

JAERI-Tech
2001-002



JP0150322



高温工学試験研究炉の燃料体からのガンマ線測定
—方法と結果—

2001年 2月

藤本 望・野尻 直喜・高田 英治・山下 清信・菊地 孝行
中川 繁昭・小嶋 崇夫・梅田 政幸・星野 修・金田 誠
小林 正一・石仙 繁・川崎 幸三・國富 一彦

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。
入手の問合わせは、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, 2001

編集兼発行 日本原子力研究所

高温工学試験研究炉の燃料体からのガンマ線測定

—方法と結果—

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
藤本 望・野尻 直喜・高田 英治・山下 清信・菊地 孝行
中川 繁昭・小嶋 崇夫・梅田 政幸・星野 修・金田 誠
小林 正一・石仙 繁・川崎 幸三・國富 一彦+

(2001年1月5日受理)

HTTR の炉心内の情報を直接得ることを目的として、炉心から燃料体を取り出し、再装荷する過程での燃料体からのガンマ線の測定を行った。測定は、燃料体が通過する床上ドアバルブに設置した GM 管及び CZT 半導体検出器と、スタンドパイプ室に設置したエリアモニタで行い、炉内のウラン濃縮度配分の対称性を考慮して 4 カラムの燃料体計 20 体について行った。

測定の結果、GM 管及び CZT 検出器による測定では、各カラムでのガンマ線強度の軸方向相対分布は、解析結果と同様の傾向を示すが、炉心上部では解析値が高く、炉心下部では低くなかった。エリアモニタによる測定でも軸方向の分布を測定することができ、解析値は測定値とよい一致を見た。更に、カラム間の比較も行った。その結果、今回的方法は炉心内部の情報を得ることが可能であることが明らかとなった。

Measurement of Gamma Ray from Fuel of High Temperature Engineering Test Reactor

-Method of Measurement and Results-

Nozomu FUJIMOTO, Naoki NOJIRI, Eiji TAKADA, Kiyonobu YAMASHITA,
Takayuki KIKUCHI, Sigeaki NAKAGAWA, Takao KOJIMA, Masayuki UMEDA,
Osamu HOSHINO, Makoto KANEDA, Shoichi KOBAYASHI,
Sigeru KOKUSEN, Kozo KAWASAKI and Kazuhiko KUNITOMI⁺

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

(Received January 5, 2001)

To obtain information in the HTTR core directly, gamma ray from fuel blocks was measured when fuel blocks were discharged from the core and reloaded to the core. Gamma ray was measured using GM detector, CZT semiconductor detector installed in a door valve and area monitors installed in a stand pipe compartment. The measurement was carried out for 20 fuel blocks in 4 columns considering the symmetry of uranium enrichment distribution in the core.

Relative axial distribution in each column obtained by the GM detector and CZT detector agreed with calculated results. However, calculation values showed higher values than measured values in upper region of the core, lower those in lower region of the core. The axial distributions were also evaluated by the area monitors. The measured values agreed with calculated values. It became clear that it was possible to obtain the data inside the core by this method

Keywords : HTTR, Gamma Ray, Fuel Handling Machine, GM Detector, CZT Detector, Power Distribution,

+Department of Advanced Nuclear Heat Technology

目 次

1. はじめに	1
2. 測定方法及び測定装置	2
2.1 測定方法の概要	2
2.2 燃料交換機の運転	2
2.3 床上ドアバルブ(1)に設置する測定装置	3
2.4 スタンドパイプ室に設置する検出器	4
3. 燃料体からのガンマ線放出率の解析	19
3.1 解析方法	19
3.2 解析結果	19
4. 測定結果	26
4.1 GM 管及び CZT 検出器による結果	26
4.1.1 GM 管の低レンジ用から高レンジ用への変更について ..	26
4.1.2 GM 管による軸方向放出ガンマ線強度分布	27
4.1.3 CZT 検出器によるガンマ線スペクトル	27
4.1.4 燃料体毎の放出ガンマ線軸方向相対分布	28
4.1.5 解析値との比較	28
4.2 エリアモニタによる結果	29
5. まとめ	63
謝辞	63
参考文献	63

Contents

1. Introduction	1
2. Outline for Method of Measurement and Detectors	2
2.1 Outline of Measurement	2
2.2 Fuel Handling Machine Operation	2
2.3 Detectors at Door Valve(1)	3
2.4 Detectors at Stand Pipe Compartment	4
3. Calculation of Gamma Ray Emission Rate from Fuel	19
3.1 Calculation Method	19
3.2 Calculation Results	19
4. Results of Measurements	26
4.1 Results by GM Detector and CZT Detector	26
4.1.1 Change of Low Range GM Detector to High Range One	26
4.1.2 Axial Gamma Ray Emission Rate Distribution by GM Detector	27
4.1.3 Gamma Ray Energy Spectrum by CZT Detector	27
4.1.4 Axial Gamma Ray Emission Rate Distribution in Fuel Blocks	28
4.1.5 Comparison with Calculation Results	28
4.2 Results by Area Monitor	29
5. Conclusion	63
Acknowledgements	63
References	63

1. はじめに

高温工学試験研究炉(High Temperature Engineering Test Reactor : HTTR)は出力30MW、原子炉出口冷却材温度950°C（高温試験運転時）の我が国初の高温ガス炉であり¹⁾、1998年11月10日の初臨界達成後、臨界試験²⁾を経て、現在100%出力の達成を目指して出力上昇試験の途上にある。

HTTRでは、運転中に燃料の健全性を損うことのないよう燃料温度に制限値を設けている。しかしながら炉内の温度は1000°C以上の高温となるため燃料温度を直接測定できない。そのため燃料温度は、1次冷却材流量、原子炉出力から解析により評価することとしている。更に、燃料最高温度の低減のため、HTTRでは軸方向及び径方向に燃料の濃縮度配分を行い、出力密度分布の最適化を図っていることから、出力密度分布の評価はHTTRの燃料温度評価上非常に重要である。そこで、臨界試験では、炉心に接している位置の反射体領域中で軸方向の中性子束分布を測定しており、解析結果とよい一致を見ている²⁾。

一方、HTTRの燃料交換では、全ての燃料体が床上ドアバルブを通過することから、ここにガンマ線検出器を設けることにより、燃料体毎の積算出力及び燃焼度を燃料取り扱い時に測定できる可能性がある。これは、臨界試験で行った中性子束分布測定と比較すると、炉心内部の直接の測定であること、臨界試験の結果は軸方向のみであるが、この方法によれば炉心内の軸方向だけでなく径方向の分布についても情報を得ることができる。更に、積算出力及び燃焼度の測定結果は、燃料体内の核分裂生成物(FP)量、残存ウラン量、プルトニウム(Pu)生成量等の評価に役立つのみならず、核物質管理上有益なデータとなる。

これまで、核燃料施設では燃焼クレジットを施設の臨界安全設計に取り入れるため、ガンマ線測定及び中性子測定を組み合わせた燃焼度測定装置が開発されてきた^{3,4)}。この方法を応用すればHTTRにおいても同様に評価できると考えられる。

更に、燃焼初期は燃料内のFPの蓄積も少ないと、Puの生成量が少ないため解析との比較が行いやすい等の利点がある。

そこで、出力上昇試験を行っているこの時期に炉心から燃料を取り出し、再装荷する過程で燃料体からのガンマ線の測定を行うこととした。本報では、測定方法、測定装置の概要、解析結果及び測定結果について報告する。

2. 測定方法及び測定装置

2.1 測定方法の概要

HTTR の燃料体は、燃料交換機によって装荷、取り出しが行われる。燃料取り扱い時、燃料交換機は炉心上部に設置された床上ドアバルブ(1)の上に据え付けられる。床上ドアバルブ(1)と炉心上部のスタンドパイプの間は接続管が設置され、内部は He 霧囲気となる。燃料体は、このスタンドパイプと接続管内を通って移動する。測定の概念図を第 2.1.1 図に示す。

測定では、炉心から燃料体を燃料交換機内に取り出し、床上ドアバルブ(1)内を通過する燃料体からのガンマ線測定を行い、燃料体相互のガンマ線強度の比を評価する。また、併せてガンマ線スペクトル測定で特定核種の測定を行う。床上ドアバルブ(1)には、保障措置用の検出器のための貫通孔が 4 力所設けられており、うち 2 力所には保障措置用の検出器 が既に設置されている。ここで、残りの 2 力所の貫通孔にガンマ線検出器を設置することとした。

また、併せてスタンドパイプ室にエリアモニタを設置し、スタンドパイプ内を通過する時点での空間線量率を測定することにより補足的なデータを取得することを計画した。

HTTR では、炉心内の出力密度分布を平坦化し燃料温度の低減を図ることを目的として、軸方向及び径方向に燃料のウラン濃縮度配分を行っている。測定においては、炉内のウラン濃縮度配分の対称性を考慮して、第 2.1.2 図に示す 4 カラムについて測定することとした。1 カラムは 5 体の燃料体が含まれているため、合計で 20 体の燃料体の測定を行うこととした。

燃料体の取り扱いは、燃料交換機から燃料体を保持するグリッパを炉心内に降ろし、燃料をつかんで燃料交換機内に取り込む。炉心部より上のレベルでは、燃料体は収納筒内に保持されて移動する。

測定は、燃料体が床上ドアバルブ(1)を通過する時に行われるが、今回の測定は炉心で照射された燃料体を取り扱う初めての機会であることから、燃料交換機の運転は通常の運転とし、測定のための特別の操作は行わないこととした。よって、測定は、燃料体を停止させず行うこととした。燃料体が床上ドアバルブを通過するときの移動速度は、燃料体取り出し時が 0.5m/min、燃料体装荷時が 3m/min である。

測定は、当初第 2.1.3 図に示すように 9MWまでの出力上昇試験(1)及び 20MWまでの出力上昇試験(2)の後、90 日程度の冷却期間をおいて行う予定であった。しかしながら 7 月 8 日に原子炉がスクラムしたため、スクラム後 120 日程度冷却した後に行った。第 2.1.1 表に測定時の主要な条件を示す。

2.2 燃料交換機の運転

燃料交換機は炉心上部に設置された床上ドアバルブ(1)の上に据え付けられ、燃料体の取り出し、装荷を行う。燃料体の取り出しは、燃料交換機のグリッパが炉内の燃料体を掴み、スタンドパイプ、床上ドアバルブ(1)を通過して、燃料交換機内の回転ラック内に燃料体を収納することにより行う。回転ラック内に 1 カラム分の燃料体が収納された後、取り出しと逆の手順により燃料体は炉内に装荷され、元の状態に戻される。燃料交換機の運転の概要図を第 2.2.1 図に示す。

燃料体が炉心を離れ、スタンドパイプ、床上ドアバルブ(1)内を移動する際は、燃料体はグリッ

パにより把持され、ステンレス製の収納筒により保護される。収納筒は六角柱状の、厚さ約 13mm のステンレス製の筒である。第 2.2.2 図にグリッパ、収納筒の構造図を示す。

燃料体が収納される収納筒の下部は、燃料交換の際に燃料体に刻印されている燃料番号を確認するための窓があり、また、炉心頂部に接地するためのスパイクのある 4 面にはリミットスイッチ等が存在し、他の 2 面と厚さが異なり 6 面が同じ構造でない等、複雑な構造となっている。第 2.2.3 図に収納筒下部の概略図を示す。

測定する 4 カラムのうち、B01、C02 カラムについては炉心中央の N1 スタンドパイプを通して、D02、D01 カラムについては N5 スタンドパイプを通して燃料体を取り扱う。その際、N1 スタンドパイプと N5 スタンドパイプに接続される燃料交換機及び床上ドアバルブ(1)の向きは異なる。燃料体は炉心位置を基準にその向きを保持し床上ドアバルブ(1)を通過する。収納筒の向きについても、カラム毎にその向きが異なる。よって、第 2.2.4 図に示すように、床上ドアバルブ(1)に設置される検出器、燃料体及び収納筒の向きの関係はカラム毎に異なる。このことから、床上ドアバルブ(1)に設置される検出器による測定はカラム毎に測定条件が異なることになる。

2.3 床上ドアバルブ(1)に設置する測定装置

床上ドアバルブ(1)には保障措置用の検出器⁵⁾を設けるために 4 力所の貫通孔が設けられており、そのうち 2 力所は未使用となっている。この 2 力所の貫通孔に計測器ハウジングを設け、その中にコリメータとともに検出器を収納して測定を行った。検出器の周辺及び後部にはタンゲステン及び SUS 製の遮へい体を設け、遮へい性能を満足させることとした。

検出器としては、ガンマ線測定用としての GM 管と、スペクトル測定用として半導体検出器であるテルル化カドミウム亜鉛検出器 (CZT 検出器) を設置することとした。GM 管は感度の異なる 2 種類のものを用意した。これらの検出器は、貫通孔に設置する計測器ハウジング内のコリメータの後部に設置し、計数率及びガンマ線スペクトルを測定する。それぞれの検出器の概要を第 2.3.1 表に示す。

通常、ガンマ線スペクトル測定には Ge 検出器が用いられるが、Ge 検出器は液体窒素等による冷却の必要があり計測器ハウジングの内部に設置することができないため、ガンマ線を床上ドアバルブ(1)の外に取り出さなければならない。この場合、床上ドアバルブ(1)表面での線量当量が制限値を超える可能性があるので、計測器ハウジング内に設置可能な小型の CZT 検出器を用いることとした。

(1) 計測器ハウジングの概要

第 2.3.1 図に計測器ハウジングの概要を示す。計測器ハウジングは GM 管用と CZT 検出器用の 2 種類製作し、床上ドアバルブ(1)に向かい合わせの状態で設置した。計測器ハウジングの先端にはタンゲステン製のコリメータを設け、その後部に検出器を設置する。検出器の周辺及び後部はタンゲステン製及び SUS 製の遮へい体を設け、床上ドアバルブ(1)の遮へい性能を満足させている。コリメータの寸法は、GM 管用は、Φ10mm とした。CZT 用のコリメータは Φ5mm、Φ2.2mm 及び Φ1mm のものを製作し、計数率に応じて変更できるようにした。なお、今回の測定

ではすべて $\phi 5\text{mm}$ のコリメータを用いた。また、計測器ハウジングは燃料交換時には1次冷却材圧力バウンダリとなる。

(2) GM 管の概要

GM 管による測定装置の構成を第 2.3.2 図に示す。GM 管からの信号はプリアンプを介して測定器へ送られ、更に RS-232C を経由してパソコンで処理され、記録される。測定は、指定した時間内の計数値から計数率を求め、記録する方法と、一定の時間間隔毎に計数値を連続して記録する方法の 2 種類を選択できるようにした。今回の測定では、後者的方法により測定した。記録の時間間隔は 1 秒とした。

(3) CZT 検出器の概要

CZT 検出器による測定装置の構成を第 2.3.3 図に示す。CZT 検出器からの信号はアンプに送られ、ボード型の波高分析器を通してパソコンに送られ、記録される。CZT 検出器の有感部の結晶はペルチェ効果により -20°C 以下に冷却される。

2.4 スタンドパイプ室に設置する検出器

(1) 測定装置の概要

出力分布測定には、2カ所のスタンドパイプ（N1 スタンドパイプと N5 スタンドパイプ）を使用して燃料の取り出し、装荷を行う。そこで、スタンドパイプ室内にレンジの異なる可搬型のエリアモニタ(Si 半導体検出器)を設置して測定を行うこととした。検出器の設置は、可搬型のエリアモニタから検出器を取り出し、延長ケーブルを用いてスタンドパイプクロージャーのつかみ孔内に設置した。エリアモニタの本体はスタンドパイプ室に設置し、ここから絶縁アンプを介して制御室に設置したデータレコーダにデータを記録する。データは 1 秒おきに記録した。測定装置の概略を第 2.4.1 図に、使用するエリアモニタの主要諸元を第 2.4.1 表に示す。

出力分布測定では N1 スタンドパイプと N5 スタンドパイプの 2 つのスタンドパイプを使用することから、線量当量率をできるだけ同条件で測定できるように、燃料体から検出器までの距離、周辺のスタンドパイプの配置状況等を考慮して検出器の設置位置を決定した。検出器を設置するスタンドパイプの位置を第 2.4.2 図及び第 2.4.3 図に示す。

また、予想される線量当量率が検出器の測定可能範囲に対して大きいため、線源からの距離を離すとともに、スタンドパイプクロージャのつかみ孔の中に検出器を設置し、クロージャとスタンドパイプの遮へい効果を利用するとともに、つかみ孔の上に鉛毛を設置して上方向からのガンマ線に対しても遮へいしている。

第 2.1.1 表 測定時の主要な条件

最大到達出力	16.5MW*
炉心平均燃焼度	約 280MWd/t
冷却期間	約 120 日
燃料交換機の運転方法	通常の運転

*スクラム時の出力

第 2.3.1 表 床上ドアバルブに設置する検出器の概要

(1) GM 管

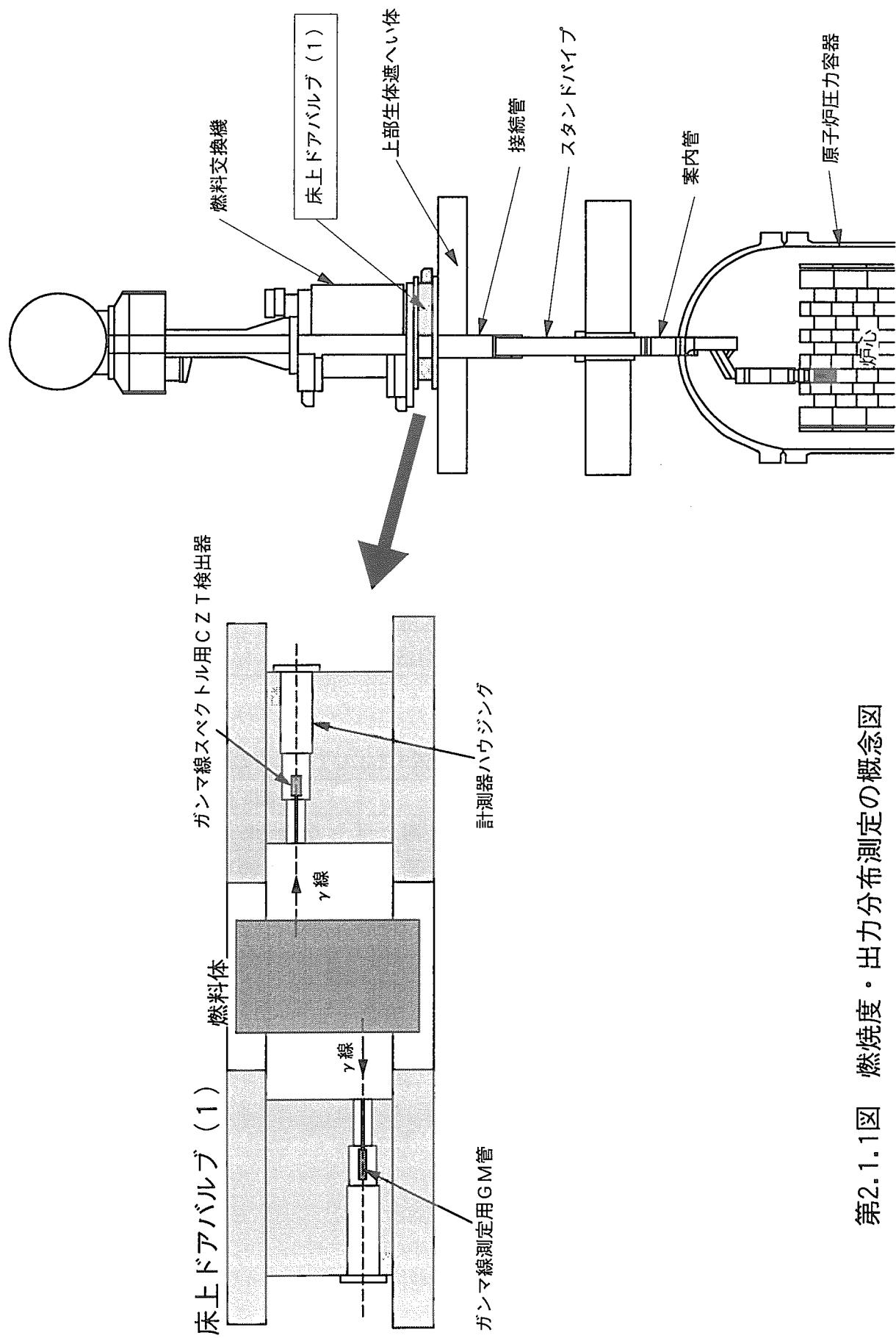
形式	感度	概略寸法	備考
ZP1201	10 ⁻³ ~40mGy/h	φ 20×45mm	CENTRONIC 社製
ZP1301	10 ¹ ~10 ⁴ mGy/h	φ 14×20mm	CENTRONIC 社製

(2) CZT 検出器

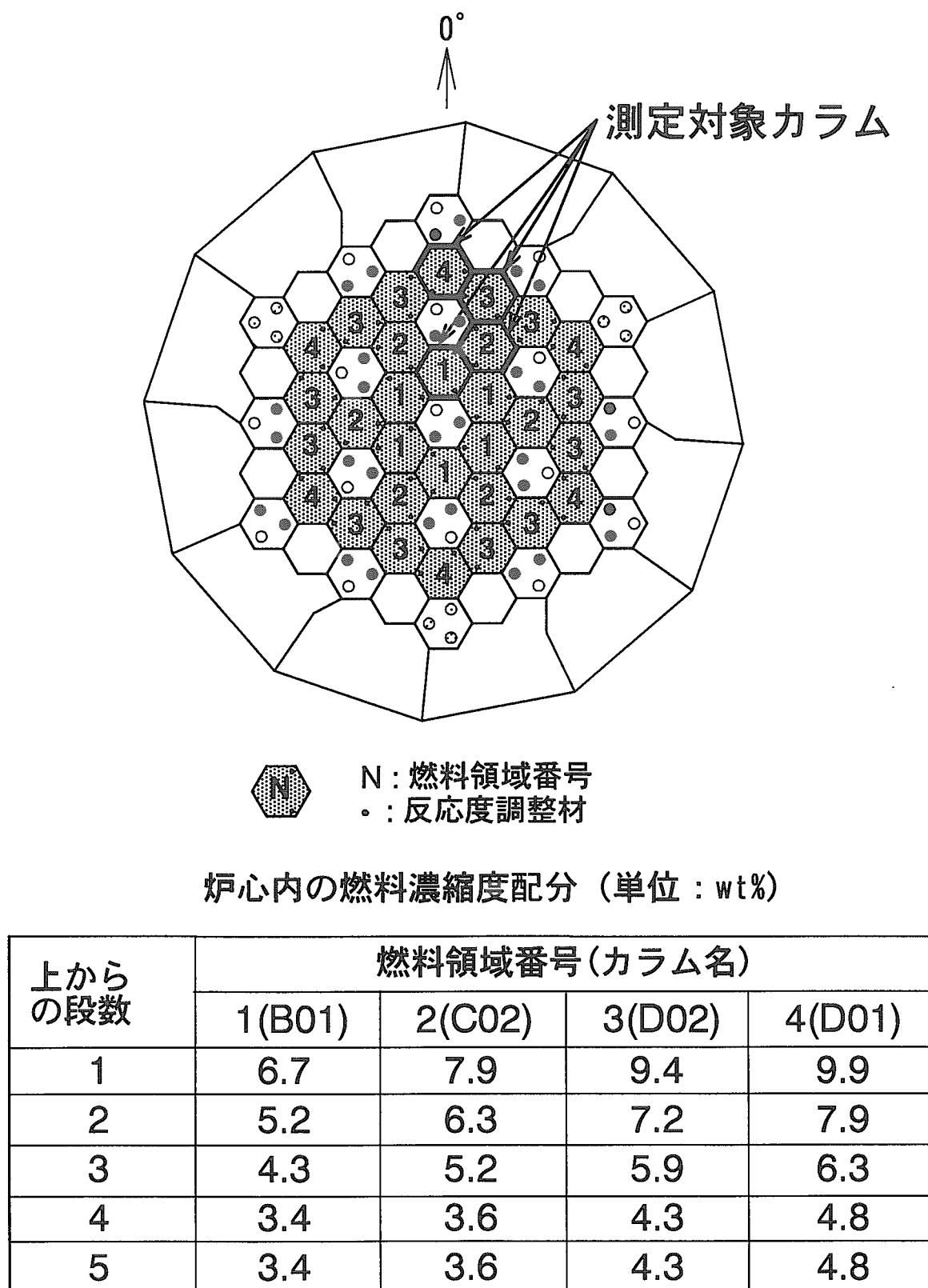
形式	有感部体積	エネルギー分解能	備考
XR-100T-CZT	5mm×5mm×2mm	1.5keV FWHM (122keV-Co57)	Amptek 社製

第 2.4.1 表 スタンドパイプ室に設置するエリアモニタの概要

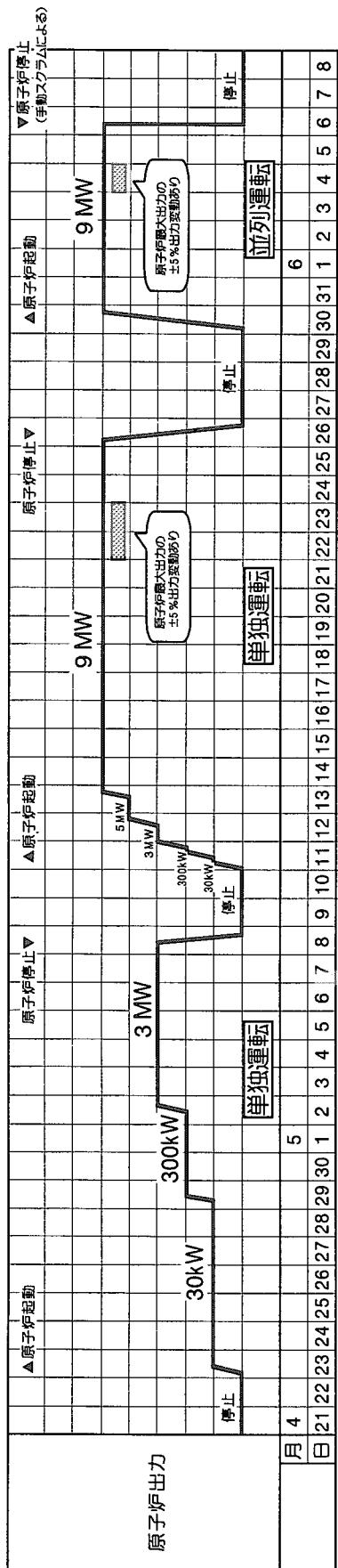
	検出器	測定範囲
検出器 A (高レンジ)	Si 半導体検出器	0.01~99.99mSv/h
検出器 B (高レンジ)	Si 半導体検出器	0.01~99.99mSv/h
検出器 C (低レンジ)	Si 半導体検出器	0.1~999μSv/h
検出器 D (低レンジ)	Si 半導体検出器	0.1~999μSv/h



