

プルトニウム・ウラン同位体分析における 日常管理データに基づく分析誤差の評価

(1998年9月～2000年12月)

(業務報告)

2001年2月

核燃料サイクル開発機構
東海事業所

本資料の全部または一部を複写・複製・転写する場合は、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4-49
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

プルトニウム・ウラン同位体分析における
日常管理データに基づく分析誤差の評価
(1998年9月～2000年12月)

(業務報告)

実施責任者：小林 英男¹⁾

報告者：鈴木 徹¹⁾、千葉正彦¹⁾
佐藤 光弘¹⁾、川崎 雅史¹⁾
平沢 正²⁾、大内 勇一³⁾

要 旨

プルトニウム燃料センターにおいて、プルトニウム・ウラン同位体分析および濃度分析のために、4台の質量分析装置を使用している。それらの装置の管理のために、試料分析の都度プルトニウム・ウランの標準試料を測定しており、それらのデータを評価した結果、質量分析における分析誤差は、保障措置分析に関する国際目標値を十分満足するとともに、従来法からトータルエバポレーション法に変更したことにより、特にプルトニウム同位体分析において顕著にランダム誤差が改善されたことが確認できた。

-
- 1) 東海事業所 プルトニウム燃料センター 技術部 分析課
 - 2) 原子力技術(株)
 - 3) 検査開発(株)

Evaluation of the Analytical Errors in Plutonium and Uranium Isotopic Composition Analysis Based on Routine Control Measurement Data (1998/9~2000/12)

Hideo Kobayashi¹⁾

Toru Suzuki¹⁾、Masahiko Chiba¹⁾

Mitsuhiro Sato¹⁾、Masashi Kawasaki¹⁾

Masashi Hirasawa²⁾、Yuichi Ouchi³⁾

Abstract

Four mass spectrometers are used for plutonium and uranium isotopic composition analysis in the Plutonium Fuel Center. Analytical errors of the analysis was evaluated based on routine control data obtained with measurement of reference materials. It was confirmed that the errors satisfied the International Target Values for safeguard analysis, and the random error of the analysis was improved by changing conventional method to total evaporation method.

1) Analysis Section, Technical Administration Division, Pu Fuel Center, JNC

2) Nuclear Technology Engineering Co. Ltd.

3) Inspection Development Co. Ltd.

目 次

1. はじめに	1
2. 質量分析法によるプルトニウム・ウラン同位体分析の概要	2
3. 質量分析装置の管理の方法	4
4. x 管理図による管理の実績	6
5. プルトニウム・ウラン同位体分析における分析誤差の評価	20
6. T E 法の導入による分析誤差への影響	23
7. まとめ	30
8. 今後の課題	31

1. はじめに

プルトニウム燃料センターでは、プルトニウム・ウランの同位体分析および濃度分析のために、4 台の表面電離型質量分析装置を使用している。それらの装置の日常管理のために、依頼分析試料を測定する都度、プルトニウム・ウラン標準試料が測定され、それらのデータを課内の QA 担当者が定期的に評価して、装置が管理された状態にあるかどうかを判定している。

本報告書では、管理図による測定データの管理の実績について触れるとともに、1998 年 9 月～2000 年 12 月までの標準試料測定データを総合的に評価し、定常分析における分析誤差を ITV と比較した結果と、1999 年 1 月から導入したトータルエバポレーション法（以下、TE 法）に関して、その分析誤差に及ぼす効果を確認した結果について記述する。

2. 質量分析法によるプルトニウム・ウラン同位体分析の概要

プルトニウム・ウラン混合酸化物燃料等中のプルトニウム・ウラン同位体分析のために質量分析法が用いられている。

使用しているのは4台表面電離型質量分析装置であり、いずれも以下の概略仕様のものである。装置の写真を写2.1に示す。

装置名称：Finnigan MAT-262

製作メーカ：フィニガン・マット・インスツルメンツ・インク
(サーモクエスト(株)により設置)

イオン検出部：モータドライブ付きマルチコレクタ (7個)

フィラメントタイプ：Re ダブルフィラメント

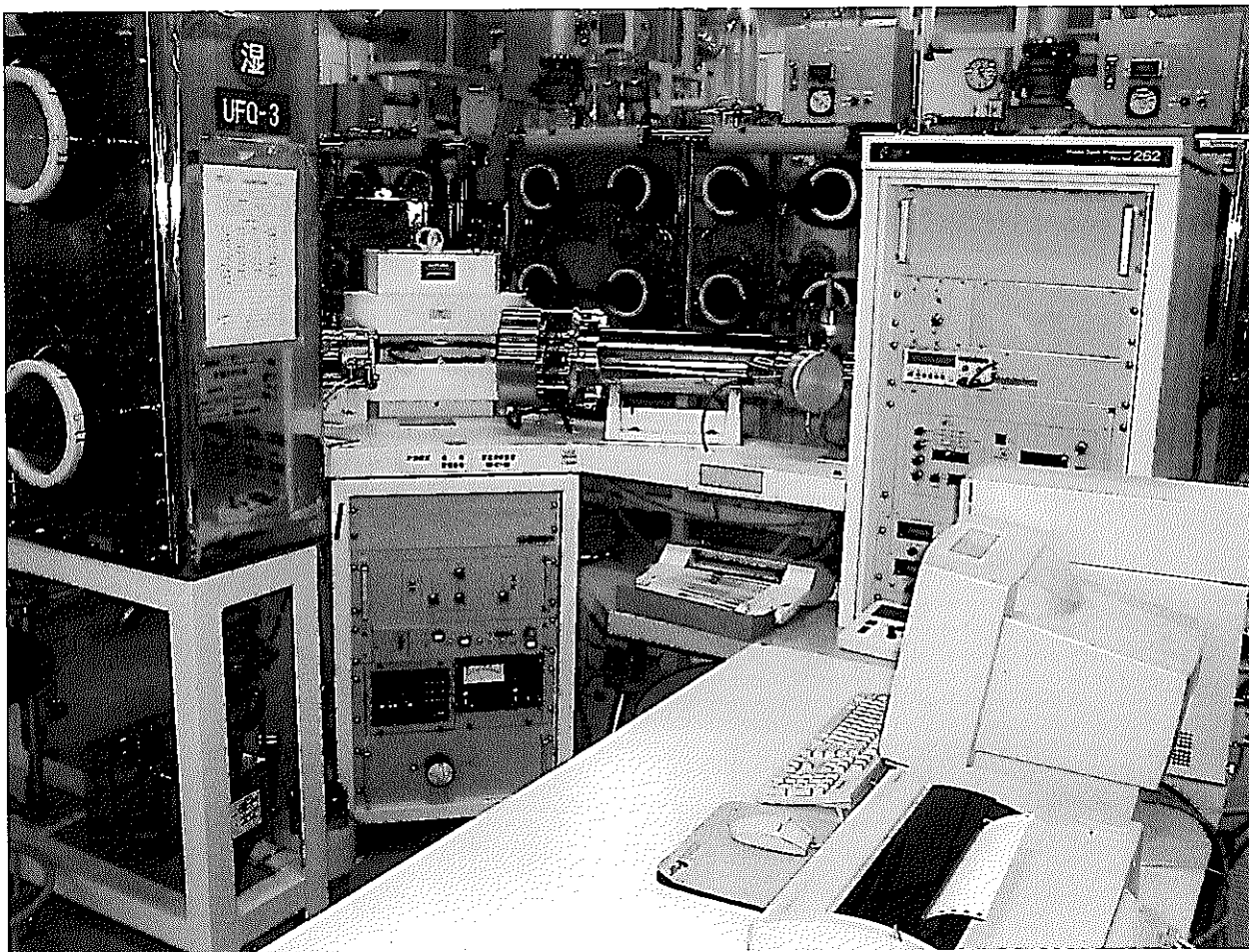
到達真空度： 5×10^{-6} Pa

サンプルマガジン：13個セット可能

また、プルトニウム・ウラン同位体分析は、表2.1に示す条件で行われる。

表2.1 プルトニウム・ウラン同位体分析における測定条件

		従来法	TE法
フィラメント塗布量	Pu	2 μ g	50~100ng
	U	2 μ g	100~200ng
焼付け条件		乾燥：0.8A	焼付け：2A-30秒
測定電流	蒸発側	1.6~2A	~MAX. 6.5A
	イオン化側	5.3~5.7A	~MAX. 6.0A
キャリブレーション		Na-23, K-39, Re-187, U-235, U-238, Pu-239, Pu-240	
測定スキャン数		20scan $\times$ 2	~MAX. 999



写 2.1 質量分析装置 (Finnigan MAT-262)

