データを示すと共に、得られた測定データについては即時性の観点での速報レベルのものである。

本報告書は FP 放出挙動試験装置の性能及び「常陽」で約 65GWd/t まで照射した MOX 燃料を用いて行った加熱試験の結果をまとめたものである。

## 2. 試験装置の概要

ホットセル内に設置したFP放出挙動試験装置では、高速実験炉「常陽」等で実際に照射したウラン-プルトニウム混合酸化物燃料（MOX燃料）を温度制御しながら溶融するまで加熱し、その際のFP放出の様子を各種分析装置により測定する。装置は図2.1の概略図及び図2.2の全体系統図に示すように高温加熱炉、サンプリング装置、分析装置等から構成されている。加熱炉にはFBRの想定事故時の燃料温度を一部模擬できる1~25℃/秒の加熱速度と、燃料溶融温度を超える3,000℃の最高加熱温度の性能を有した高周波誘導加熱炉を採用した。直接誘導加熱されるのは加熱炉中心部のコイル内に設置された筒状の形状をした加熱容器であり、この容器内に燃料が納められたるつぼを挿入し、加熱容器からの輻射熱によりるつぼを加熱する構造となっている。加熱、溶融された燃料から放出されるFP等のサンプリング装置への導入は高純度アルゴンのキャリアガスを用いている。

サンプリング装置は、放出されたFPを分別捕集する温度勾配管、焼結金属フィルタ、ガスサンプリングボトル等を加熱炉下流に直列に配置している。また、分析装置はγ線スペクトル測定装置、ガス分析装置（ガス質量分析装置、ガスクロマトグラフ分析装置）から構成されている。以下に本装置の特徴であるサンプリング装置及び分析装置の概要を示す。<sup>1)</sup>

### 2.1 サンプリング装置の概要

サンプリング装置は、試験時に放出されるさまざまな形態（蒸気、ガス、エアロゾル、ミスト状等）のFP等を捕集するためのものであり、図2.3の系統図に示すとおり温度勾配管、焼結金属フィルタ、コールドトラップ及びガスサンプリングボトルより構成されている。シースイータを用いて配管部に一定の温度勾配（上流側温度約750℃—下流側温度約150℃）を設けた温度勾配管は、試験時に温度部位ごとにFP等を凝縮・付着させ、この時得られる各FP等の付着プロファイルを基にその化学形態を調べるために用いられる。温度勾配管内部には、加熱容器内にキャリアガスを供給するためのキャリアガスライン1系統と試験時に放出されるFP等を凝縮・捕集するためのサンプリングラインが2系統（A系統、B系統）設けられている。サンプリングラインには一定の温度領域ごとに凝集・捕集したFP等のγ線測定を容易にするため、ニッケル製サンプリング管が1系統あたり14本挿入されている。温度勾配管で捕集されなかったエアロゾル等を捕集するための焼結金属フィルタは、ステンレス製ケースの中に孔径の異なるフィルタを5枚入れた構造であり、上流側（温度勾配管側）から下流にむかって孔径の大きな順（43、30、10、5、1μm）に配置している。この焼結金属フィルタは温度勾配管のサンプリングライン出口近傍にあり、A、B系統2箇所設置されている。焼結金属フィルタでも捕集できないと考えられるヨウ素成分を捕集するためのコールドトラップは、A系統、B系統それぞれに設置されている。コールドトラップの捕集配管部はU字型をしたステンレス製配管で、両端に手動式ボール弁とクイックカップラが取り付けられている。ヨウ素成分を捕集するのに80℃程度までU字型配管を冷却するため、間接熱媒体を満した容器内にU字型配管を挿入し、その間接熱媒体を液体窒素により冷却している。ガスサンプリングボトルはコールドトラップまでで捕集されない希ガス等のガス成分を捕集するためのものである。本ボトルは内容積500cc

のステンレス製で、No. 14 セル前面に設置されたガス分析用グローブボックス内に 10 本配置されており、2 系統のタイマー回路及び電磁バルブを使用し一定時間ごとに流入するガスをボトル内に捕集できるようになっている。

## 2.2 分析装置の概要

分析装置としては、 $\gamma$ 線スペクトル測定装置、ガス質量分析装置、ガスクロマトグラフ分析装置が設置されている。 $\gamma$ 線スペクトル測定装置は、加熱試験中にA系統の焼結金属フィルタ部に捕集されたFPや加熱試験後のサンプリング管に付着したFPなどの $\gamma$ 線を測定することにより各FP等の放出挙動を評価するために使用する。検出器には同軸型高純度ゲルマニウム半導体検出器を使用し、セルボックス背面とセル背面扉の隙間部に設置している。ガス質量分析装置は希ガス等のガス成分の濃度変化を加熱試験中に連続して測定することにより、ガス成分の放出時期、放出速度、同位体組成等を測定するもので、No. 14 セル前面のガス分析用グローブボックス側面部に設置されている。ガスクロマトグラフ分析装置は、試験時にサンプリングボトルに採取したガスに対し、オフラインで定性・定量分析を行うもので、No. 14 セル前面のガス分析用グローブボックス中に設置されている。

### 3. 供 試 材

#### 3.1 試験対象燃料

本試験に供する燃料としては、燃焼度が高く、且つ炉内取り出し日から試験に供するまでの期間が短いほうが、燃料内に存在する固体 FP 量が多いことから、試験時の放出 FP を検出し易い。一方で、燃料内 FP ガス保持量としては 60～70Gwd/t が最大となり、それ以上の燃焼度では保持率が低下することが分かっている<sup>2)</sup>。

これらの条件を最も満足する試料として、燃焼度が FP ガス保持率の高いと推定される約 60～70Gwd/t の位置を選定可能で、かつ炉取り出しからの期間が短く、試験に供する試料量も十分採取可能なことから PFD549 集合体切断ピンを選定した。PFD549 集合体の主な照射実績を表 3.1 に、ペレット製造時仕様を表 3.2 に示す。

#### 3.2 試料数量

試験条件については後述するが、実施した FP 放出挙動試験では加熱温度を主たるパラメータとして 2 回の試験を実施した。一試験当たりの試料量は 10g とし、照射条件がほぼ同一の切断ピン 2 本を選定した。選定したピンは燃焼度が約 65Gwd/t のピン No.L0012 と LOC72 の 2 本であり、それぞれ軸方向中心部 62mm を試験に供した。試験対象ピンの炉心装荷位置及びピン軸方向切断位置を図 3.1 に示すと共に、燃焼度分布を図 3.2 に示す。

#### 3.3 試料調製

本試験では、燃料からの FP 放出挙動を調べることを目的とすることから試料調製段階で燃料から被覆管を除去し、照射燃料単体を供試材として試験を実施した。燃料単体からの脱被覆管に当たっては燃料を細かく砕いてしまうと、燃料内に保持されている希ガスを試料調製段階に一部放出をさせてしまうことが考えられる。そこで試料調製では、L0012 と LOC72 の 2 試料について軸方向中心部の 62mm を輪切り切断した後、縦割り切断機を用いて脱被覆管作業を行った。脱被覆管作業は、事前のモックアップ試験結果に基づいて、被覆管の軸方向に等間隔に 4～5 箇所縦割りスリットを入れ被覆管を除去した。試料調製方法の概略を図 3.3 に示すと共に、試料調製した燃料の外観写真を図 3.4 に示す。

## 4. 試験条件

作製した2試料について、下記に示す試験条件にて計2回の試験を実施した。以下、それぞれの試験をFP-1、FP-2試験と称する。

### 4.1 加熱パターンとサンプリング系統の設定

実施した試験は一定保持温度におけるFP放出挙動を評価することを目的に実施した。従って、保持温度及び保持時間の設定にあたっては、基本的にCsの放出挙動評価に主眼を置き、ORNL (Oak Ridge National Laboratory) で実施されたFP放出試験結果 (NUREG/CR-6261)<sup>3)</sup>のFPの拡散係数を用いてのBoothモデルでのFP放出割合計算結果、日本原子力研究所で実施されたVEGA実験結果<sup>4)</sup>等を参考にした。以下に2回の試験の加熱パターンを示す。一定温度での保持時間は30分とした。保持温度に達するまでの昇温速度については、試験後のサンプリング部品の分析を考慮すれば高速にすることが望ましいが、一方で急速加熱における熱応力による放出挙動への影響も考えられる。今回設定した一定温度での30分の保持時間に対しては、昇温時間が最大でも1/10(3分)程度となる15°C/sを昇温速度とした。また保持温度の設定点数は、温度勾配管等のサンプリング系統が2系統のため、1試験あたり2点の保持温度とすると共に、オンラインでのγ線測定については構造上A系統焼結金属フィルタのみしか行えないことから、Csが高揮発性であることを考慮し、2点の保持温度の低温側をA系統とした。両試験の試験条件を表4.1に示すと共に加熱パターン図を図4.1に示す。

#### 4.1.1 FP-1試験

FP-1試験での保持温度については、ソースターム評価上重要な核種である高揮発性のCs及び燃料挙動評価上重要となる希ガスの放出率が評価可能と推定される2,000°Cと本試験目標の一つである燃料融点以上の挙動を評価するための3,000°Cの2点の保持温度とした。サンプリング系統の振り分けについては、Csや希ガスが比較的低温から放出を開始すると予想されることから2,000°C保持が終了するまでを、γ線測定が可能なA系統とし、2,000°C保持終了以降はB系統への切り替えを行った。

#### 4.1.2 FP-2試験

FP-2試験の保持温度については、FP-1試験の結果を考慮し設定した。FP-1試験では固相領域において保持温度2,000°Cのデータの取得を行い、詳細は後述するが計測できた核種はそれほど多くは無かったものの、Csを主体とした幾つかについては十分に計測できた。従って、FP-2試験ではCsを主体とした挙動に着目し、更に詳細なデータを取得するため、FP-1試験における2,000°Cのデータを補完する観点で、保持温度は1,500°C及び2,500°Cと設定した。一定温度保持時間及び昇温速度については、FP-1試験と同様に30分、15°C/sとした。

サンプリング系統の振り分けについては、Csの放出挙動に重点を置く観点から、低温である1,500°C保持が終了するまでをγ線オンライン測定が可能なA系統とし、1,500°C保持終了以降はB系統への切り替えを行った。

## 4.2 $\gamma$ 線測定

本試験では放射性FP核種が持つ固有の $\gamma$ 線を測定しFP放出挙動を観察した。ここでは、測定装置、測定体系および測定方法について説明する。

本試験で用いた $\gamma$ 線測定装置の構成を図4.2に示す。表4.2に主要部分の仕様を示す。本 $\gamma$ 線測定装置はセル内で使用する点、照射燃料のように高線量物を測定する点などの理由から測定及び評価上、以下のような制約のもと測定を行う必要がある。

- ・ 検出器に付属するデュワー瓶が小さい点、液体窒素導入部がデュワー瓶から離れている点及び液体窒素の供給量が限られている点から連続測定時間は最大で4時間程度である。
- ・ セル内に検出器が設置してあるため、セルが持つバックグラウンドの影響を受ける。
- ・ ボックス内での物品の移動でバックグラウンドの状況が変化する。
- ・ 極めて高い放射能を有する試料を測定するため、増幅器(最大8万cps)側で数え落としが発生する。

したがって、測定は断続的に行い、測定前にはバックグラウンドを測定し、測定中においてはボックス内での物品を移動しないようにした。また、検出部は可能な限りコリメートし、それ以外の部位には可能な限り遮へい体で覆うような構造とした。

図4.3(1)、(2)に検出器と測定試料の設置位置の関係を示す。測定位置にはA系統焼結金属フィルタケーシングの位置(ケーシング位置)と測定台がある。後者はアームで保持されており、測定していない時は撤去できる。

高圧電源は3.5kV、チャンネルは4,096(1~69チャンネル及び4,000~4,096チャンネルはカットオフした)で測定した。また、特にオンライン測定のような連続測定時のピークシフトを軽減するためにピークスタビライザーを作動させ、1,321チャンネルがCs-137の661.7KeVのピークとなるようにした。これらの設定はすべての測定について同様である。

$\gamma$ 線測定により評価した項目について、試料、数量、目的等を整理すると、表4.3のようになる。それぞれの測定項目について以下に説明する。

### 4.2.1 オンライン測定

オンライン測定ではA系統焼結金属フィルタケーシングを測定している(図4.3(1)、(2)参照)。図4.4に示すようにここでは異なる孔径を持つ5枚のフィルタがOリングを介して積み重なり、ケーシングに収納されている。図に示すように、測定できる範囲はフィルタ5枚を含んでいるため、オンライン測定で得られるデータはこれらのフィルタ及びケーシングに付着した放射性FPからの $\gamma$ 線によるものである。

FP-1における試験体の加熱パターンは2,000°Cで30分保持した後、3,000°Cまで昇温し30分保持しているが、このうちA系統にキャリアガスを通じたのは2,000°Cでの30分保持が終了するまでである。したがって、このオンライン測定では試験体を室温から2,000°Cになるまでの3分10秒と2,000°Cで30分保持している間を観察した。本測定ではA系統ケーシングに付着している放射性FPの時間変化を得るため、測定は高周波加熱炉の出力投入の20分前から測定時間100秒で連続して60回測定している(各測定でスペクトルデータのハードディスクへの読み込み時間約1.5秒が必要であるため、1測定で101.5秒刻みのデータである)。

FP-2における試験体の加熱パターンは1,500°C、30分保持及び2,500°C、30分保持であり、この



うち A 系統にキャリアガスを通じたのは前者である。したがって、このオンライン測定では試験体を室温から 1500℃になるまでの 2 分 31 秒と 1500℃で 30 分保持している間を観察できる。測定は高周波加熱炉の出力投入の 10 分前から実施し、48 回測定した。

#### 4.2.2 オフライン測定

γ線測定によるオフライン測定については、オンライン測定で使用している γ 検出器を利用し、コリメータ前面部にある測定台(図 4.3(1)、(2)参照)に、各サンプリング部品等(試験体、サンプリング管、焼結金属フィルタ)をセットし測定を行った。以下に、それぞれのサンプリング部品等に対する測定について説明する。

##### (1) 燃料

加熱される試験体(FP-1 : 9.55g、FP-2 : 9.52g)をタングステンるつぼに収納し、さらにアルミニウム製試料容器に収めた状態で測定台に設置し測定した。測定時の試料の状況及び脱被覆した試料の写真を図 4.5 に示す。照射燃料から放射される γ 線は非常に強く、その計数率がアナログ-デジタル変換による処理可能な 8 万 cps を超えてしまうことが FP-1 における試験体に対する測定で明らかとなった。そのため、FP-2 では放射性 FP のインベントリ評価用試料として、試験体切り出し位置に隣接する部位からピン長さにして 1mm 程度の燃料を採取した。このインベントリ評価用試料は 0.22g で FP-2 試験体の 2.2%程度であった。ESPRIT-J のデータから試験体とインベントリ評価用試料における燃焼度の平均値の差は 1%以下であることを考えると、インベントリ評価用試料の放射能は試験体の 2.2%程度であるので γ 線測定でのインベントリ評価の可能性があると考えられる。測定時間は 3500 秒であるが、試料の放射能の強さに応じて合理的に考えて、短い測定時間を設定した。

試験後のタングステンるつぼは、試験前と同様に試料容器に収納され、試験後の燃料中に残留する放射性 FP の同定と相対量評価のため再度測定した。FP-1 の試験体は 2,000℃で 30 分及び 3,000℃で 30 分、FP-2 の試験体は 1,500℃で 30 分及び 2,500℃で 30 分の熱履歴を経験している。

これらの測定より試験体中の FP のインベントリ及び試験後の残留量を評価した。

##### (2) サンプリング管

前述したように温度が一定に保たれた温度勾配管内(系統の上流側から 750℃~150℃)にはさや管と呼ばれる一本の管が収納してあり、その中には長さ 30mm×φ5.2mm のサンプリング管が縦に 14 個(最も系統の下流に設置してあるサンプリング管の温度はモニタされていない)配置されている(図 4.3(1)参照)。FP-1 では試料温度がそれぞれ 2,000℃の時 A 系統、3,000℃の時 B 系統に加熱された燃料から放出した FP を含んだキャリアガスが通過している(それぞれ保持時間は 30 分)。一方、FP-2 は A 系統 1,500℃、B 系統 2,500℃であり、保持時間は同様である。試験後はこれらのサンプリング管をそれぞれ個別の試料容器へ収納し、γ線計測に供する(図 4.6 参照)。

測定時間は約 2,400 秒であるが、工程上の制約と裕度のバランスで長短がある。この測定により、試験体から放出した放射性 FP 核種の同定と相対量評価を行い、これと温度勾配管の温度により、放射性 FP の付着の温度依存性をみる。また、試験体の加熱温度依存性とあわせて評価することで放出した放射性 FP の化学形を予測する基礎データとする。

### (3) 焼結金属フィルタ

サンプリング管を通じた FP を含むキャリアガスはさらにケーシング内に設置してある焼結金属フィルタ(孔径がそれぞれ 43、30、10、5、1 $\mu$ m の 5 つの焼結金属フィルタ)を通過する(図 4.3(1)及び図 4.4 参照)。試験後、ケーシングを開封してそれぞれの焼結金属フィルタを試料容器に収納し、 $\gamma$ 線測定に供する(図 4.7 参照)。

測定時間はサンプリング管と同様で約 2,400 秒である。この測定から FP 等の移動形態がエアロゾル状の粒子である場合、その粒形分布に関する情報を与える。

これらオフライン測定では試験前後の放射性 FP のマスバランスを明らかにすることを大きな目的の一つとした。すなわち、試験前の試験体に存在する放射性 FP からの  $\gamma$  線の計数率と試験後の試験体、サンプリング管及び焼結金属フィルタに付着する FP からの  $\gamma$  線の計数率和の関係に注目した。

## 4.3 ガス分析

希ガスの放出挙動分析に当たっては、加熱試験中におけるガス質量分析装置(以下「ガスマス」とする。)でのオンライン連続測定、及び加熱試験中にサンプリングボトルに捕集したガスのガスクロマトグラフ分析装置(以下「ガスクロ」とする。)による濃度測定を基本として実施した。なお、ガス分析装置まで放出ガスを移行させるキャリアガスの流量はマスフローメータにより 1 l/min (1 LM) に設定した。

### 4.3.1 ガスマスによる分析

ガスマスはガス成分の濃度変化を連続して測定することにより、加熱試験中における FP ガスの放出時期、放出量等を分析する。本試験では測定間隔を短くするために、測定する質量数を H<sub>2</sub>、He、Kr、Xe に該当する主要な質量数に絞り連続測定を行った。また、加熱試験後については、サンプリングボトルに捕集したガスを用いて主要各種の同位体組成比を評価した。

### 4.3.2 ガスクロによる分析

ガスクロによる分析について最重要となるのは、ガスクロ分析用に捕集するサンプリングボトルのサンプリング時間設定である。サンプリングボトルは計 10 本設置しており、1 本あたりのサンプリング時間は、コールド試験の結果からボトル内の圧力上昇による流量低下のない 1 分間と設定した。

捕集タイミングの設定に当たっては、加熱過程での FP ガス放出時期及び燃料から放出した希ガスが、ガス分析グローブボックス内のサンプリングボトル部に到達するまでの時間遅れを考慮し設定した。本試験では、先ず FP-1 試験において、Kr、Xe の放出が顕著と推定される 2,000°C の保持温度とそれ以下の昇温過程の捕集を主体とする設定を行った。

1 本のボトルへの捕集終了後次のボトルの捕集開始までの時間(以下「タイムスパン」とする。)は FP-1 試験において 3 分間として試験を実施したが、高温側でも FP ガスの放出が見られたことを踏まえ、FP-2 試験ではタイムスパンを 5 分間に変更し加熱中の全般で均等に捕集を行うようにした。表 4.4 に両試験でのタイマー設定値を示す。

## 5. 結 果

### 5.1 加熱試験時の装置性能

FP-1 及び FP-2 試験における加熱試験時の装置計器類の指示値について、図 5.1～図 5.11 に示す。冷却水流量・温度、加熱炉フランジ温度等装置の安全運転上監視している数値には特に異常はなく、正常に機能していた。また、試験条件に係わる値である、加熱温度、キャリアガス流量、温度勾配管温度等についても当初予定した通りの数値であり、ほぼ満足する試験条件を構築することができた。以下に、試験条件に係わる部分の計測結果について報告する。

#### 5.1.1 加熱温度

##### (1) 温度制御精度

設定した加熱パターンに対する実際の制御は、1,000°C以下の低温部については赤外線温度計の測定レンジ外であり擬似温度入力によるパワー制御を行い、温度指示後に手動操作によりフィードバック制御への切替る方法を行った。結果としては15°C/sの早い昇温過程においても円滑に制御切替えを行うことができ、1,000°C以下の温度は推定であるものの、図 5.1 に示す通りほぼ設定した加熱パターン通りにコントロールできた温度履歴とすることができた。但し、FP-1、FP-2 試験とも低温側の保持温度到達時に若干のオーバーシュートが見られた。

##### (2) 温度計精度

赤外線温度計の指示値の精度に関しては、事前に測温精度評価及び温度校正試験を実施している。試験方法としては、Mo 及び Ta の高融点金属を標準試料としてそれらを加熱し、熔融時の指示温度を融点値 (Mo : 2,630°C、Ta : 2,990°C<sup>9)</sup>) と合うように温度計の補正を行った。実際には加熱中に試料を直視することや熔融時の吸熱反応を計測することは不可能なことから、標準試料をるつぼに入れ、融点前後まで加熱し冷却後、試料の熔融・未熔融を目視確認し融点を絞り込んだ。最終的には熔融・未熔融の再現性が確実にある温度を融点の最大・最小値としてその平均をノミナル値とした。その結果、放射温度計の精度は±30°Cであることを確認した。

#### 5.1.2 温度勾配管温度

温度勾配管は加熱炉に近い上流側を750°C、下流側を150°Cとし直線的な温度勾配を設けており、この温度勾配下への付着プロファイルを計測することにより、化学形態等の推定を行うことを目的としている。加熱試験中における実際の温度勾配は図 5.3 に示すとおりであり、500°C付近が温度勾配管のつなぎ目にあたるため若干低い値を示しているが、良好な直線性得られた。また、図 5.4 に示したとおりこの温度が最高3,000°Cの加熱試験中においても変動することはなかった。

#### 5.1.3 サンプルングガス流量

サンプルングガス流量はサンプルングボトル内に捕集したガス量を決定する際に必要なデータであり、捕集ガスのガスクロ分析結果から Kr、Xe 等の核種それぞれを定量値に換算するのに用いる。サンプルングガス流量はマスフローメータにより1 l/min (1 LM) に制御しており、事前に真空排

気したサンプリングボトル内への捕集時間は1分間に設定していることから室温(25°C)において1-lのガスが捕集されている。本試験における流量の安定性は図5.5に示すとおりであり、FP-2試験において捕集時間後半においてわずかの流量低下が見られたものの、1 l/minでの制御性は非常に良好であった。

よって、本報告書におけるガス量の定量においてはサンプリングボトル内捕集ガスを1 l(但し、25°C, 1 atm条件)として実施した。

## 5.2 放出FPの $\gamma$ 線計測結果

### 5.2.1 バックグラウンドの時間変化

本 $\gamma$ 線測定では測定体系がセル内であるため、検出器に最低限の遮へいは施されているものの比較的高いバックグラウンドが常に存在し、なおかつボックス内の物品の移動に依存して変化する。そこで本測定では前述の通り、試験体等の測定前に必ずバックグラウンドを測定した。図5.12にFP-1及びFP-2にかかわる測定時(平成12年12月15日~平成13年5月9日)の主なバックグラウンドピークCs-137(661.7keV)、Rh-106(511.7keV)及びEu-154(1,274.7keV)の計数率変化を示す。Cs-137(661.7keV)のバックグラウンドは5cps~15cps程度で推移していることが分かる。試験実施によるバックグラウンドの上昇は見られないが、その後のオフライン測定を行っていくうちに断続的に上昇している。これはサンプリング部品や試験体のセルボックス内での置き場所等に依存していると考えられる。Rh-106(511.7keV)とEu-154(1,274.7keV)のバックグラウンド変化は良く一致していることが分かる。これらをCs-137(661.7keV)のバックグラウンドの推移と比較すると、一致しない点があることが分かる。これは、Rh-106、Eu-154とCs-137が存在する物品(試験体、サンプリング管やフィルタなど)が若干異なることを示していると考えられる。

これ以降特に断らない限り、試験体等の測定で得られた計数率はこれらのバックグラウンドが差し引いてある。

### 5.2.2 オンライン測定

オンライン測定で得られた $\gamma$ 線スペクトルの例を図5.13に示す(FP-1の31回目の測定)。図のようにスペクトルで確認されるピークはCs-137とCs-134のような放射能が高く、高い放出率を有する核種のみであった。放射性FPのうち放出したものがこれらの核種のみと判断できないが、少なくともオンライン測定で時間変化が評価できるものはこの二つの核種であり、Csの一つの元素である。

図5.14と図5.15(表5.1に数値データを示す)にFP-1及びFP-2におけるCs-137(661.7keV)とCs-134(604.75keV)の計数率の時間変化を示す。ここには試料温度の時間変化も合わせて示す。FP-1、FP-2の両者において加熱開始後直ちにCsが放出しているのがわかる。また、FP-1とFP-2では計数率にして3倍程度の違いがあり、試料温度が2,000°Cと1,500°Cではその放出特性に歴然とした差があることが分かる。これは温度の違いによるCsの活性度合いが異なることだけではなく、安定化学形が異なるため生じる差、試験体におけるFP量の差等の理由によるものと考えられるため、マスバランスに注意して熱力学的に評価すべき点である。Cs放出の状況をさらに見やすく整理するために、各測定時間(100秒)に増加した計数率の時間変化をFP-1、FP-2においてそれぞれ図5.16、図5.17(表5.1に数値データを示す)に示す。図のようにFP-1、FP-2ともCs-137とCs-134のピークが100秒ずつれていることが分かる。また、ピーク後の変化はほぼなだらかであるが、数箇所計数率が若干高く

なるような形となっている。これらは、両者の生成過程(Cs-137 はほとんどが核分裂で生成し、Cs-134 は Xe-133 の崩壊後の中性子吸収または Cs-133 の中性子吸収で生成している)が若干異なることや生成量が異なること等により燃料内での分布が異なることに起因している可能性がある。この差異を追求すれば、炉内 FP 挙動に関して有用な情報となりうる。

### 5.2.3 オフライン測定

#### (1) 焼結金属フィルタ試験体及びインベントリ評価試料に対する測定

試験後のタングステンるつぼの外観及び内部を観察した写真を図 5.18 に示す(FP-1)。外観に変化は無いことが分かるが、内部の燃料については本写真では良く確認できない。図 5.19、図 5.20 にそれぞれ FP-1、FP-2 における試験体に対して得られた試験前後の $\gamma$ 線スペクトルを示す。図のように試験前のみに見られるピーク、試験後のみに見られるピーク及び両者に見られるピークの 3 種類が見られる。これらはそれぞれ放出した核種のもの、試験前は計数が高くピークサーチができなかったものの、放出しなかったかあるいは一部放出したものであると考えられる。

核種同定の参考とするため、同位体生成・崩壊計算コード ORIGEN-2 を用いて生成される核種の放射能と収量を計算した。この計算では計算条件を正確に設定していないため(試料重量等)、その放射能と収量における順位を評価するにとどめている。この評価結果を $\gamma$ 線エネルギーとその放出率とともに表 5.2(1)～(3)に示す。このデータベースをもとに FP-1 の試験体における $\gamma$ 線スペクトルのピークから核種の同定を行った結果を図 5.21 に示す。同定された核種は Sb-125、Rh(Ru)-106、Cs-134、Nb-95(?), Eu-154、Pr-144、Cs-137、Pm-146、Zr-95、Ag-110M、Cs-135(?), Eu-152、Co-60 の 13 個であった。FP-1 の試験体、FP-2 の試験体及びインベントリ評価試料における検出ピークから同定された核種及び計数率を表 5.3(1)、(2)に示す。

これらの測定から試験前の試験体に含まれる放射性 FP の計数率を評価した。評価結果については 5.2(4)に示す。

#### (2) サンプリング管に対する測定

図 5.22 にサンプリング管に対する測定で得られたスペクトルの例を示す(FP-1、A 系統、上流側から 6 番目のサンプリング管)。Ru-106(Rh-106)、Eu-154 はバックグラウンドの影響であることを考慮すると(図 5.12 参照)、このスペクトルより燃料から放出しサンプリング管に付着した核種は Sb-125、Cs-134、Cs-137、Pm-147、Pr-144 と同定できる。表 5.4(1)、(2)に FP-1 および FP-2 の A・B 系統の各 14 つのサンプリング管に対するピークサーチ結果を示す。この表のようにサンプリング温度と相関を見ることが出来る核種は Cs-134、Cs-137、Sb-125 であり、その他は計数率が小さいか、放出率が小さいかの理由で温度勾配管に対するプロファイルを観察するには困難である。

Cs-134、Cs-137、Sb-125 の温度勾配管の温度に対するプロファイルを図 5.23(1)～(4)に示す(温度勾配管は試験中にほとんど一定温度であったため、平均値で示す)。ただし、系統の最も下流部の温度勾配管温度は測定されていないため参考値である。Cs の場合、いずれのプロファイルも温度勾配管温度が 500℃以下で計数率が高い傾向にあることがわかる。また、FP-2 の B 系統以外は下流に行くにつれて計数率は程度の差があるものの一旦降下し、最も下流のサンプリング管で再び上昇している。Sb-125 の場合、FP-1 及び FP-2 のいずれについても試料温度が高い B 系統でのみ検出されている。これらにおける Sb-125 のプロファイルはまったく異なっており、3,000℃保持した FP-1 の B 系統にお

いては温度勾配管温度 500°C でピークを持ち、一方で 2,500°C 保持した FP-2 の B 系統においては温度勾配管温度が最も高いところで計数率が最も高くそれ以下の温度では単調に減少している。このようなプロファイルの特徴を解釈するには Cs や Sb の化学形の温度依存性を考えるだけでなく、一段階での温度保持を終了した段階でどのような FP がどの程度の FP が燃料に残留していたかを考察する必要がある。また、CVD (chemical vapor decomposition) 技術にあるように、気相移動中での化学形の変化も考慮すべきであろう。

### (3) 焼結金属フィルタに対する測定

図 5.24(1)～(4)に試験後のフィルタの写真を示す。これらのフィルタは各系統で最も上流側のフィルタである。FP-1 及び FP-2 の両者において B 系統で白い粉上のものが付着している。一方で A 系統では黒いしみのようなものが見られる。系統でのケーシング保持方向の違いや付着物の色・状態の差異などの情報は、放出される FP の化学形の推察に関して有益な情報となりうる。

図 5.25(1)、(2)にそれぞれ FP-2 における A 系統と B 系統の焼結金属フィルタに対する測定で得られたスペクトルの例を示す。ここで示すのは 5 つのフィルタのうち最も系統の上流側に装着されたフィルタで孔径は 43  $\mu\text{m}$  である。ここで同定された核種は Sb-134、Cs-134、Cs-137、Pm-146 であった(バックグランドピークに関するピークサーチ結果は示していない)。これらの核種は(2)で示したサンプリング管で検出された核種とほぼ同様である。FP-1、FP-2 の A・B 系統の各 5 枚のフィルタに対するピークサーチ結果を表 5.5(1)、(2)に示す。

図 5.26(1)～(4)に FP-1、FP-2 の A 系統と B 系統における Cs-134、Cs-137、Sb-125、Pm-146 のプロファイルを横軸としてフィルタの孔径に示す。図のように A 系統の最も上流のフィルタを除けば、A 系統、B 系統ともプロファイルの形は良く似ていることがわかる。また、両方とも最も下流のフィルタでの計数率はほぼ等しい。これらの孔径依存性を考慮してエアロゾルの基本的性質、粒子の数分布の取り扱い等を検討することで現象をさらに的確に捉えることができる。

## 5.2.4 相対量評価

ここでは暫定的な評価とはなるが、Cs-137、Cs-134、Sb-125(参考)の試験前後のマスバランスについて計数率を用いて評価した。

まず、試験前に燃料に含まれる FP について評価する。FP-1 についてはインベントリ評価用の少量試料の測定を行っていないので、FP-2 の評価を中心に行う。イベントリ評価試料の重量は FP-2 の試験体の重量に対して約 1/45.3 倍である。したがって、増幅器の数え落としなしに測定できたものとして( $\gamma$ 線のグロスの計数率は 3 万 cps 程度であった)インベントリ評価用試料で得られた計数率を単純に 45.3 倍したところ、比較的高い計数率で複数のピークを持つ核種 Rh(Ru)-106 と Eu-154 のほとんどの  $\gamma$ 線についてその計数率が試験後のろつぼに残った Rh(Ru)-106 と Eu-154 の計数率と良く一致した。Rh(Ru)-106 と Eu-154 はサンプリング管や焼結金属フィルタの測定ではバックグランドからの寄与以外検出されておらず、本加熱試験で放出していない核種であると考えている。この点からインベントリ評価用試料から得られた計数率を 45.3 倍することで試験前の FP-2 の試験体に存在した Cs-137 をはじめとする FP の計数率を予想できると考えた。

オフライン測定での測定対象物は試験体、サンプリング管、焼結金属フィルタであるが、それぞれ図 4.5、図 4.6、図 4.7 のように異なる試料容器に収納してあるため、すべて測定場所が同じ測定台

であるとしても容器等の遮へいの影響を受ける。ここではこれを暫定的に補正するため、試料と検出器を結ぶ直線上の遮へい物による $\gamma$ 線の減衰を考慮した(ビルドアップ、試料形状、試料自己遮へい等の影響はここでは考えていない)。光子( $\gamma$ 線)の減弱係数のうち、タングステン、ステンレス、真鍮に対するものが得られなかったため、タングステンと鉛で、ステンレスと真鍮は鉄で置き換えて評価した。また、密度が小さいのでアルミニウムの影響は小さいと考え、本評価では無視している。Sb-125(427.8keV)、Cs-134(604.7keV)、Rh(Ru)-106(622.1keV)、Cs-137(661.7keV)、Eu-154(723.6keV)、Rh(Ru)-106(1,050.7keV)、Eu-154(1,274.5keV)に対する係数を試験体、焼結金属フィルタ及びサンプリング管について表 5.6 に示す。この係数で測定された計数率を割ることで、それぞれの測定で得られた計数率が直接比較することができる。

FP-1における測定時に使用した $\gamma$ 線スペクトル測定装置の増幅器とFP-2のものでは異なっており、同試料においてもその計数率は若干異なっていることが分かっている。FP-1/FP-2は約1.1倍であった。

FP-1ではインベントリ評価試料は用意していないが、Rh(Ru)-106とEu-154の計数率が試験前後で変化しないという仮定のもと、FP-1試験体の試験前のインベントリを予想した。

これらの評価で得られたFPの相対存在量の評価結果を表 5.7(1)、(2)に示す。ここで相対量の評価した核種は試験体ではSb-125、Cs-134、Rh(Ru)-106、Cs-137、Eu-154であり、サンプリング管及び焼結金属フィルタではSb-125、Cs-134、Cs-137である。

図 5.27(1)~(4)にFP-1、FP-2のA及びB系統におけるSb-125、Cs-134、Cs-137のマスバランスを示す。Cs-137はサンプリング管部分で緩やかに増加し、保持温度が2,000°C以上の場合、その後ほとんど減少することなくフィルタまで達し、フィルタでは5,000cps以上の計数率に増加している。1500°C保持の場合、フィルタ前で計数率は減少し、フィルタでも1,000cps以下の計数に留まっている。Cs-134もCs-137と同様の傾向を示している。一方、Sb-125の付着挙動はこれらの核種と異なっており、2,000°C以下での検出はまったく無い。2,500°Cと3,000°Cで系統の上流のフィルタに付着している点は同様であるが、2,500°C保持ではサンプリング管流路上流部、3,000°C保持ではサンプリング管流路中間部に付着していることが分かる。ただし、Sb-125の場合、測定部位によっては計数率が低いためまくピークサーチが行われなかった可能性があることを念頭におく必要がある。フィルタとサンプリング管での付着率の割合はFP-1のA系統(2,000°C保持)でCs-137が76:24、Cs-134が75:25、FP-1のB系統(3,000°C保持)でCs-137が68:32、Cs-134が67:33、FP-2のA系統(1,500°C保持)でCs-137が62:38、Cs-134が61:39、FP-2のB系統(2,500°C保持)でCs-137が74:26、Cs-134が75:25であった。この比率は試験体の保持温度だけではなく、燃料に残っているFPの量や種類にも依存していると考えられる(FP-1、FP-2のいずれの場合でもB系統はA系統に通じた後燃料に残留しているFPの放出となっている)。

次に試験当たりのCs-137のマスバランスをみる(図 5.28(1)、(2))。FP-1でのA系統とB系統の付着比は54:46である(サンプリング管53:47、フィルタ61:39)。FP-2では18:82(サンプリング管25:75、フィルタ16:84)であり、8割がB系統に付着している。

FP-2における試験前に存在していたと思われるCs-137、Cs-134の相対量と試験後のサンプリング管及びフィルタに付着している相対量を比較する(図 5.29(1)、(2))。両核種とも試験前後の全量は10%程度で一致していることが分かる。この点はソースターム評価上非常に有用な結果であり、本試験及び測定が十分な精度で行われたことを示している。しかしながら、詳細に見ていくとCs-137に

においては試験後の計数率は試験前より小さい。また、Cs-134においてはその逆の傾向を示している。系統内にはサンプリング管とフィルタ以外にも距離は短いがいづらかの配管があり、そこでも若干のFPの付着がある可能性がある。したがって、試験体のインベントリより試験後の全量が小さい方が容認しやすいことになる。Cs-137においては合致するが、Cs-134では試験後の全量が試験前に比べて増えている。考えられる理由はインベントリ評価の精度がCs-137の評価と比べて低かったこと等があげられる。測定精度について従来の $\gamma$ 線計測(品質の高い標準試料が必要)と同等の定量性はないが、試料形状、試料自己遮蔽等を考慮することで改良できると考えられる。

最後にFP-1とFP-2におけるCs-137のマスマスを比較する(図5.30(1)、(2))。ここで分かるのは、1,500℃と2,000℃では3倍以上の放出量の差がある点、B系統の付着はA系統での温度に強く依存するという点である。また、このような温度依存性はフィルタで顕著に見られ、サンプリング管ではあまり明確ではない。これは温度勾配管への付着量は飽和するとも考えられる。この点はサンプリング管への付着速度を考える上で重要になる。

### 5.3 放出FPガスのガス分析結果

キャリアガスによりセル内加熱炉から操作室に設置してあるガス分析装置まで、加熱試験中に連続的に移送された放出FPガスのガスマスによる連続測定及び一定時間間隔で捕集したサンプリングガスのガスクロによる測定を行った。その結果、ガスマス及びガスクロともXeを主体として分析に十分なFPガスが計測できた。それぞれの分析結果を以下に示すと共に、ガスクロの定量値からガスマスの連続分析値を補正し、加熱試験中における放出したFPガスの定量評価を実施した結果についても報告する。

#### 5.3.1 ガスマスによる分析結果

##### (1) 加熱試験中における連続測定結果

ガスマスによる連続測定は、加熱試験中におけるキャリアガス中のFPガス濃度の相対変化を計測することに主眼をおいている。従って、スキャンスピードを早めるためすべてのチャンネルの測定は行わず、連続測定するH<sub>2</sub>、He、Kr、Xeに対応する主要な質量数として2、4、84、132に限定し測定を行った。また、ガスマス測定において直接得られる値は電流値による相対値であるが、試みとして標準ガスを用いて検量線を作成しFP濃度換算を行った。その試験結果を図5.31に示す。

FP-1試験は照射燃料を用いた最初の試験であるため、放出FPガスのキャリアガス中の濃度が十分な有意差として検出可能かどうかという基本的な能力の確認も兼ねていたが、結果として十分なピークが計測できた。しかし、加熱試験中に電離真空計の電源スイッチが何らかの原因で切れてしまったため、加熱開始後の約7分弱は計測できなかった。FP-2試験結果との比較から、FP-1試験の1,500℃加熱過程におけるH<sub>2</sub>、HeとKrの一部のデータが取得できていないと推測される。このことを踏まえてのFP-1試験の結果は、Krはデータの一部が計測されていないがFP-2試験結果との比較から、加熱開始から約6分後に、2,000℃到達後で約3分後にバースト的放出が発生したと推測される。その後1分30秒程度遅れてXeの放出が緩やかに開始し、その放出は15分間以上に渡って計測された。その後の3,000℃への昇温においては、2,000℃保持時のピーク値より低いものの同様な時間履歴でのKr及びXeの放出が見られた。温度履歴との直接的な比較では燃料の溶融開始温度である約2,700℃<sup>4)</sup>を超え、3,000℃到達以降にガス放出が観察されているが、現実的挙動としては考えにくく、



加熱された燃料から放出したガスがガス分析装置に到達するまでの時間遅れ、経路配管内での拡散等を考慮した評価をする必要がある。また、Kr と Xe の放出履歴の差異についても装置特性上見られた現象であると推定しており、これらについては、(2)項で考察する。

FP-2 試験では、FP-1 試験でガス放出が大きかった 2,000°C を基準に前後 500°C の保持温度での試験を実施した結果、FP-1 試験と類似した放出履歴を示したが、その量については 2,500°C 保持の方が多い結果となった。また、加熱初期において H<sub>2</sub> の高濃度の放出が観察されたが、これについては試料が空気中で保管されていたための湿分による影響と考えられる。

キャリアガス中のガス濃度値への換算については、20ppm 及び 1,000ppm の 2 種類の標準ガスを用いてそれぞれの核種について検量線を作成して行ったが、絶対値としての精度は低いことから参考値としての値である。定量についての検討はガスクロ測定結果を元に補正した計算結果を後述する。

## (2) FP ガス放出履歴の補正と考察

ガス分析結果の FP ガス放出履歴は、保持温度に到達してからかなり遅れて FP ガスの放出が発生すること、及び Kr と Xe の放出開始時間に差があると共に放出時間にも大きな差異がある等の装置特性に依存していると思われる挙動が見られる。FP が放出してからキャリアガスによりガス分析装置に到達するまでの時間遅れ及び配管内での拡散については、加熱炉に最も近い分析機器である  $\gamma$  線計測のオンライン測定結果をもとに補正できないかを期待したが、 $\gamma$  線測定では希ガスのオンライン計測ができなかった。そこで、ガス分析装置の校正用に用いている標準ガスをキャリアガス系統に導入し、それをガスマスで連続測定することにより Kr と Xe の放出挙動の違いに関して調査を実施した。

調査をするに当たって、基本的には同様な希ガスである Kr 及び Xe の加熱放出のタイミングに違いはないとの推測のもと、これら希ガスに選択的に影響を与えるものとして、キャリアガス系統の加熱炉下流側に設置してあるコールドトラップ及びヨウ素フィルタに着目した。コールドトラップについては FP ガス以外の核種をトラップするため冷却温度を -80°C に設定している。それに対して Kr、Xe の沸点がそれぞれ -153°C、-108°C であり、設定した冷却温度が Xe の沸点に近いことからその影響の有無を確認した。コールドトラップに標準ガスを通過させた場合とバイパスした場合との比較を行った結果、測定結果に差は無くコールドトラップによる影響は見られなかった。次にヨウ素フィルタであるが、本フィルタは操作室に設置したガス分析装置へのヨウ素の流れ込みによる線量率の増大を防止するために設置したものであり、配管内に粒状の「銀ゼオライト」を詰め込んだ構造をしている。これについてもフィルタを通過させた場合とバイパスした場合のガスマス連続測定を実施した。その結果を図 5.32 に示す。この測定では明確な違いが観察された。試験条件は、Kr、Xe とも濃度 1% の標準ガスを使用し、キャリアガス導入口である操作室に設置した Ar ガスボンベ部の配管を分岐し、キャリアガスを流しながら 10 秒間標準ガスの導入を行った。この結果、ヨウ素フィルタを通過させた場合約 2 分 30 秒後 Kr の急激な濃度の上昇が見られ、3 分程度でバックグラウンドレベルに戻ったのに対し、Xe は 2 分経過後にゆっくりと濃度が上昇しその濃度上昇は 15 分程度続いた。一方、ヨウ素フィルタをバイパスさせた場合は、約 2 分後に Kr、Xe 共に急激な濃度上昇がみられ、3 分程度で両方ともバックグラウンドレベルにまで戻った。