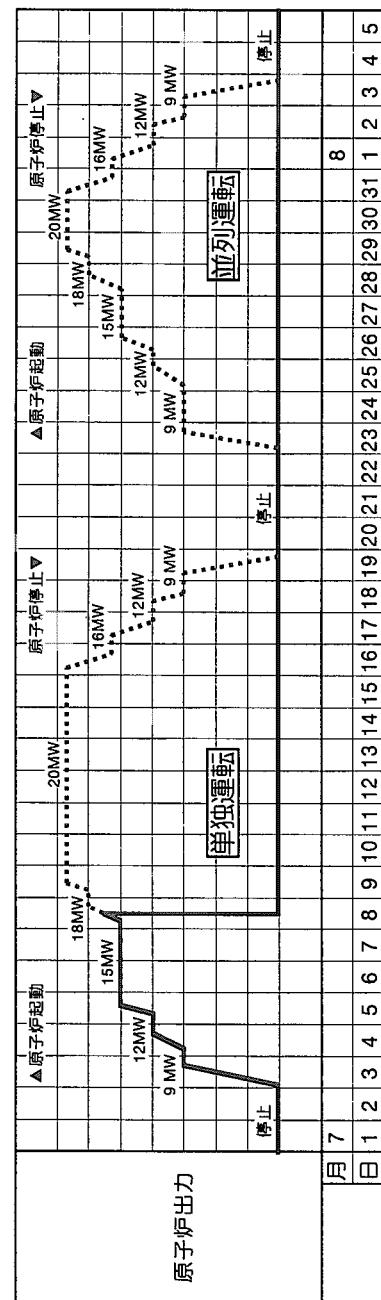
第2.1.1図 燃焼度・出力分布測定の概念図



第2.1.2図 炉心内の燃料濃縮度配分と測定対象カラムの位置

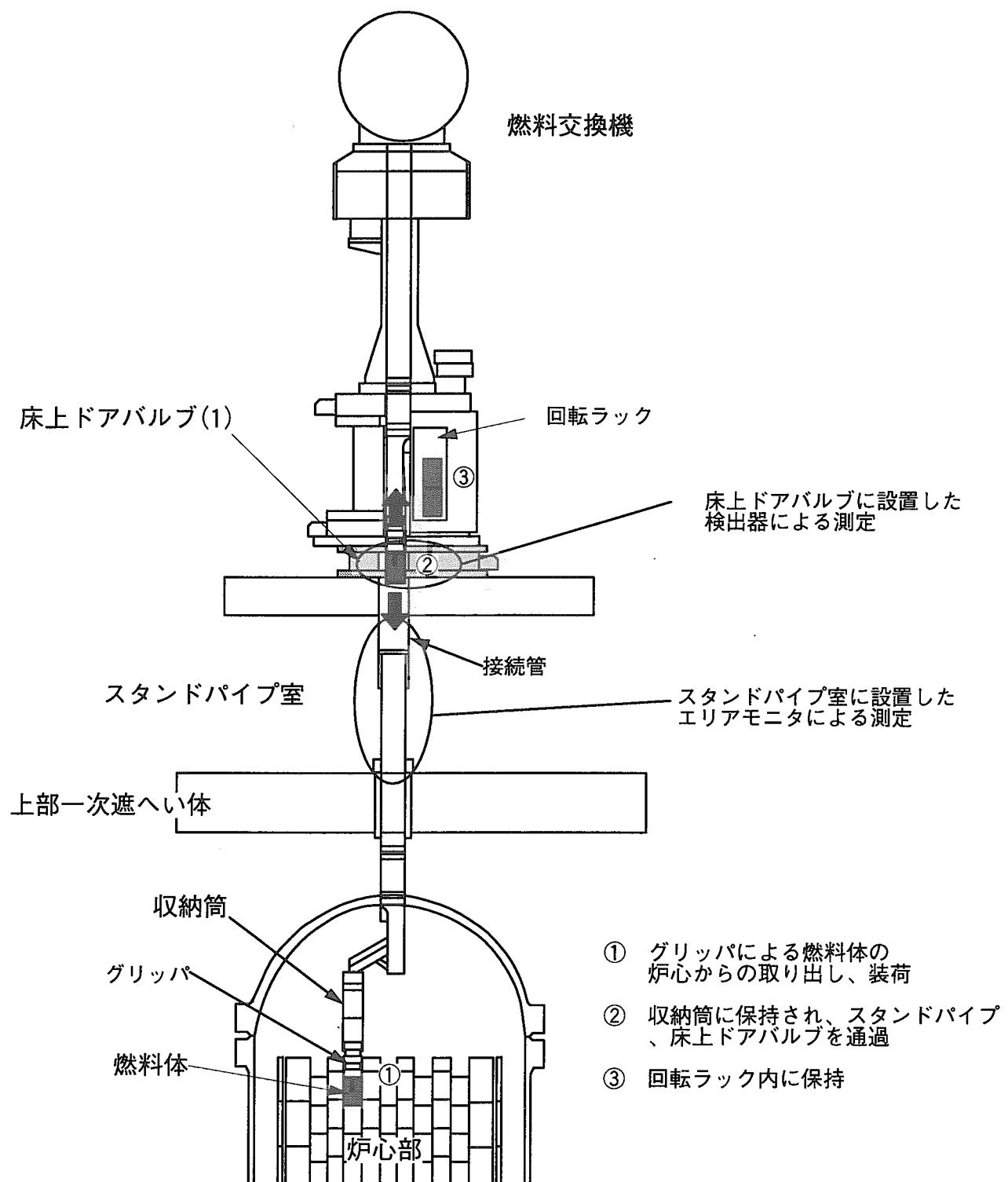


a) 出力上昇試験(1)での出力履歴(実績)

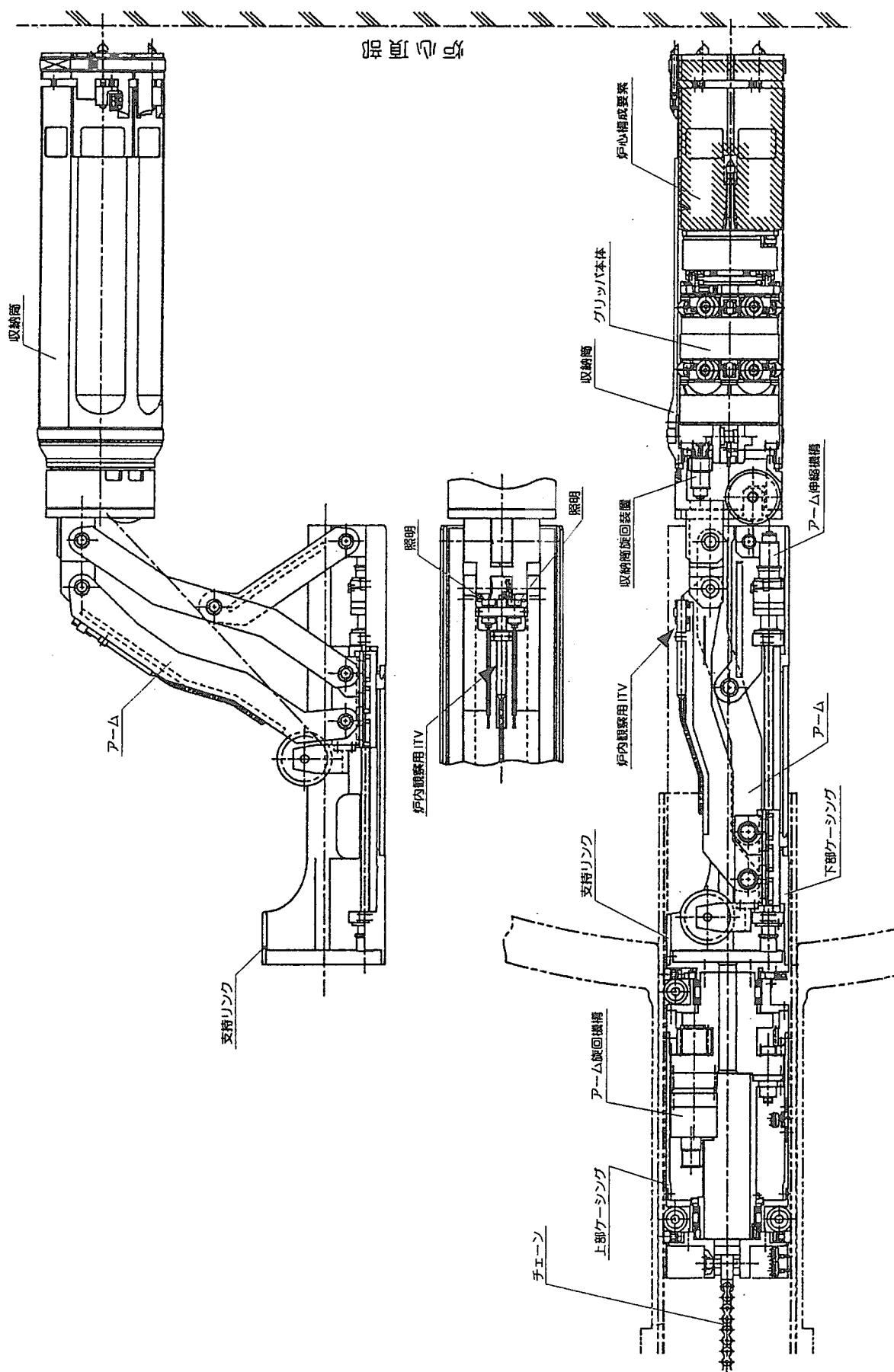


b) 出力上昇試験(2)での出力履歴 (計画と実績)

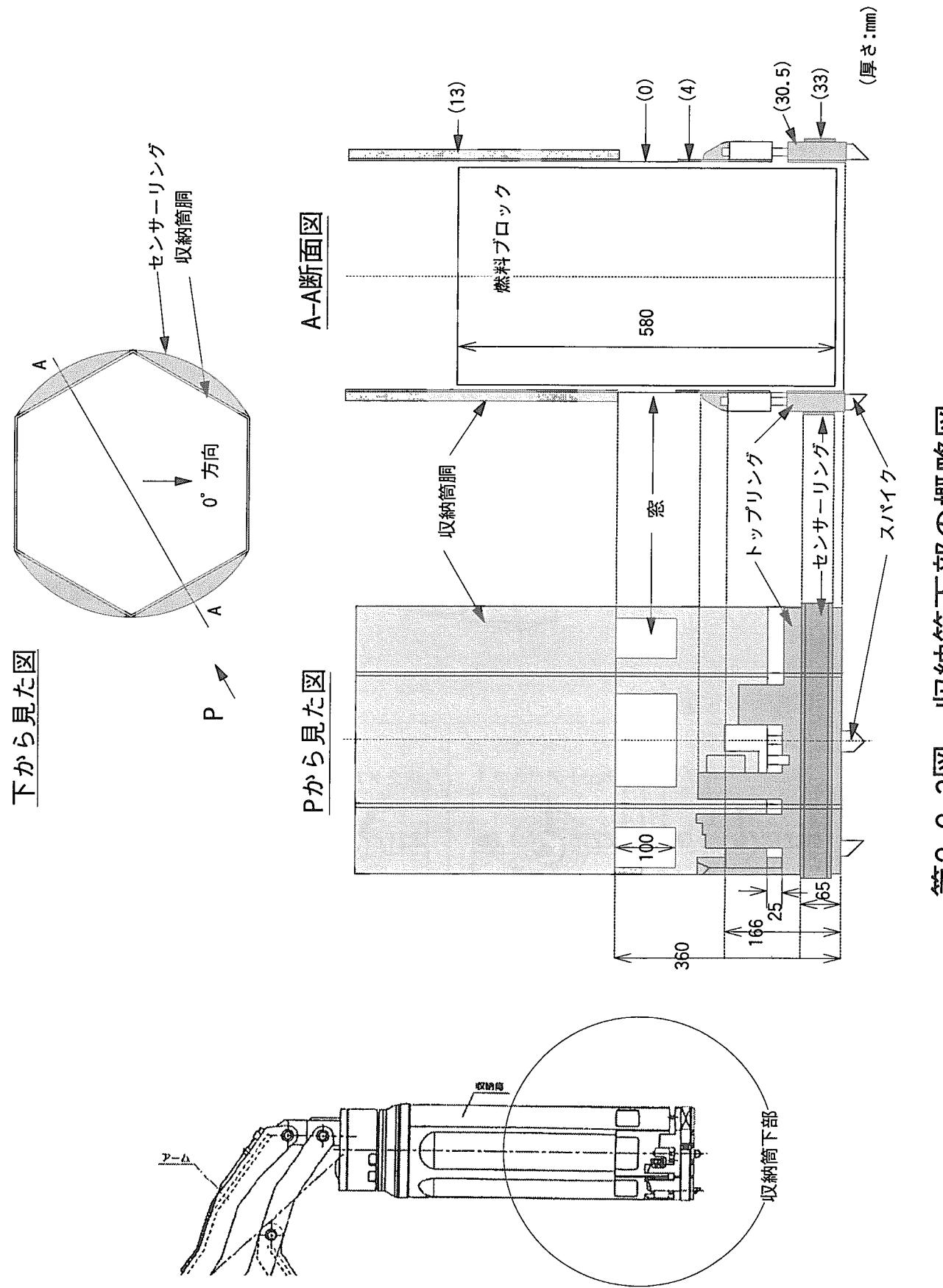
第 2.1.3 図 出力上昇試験(1)及び(2)での出力履歴

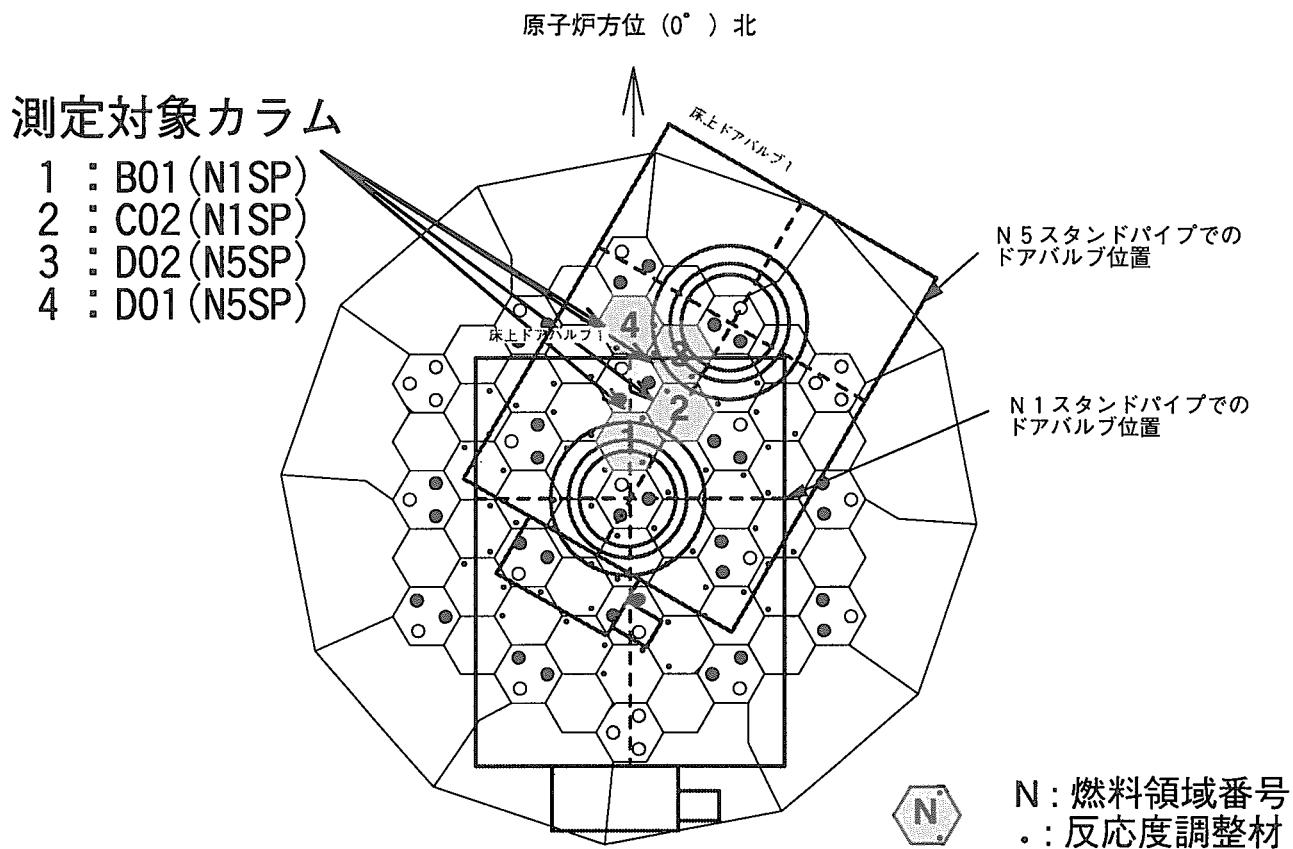


第2.2.1図 燃料交換機の運転の概要



第2.2.2図 グリッパ、収納筒



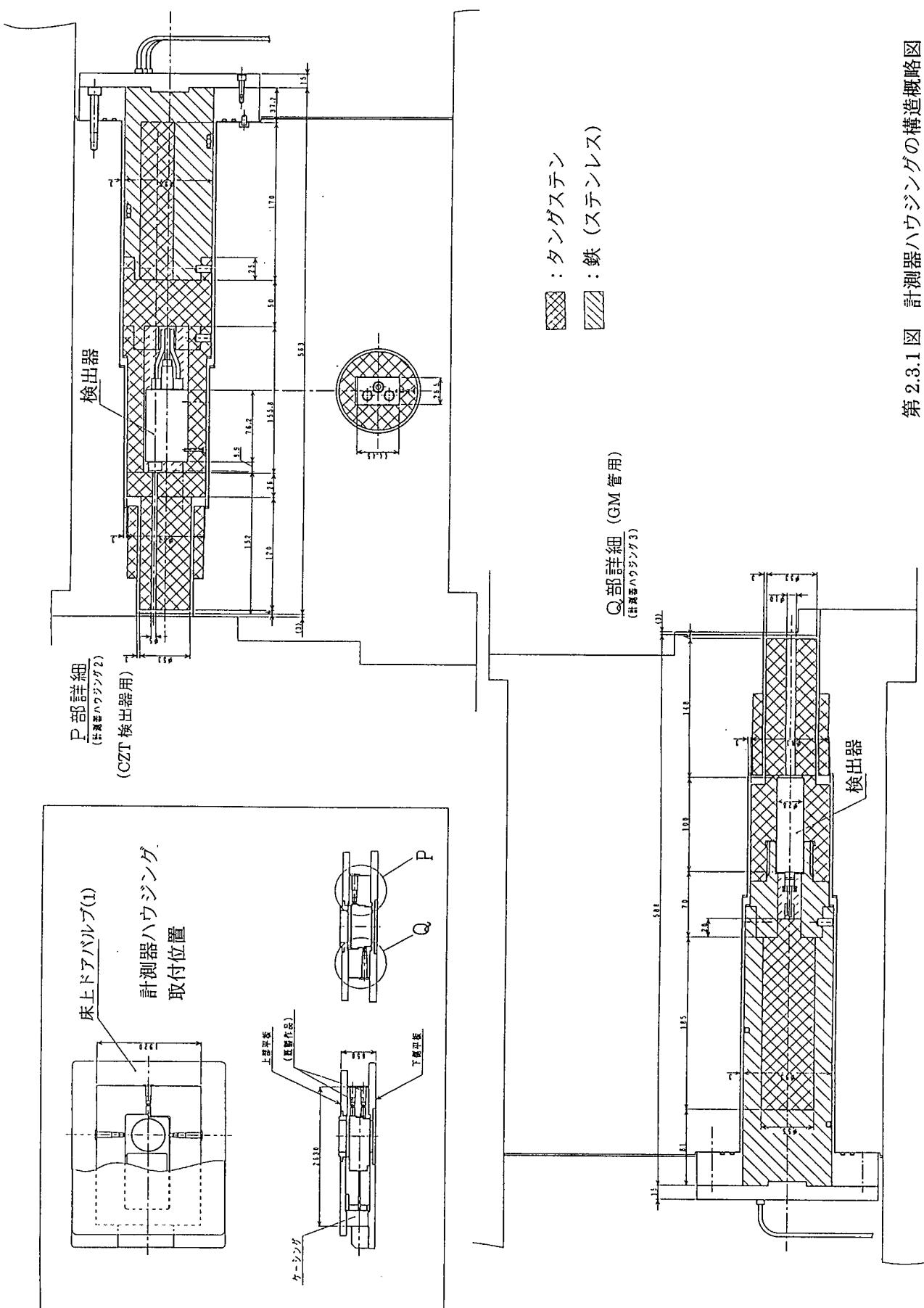


検出器と収納筒の位置関係

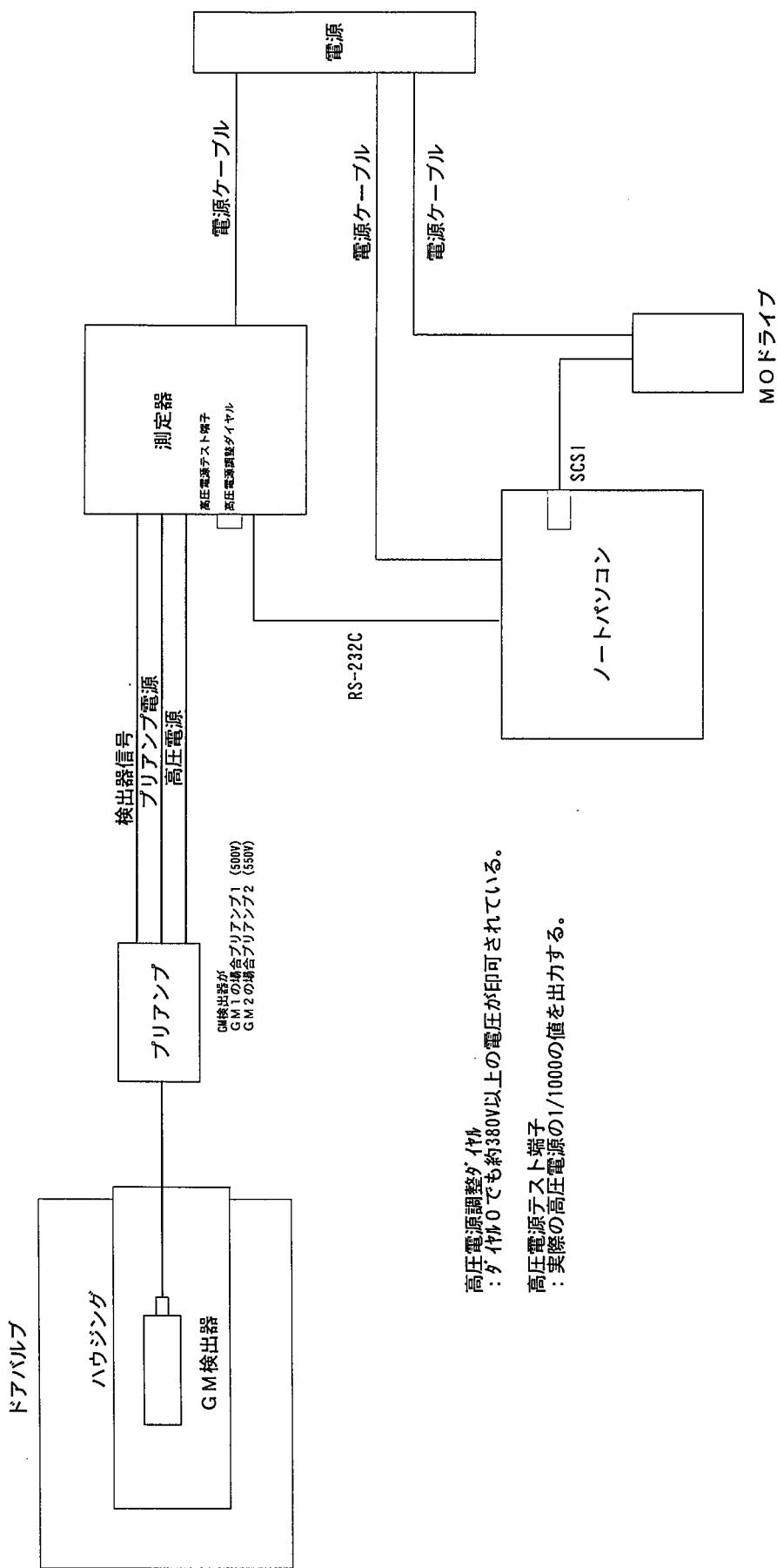
	床上ドアバルブ 1	床上ドアバルブ 1	床上ドアバルブ 1	床上ドアバルブ 1
測定カラム	B 0 1	C 0 2	D 0 2	D 0 1
ドアバルブ向き	0° (原子炉方位に対する)	0° (原子炉方位に対する)	30° (原子炉方位に対する)	30° (原子炉方位に対する)
収納筒向き	0° (ドアバルブに対する)	120° (ドアバルブに対する)	210° (ドアバルブに対する)	330° (ドアバルブに対する)
燃料体向き (BPがない角の向き)	270° (原子炉方位に対する)	90° (原子炉方位に対する)	30° (原子炉方位に対する)	330° (原子炉方位に対する)

①: 原子炉方位 (0° 方向)②: 収納筒向き (収納筒 0° 方向)