3. 質量分析装置の管理の方法

プルトニウム・ウラン同位体分析および同位体希釈質量分析法による濃度分析のために、現在4台の表面電離型質量分析装置が日常的に使用されている。これらの装置の分析精度を管理するために、依頼分析試料を測定する前に、必ず以下の標準試料を測定している。

1) プルトニウム同位体分析用標準試料

NBS947 (米国 NBL 製)

Pu238 : 0.296 ± 0.006 at. %

Pu239 : 75.696 ± 0.022 at. %

Pu240 : 18.288 ± 0.022 at. %

Pu241 : 4.540 ± 0.006 at. %

Pu242 : 1.180 ± 0.004 at. %

(1971 年 10 月 13 日)

2) ウラン同位体分析用標準試料

U500 (米国 NBL 製)

U234 : 0.5181 ± 0.0008 at. %

U235 : 49.696 ± 0.050 at. %

U236 : 0.0755 ± 0.0003 at. %

U238 : 49.711 ± 0.050 at. %

U200 (米国 NBL 製)

U234 : 0.1246 ± 0.0003 at. %

U235 : 20.013 ± 0.020 at. %

U236 : 0.2116 ± 0.0006 at. %

U238 : 79.651 ± 0.021 at. %

これらの測定結果について各標準試料毎に x 管理図を作成し、管理線を超えたものについては、原因を究明し、必要な処置をとることになっている。管理図に打点するデータは、以下の式に示す標準試料と測定値の相対誤差を用いている。

$$\text{相対誤差 (rel. \%)} = (B - A) / A \times 100$$

ここで、

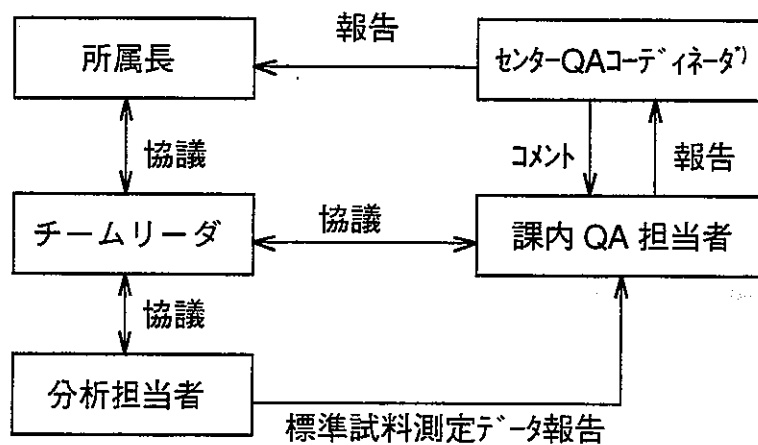
A : 標準試料の管理対象同位体比

B : 管理対象同位体比の測定値

なお、管理対象の同位体比は、最も含有比率が高く、同位体分析および同位体

希釈質量分析において最も精度が求められることから、プルトニウムについては Pu240/239 比、ウランについては U235/238 比のみとした。

課内 QA 担当者は、1 ヶ月毎に x 管理図を評価し、質量分析担当者とミーティングを持って、問題点についての協議等を実施している。さらに、処置結果等については、QA 担当者が確認するとともに、課長およびセンターの QA コーディネータもチェックする仕組みとなっている。（図 3.1 参照）



* 不在時は課内 QA 担当者が代行

図 3.1 質量分析装置の標準試料測定データの管理方法

4. x 管理図による管理の実績

標準試料測定データは、依頼分析試料の測定の都度、繰り返し数 $n=1$ で行われるため、そのデータの管理には、x 管理図を用いている。x 管理図は、連続する 2 点のデータ間の差の平均 ($\overline{Rs}$) とデータの総平均 ($\bar{x}$) から 3σ の管理限界線を $\bar{x} \pm 2.66\overline{Rs}$ から求め、データがそれを超えた場合に異常と判断するものである。

質量分析の手法としては、1998 年 9 月～12 月までは従来法¹⁾、1999 年 1 月～9 月までは改良前の TE 法²⁾、1999 年 10 月～2000 年 12 月までは改良後の TE 法を用いている。なお、TE 法のソフトウェアはサーモクエスト社の協力を得て 1998 年に開発したものであり、1999 年には以下の改良を行った。

- 1) 測定開始及び測定終了の条件および測定中の電流制御について、1 つのイオン強度（メイン質量）を基準にしていた方法から、検出する全てのイオン強度へ変更した。
- 2) 測定中の電流制御速度について、上昇側、下降側共に同一の速度とし、よりきめ細やかな制御を可能にした。

4-1 NBS947 測定データの x 管理図

1998 年 9 月～2000 年 12 月までの x 管理図を図 4.1.1～4.1.4 に示す。また、管理図が示す傾向とその理由、および異常値が出現した主な原因等を以下に示す。

- ・TE 法の改良により、顕著な分析精度の向上が見られており、改良の効果が認められた。
- ・測定法の変更により若干の平均値の変化は見られるが、標準試料の表示値とは大きな差はない。
- ・従来法から TE 法へ変更した際に管理限界線を超えたデータが多かった原因は、フィラメントに塗布する試料量が適切になっていなかったためである。
- ・改良前の TE 法では、管理上限線を超える値の出現がやや多くなっていたが、改良後には解消している。その理由としては、改良により測定開始前のイオンの数え落としがなくなったこと、測定中のイオン強度制御能力が向上したことが考えられる。

1) 従来法とは、標準試料を測定し、その表示値との差を校正定数とする方法であり、測定値は観測された同位体比×校正定数となる。

2) TE 法（トータルエバポレーション法）とは、検出器に導入された各同位体のイオンの総量の比から直接同位体比を求める方法であり、装置に校正定数は持たない絶対法である。

- ・改良後の TE 法は安定しているが、管理下限線を超える値が散見される。その原因としては、自動測定中のフォーカスミス、停電直後の運転、測定温度の低さなど様々であり、突発的なものである。

4-2 U200 および U500 測定データの x 管理図

1998 年 9 月～2000 年 12 月までの x 管理図を図 4.2.1～4.2.8 に示す。また、管理図が示す傾向とその理由、および異常値が出現した主な原因等を以下に示す。

- ・ NBS947 の測定データと比較してばらつきが大きくなっている。これは、プルトニウムとウランのフィラメントからの蒸発特性の違いからくるものと考えられる。
- ・従来法から TE 法に変更したことにより、平均して標準試料の表示値よりもプラス側の値を示すようになっている。ただし、標準試料の有する誤差（約 0.1%）の範囲内であり、バイアスとは言えない。
- ・TE 法の改良前後でばらつきの変化は見られず、ウラン測定については、改良の効果は見られなかった。
- ・MS2 号機の U500 測定において、1999 年 5～6 月にかけて連続して管理上限線を超えたため、ウラン分析を一時中止して原因究明を行った。その結果、ヒートスロープが適切でなかったことが判明し、その改善を行ったところ、その後は安定したデータが得られている。
- ・管理限界線を大きく超える値が散見されるが、これらの原因は、停電直後の運転、試料の蒸発速度の通常との違い、電子回路の故障など様々であり、突発的なものである。