以上の結果から、FP-1 及び FP-2 試験結果で見られた Kr に対する Xe の放出の遅れは、吸着材である銀ゼオライトにより選択的に影響を受けたのが原因であったことが判明し、また Kr についてはヨウ素フィルタを通過させた場合に若干の時間遅れが発生したもののピーク形状に変化は無く、その影響

は非常に小さいことから、Xe の放出履歴は Kr と同様であったと推測される。

一方、実際の燃料からの FP ガスの放出挙動を評価するには、加熱放出した FP ガスが分析装置に到達するまでの時間遅れ及び配管内での拡散を考慮しなければならない。時間遅れについては、加熱炉中心部から標準ガスを放出させて時間遅れを測定するコールド試験の結果から、図 5.33 に示すとおり Kr で約 70 秒であることが分かっている。また拡散に関しては現在の所それを補正するための実験データがないが、図 5.33 に示すコールド試験結果ではガスマスの濃度値が上昇してから最高値に達するまでの時間が約 30 秒であること、及び操作室側からガスを 10 秒間導入した条件である図 5.32 においても濃度が上昇してから最高値に達するまで同じく約 30 秒かかっていることなどから推測すると、Kr の放出時間が標準ガスの試験と同様で 2～3 分であった FP-1 及び FP-2 試験における Kr 及び Xe は、荒い評価ではあるが実際には 10 秒程度のバースト放出であったことが推定される。

### (3) サンプルングガスによる同位体組成分析結果

ガスクロ測定用に捕集したサンプルングボトル内ガスについて、ガスクロ測定後の残ガスをガスマスに導入し同位体組成分析を実施した。その結果を表 5.8～表 5.11 に示す。得られた同位体組成比は、ORIGEN-2 コードで評価した結果と良い一致を示し、天然同位体では Kr-84 及び Xe-132 が組成比が最も高いのに対し、FP ガスでは Kr-86 及び Xe-134 であった。FP-2 試験では、Kr-84、86 及び Xe-132、134 の同時測定を実施したが、Kr-86 及び Xe-134 のデータはノイズが非常に大きい結果となり評価に使用することができなかった。現在のところその原因は不明であり、今後の試験実施時のガスマスの測定質量数については事前検討を実施する必要がある。一方、 $H_2$  の同位体組成分析では、通常であれば分子  $H_2$  からなり、測定で得られる質量数は 2 であるが、測定結果では、ばらつきが大きいものの質量数 1 の組成比も高い結果が得られた。標準ガスの測定結果でも質量数 1 が高い結果となったことから、分析装置自体のピーク位置のずれが生じていた可能性がある。

### 5.3.2 ガスクロによるサンプルングガス測定結果

試験前に容器内を真空排気した 10 本のサンプルングボトルにより、加熱試験中に一定の時間間隔で 1 分間キャリアガスのサンプルングを行ったガスについてガスクロ分析を行った結果を図 5.34 に示す。FP-1 及び FP-2 試験とも、キャリアガス中の Kr 及び Xe の濃度は、ガスマス分析結果と比較し絶対値は約 2 倍程度高いが、プロファイルについては比較的良く一致した。絶対値についてガスマスの濃度データとの違いは現在のところ不明であるが、ガスマス測定値（電流値）から得られた濃度データは定量精度としての信頼性は高くなく、それに対しガスクロは定量評価を目的として設置したものであり精度的に十分信頼性が高い。

FP-1 試験において、1 本目の加熱初期のガス分析結果の  $H_2$  の高濃度のピークは、ガスマス分析結果の項で述べたように、試料が空气中保管されていたための湿分による影響と考えられる。

### 5.3.3 ガス分析結果による放出 FP ガス定量評価

定量評価するにあたって、本来であれば Xe も Kr 同様バースト放出であったと推測され、決め打ち的なガスクロデータによる補正は困難な可能性があったが、銀ゼオライトの影響により Xe が長時間に渡り検出されたことが幸いし、相対的な連続プロファイル測定であるガスマスの測定結果と定量評価のために一定時間間隔で定量サンプルングを行い測定を実施したガスクロの測定結果の時間履

歴が良い一致を示す結果を取得することができた。そこでXeのガスクロ測定値を基に補正係数を算出し、ガスマス測定値の連続プロファイルの濃度値の補正を行った。補正後の値を図5.35に示す。

補正係数を算出するにあたっては、ガスクロ測定値はサンプリングボトル内に1分間サンプリングしたガスの平均濃度であることから、連続測定したガスマス測定値についても1分間の平均値として処理した。この方法は、ガスクロ測定で得られた濃度値から更にFPガス量を計算した際にガスマス測定値についても直接的な変換を行えると共に、ノイズの大きかったXeデータの周期的ノイズの処理にも有効である。但し、ガスクロ測定時刻（サンプリングボトルへの捕集時刻）と同時刻のガスマス測定値（1分間平均値）との比較による補正では、サンプリングボトルへのサンプリングを行っている1分間は、ガスマスへのキャリアガスの導入が停止していることから問題があり、ガスクロ測定時刻の前後1分間のガスマス測定値（1分間平均値）2点のデータを内挿した値を用いて補正を行った。濃度の高いデータを基に補正係数を算出した結果、FP-1及びFP-2試験とも補正係数は2.3倍となった。

補正したガスマスのKr及びXeの濃度値（1分間平均値）をFPガス量に換算し、更にFPガス放出割合についての整理をしたものを図5.36示す。これによれば全放出量に対して2段の温度ステップでの放出割合は、Kr、XeともおおよそFP-1試験の2,000℃、3,000℃保持では7:3の放出比、FP-2試験の1,500℃、2,500℃保持では3:7の放出比であった。また、全放出量は表5.12及び表5.13に示す通りFP-1試験ではKrが $3.73 \times 10^{-6}$ mol/g、Xeが $4.36 \times 10^{-5}$ mol/g、FP-2試験ではKrが $5.16 \times 10^{-6}$ mol/g、Xeが $4.68 \times 10^{-5}$ mol/gであった。FP-1試験におけるKrについては、加熱初期のデータが取得できていないことから参考値とする。この結果から、Xe/Kr比については約9（FP-2試験結果）であり、ピンパンクチャー試験（ピンプレナム部に放出したガスのガス分析）結果の9.8（L001ピン）と比較的良好一致を示した。また、最高温度3,000℃のFP-1試験と2,500℃のFP-2試験における単位試料重量あたりのXe全放出量が一致することが分かった。このことから加熱温度2,500℃でもペレット内保持ガスの全量が放出していると推定され、全放出量をペレット内保持量としても問題がないと考えられる。Xeのペレット内保持量については図5.37に示すとおり前田ら<sup>1)</sup>のEPMA分析ORIGEN計算結果から評価したXe量と比較的良好一致を示した。Xeの測定履歴のように、一定時間の濃度上昇があれば、ガスクロ測定結果による補正が可能であり、比較的精度の高い定量評価が可能であると考えられる。参考評価として、2回の試験の温度ステップ毎の放出割合から、1,500℃以上を500℃ステップとして各温度域における放出割合を評価してみたところ、図5.48に示すようにXeの放出のピークは1,500℃～2,000℃付近にあることが推定される。

## 6. ま と め

FP 放出挙動試験 (FP-1、FP-2) で燃料挙動評価上重要な FP ガスの放出挙動及びそのインベントリに関するデータとソースターム評価上重要な Cs-137 の放出挙動及び系内への付着挙動を示すデータを得た。

### (1) 放出 FP の $\gamma$ 線計測結果

$\gamma$  線スペクトロメトリでは主に Cs の放出及び系内への付着挙動を観察し、以下の結果を得た。

- $\gamma$  線スペクトロメトリで燃料からの放出が観察できた核種は Sb-125、Cs-134、Cs-137、Pm-147、Pr-144 であり、オンライン測定で放出挙動の時間変化が観察できたのは Cs-134、Cs-137 であった。
- 揮発性 FP の一つである Cs の放出は昇温と同時に放出を開始し、一定温度下でも少量の放出が続く。生成過程が異なる Cs-134 と Cs-137 とでは放出の量が最も多くなる時間がずれていることが分かった。これは照射燃料中でこれらの核種の分布が異なるために起こると考えられる。
- Cs に関してサンプリング管では 600°C 以下で付着量が多くなる傾向が現れているが、特定の温度領域での選択的な付着がみられたのは試験体を 1,500°C に保った時のみであることがわかった。これは、単位時間に試験体から放出される量とサンプリング管に付着する速度に左右された結果であると考えられる。
- Cs に関して焼結金属フィルタへの付着挙動においても 1,500°C 保持とそれ以外の温度保持との間には違いが見られた。後者の方が前者よりも焼結金属フィルタの孔径依存性が見られる。
- Sb-125 に関してサンプリング管と焼結金属フィルタに付着における付着量プロファイルの一部を観察することができた。この核種の付着プロファイルにおける温度依存性は Cs と若干異なっていることが分かった。
- Cs の付着先は 7 割り近くが焼結金属フィルタであり、これは FP-1 と FP-2 であまり変化が無かった。また、FP-1 と FP-2 のインベントリはサンプリング管と焼結金属フィルタに対する測定の計数率の合計を比較すると同程度であり、両者の照射条件と試験体重量が同様である事実と一致し、良い精度で測定が行われたことが分かった。
- 試験前後の試験体及びインベントリ評価試料に対する測定の結果、Rh (Ru)-106 及び Eu-154 の計数率は試験前後でほとんど変化していないことが分かった。これは他のサンプリング部位の測定で検出されていない結果と合わせて、本試験条件ではこれらの元素が放出しないという重要な事実を示している。

### (2) 放出 FP のガス分析結果

ガス分析では、主に Kr、Xe の放出挙動を観察し、以下の結果を得た。

- FP ガスは、15°C/s で昇温し一定温度 (1,500°C、2,000°C、2,500°C、3,000°C) に保持した結果、放出ガスのガス分析において Kr のバースト的濃度上昇が観測された。その後遅れて Xe の濃度上昇が 15 分間以上に渡って計測されたが、この時間遅れはヨウ素フィルタとして設置した吸着剤の銀ゼオライトの影響によるものであり、Kr に対してはその影響が非常に小さいことが分かった。

現実的挙動を評価するためには、更にガス分析装置に到達するまでの時間遅れ、経路配管内での拡散を考慮する必要がある。

- FPガスのペレット内保持量は、XeはFP-1試験で $4.35 \times 10^{-5} \text{mol/g}$ 、FP-2試験では $4.68 \times 10^{-5} \text{mol/g}$ であり、この結果は前田ら<sup>2)</sup>のEPMA分析結果から評価したペレット内Xe量と比較的良好一致を示した。また、Xeの放出のピークは $1,500^\circ\text{C} \sim 2,000^\circ\text{C}$ 付近にあると推定される。
- Xe/Kr比については約9（FP-2試験結果）であり、ピンパンクチャー試験結果の9.8と比較的良好一致を示した。

## 7. 謝 辞

この試験の実施にあたって、試料調製、試験準備・実施、ガス分析及び $\gamma$ 線分析に関して、原子力技術株式会社の福田 誠氏、飛田 剛志氏及び石田 貴志氏に、また、ガス分析装置のデータ処理プログラムの改造に関して原子力システム株式会社の豊原 大輔氏に多大な協力を頂いたことをここに感謝する。

## 8. 参 考 文 献

- 1) 廣沢ら “FP 放出挙動試験装置の開発” ; 日本原子力学会「1997年春の年会」J62
- 2) Kouji Maeda et al. “Fission product behaviour in peripheral region of FBR mixed-oxide fuel pellet under high burnup condition” ; Inter. Workshop on Interfacial Effects in Quantum Engineering System, Mito, Japan(1996)
- 3) R. A. Lorenz, M. F. Osborne “A Summary of ORNL Fission Product Release Tests With Recommended Release Rates and Diffusion Coefficients” ; NUREG/CR-6261 ORNL/TM-12801
- 4) 例えば T. Nakamura “Result of VEGA-1 Test and Quick Look of VEGA-3 Test under High Temperature Condition” ; The 24<sup>th</sup> NSRR Technical Review Meeting Tokyo , November 13-14, 2000
- 5) 金属データブック 改定3版 ; 日本金属学会編, 1993年発行

表 3.1 PFD549 の主な照射実績

炉心装荷日	平成 2 年 12 月 14 日
炉心取出日	平成 9 年 9 月 24 日
照射サイクル (装荷位置)	22~24' (4D1) 25~31 (4D1)
燃焼度	58.1GWd/t (集合体平均) 75.3GWd/t (最高)
照射量	$8.16 \times 10^{22} \text{n/cm}^2 (E \geq 0.1 \text{MeV})$

表 3.2 ペレット製造時仕様

項 目	検 査 結 果			
<sup>235</sup> U 濃縮度	18.4 wt%			
核分裂性 Pu 富化度	20.6 wt%			
O/M 比	1.99			
蒸発性不純物 (水分以外)	79 $\mu\text{l/g} \cdot (\text{UO}_2 + \text{PuO}_2)$			
水分	<8 ppm			
不純物	Al	<100 ppm	Mg	20 ppm
	B	<5 ppm	N	110 ppm
	C	40 ppm	Fe	510 ppm
	Ca	55 ppm	Ni	<50 ppm
	Cd	<5 ppm	V	<50 ppm
	Cl	<10 ppm	Cu+Zn+Si	<290 ppm
	Cr	95 ppm	Ag+Mn+Mo+Pb+Sn	<135 ppm
	F	<10 ppm	Total	<1485 ppm
プルトニウムスポット検査	78 $\mu\text{m}$			

表 4.1 FP-1、FP-2 の試験条件

試験名	保持温度	保持時間	サンプリング系統	昇温速度	備考
FP-1	2,000℃	30分	A系統	15℃/S	
	3,000℃	30分	B系統		
FP-2	1,500℃	30分	A系統	15℃/S	
	2,500℃	30分	B系統		



表 4.2  $\gamma$  線測定装置の検出器、増幅器及び高圧電源の主な仕様

装置の各部	項目	仕様
ゲルマニウム半導体 $\gamma$ 線検出器	型式	GEM-15180-P-PLUS(ピュア Ge 同軸型)
	相対効率	15%
	分解能(FWHM)	825eV(122keVにて)、1.80keV(1.33MeVにて)
	P/C比	46 : 1
	ピークシェイプ (FWTM/FWHM)	1.90
	(FWFM/FWHM)	2.65
	検出器形状	シャローホールプローブ
	測定エネルギー範囲	40keV~10MeV
	窒素消費量	2.0l/day以下
	高計数率測定用プリアンプ	内臓
超高計数率増幅器	型式	973U
	ゲインレンジ	$\times 1.25 \sim \times 375$
	雑音	15 $\mu$ V rms
	温度係数(0~50 $^{\circ}$ C)	gain $\pm 0.007\%/^{\circ}$ C以下 dc level $\pm 7.5\mu$ V/ $^{\circ}$ C以下
	スペクトルシフト	0.03%以下
高圧電源	型式	659
	バイアス電圧出力	0~5kV 及び 0~500V
	出力電流	0~100 $\mu$ A
	出力直線性	$\pm 3\%$ 以下
	出力電圧立ち上り時間	500ms
	使用電源	+24V 80mA, +24V 80mA -24V 35mA, -12V 65mA

表 4.3  $\gamma$ 線測定項目の整理

試験	試験項目の分類	測定試料	収納形態	数量	測定位置	測定時間	測定目的	備考	
FP-1	オンライン(2000℃保持)	A 系統ケーシング	ケーシングに収納	60 <sup>*1</sup>	ケーシング 位置	100 秒	ケーシング内のフィルタ(6枚)に付着する FP の時間変化		
	燃料	試験体	試験用燃料	タンガスステンをつ ば及びアルミニウ ム容器	1	測定台	4000 秒程度	試料内の核種同定とインベントリ評 価の参考	秤量重量：9.55g 試験前後計二回 測定
		インベント リ評価用	試験試料近接燃料 (少量)	—	—	—	—	—	FP-1 の時は用 意していない
		オフライン サンプリング 管	A 系統 (2000℃)	Ni サンプリング管	アルミニウム容器	14	測定台	3000 秒程度	温度勾配管に付着する FP の核種の 同定と相対量評価
	B 系統 (3000℃)		Ni サンプリング管	アルミニウム容器	14	測定台	3000 秒程度		
	焼結金属 フィルタ	A 系統 (2000℃)	焼結金属フィルタ	ステンレス容器	5	測定台	3000 秒程度	孔径の異なる焼結金属フィルタ(孔 径：43、30、10、5、1 $\mu$ m)おのおの に付着する FP の核種の同定と相対 量評価し、浮遊するエアロゾル状の 流刑分布を評価	
		B 系統 (3000℃)	焼結金属フィルタ	ステンレス容器	5	測定台	3000 秒程度		

(表 4. 3 続き)

オンライン(1500℃保持)		A 系統ケーシング	ケーシングに収納	48*1	ケーシング位置	100 秒	ケーシング内のフィルタ(5枚)に付着する FP の時間変化
燃料	試験体	試験用燃料	タングステンつぼ及びアルミニウム容器	1	測定台	4000 秒程度	試験内の核種同定とインベントリ評価の参考 秤量重量：9.52g 試験前後計二回測定
	インベントリ評価用	試験試料近接燃料(少量)	タングステンルツボ及びアルミニウム容器	1	測定台	4000 秒程度	試験内の核種同定とインベントリ評価 秤量重量：0.21g
FP-2 オフライン	サンプリング管	A 系統 (1500℃)	Ni サンプリング管	アルミニウム容器	14	測定台	3000 秒程度 温度勾配管に付着する FP の核種の同定と相対量評価
		B 系統 (2500℃)	Ni サンプリング管	アルミニウム容器	14	測定台	3000 秒程度
焼結金属 フィルタ	焼結金属 フィルタ	A 系統 (1500℃)	焼結金属フィルタ	ステンレス容器	5	測定台	3000 秒程度 孔径の異なる焼結金属フィルタ(孔径：43、30、10、5、1 μm)おのおのに付着する FP の核種の同定と相対量評価し、浮遊するエアロゾル状の流剤分布を評価
		B 系統 (2500℃)	焼結金属フィルタ	ステンレス容器	5	測定台	3000 秒程度

\*1:測定回数

表 4.4 ガスクロ用サンプリングボトルの捕集タイミング

試験名	タイマー設定	ボトル No	捕集タイミング
FP-1	捕集時間 1分 タイムスパン 3分	1～8	2,000℃保持
		9～10	3,000℃保持
FP-2	捕集時間 1分 タイムスパン 5分	1～5	1,500℃保持
		6	1,500℃～2,500℃
		7～10	2,500℃保持

表5.1 FP-1及びFP-2におけるA系統ケーシングにおけるCsの計数率及びその差分値の時間変化

FP-1(2000°C保持)					FP-2(1500°C保持)				
測定開始時刻 <sup>*1</sup>	計数率(積分値)		計数率(微分値)		測定開始時刻 <sup>*1</sup>	計数率(積分値)		計数率(微分値)	
	Cs-134(cps)	Cs-137(cps)	Cs-134(cps)	Cs-137(cps)		Cs-134(cps)	Cs-137(cps)	Cs-134(cps)	Cs-137(cps)
0:04:44 <sup>*2</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0:04:55 <sup>*2</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00
0:03:03 <sup>*2</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0:03:13 <sup>*2</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00
0:01:21 <sup>*2</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0:01:31 <sup>*2</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00
0:00:21	0.00	0.00	0.00	0.00	0:00:10	0.00	0.00	0.00	0.00
0:02:03	15.10	29.40	15.10	29.40	0:01:52	4.05	10.91	4.05	10.91
0:03:45	79.34	320.25	64.24	290.85	0:03:34	13.56	68.85	9.51	57.94
0:05:27	95.50	682.88	16.16	362.63	0:05:16	19.18	139.85	5.62	71.01
0:07:08	96.44	967.78	0.94	284.90	0:06:58	21.36	201.29	2.18	61.43
0:08:50	102.22	1167.84	5.79	200.07	0:08:39	22.45	249.79	1.08	48.51
0:10:32	107.17	1312.80	4.95	144.95	0:10:21	25.23	283.17	2.78	33.38
0:12:14	105.48	1412.14	-1.69	99.35	0:12:02	23.95	317.55	-1.28	34.38
0:13:55	108.08	1480.51	2.60	68.36	0:13:44	25.68	347.98	1.73	30.44
0:15:37	108.30	1553.62	0.21	73.11	0:15:26	23.78	362.84	-1.90	14.86
0:17:18	111.94	1586.83	3.64	33.21	0:17:07	25.77	371.04	1.99	8.20
0:19:00	109.16	1612.96	-2.78	26.13	0:18:49	27.40	384.07	1.63	13.03
0:20:41	112.20	1654.64	3.04	41.68	0:20:31	26.02	400.77	-1.38	16.70
0:22:23	113.38	1682.59	1.19	27.94	0:22:13	25.98	404.07	-0.03	3.30
0:24:05	114.93	1687.56	1.54	4.97	0:23:55	25.93	410.05	-0.06	5.98
0:25:47	116.30	1696.15	1.38	8.59	0:25:37	27.58	415.11	1.66	5.06
0:27:28	112.57	1708.30	-3.74	12.16	0:27:19	27.02	413.50	-0.56	-1.61
0:29:10	115.11	1740.94	2.54	32.64	0:29:00	28.44	411.96	1.41	-1.53
0:30:52	115.11	1740.94	0.00	0.00	0:30:42	29.40	420.93	0.97	8.97

\*1 加熱開始温度を0:00:00とした。

\*2 ここは加熱開始以前の測定開始時刻である

表5.2(1)  $\gamma$ 線放射FPにおける放射能と収率の関係(ORIGEN-2データを参考)

元素	質量数	$\gamma$ 線エネルギー(keV)	放出率(%)	放射能順位	収量順位	備考
Cs	137	661.66	85.2	1	15	
Ba	137M	661.66	-	2	46	Cs-137の娘
Pm	147	121.22	3.00E-03	3	58	$\gamma$ 弱い
Sr	90	-	-	4	34	$\beta$ 放射体
Y	90	-	-	5	126	$\beta$ 放射体
Rh(Ru)	106	511.7	85.5	6	84	
Rh(Ru)	106	717.2	28.9	6	84	
Rh(Ru)	106	1046.7	30.4	6	84	
Rh(Ru)	106	511.86	20.4	6	84	
Rh(Ru)	106	621.93	9.93	6	84	
Rh(Ru)	106	1050.41	1.56	6	84	
Ce	144	33.6	0.29	8	95	その他有り
Ce	144	40.98	0.26	8	95	その他有り
Ce	144	80.12	1.36	8	95	その他有り
Ce	144	133.51	11.1	8	95	その他有り
Ce	144	else	0.29以下	8	95	その他有り
Pr	144	696.51	1.34	9	162	
Pr	144	1489.16	0.28	9	162	
Pr	144	2185.66	0.69	9	162	
Pr	144	59.03	-	9	162	
Pr	144	617.8	0.02	9	162	
Pr	144	1631.36	0.03	9	162	
Pr	144	1885.3	0.01	9	162	
Kr	85	514	0.43	10	65	
Kr	85	151.19	75	10	65	
Kr	85	304.87	14	10	65	
Eu	155	45.3	1.36	11	86	
Eu	155	60	1.2	11	86	
Eu	155	86.54	32.8	11	86	
Eu	155	105.31	21.8	11	86	
Eu	155	else	1.2以下	11	86	
Sb	125	176	6.8	12	100	
Sb	125	427.87	29.6	12	100	
Sb	125	463	10	12	100	
Sb	125	600.6	17.9	12	100	
Sb	125	607	5	12	100	
Sb	125	635.95	11.3	12	100	
Sb	125	else	6.8以下	12	100	
Cs	134	563	8.4	13	104	
Cs	134	569.32	15.4	13	104	
Cs	134	604.7	97.6	13	104	
Cs	134	795.85	85.4	13	104	
Cs	134	802	8.7	13	104	
Cs	134	847	3.00E-04	13	104	
Cs	134	11.23	0.94	13	104	
Cs	134	127.5	12.7	13	104	
Cs	134	1365	3	13	104	
Cs	134	else	3.0以下	13	104	
Sm	151	21.54	0.03	14	51	
Te	125M	35.5	6.67	15	133	
Te	125M	109.28	0.27	15	133	
Eu	154	35.8	12.6	16	105	
Eu	154	68.17	37	16	105	
Eu	154	100.88	26.6	16	105	
Eu	154	123.07	40.6	16	105	
Eu	154	723.3	20.1	16	105	
Eu	154	1274.44	35	16	105	
Eu	154	81.99	3.00E-03	16	105	
Eu	154	184.68	4.00E-03	16	105	
Eu	154	248	6.6	16	105	
Eu	154	592	4.8	16	105	
Eu	154	757	4.3	16	105	
Eu	154	873	12	16	105	

表5.2(2)  $\gamma$ 線放射FPにおける放射能と収率の関係(ORIGEN-2データを参考)

元素	質量数	$\gamma$ 線エネルギー(keV)	放出率(%)	放射能順位	収量順位	備考
Eu	154	996	10	16	105	
Eu	154	1005	18	16	105	
Pr	144M	696.51	1.34	17	184	
Pr	144M	1489.16	0.28	17	184	
Pr	144M	2185.66	0.69	17	184	
Pr	144M	59.03	—	17	184	
Pr	144M	617.8	0.02	17	184	
Pr	144M	1631.36	0.03	17	184	
Pr	144M	1885.3	0.01	17	184	
Ag	110M	374	6.00E-03	18	138	
Ag	110M	657.5	4.5	18	138	
Ag	110M	116.48	8.00E-03	18	138	
Ag	110M	657.76	94	18	138	
Ag	110M	884.68	72.2	18	138	
Ag	110M	937.49	34.1	18	138	
Ag	110M	678	10	18	138	
Ag	110M	687	6.4	18	138	
Ag	110M	707	16	18	138	
Ag	110M	764	22	18	138	
Ag	110M	818	7.3	18	138	
Ag	110M	1384	24	18	138	
Ag	110M	1505	13	18	138	
Ag	110M	else	6.4以下	18	138	
Cd	113M	121.78	28.4	19	122	
Cd	113M	344.28	26.6	19	122	
Cd	113M	411.12	2.23	19	122	
Cd	113M	778.9	13	19	122	
Cd	113M	964.13	14.3	19	122	
Cd	113M	1408.01	20.9	19	122	
Cd	113M	121.78	7.21	19	122	
Cd	113M	344.31	2.44	19	122	
Cd	113M	841.63	14.6	19	122	
Cd	113M	963.37	12	19	122	
Cd	113M	970.38	0.6	19	122	
Cd	113M	1314.67	0.96	19	122	
Cd	113M	18.21	1.26	19	122	
Cd	113M	89.85	69.9	19	122	
Eu	152	122	28	20	128	
Eu	152	245	7.5	20	128	
Eu	152	964	14	20	128	
Eu	152	1086	10	20	128	
Eu	152	1112	14	20	128	
Eu	152	1408	21	20	128	
Eu	152	344	27	20	128	
Eu	152	779	13	20	128	
Eu	152	1299	1.6	20	128	
Eu	152	else	1.6以下	20	128	
Tc	99	—	—	21	12	$\beta$ 放射体
Nb	95	765.81	99.8	22	161	
Nb	95	204.12	2.33	22	161	
Nb	95	235.69	24.8	22	161	
Nb	95	582.07	0.05	22	161	
Te	127M	88.3	—	23	157	
Te	127M	57.6	50	23	157	
Te	127M	659	—	23	157	
Te	127	57.63	0.5	24	181	
Te	127	88.26	0.08	24	181	
Te	127	658.9	0.01	24	181	
Te	127	202.9	0.06	24	181	
Te	127	360.3	0.14	24	181	
Te	127	417.9	0.99	24	181	
Te	127	else	0.01以下	24	181	
Zr	95	724.2	44.2	25	164	
Zr	95	756.73	54.5	25	164	

表5.2(3)  $\gamma$ 線放射FPにおける放射能と収率の関係(ORIGEN-2データを参考)

元素	質量数	$\gamma$ 線エネルギー(keV)	放出率(%)	放射能順位	収量順位	備考
Sn	123	1088.64	0.6	26	159	
Sn	123	160.32	85.7	26	159	
Sn	123	1030.23	0.03	26	159	
Sn	119M	23.88	16.1	27	153	
Sn	119M	25.27	14.3	27	153	
Cs	135	787.2	100	29	2	
Cs	135	846.1	95.9	29	2	
Pm	146	453.88	65	30	145	
Pm	146	633.25	2.15	30	145	
Pm	146	735.93	22.5	30	145	
Pm	146	747.24	34	30	145	
Zr	93	-	-	31	24	
Rh	102	140.7	100	32	151	
Rh	102	475.06	95	32	151	
Rh	102	631.29	56	32	151	
Rh	102	697.49	44	32	151	
Rh	102	475.06	39.4	32	151	
Rh	102	556.6	1.92	32	151	
Rh	102	628.05	3.85	32	151	
Rh	102	1103.16	2.48	32	151	
Sn	126	414.8	83.3	33	61	
Sn	126	666.3	99.6	33	61	
Sn	126	695	99.6	33	61	
Sn	126	17.7	5.00E-05	33	61	
Sn	126	414.5	85.7	33	61	
Sn	126	666.1	85.7	33	61	
Sn	126	694.8	82.2	33	61	
Sb	126M	-	-	34	-	不明
Y	91	555.57	94.9	35	171	
Y	91	1204.67	0.3	35	171	
Sn	121M	-	-	36	-	不明
Ag	110	374	6.00E-03	37	200	
Ag	110	657.5	4.5	37	200	
Ag	110	116.48	8.00E-03	37	200	
Ag	110	657.76	94	37	200	
Ag	110	884.68	72.2	37	200	
Ag	110	937.49	34.1	37	200	
Se	79	95.73	9.63	38	80	
Nb	93M	30.77	6.00E-04	39	146	
Pd	107	-	-	40	-	不明
Sb	126	64.28	9.62	41	183	
Sb	126	86.94	8.62	41	183	
Sb	126	87.57	37	41	183	



表5.3(1) FP-1試験体におけるピークサーチ結果と計数率

ピーク中心エネルギー (keV)	元素	質量数	試験前	試験後
			(cps)	(cps)
427.95	Sb	125	109.94	0.00
463.30	Sb	125	41.55	0.00
511.91	Rh(Ru)	106	1154.14	1584.01
563.12	Cs	134	51.56	0.00
569.23	Cs	134	110.68	0.00
582.51	Nb	95	0.00	1.67
591.88	Eu	154	7.19	14.80
600.59	Sb	125	0.00	0.00
604.65	Cs	134	749.59	0.00
616.29	Pr	144	23.44	54.14
622.15	Rh(Ru)	106	573.25	847.01
635.85	Sb	125	57.28	0.00
661.73	Cs	137	16708.50	0.21
693.03			0.00	1.13
696.69			14.08	79.24
723.50	Eu	154	39.33	63.65
735.56	Pm	146	95.00	0.00
745.96	Pm	146	40.57	0.00
757.05	Zr	95	10.14	15.20
795.93	Cs	134	719.79	0.00
801.92	Cs	134		0.00
816.06	Ag	110M	0.00	1.77
845.64	Cs	135	0.00	1.57
873.64	Eu	154	25.20	86.86
893.50			0.00	2.47
904.78			0.00	3.40
964.63	Eu	152	0.00	1.58
996.61	Eu	154	23.72	37.45
1005.09	Eu	154	41.42	64.66
1038.71	Cs	134	12.70	0.00
1050.75	Rh(Ru)	106	112.82	161.78
1062.64			0.00	2.90
1086.00	Eu	152	0.00	0.00
1112.53			0.00	0.00
1128.80	Rh(Ru)	106	36.90	40.69
1164.42			0.00	2.87
1168.11	Cs	134	4.38	0.00
1172.94	Co	60	0.00	0.00
1181.25			0.00	1.61
1194.96			4.54	6.34
1246.78			0.00	2.62
1265.60			45.48	0.00
1274.73	Eu	154	82.62	133.29
1282.76			12.79	0.00
1322.47			510.71	0.00
1332.64	Co	60	0.00	0.00
1365.17	Cs	134	32.31	0.00
1408.37	Eu	152	0.00	2.83
1456.61			59.81	0.00
1489.28	Pr	144	20.76	19.72
1494.86			0.00	0.00
1562.27	Rh(Ru)	106	10.81	16.57
1596.45			4.45	6.42
1674.54			0.00	2.98
1710.73			4.25	0.00
1765.61			0.00	2.71
1786.53			0.00	0.00
1796.57			0.00	2.60
1926.02			0.00	1.61
1986.44			0.00	2.48

表5.3(2) FP-2試験体におけるピークサーチ結果と計数率

ピーク中心エネルギー (keV)	元素	質量数	試験体		インベントリ評価試料
			試験前 (cps)	試験後 (cps)	試験後 (cps)
427.91	125	Sb	82.03	5.95	5.53
463.25	125	Sb	153.42	0.00	2.57
511.84	106	Rh(Ru)	735.93	2037.77	47.99
563.18	134	Cs	30.93	0.00	3.38
569.27	134	Cs	75.03	0.00	6.25
582.74	95	Nb	0.00	1.08	0.00
592.12	154	Eu	0.00	17.35	0.00
600.63	125	Sb	0.00	0.00	1.17
604.70	134	Cs	745.50	0.00	38.32
616.32	144	Pr	3.73	39.42	1.44
622.12	106	Rh(Ru)	352.83	967.10	24.63
635.92	125	Sb	40.55	0.00	3.07
661.79	137	Cs	11863.25	22.84	687.11
696.64			33.18	127.39	2.60
716.53			0.00	2.45	0.00
723.45	154	Eu	31.86	98.86	2.21
746.94	146	Pm	0.00	0.00	0.00
757.00	95	Zr	0.00	22.91	0.76
779.53			0.00	2.49	0.00
796.18	134	Cs	542.61	2.08	40.38
802.02	134	Cs	0.00	0.00	3.33
816.39	110M	Ag	0.00	3.41	0.00
834.95			0.00	0.00	0.00
873.73	154	Eu	28.52	119.21	2.97
893.59			0.00	3.12	0.00
905.10			0.00	4.55	0.00
965.20	152	Eu	0.00	2.81	0.00
996.69	154	Eu	17.67	54.47	1.33
1005.22	154	Eu	34.91	95.20	2.27
1024.75			0.00	5.01	0.00
1038.77	134	Cs	0.00	0.00	0.66
1049.81	106	Rh(Ru)	0.00	191.83	4.17
1062.96			0.00	3.26	0.00
1086.97	152	Eu	0.00	1.40	0.00
1113.70			0.00	2.52	0.00
1128.54	106	Rh(Ru)	16.48	46.30	1.11
1134.77			0.00	1.21	0.00
1167.05	134	Cs	2.97	3.79	0.98
1173.30	60	Co	27.96	0.00	0.00
1181.82			0.00	1.63	0.00
1194.94			0.00	6.92	0.00
1247.18			0.00	6.44	0.00
1274.91	154	Eu	56.50	193.98	4.44
1323.00			515.54	0.00	0.63
1332.48	60	Co	(0.02)	0.00	0.00
1365.18	134	Cs	(0.12)	(0.09)	1.48
1408.36	152	Eu	0.00	3.53	0.00
1489.57	144	Pr	6.79	21.09	0.56
1562.54	106	Rh(Ru)	5.83	19.59	0.45
1596.78			2.38	9.03	0.25
1675.98			0.00	4.21	0.00
1766.25			0.00	3.03	0.00
1796.88			0.00	3.19	0.00
1927.44			0.00	1.62	0.00
1987.38			7.38	2.60	0.00

表5.4(1) FP-1のサンプリング管に対する測定で得られたピークサーチ結果と計数率(cps)

## A系統(2000℃保持)

エネルギー(keV)	元素	質量数	サンプリング管のキャリアガス上流部からの番号													
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
563.31	Cs	134				0.34	0.86	0.95	2.66	2.05	3.14	2.66	2.06	2.07	2.12	2.70
569.35	Cs	134	0.52	0.49	0.53	0.68	1.66	2.09	5.05	3.87	5.89	5.06	4.28	3.55	3.95	5.44
604.75	Cs	134	2.90	3.23	3.38	4.25	11.48	12.90	35.25	25.29	37.72	33.19	27.86	25.34	26.49	36.79
661.76	Cs	137	43.23	49.44	52.70	62.47	176.02	201.40	545.54	392.34	596.97	516.34	433.55	400.69	412.12	569.76
735.23	Pm	146										0.52				
746.06	Pm	146							0.29							
796.00	Cs	134	2.62	3.00	3.14	3.36	9.84	11.57	30.62	21.64	32.44	28.88	24.11	22.34	23.15	31.74
802.05	Cs	134	0.34	0.31	0.30	0.42	0.89	1.10	2.79	1.91	2.95	2.68	2.14	1.94	2.09	2.66
1038.66	Cs	134						0.22	0.39	0.29	0.42	0.44	0.32	0.29	0.30	0.42
1123.00																
1168.15	Cs	134	0.10	0.12	0.09		0.25	0.39	0.71	0.51	0.75	0.63	0.58	0.53	0.61	0.75
1365.03	Cs	134	0.25				0.28	0.39	1.06	0.70	1.11		0.84	0.72	0.75	1.07
1489.21	Pr	144				0.26										

## B系統(3000℃保持)

エネルギー(keV)	元素	質量数	サンプリング管のキャリアガス上流部からの番号													
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
427.87	Sb	125					0.67	0.93	1.15		0.66	0.55	0.48		0.48	
463.50	Sb	125								0.55						
563.31	Cs	134			0.25	0.84	2.27	2.35	2.58	1.57	1.47	1.49	1.58		0.98	1.59
569.35	Cs	134				1.63	4.14	4.49	4.83	3.37	2.87	2.71	2.90		1.75	2.78
600.62	Sb	125					0.03		32.46		0.11	0.01	0.04			
604.75	Cs	134	0.97	1.14	2.83	10.91	27.40	28.06	32.46	20.70	17.85	17.59	18.52		11.22	17.61
635.92	Sb	125							0.25				0.34			
661.76	Cs	137	12.43	10.54	35.03	169.35	471.86	485.30	527.52	355.17	301.78	303.12	315.83		195.23	306.81
735.23	Pm	146						0.31		0.33						
746.06	Pm	146						0.16								
796.00	Cs	134	0.38	0.35	1.65	8.62	24.06	25.03	26.73	18.24	15.80	15.76	16.14		9.91	15.52
802.05	Cs	134	0.01		0.06	0.78	2.19	2.17	2.18	1.46	1.63	1.55	1.46		1.02	1.39
1038.66	Cs	134				0.16	0.35	0.34	0.41	0.31	0.23	0.29	0.25		0.20	0.24
1063.18										0.05						
1168.15	Cs	134		0.11	0.17	0.29	0.64	0.64	0.67	0.53	0.46	0.41	0.48		0.33	0.46
1365.03	Cs	134				0.26	0.79	0.86	0.90	0.60	0.85	0.86	0.81		0.26	0.48
1489.21	Pr	144	0.04					0.04	0.04				0.04			

表5.4(2) FP-2のサンプリング管に対する測定で得られたピークサーチ結果と計数率(cps)

## A系統(1500°C保持)

エネルギー(keV)	元素	質量数	サンプリング管のキャリアガス上流部からの番号													
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
563.11	Cs	134					0.74	0.95	1.18	0.96	0.68		0.31	0.48	0.75	2.23
569.27	Cs	134			0.60	0.89	1.55	1.70	2.23	1.68	1.07		0.74	0.84	1.28	4.52
604.71	Cs	134	2.98	1.89	3.38	4.45	9.92	11.43	13.87	11.31	7.80	6.83	4.95	6.07	9.52	31.20
661.68	Cs	137	41.69	22.60	51.25	68.15	149.12	175.14	212.14	173.45	115.47	94.76	76.90	94.73	147.14	490.88
736.45	Pm	146								0.58						0.82
746.88	Pm	146														0.59
796.04	Cs	134	2.31	1.13	2.70	3.80	8.29	9.77	11.84	9.67	6.60	4.96	4.13	5.10	7.84	26.81
802.04	Cs	134	0.31		0.37	0.41	0.75	0.89	1.02	0.97	0.74		0.35	0.52	0.71	1.97
1038.68	Cs	134							0.17	0.20						0.39
1167.96	Cs	134				0.18	0.24	0.26	0.38	0.23	0.19			0.16	0.19	0.61
1323.07																0.24
1365.26	Cs	134	0.07		0.06	0.18	0.29		0.37	0.29	0.19		0.10	0.16	0.23	0.95
1489.30	Pr	144	0.13	0.11		0.01			0.49							

## B系統(2500°C保持)

エネルギー(keV)	元素	質量数	サンプリング管のキャリアガス上流部からの番号													
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
427.79	Sb	125	4.25	3.26	1.59	0.95	1.12	1.24			1.22			1.15		1.21
463.17	Sb	125	1.45	1.09	0.84											
563.11	Cs	134	0.38				1.60	2.43	2.75	2.69	3.36	3.26	2.85	3.19	3.07	2.92
569.27	Cs	134			0.24	0.76	2.59	5.12	5.10	4.80	5.87	5.69	5.46	5.98	5.23	5.41
600.52	Sb	125	1.73	1.34	0.67											
604.71	Cs	134	1.06	0.99	1.22	3.82	17.99	33.22	38.44	33.61	39.67	40.40	38.70	42.88	35.85	35.84
635.95	Sb	125	1.64	1.46	0.79	0.44	0.47		0.44						0.65	
661.68	Cs	137	37.51	19.71	23.72	69.13	268.20	512.98	585.77	550.06	621.14	628.62	603.10	660.53	579.12	591.32
671.74			0.43													
736.45	Pm	146						1.23	1.42				1.21		1.89	
746.88	Pm	146														0.86
796.04	Cs	134	2.00	1.12	1.23	3.60	14.46	27.31	31.01	29.41	33.63	33.68	32.41	35.40	30.64	31.62
802.04	Cs	134	0.21	0.08		0.39	1.09	1.87	2.21	1.96	2.57	2.26	2.41	2.82	2.46	2.32
1038.68	Cs	134					0.18	0.33	0.36	0.38	0.38	0.43	0.43	0.45	0.36	0.47
1167.96	Cs	134	0.11				0.35	0.68	0.80	0.69	0.79	0.79	0.70	0.77	0.81	0.72
1323.07								0.33	0.42	0.47	0.44	0.52	0.53	0.63	0.49	0.43
1365.26	Cs	134	0.05	0.03	0.07	0.13	0.54	1.00	1.05	1.08	1.19	1.18	1.20	1.27	1.12	1.20
1447.50							0.01									

表5.5(1) FP-1のフィルタに対する測定で得られたピークサーチ結果と計数率(cps)

A系統(2000℃保持)

エネルギー (keV)	元素	質量数	焼結金属フィルタのキャリアガス上流部からの番号				
			1	2	3	4	5
			43 $\mu\text{m}^{\text{r}}$	30 $\mu\text{m}^{\text{r}}$	10 $\mu\text{m}^{\text{r}}$	5 $\mu\text{m}^{\text{r}}$	1 $\mu\text{m}^{\text{r}}$
563.11	Cs	134	32.04	3.68	1.15	0.76	1.18
569.27	Cs	134	71.07	6.65	2.32	1.52	2.11
604.71	Cs	134	522.33	46.36	15.86	8.62	15.58
661.68	Cs	137	8969.72	782.69	265.90	143.12	268.04
736.45	Pm	146	53.01	2.44	0.77		
746.88	Pm	146	20.41	1.01			
796.04	Cs	134	399.52	38.84	12.93	7.00	12.95
802.04	Cs	134		3.05	1.01	0.51	1.04
1038.68	Cs	134	4.36	0.58	0.19		0.20
1167.96	Cs	134	8.54	0.92	0.34	0.21	0.27
1247.18				0.02		0.03	
1365.26	Cs	134	15.17	1.36	0.48	0.22	0.45

\*1:フィルタの孔径

B系統(3000℃保持)

エネルギー (keV)	元素	質量数	サンプリング管のキャリアガス上流部からの番号				
			1	2	3	4	5
			43 $\mu\text{m}^{\text{r}}$	30 $\mu\text{m}^{\text{r}}$	10 $\mu\text{m}^{\text{r}}$	5 $\mu\text{m}^{\text{r}}$	1 $\mu\text{m}^{\text{r}}$
427.79	Sb	125		3.33	1.87		
563.11	Cs	134	17.22	6.04	2.41	1.14	0.96
569.27	Cs	134	31.64	11.31	4.94	2.07	1.72
604.71	Cs	134	229.20	82.55	33.00	13.51	12.19
635.95	Sb	125					
661.68	Cs	137	4201.54	1440.49	577.42	250.70	208.40
736.45	Pm	146	17.68	4.72	2.01		
746.88	Pm	146	7.68	2.16			
796.04	Cs	134	184.72	66.15	26.66	11.50	9.96
802.04	Cs	134	11.63	4.19	1.82	0.79	0.66
1038.68	Cs	134	2.47	1.02	0.44	0.22	0.16
1167.96	Cs	134	3.88	1.56	0.66	0.32	0.24
1230.89							
1266.12			2.18	0.25			
1323.07			30.59	3.27	0.40		
1365.26	Cs	134	6.70	2.47	0.98	0.42	0.39
1981.65							