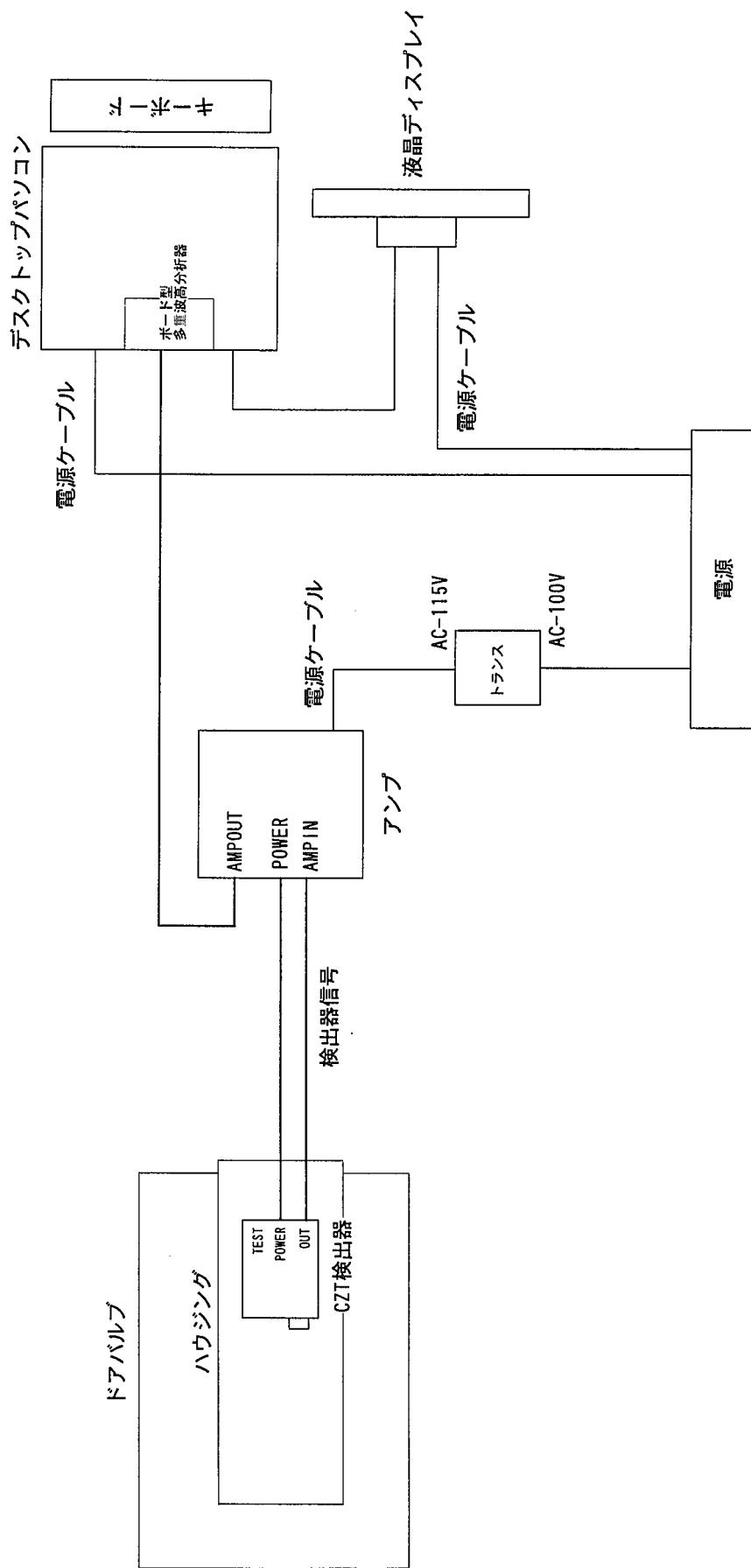
第2.2.4図 炉心内測定対象カラムの位置



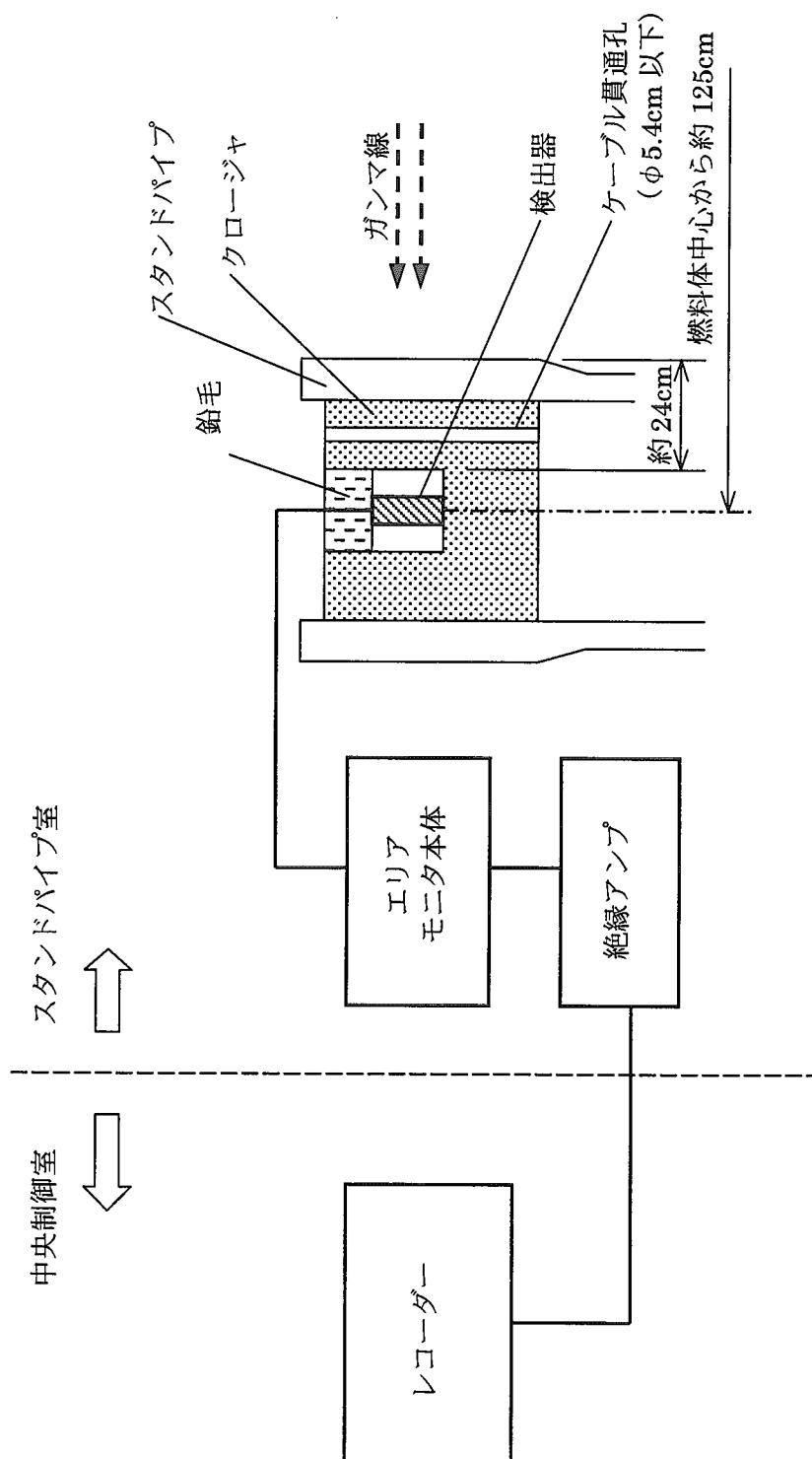
第2.3.1図 計測器ハウジングの構造概略図



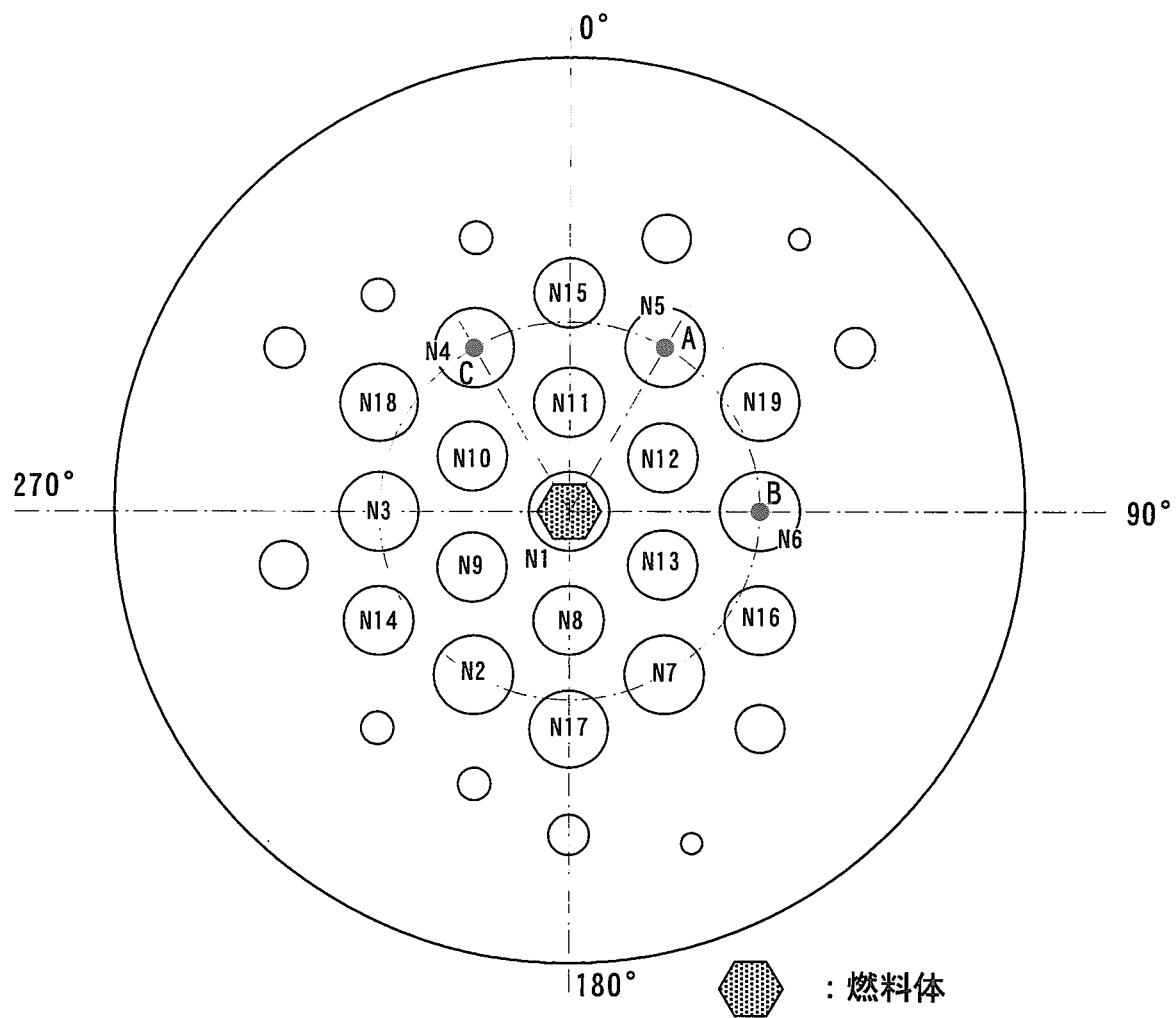
第2.3.2図 GM管による測定装置の構成図



第2.3.3図 CZT検出器による測定装置の構成図



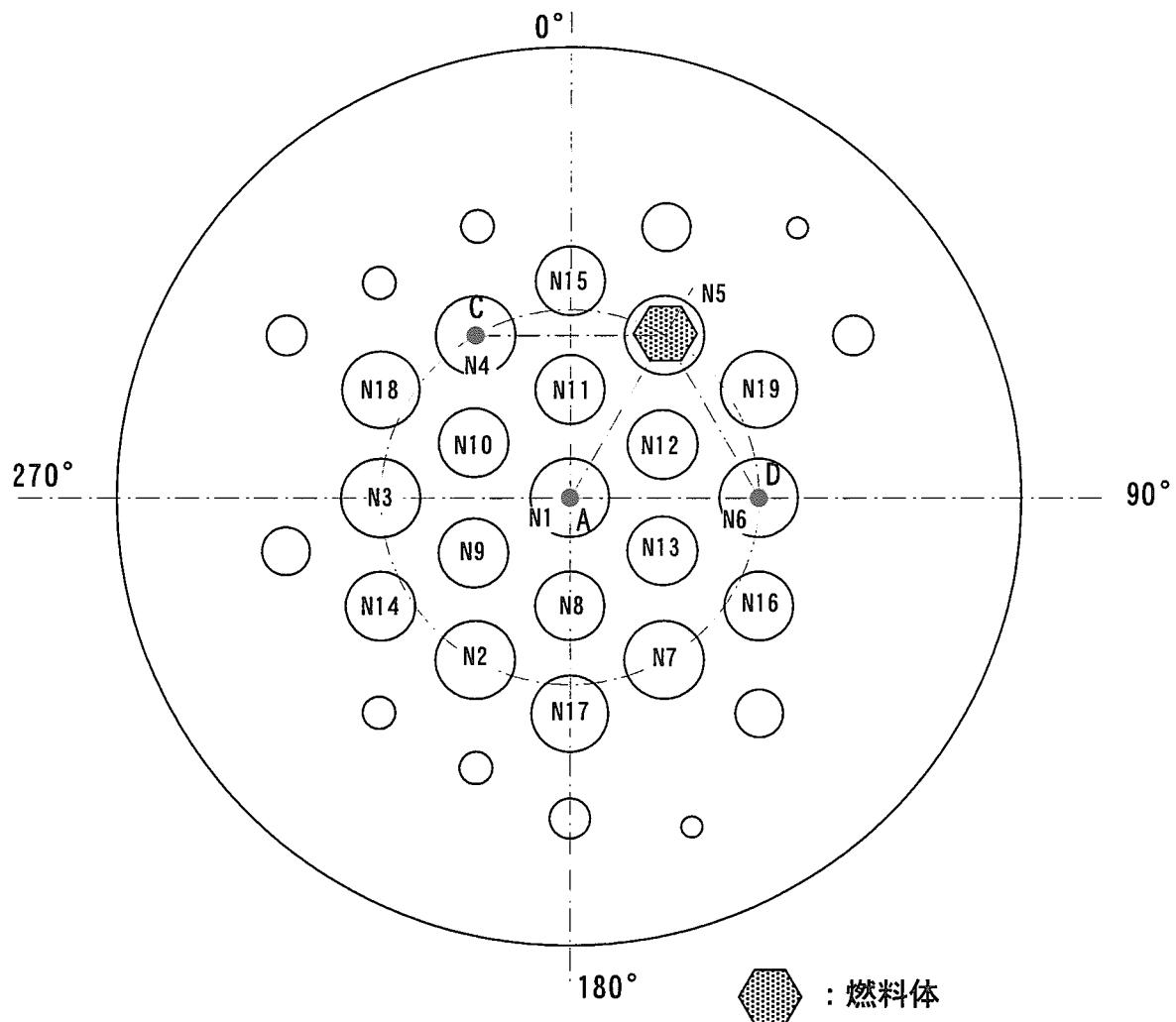
第2.4.1図 スタンドパイプ室に設置したエリアモニタによる測定の概念図



〈検出器の種類〉

- 検出器A：ガンマ線モニタ（高レンジ）
- 検出器B：ガンマ線モニタ（高レンジ）
- 検出器C：ガンマ線モニタ（低レンジ）
- （ガンマ線モニタはクロージャ内部に設置）

第2.4.2図 N1スタンドパイプ使用時の検出器（ガンマ線モニタ）
の配置(B01カラム及びCO2カラム測定時)



〈検出器の種類〉

検出器A：ガンマ線モニタ（高レンジ）
検出器C：ガンマ線モニタ（低レンジ）
検出器D：ガンマ線モニタ（低レンジ）
(ガンマ線モニタはクロージャ内部に設置)

第2.4.3図 N5スタンドパイプ使用時の検出器（ガンマ線モニタ）の配置 (D02カラム及びD01カラム測定時)

3. 燃料体からのガンマ線放出率の解析

測定時における燃料体のガンマ線放出率分布を評価するため、HTTR核特性解析コードシステム^⑥及び同位体生成・消滅計算コードORIGEN-JR^⑦による解析を行った。

3. 1 解析方法

燃料体からの放出ガンマ線強度を解析するフローを第3.1.1図に示す。燃料体等の諸元データを元に、燃料格子計算コードDELIGHT-7及び中性子輸送計算コードTWOTRAN-IIにより、炉心計算用群定数を作成し、3次元拡散計算コードCITATION-1000VPにより、炉心内の出力密度分布を燃料体毎に計算する。各燃料体の出力密度分布及び照射時間、冷却時間から同位体生成・消滅計算コードORIGEN-JRを用いて各燃料体の放出ガンマ線強度を算出した。

実際の出力上昇試験(1),(2)における運転履歴から第3.1.2図の運転パターンを設定した。原子炉出力は3MW、9MW、15MWの3パターンに限定し、出力の上昇及び下降過程を含め燃焼度を保存するようにステップ状の運転パターンを設定した。

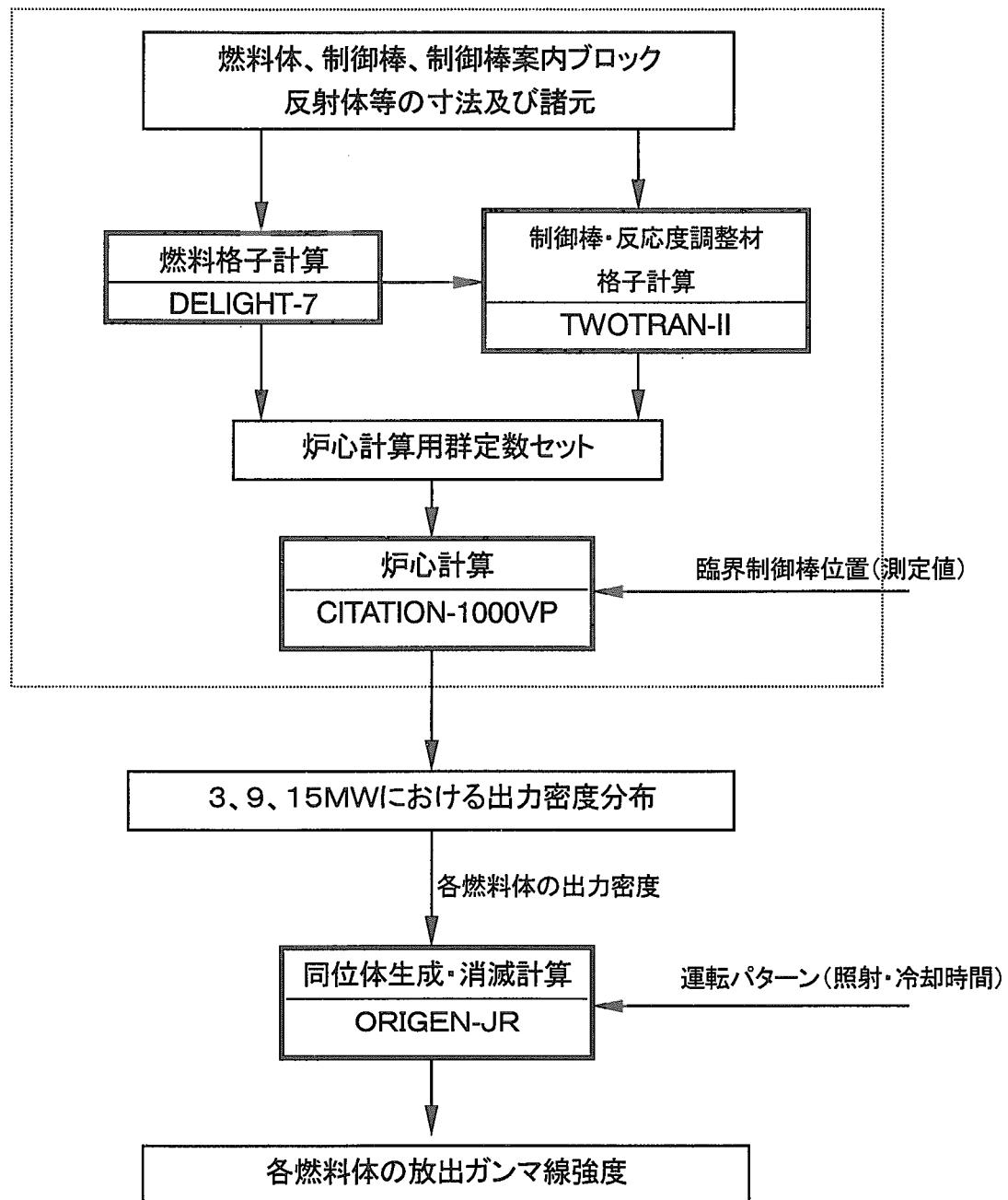
炉内出力密度分布の解析はHTTR核特性解析コードシステムを用いて行った。解析に用いたモデルは、臨界試験に用いた24メッシュ非均質モデル^⑧を用いて行った。解析の条件としては、それぞれ10日燃焼してXeが飽和した状態を解析値とした。また、臨界制御棒位置は測定で得られたものを使用し、制御棒による出力密度分布への影響を考慮した。

燃料体からの放出ガンマ線強度の解析は、解析した出力密度分布及び設定した運転パターンから同位体生成・消滅計算コードを用いて行った。原子炉がスクラムした7月8日からB01カラム測定の10月30日まで115日であるので、照射終了後120日の値を解析値とした。また、燃焼度が約280MWd/tと小さいため、核分裂生成物からのガンマ線放出のみを解析値として用いた。

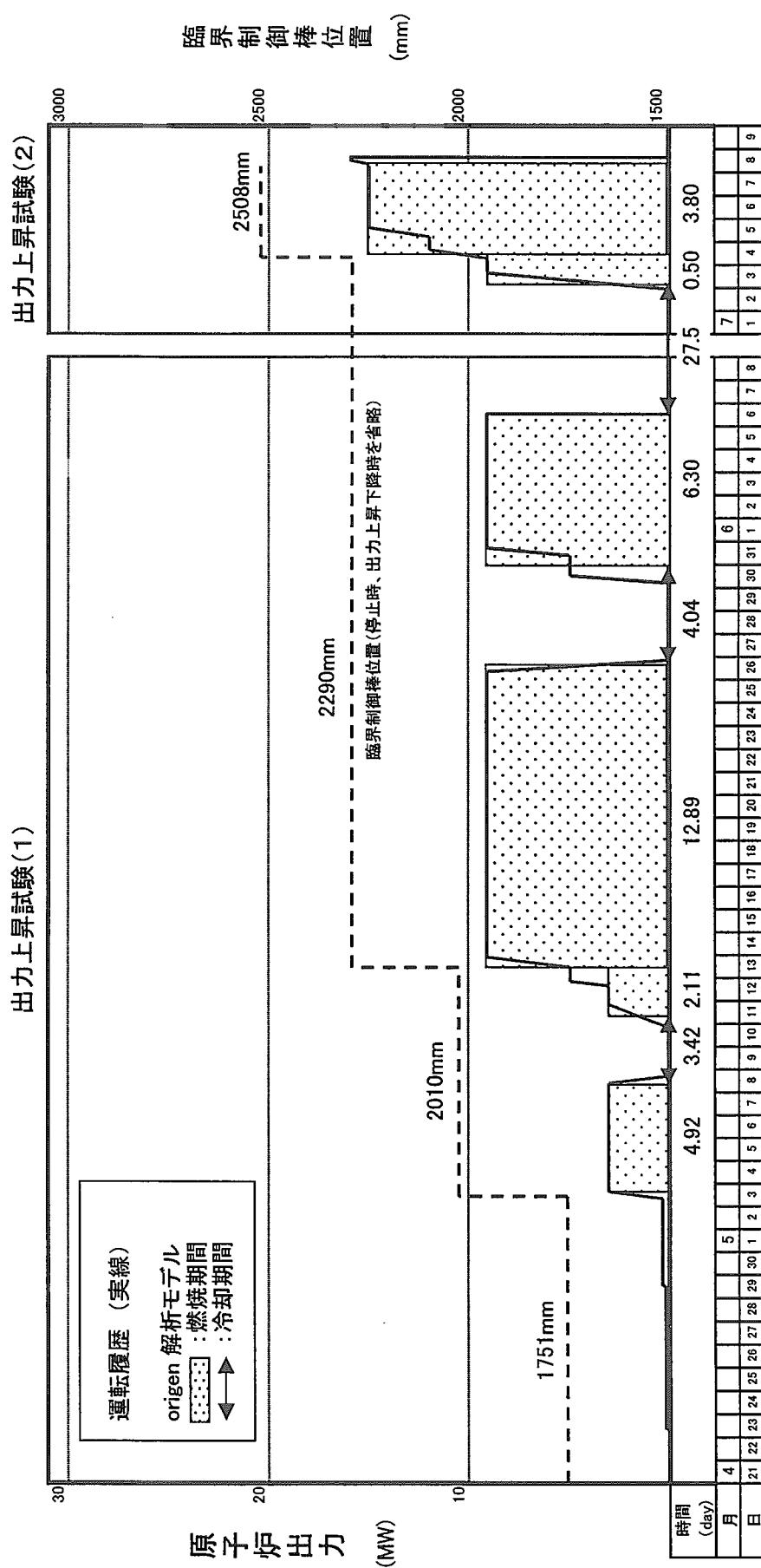
3. 2 解析結果

第3.2.1図～第3.2.3図に解析により得られた3MW、9MW及び15MWの炉内出力密度分布を示す。また、第3.2.4図に照射後120日の各燃料体からの放出ガンマ線強度(photon/sec)をカラム毎に示す。炉内の出力密度分布は、制御棒位置の影響を受け、出力が高くなり制御棒位置が高くなるにつれピークの位置が炉心の上部に移動していく。また、放出ガンマ線強度分布は、照射期間の長い9MWの出力密度分布の形に近いことが予測される。

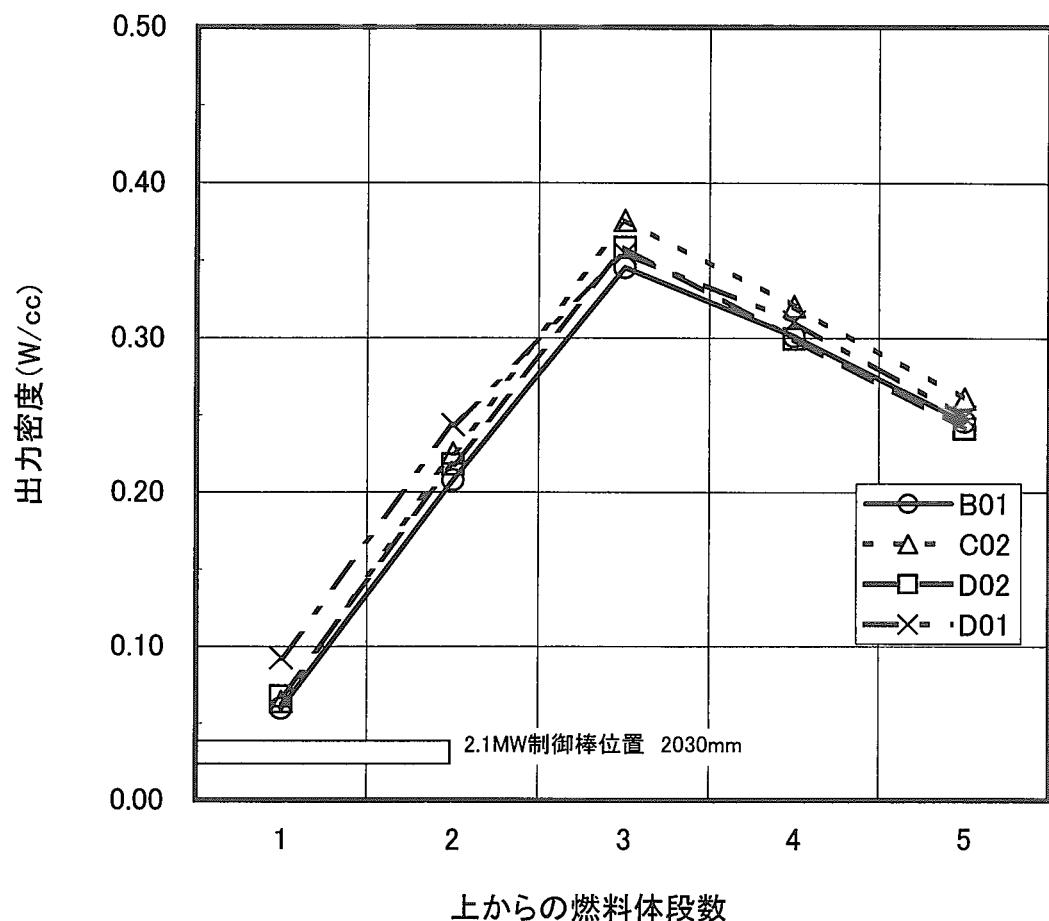
HTTR核特性解析コードシステム



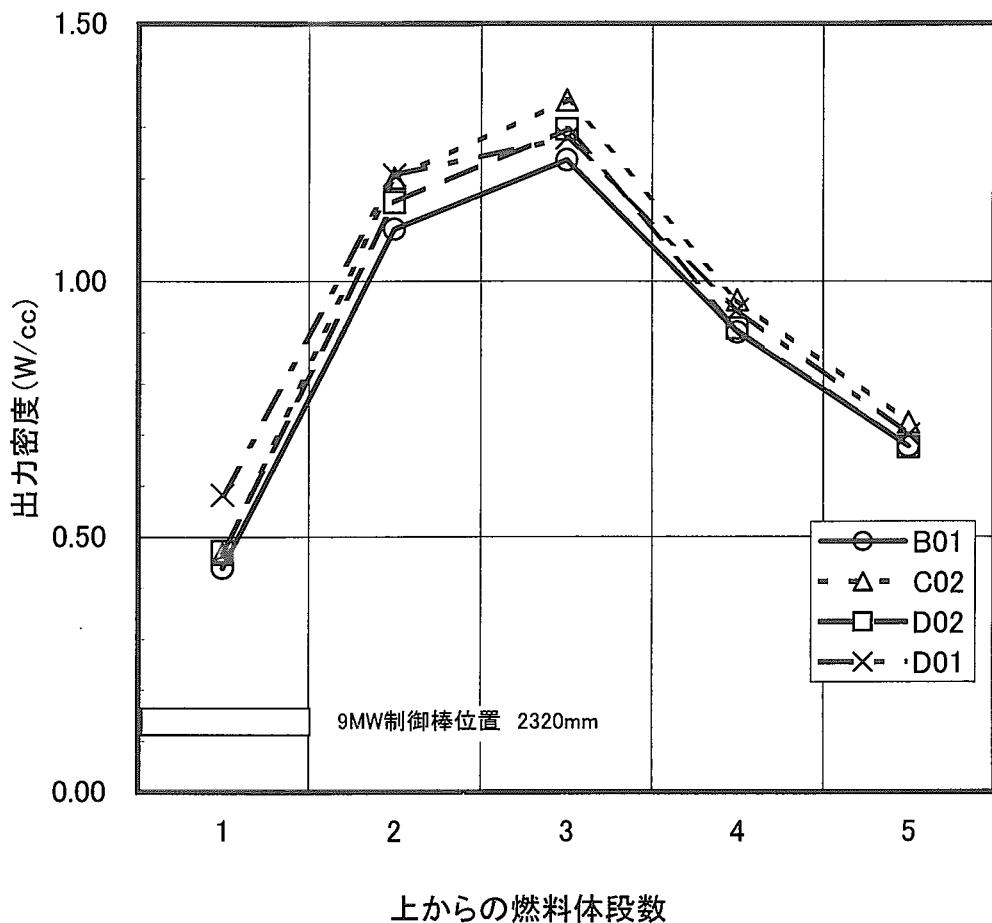
第 3.1.1 図 燃料体からのガンマ線強度解析フロー



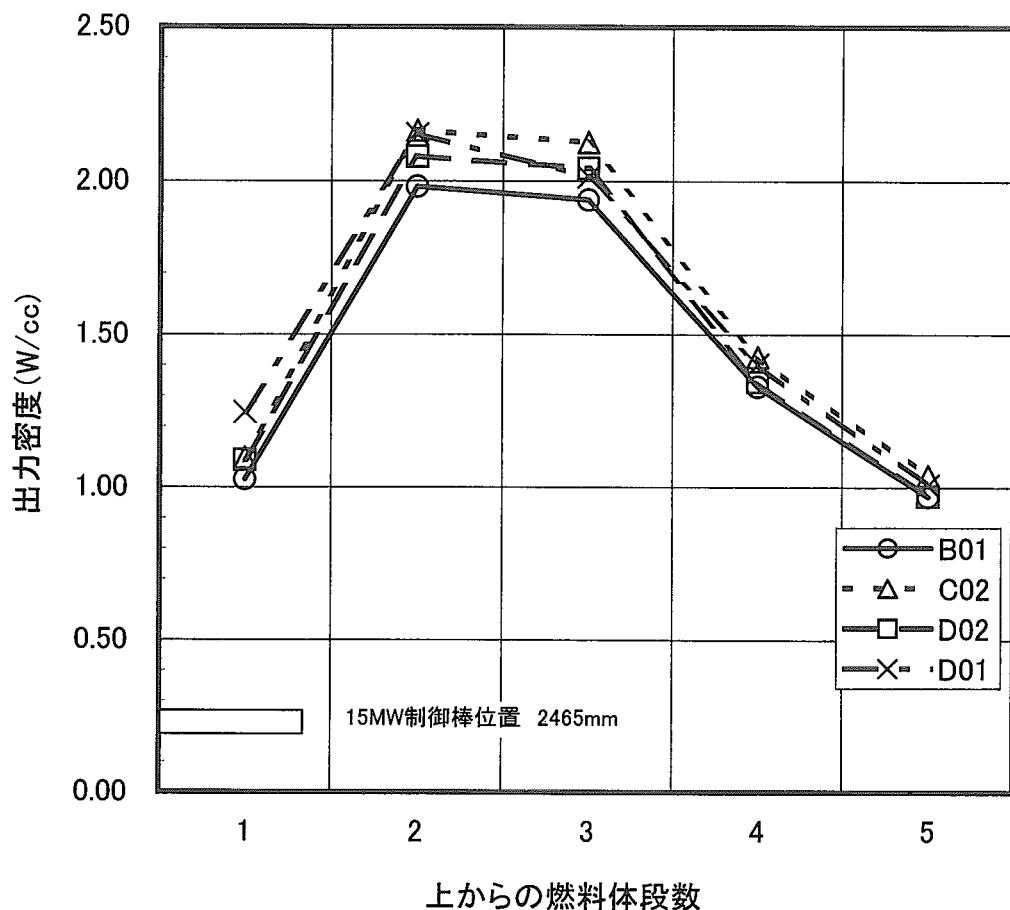
第3.1.2図 解析に用いた運転パターン



第3.2.1図 3MW (2.1MW)での出力密度分布(燃料ブロック平均)
(計算条件:10日燃焼、臨界制御棒位置2030mm)