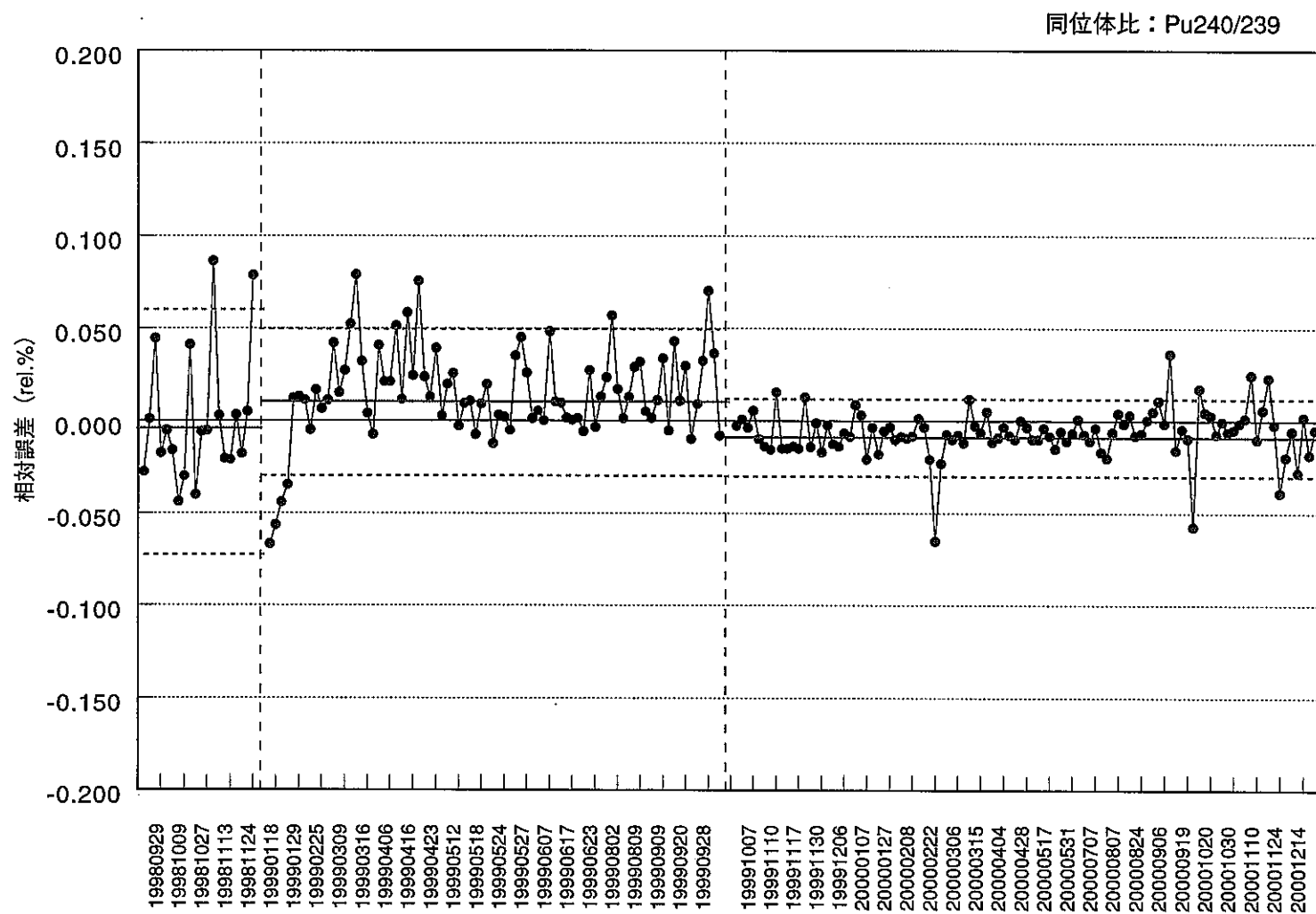


図4.1.1 NBS947測定データのx管理図 (MS1号機)

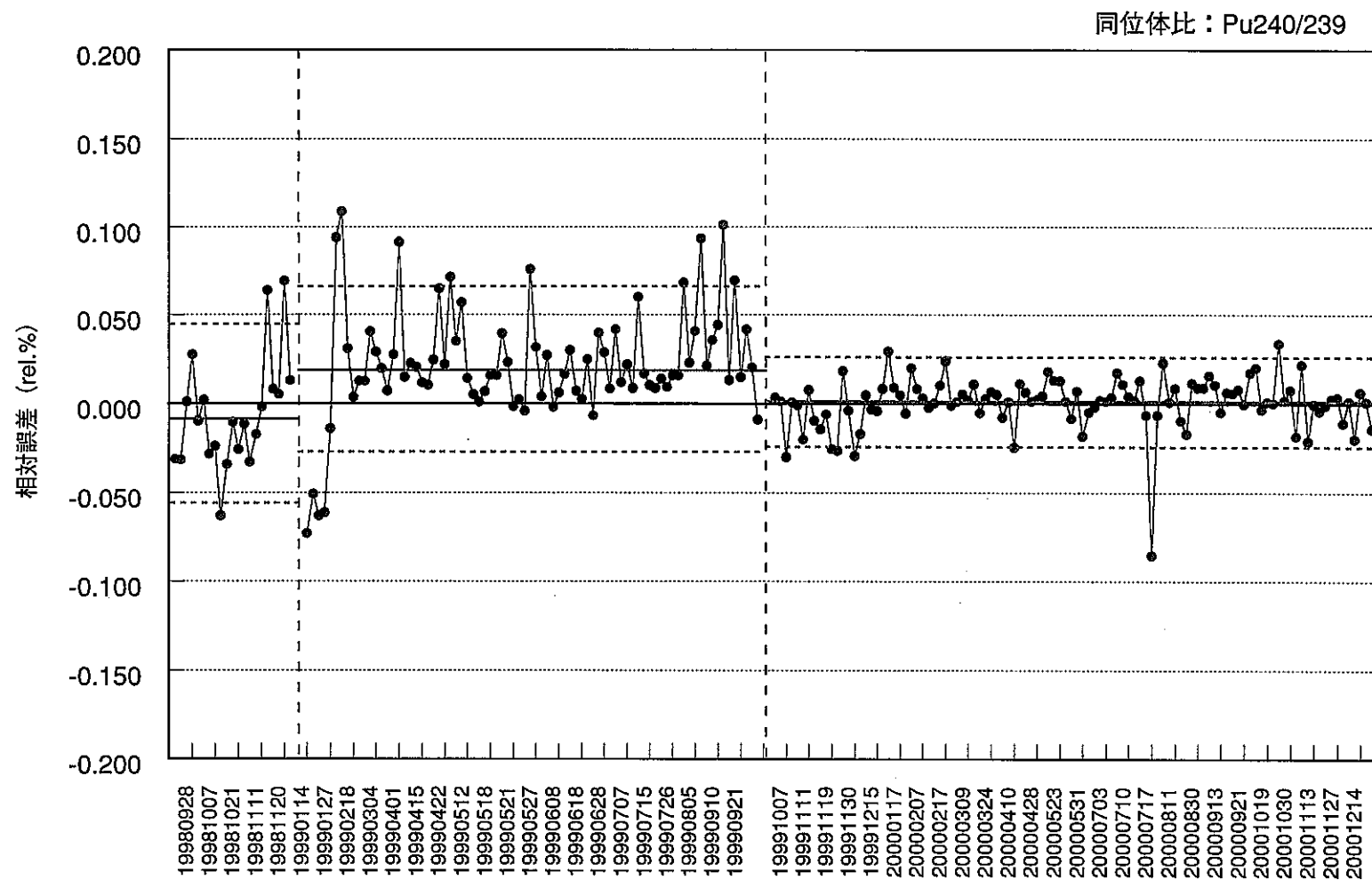


図4.1.2 NBS947測定データのx管理図 (MS2号機)