\*1:フィルタの孔径

表5.5(2) FP-2のフィルタに対する測定で得られたピークサーチ結果と計数率(cps)

A系統(1500℃保持)			焼結金属フィルタのキャリアガス上流部からの番号				
エネルギー(keV)	元素	質量数	1	2	3	4	5
			43 $\mu\text{m}^{\text{r}}$	30 $\mu\text{m}^{\text{r}}$	10 $\mu\text{m}^{\text{r}}$	5 $\mu\text{m}^{\text{r}}$	1 $\mu\text{m}^{\text{r}}$
563.11	Cs	134	3.27	2.83	3.24	1.52	1.29
569.27	Cs	134	5.75	5.24	6.38	3.01	2.34
604.71	Cs	134	40.33	36.85	44.30	19.29	16.90
661.68	Cs	137	639.95	584.57	701.61	305.63	275.52
736.45	Pm	146	2.17	1.79			0.85
746.88	Pm	146	34.34				
796.04	Cs	134		30.59	37.04	15.90	14.04
802.04	Cs	134	1.91	2.02	3.01	1.31	0.95
1038.68	Cs	134	0.46	0.47	0.47	0.22	0.26
1167.96	Cs	134	0.82	0.93	1.01	0.54	0.57
1247.18				0.39	0.32	0.33	0.34
1365.26	Cs	134	1.15	1.12	1.37	0.64	0.53

\*1:フィルタの孔径

B系統(2500℃保持)			サンプリング管のキャリアガス上流部からの番号				
エネルギー(keV)	元素	質量数	1	2	3	4	5
			43 $\mu\text{m}^{\text{r}}$	30 $\mu\text{m}^{\text{r}}$	10 $\mu\text{m}^{\text{r}}$	5 $\mu\text{m}^{\text{r}}$	1 $\mu\text{m}^{\text{r}}$
427.79	Sb	125	34.99				
563.11	Cs	134	38.63	8.11	3.69	1.19	1.21
569.27	Cs	134	90.06	13.88	7.66	1.91	2.47
604.71	Cs	134	702.91	103.56	48.76	14.40	16.90
635.95	Sb	125	12.46				
661.68	Cs	137	10818.54	1560.34	757.94	226.14	261.73
736.45	Pm	146	69.93	0.00	2.52		0.90
746.88	Pm	146	28.79	2.45	1.13		
796.04	Cs	134	504.82	82.60	41.27	12.21	14.11
802.04	Cs	134	23.61	6.10	2.93	0.98	1.11
1038.68	Cs	134	6.68	1.10	0.57	0.24	
1167.96	Cs	134	11.15	1.95	0.85	0.27	0.43
1230.89			2.10				
1266.12			24.07	0.42			
1323.07			235.34	3.86	0.89		
1365.26	Cs	134	19.79	3.06	1.39	0.41	0.47
1981.65			1.36				

\*1:フィルタの孔径

表5.6  $\gamma$ 線の減弱係数

元素	質量数	$\gamma$ 線エネルギー(keV)	試験体	サンプリング管	フィルタ
Sb	125	427.8	0.802	0.909	0.704
Cs	134	604.7	0.868	0.923	0.744
Rh(Ru)	106	622.2	0.872	0.924	0.748
Cs	137	661.8	0.878	0.925	0.752
Eu	154	723.6	0.889	0.929	0.763
Rh(Ru)	106	1050.8	0.921	0.940	0.796
Eu	154	1274.5	0.936	0.945	0.814

表5.7(1) 測定値からの相対量評価(FP-1:インベントリ評価用少量試料が無いいため参考値)(補正された計数率(cps))

試験体			サンプリング管						フィルタ					
核種	試験前 <sup>*1</sup>	試験後	番号 <sup>*2</sup>	A系統			B系統			A系統			B系統	
				Cs-134	Cs-137	Sb-125	Cs-134	Cs-137	番号 <sup>*3</sup> (孔径)	Cs-134	Cs-137	Sb-125	Cs-134	Cs-137
Sb-125(427.8keV)	208.48	0.00												
Cs-134(604.7keV)	1313.12	0.00	1	3.14	46.73		1.06	13.43	1(43μm)	771.91	13124.39	0.00	338.72	6147.64
Rh(Ru)-106(622.1keV)	999.42	970.98	2	3.50	53.43		1.23	11.39	2(30μm)	68.52	1145.22	5.19	122.00	2107.71
Cs-137(661.7keV)	28933.55	0.24	3	3.66	56.95		3.07	37.86	3(10μm)	23.44	389.07	2.92	48.77	844.88
Eu-154(723.6keV)	67.25	71.56	4	4.61	67.52		11.82	183.02	4(5μm)	12.73	209.40	0.00	19.97	366.82
Th(Ru)-106(1050.7keV)	186.20	175.56	5	12.44	190.22	0.74	29.70	509.95	5(1μm)	23.02	392.19	0.00	18.02	304.92
Eu-154(1274.5keV)	134.30	142.46	6	13.98	217.65	1.02	30.41	524.48	total	899.62	15260.26	8.12	547.48	9771.96
			7	38.20	589.58	1.26	35.18	570.10						
			8	27.41	424.01		22.43	383.84						
			9	40.87	645.16	0.72	19.34	326.14						
			10	35.96	558.02	0.61	19.06	327.59						
			11	30.19	468.54	0.52	20.07	341.32						
			12	27.46	433.03	0.52	20.07	341.32						
			13	28.70	445.39	0.53	12.15	210.99						
			14	39.87	615.75		19.08	331.57						
			total	309.99	4811.98	5.93	244.67	4112.99						

\*1:インベントリ評価用少量試料が無いいため参考値

\*3:系統の上流からの番号

\*2:系統の上流からの番号

サンプリング管とフィルタのtotal				
A系統			B系統	
Cs-134	Cs-137	Sb-125	Cs-134	Cs-137
1209.61	20072.24	14.05	792.15	13884.95

サンプリング管とフィルタ、試験後試験体のtotal		
Sb-125	Cs-134	Cs-137
14.05	2001.76	33957.43



表5.7(2) 測定値からの相対量評価(FP-2) (補正された計数率(cps))

核種	試験体		サンプリング管						フィルタ					
	試験前	試験後	番号 <sup>*1</sup>	A系統			B系統		番号 <sup>*2</sup> (孔径)	A系統			B系統	
				Cs-134	Cs-137	Sb-125	Cs-134	Cs-137		Cs-134	Cs-137	Sb-125	Cs-134	Cs-137
Sb-125(427.8keV)	321.58	8.16	1	3.55	49.56	5.14	1.27	44.59	1(43 μm)	59.60	936.37	54.64	1038.77	15829.55
Cs-134(604.7keV)	2059.34	0.00	2	2.26	26.86	3.95	1.18	23.43	2(30 μm)	54.46	855.33	0.00	153.04	2283.07
Rh(Ru)-106(622.1keV)	1317.09	1219.51	3	4.03	60.92	1.92	1.46	28.19	3(10 μm)	65.47	1026.58	0.00	72.06	1109.01
Cs-137(661.7keV)	36498.61	28.60	4	5.30	81.01	1.15	4.55	82.18	4(5 μm)	28.51	447.20	0.00	21.28	330.89
Eu-154(723.6keV)	115.69	122.26	5	11.83	177.27	1.35	21.44	318.83	5(1 μm)	24.98	403.13	0.00	24.98	382.96
Rh(Ru)-106(1050.7keV)	211.35	228.99	6	13.62	208.20	1.50	39.59	609.83	total	233.02	3668.61	54.64	1310.13	19935.47
Eu-154(1274.5keV)	221.58	228.07	7	16.54	252.19	0.00	45.82	696.36						
			8	13.48	206.19	1.48	40.07	653.90						
			9	9.30	137.27	0.00	47.29	738.41						
			10	8.14	112.66	1.39	48.16	747.30						
			11	5.90	91.42	0.00	46.13	716.97						
			12	7.24	112.61	1.47	51.11	785.24						
			13	11.35	174.92	0.00	42.74	688.46						
			14	37.19	583.55	0.00	42.72	702.96						
			total	149.73	2274.64	19.35	433.53	6836.64						

\*2:系統の上流からの番号

\*1:系統の上流からの番号

サンプリング管とフィルタのtotal				
A系統			B系統	
Cs-134	Cs-137	Sb-125	Cs-134	Cs-137
382.74	5943.25	73.99	1743.66	26772.12

サンプリング管とフィルタ、試験後試験体のtotal		
Sb-125	Cs-134	Cs-137
82.15	2126.40	32743.97

表5.8 FP-1でのサンプリングボトル内捕集ガス(Kr)の同位体組成

(単位:%)

SB番号	質量数								
	78	79	80	81	82	83	84	85	86
2	1.36	4.37	2.26	0.00	0.00	13.33	28.77	5.29	44.61
9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	18.30	29.52	3.60	48.57
ORIGEN2結果	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	15.01	25.84	5.57	53.52
標準ガス測定値	0.40	0.01	2.48	0.01	11.70	11.28	57.75	0.03	16.35
天然組成比	0.35	0.00	2.25	0.00	11.60	11.50	57.00	0.00	17.30

表5.9 FP-1でのサンプリングボトル内捕集ガス(Xe)の同位体組成

(単位:%)

SB番号	質量数								
	128	129	130	131	132	133	134	135	136
3	0.60	0.42	0.31	16.56	21.87	0.36	33.36	0.54	25.98
4	0.00	0.23	0.19	16.50	22.39	0.50	32.72	0.00	27.47
5	0.06	0.00	1.03	13.25	20.40	0.93	36.69	2.63	25.00
6	0.60	0.00	0.00	11.92	25.17	0.00	29.87	0.00	32.44
ORIGEN2結果	0.03	0.00	0.08	16.77	22.05	0.00	32.42	0.00	28.65
標準ガス測定値	1.64	33.10	9.01	20.45	29.63	0.13	3.64	0.02	2.36
天然組成比	1.91	26.40	4.10	21.20	26.90	0.00	10.40	0.00	8.90

表5.10 FP-1でのサンプリングボトル内捕集ガス(H<sub>2</sub>)の同位体組成

(単位:%)

SB番号	質量数		
	1	2	3
1	5.22	94.74	0.03
2	31.38	60.43	7.74
標準ガス測定値	86.13	13.85	0.02
天然組成比(H)	99.99	0.01	0.00

表5.11 FP-2でのサンプリングボトル内捕集ガス(Xe)の同位体組成

(単位:%)

SB番号	質量数								
	128	129	130	131	132	133	134	135	136
3	0.00	0.00	0.00	15.24	22.62	0.73	34.26	1.03	26.12
4	4.58	4.42	4.74	15.68	17.24	3.81	27.45	3.85	18.23
8	0.00	0.00	0.00	16.28	26.25	0.00	36.00	0.00	21.47
9	0.00	0.00	0.00	14.27	22.06	0.25	32.70	0.76	29.96
ORIGEN2結果	0.03	0.00	0.08	16.77	22.05	0.00	32.42	0.00	28.65
標準ガス測定値	1.64	33.10	9.01	20.45	29.63	0.13	3.64	0.02	2.36
天然組成比	1.91	26.40	4.10	21.20	26.90	0.00	10.40	0.00	8.90

表5.12 FP-1におけるFPガス放出量

(単位: mol/g)

保持温度	Kr	Xe
2,000°C	$2.82 \times 10^{-6}$ ※	$3.03 \times 10^{-5}$
3,000°C	$9.12 \times 10^{-7}$	$1.33 \times 10^{-5}$
総量	$3.73 \times 10^{-6}$ ※	$4.36 \times 10^{-5}$

※ データの一部未取得のため参考値とする。

表5.13 FP-2におけるFPガス放出量

(単位: mol/g)

保持温度	Kr	Xe
1,500°C	$1.73 \times 10^{-6}$	$1.36 \times 10^{-5}$
2,500°C	$3.42 \times 10^{-6}$	$3.32 \times 10^{-5}$
総量	$5.16 \times 10^{-6}$	$4.68 \times 10^{-5}$

第2操作室

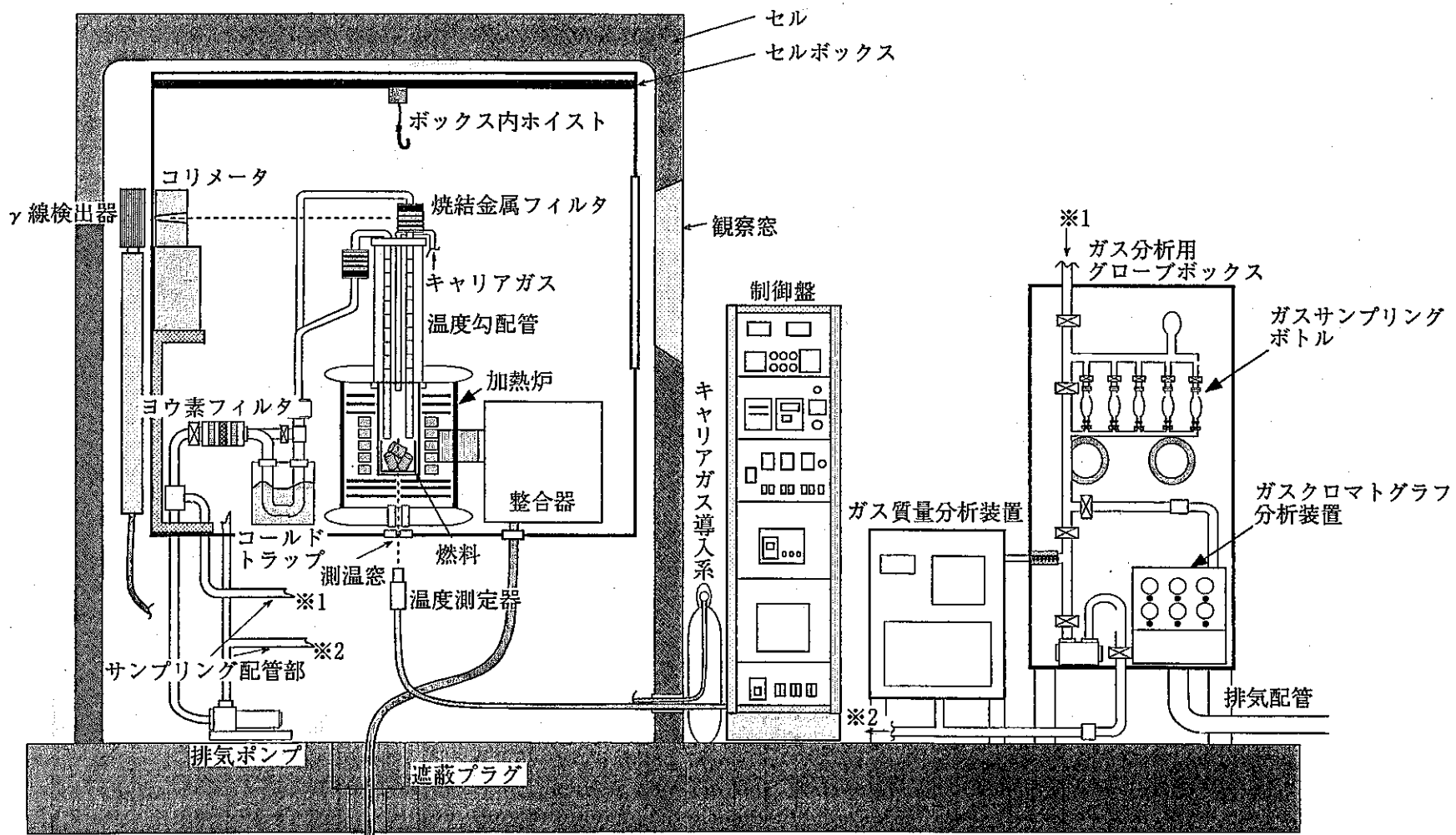


図2.1 FP放出挙動試験装置全体概略図

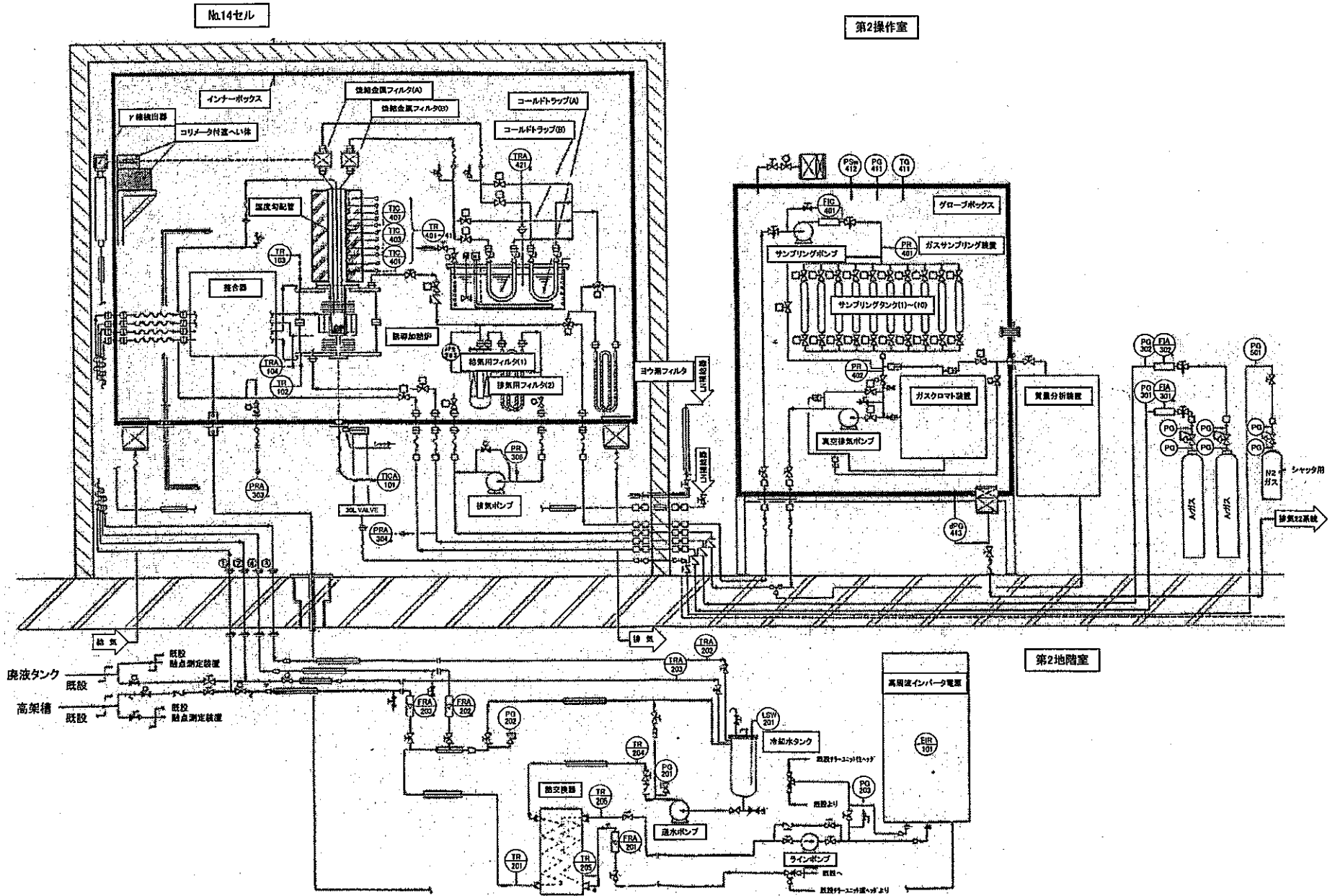


図2.2 FP放出挙動試験装置全体系統図

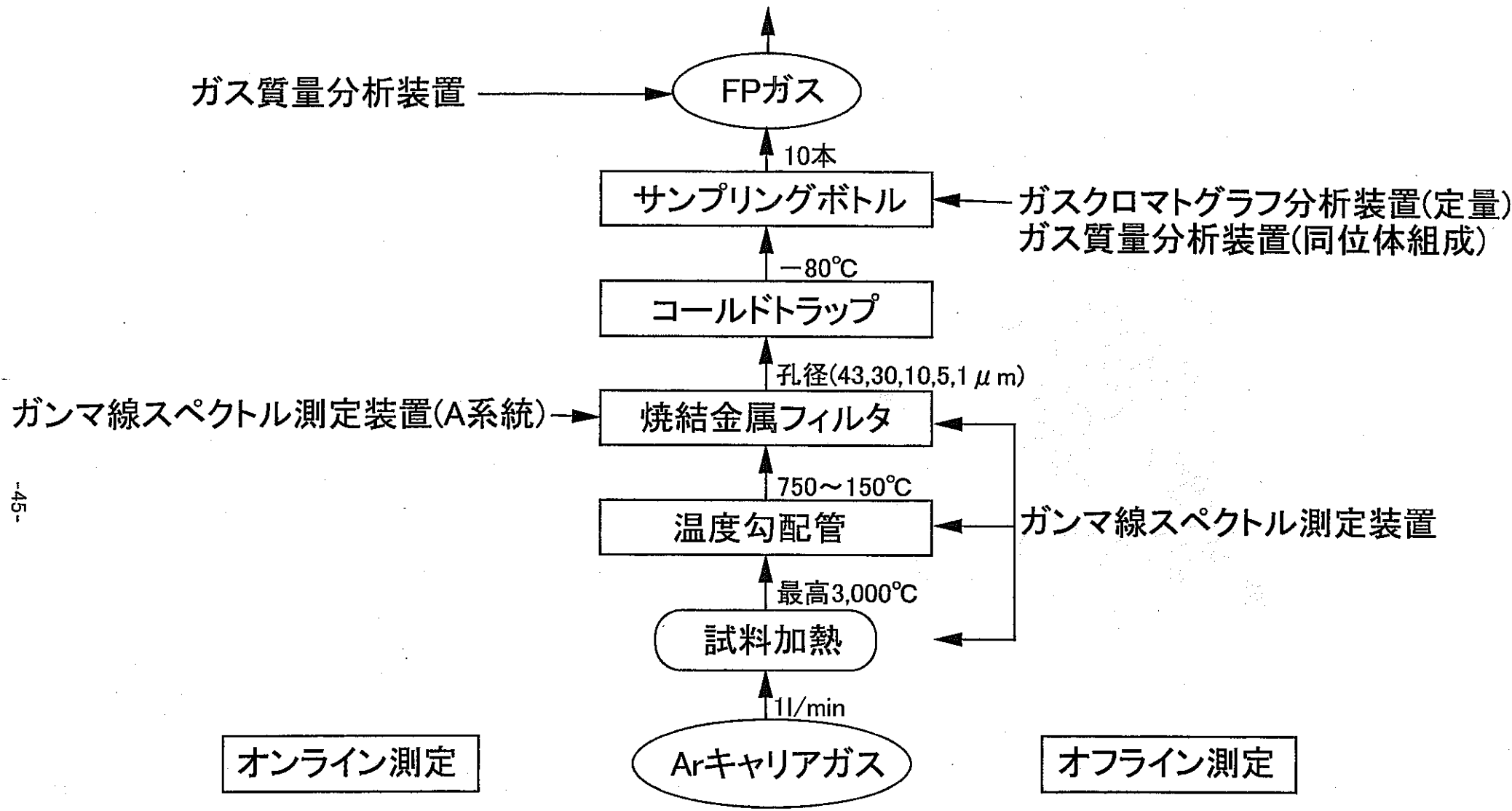


図2.3 サンプルング装置及び分析装置系統図

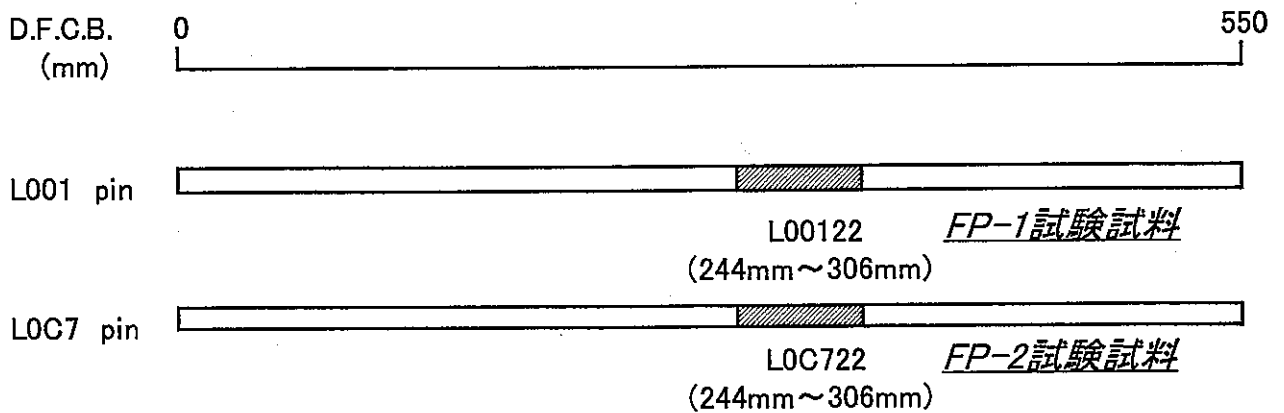
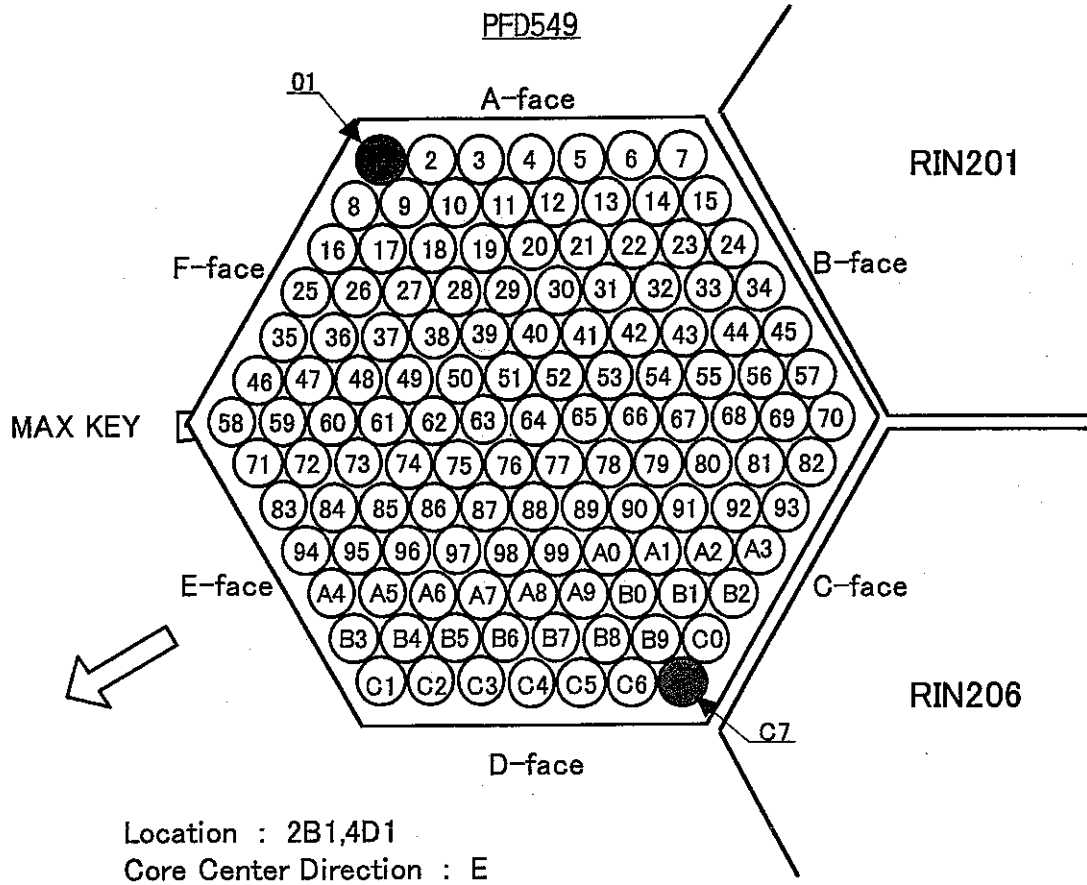


図3.1 試験対象ピンの炉心装荷位置及びピン軸方向切断位置



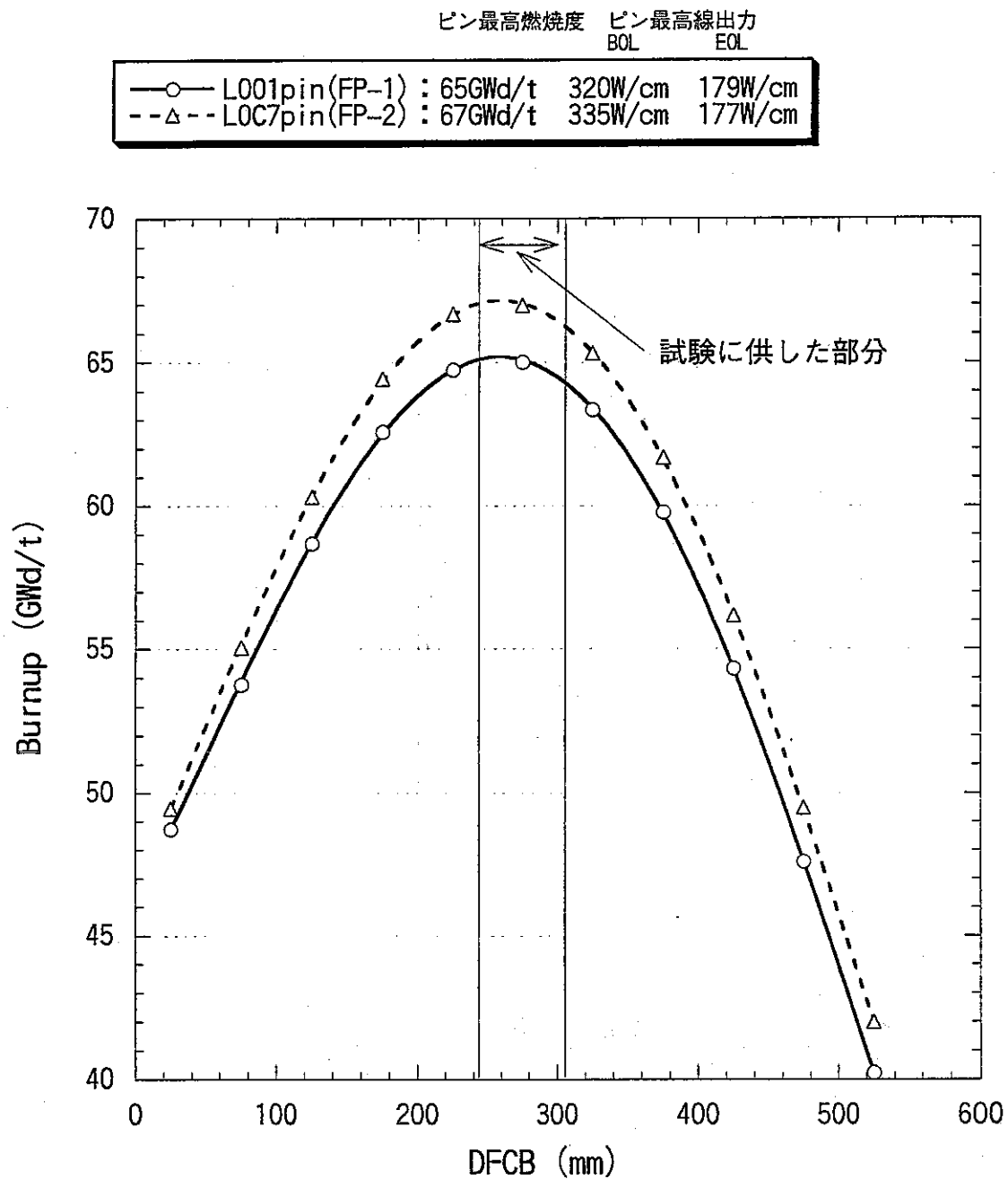


図3.2 試験対象ピンの燃焼度分布

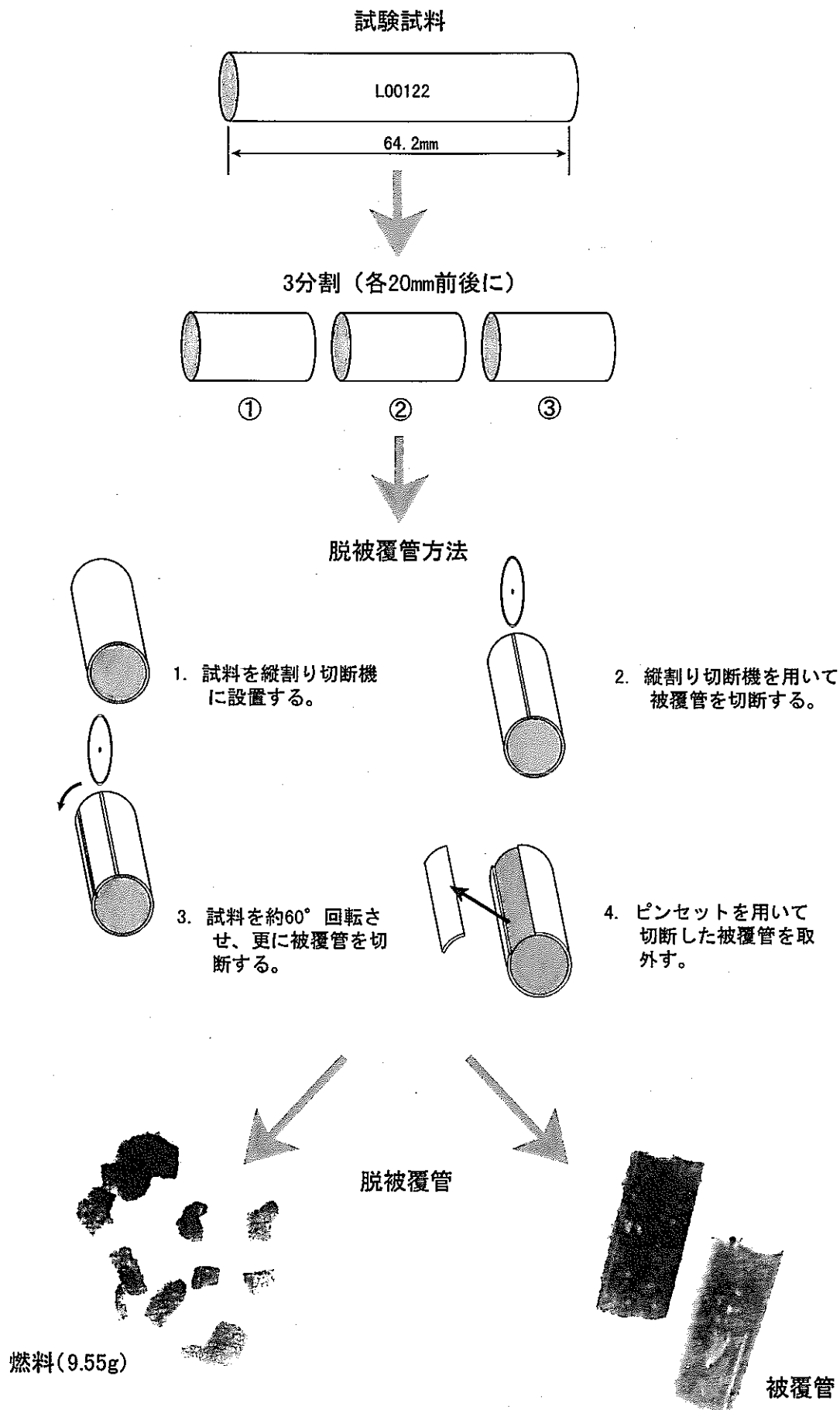
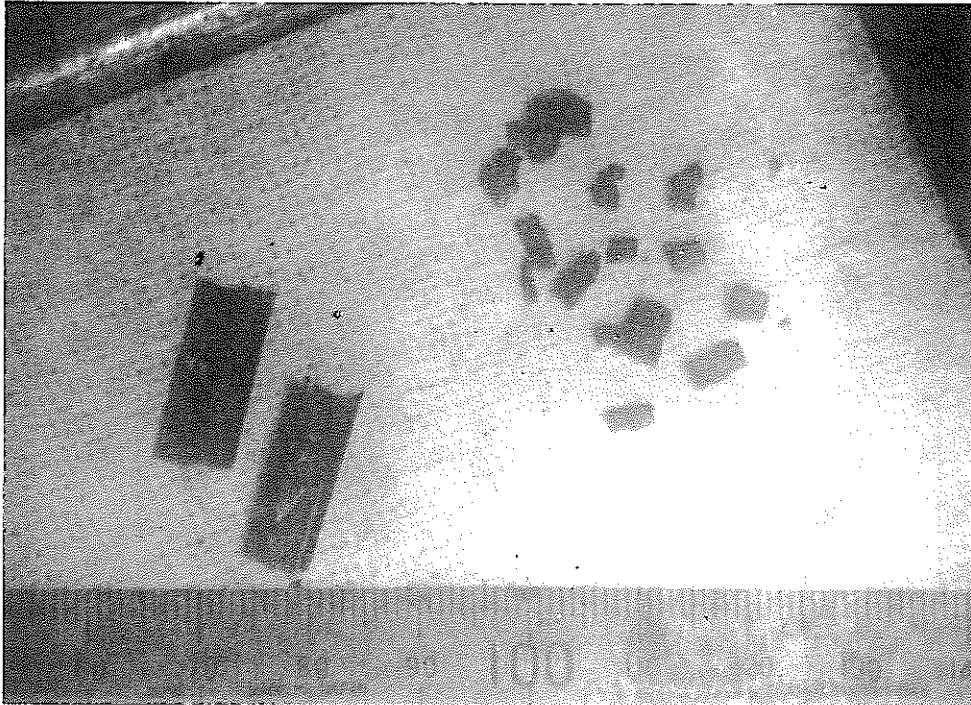
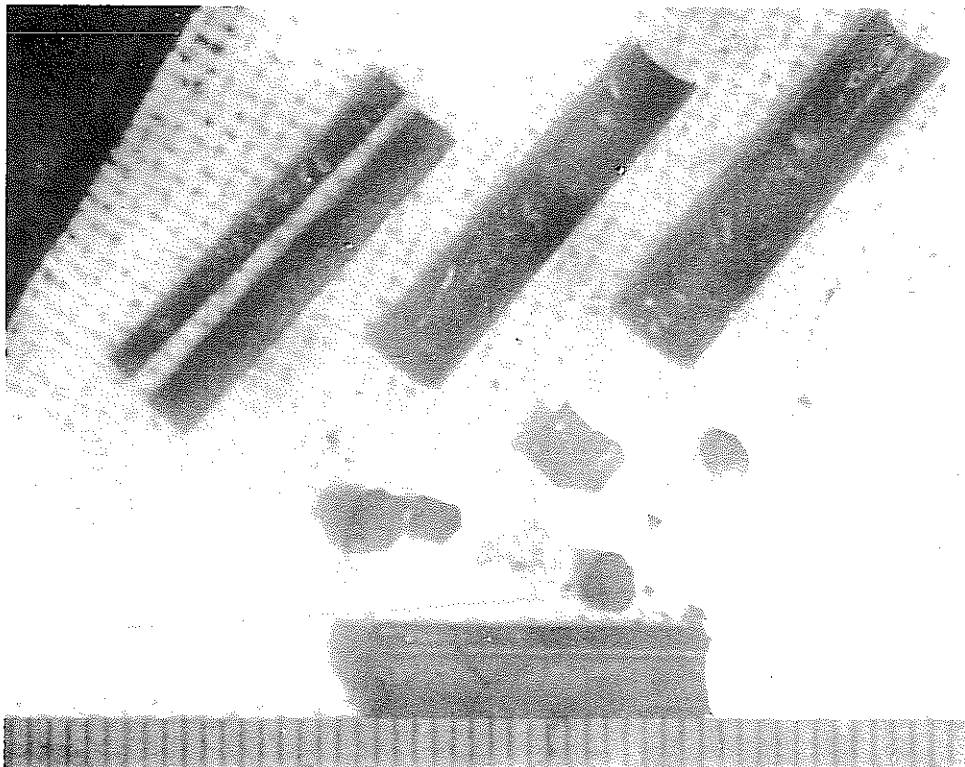