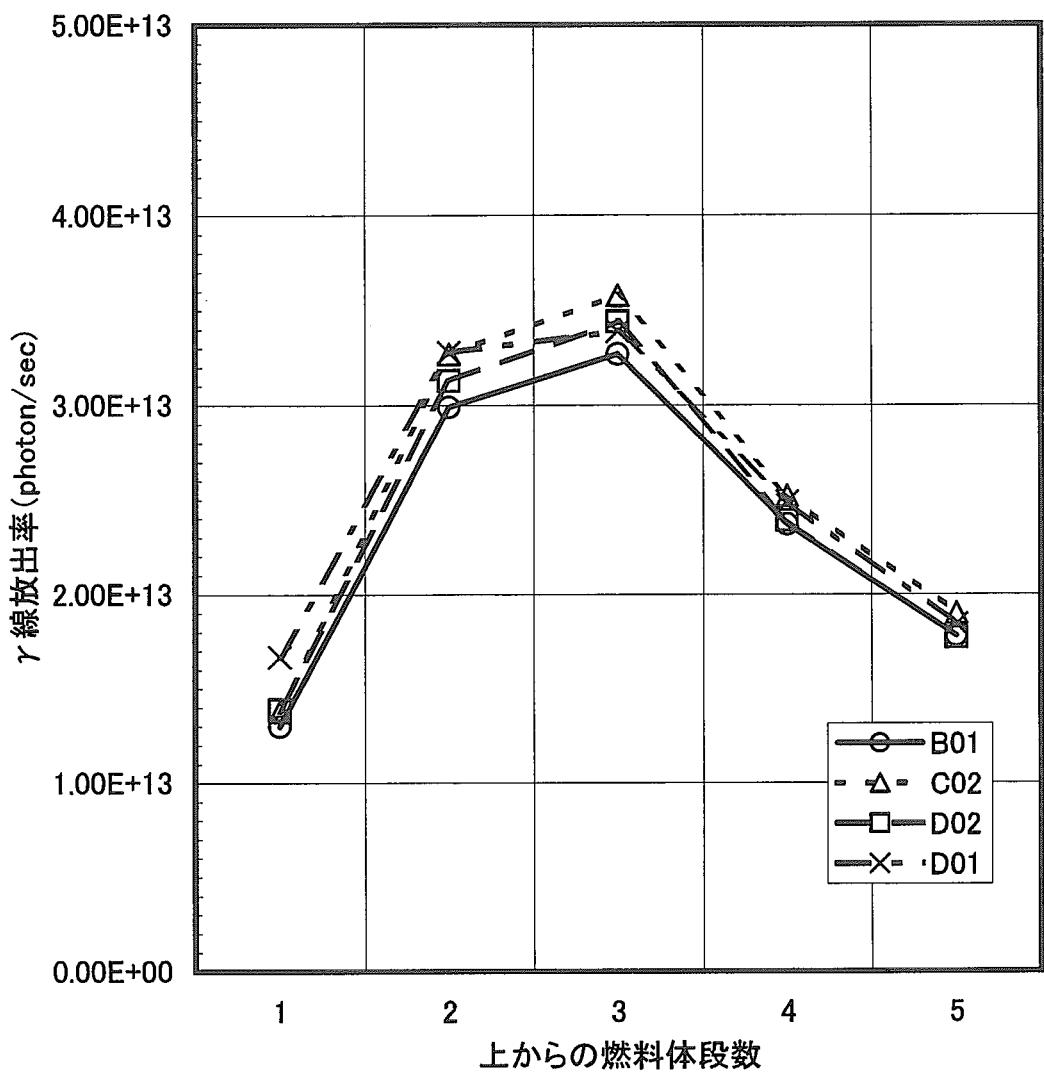


第3.2.2図 9MWでの出力密度分布(燃料ブロック平均)
(計算条件:10日燃焼、臨界制御棒位置2320mm)



段	出力密度(W/cc)			
	B01	C02	D02	D01
1	1.03	1.10	1.09	1.25
2	1.98	2.16	2.08	2.15
3	1.94	2.13	2.04	2.01
4	1.33	1.43	1.35	1.40
5	0.97	1.04	0.97	1.01

第3.2.3図 15MWでの出力密度分布(燃料ブロック平均)
(計算条件:10日燃焼、臨界制御棒位置2465mm)



段	γ 線放出率 (photon/sec)			
	B01	C02	D02	D01
1	1.30E+13	1.38E+13	1.39E+13	1.67E+13
2	2.99E+13	3.27E+13	3.13E+13	3.28E+13
3	3.27E+13	3.58E+13	3.44E+13	3.39E+13
4	2.37E+13	2.52E+13	2.39E+13	2.49E+13
5	1.78E+13	1.90E+13	1.77E+13	1.84E+13
合計	1.17E+14	1.27E+14	1.21E+14	1.27E+14

第3.2.4図 運転停止120日後のガンマ線放出率

4. 測定結果

本測定作業は、燃料交換機の移動等の準備作業も含め平成 12 年 10 月 18 日から平成 12 年 11 月 21 日の計 35 日間かけて行った。そのうち測定は、平成 12 年 10 月 30 日(B01),10 月 31 日(B01),11 月 1 日(C02),11 月 14 日(D02)及び 11 月 15 日(D01)の計 5 日間行った。

4.1 GM 管及び CZT 検出器による結果

測定したカラムの燃料体 20 体について、それぞれバックグラウンド測定、燃料体取り出し時の測定、燃料体装荷時の 3 種類の測定を行った。バックグラウンド測定は、燃料体取り出し時の測定において、測定を行ってから次の測定を行う間に行い、すでに燃料交換機が取り込んでいる燃料体からの影響を補正するために用いた。3 種類の測定における測定区間を第 4.1.1 図に示す。

4.1.1 GM 管の低レンジ用から高レンジ用への変更について

測定の前段階において、GM 管及び CZT 検出器で十分な計数率のデータが取得可能かどうかを判断するため、B01 カラムの 1 段目及び 2 段目について予備測定を行った。GM 管について、計測範囲の異なる 2 種類の検出器を用意し、必要に応じて交換を行うこととした。

予備測定の結果、あらかじめ設置してある GM 管（以下、低レンジ用 GM 管という）の計数率が予想していた値よりも高く、特に 2 段目については仕様上の計数率上限に近い値であり、数え落としがかなり多くなっていると判断した。また、解析によると、今後測定する燃料体にはさらに高いガンマ線放出率を持つものがあることが予想され、さらに、B01 カラムは収納筒を通して燃料体の角を見ていることになり、燃料体側面を見ることになる D02,D01 カラムには収納筒に燃料体が直接見える窓があるので、そこでは、さらに大きな計数率が予想される。そのため、GM 管については、不感時間がより短く、感度係数が低い GM 管（以下、高レンジ用 GM 管という）に変更することとした。低レンジ用 GM 管による測定データを第 4.1.2. 図及び低レンジ用 GM 管と高レンジ用 GM 管の仕様比較を第 4.1.1 表に示す。

その後、高レンジ用 GM 管による測定を行ったところ、数え落としの少ないデータが得られた（高レンジ用 GM 管は数え落とし補正是最大で 1% 程度）。低レンジ用 GM 管の数え落とし補正の適用範囲を見るため、高レンジ用 GM 管による測定結果と低レンジ用 GM 管の数え落とし補正を行った測定結果を比較した。両者を比較したものを見たものを第 4.1.3 図及び第 4.1.4 図に示す。その結果、低レンジ用 GM 管の補正值と高レンジ用 GM 管の値は燃料体 1 段目において、分布の形状についてよい一致を示すが、燃料体 2 段目については、低レンジ用 GM 管の補正值は 15000 カウント付近から大きく上昇し、高レンジ用 GM 管の値と形状について大きく異なる。これら、低レンジ用 GM 管については計数率が大きすぎるので一般的な数え落とし補正が適用できない範囲にあることがわかる。よって、低レンジ用 GM 管から高レンジ用 GM 管の交換は妥当なものと考える。

4.1.2 GM 管による軸方向放出ガンマ線強度分布

GM 管は 1 秒間隔で計測数の記録を行っているので、燃料体と GM 管が直面している時のデータは燃料体一体（燃料体長さ 580mm）当たり燃料体取り出し時で約 70 点、燃料体装荷時で約 12 点である。燃料体と GM 管が直面している時のデータを燃料体から放出されるガンマ線とした。燃料体と GM 管が直面している時のデータ選択は、燃料体取り出し時については、計数率の立ち上がり及び下降時の中間付近が燃料体端部に当たるとし、その間の 70 点を選択するようにして行った。また、燃料体装荷時については、計測数が大きい順に 12 点のデータを取り出すようにして行った。

また、不感時間及びバックグラウンドの補正、測定誤差の処理を行った。不感時間による数え落としの補正の方法は以下の式によった。

$$n = \frac{m}{1 - m\tau}$$

ここで、

n : 真の計数率 (counts/sec)

m : 測定された計数率 (counts/sec)

τ : 不感時間 (sec)

バックグラウンドの補正は、バックグラウンド測定から燃料体がドアバルブを通過しない状態の平均の計数率を算出し、それを差し引くことによって行った。測定誤差は 1 秒間隔に測定された計測数がポアソン分布に従うものとして、標準偏差の 1σ を測定誤差とした。

各カラムについて、選択した燃料体部のデータを炉心内での配置と同じようにつなげたものを第 4.1.5 図～第 4.1.8 図に示す。「2.2 燃料交換機の運転の概要」で述べたように、検出器、燃料体及び収納筒の向きがカラム毎に異なるので、カラム毎に測定条件が異なり、測定結果は各カラムに特有な違いがでてくる。各カラムでの検出器、燃料体及び収納筒の位置関係は、第 4.1.9 図に示すようになっている。B01 カラムと C02 カラムについては、GM 管に直面する燃料体の向きが 180° 異なるので、C02 カラム測定での GM 管は燃料棒でなくダウエルピンのある黒鉛部に直面することになり、計測率は小さくなっている。また、B01 と C02 カラムと異なり、D02 と D01 カラムは構造物が複雑なスパイクがある収納筒の面と検出器が直面するため、収納筒の構造物による遮へい効果による計数率の変動が見られる。

4.1.3 CZT 検出器によるガンマ線スペクトル

CZT 検出器によるガンマ線スペクトルは、Cs-137 の放出ガンマ線 (662keV) から燃焼度を評価するために用いることを考えていた。エネルギー校正は、測定前に標準線源の Cs-137 を用いて行った。

ガンマ線スペクトルの測定結果の代表的なものとして、C02 カラムの燃料体 3 段目のものを第 4.1.10 図に示す。測定結果を見ると、760keV 付近に最も大きなピークが見られ、そのエネルギーのガンマ線放出が支配的なものになっている。Cs-137 による明確な放出ピークは見いだせなかった。これは、冷却期間が短いため、短半減期核種の寄与が大きいためと考えられる。

4.1.4 燃料体毎の放出ガンマ線軸方向相対分布

各カラムについて燃料体からの放出ガンマ線を積算し、それらの平均値との比をそのカラムの燃料体毎の軸方向相対分布とした。

GM 管の場合は、各燃料体について選択した燃料体部の測定値を積算し、それら積算値の平均値との比を求めた。各測定値は測定誤差を持っており、積算値の測定誤差として以下の式を用いた。

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum \sigma_i^2}}{\sum s_i} \quad (\sigma_i = \sqrt{s_i})$$

ここで、

σ : 積算値の測定誤差(-)

σ_i : 測定値の測定誤差(-)

s_i : 測定値 (counts/sec)

なお、積算値の場合、各測定値の測定誤差は 3σ として積算値の測定誤差を算出した。

CZT 検出器の場合は、全チャンネルについて、すべての計測数を積算し、それら積算値の平均値との比を求めた。また、測定時間中のバックグラウンドの寄与を差し引くことにより補正を行った。

各カラムについての燃料体毎の放出ガンマ線軸方向相対分布についての結果を第 4.1.2 表～第 4.1.5 表に示す。また、それぞれのカラムについて、GM 管による燃料体取り出し時、GM 管による燃料体装荷時、CZT 検出器による燃料体取り出し時、CZT による燃料体装荷時の値を比較したものを第 4.1.11 図～第 4.1.14 図に示す。GM 管による燃料体取り出し時、燃料体装荷時の分布については、両者は測定誤差の範囲を越えるところもあるが概ね一致している。

4.1.5 解析値との比較

解析により得られた燃料体からの放出ガンマ線強度の平均値との比と測定値の軸方向相対分布の比較について、GM 管による燃料体取り出し時、GM 管による燃料体装荷時、CZT 検出器による燃料体取り出し時、CZT による燃料体装荷時のものを第 4.1.15 図～第 4.1.18 図に示す。測定値は解析値に比べ炉心上部が小さく、下部が大きい形となる傾向があり、臨界試験での中性子束分布と同様の傾向²⁾となっている。これは、炉心上部にある制御棒による中性子吸収の効果を解析が過小に見積もっている可能性があることによる考えられる。制御棒の中性子吸収効果を過小に見積もっていることは、制御棒価値を過小に評価することにつながり、臨界試験、出力上昇試験における制御棒価値の過小評価の傾向と一致するもの^{2,9)}であり、今後の検討が必要である。

4.2 エリアモニタによる結果

スタンドパイプ室に設置したエリアモニタは 24 時間連続で測定を行っているため、燃料体の取出及び装荷時のデータを取得している。

(1) B01 カラム及び C02 カラムでの測定結果

B01 カラム及び C02 カラムの測定では、燃料体は N1 スタンドパイプを通過する。高レンジのエリアモニタとして検出器 A 及び検出器 B を、低レンジのエリアモニタとして検出器 C を用いた。測定結果の例として、B01 カラムでの 2 段目の燃料体（上から 2 段目の燃料体）の取り出し及び装荷時の測定結果を第 4.2.1 図及び第 4.2.2 図に示す。このとき、検出器 B からは有意な信号を得ることができなかった。

検出器 C について、同一の燃料体の取り出し及び装荷時の結果を比較すると、ピークの値はほぼ同じである。しかし、ピークに達した後、取り出し時は 2 分ほど経過してから線量当量率がゼロとなっているのに対し、装荷時はピークに到達後 30 秒ほどで線量当量率がゼロとなっている。これは、第 2.2.2 図に示すように、燃料体は上方向から金属製のグリッパによってつり下げられて移動しているため、取り出し時は燃料体が検出器の位置を通り過ぎても燃料体からのガンマ線を測定できるのに対し、装荷時は、燃料体が検出器の位置を通り過ぎると、燃料体の上部にあるグリッパの遮へい効果のため、測定しなくなるためではないかと考えられる。

検出器 A の結果は検出器 C の結果と比較すると、取り出し時はピークの値が倍以上大きくなり、値のばらつきも大きく、ピークの後の減衰も緩やかである。これは、検出器 A の測定範囲が $10\mu\text{Sv}/\text{h}$ から $100\text{mSv}/\text{h}$ であるので、測定範囲下限付近での測定となること、検出器の特性の差等によるものと考えられる。

(2) D02 及び D01 カラムでの測定結果

D02 カラム及び D01 カラムの測定では、燃料体は N5 スタンドパイプを通過する。ここでは、高レンジのエリアモニタとして検出器 A を、低レンジのエリアモニタとして検出器 C 及び検出器 D を用いた。測定結果の例として、D02 カラムでの 2 段目の燃料体（上から 2 番目の燃料体）の取り出し及び装荷時の測定結果を第 4.2.3 図及び第 4.2.4 図に示す。

低レンジモニタである検出器 C 及び検出器 D では、取り出し時及び装荷時ともピークの値はほぼ同じ値になっている。取り出し時と装荷時の比較では、B01 カラム及び C02 カラムの時と同様に、取り出し時はピークから減衰する時間が長いのに対し、装荷時はピーク後の減衰が早くなっている。

検出器 A の結果も B01 カラム及び C02 カラムの時と同様に、取り出し時のほうがピークが大きくなっている。しかしながらその差は小さくなっている。

(3) 線量当量率の積算値による比較

各燃料体毎の比較を行うため、線量当量率の積算値による比較を行った。積算値の算出は、それぞれの検出器について、線量当量率が上昇し始めるまえの 5 分間の平均値をバックグラ

ウンドとし、これを差し引いた値を 15 分間にわたって積算して求めた。それぞれのカラムの燃料体毎の評価結果を第 4.2.1 表から第 4.2.4 表に示す。また、カラム毎に、カラムの平均値に対するブロックの値の相対値の分布と解析結果の比較の、それぞれの検出器についての結果を第 4.2.5 図から第 4.2.14 図に示す。

検出器 A による結果は、いずれのカラムにおいても取り出し時と装荷時の結果の差が大きく、かつ解析値との差も大きい。これは、検出器の測定範囲の下限付近での測定によるものであると考えられる。これに対し、低レンジの検出器である検出器 C 及び検出器 D の結果は、検出器 A と比較すると取り出し時と装荷時の結果がよく一致している。解析値との比較でも、床上ドアバルブ(1)に設置した GM 管による結果とは異なり、全体によく一致しているように見える。しかしながら、炉心上部では測定値が解析値より低めになり、炉心下部では高めになっていること等 GM 管による測定結果との類似点が見られる。

次に、エリアモニタによる測定では、GM 管や CZT 検出器の条件と比較して燃料体と検出器の距離があること、燃料体による空間線量率の測定であり方向依存性や収納筒の影響が GM 管や CZT 検出器の結果と比較して小さいと考えられることから、カラム間の比較が可能であると考えた。そこで、カラム毎に線量当量率を積算した結果の比較を行った。結果を第 4.2.5 表に示す。ここでは、各ブロックの積算値を加算してカラムの線量当量の積算値を求め、この平均値に対する各カラムの比を求めたものである。評価においては、測定日の違いによる計数率の変化を、ORIGEN-JR の解析結果を基に補正した。

それぞれのカラムの積算値の、平均値に対する割合の図及び解析値との比較を検出器毎に第 4.2.15 図と第 4.2.16 図に示す。

これらの図から、同じスタンドパイプを通過した B01 カラムと C02 カラムの比較では、この 2 つのカラムはほぼ同じ出力であるといえる。同様に、D02 カラムと D01 カラムの比較でも、この 2 つのカラムはほぼ同じ出力であるといえる。

しかしながら、通過するスタンドパイプが異なるれば検出器に対する位置関係は厳密には異なることから、これら 4 つのデータの定量的な比較はこのままでは困難であると考えられる。そのため、いずれの図でも C02 カラムと D02 カラムの間は破線でつないでいる。

このように、径方向の分布についての検討はこのままで困難であるので、今後 GM 管による測定結果と解析に基づく評価を通じてより詳細な検討を進める必要がある。

第 4.1.1 表 GM 管の仕様比較

	低レンジ用 GM 管	高レンジ用 GM 管
形式	ZP1201	ZP1301
感度 (cps/mGy/h)	1330	34.6
不感時間 (μs)	110	13
測定範囲 (mGy/h)	10 ⁻³ ～40	10 ¹ ～10 ⁴

第 4.1.2 表 B01 での計数率の積算値

段数	カウント数の積算値			
	GM 管		CZT 検出器	
取り出し	装荷	取り出し	装荷	
1	1.39E+04	2.31E+03	7.80E+04	1.34E+04
2	3.18E+04	5.22E+03	2.11E+05	4.20E+04
3	3.79E+04	6.34E+03	2.51E+05	5.30E+04
4	2.88E+04	4.81E+03	1.80E+05	3.66E+04
5	2.22E+04	3.67E+03	1.39E+05	2.51E+04
平均	2.69E+04	4.47E+03	1.72E+05	3.40E+04

段数	平均値に対する割合			
	GM 管		CZT 検出器	
取り出し	装荷	取り出し	装荷	
1	0.52	0.52	0.45	0.39
2	1.18	1.17	1.23	1.23
3	1.41	1.42	1.46	1.56
4	1.07	1.08	1.05	1.08
5	0.82	0.82	0.81	0.74

第 4.1.3 表 C02 での計数率の積算値

段数	カウント数の積算値			
	GM 管		CZT 検出器	
取り出し	装荷	取り出し	装荷	
1	8.61E+03	1.47E+03	8.79E+04	1.61E+04
2	2.18E+04	3.69E+03	2.60E+05	6.20E+04
3	2.69E+04	4.47E+03	3.25E+05	7.72E+04
4	2.01E+04	3.33E+03	2.23E+05	5.49E+04
5	1.54E+04	2.56E+03	1.51E+05	3.71E+04
平均	1.86E+04	3.10E+03	2.10E+05	4.95E+04

段数	平均値に対する割合			
	GM 管		CZT 検出器	
取り出し	装荷	取り出し	装荷	
1	0.46	0.47	0.42	0.33
2	1.17	1.19	1.24	1.25
3	1.45	1.44	1.55	1.56
4	1.08	1.07	1.06	1.11
5	0.83	0.82	0.72	0.75

第 4.1.4 表 D02 での計数率の積算値

段数	カウント数の積算値			
	GM 管		CZT 検出器	
取り出し	装荷	取り出し	装荷	
1	7.57E+03	1.12E+03	5.64E+04	8.86E+03
2	1.90E+04	2.72E+03	1.68E+05	2.75E+04
3	2.30E+04	3.44E+03	1.97E+05	3.59E+04
4	1.70E+04	2.65E+03	1.51E+05	2.47E+04
5	1.34E+04	1.97E+03	1.08E+05	1.65E+04
平均	1.60E+04	2.38E+03	1.36E+05	2.27E+04

段数	平均値に対する割合			
	GM 管		CZT 検出器	
取り出し	装荷	取り出し	装荷	
1	0.47	0.47	0.42	0.39
2	1.19	1.14	1.23	1.21
3	1.44	1.44	1.45	1.58
4	1.06	1.11	1.11	1.09
5	0.84	0.83	0.80	0.73

第 4.1.5 表 D02 での計数率の積算値

段数	カウント数の積算値			
	GM 管		CZT 検出器	
	取り出し	装荷	取り出し	装荷
1	9.31E+03	1.41E+03	8.22E+04	1.25E+04
2	1.92E+04	2.84E+03	1.72E+05	2.99E+04
3	2.18E+04	3.33E+03	1.86E+05	3.60E+04
4	1.75E+04	2.71E+03	1.52E+05	2.55E+04
5	1.28E+04	2.08E+03	1.10E+05	1.70E+04
平均	1.61E+04	2.47E+03	1.40E+05	2.42E+04

段数	平均値に対する割合			
	GM 管		CZT 検出器	
	取り出し	装荷	取り出し	装荷
1	0.58	0.57	0.59	0.52
2	1.19	1.15	1.22	1.24
3	1.35	1.35	1.33	1.49
4	1.09	1.09	1.08	1.05
5	0.79	0.84	0.79	0.70

第 4.2.1 表 エリアモニタによる B01 カラムの測定結果 (10 月 31 日測定)

段数	積算線量当量 [mSv]			
	検出器 A		検出器 C	
	取出	装荷	取出	装荷
1	1.73E+00	3.25E-01	4.42E-01	1.95E-01
2	3.43E+00	1.24E+00	9.98E-01	5.05E-01
3	4.08E+00	1.33E+00	1.05E+00	5.63E-01
4	2.68E+00	8.07E-01	7.42E-01	4.04E-01
5	2.33E+00	6.57E-01	5.71E-01	3.02E-01
合計	1.42E+01	4.36E+00	3.80E+00	1.97E+00
平均	2.85E+00	8.71E-01	7.60E-01	3.94E-01

段数	平均に対する線量当量比			
	検出器 A		検出器 C	
	取出	装荷	取出	装荷
1	0.61	0.37	0.58	0.50
2	1.20	1.42	1.31	1.28
3	1.43	1.53	1.38	1.43
4	0.94	0.93	0.98	1.03
5	0.82	0.75	0.75	0.77

第 4.2.2 表 エリアモニタによる C02 カラムの測定結果 (11 月 1 日測定)

段数	積算線量当量 [mSv]			
	検出器 A		検出器 C	
	取出	装荷	取出	装荷
1	1.85E+00	3.10E-01	4.13E-01	1.77E-01
2	3.46E+00	1.06E+00	9.89E-01	4.83E-01
3	3.86E+00	1.30E+00	1.13E+00	5.93E-01
4	2.50E+00	8.34E-01	7.74E-01	4.15E-01
5	1.88E+00	5.21E-01	5.96E-01	2.99E-01
合計	1.36E+01	4.03E+00	3.90E+00	1.97E+00
平均	2.71E+00	8.05E-01	7.81E-01	3.93E-01

段数	平均に対する線量当量比			
	検出器 A		検出器 C	
	取出	装荷	取出	装荷
1	0.68	0.39	0.53	0.45
2	1.28	1.32	1.27	1.23
3	1.42	1.61	1.45	1.51
4	0.92	1.04	0.99	1.05
5	0.69	0.65	0.76	0.76

第 4.2.3 表 エリアモニタによる D02 カラムの測定結果 (11月 14 日測定)

段数	積算線量当量 [mSv]					
	検出器 A		検出器 C		検出器 D	
	取出	装荷	取出	装荷	取出	装荷
1	9.36E-01	2.28E-01	3.19E-01	1.36E-01	5.27E-01	2.18E-01
2	2.38E+00	7.49E-01	7.09E-01	3.58E-01	1.15E+00	5.69E-01
3	2.59E+00	7.78E-01	7.97E-01	4.22E-01	1.26E+00	6.53E-01
4	1.81E+00	4.80E-01	5.31E-01	2.85E-01	8.49E-01	4.48E-01
5	1.16E+00	3.62E-01	4.18E-01	2.15E-01	6.82E-01	3.61E-01
合計	8.88E+00	2.60E+00	2.77E+00	1.42E+00	4.46E+00	2.25E+00
平均	1.78E+00	5.19E-01	5.55E-01	2.83E-01	8.93E-01	4.50E-01

段数	平均に対する線量当量比					
	検出器 A		検出器 C		検出器 D	
	取出	装荷	取出	装荷	取出	装荷
1	0.53	0.44	0.58	0.48	0.59	0.48
2	1.34	1.44	1.28	1.26	1.29	1.26
3	1.46	1.50	1.44	1.49	1.41	1.45
4	1.02	0.92	0.96	1.01	0.95	1.00
5	0.65	0.70	0.75	0.76	0.76	0.80

第 4.2.4 表 エリアモニタによる D01 カラムの測定結果 (11月 15 日測定)

段数	積算線量当量 [mSv]					
	検出器 A		検出器 C		検出器 D	
	取出	装荷	取出	装荷	取出	装荷
1	1.28E+00	2.96E-01	3.43E-01	1.48E-01	7.05E-01	3.22E-01
2	2.37E+00	6.27E-01	6.36E-01	3.11E-01	1.34E+00	7.03E-01
3	2.53E+00	7.01E-01	6.63E-01	3.34E-01	1.39E+00	7.56E-01
4	1.80E+00	5.47E-01	4.62E-01	2.52E-01	1.01E+00	5.74E-01
5	1.28E+00	2.88E-01	3.59E-01	1.75E-01	7.47E-01	4.41E-01
合計	9.24E+00	2.46E+00	2.46E+00	1.22E+00	5.19E+00	2.80E+00
平均	1.85E+00	4.92E-01	4.93E-01	2.44E-01	1.04E+00	5.59E-01