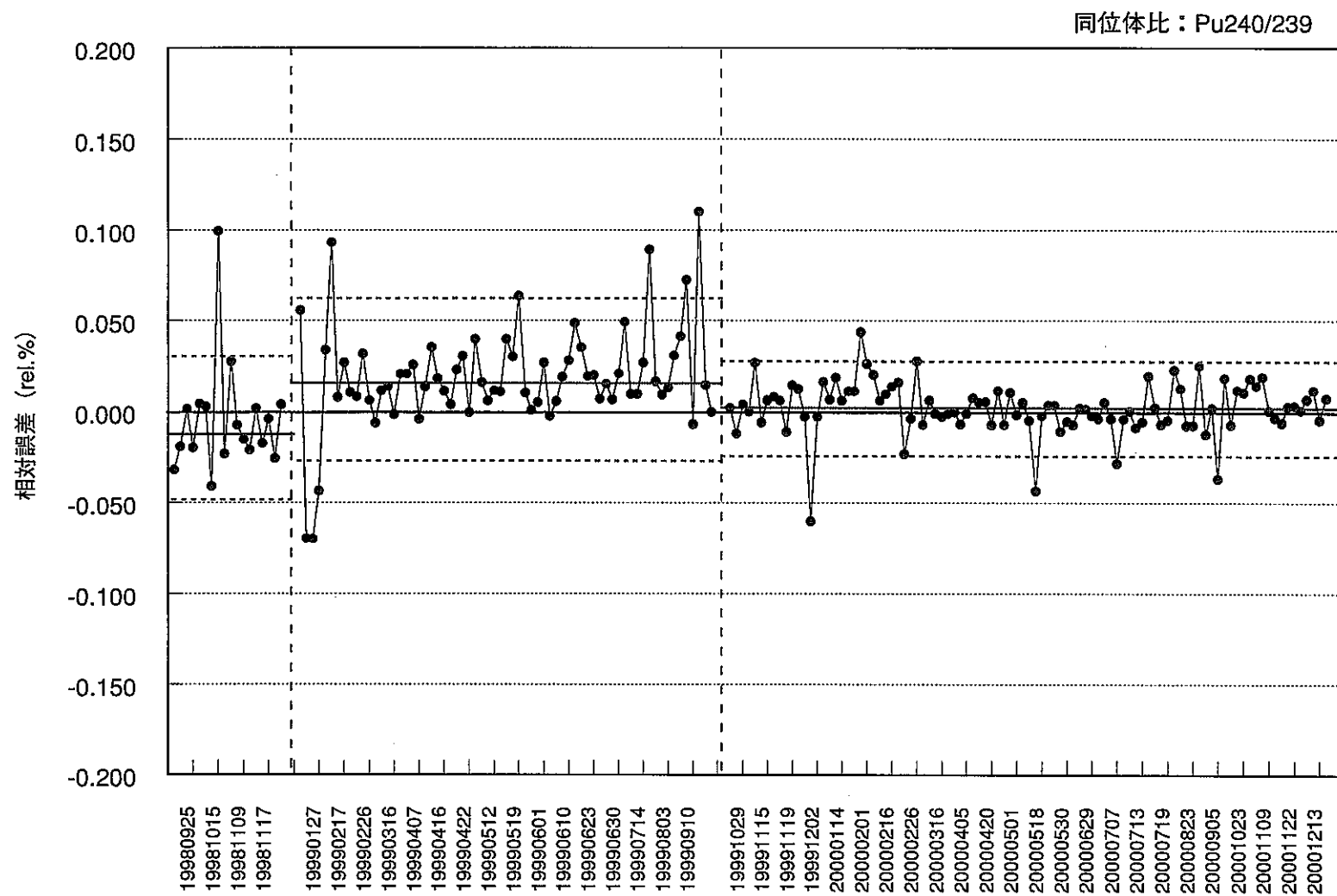


図4.1.3 NBS947測定データのx管理図 (MS3号機)

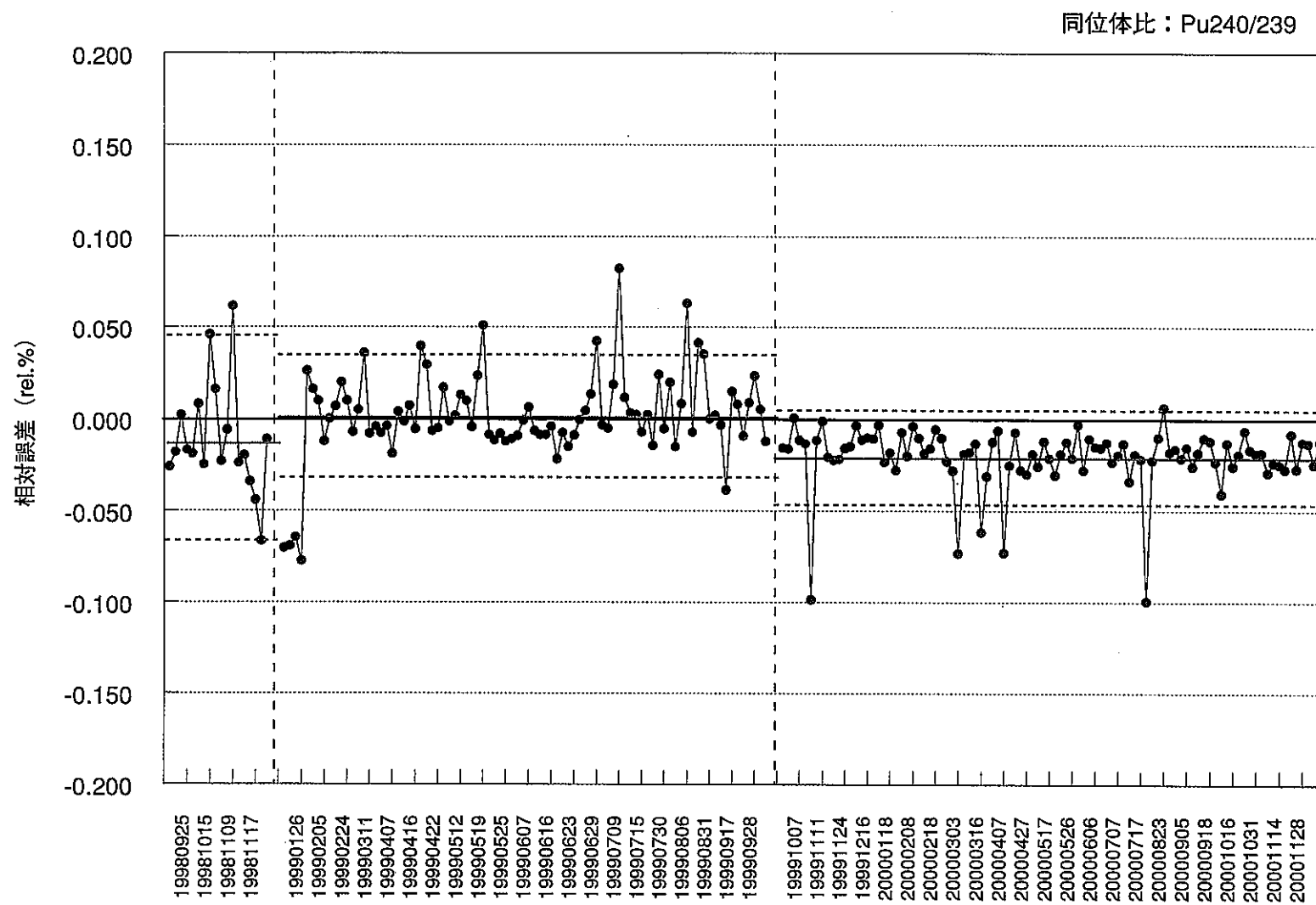


図4.1.4 NBS947測定データのx管理図 (MS4号機)

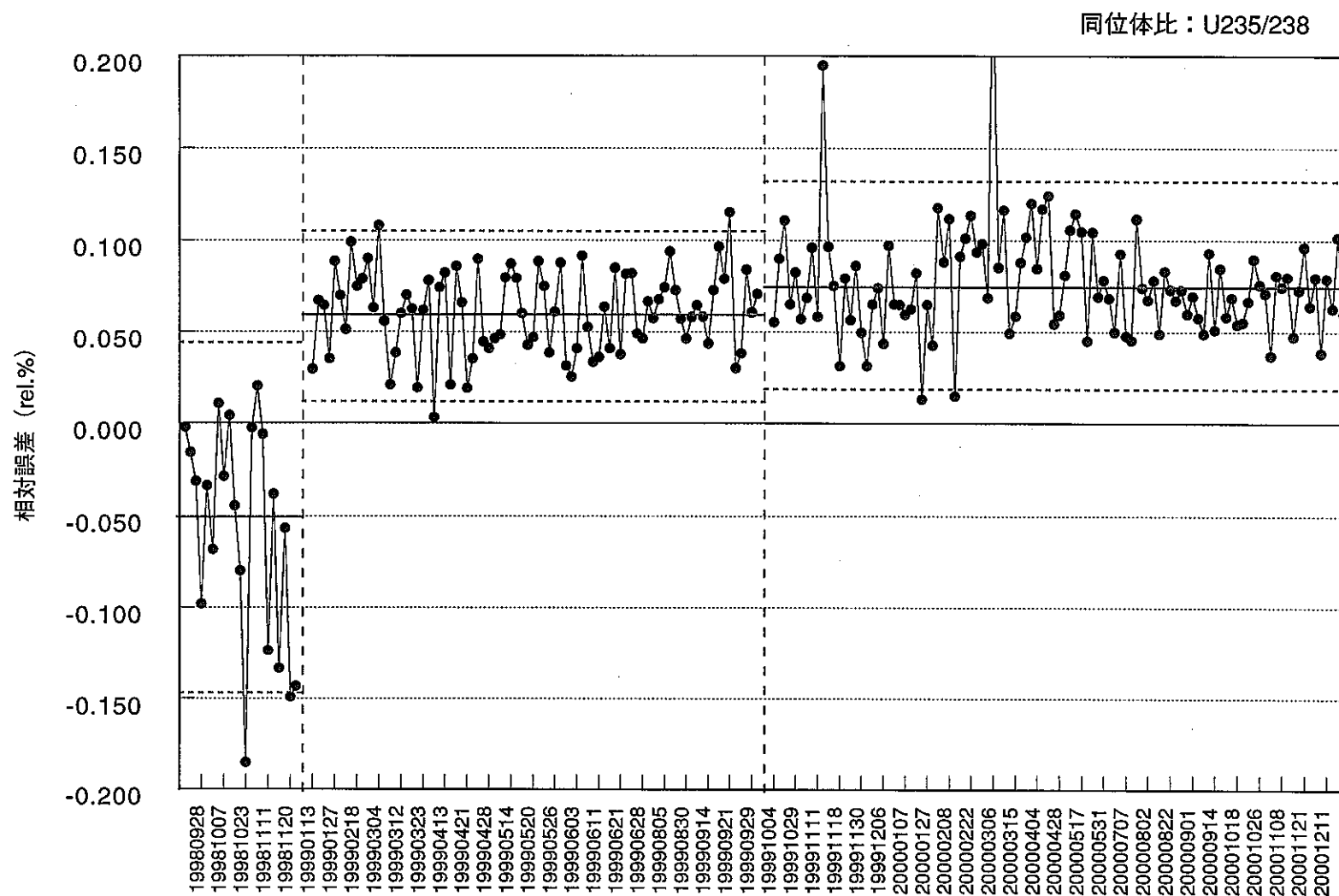


図4.2.1 U200測定データのx管理図 (MS1号機)