図3.3 試料調製方法概略



L0012



LOC72

図3.4 試料調製した燃料の外観写真

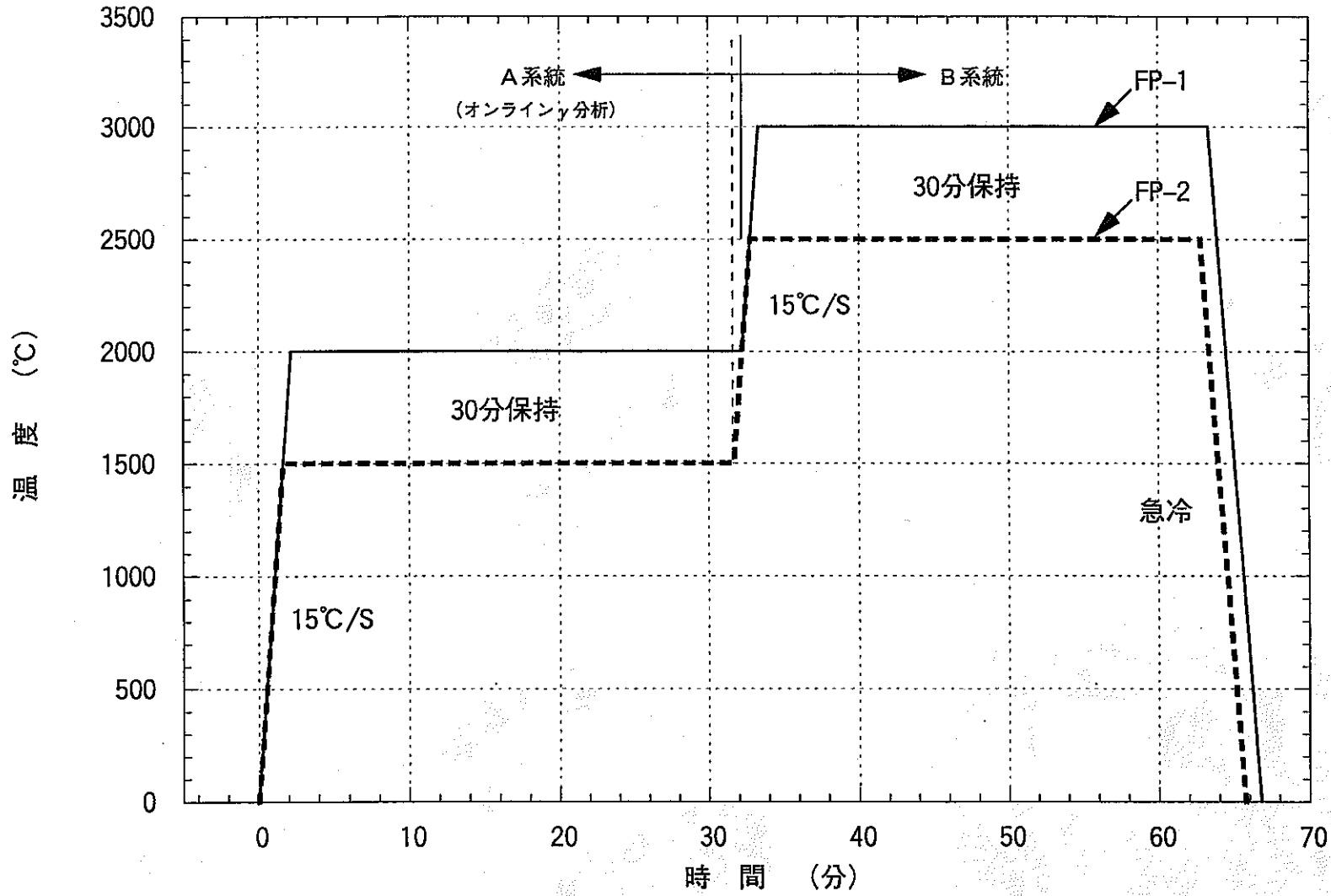


図4.1 FP-1、FP-2の加熱パターン

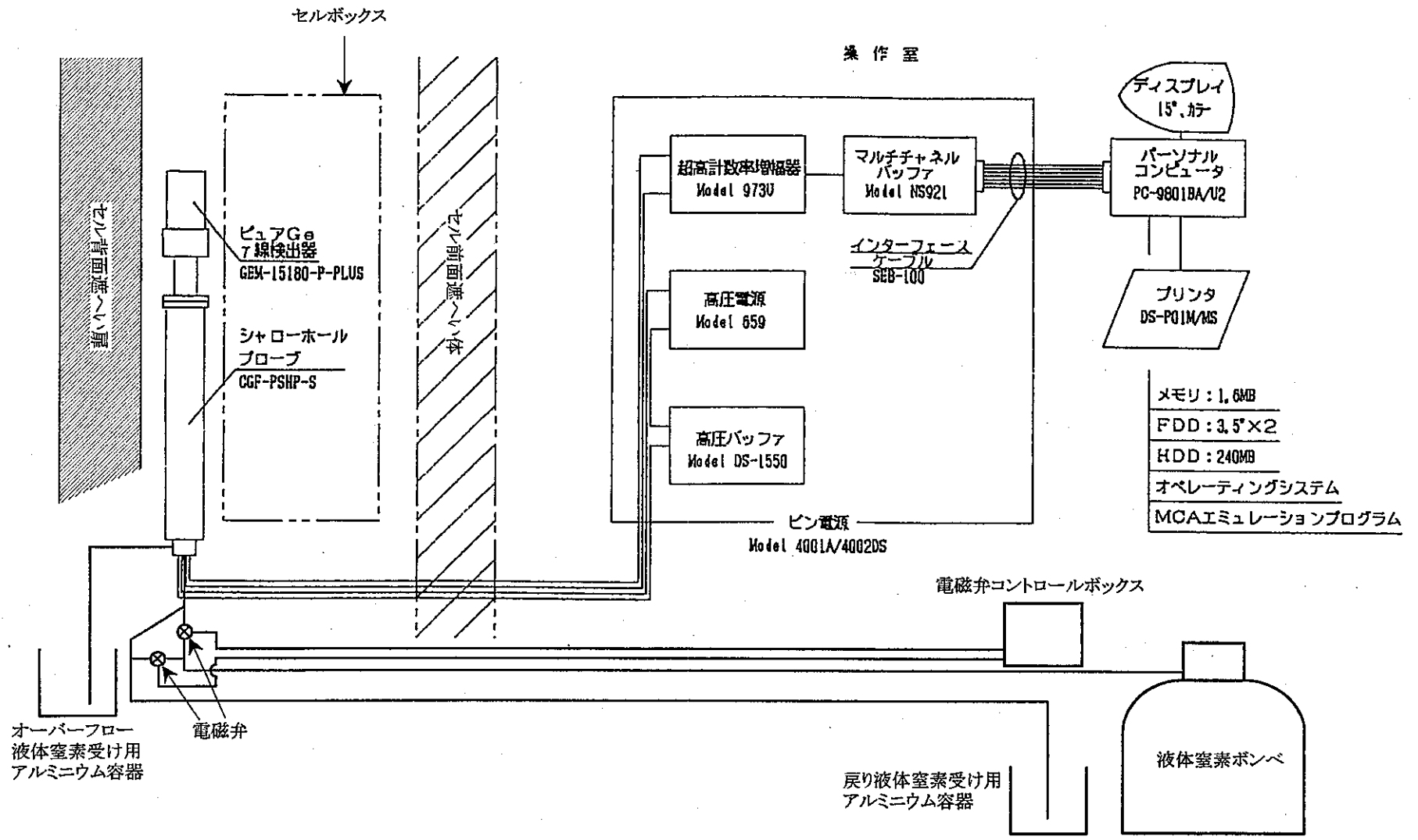
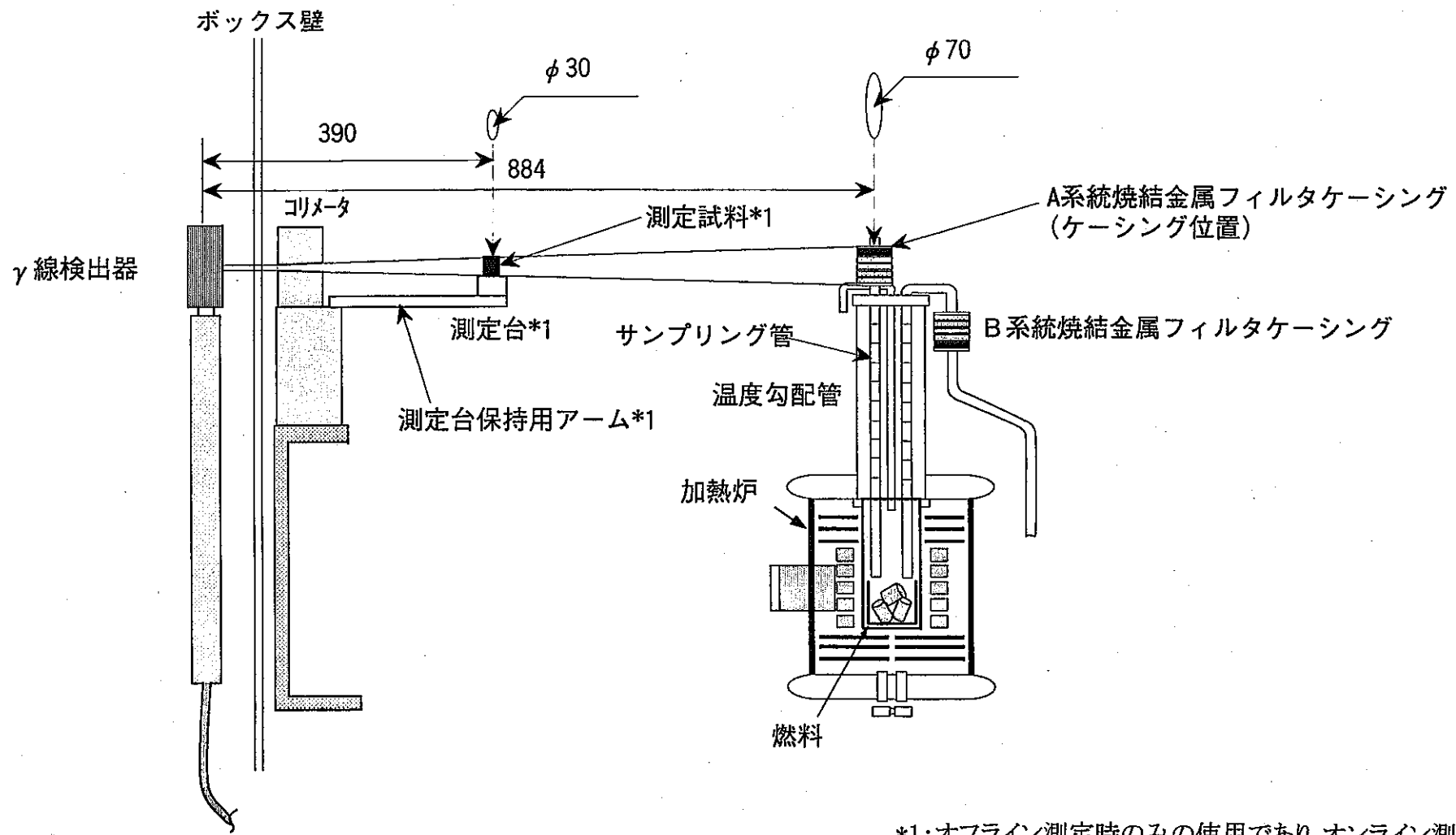


図4.2  $\gamma$ 線測定装置の構成図



\*1: オフライン測定時のみの使用であり、オンライン測定時は撤去されている。

図4.3(1) 検出器と測定位置の関係(側面図)

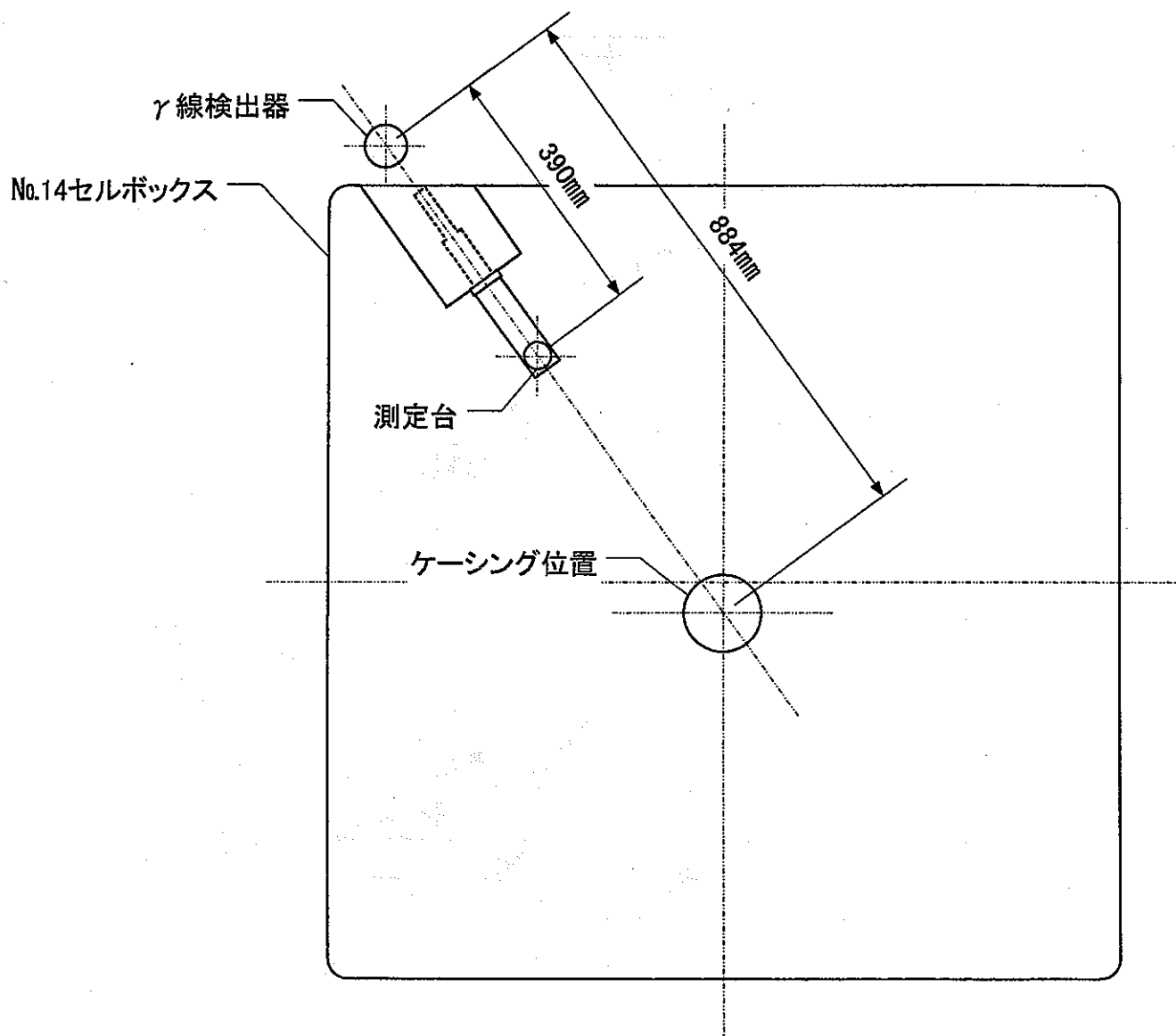


図4.3(2) 検出器と測定位置の関係 (平面図)

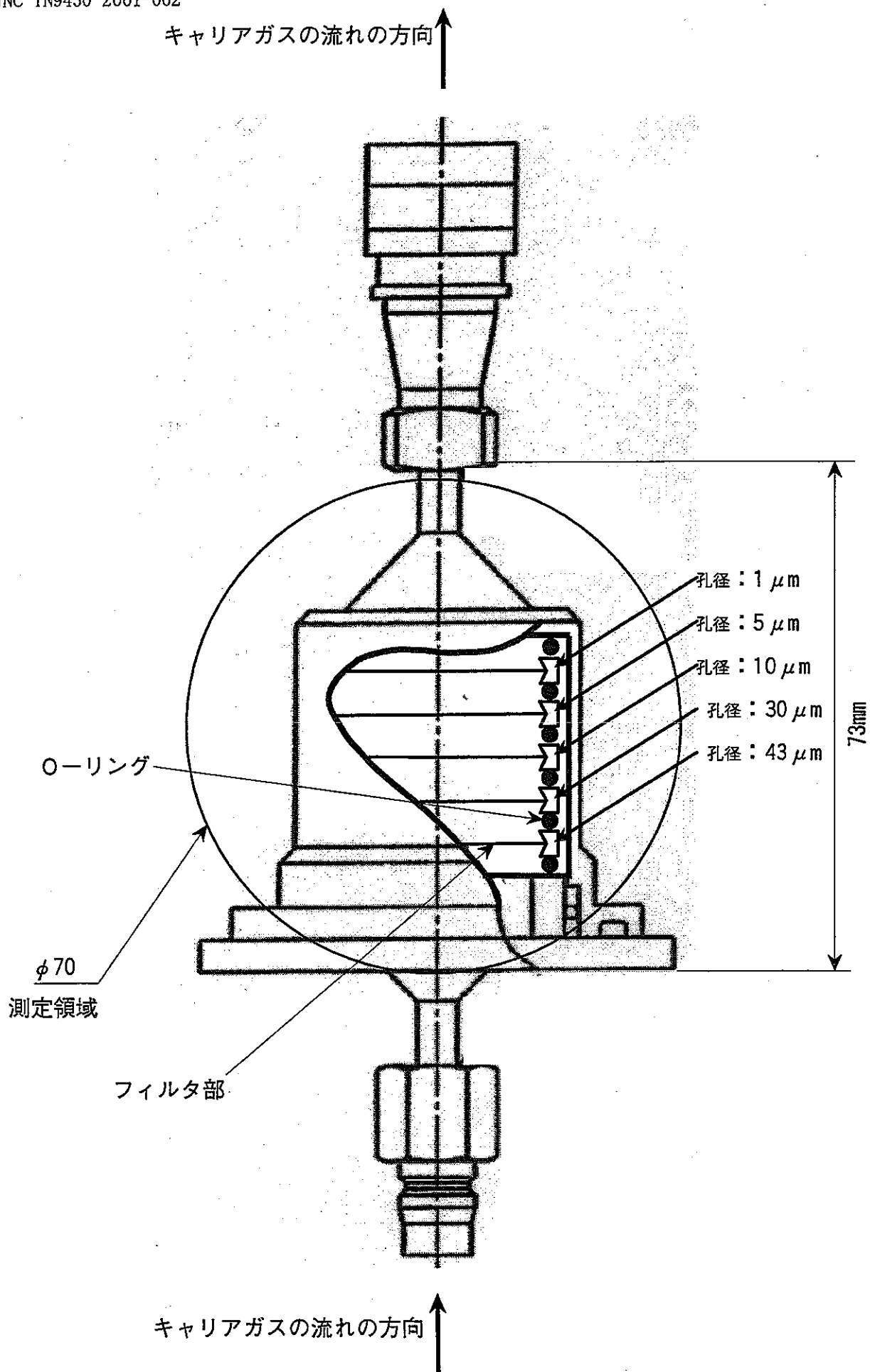
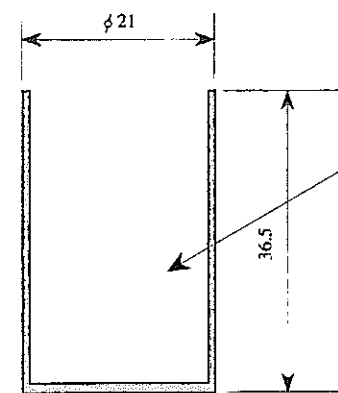
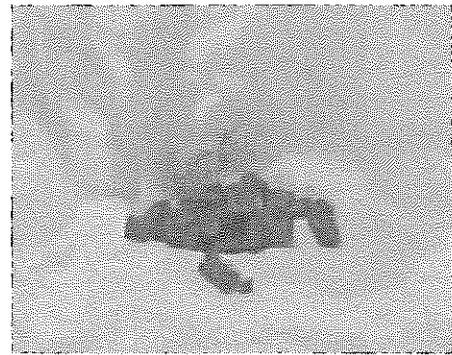


図4.4 A系統ケーシングの構造とオンライン測定での測定領域

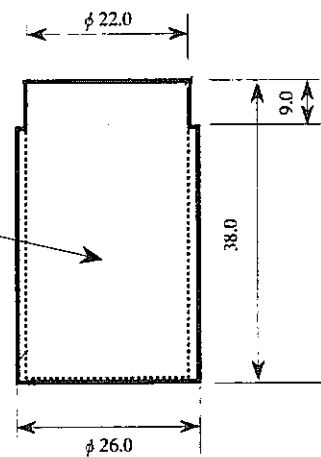




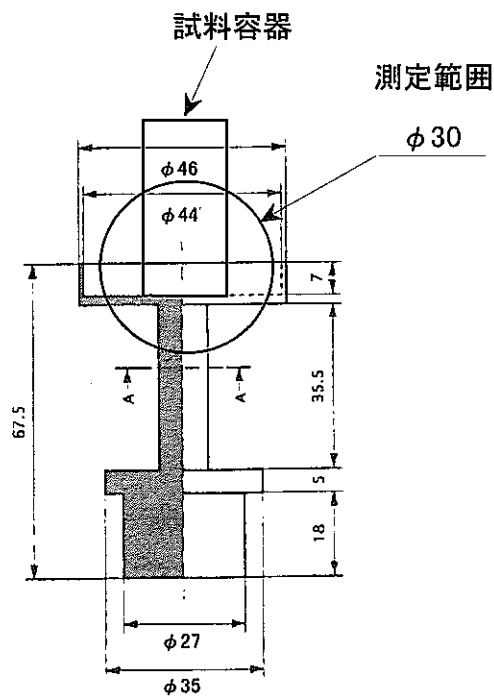
タングステンるつぼ



脱被覆された実照射燃料片  
(FP-1試験体 (9.55g))



試料容器 (アルミニウム製)



測定台アダプタ (SUS製)

図4.5 試験体、タングステンるつぼ、試料容器及び測定台アダプタ

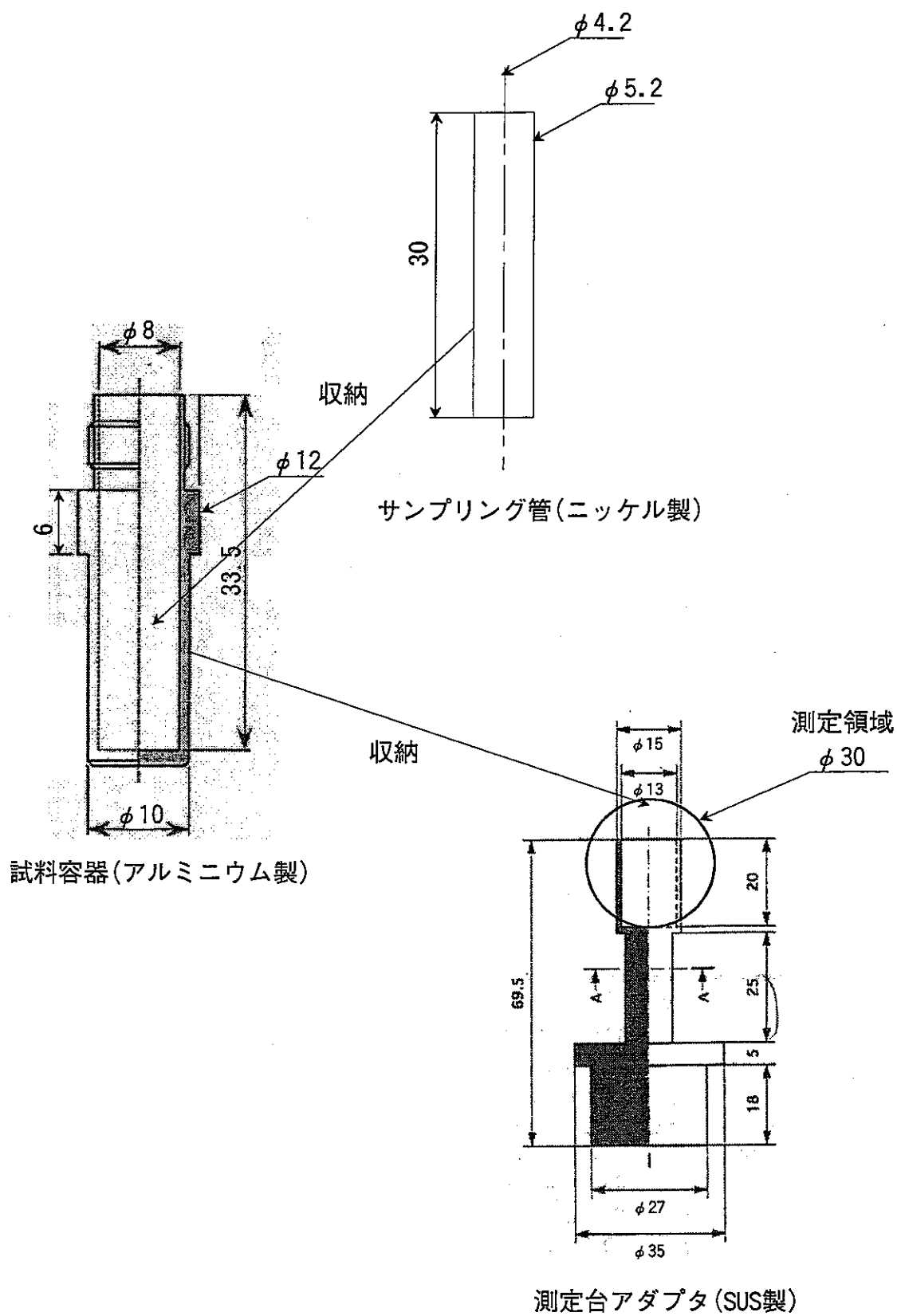


図4.6 サンプリング管、試料容器及び測定台アダプタ

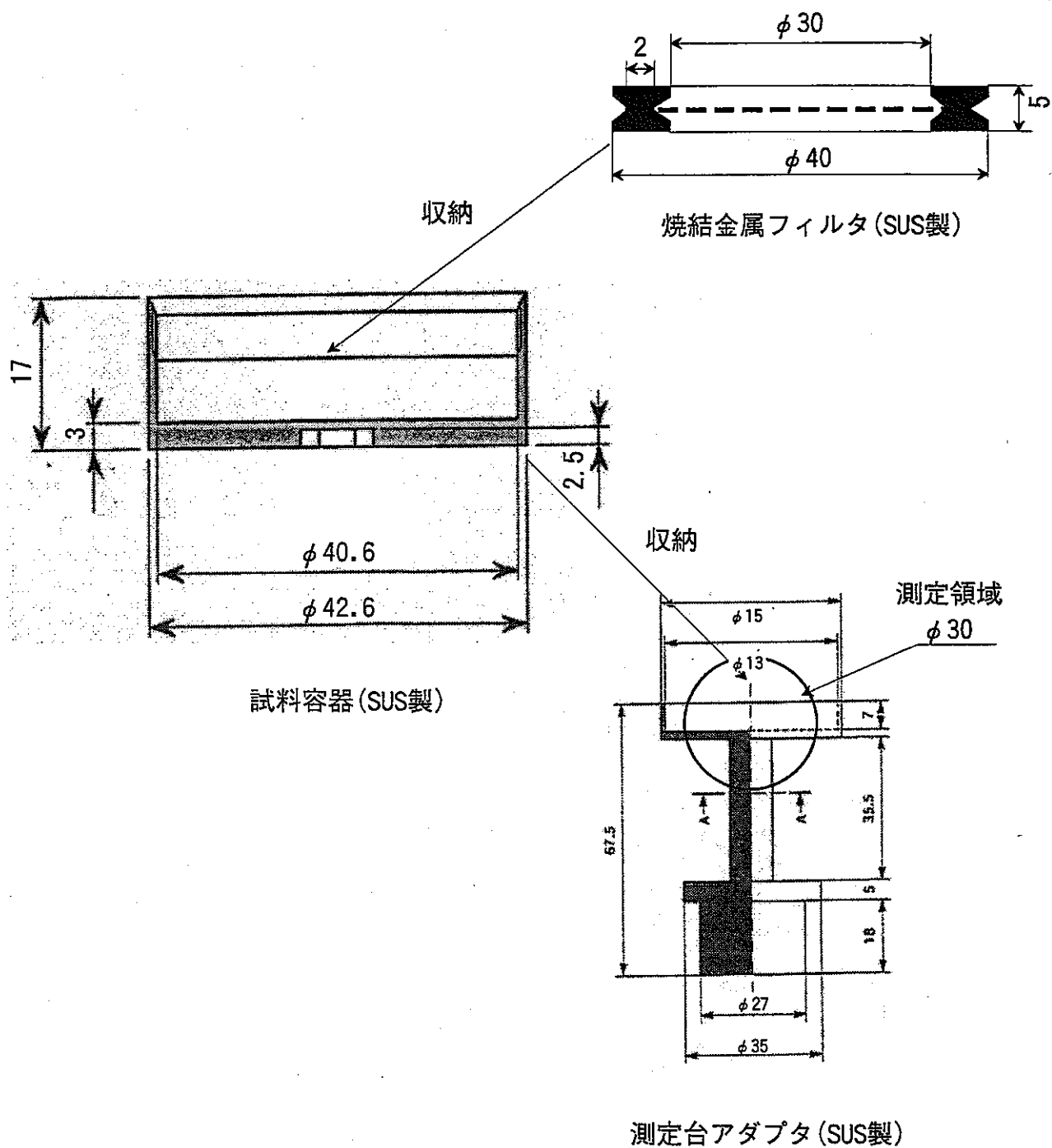


図4.7 フィルタ、試料容器及び測定台アダプタ

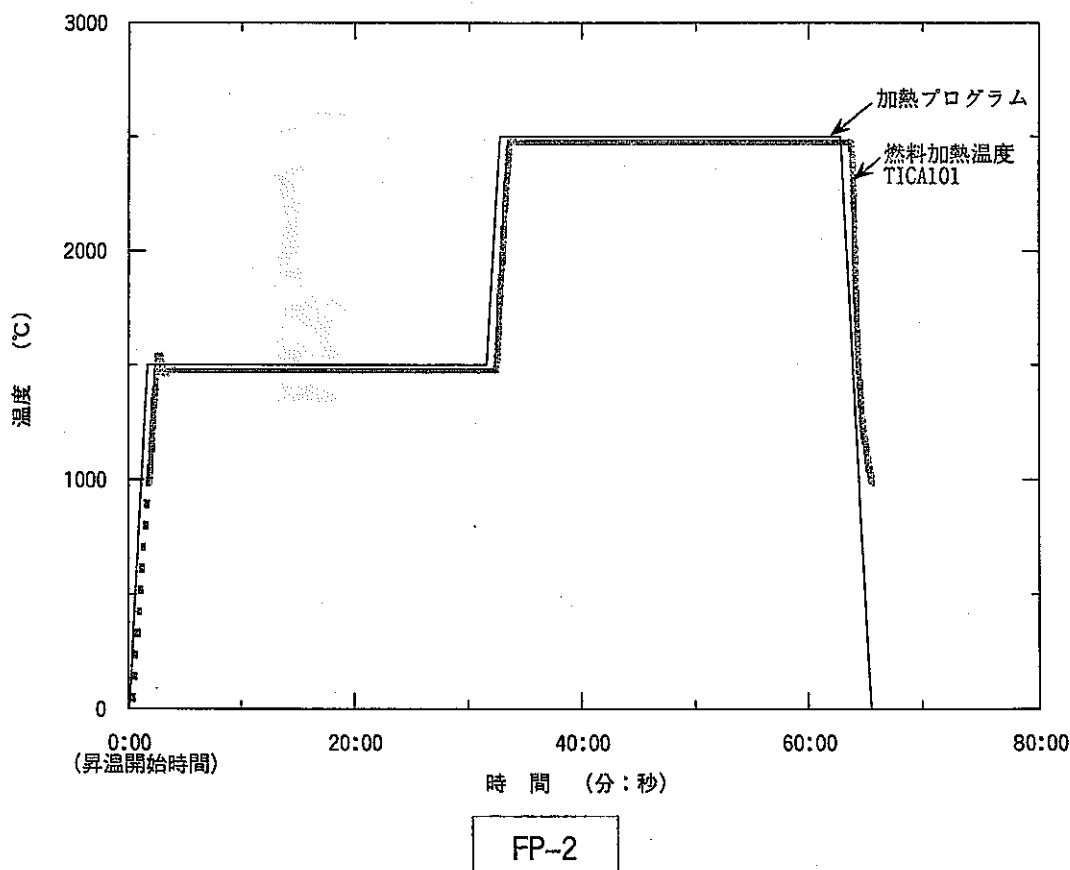
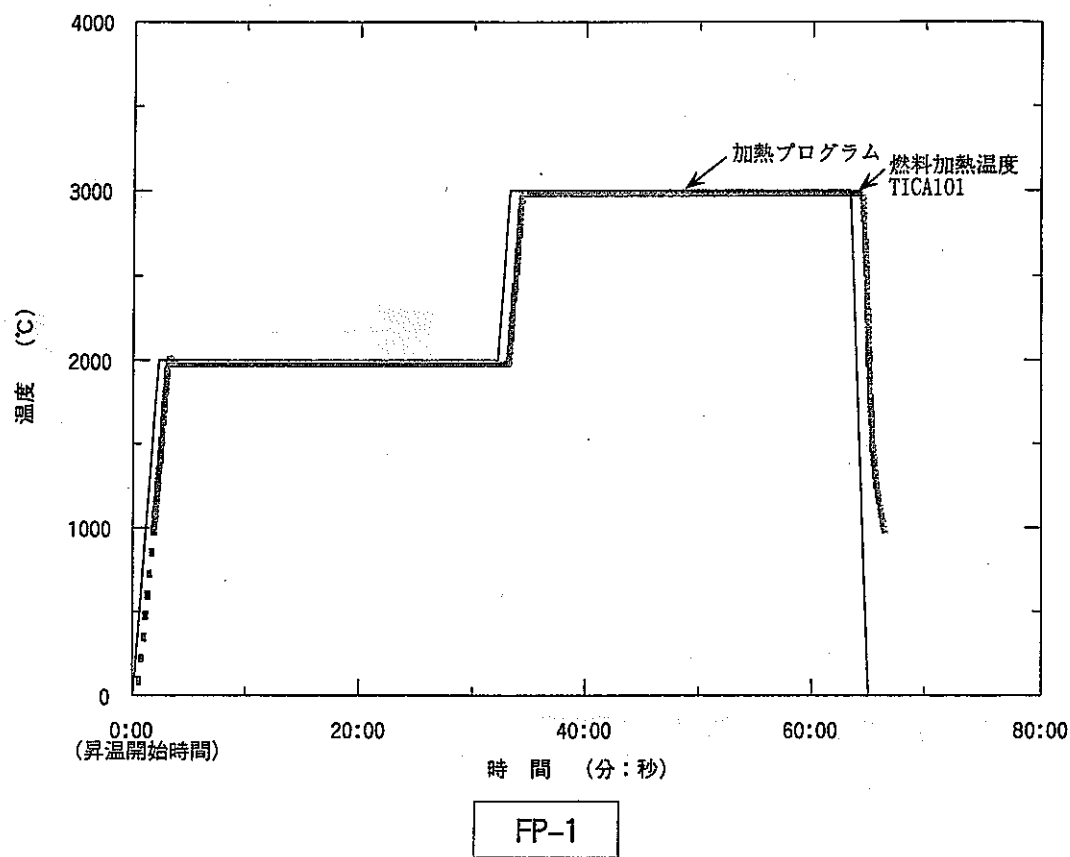
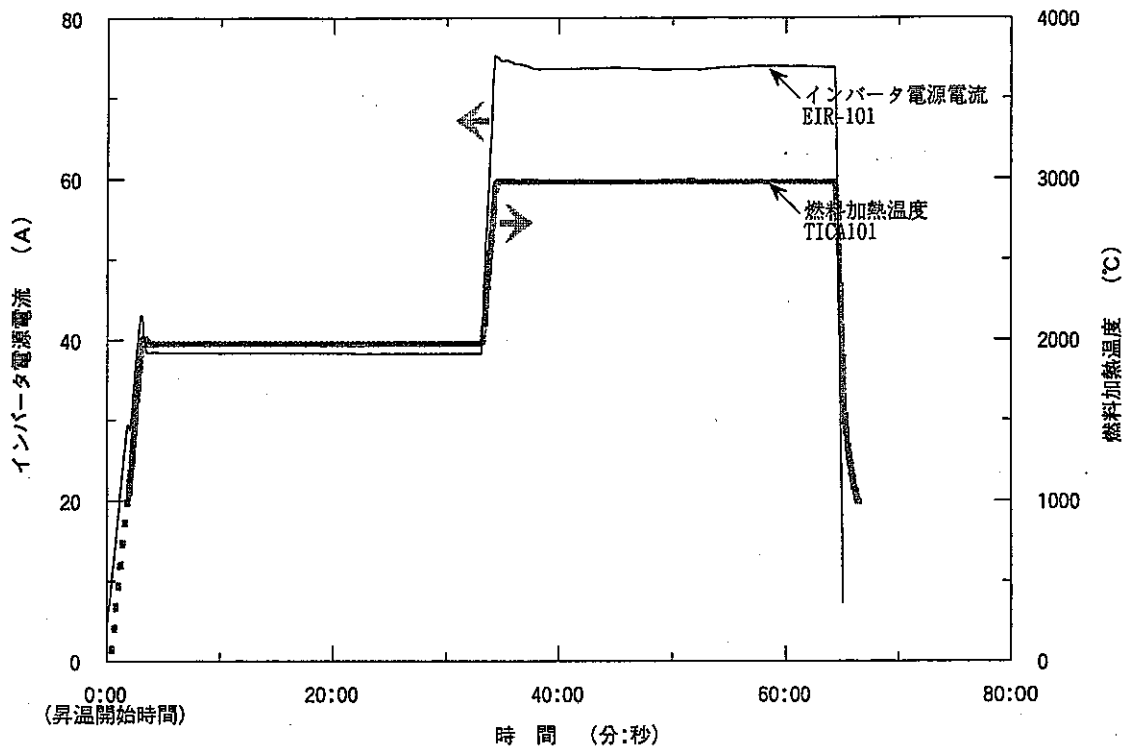
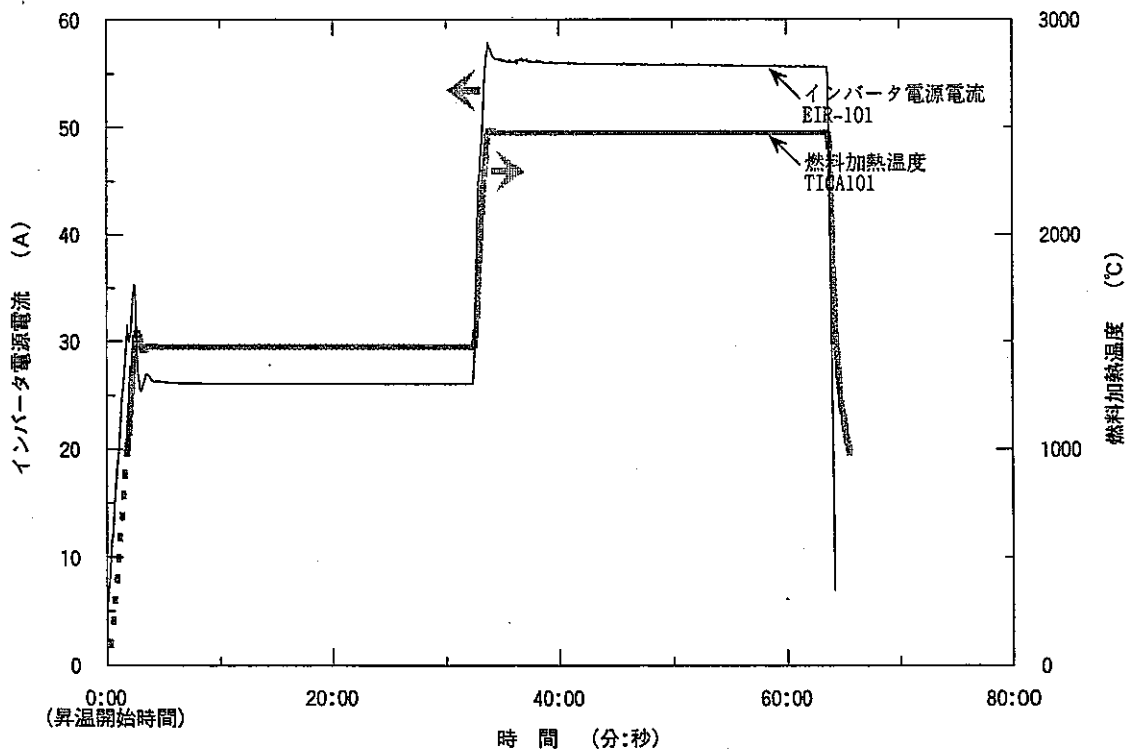


図5.1 加熱プログラムに対する実際の加熱履歴



FP-1



FP-2

図5.2 燃料加熱温度とインバータ電源電流との関係

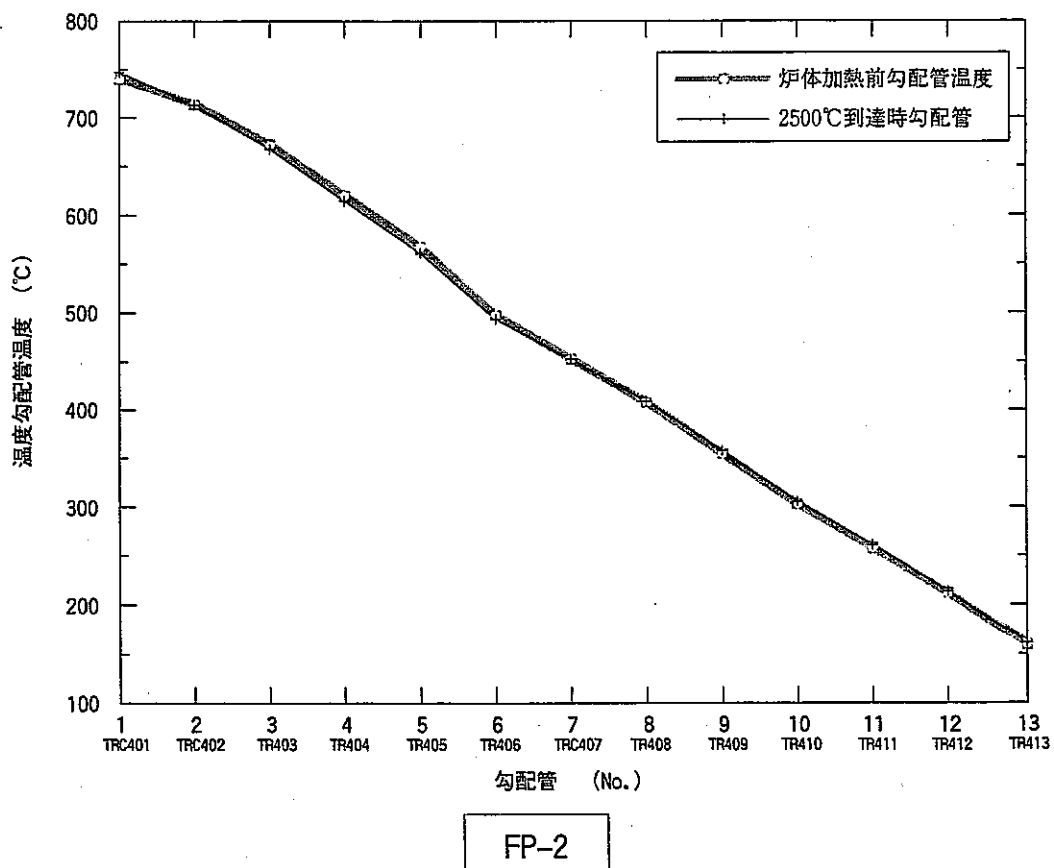
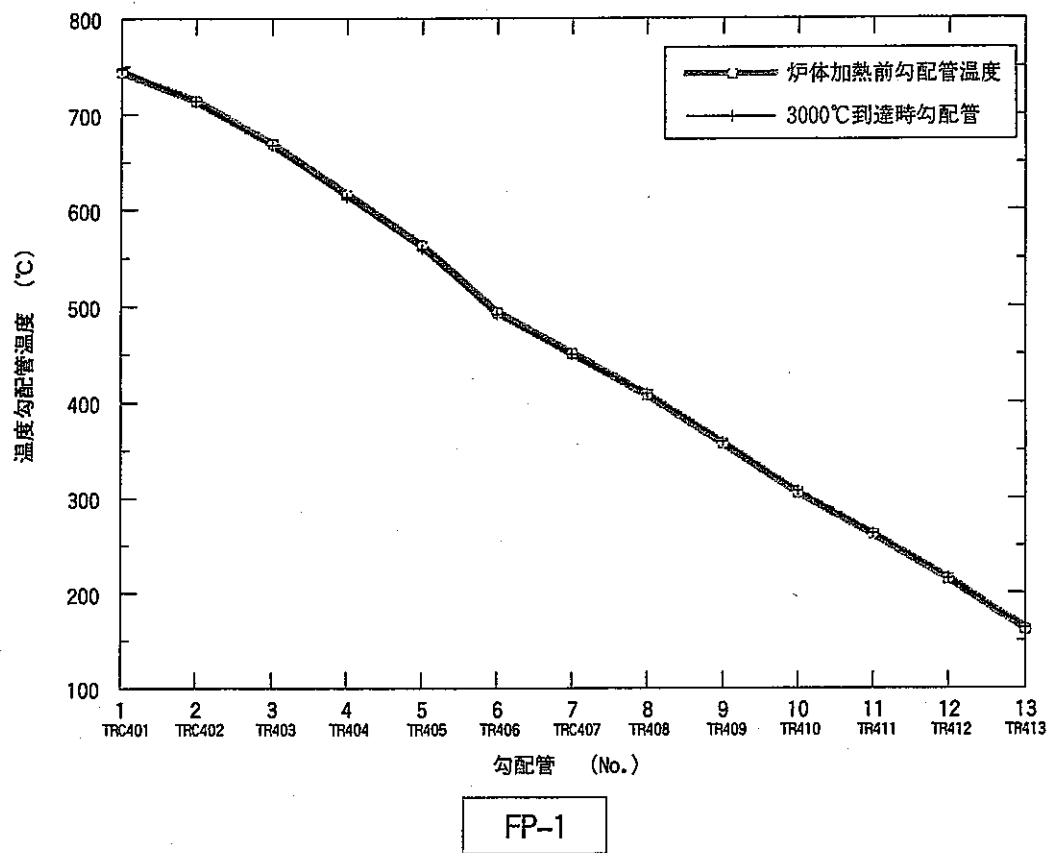