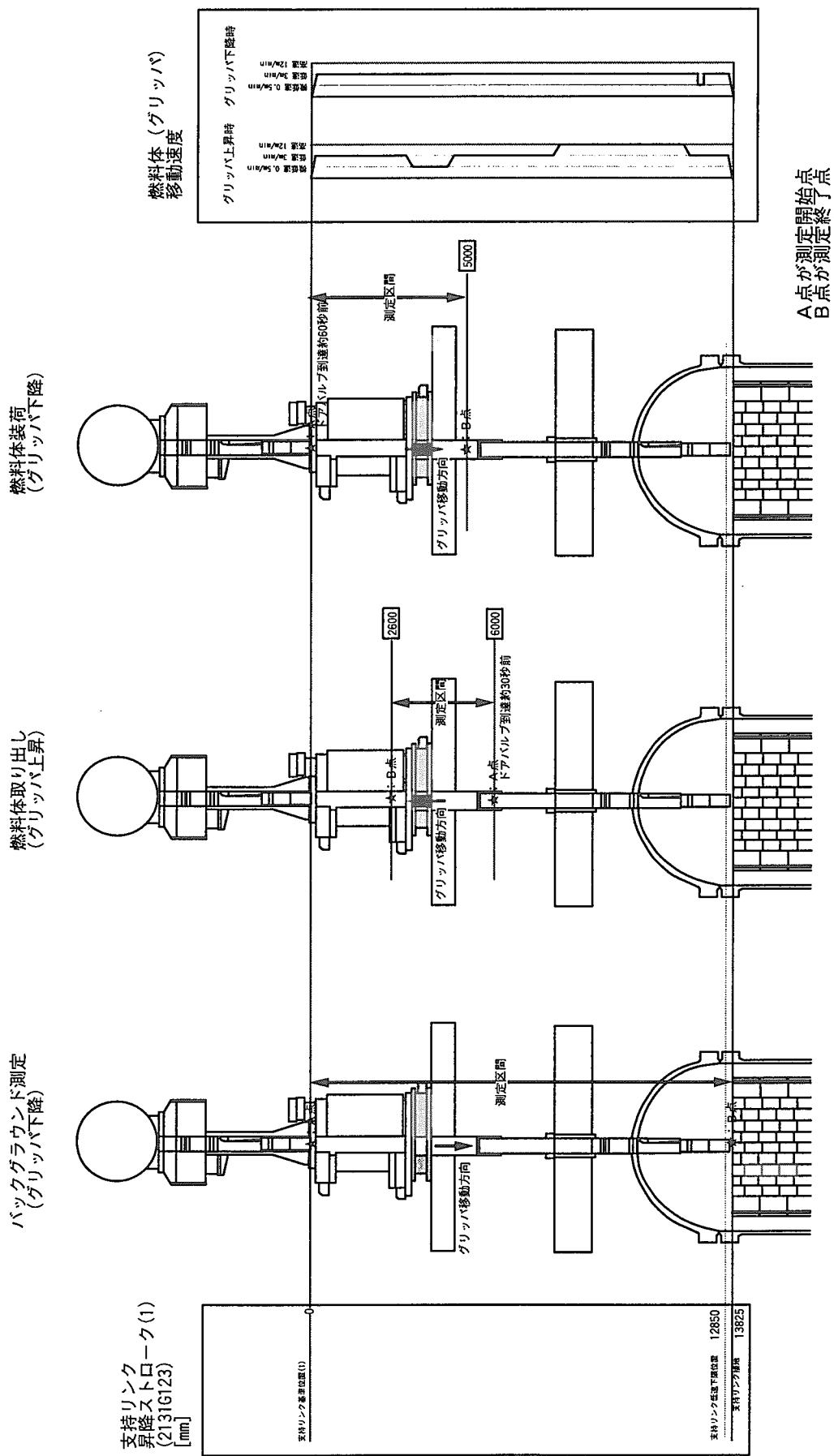
段数	平均に対する線量当量比					
	検出器 A		検出器 C		検出器 D	
	取出	装荷	取出	装荷	取出	装荷
1	0.69	0.60	0.70	0.61	0.68	0.58
2	1.28	1.27	1.29	1.27	1.29	1.26
3	1.37	1.43	1.35	1.37	1.34	1.35
4	0.97	1.11	0.94	1.03	0.97	1.03
5	0.69	0.59	0.73	0.72	0.72	0.79

第 4.2.5 表 エリアモニタによる各カラムでの線量当量の積分値の比較

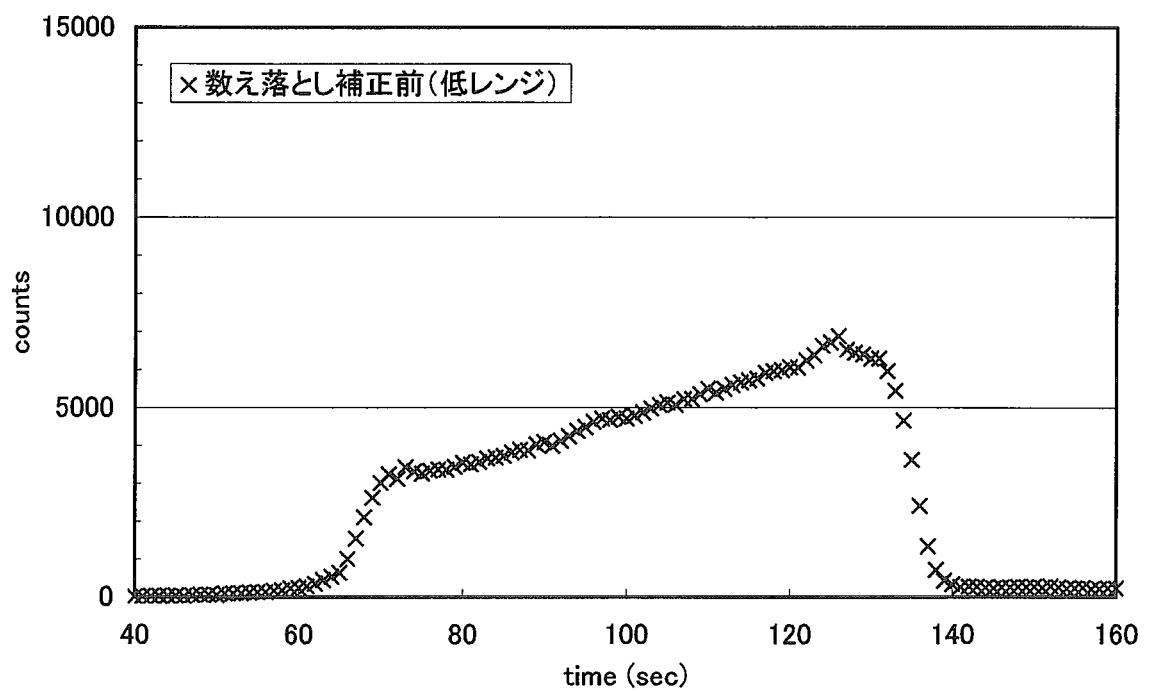
カラム	積算当量[mSv]			
	検出器 A		検出器 C	
	取出	装荷	取出	装荷
B01	1.42E+01	4.36E+00	3.80E+00	1.97E+00
C02	1.37E+01	4.07E+00	3.94E+00	1.99E+00
D02	1.02E+01	2.97E+00	3.17E+00	1.62E+00
D01	1.07E+01	2.84E+00	2.84E+00	1.41E+00
平均	1.22E+01	3.56E+00	3.44E+00	1.75E+00

カラム	平均に対する割合[-]			
	検出器 A		検出器 C	
	取出	装荷	取出	装荷
B01	1.17	1.22	1.11	1.13
C02	1.12	1.14	1.15	1.14
D02	0.83	0.83	0.92	0.93
D01	0.88	0.80	0.83	0.81

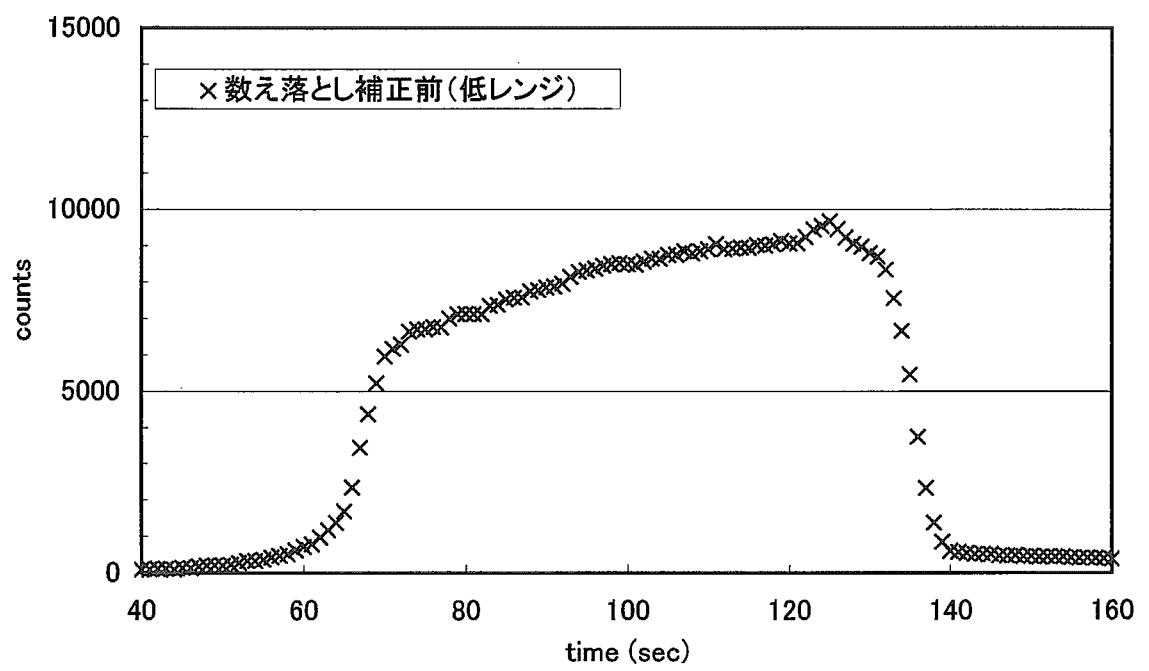
注：測定日の違いによる減衰効果補正済



第4.1.1図 バックグラウンド測定、燃料体取り出し時、燃料体装荷時の測定区間

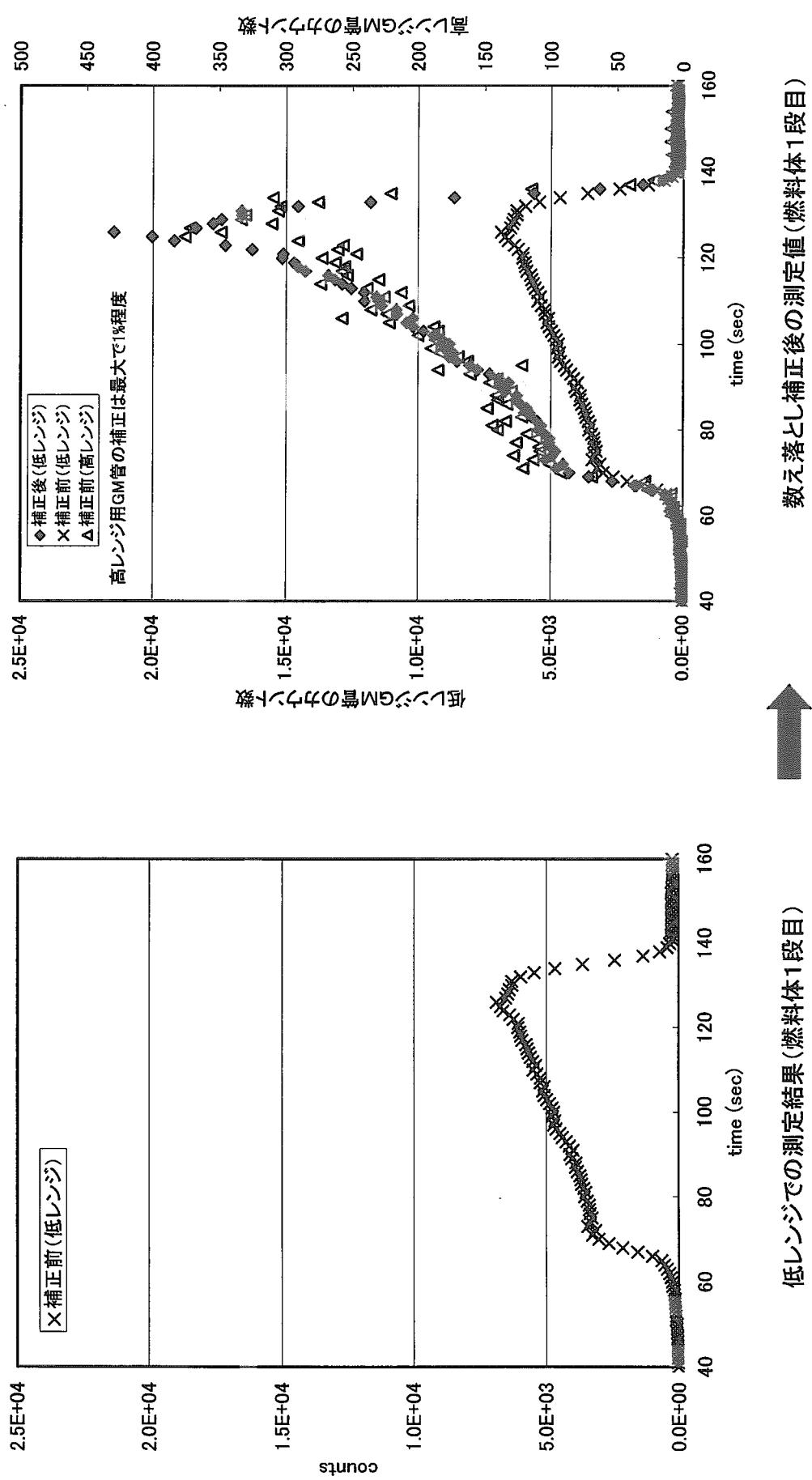


低レンジでの測定結果(燃料体1段目)

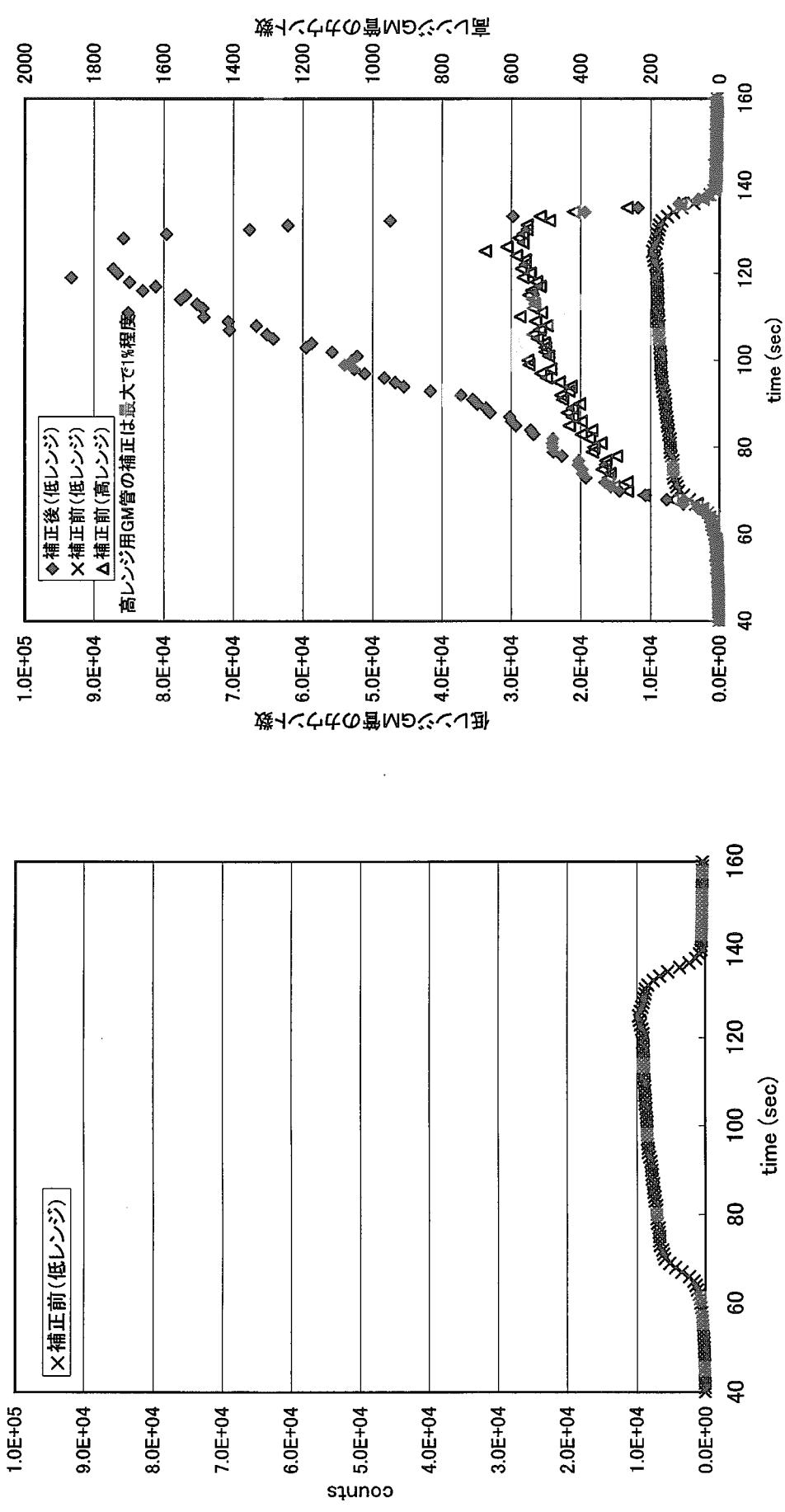


低レンジでの測定結果(燃料体2段目)

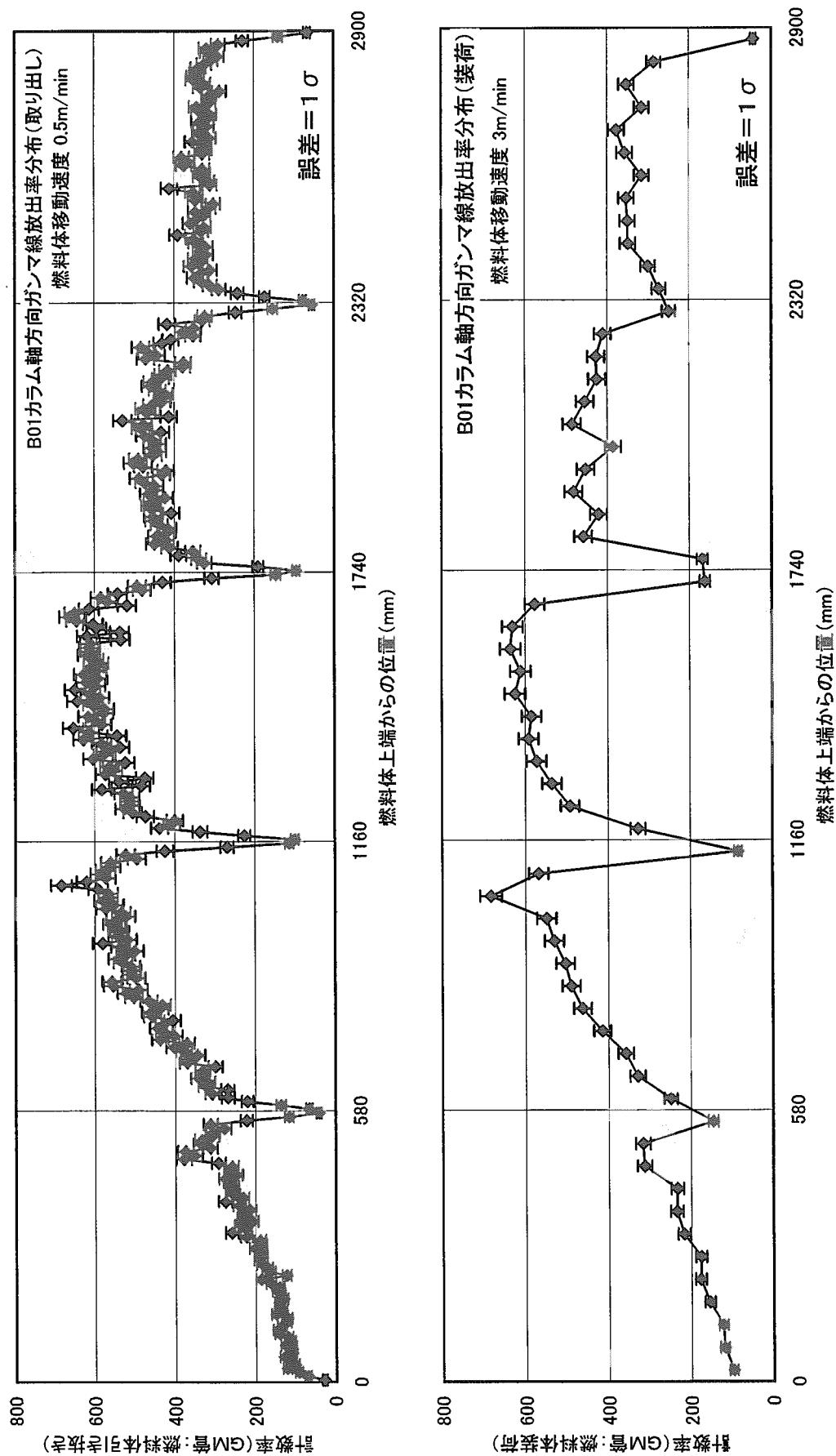
第4.1.2図 低レンジ用GM管の測定結果



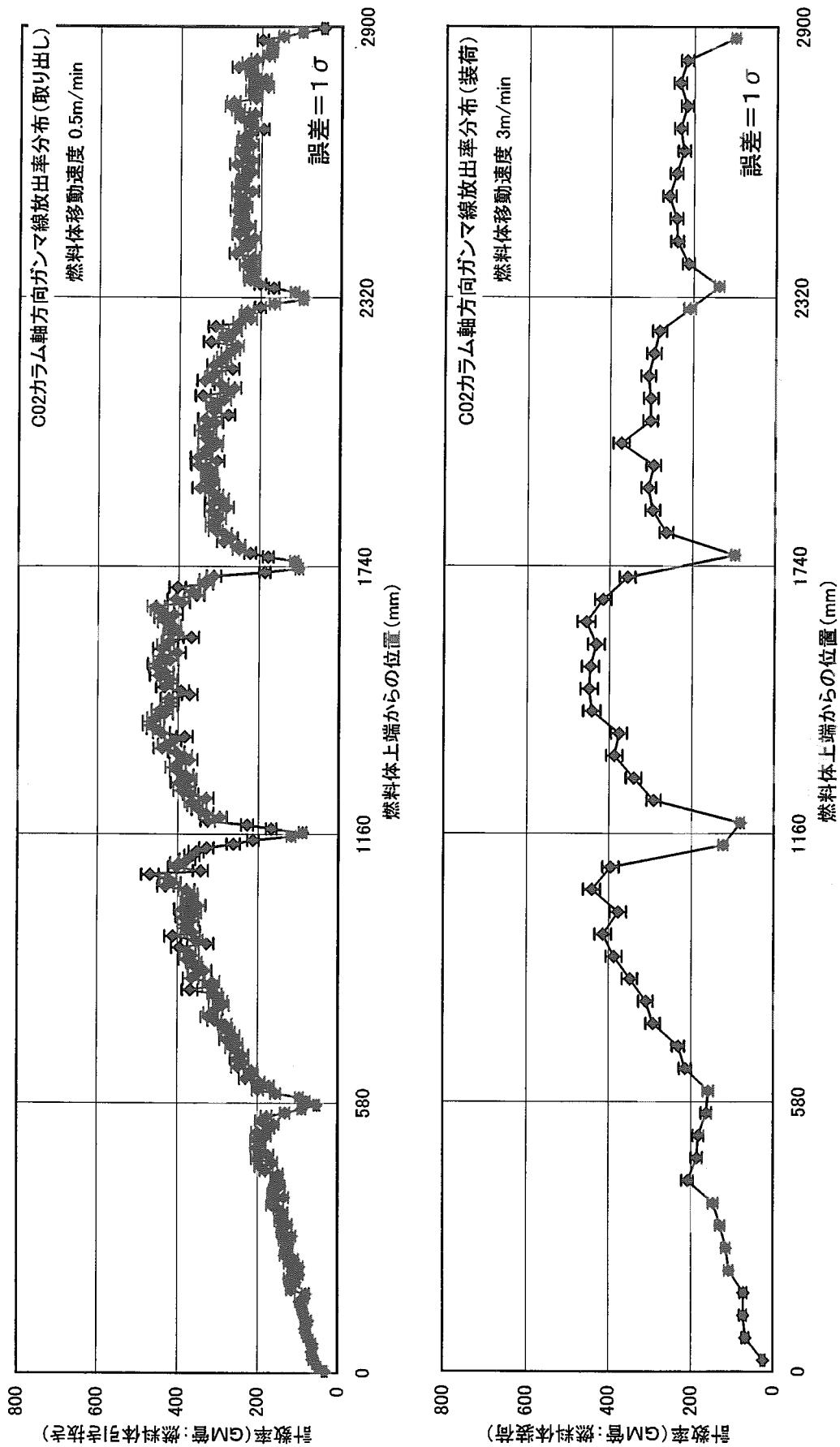
第4.1.3図 高レンジ用GM管の測定結果と低レンジGM管の数え落とし補正したものの比較(燃料体1段目)



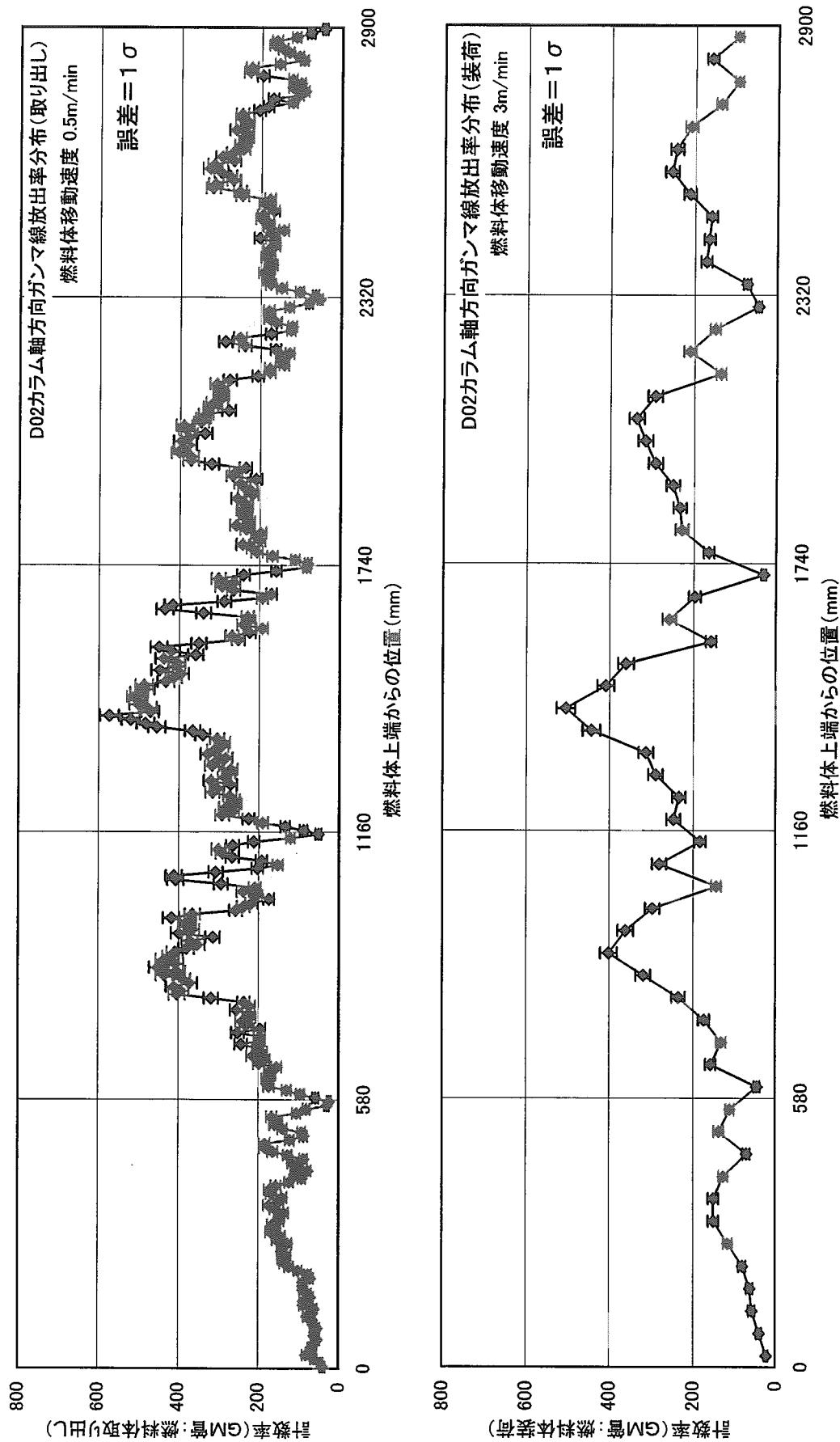
第4.1.4図 高レンジ用GM管の測定結果と低レンジGM管の数え落とし補正したものとの比較(燃料体2段目)