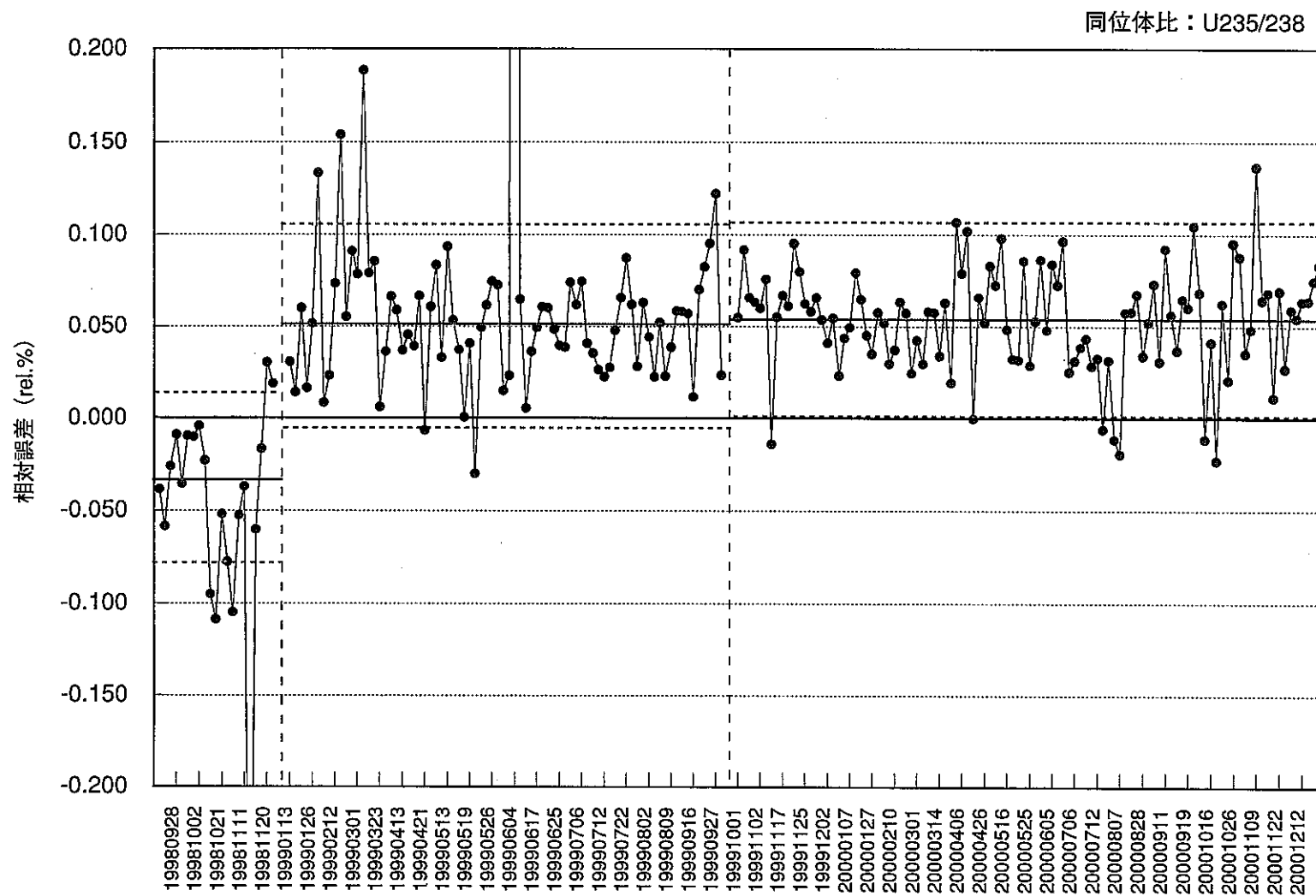


図4.2.2 U200測定データのx管理図 (MS2号機)

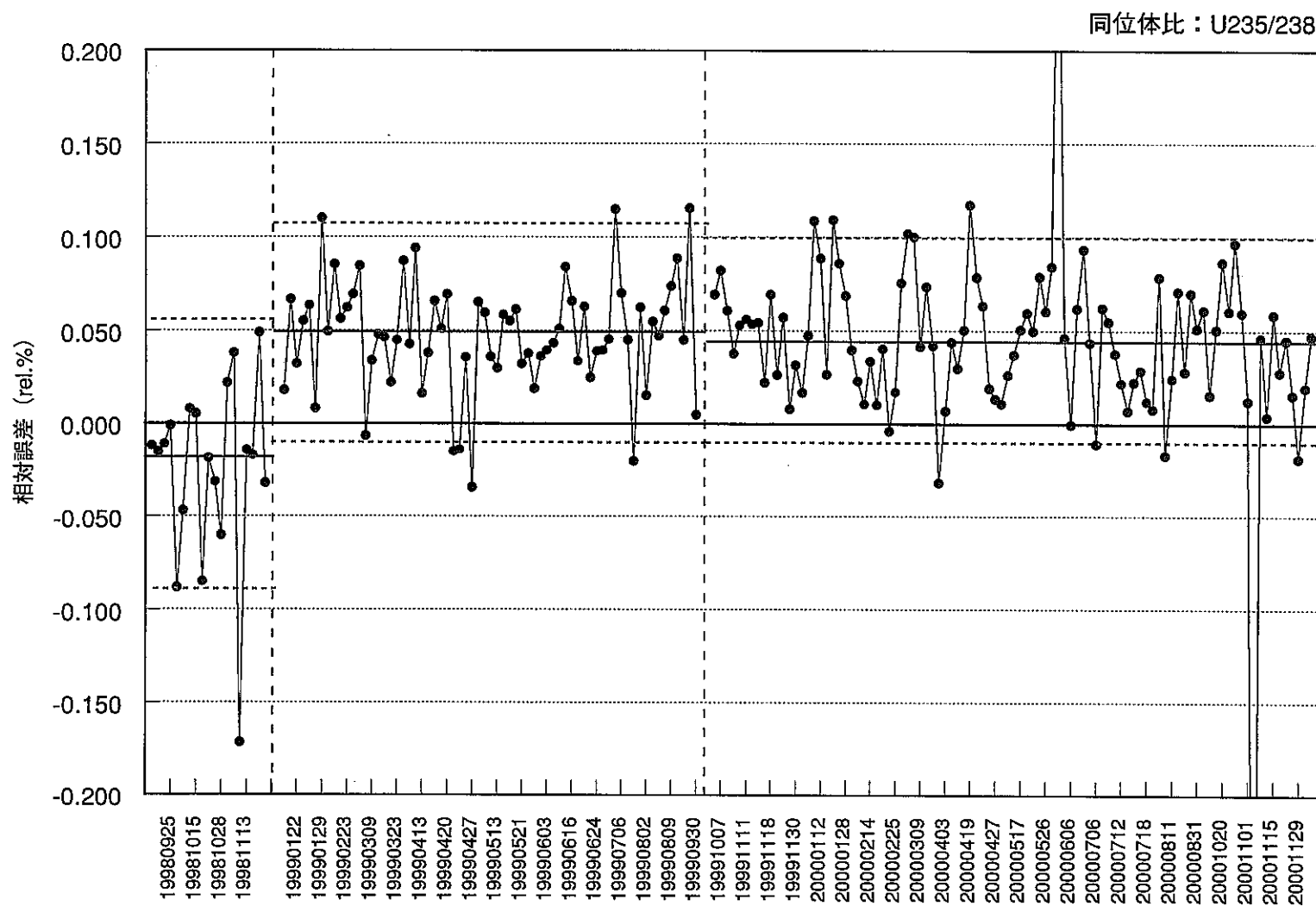


図4.2.3 U200測定データx管理図 (MS3号機)