図5.3 温度勾配管温度の直線性

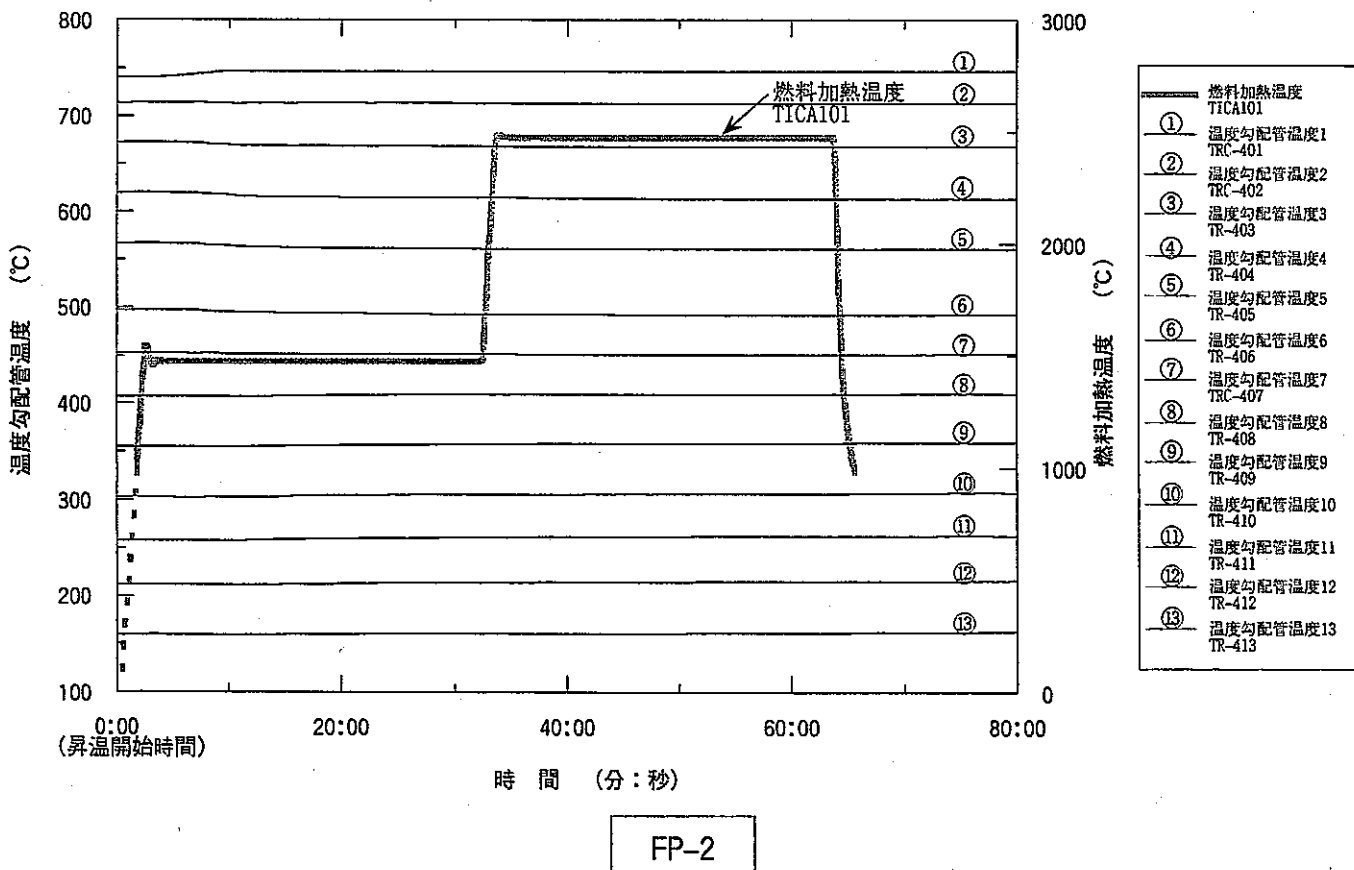
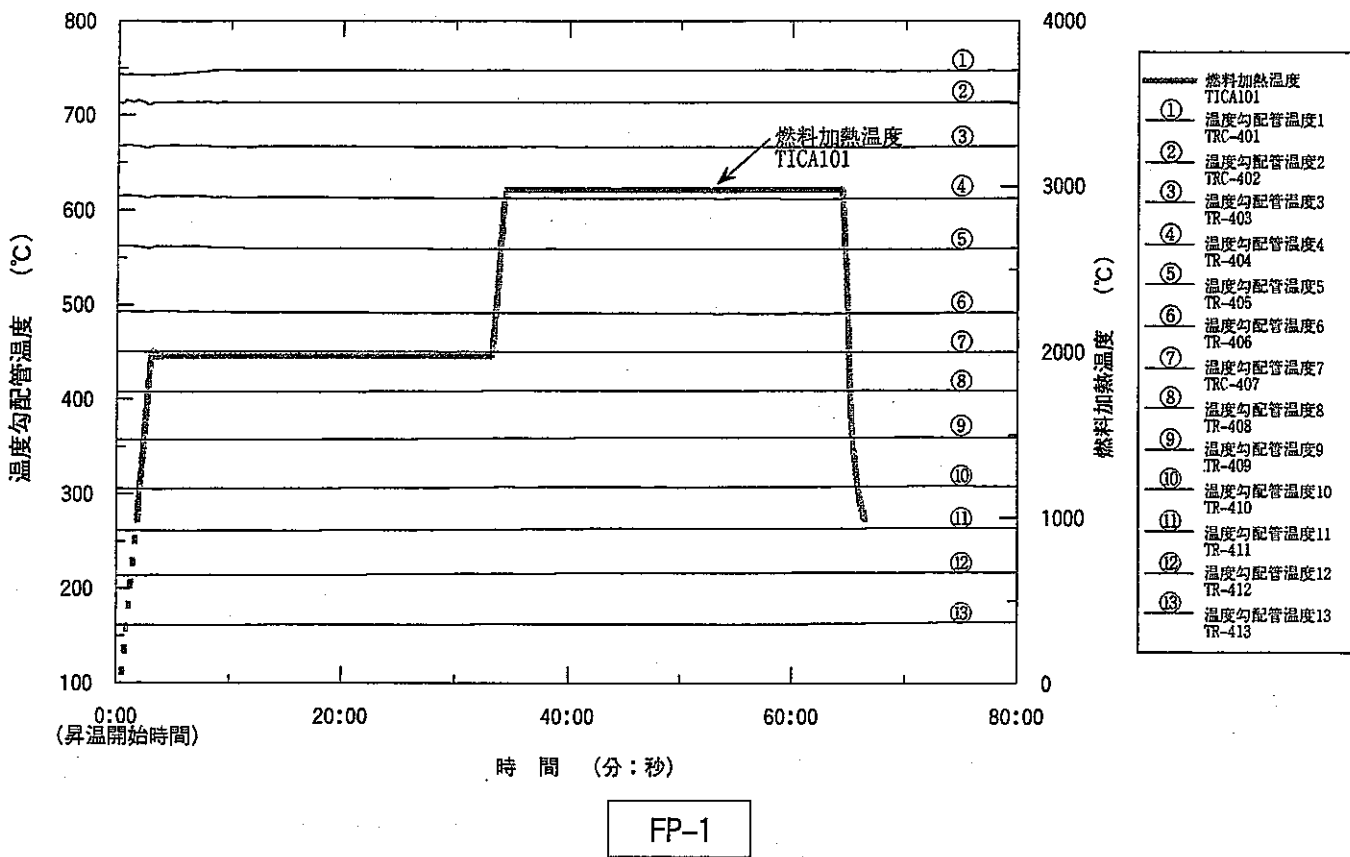
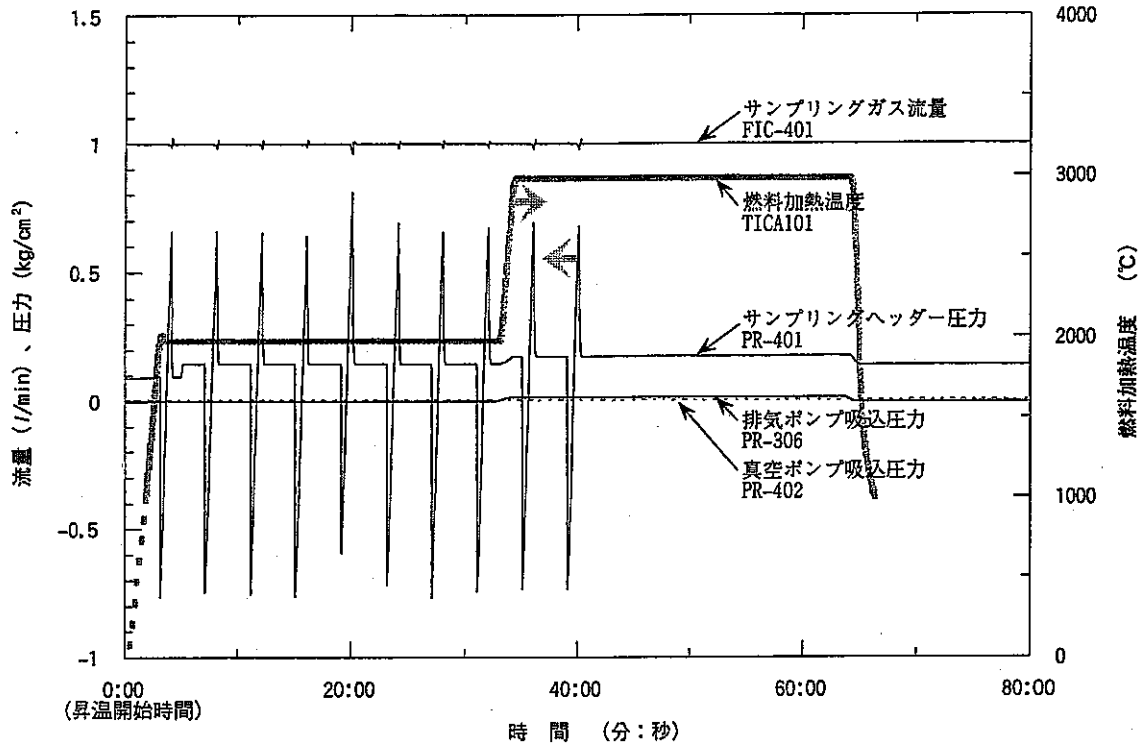
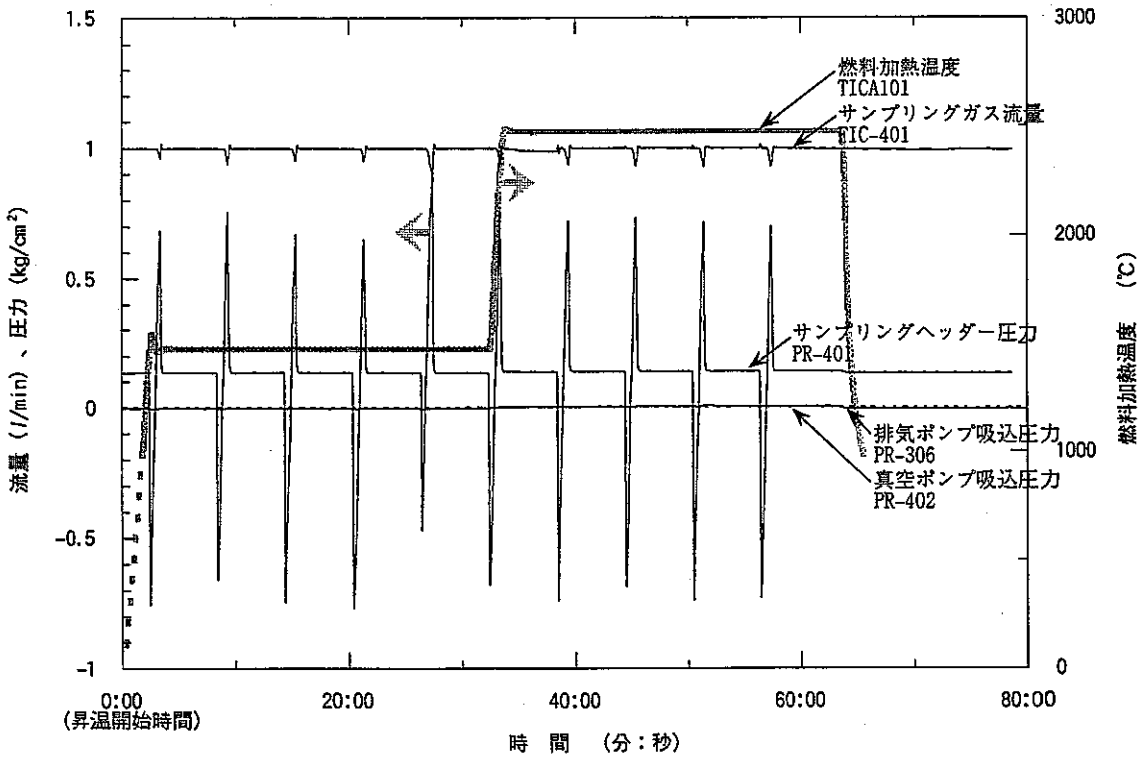