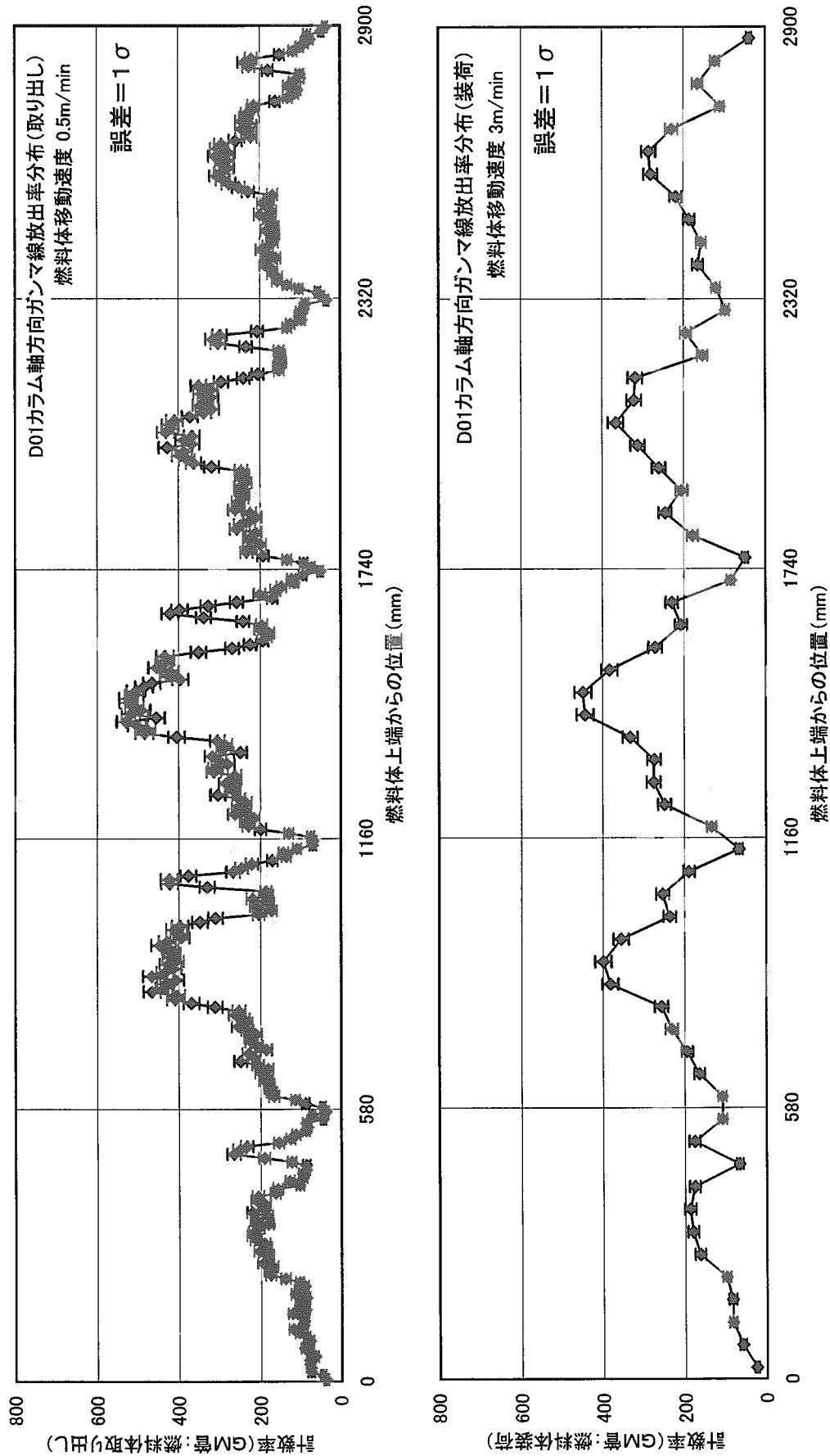
第4.1.5図 GM管による軸方向放出ガンマ線強度分布(B01)



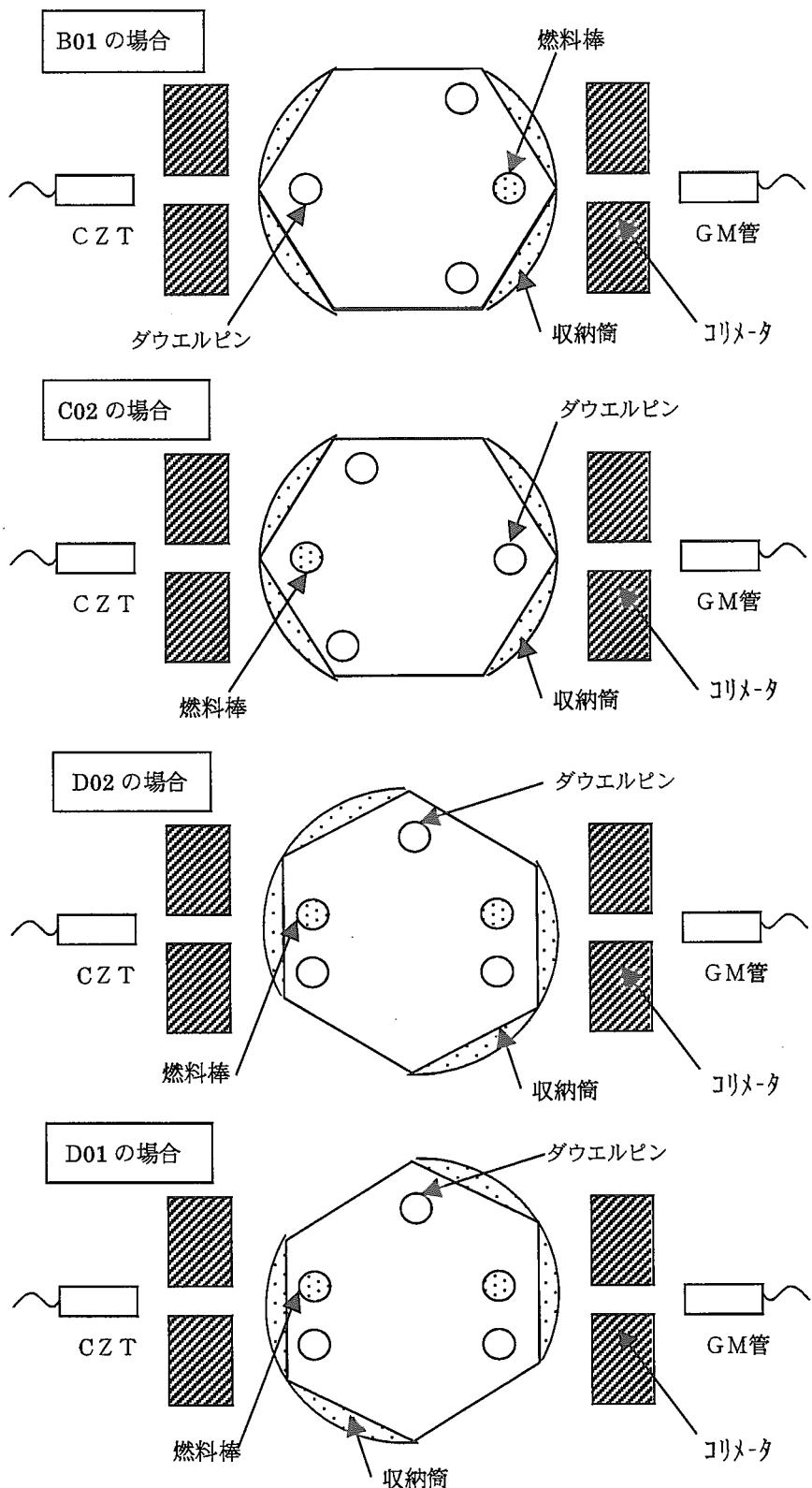
第4.1.6図 GM管による軸方向放出ガンマ線強度分布(C02)



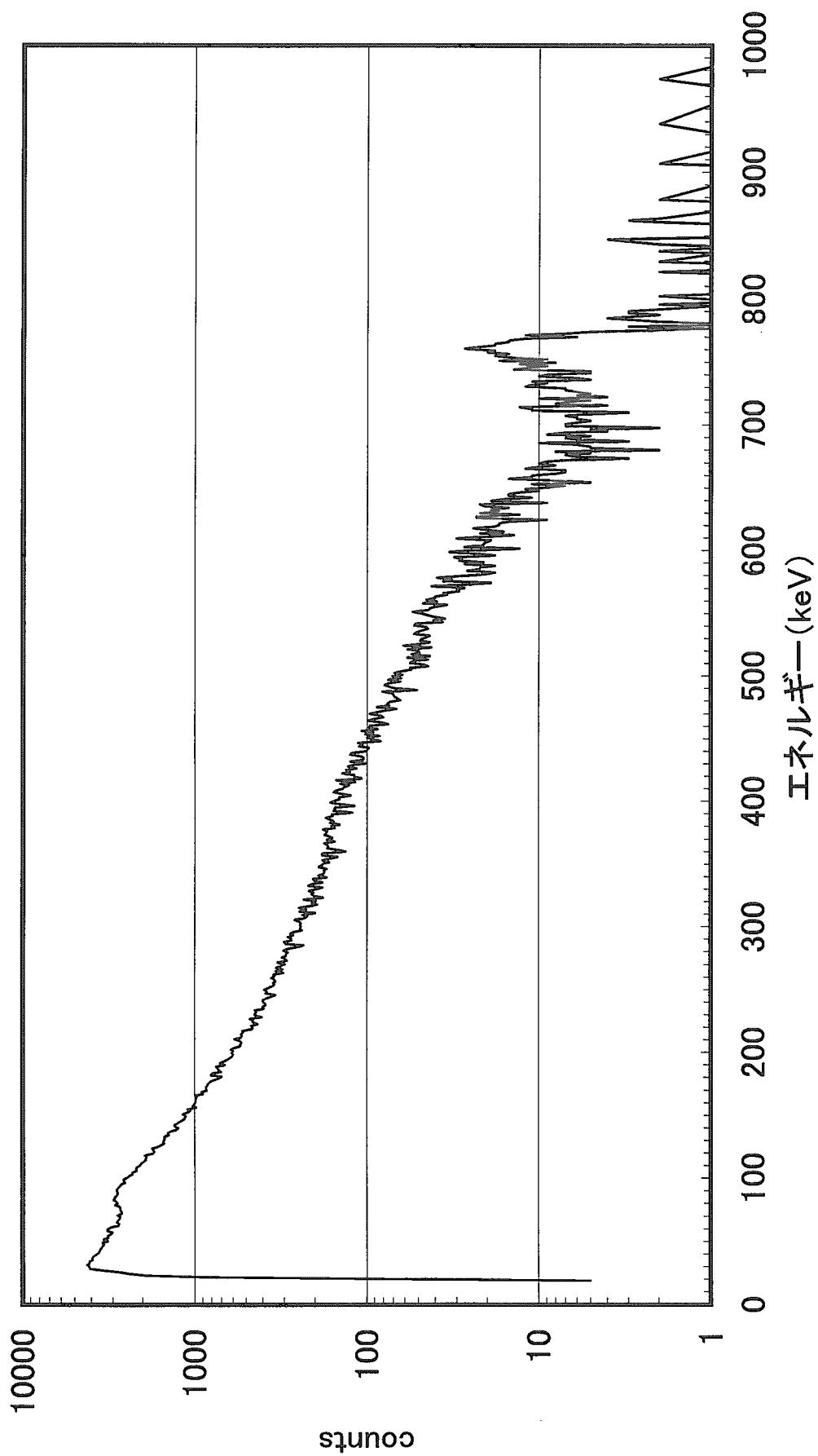
第4.1.7図 GM管による軸方向放出ガンマ線強度分布 (D02)



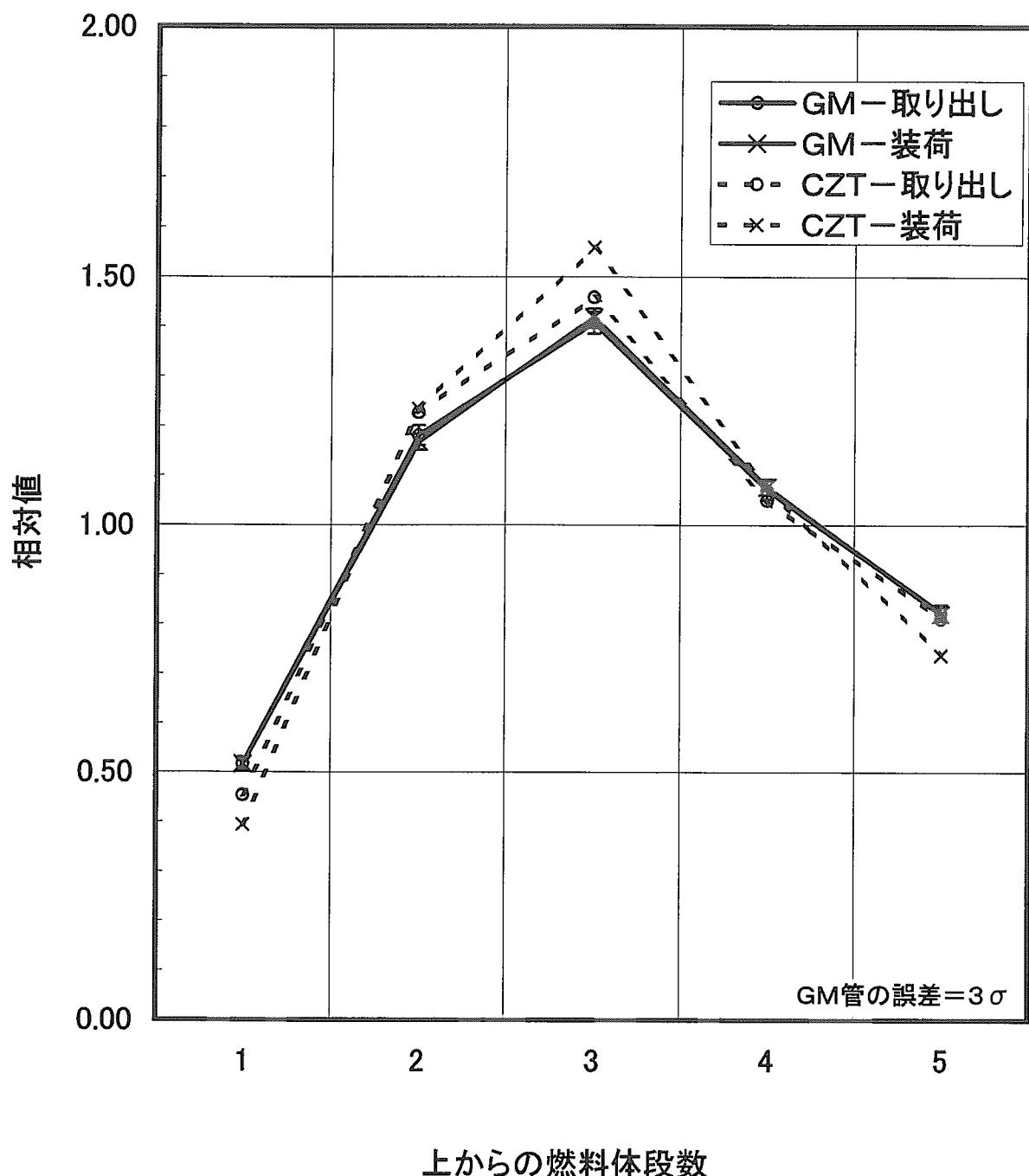
第4.1.8図 GM管による軸方向放出ガンマ線強度分布(D01)



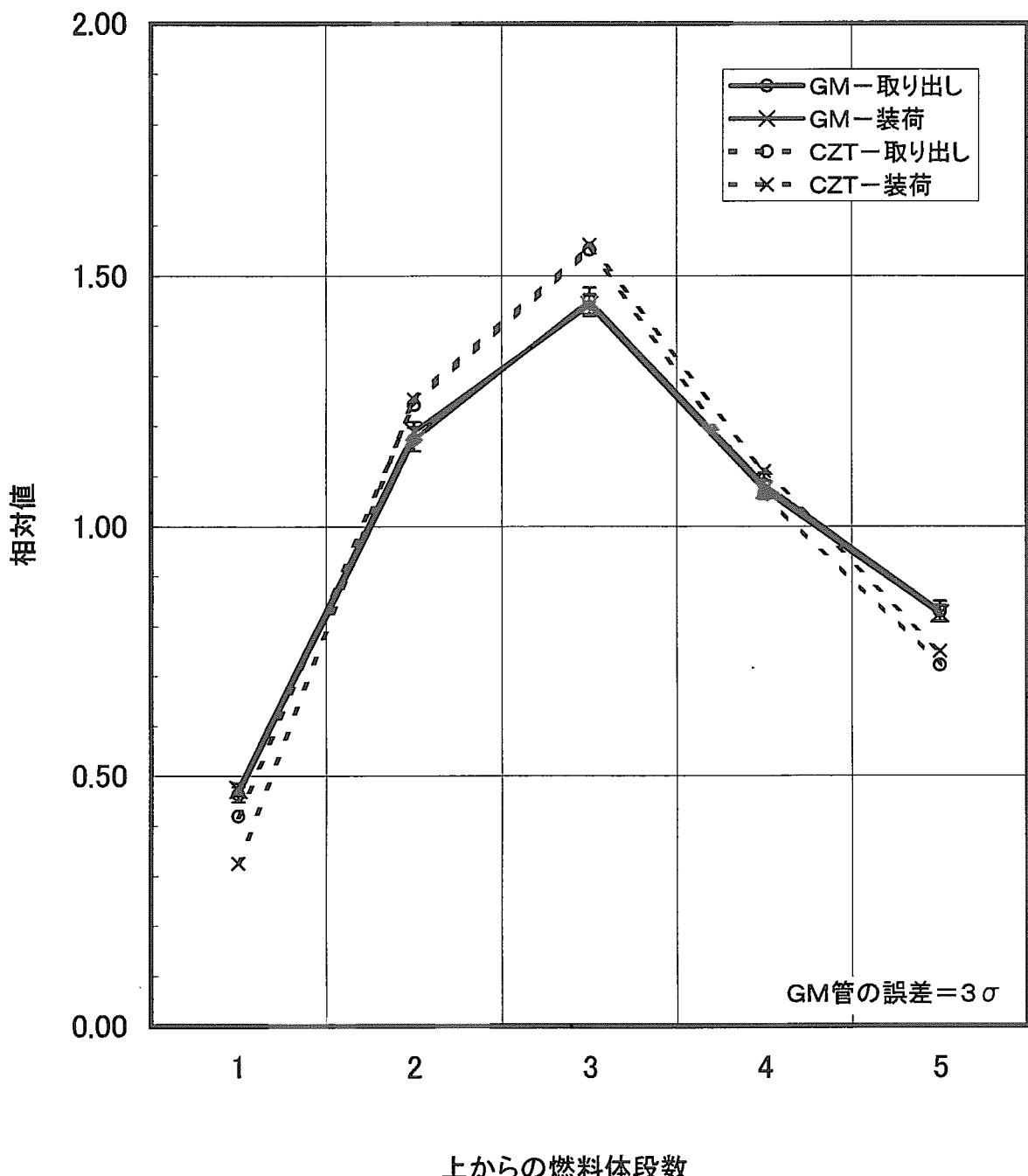
第 4.1.9 図 燃料体、検出器、収納筒の位置関係

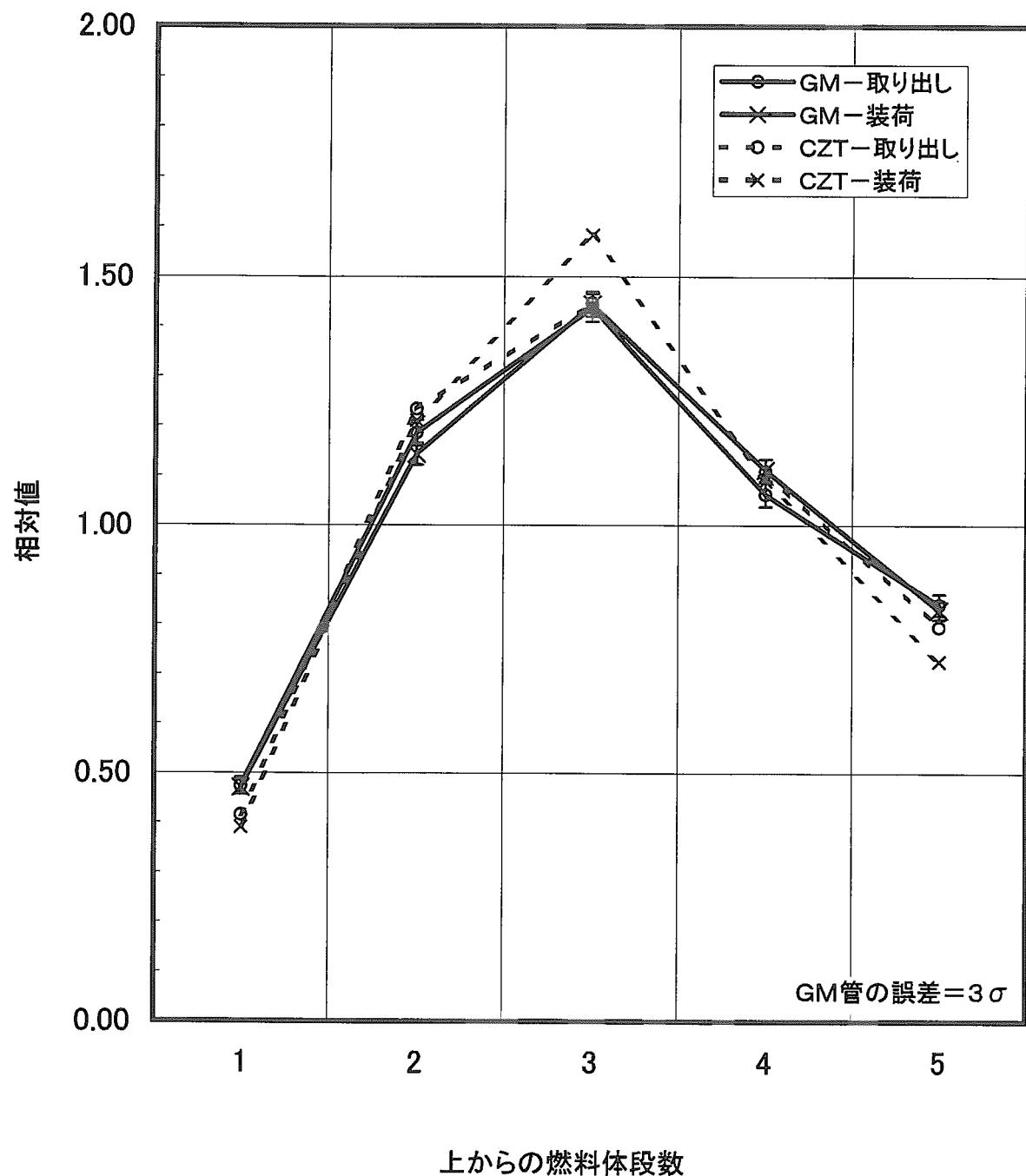


第4.1.10図 CZT検出器によるガンマ線スペクトル測定結果
(C02カラム 燃料体3段目)

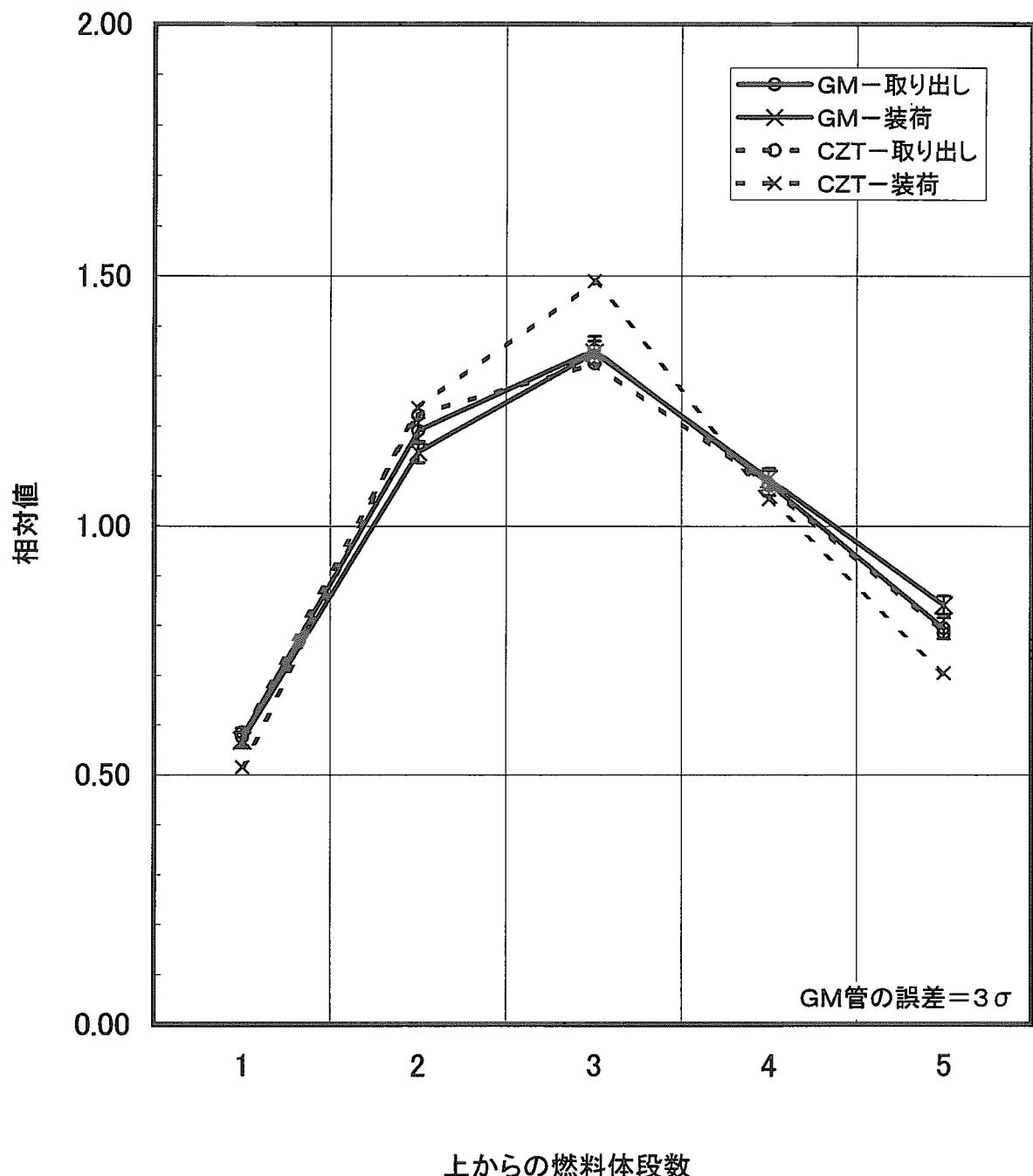


第4.1.11図 燃料体毎の軸方向相対分布(B01)