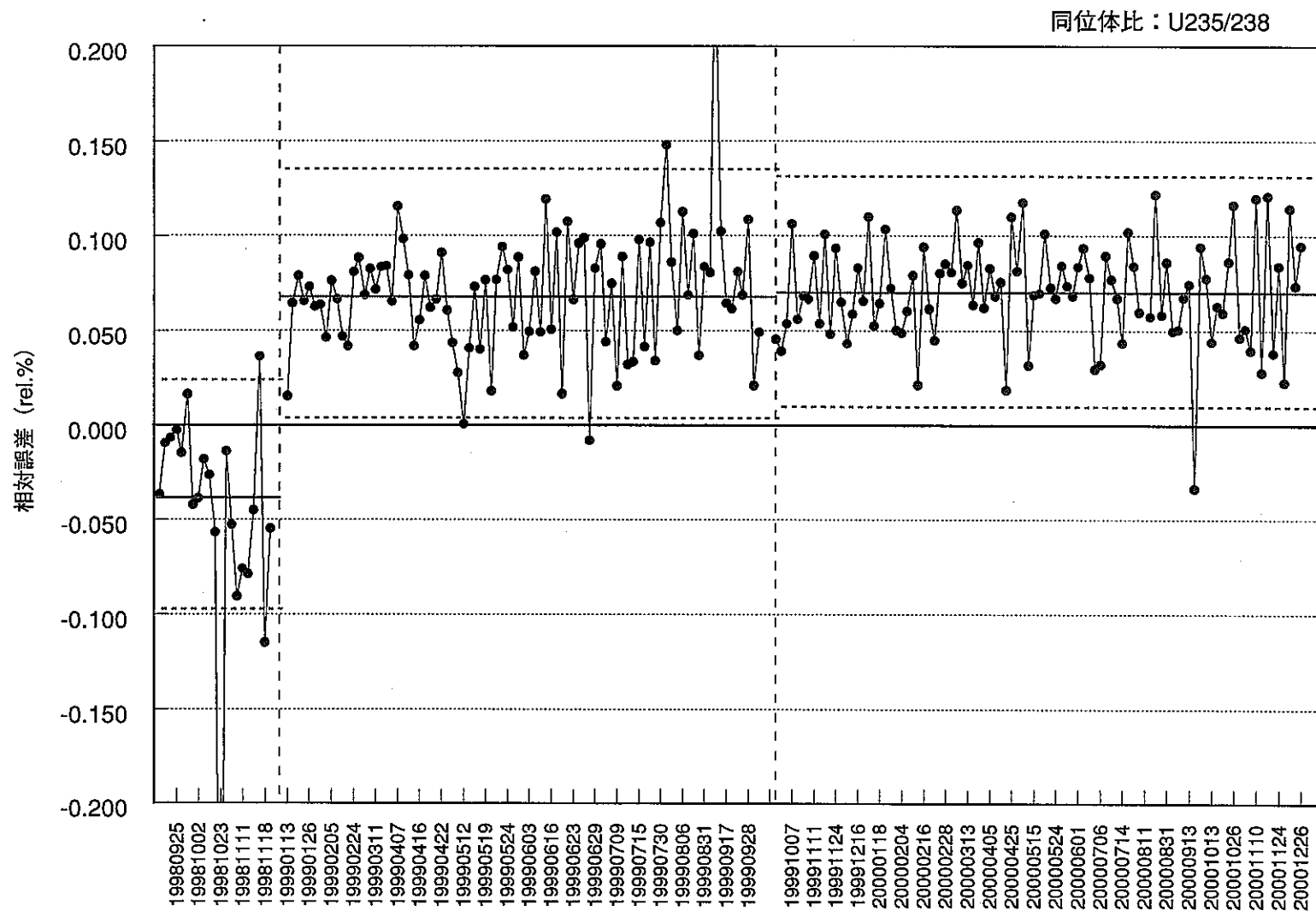


図4.2.4 U200測定データのx管理図 (MS4号機)

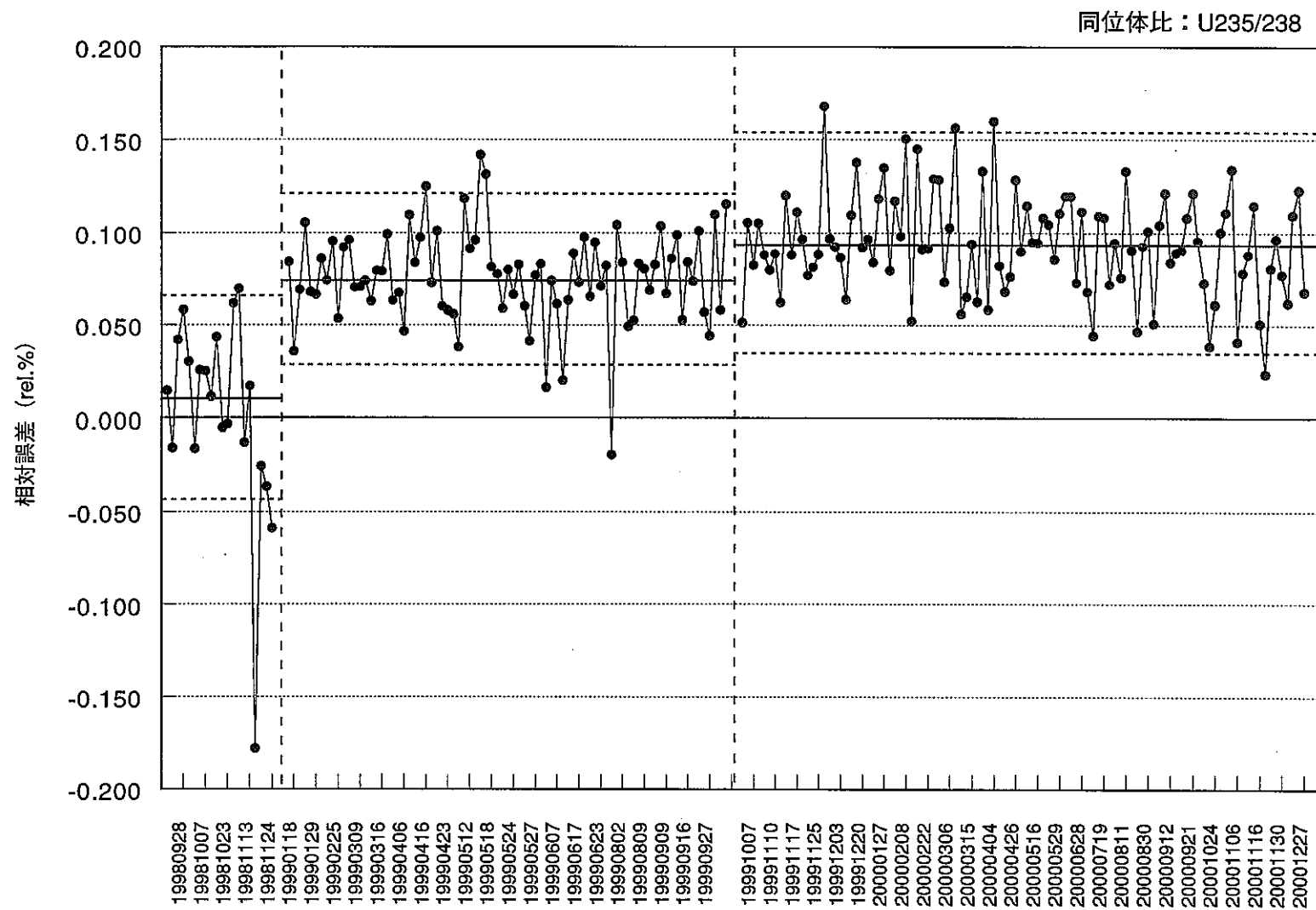


図4.2.5 U500測定データのx管理図 (MS 1 号機)