図5.4 燃料加熱時の勾配管温度の変化



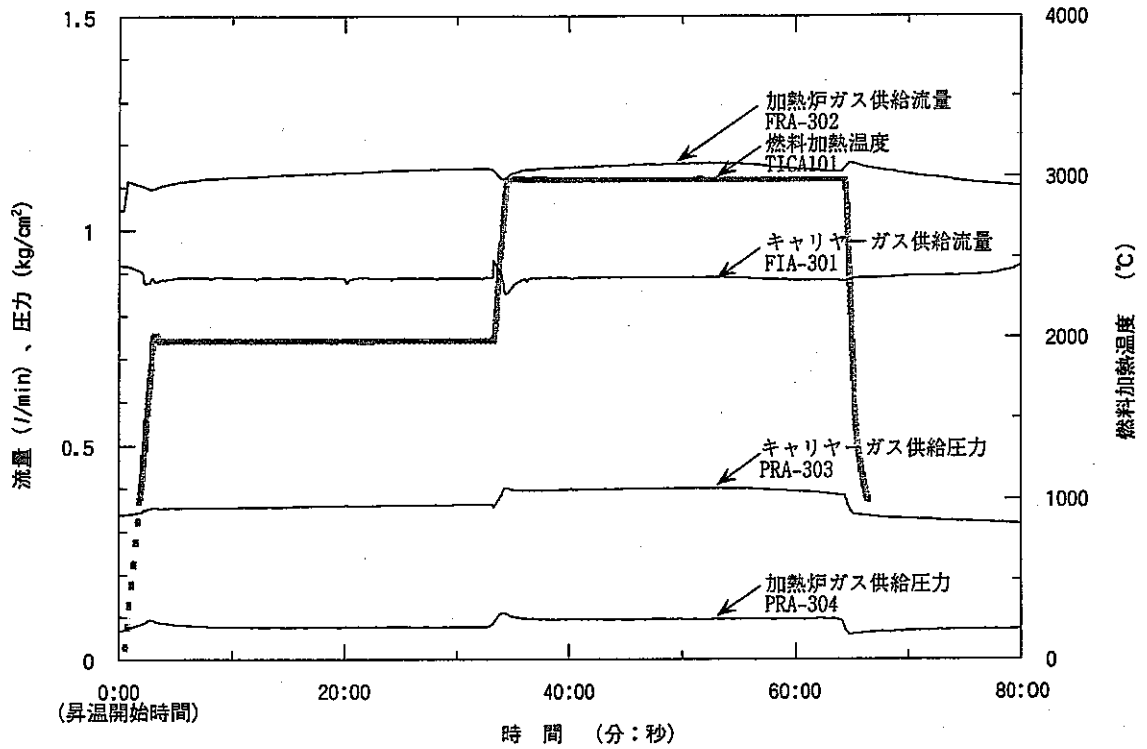
FP-1



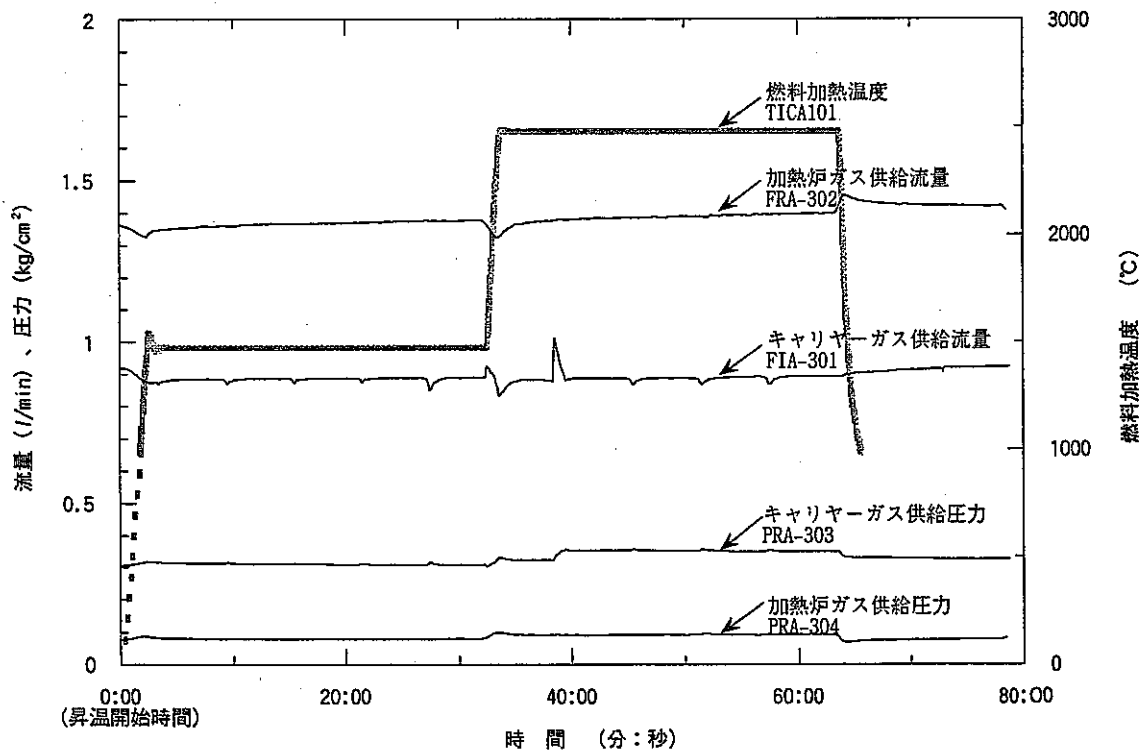
FP-2

図5.5 サンプリングボトルへのガス捕集時の流量、圧力の変化



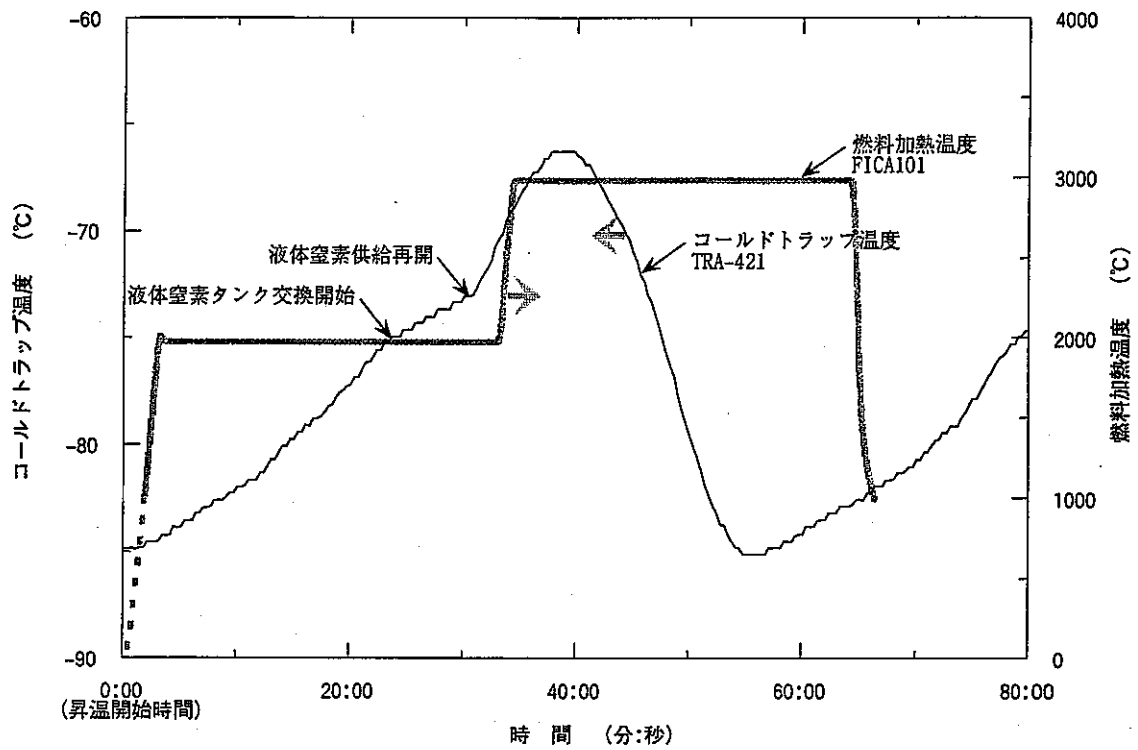


FP-1

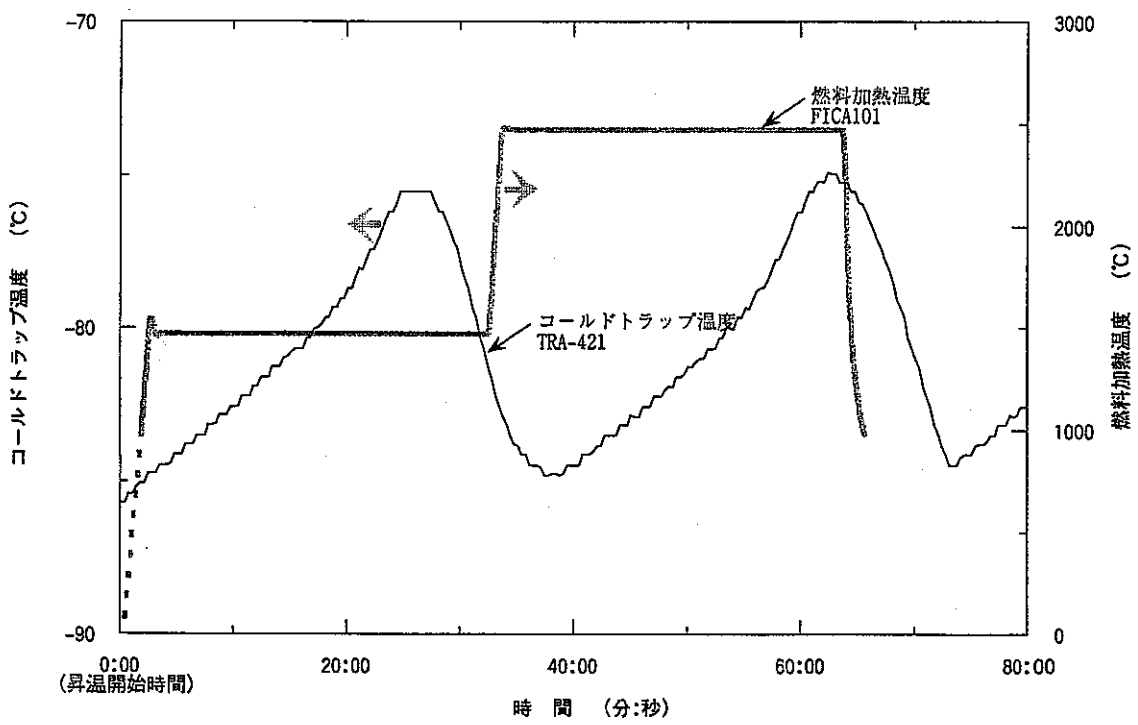


FP-2

図5.6 加熱試験中におけるガス供給流量、圧力の変化

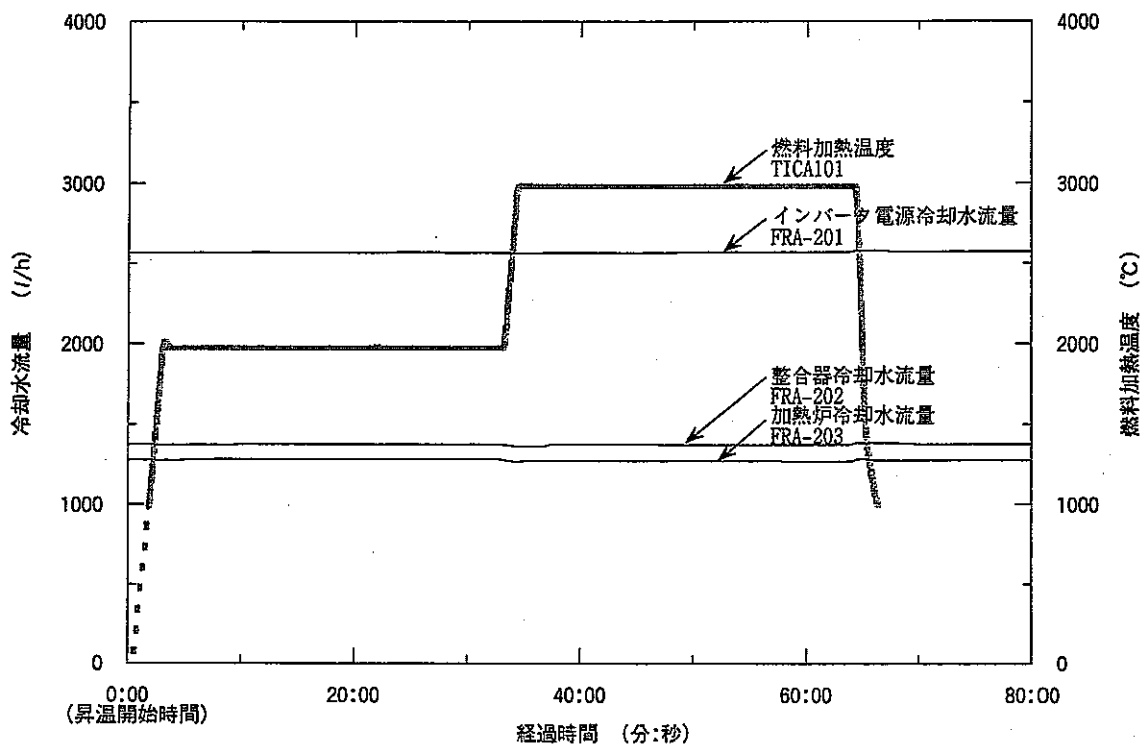


FP-1

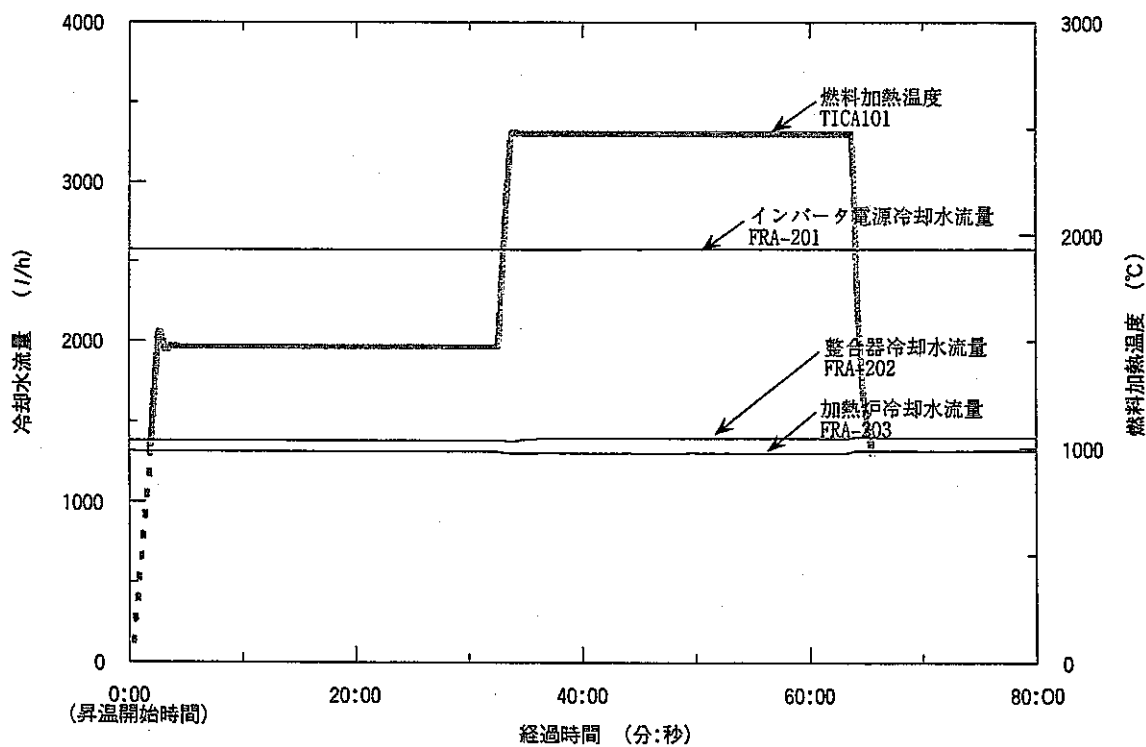


FP-2

図5.7 加熱試験中におけるコールドトラップの温度変化

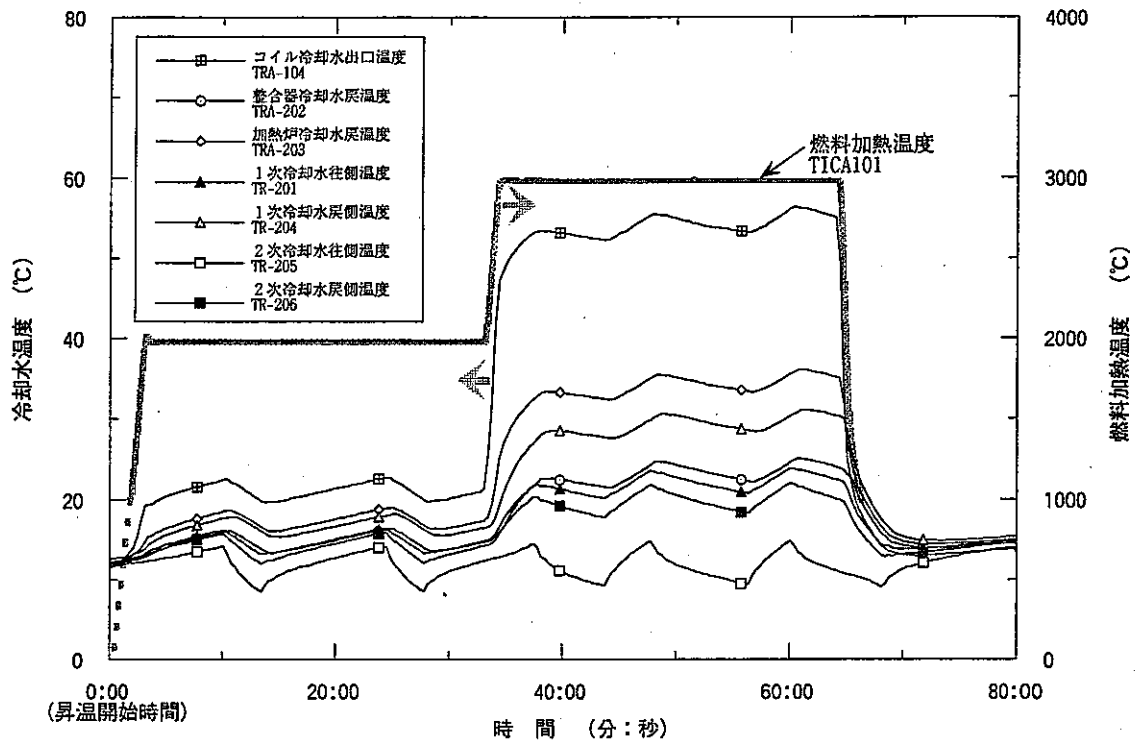


FP-1

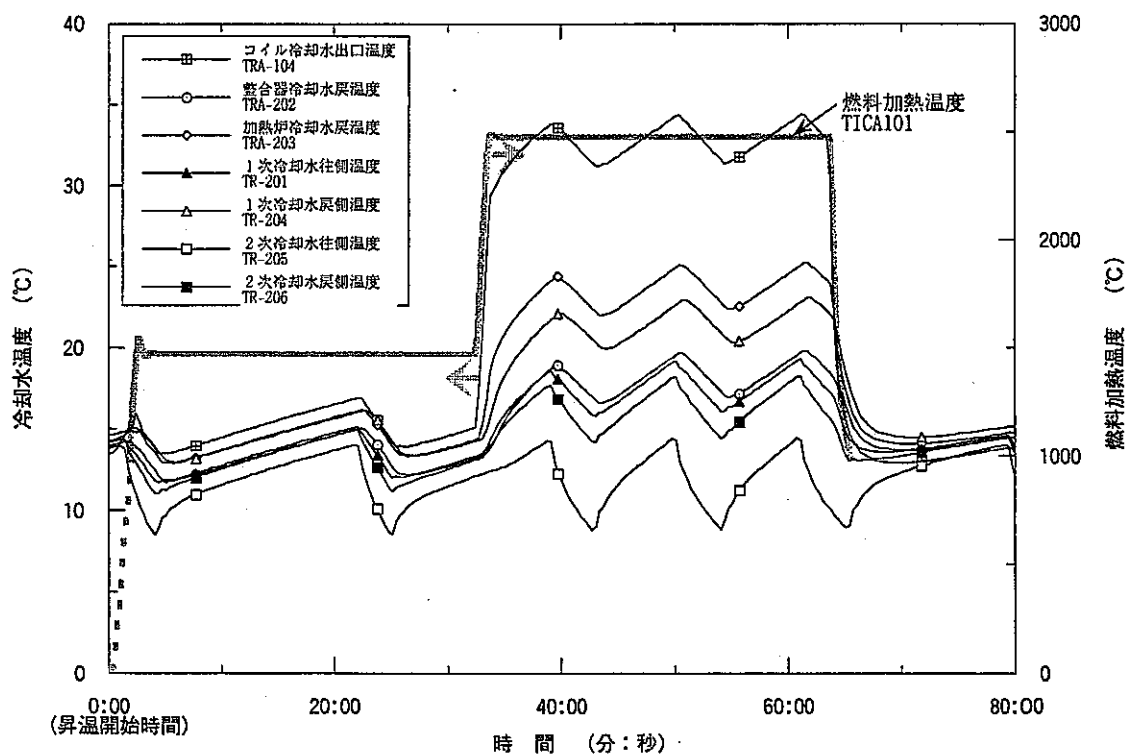


FP-2

図5.8 加熱試験中における冷却水流量の変化

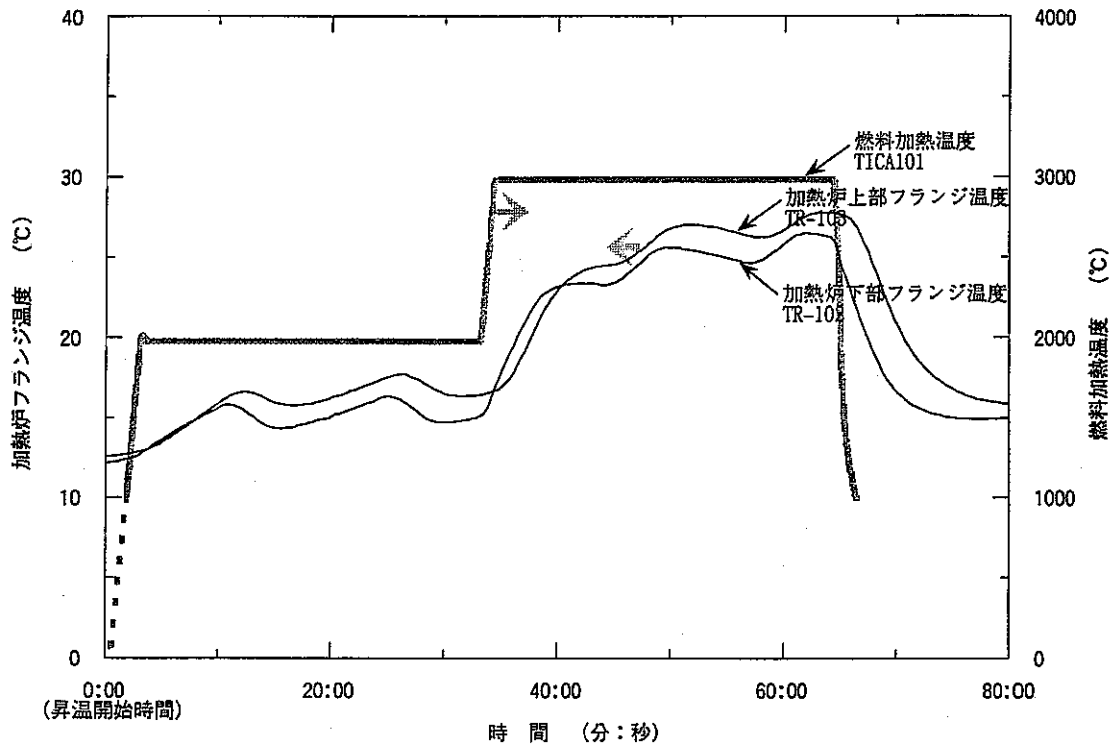


FP-1

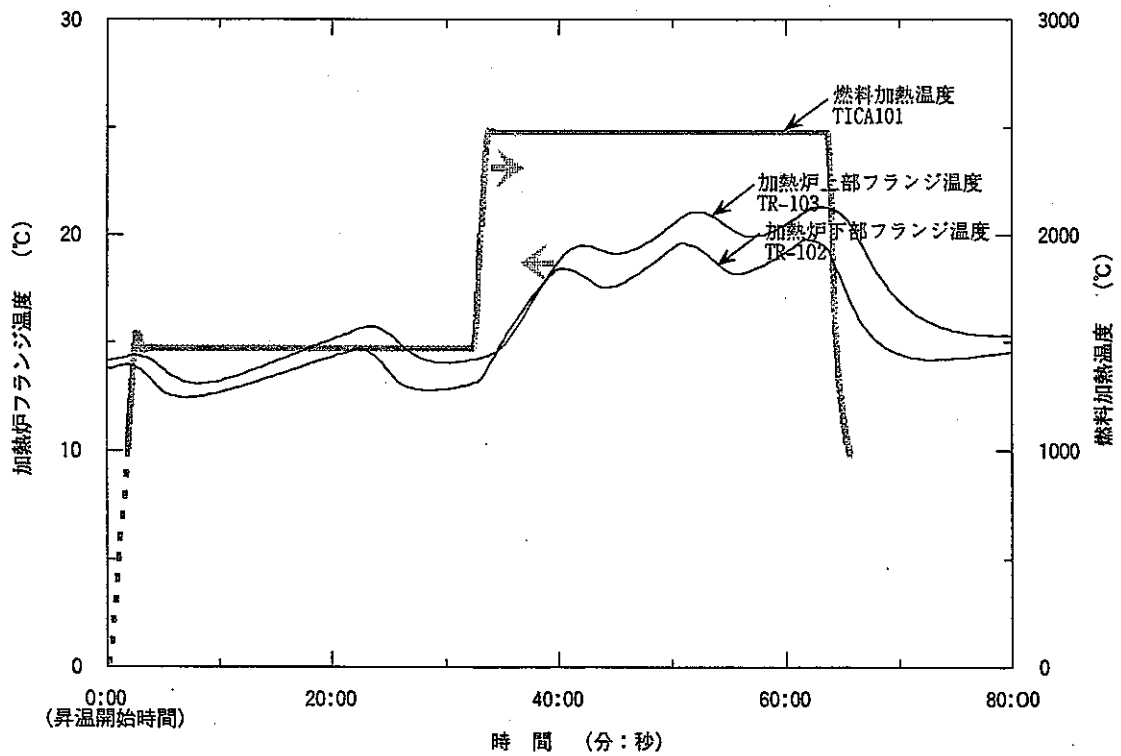


FP-2

図5.9 加熱試験中における冷却水温度の変化

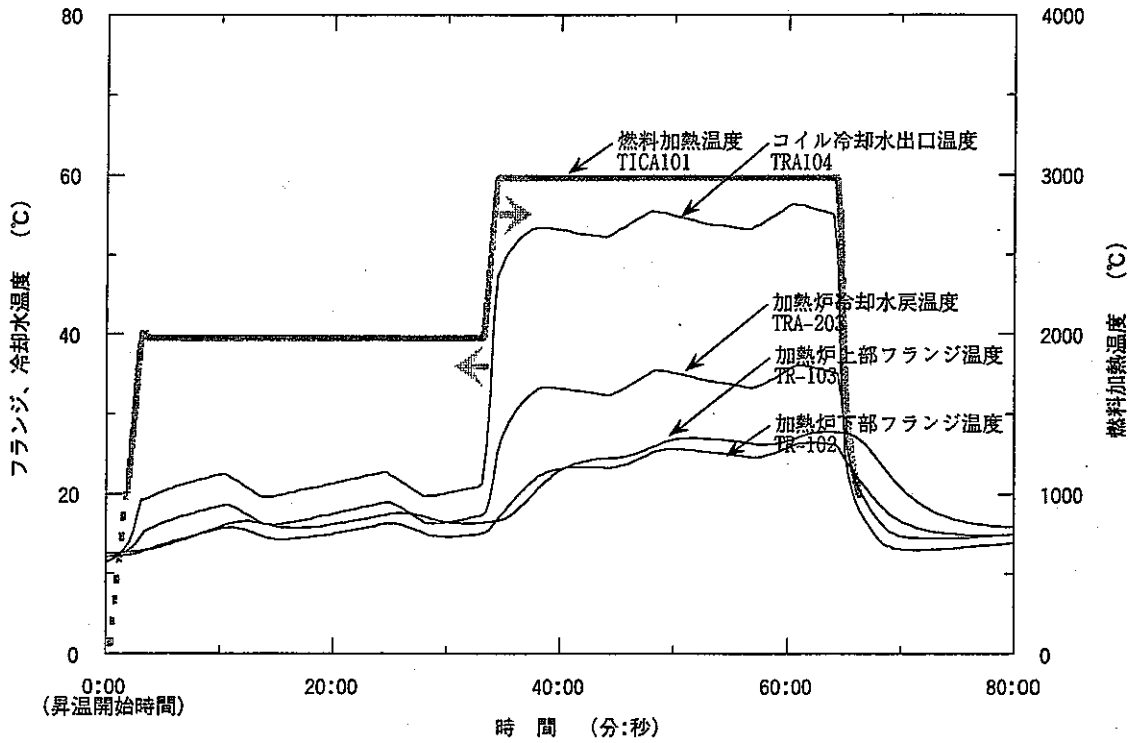


FP-1

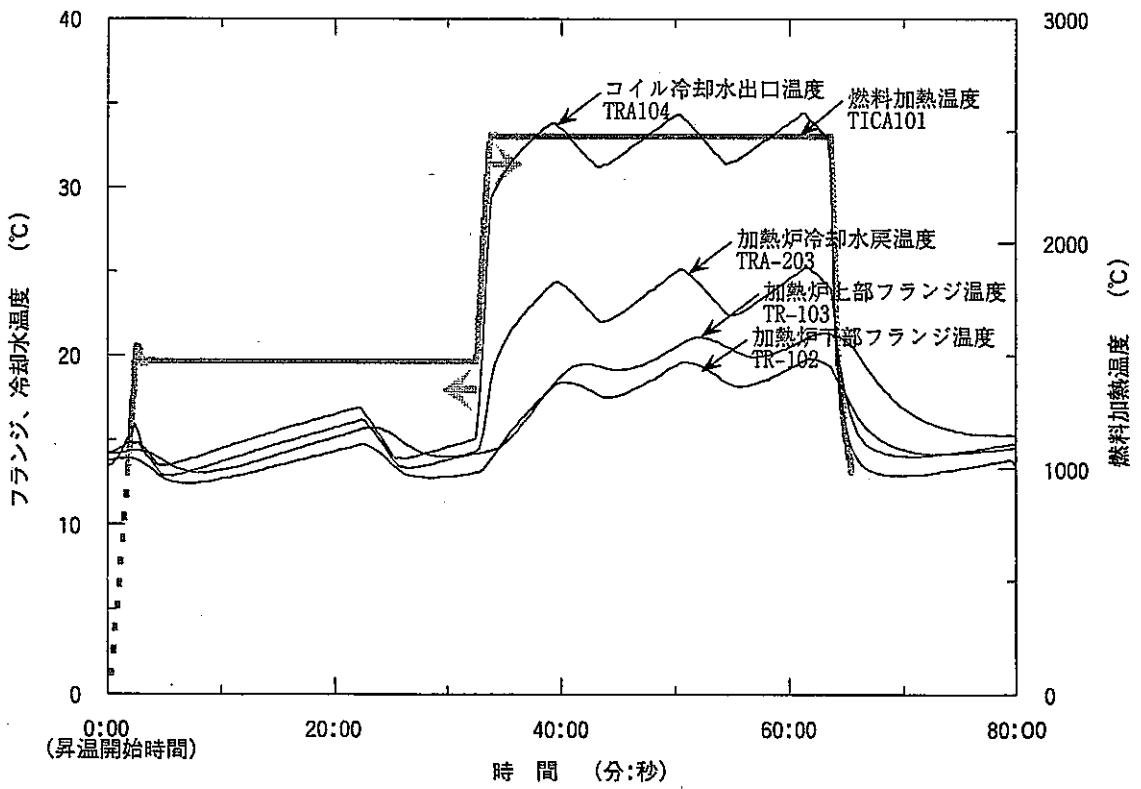


FP-2

図5.10 加熱試験中における加熱炉フランジ温度の変化



FP-1



FP-2

図5.11 加熱炉フランジ温度と冷却水温度の関係

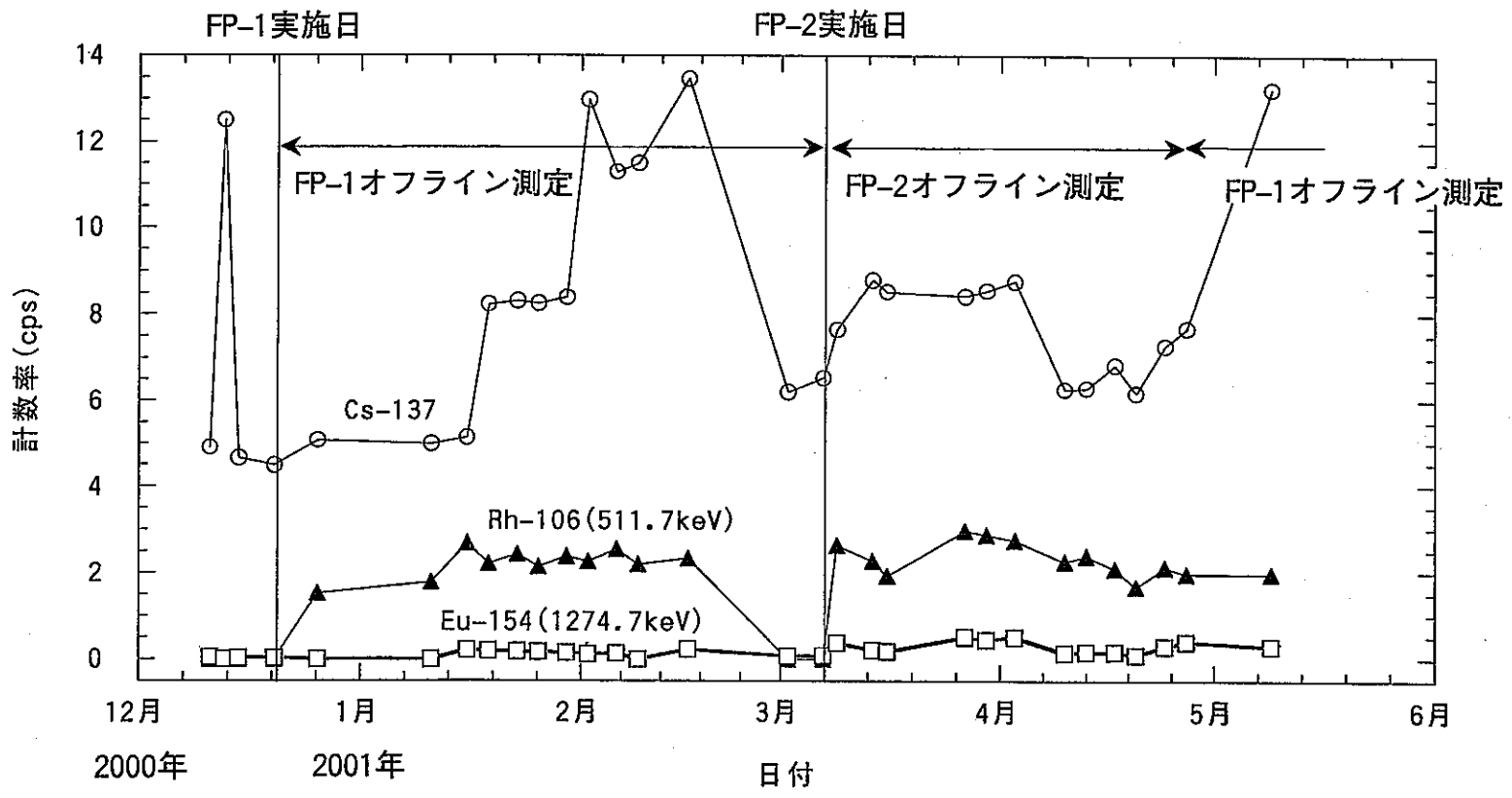


図5.12  $\gamma$ 線測定装置で得られるバックグラウンドの時間変化

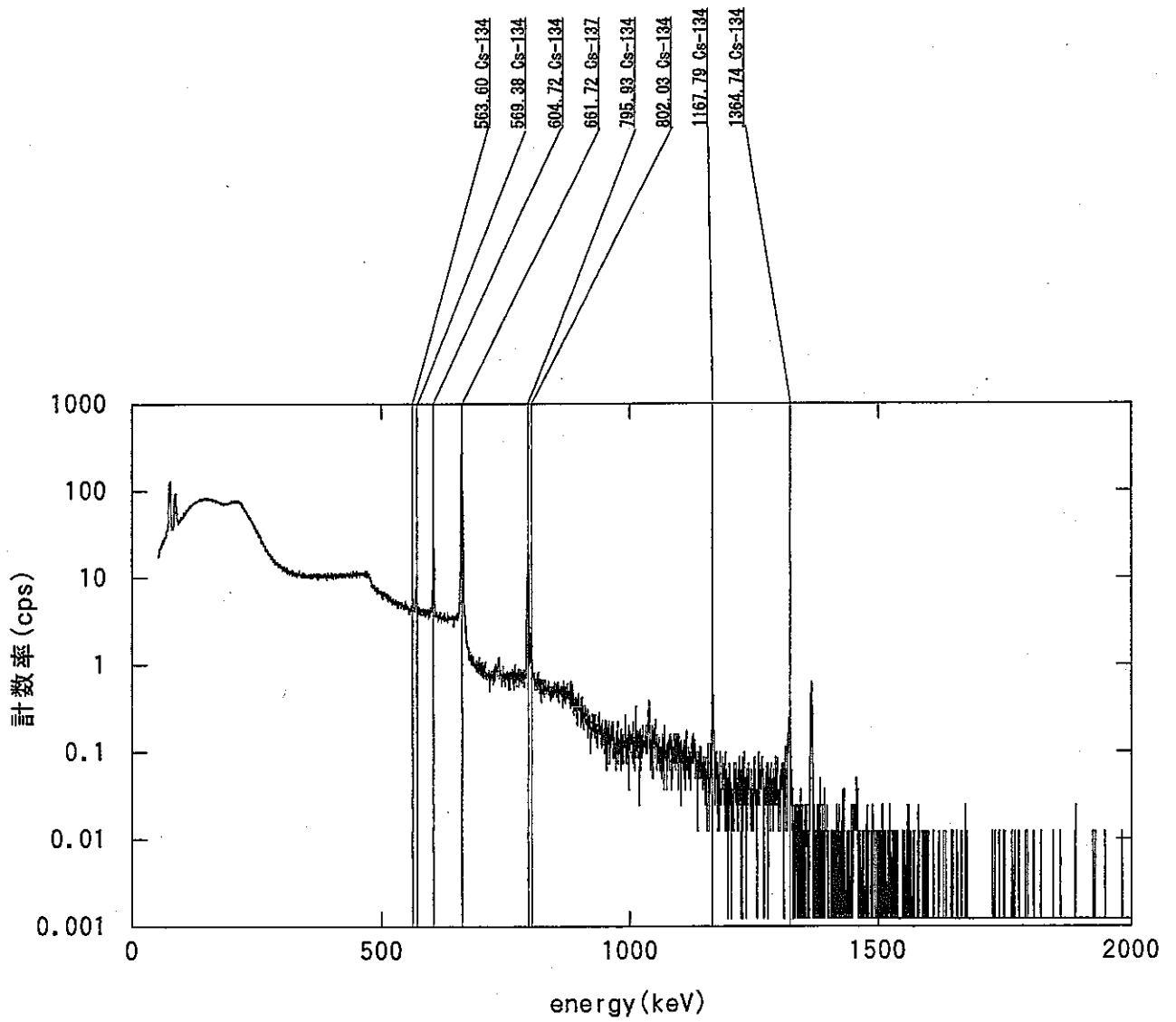


図5.13 FP-1オンライン測定の $\gamma$ 線スペクトルの例(31回目の測定)



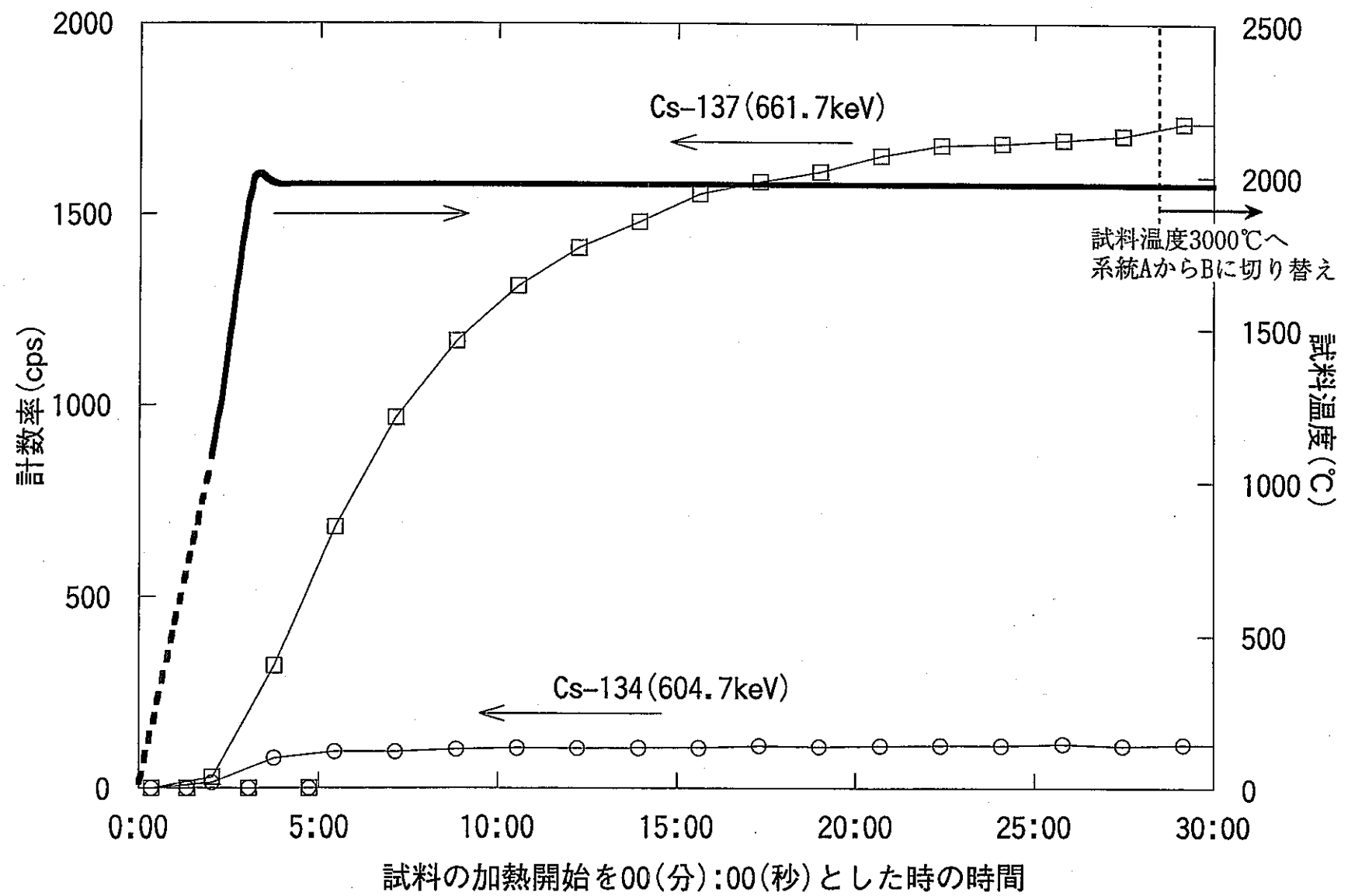


図5.14 A系統に取り付けられた焼結金属フィルタケーシングにおけるCsの計数率時間変化(FP-1)

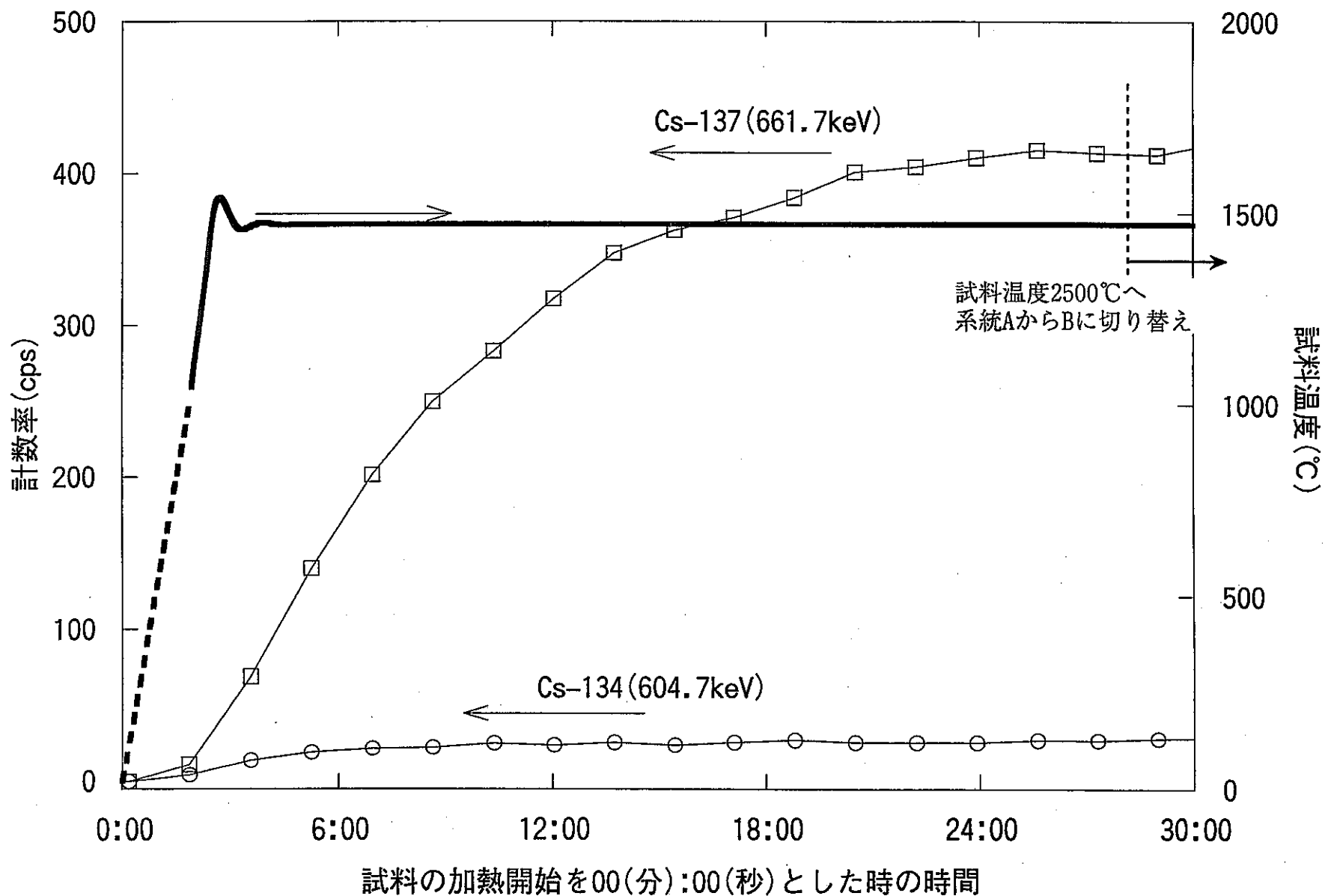


図5.15 A系統に取り付けられた焼結金属フィルタケーシングにおけるCsの計数率時間変化(FP-2)

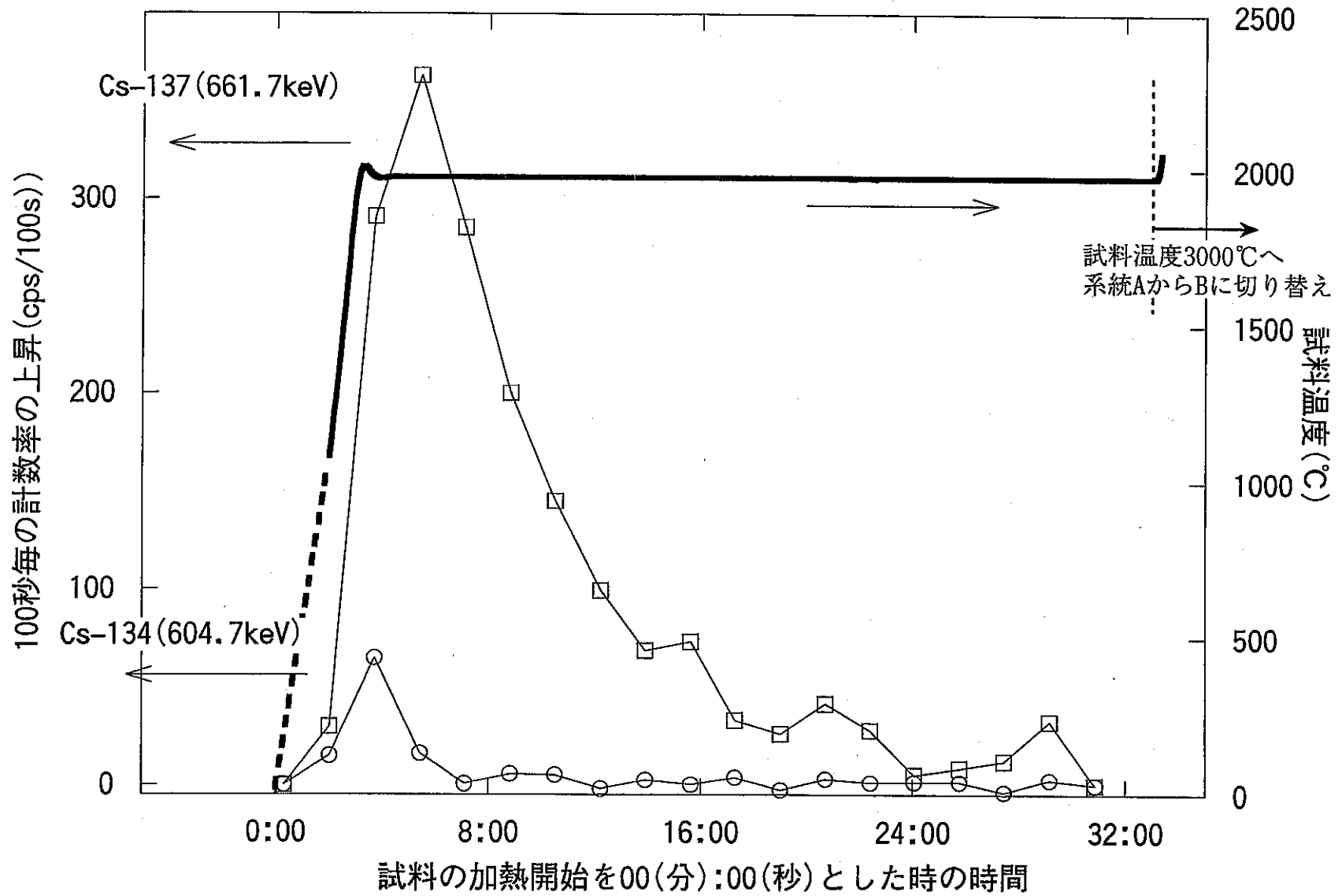


図5.16 A系統に取り付けられた焼結金属フィルタケーシングにおけるCsの計数率増加分の時間変化(FP-1)

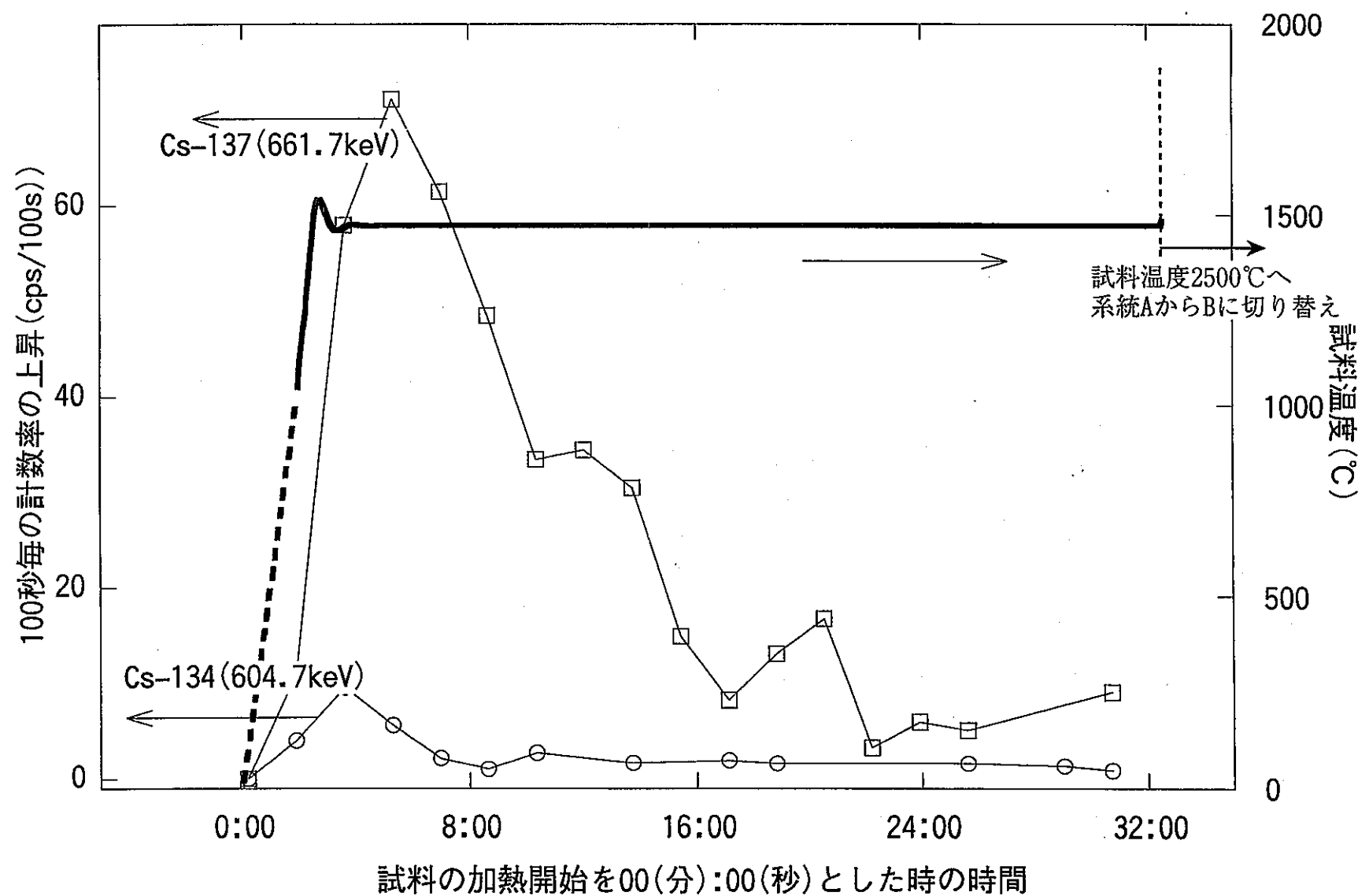
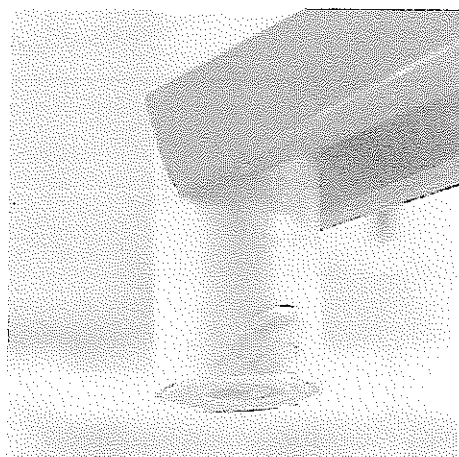
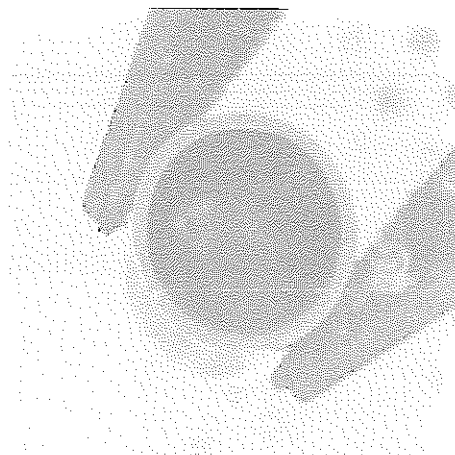


図5.17 A系統に取り付けられた焼結金属フィルタケーシングにおけるCsの計数率増加分の時間変化(FP-2)



外観



内部

図5.18 試験後のタングステンるつぼ (FP-1)