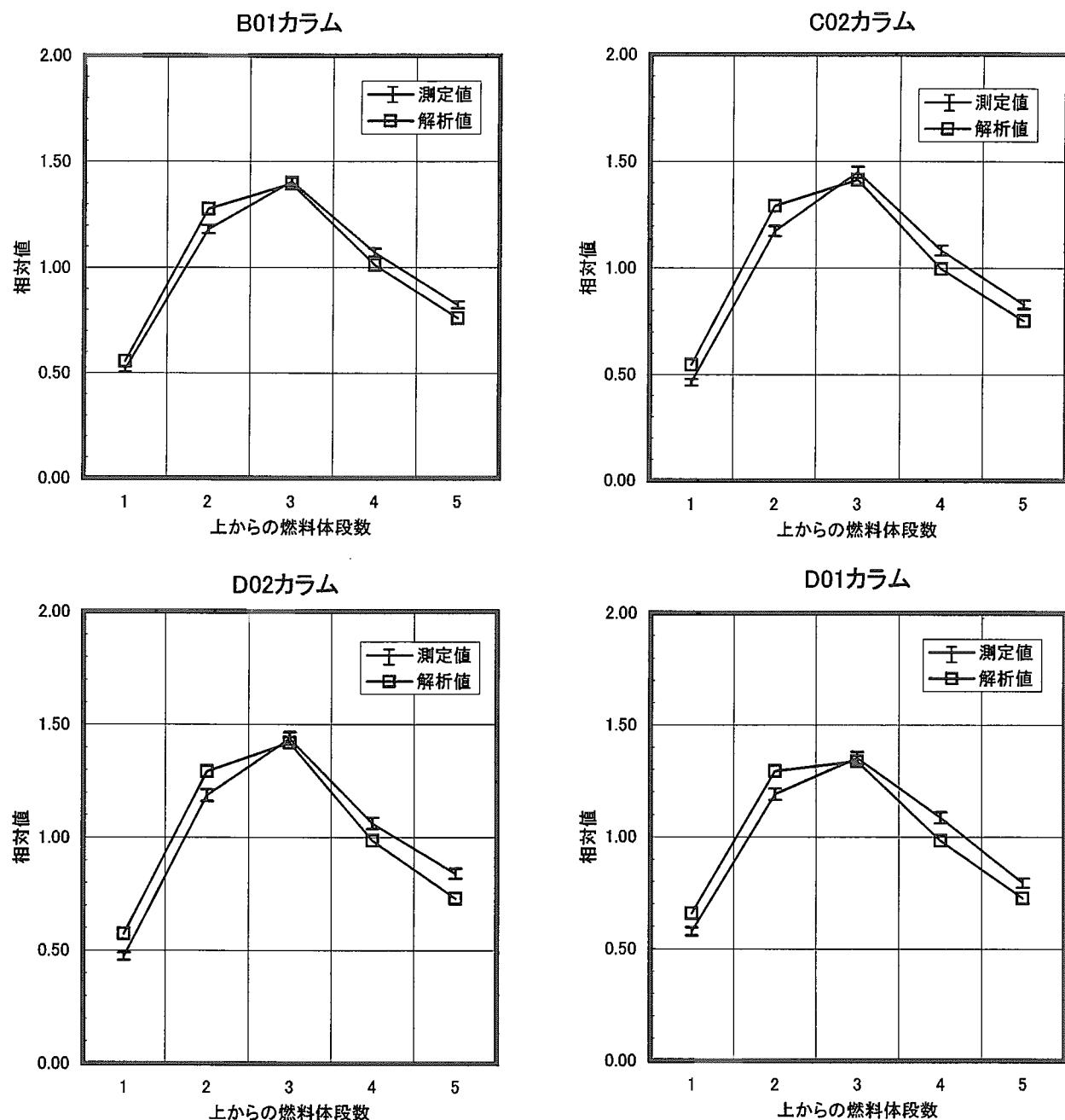
第4.1.12図 燃料体毎の軸方向相対分布(CO₂)



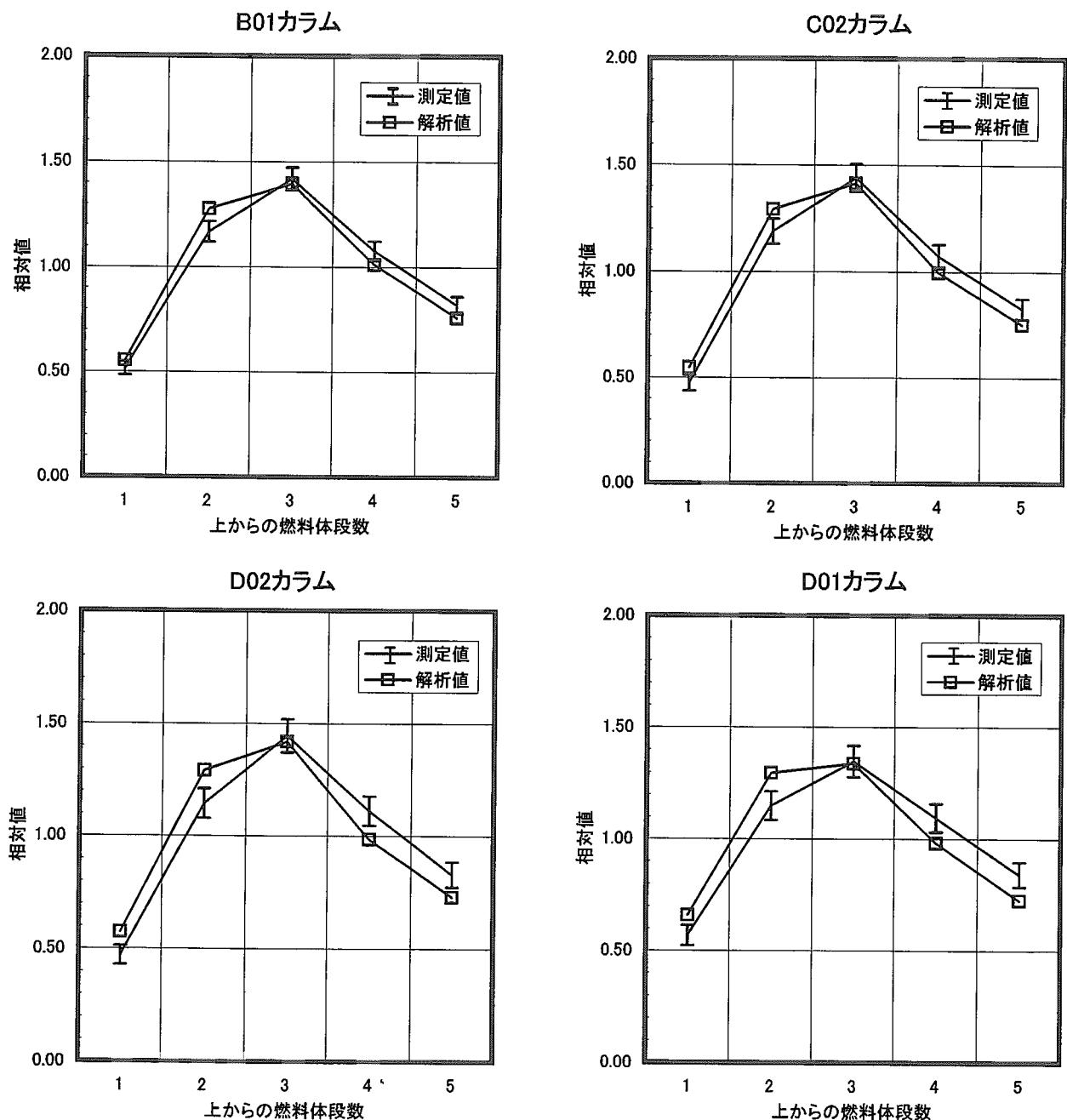
第4.1.13図 燃料体毎の軸方向相対分布(D02)



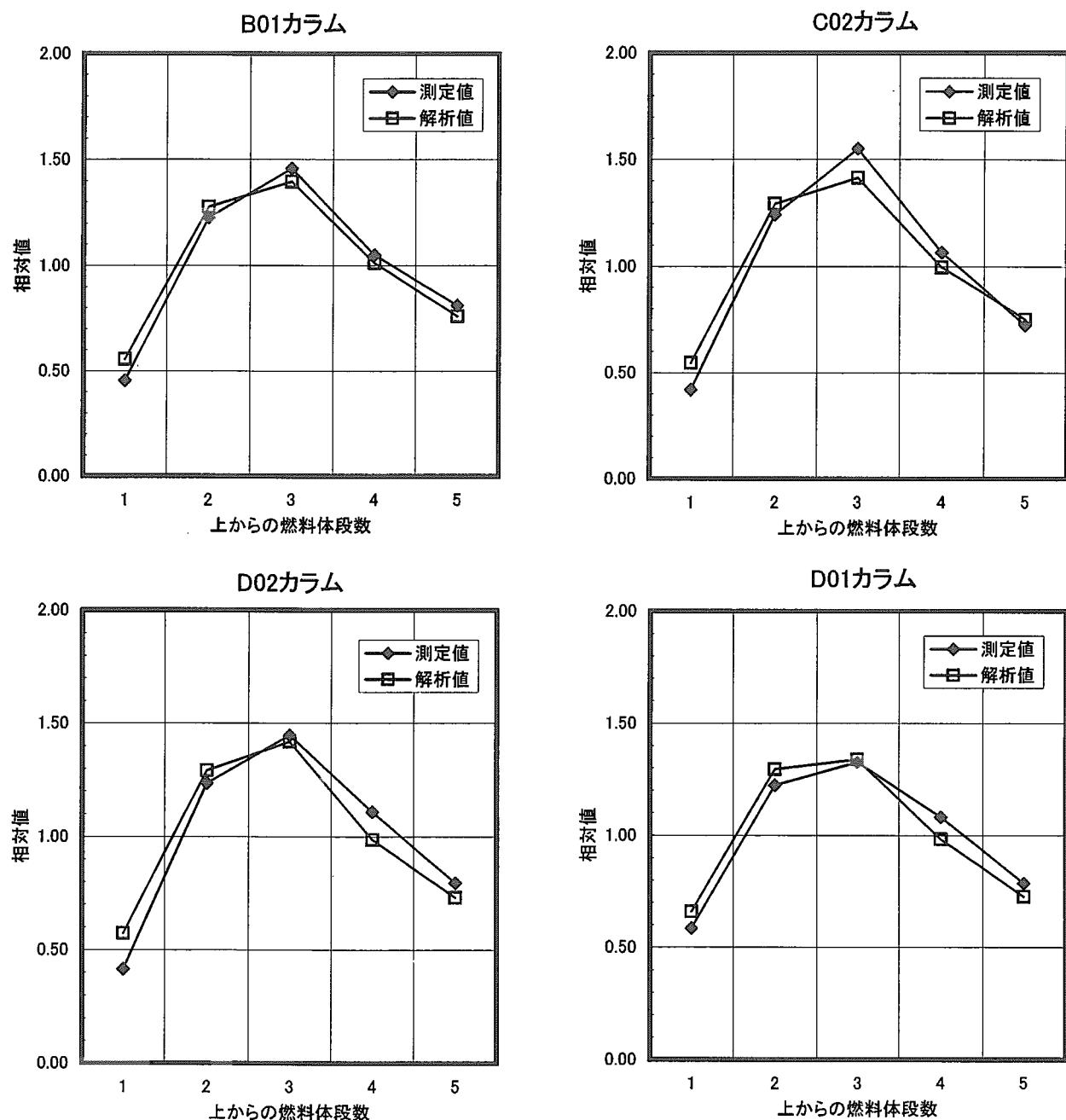
第4.1.14図 燃料体毎の軸方向相対分布(D01)

誤差 = 3σ

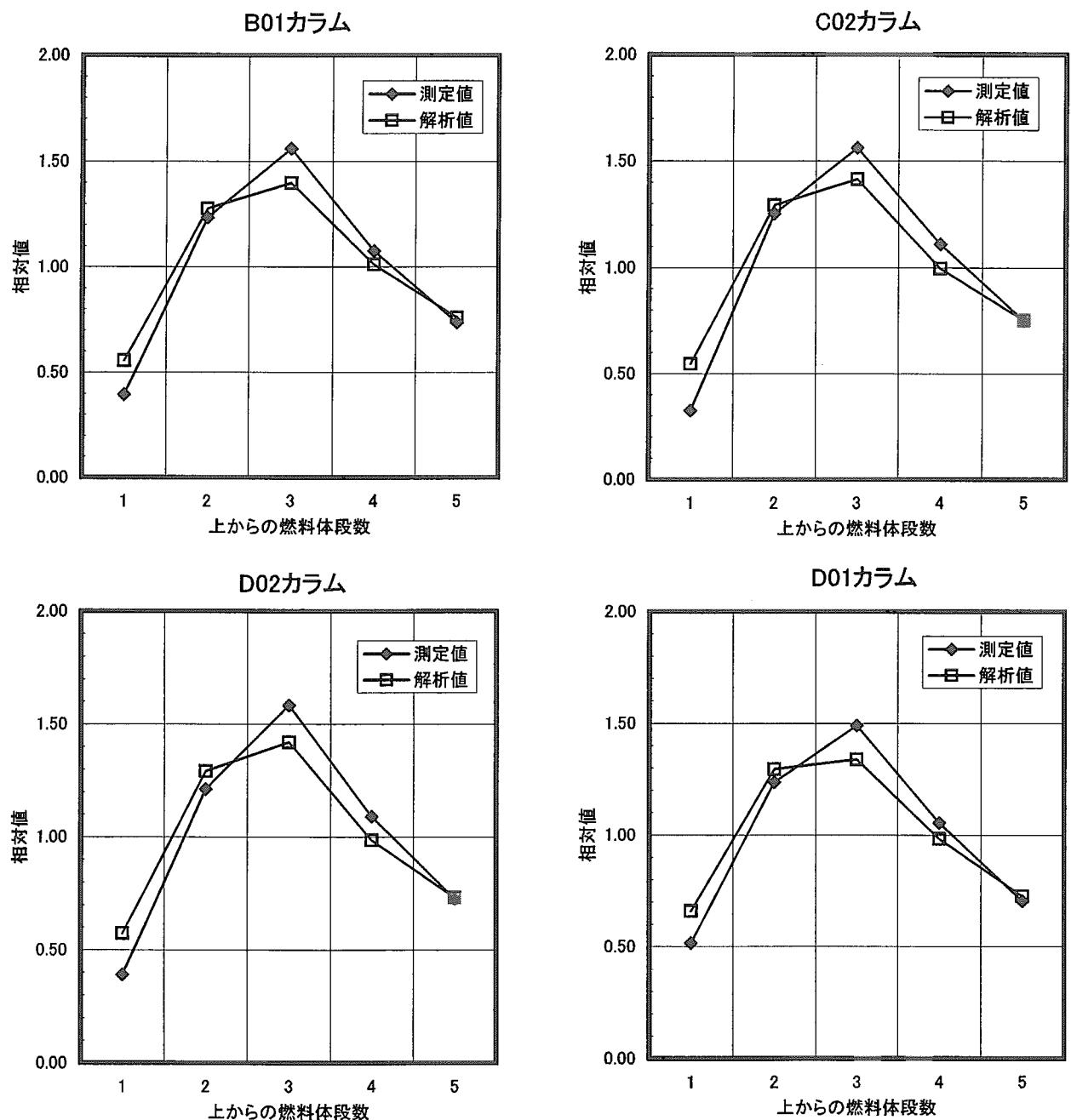
第4.1.15図 軸方向相対分布 測定値と解析値の比較 (GM 燃料体取り出し)

誤差 = 3σ

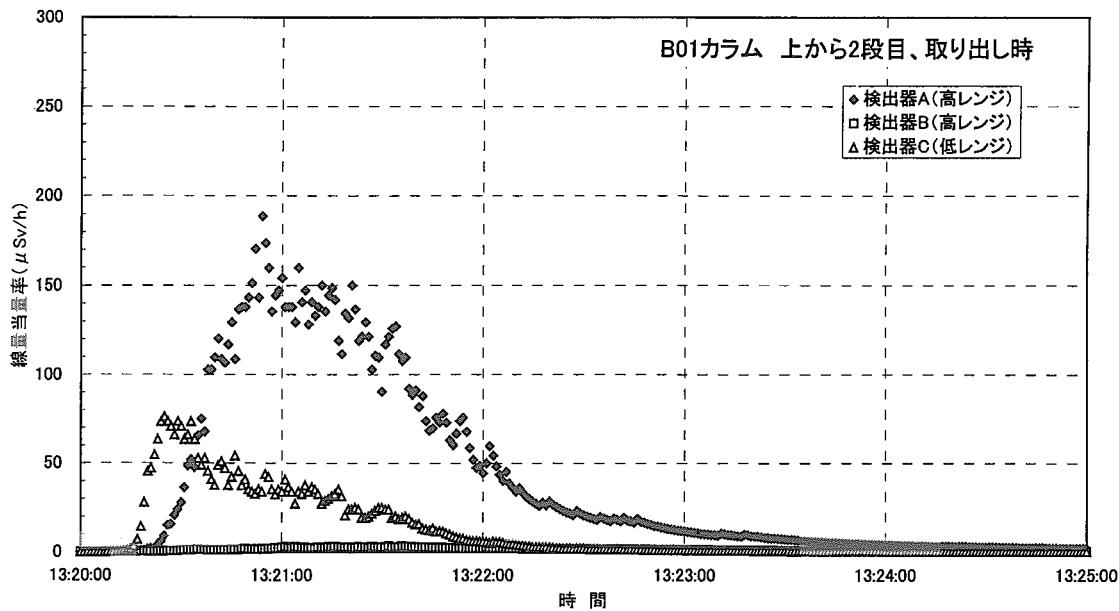
第4.1.16図 軸方向相対分布 測定値と解析値の比較 (GM 燃料体装荷)



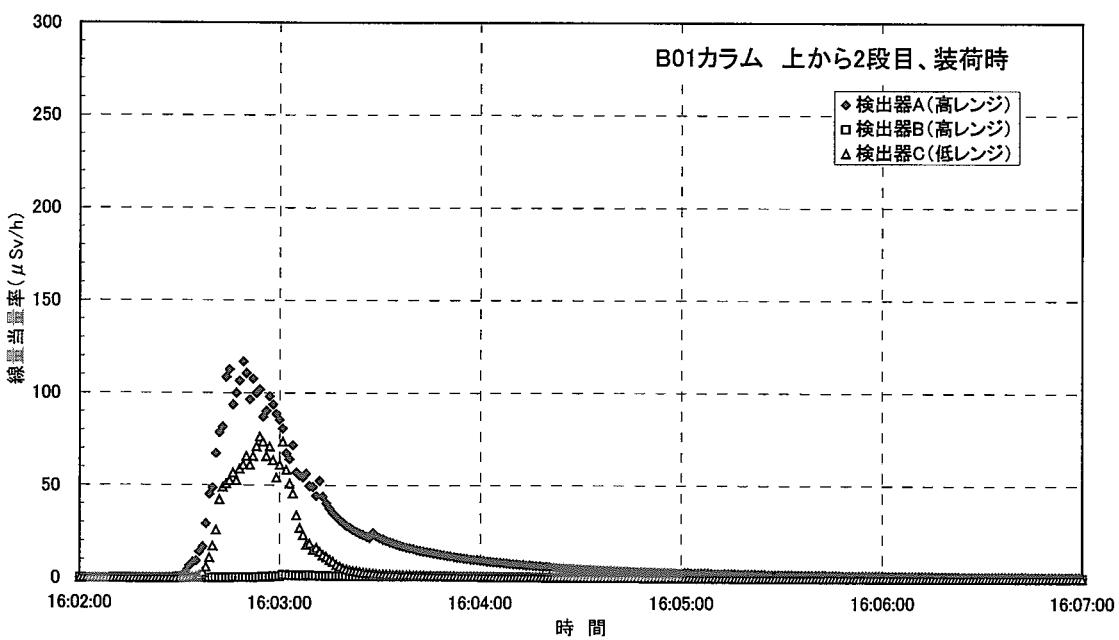
第4.1.17図 軸方向相対分布 測定値と解析値の比較 (CZT 燃料体取り出し)



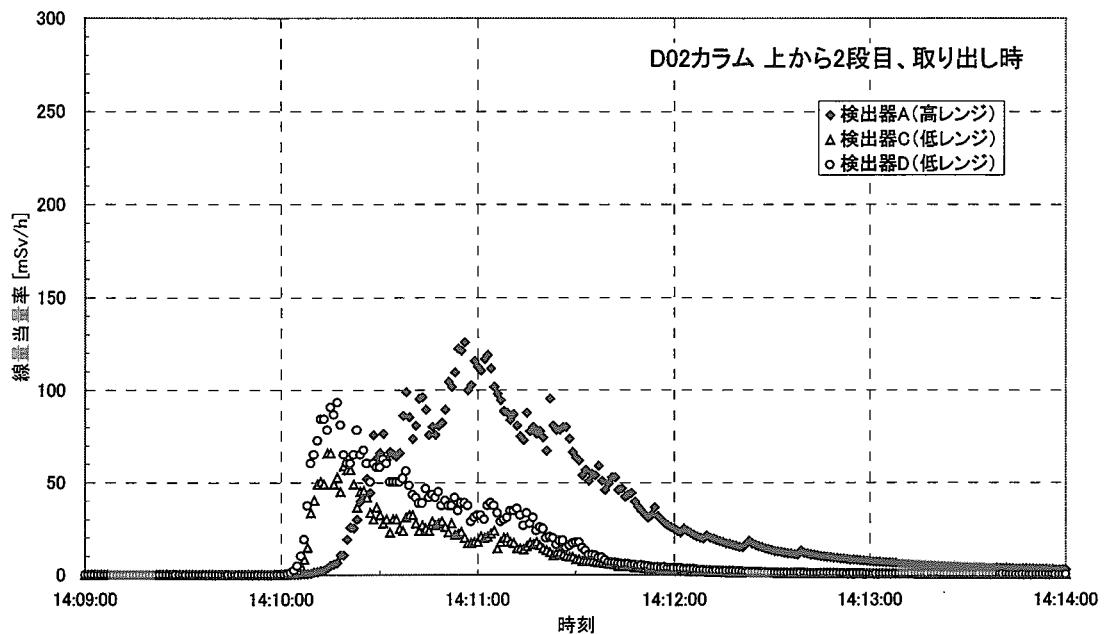
第4.1.18図 軸方向相対分布 測定値と解析値の比較 (CZT 燃料体装荷)



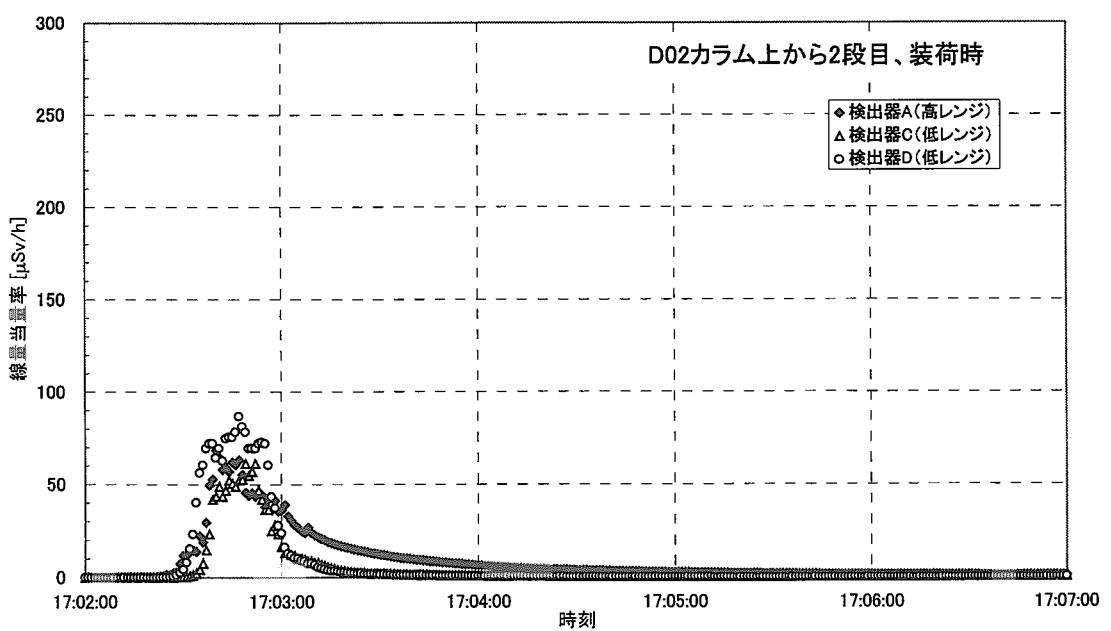
第 4.2.1 図 B01 カラム 2 段目燃料体取り出し時の SP 室内線量当量率
(平成 12 年 10 月 31 日)



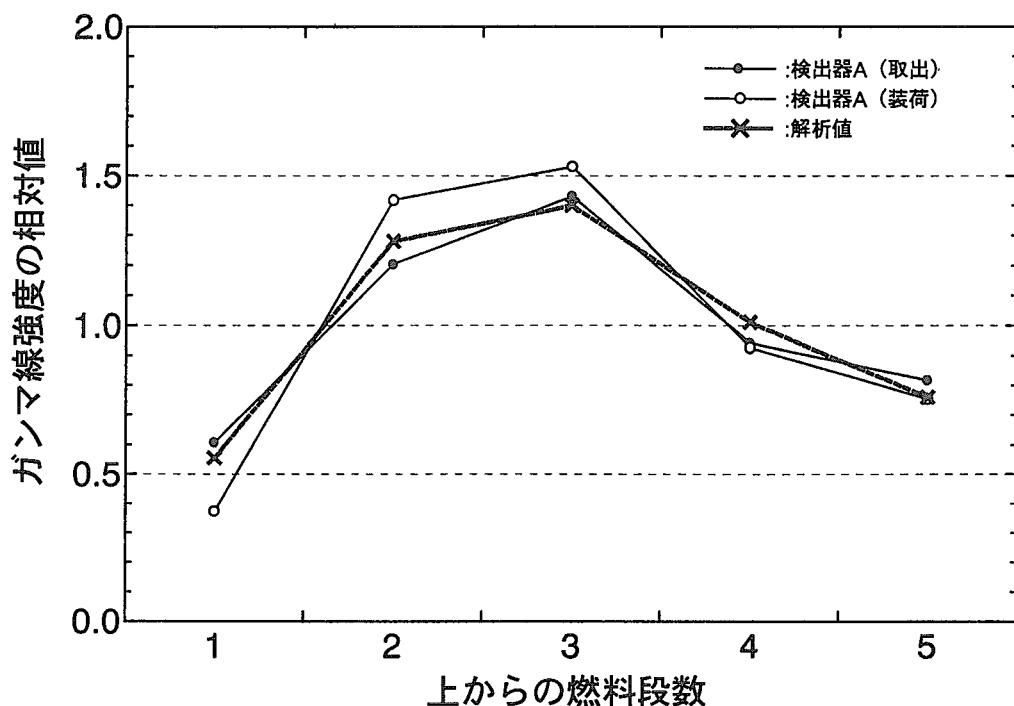
第 4.2.2 図 B01 カラム 2 段目燃料体装荷時の SP 室内線量当量率
(平成 12 年 10 月 31 日)



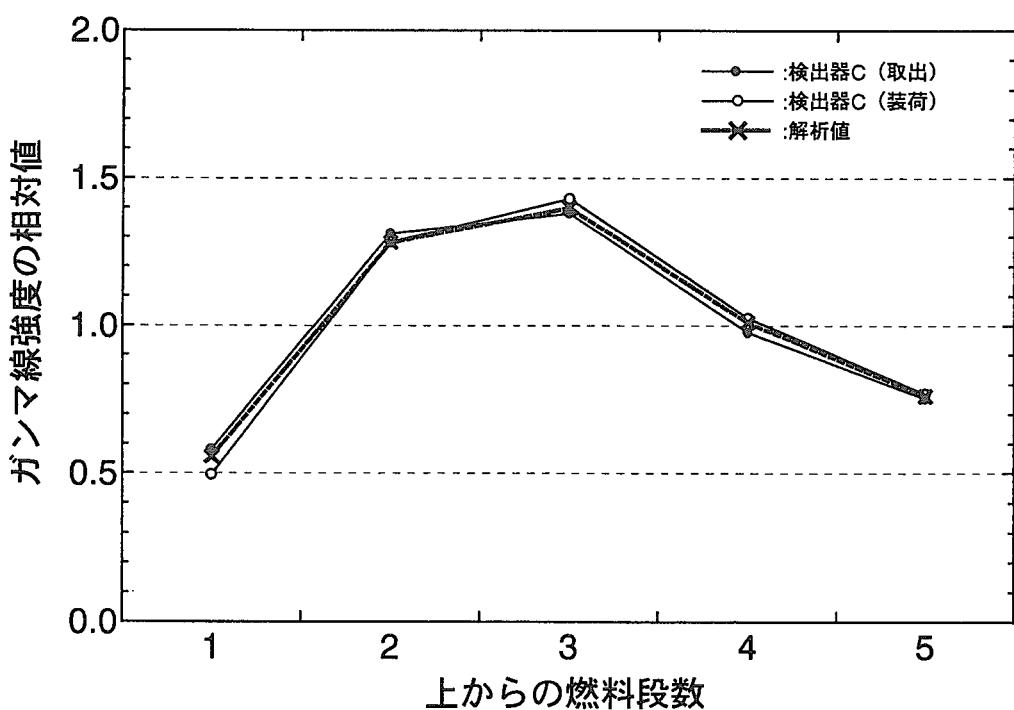
第 4.2.3 図 D02 カラム 2 段目燃料体取り出し時の SP 室内線量当量率
(平成 12 年 11 月 14 日測定)