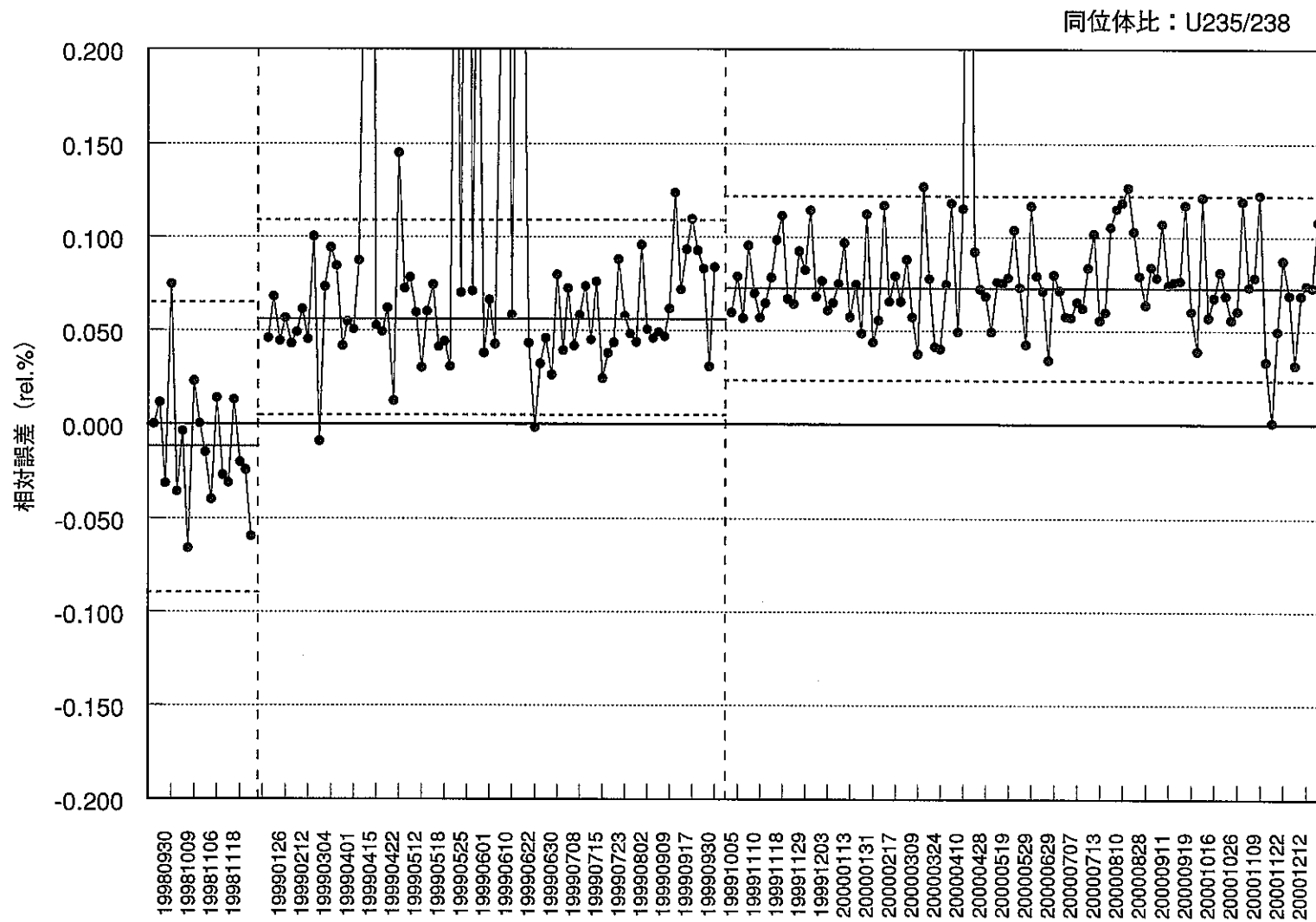


図4.2.6 U500測定データのx管理図 (MS2号機)

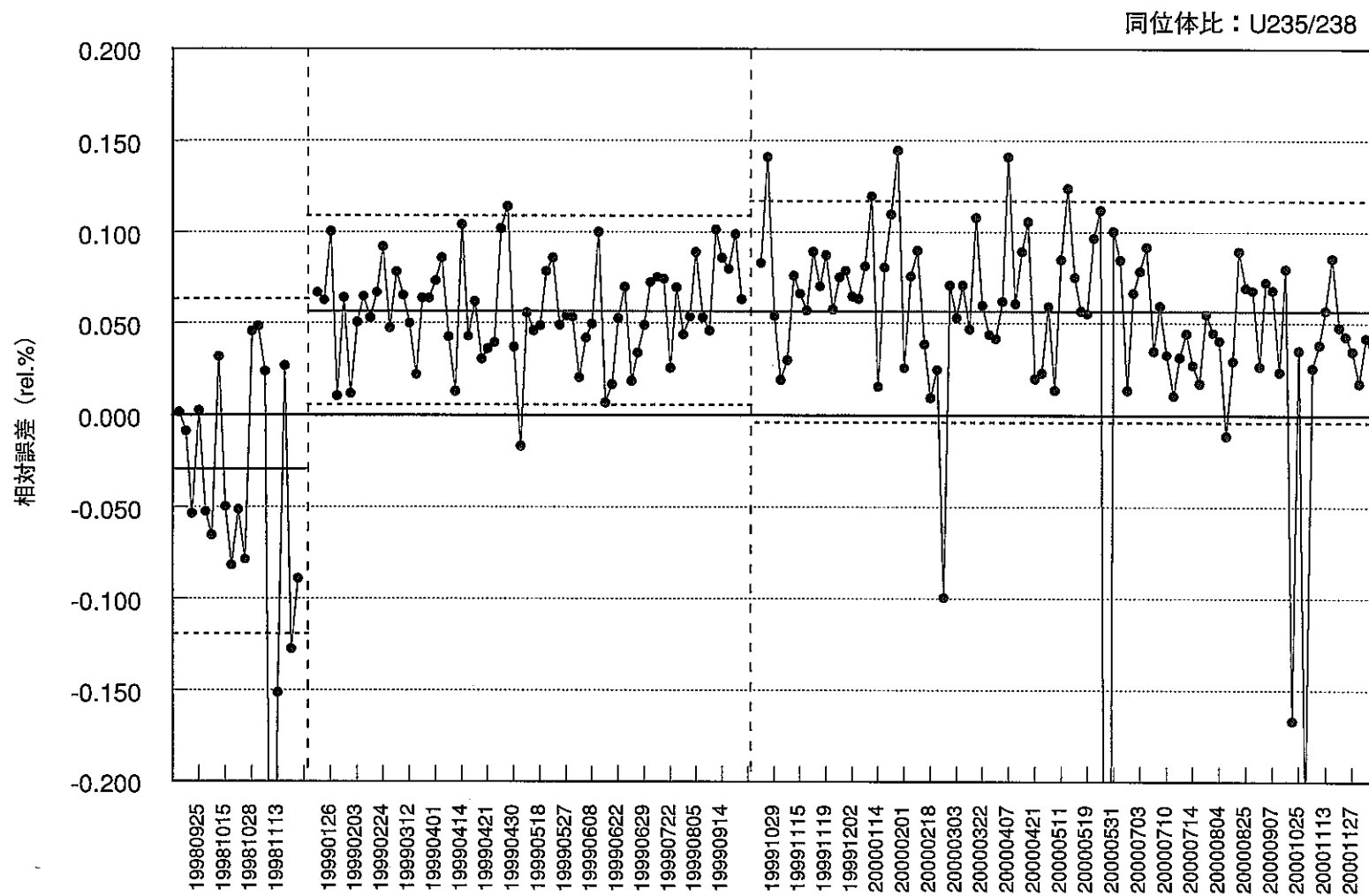


図4.2.7 U500測定データのx管理図 (MS3号機)