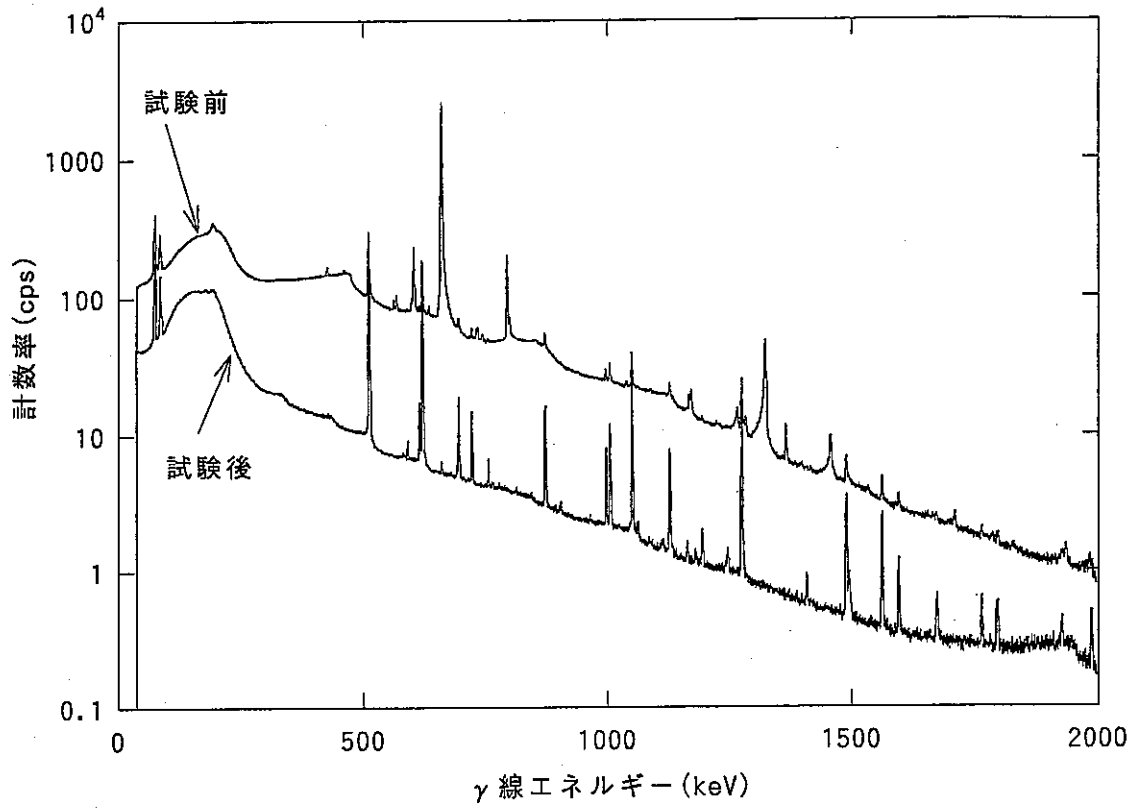


図5.19 FP-1の試験体におけるγ線スペクトル

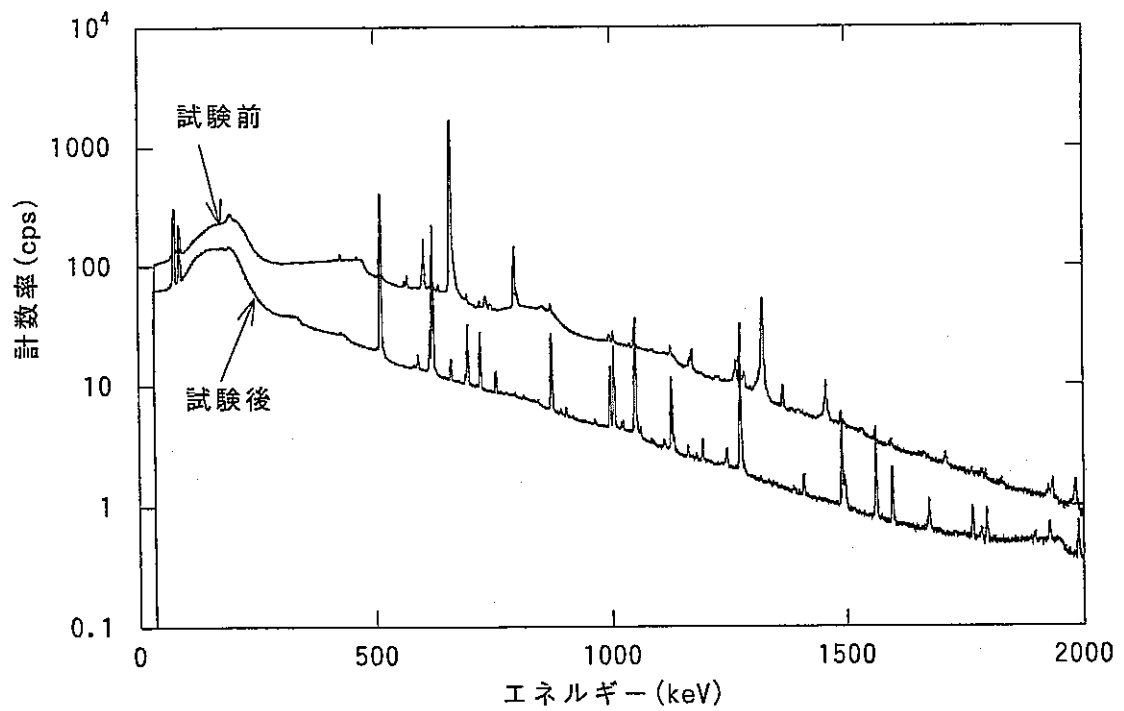


図5.20 FP-2の試験体におけるγ線スペクトル

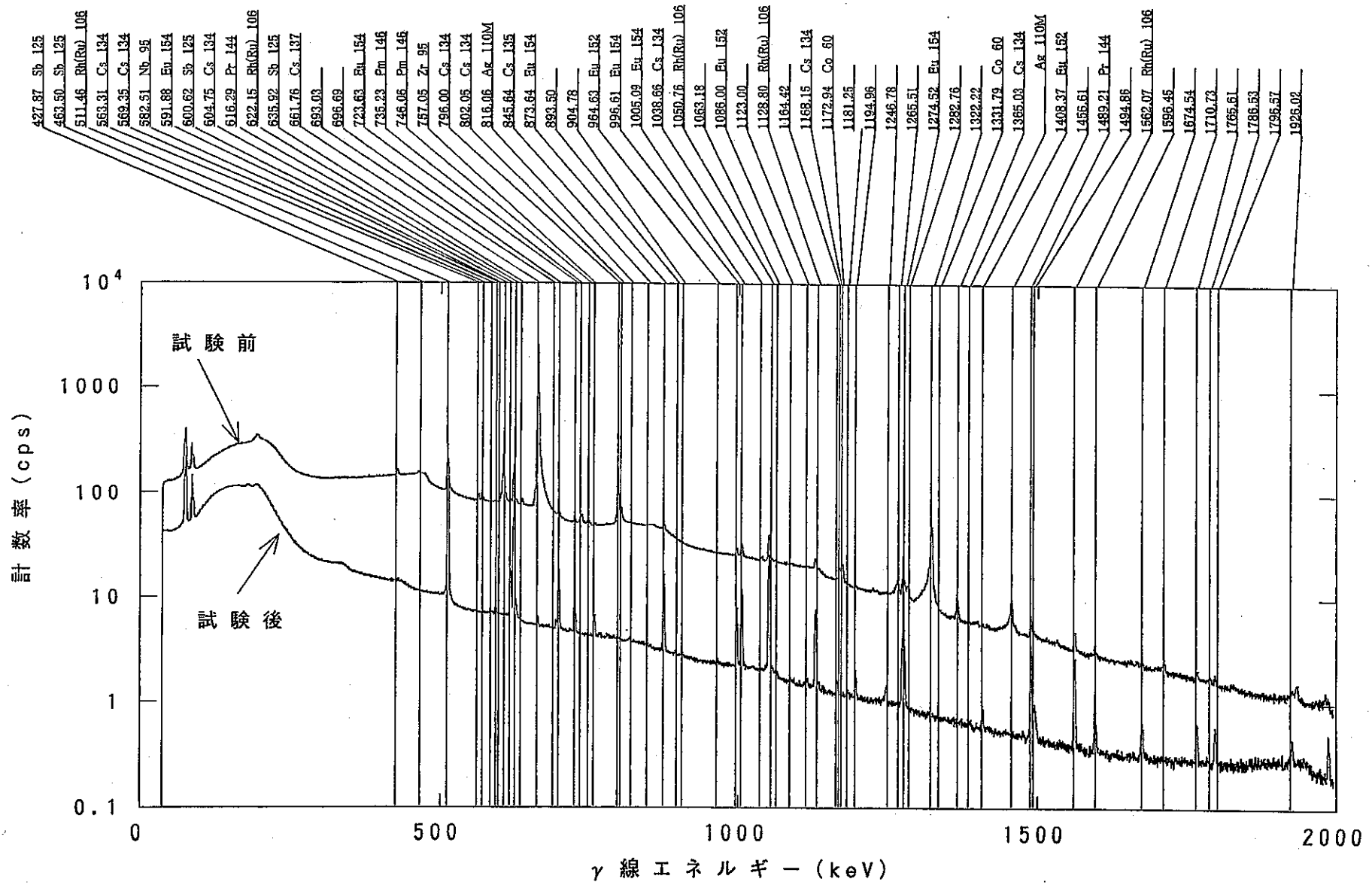


図5.21 FP-1の試験体におけるγ線スペクトルピークサーチ結果

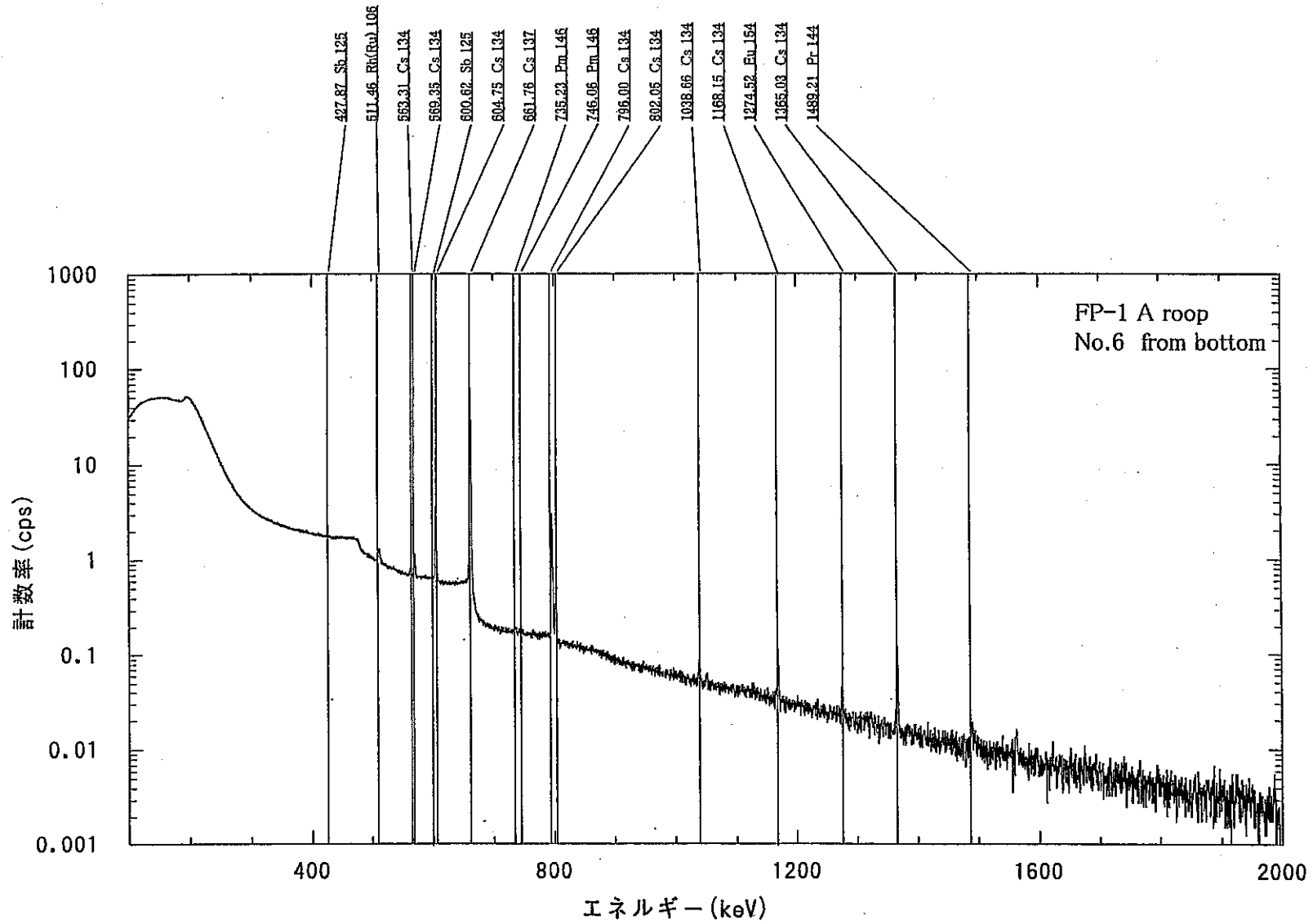


図5.22 FP-1のA系統サンプリング管における $\gamma$ 線スペクトルピークサーチ結果の例



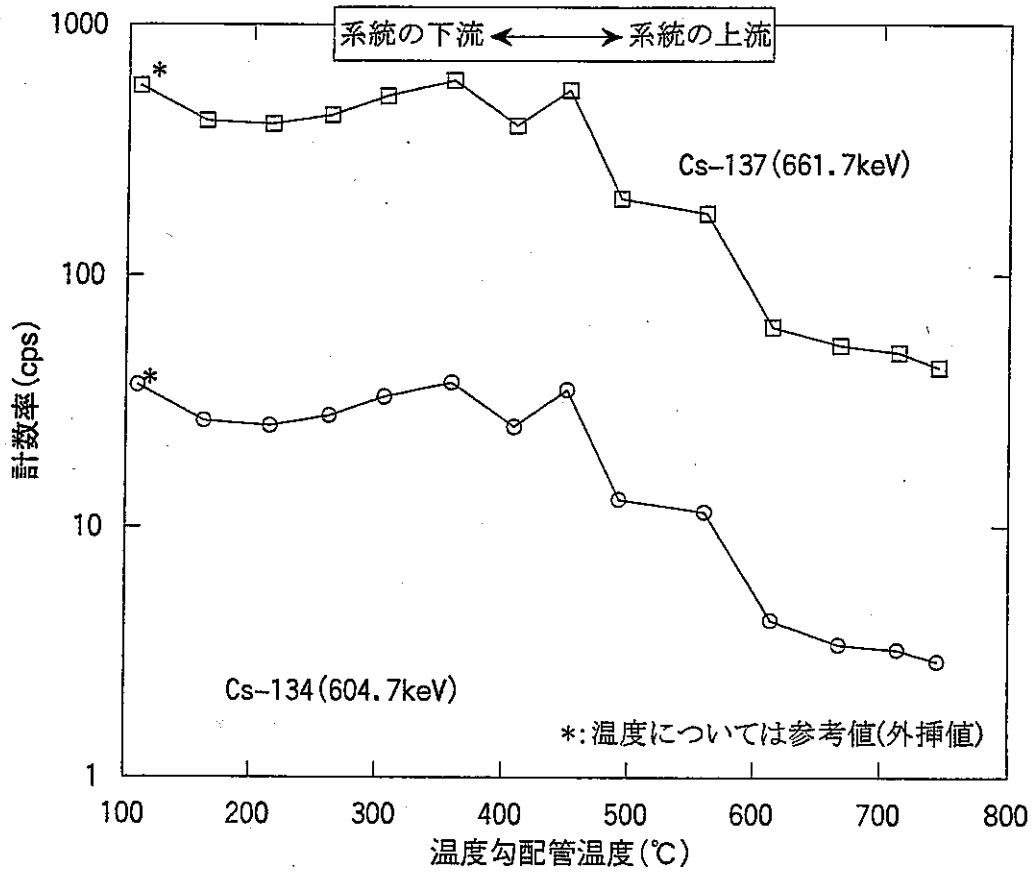


図5.23(1) FP-1のA系統(2000℃保持)におけるサンプリング管に付着したF Pの計数率

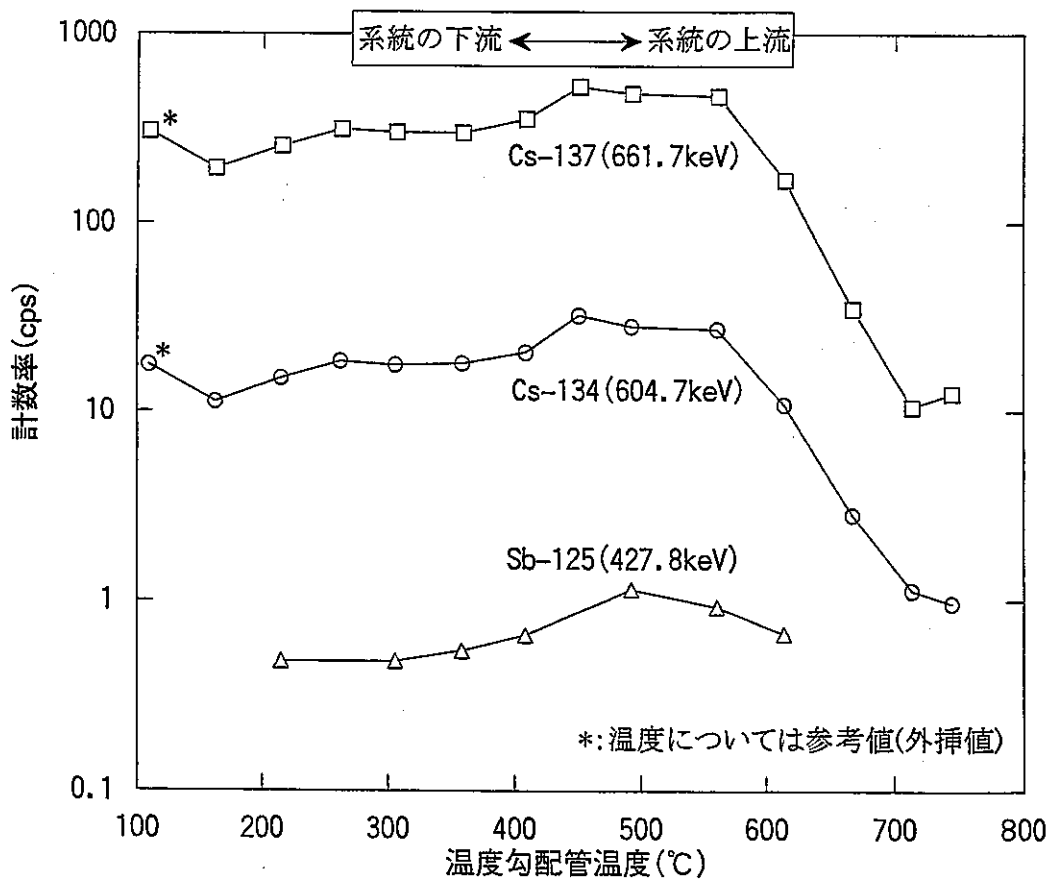


図5.23(2) FP-1のB系統(3000℃保持)におけるサンプリング管に付着したF Pの計数率

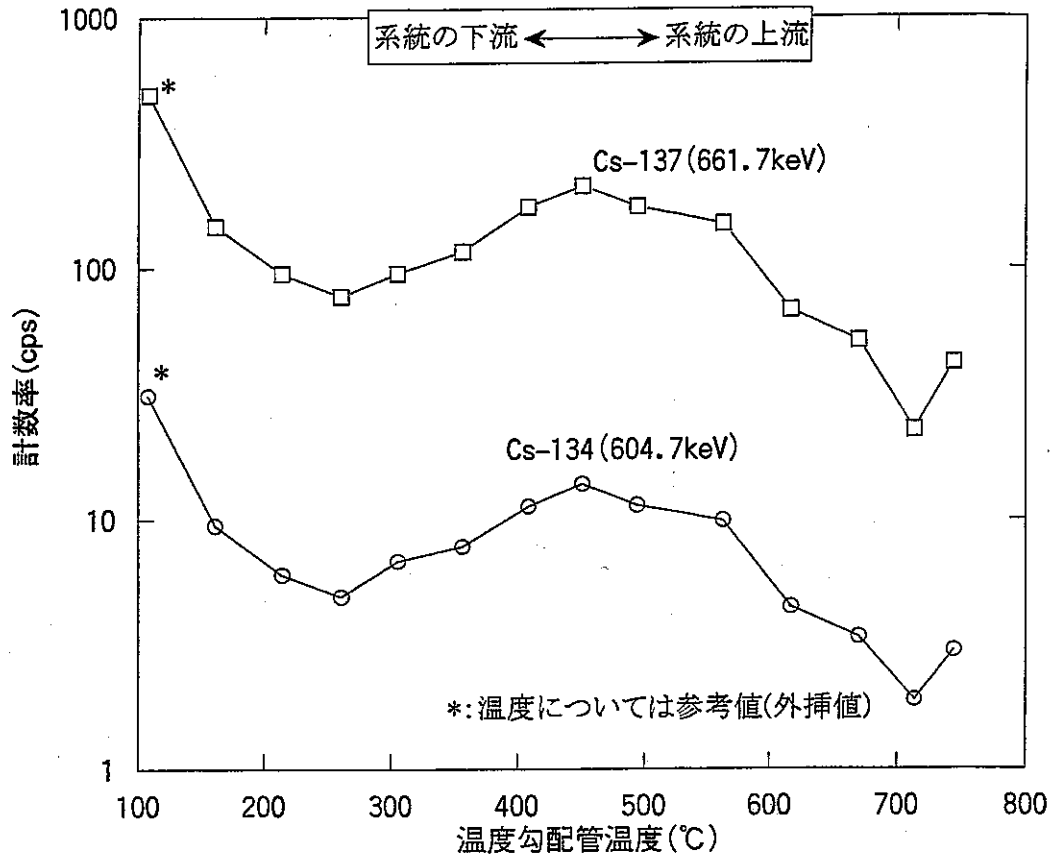


図5.23(3) FP-2のA系統(1500°C保持)におけるサンプリング管に付着したF P の計数率

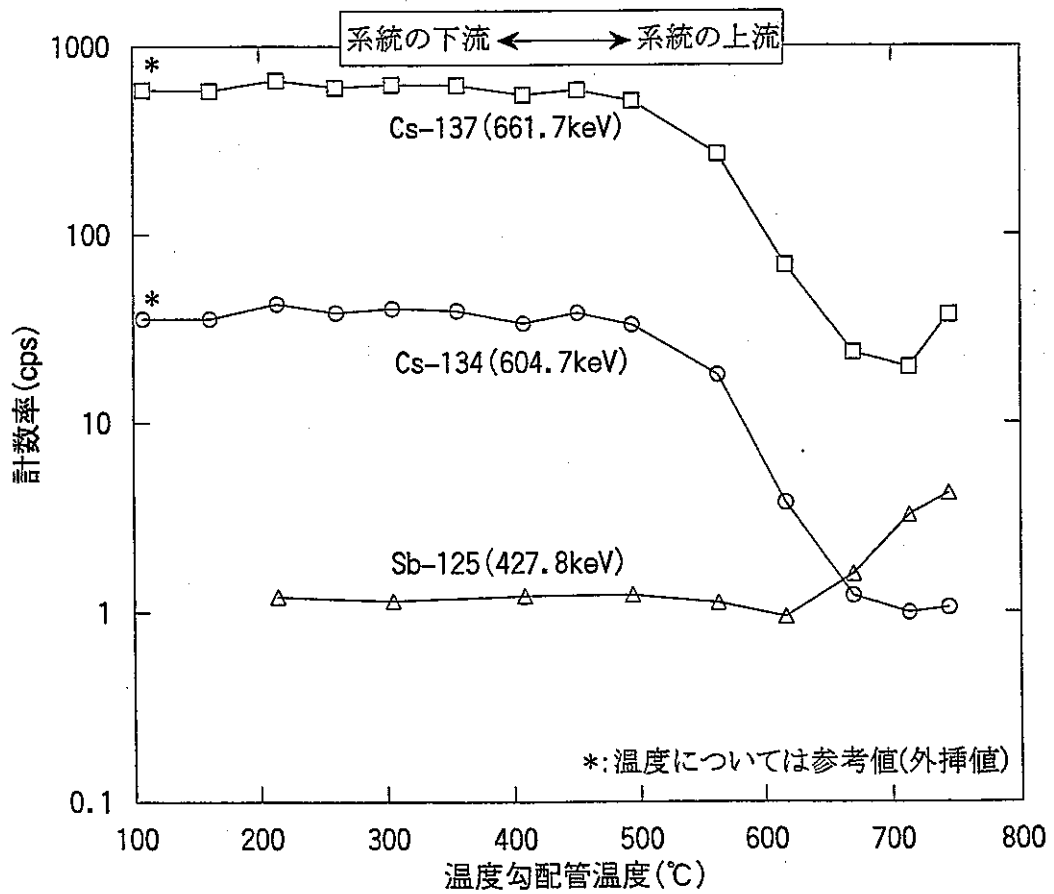


図5.23(4) FP-2のB系統(2500°C保持)におけるサンプリング管に付着したF P の計数率

焼結金属フィルタケーシング

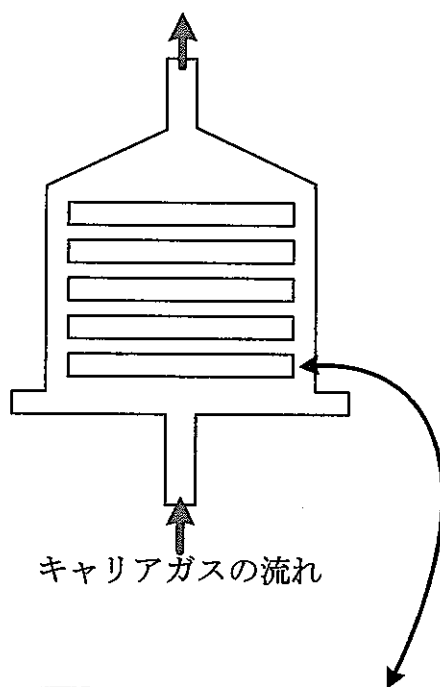


図5.24(1) FP-1のA系統における焼結金属フィルタの様相

焼結金属フィルタケーシング

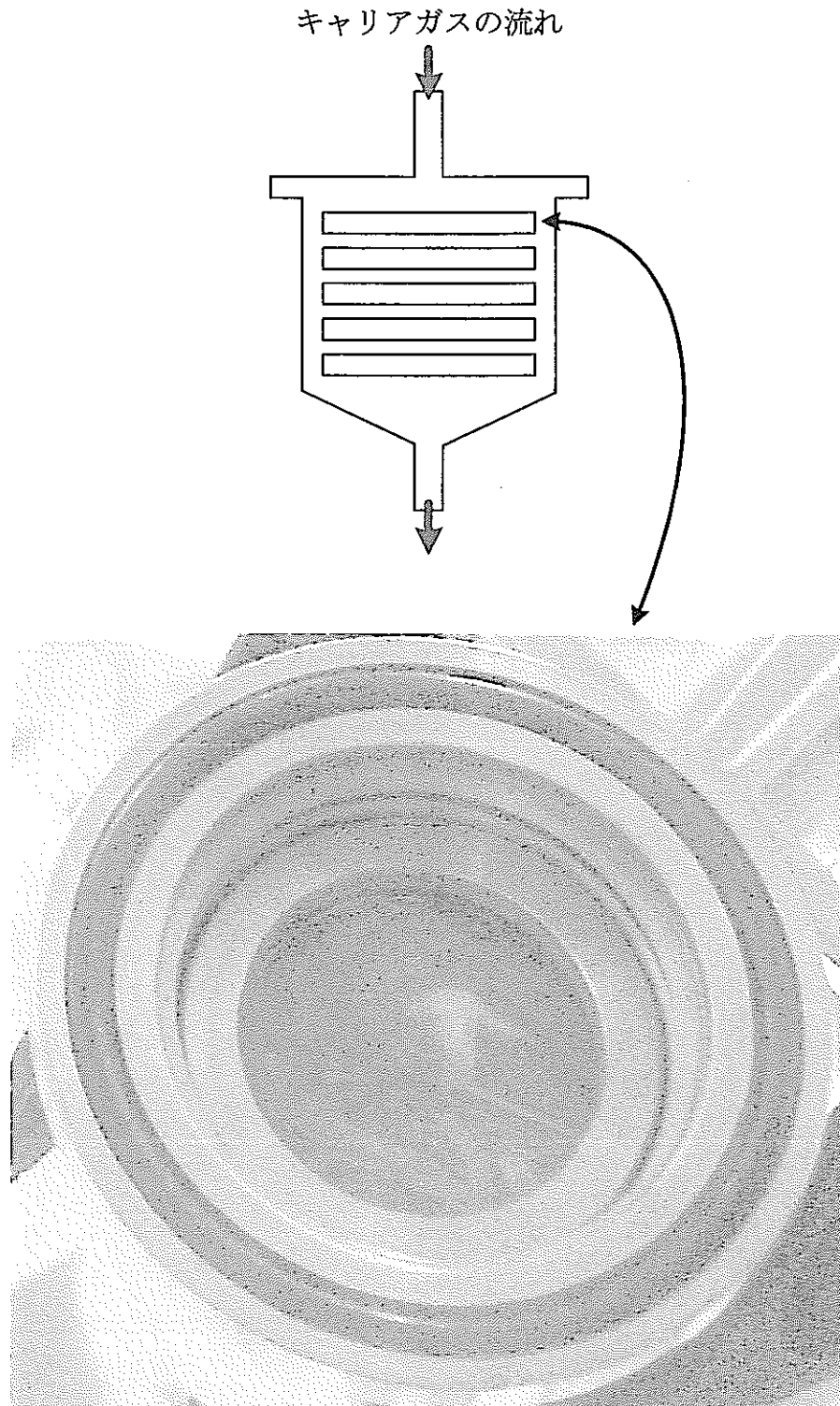


図5.24(2) FP-1のB系統における焼結金属フィルタの様相

焼結金属フィルタケーシング

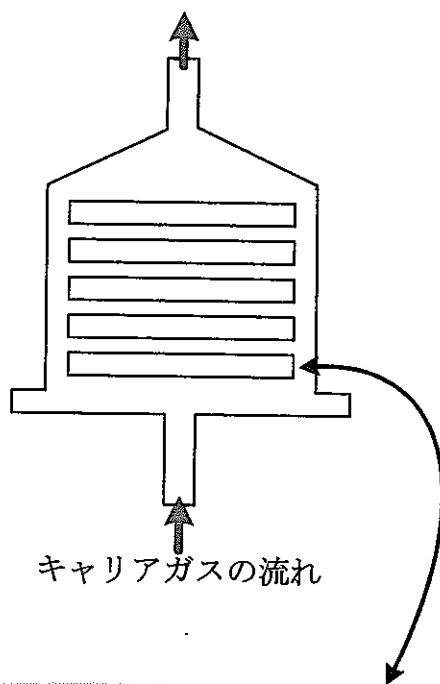


図5.24(3) FP-2のA系統における焼結金属フィルタの様相

焼結金属フィルタケーシング

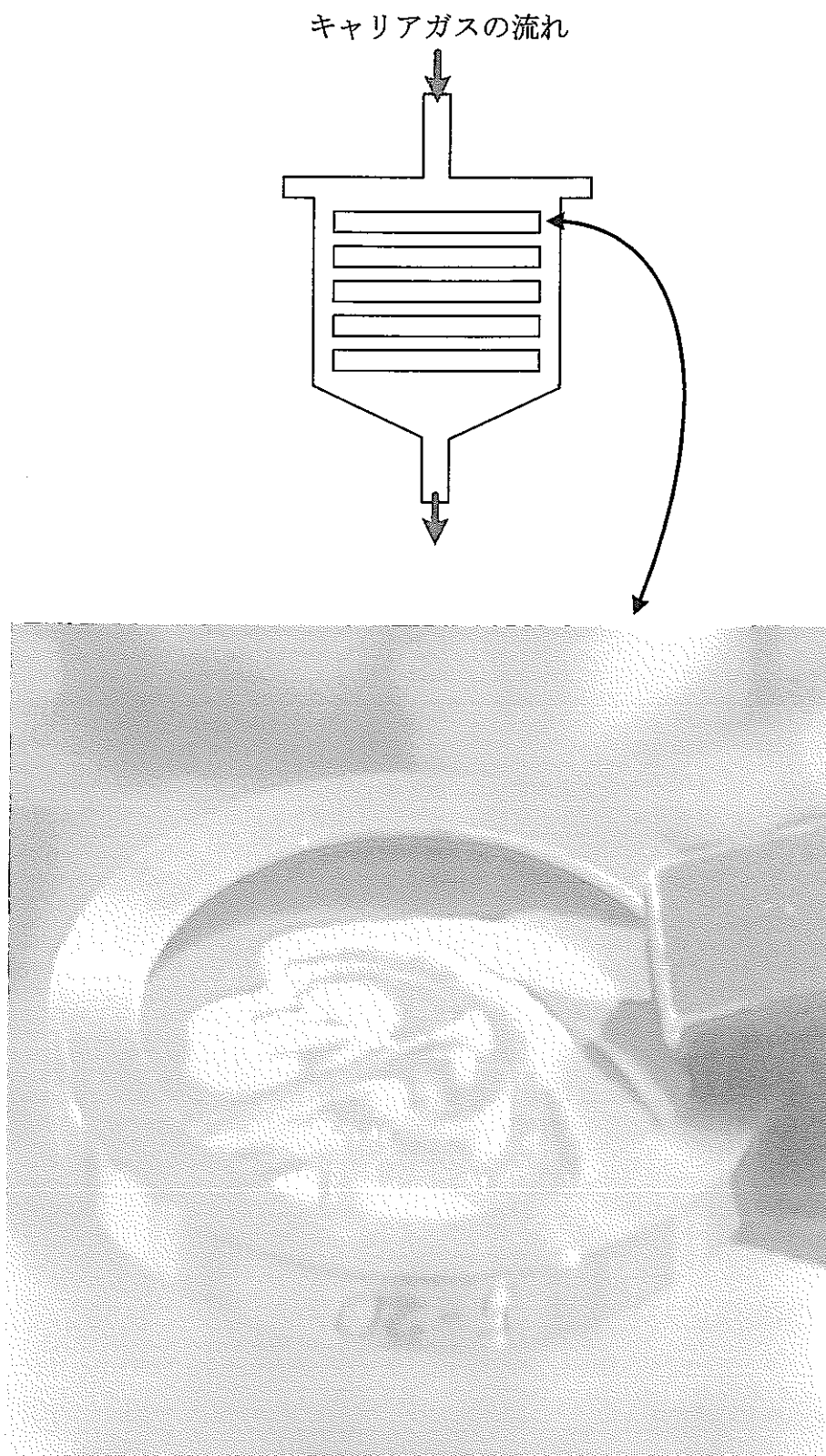


図5.24(4) FP-2のB系統における焼結金属フィルタの様相

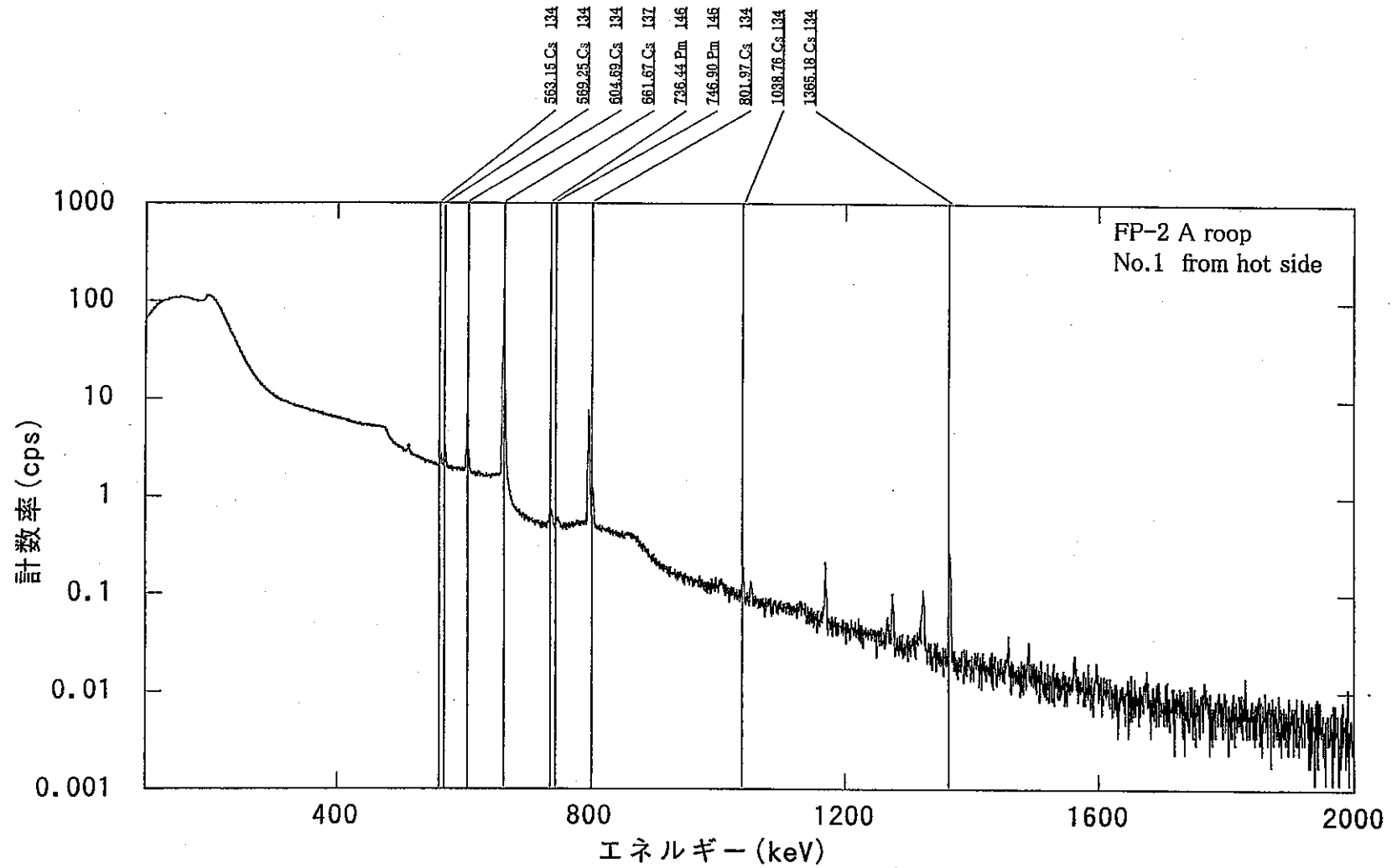


図5.25(1) FP-2のA系統(1500℃保持)焼結金属フィルタにおける $\gamma$ 線スペクトルピークサーチ結果の例

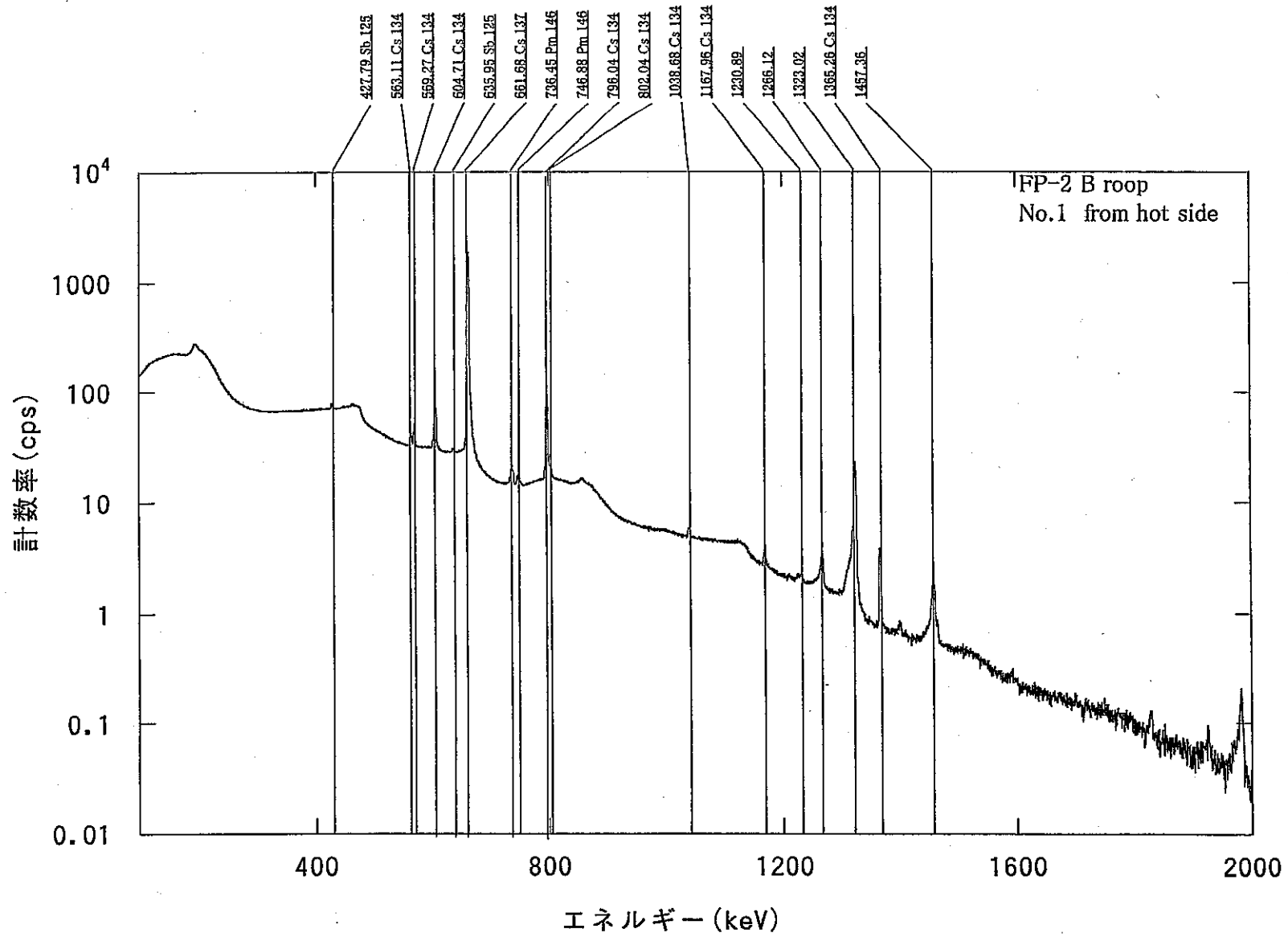


図5.25(2) FP-2のB系統(2500℃保持)焼結金属フィルタにおけるγ線スペクトルピークサーチ結果の例



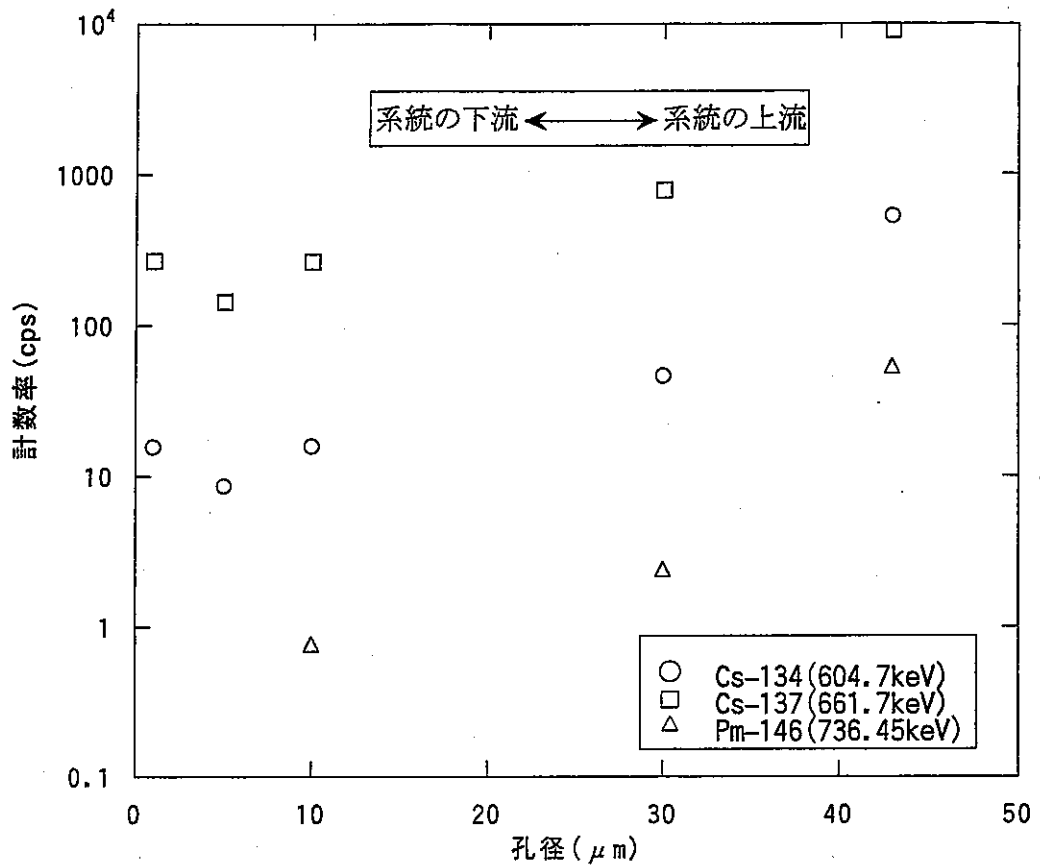


図5.26(1) FP-1のA系統(2000℃保持)における焼結金属フィルタに付着したFPの計数率

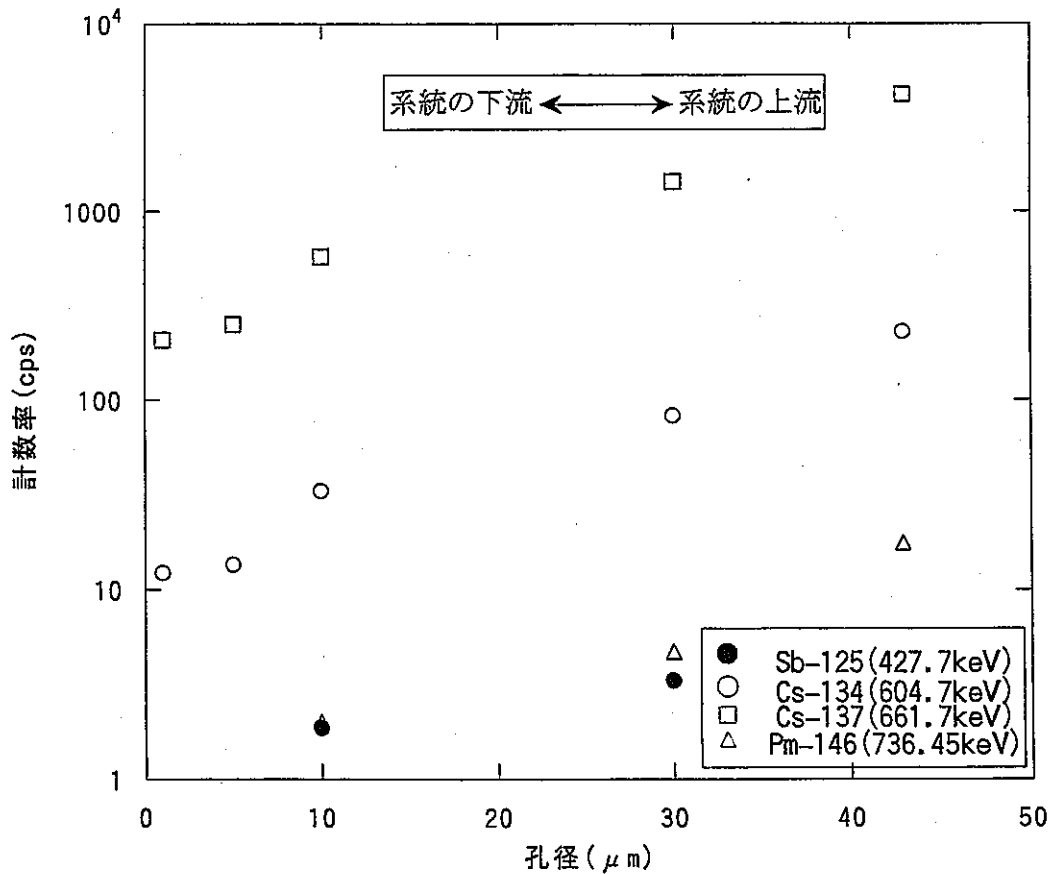


図5.26(2) FP-1のB系統(3000℃保持)における焼結金属フィルタに付着したFPの計数率

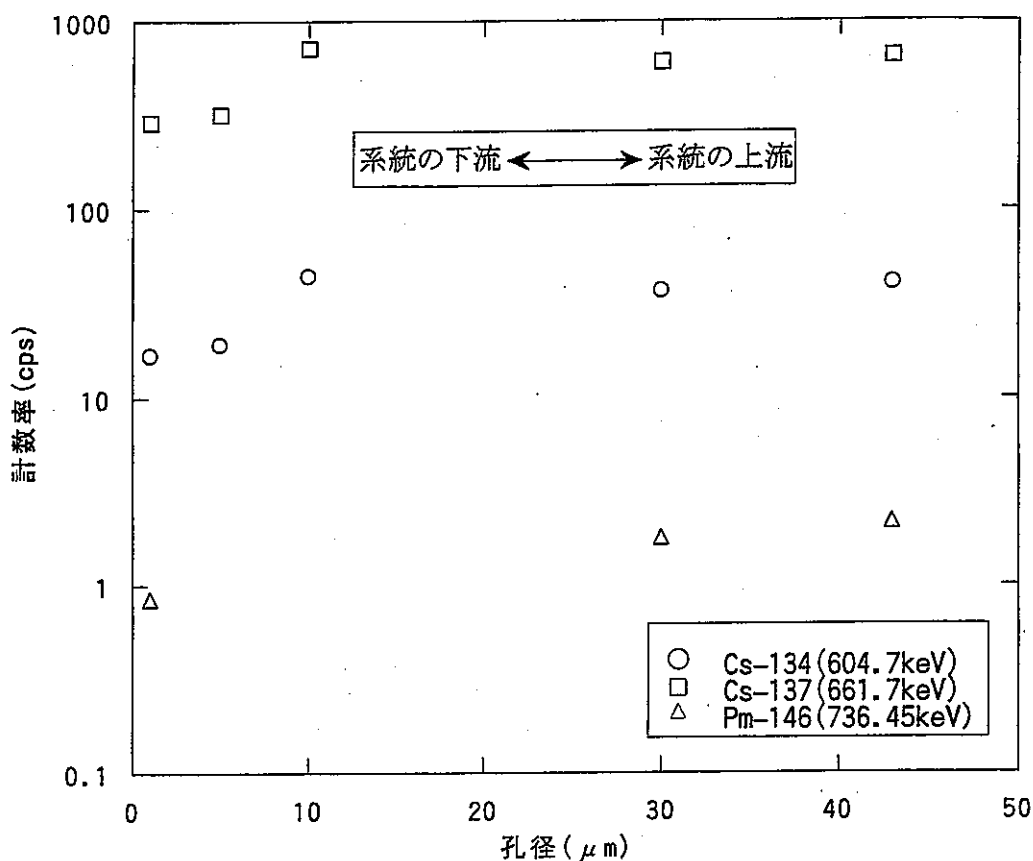


図5.26(3) FP-2のA系統(1500°C保持)における焼結金属フィルタに付着したFPの計数率

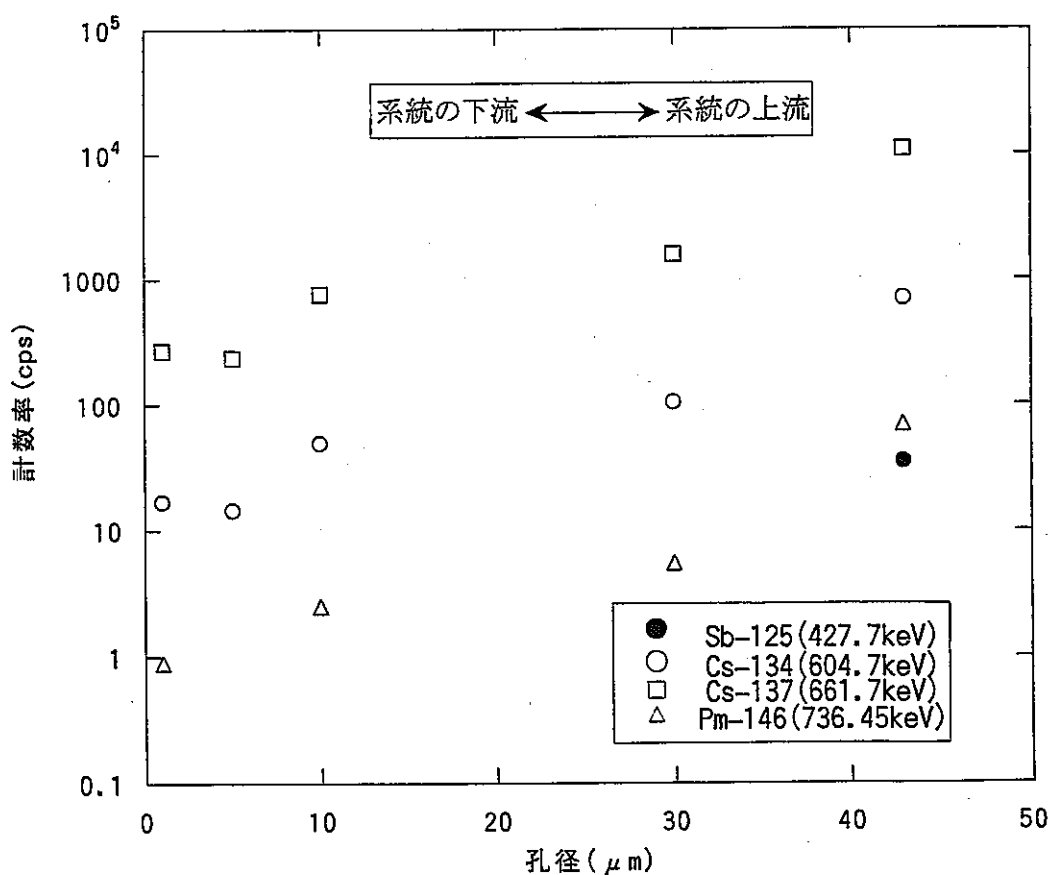


図5.26(4) FP-2のB系統(2500°C保持)における焼結金属フィルタに付着したFPの計数率

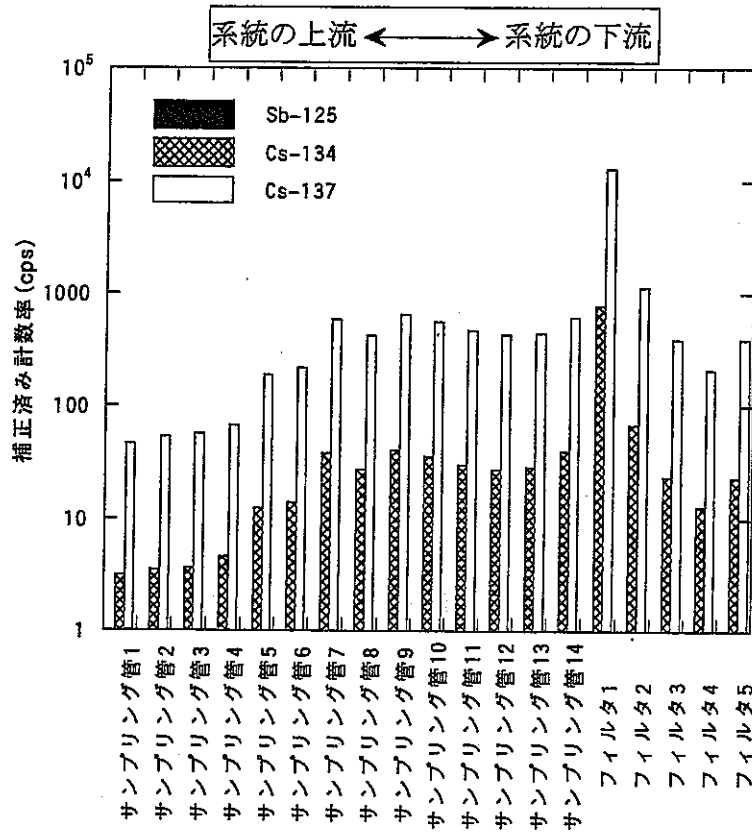


図5.27(1) FP-1のA系統(2000℃保持)における  
放出核種のサンプリング管及びフィルタでのマスバランス