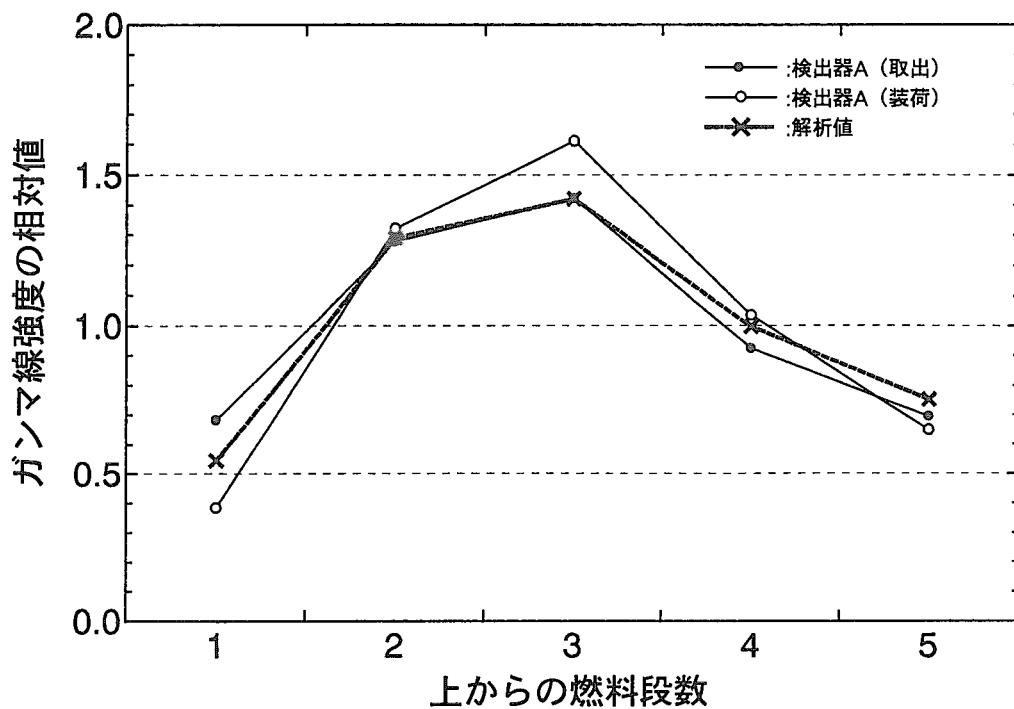
第 4.2.4 図 D02 カラム 2 段目燃料体装荷時の SP 室内線量当量率
(平成 12 年 11 月 14 日測定)



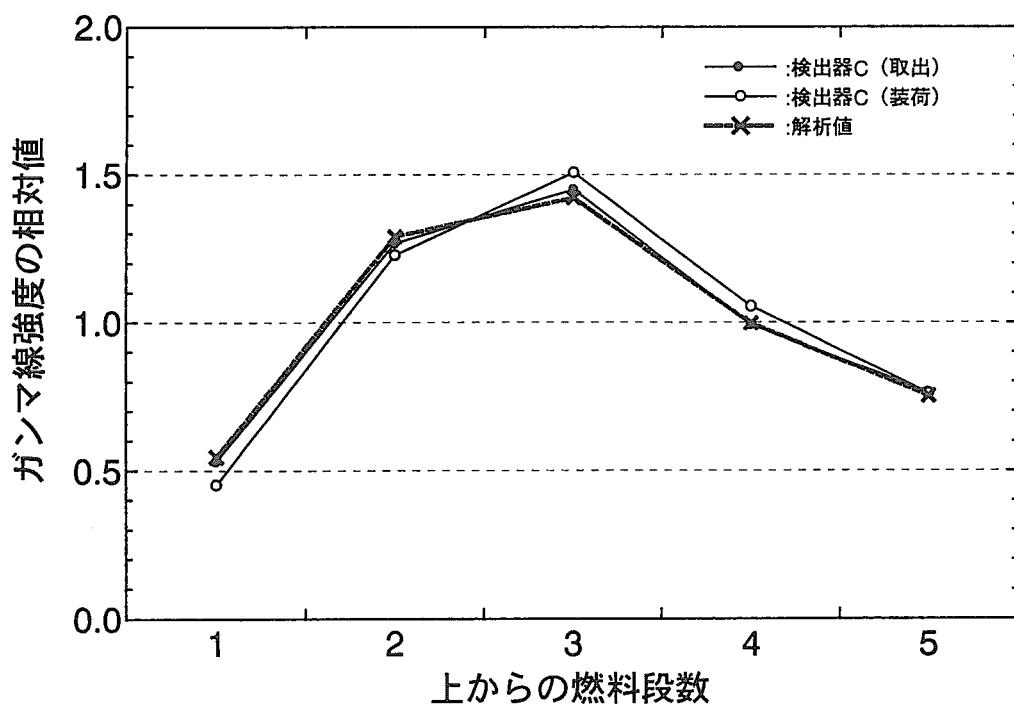
第 4.2.5 図 エリアモニタによる軸方向相対分布 (B01 カラム、検出器 A)



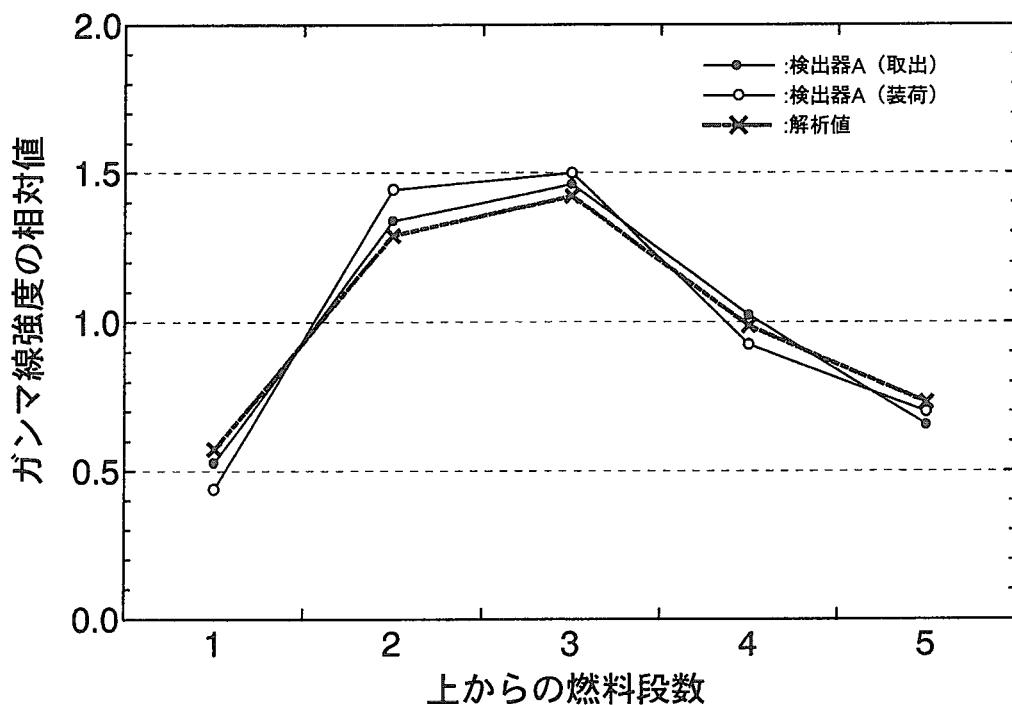
第 4.2.6 図 エリアモニタによる軸方向相対分布 (B01 カラム、検出器 C)



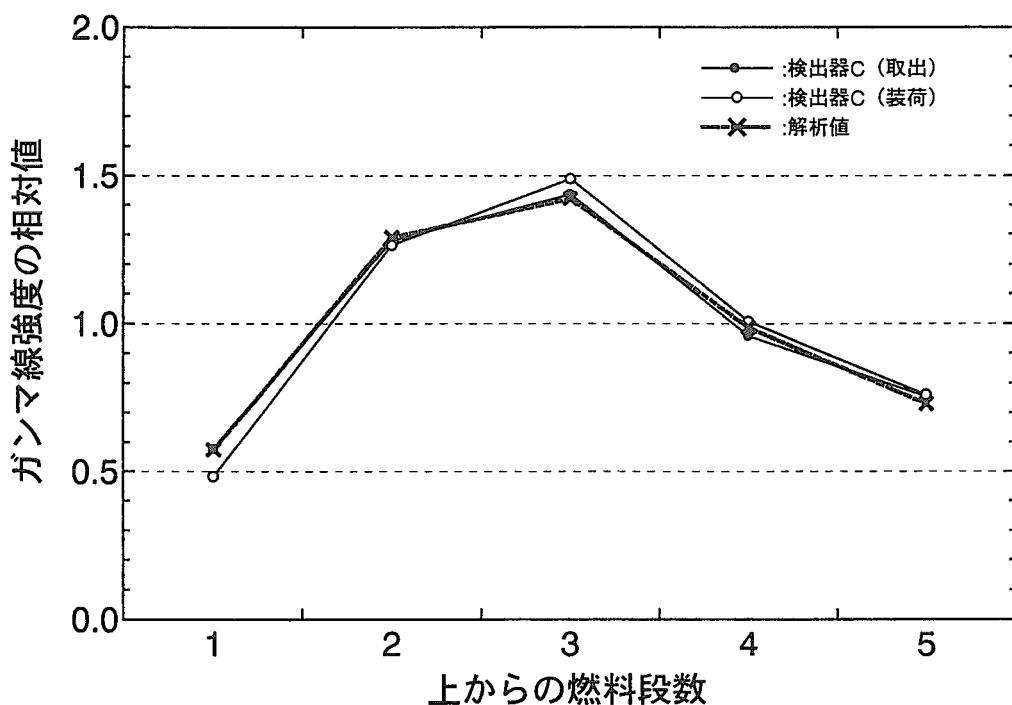
第 4.2.7 図 エリアモニタによる軸方向相対分布 (C02 カラム、検出器 A)



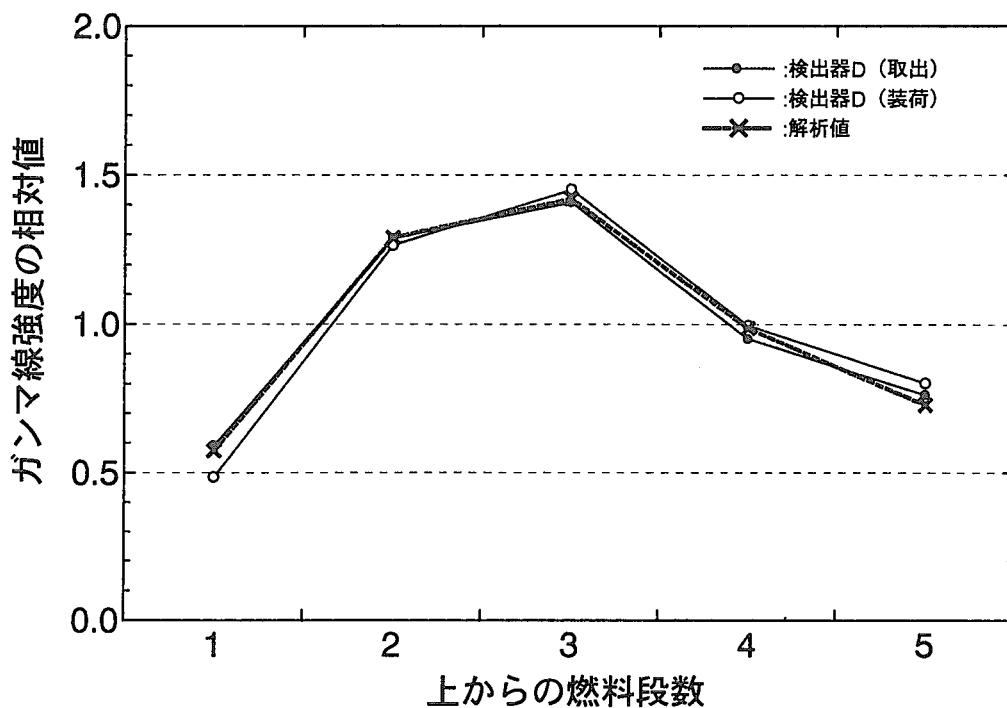
第 4.2.8 図 エリアモニタによる軸方向相対分布 (C02 カラム、検出器 C)



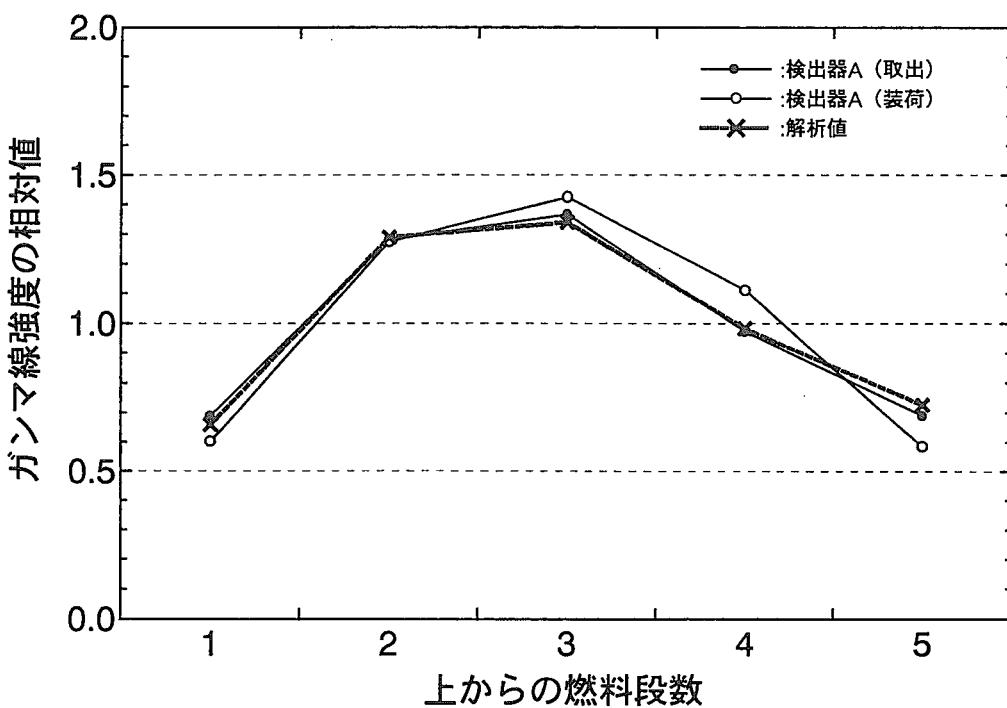
第 4.2.9 図 エリアモニタによる軸方向相対分布 (D02 カラム、検出器 A)



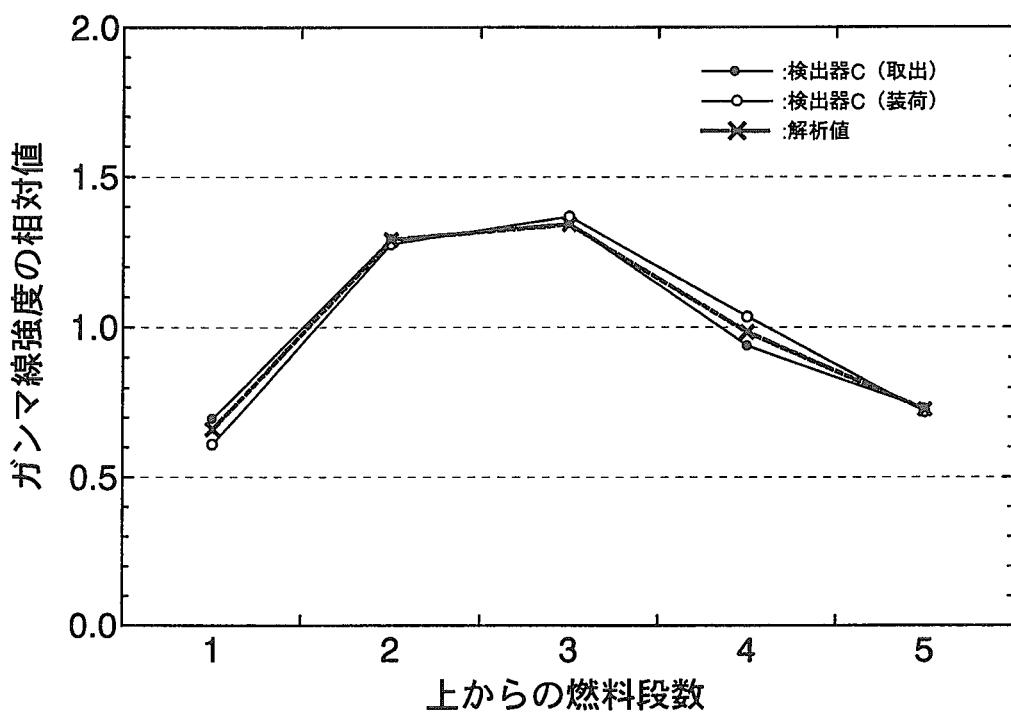
第 4.2.10 図 エリアモニタによる軸方向相対分布 (D02 カラム、検出器 C)



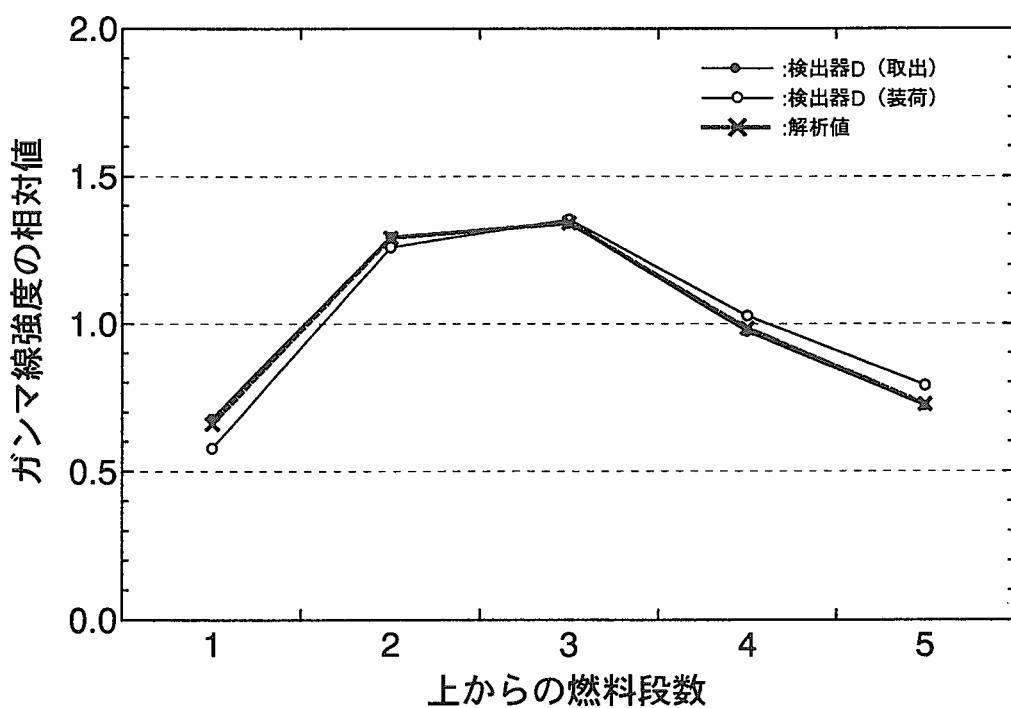
第 4.2.11 図 エリアモニタによる軸方向相対分布 (D02 カラム、検出器 D)



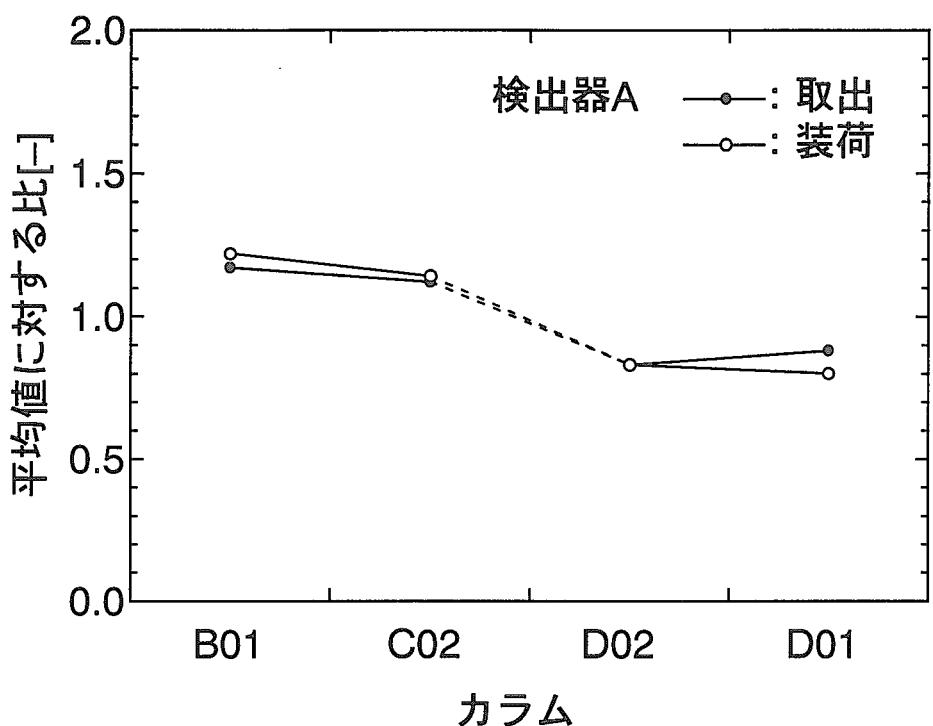
第 4.2.12 図 エリアモニタによる軸方向相対分布 (D01 カラム、検出器 A)



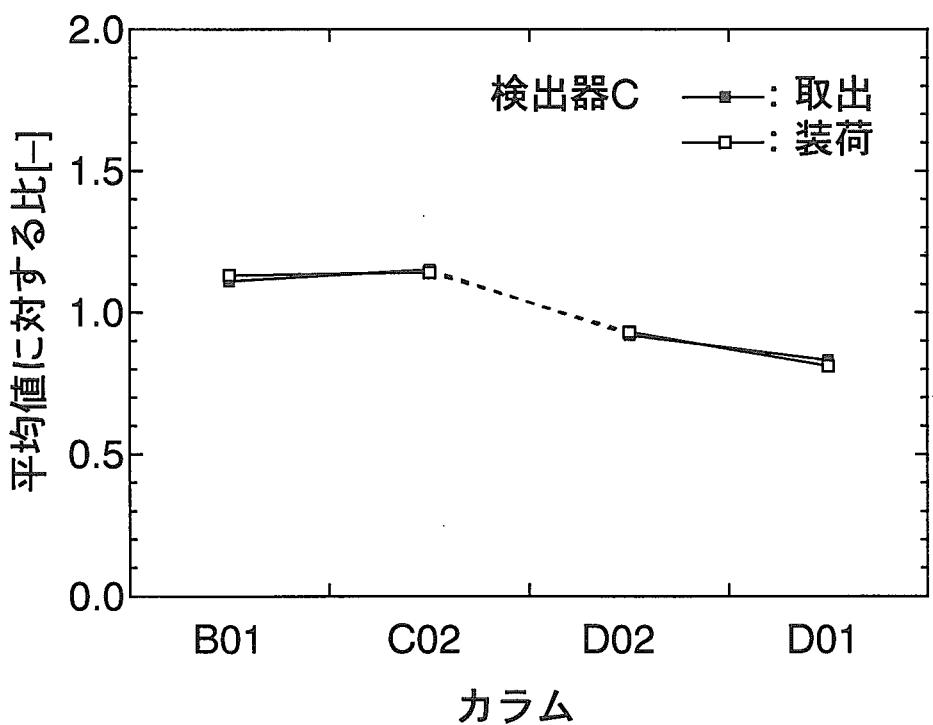
第 4.2.13 図 エリアモニタによる軸方向相対分布 (D01 カラム、検出器 C)



第 4.2.14 図 エリアモニタによる軸方向相対分布 (D01 カラム、検出器 D)



第 4.2.15 図 エリアモニタによる測定でのカラム毎の線量当量積分値の比較
(検出器 A の結果による比較、測定日の違いによる効果補正済)



第 4.2.16 図 エリアモニタによる測定でのカラム毎の線量当量積分値の比較
(検出器 C の結果による比較、測定日の違いによる効果補正済)

5. まとめ

HTTR の炉心内の情報を直接得ることを目的として、燃料体を炉心から取り出し、再装荷する過程で燃料体からのガンマ線を測定し、解析との比較を行った。測定は、床上ドアバルブ(1)に設置した GM 管と CZT 検出器、及びスタンドパイプ室に設置したエリアモニタによって行った。

GM 管による測定では、各カラムの軸方向の相対分布を測定することができた。解析との比較では、軸方向分布の全体の傾向は一致するが、解析値は炉心の上部で高く、下部で低い傾向を示した。これは、臨界試験で得られた中性子束分布と同様の傾向であった。

CZT 検出器による測定では、軸方向の相対分布は評価することができたが、燃料の冷却期間が短かったため、 ^{137}Cs のピークを測定することはできなかった。スタンドパイプ室に設置したエリアモニタでもカラム内の軸方向分布を測定することが可能であり、解析値とよく一致した。また、エリアモニタの測定結果から、カラム間の比較も行うことができたが、通過するスタンドパイプが異なる場合は測定条件が同一ではないため、定量的な評価は困難であった。

今回の測定は、炉内で照射された燃料を取り扱う初めて初めての機会であったため、燃料交換機の運転を優先し測定のための特別な操作は行わなかった。そのため、燃料体と検出器の位置関係や燃料体周りの収納筒の方向等の条件を同一とすることができなかった。このことから、GM 管及び CZT 検出器によるデータでもカラム間の直接の比較は困難であり、径方向の分布を直接評価することはできなかった。

しかしながら、今回の測定方法で燃料体からのガンマ線強度の測定により炉心内部の情報を得ることが可能であった。この方法は燃料交換時に、燃料交換機の運転に併せて行うことが可能である。今後測定を重ねることによりデータの蓄積を図ることが可能である。

なお、今回得られたデータについては今後詳細な解析を行い、軸方向、径方向の分布及び燃料体内の分布についても検討を進め、HTTR の出力密度分布評価の解析精度について検討を進めていくこととする。

謝辞

本測定を行うに当たり、燃料取り扱い、燃料交換機及び制御棒交換機の運転に協力をいただいた HTTR 試験室及び富士電機（株）の関係各位、測定作業等に協力いただいた HTTR 技術開発室の重本雅光氏並びに各位、ORIGEN-JR による解析に協力いただいた飛田勉氏、作業に関する放射線管理を行っていただいた放射線管理課 HTTR 係各位及び本報告書を査読いただいた核熱利用研究部宮本喜晟氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) S. Saito, et al., "Design of High Temperature Engineering Test Reactor(HTTR)", JAERI 1332(1994).

- 2) 山下 清信、他、“高温工学試験研究炉(HTTR)の臨界試験、(I)試験計画、燃料装荷及び核特性試験”、日本原子力学会誌、Vol. 42, No. 1, pp. 30~42(2000).
- 3) 神田 啓治、他、“燃焼度クレジット概念の再処理施設への導入”、原子力工業、第 40 卷、第 3 号、pp.11~19(1994).
- 4) 二村 嘉明、他、“燃焼度測定法の開発状況”、原子力工業、第 40 卷、第 3 号、pp.20~29(1994).
- 5) K. Yamashita, et al., “Safeguards Concept for the High Temperature Engineering Test Reactor using Unattended Fuel Flow Monitor System”, Journal of Nuclear Material Management, Vol.25, No.4, pp.15~19(1997).
- 6) 藤本 望、他、“高温工学試験研究炉(HTTR)臨界試験の予備解析結果－HTTR 核特性解析コードシステムに基づく解析結果－”, JAERI-Tech 98-021(1998).
- 7) K. Koyama, et al., “ORIGEN-JR: A Computer Code for Calculating Radiation Sources and Analyzing Nuclide Transmutations”, JAERI-M 8229(1979).
- 8) 藤本 望、他、“高温工学試験研究炉炉心解析モデルの改良－過剰反応度に関する検討－”, JAERI-Tech 99-059(1999).
- 9) 藤本 望、他、”HTTR 出力上昇試験での臨界制御棒位置と温度係数”、JAERI-Tech 2000-091(2000).

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·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·m
工率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·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
磁束密度	ウェーバ	Wb	V·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·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	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

(注)

- 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。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクト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。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

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

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

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

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

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

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

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

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

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

換算表

圧	MPa(=10 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	1	0.967841	735.559	14.2233
	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

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

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

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 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 J(15 °C)
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵	= 4.1868 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(仏馬力)
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹	= 75 kgf·m/s
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸	= 735.499 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 × 10 ⁻¹¹		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