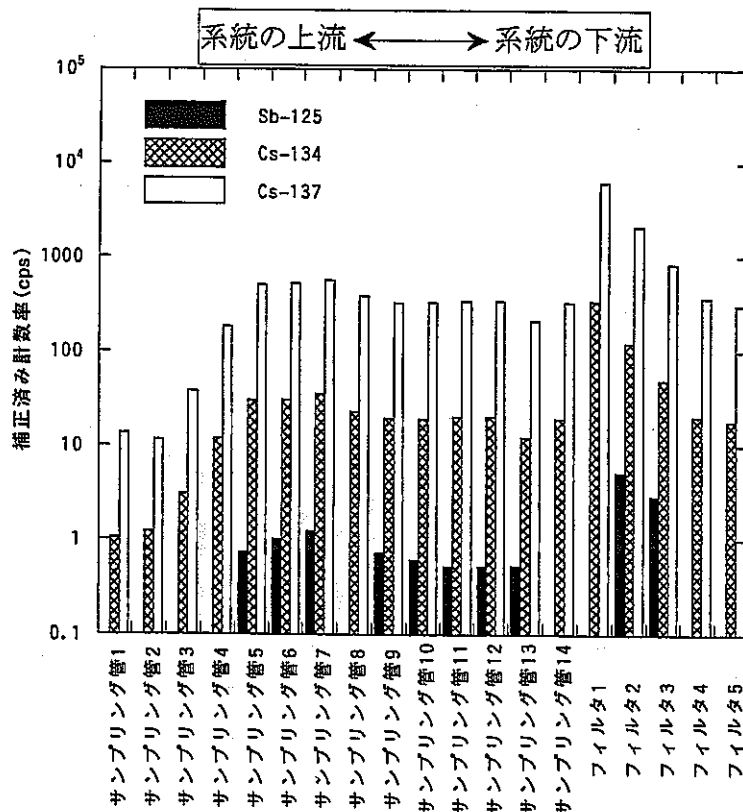


図5.27(2) FP-1のB系統(3000℃保持)における  
放出核種のサンプリング管及びフィルタでのマスバランス

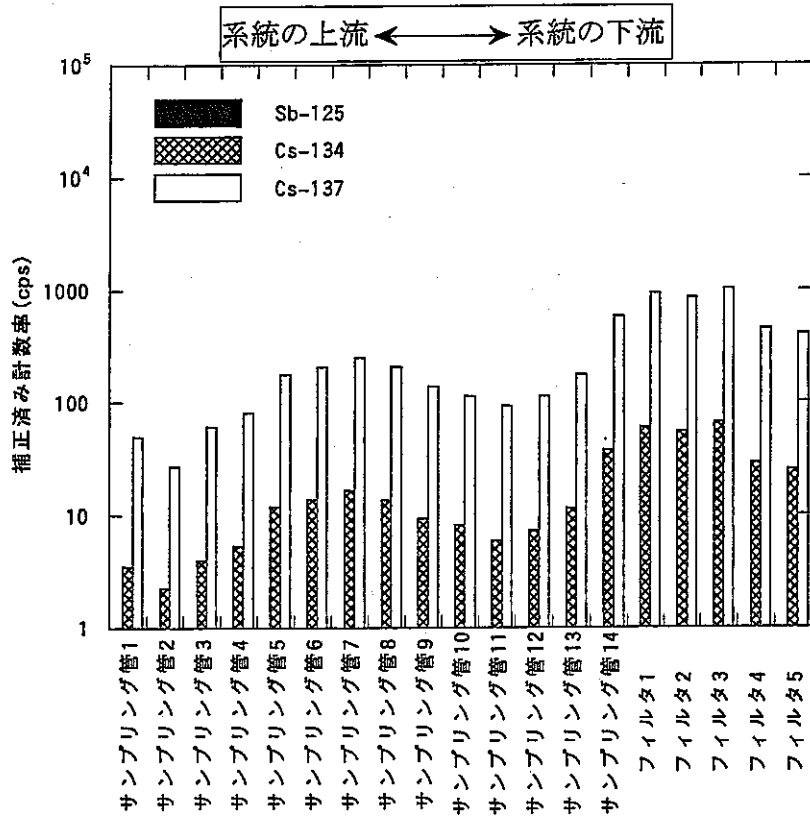


図5.27(3) FP-2のA系統(1500℃保持)における  
放出核種のサンプリング管及びフィルタでのマスバランス

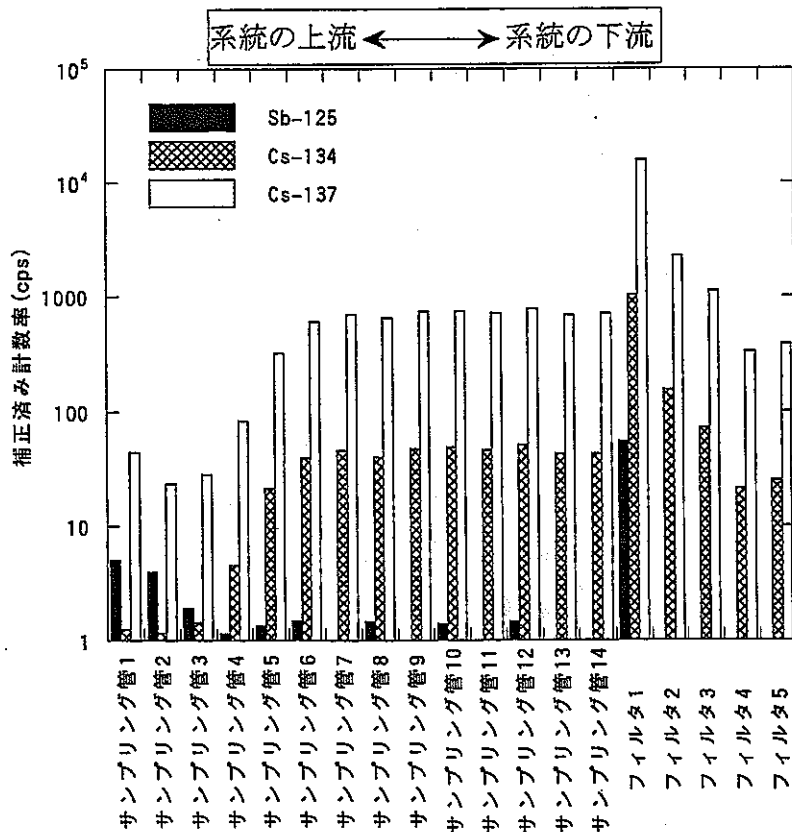


図5.27(4) FP-2のB系統(2500℃保持)における  
放出核種のサンプリング管及びフィルタでのマスバランス

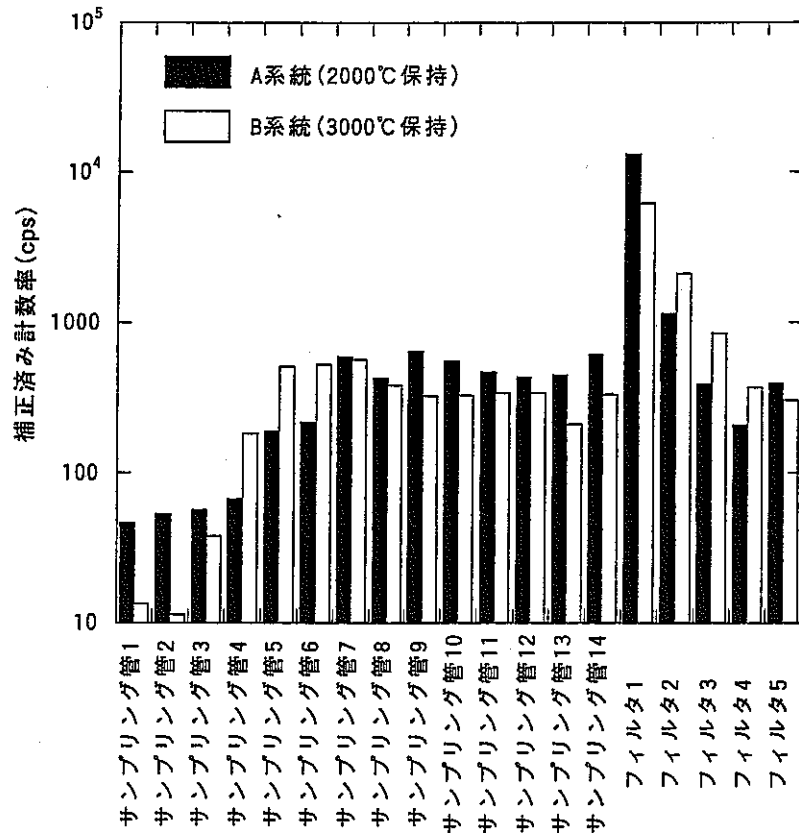


図5.28(1) FP-1におけるCs-137のマスバランス

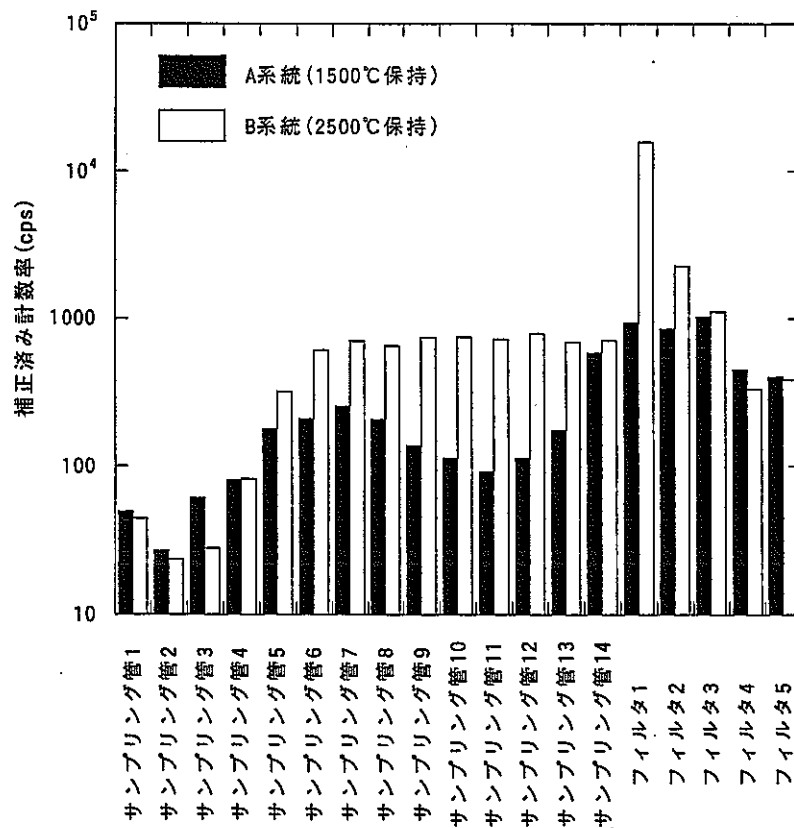


図5.28(2) FP-2におけるCs-137のマスバランス

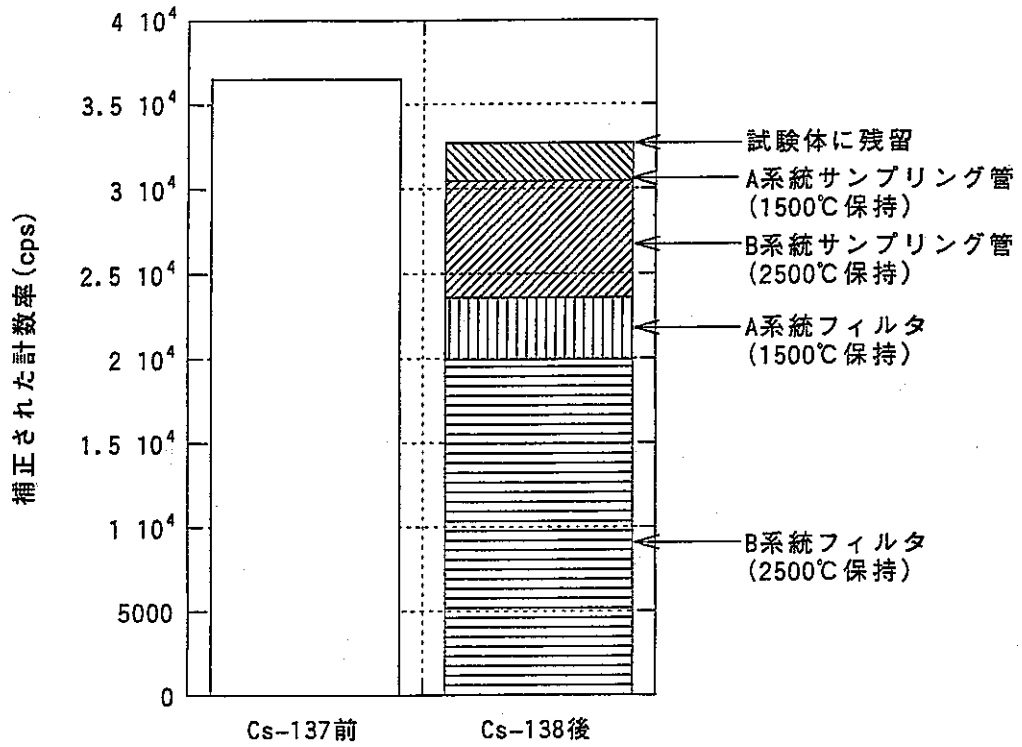


図5.29(1) FP-2におけるCs-137の試験前後のマスバランス

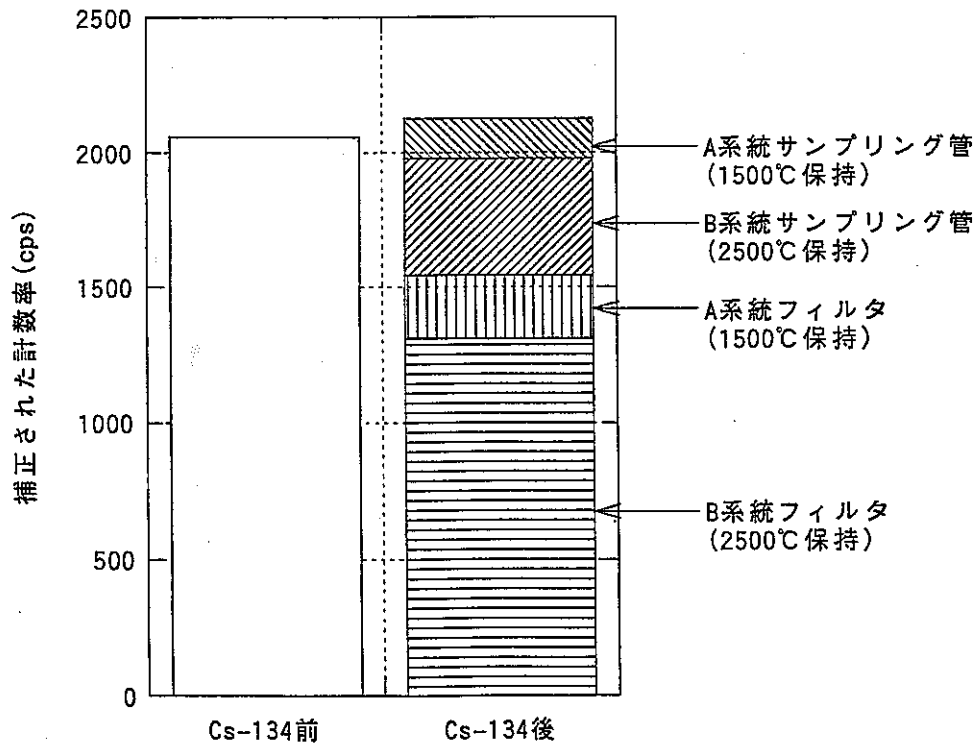


図5.29(2) FP-2におけるCs-134の試験前後のマスバランス

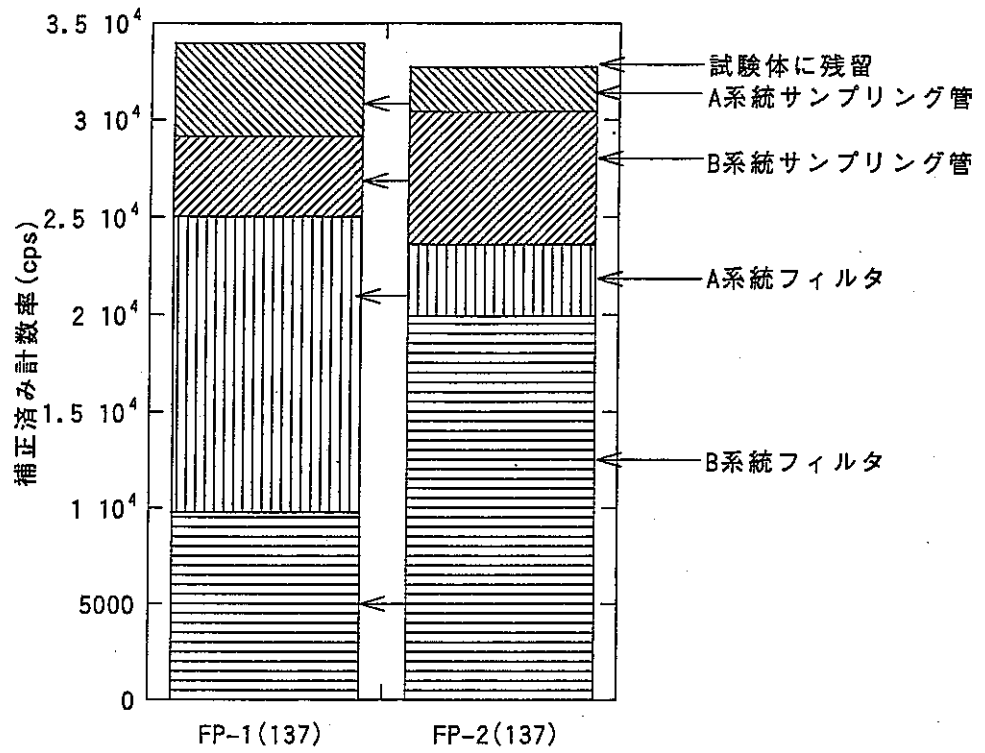


図5.30(1) FP-1、FP-2でのCs-137のマスバランスの比較

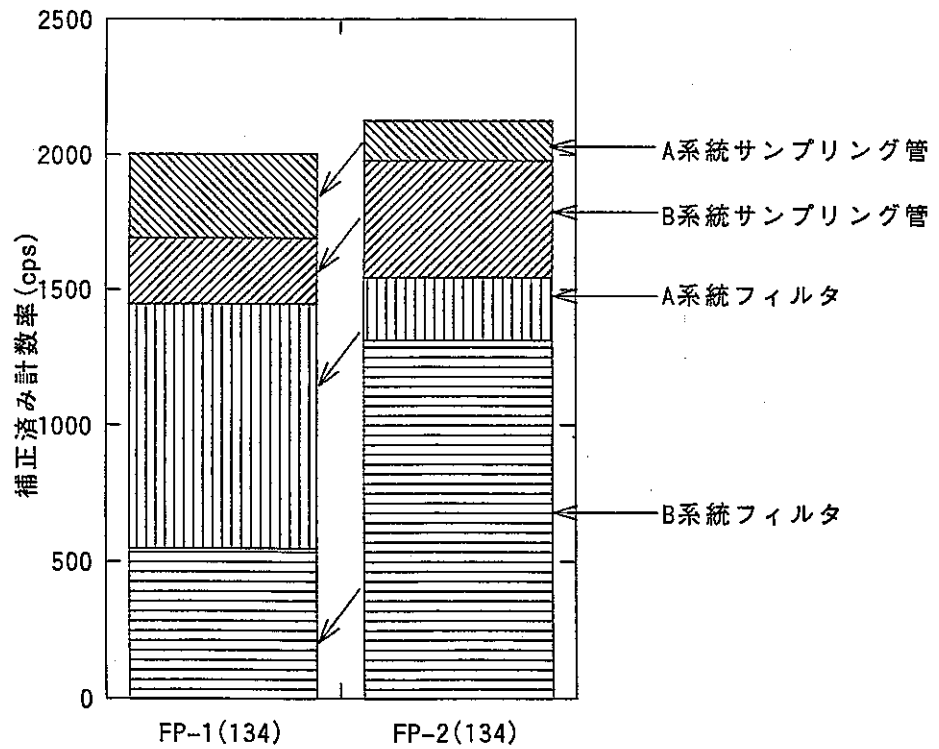
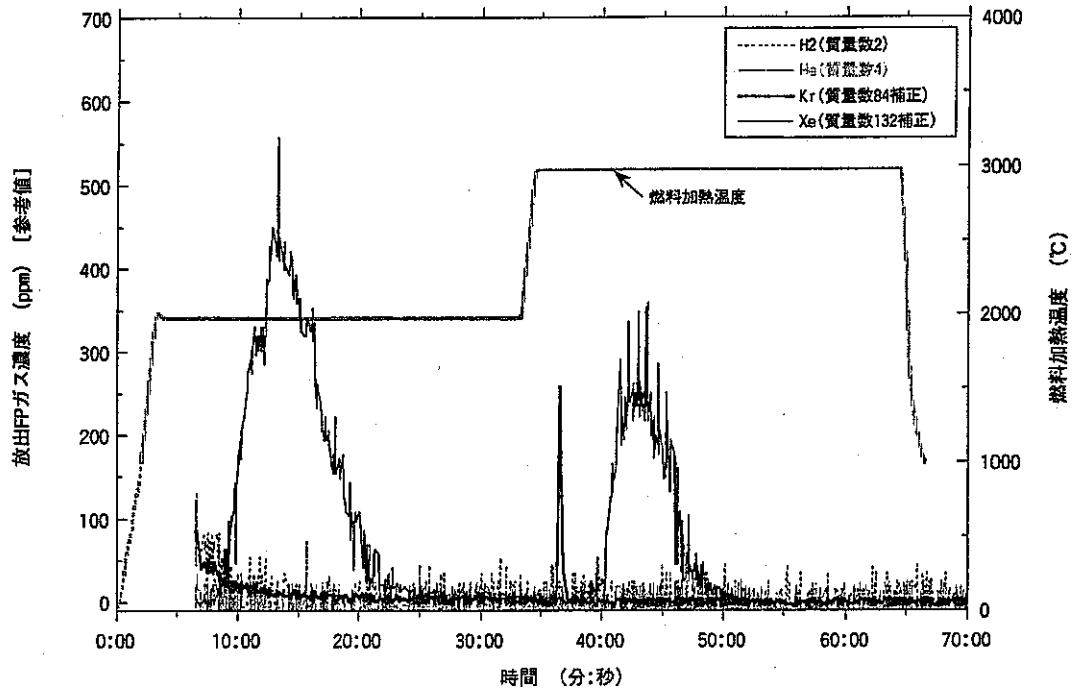
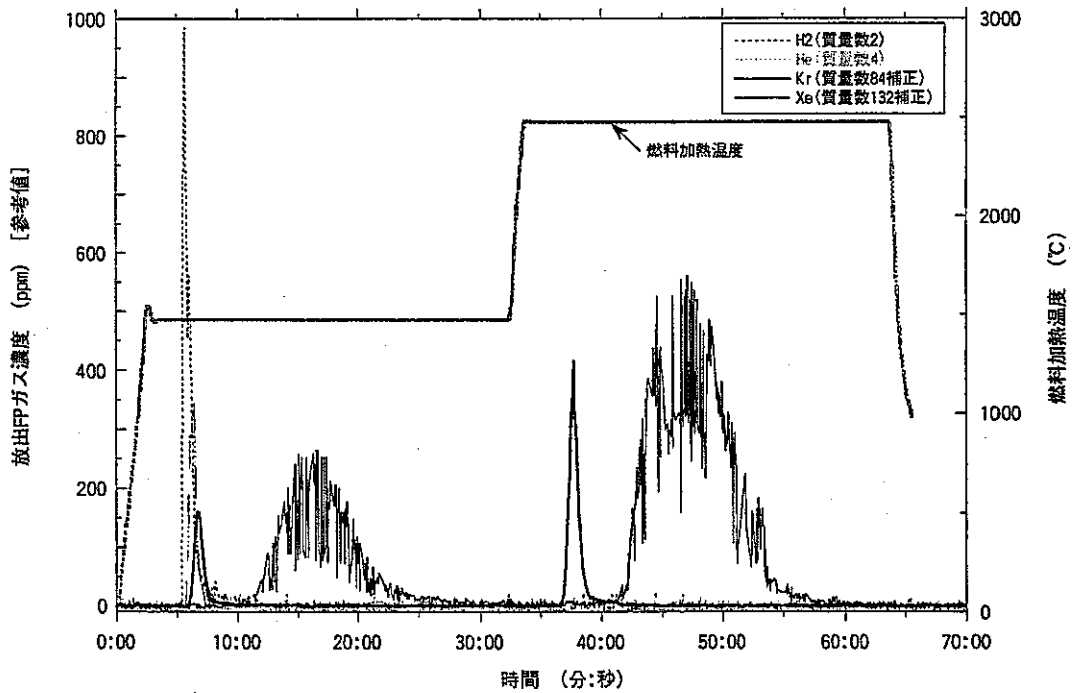


図5.30(2) FP-1、FP-2でのCs-134のマスバランスの比較



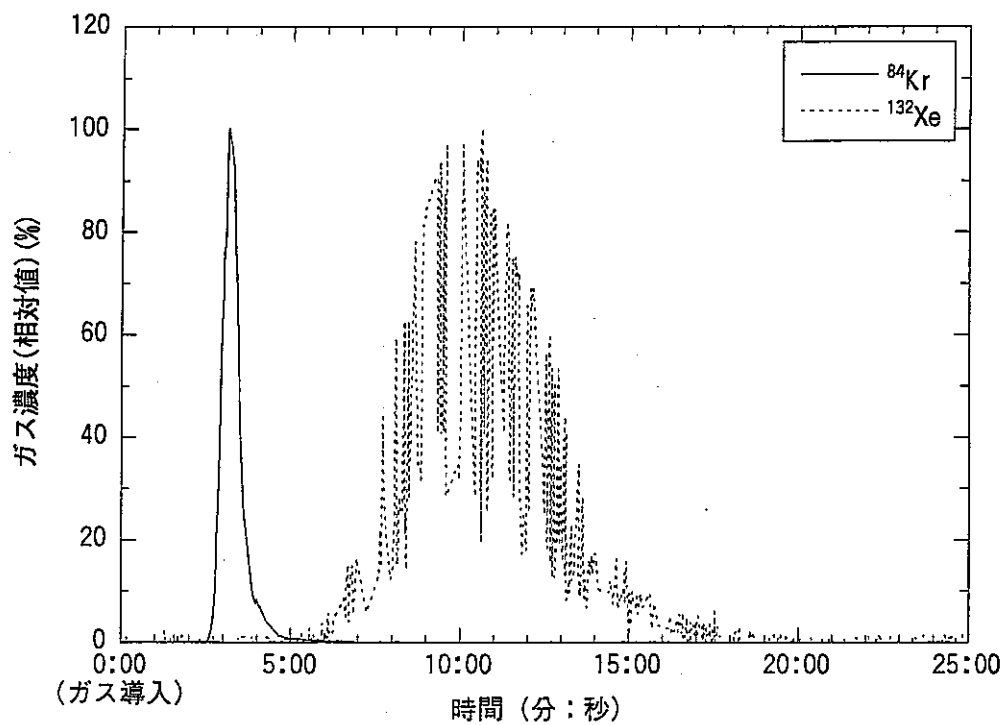
FP-1



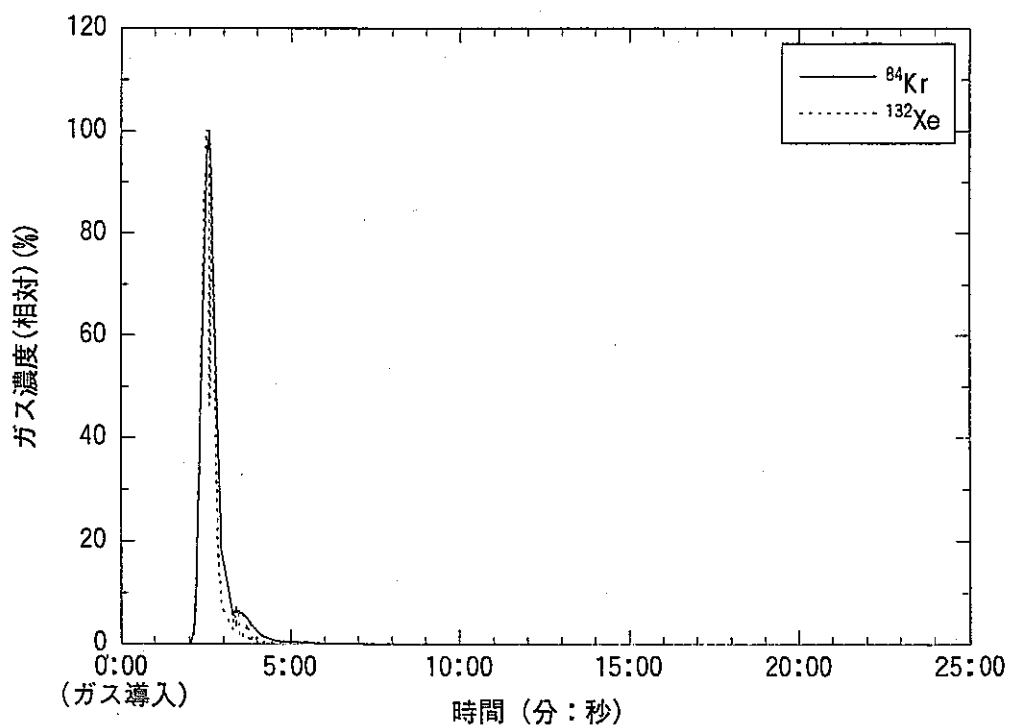
FP-2

図5.31 燃料加熱温度とキャリアガス中の放出FPガス濃度との関係 (ガスマスオンライン分析結果)





ヨウ素フィルタ通過時の標準ガス分析結果



ヨウ素フィルタバイパス時の標準ガス分析結果

図5.32 ヨウ素フィルタ(銀ゼオライト)のFPガス放出履歴への影響

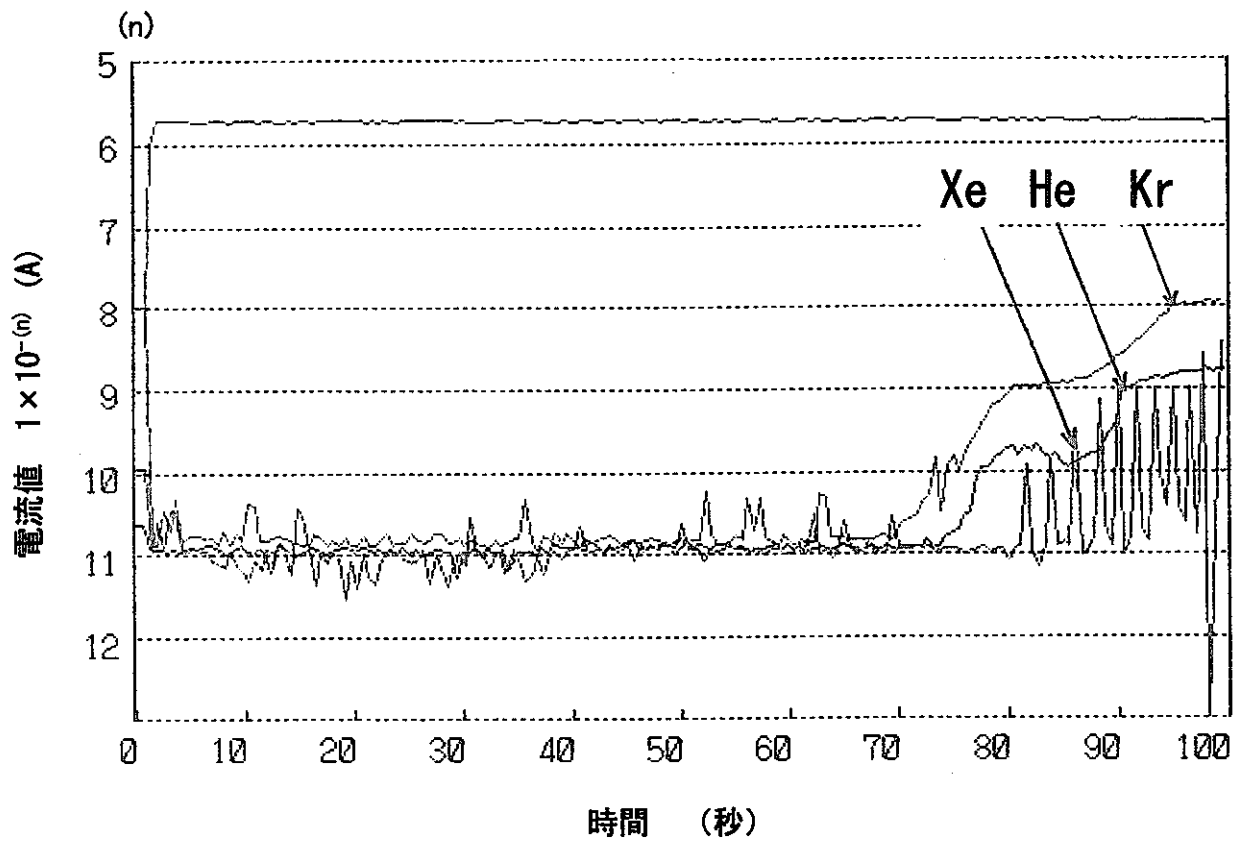
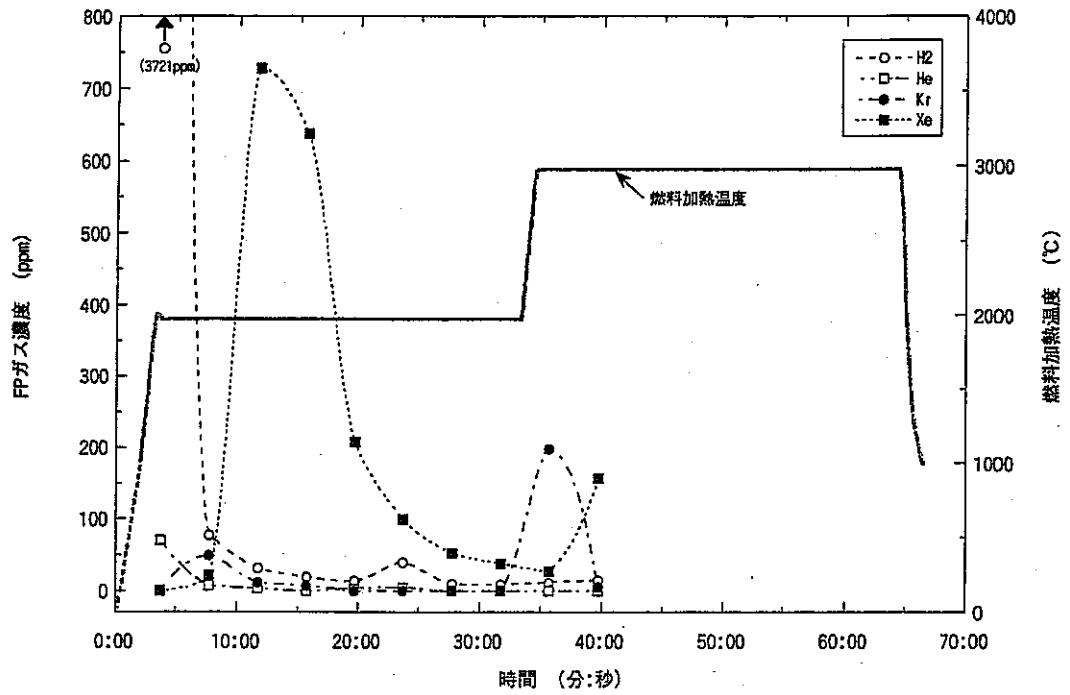
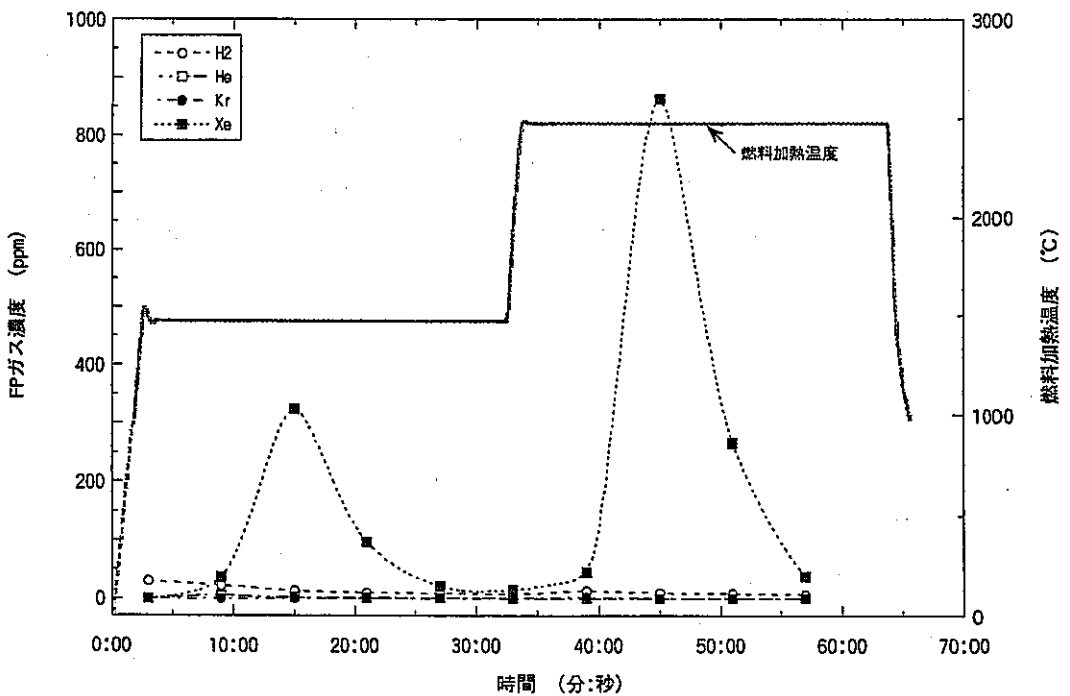


図5.33 加熱炉部で放出後、ガスマスで検出されるまでの時間遅れ  
(コールド試験結果)

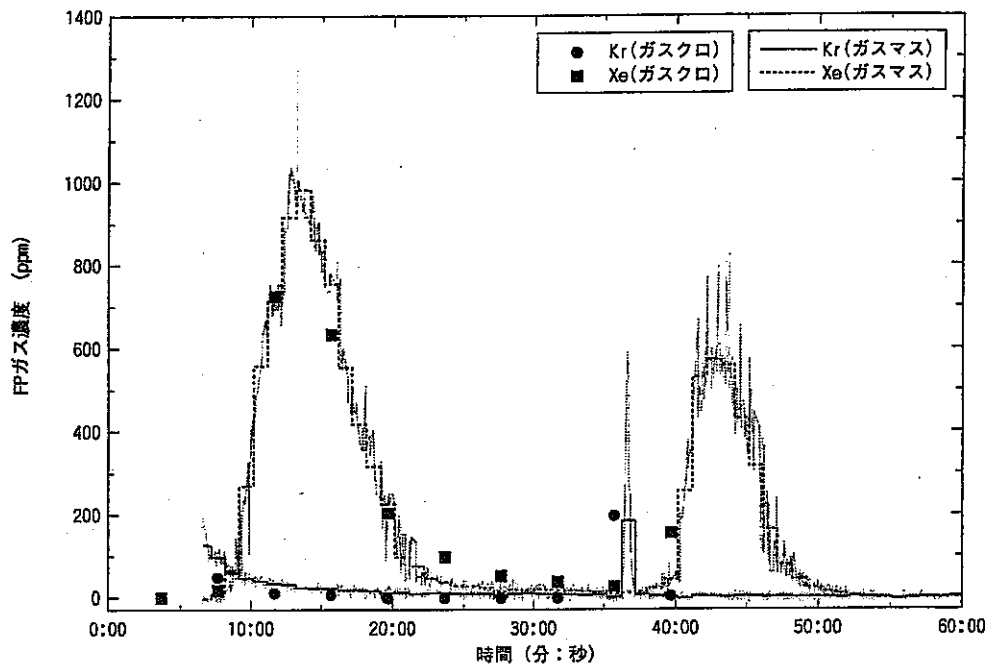


FP-1

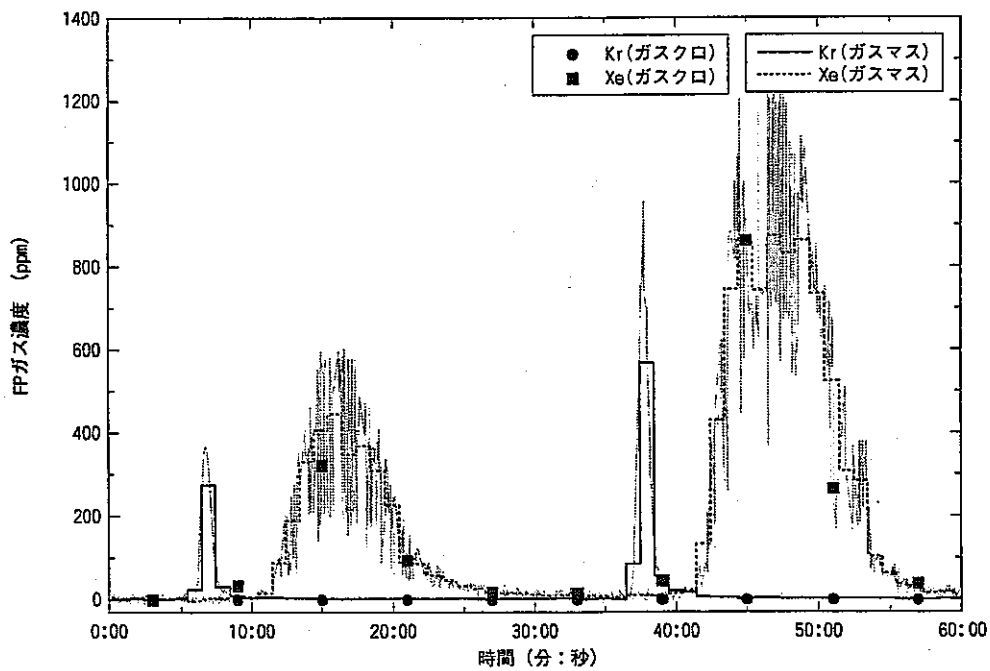


FP-2

図5.34 燃料加熱温度とキャリアガス中の放出FPガス濃度との関係 (ガスクロ分析結果)

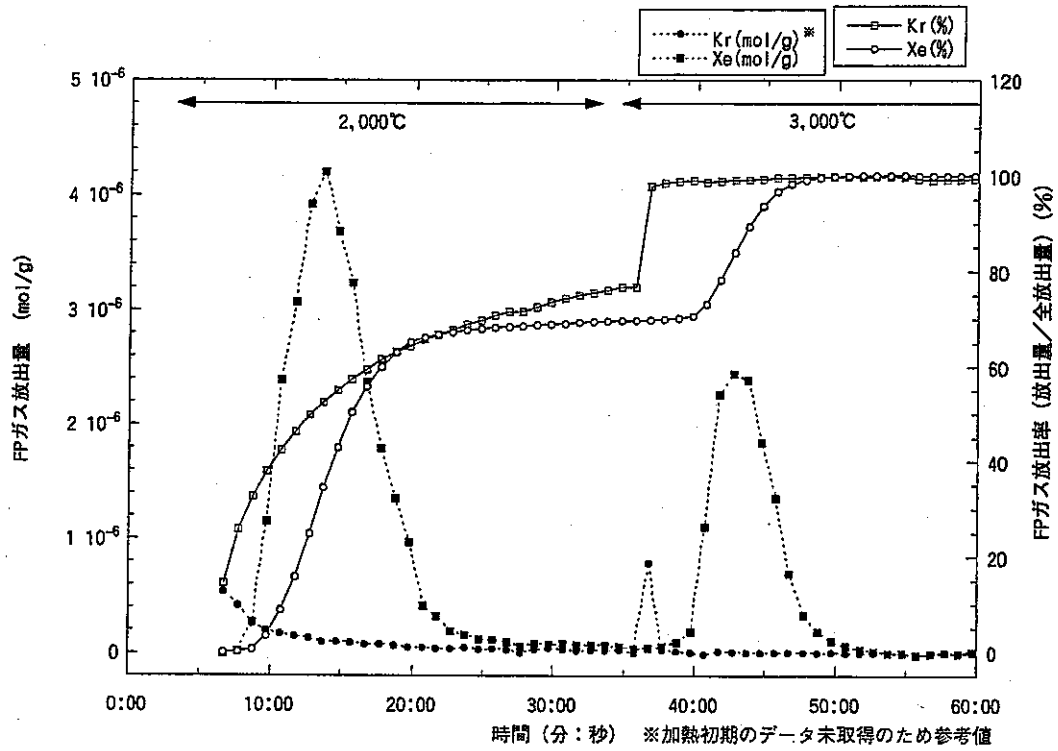


FP-1

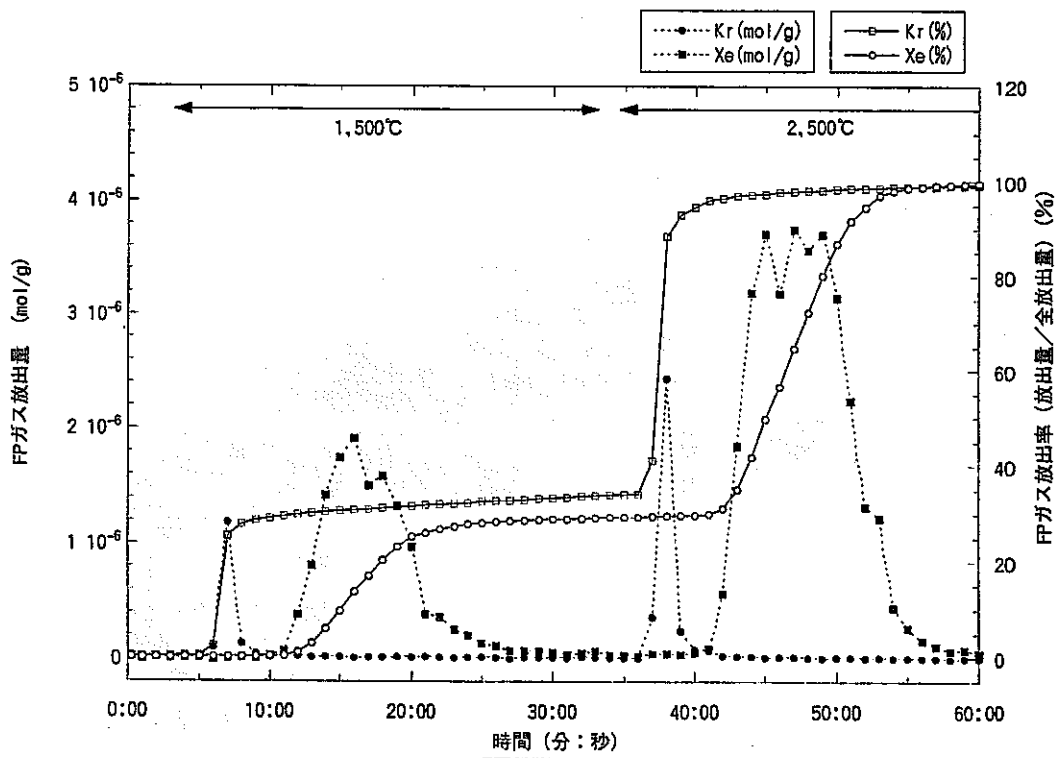


FP-2

図5.35 ガスマス1分間平均値のガスクロ値による濃度補正結果



FP-1



FP-2

図5.36 FPガス放出量 (算出結果)

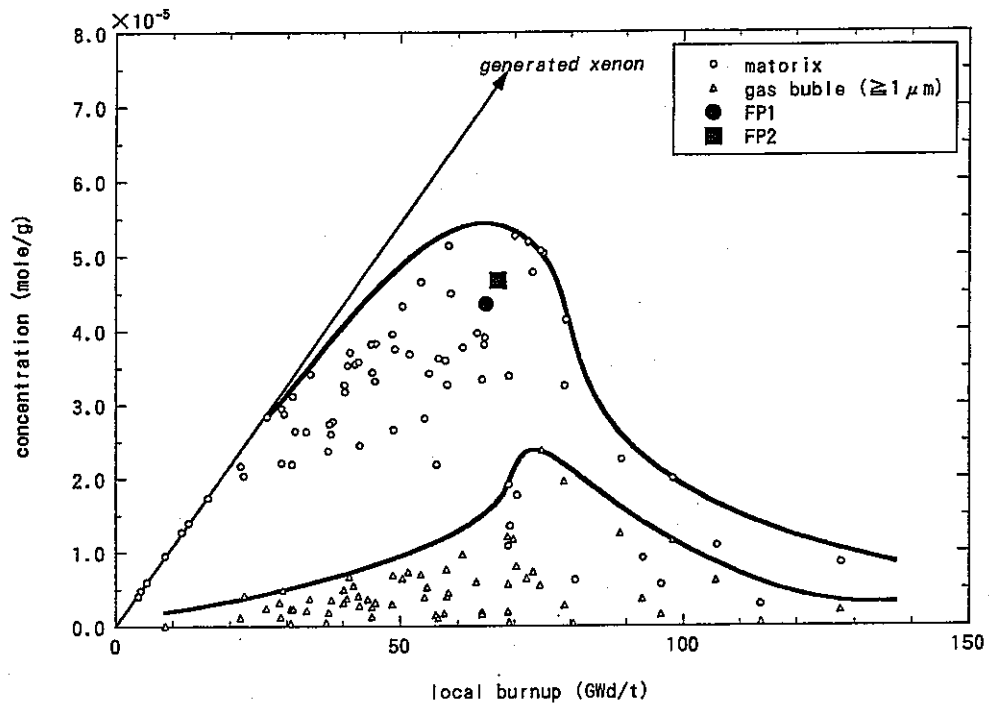


図5.37 EPMA分析結果を用いて評価したXe量<sup>1)</sup>と本試験結果の比較

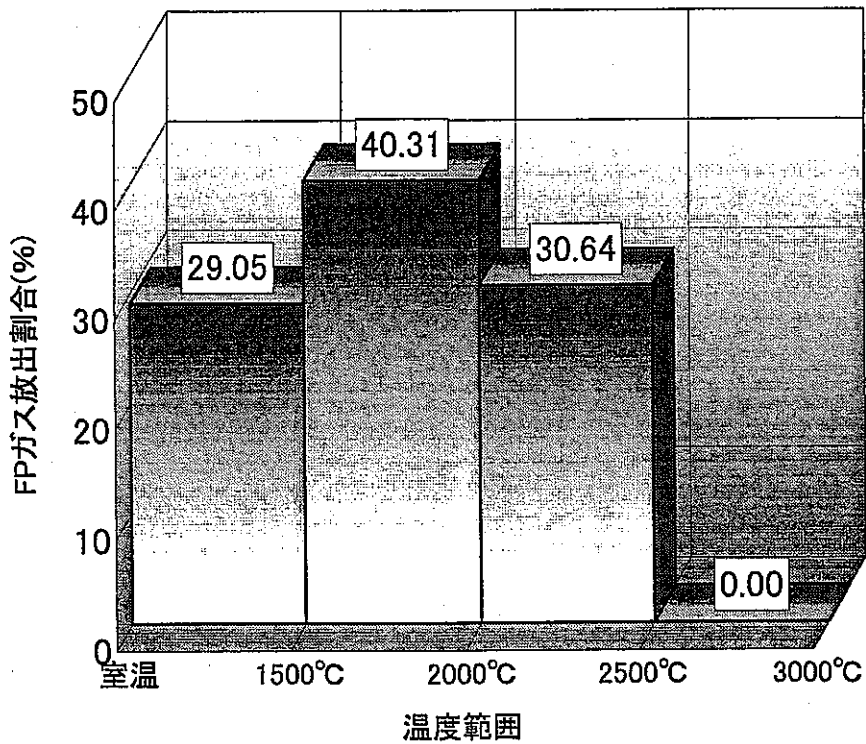


図5.38 各温度範囲におけるFPガス放出割合