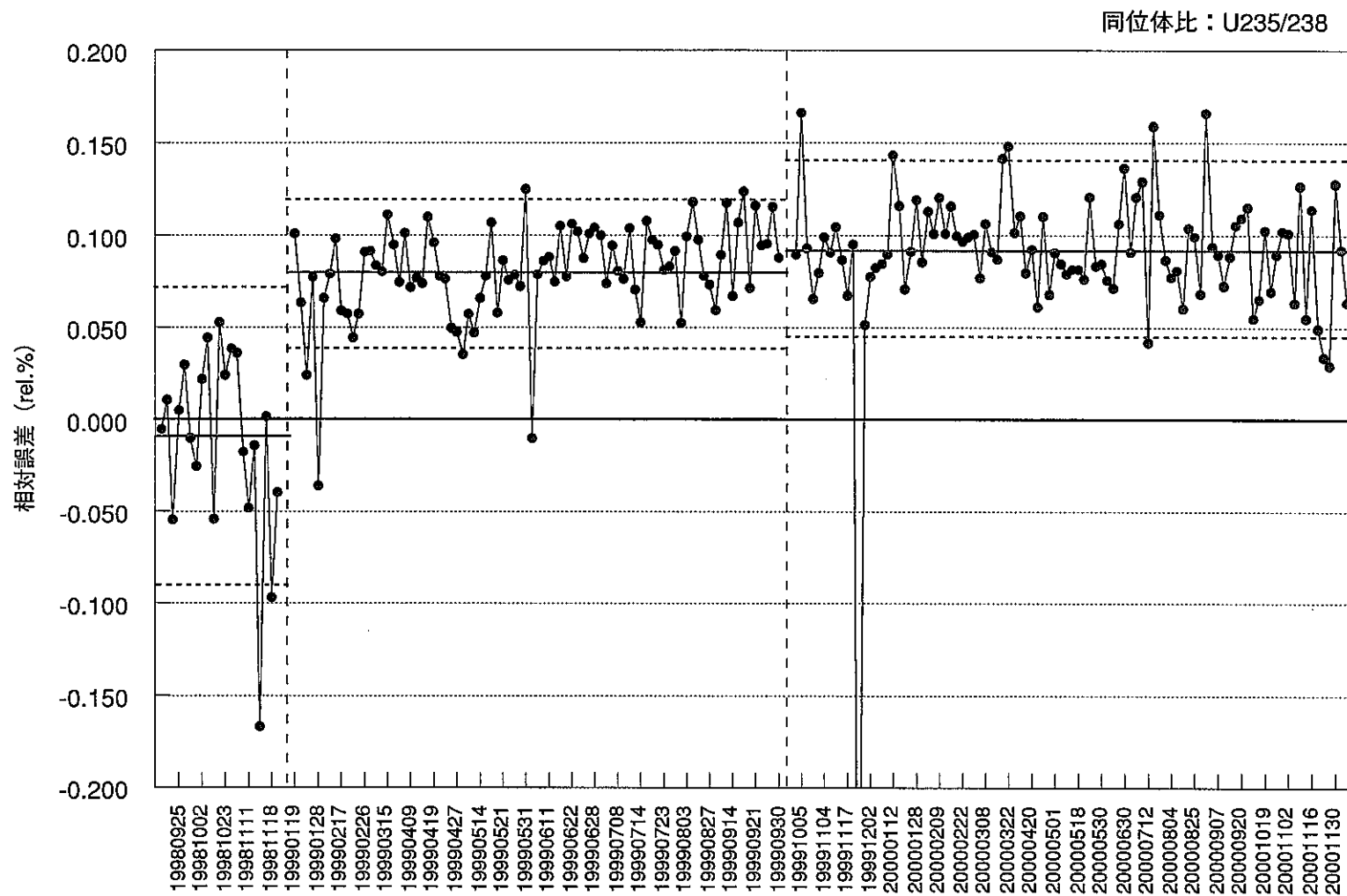


図4.2.8 U500測定データのx管理図 (MS4号機)

5. プルトニウム・ウラン同位体分析における分析誤差の評価

保障措置分析に関する分析誤差については、IAEA により国際目標値（以下、ITV）が提示されており、それらの値がプルトニウム・ウランの同位体分析および濃度分析を管理する上での管理目標になる。そこで、標準試料測定データを評価することにより、プルトニウム・ウラン同位体分析における分析誤差を求めるとともに、ITV との比較を行った。

5-1 分析誤差の評価の方法

(1) 各装置毎の誤差の評価

従来法では、装置の校正定数を毎月変更していたことから、月間誤差がシステムティック誤差（ σ_{sys} ）となり、月内誤差がランダム誤差（ σ_{ran} ）となる。しかし、今回の評価期間（1998 年 9～12 月）においては、データの数が少ないとともに、月毎の校正定数に大きな変動もなかったことから、期間内のデータのばらつきを全てランダム誤差として評価した。

TE 法では、装置の校正定数を有しないため、それが原因で生じるシステムティック誤差はない。そこで、改良前と改良後に期間を分けて、それぞれについて、期間内のばらつきを全てランダム誤差として評価した。

(2) 実試料の同位体分析における分析誤差の推定

実試料を分析する場合には、4 台の質量分析装置のいずれかをランダムに使用するため、各装置毎の誤差以外に、装置間の誤差が分析結果に反映されることになる。そこで、4 台の質量分析装置のデータを分散分析により解析し、繰り返し誤差成分をランダム誤差、装置間誤差成分をシステムティック誤差とした。

5-2 プルトニウム同位体分析における分析誤差

(1) 各装置のランダム誤差

NBS947 の Pu240/239 比測定データからランダム誤差を求めた結果について表 5.1 に示す。管理期間において全て ITV を十分に満足している。

表 5.1 各装置の Pu240/239 比測定におけるランダム誤差

単位：rel. %

	従来法	TE法(改良前)	TE法(改良後)	ITV
MS1号機	0.024	0.016	0.008	0.1
MS2号機	0.019	0.018	0.010	
MS3号機	0.017	0.015	0.009	
MS4号機	0.016	0.012	0.008	

(2) 実試料分析における分析誤差

4 台の質量分析装置の NBS947 の測定データから求めた、実試料分析におけるランダム誤差とシステマティック誤差を表 5.2 に示す。管理期間において、全て ITV を十分に満足している。

表 5.2 実試料の Pu240/239 比分析における誤差

単位：rel. %

	従来法	TE法(改良前)	TE法(改良後)	ITV
ランダム誤差	0.019	0.016	0.009	0.1
システマティック誤差	N.D.	0.009	0.009	0.05

5-3 ウラン同位体分析における分析誤差

(1) 各装置のランダム誤差

U200 および U500 の U235/238 比測定データからランダム誤差求めた結果を表 5.3, 5.4 に示す。管理期間において全て ITV を十分に満足している。

表 5.3 各装置の U200 の U235/238 比測定におけるランダム誤差

単位：rel. %

	従来法	TE法(改良前)	TE法(改良後)	ITV
MS1号機	0.050	0.021	0.022	0.2
MS2号機	0.020	0.024	0.021	
MS3号機	0.037	0.022	0.026	
MS4号機	0.029	0.026	0.025	

表 5.4 各装置の U500 の U235/238 比測定におけるランダム誤差

単位：rel. %

	従来法	TE法(改良前)	TE法(改良後)	ITV
MS1号機	0.029	0.018	0.025	0.2
MS2号機	0.033	0.021	0.023	
MS3号機	0.048	0.025	0.028	
MS4号機	0.034	0.019	0.020	

(2) 実試料分析における分析誤差

4 台の質量分析装置の U200 および U500 の測定データから求めた、実試料分析におけるランダム誤差とシステムティック誤差を表 5.5, 5.6 に示す。ランダム誤差の ITV は 0.2%、システムティック誤差の ITV は 0.2%であり、管理期間において、全てそれらを十分に満足している。

表 5.5 実試料の U235/238 比分析における誤差 (U200 測定データから算出)

単位: rel. %

	従来法	TE法(改良前)	TE法(改良後)	ITV
ランダム誤差	0.037	0.023	0.023	0.2
システムティック誤差	0.009	0.009	0.014	0.2

表 5.6 実試料の U235/238 比分析における誤差 (U500 測定データから算出)

単位: rel. %

	従来法	TE法(改良前)	TE法(改良後)	ITV
ランダム誤差	0.037	0.021	0.024	0.2
システムティック誤差	0.012	0.013	0.016	0.2

6. TE法の導入による分析誤差への影響

1999年1月からTE法を導入したことにより、測定データのばらつき、トレンドともに、従来法とは異なる傾向が見られた。そこで、プルトニウム・ウラン同位体分析において、TE法の導入により分析誤差にどのような影響があったかを評価した。

6-1 ランダム誤差への影響

(1) 従来法と改良後のTE法の比較

従来法と改良後のTE法について、各装置毎のランダム誤差における有意な差の有無をF検定により評価した。(表6.1)

プルトニウム同位体分析においては、表5.1に示したように、全ての装置で従来法に比べて改良後のTE法ではランダム誤差が小さくなっており、F検定の結果においても全てが99%有意で差があることから、改良後のTE法により、従来法に比べて顕著に分析精度が向上したと言える。

一方、ウラン同位体分析では、表5.3, 5.4に示されるように、両者に大きな差はなく、F検定の結果においても、有意な差が認められない場合も見られている。よって、ウラン同位体分析では、改良後のTE法により分析精度向上は図られているものの、プルトニウム同位体分析に比べてその程度は小さい。

表6.1 従来法と改良後のTE法におけるランダム誤差の差の評価結果

	NBS947	U200	U500
MS 1号機	**	**	—
MS 2号機	**	—	*
MS 3号機	**	*	**
MS 4号機	**	—	**

** : 99%有意、* : 95%有意、— : 有意差なし

(2) 改良前後のTE法の比較

改良前後のTE法について、各装置毎のランダム誤差における有意な差の有無をF検定により評価した。(表6.2)

プルトニウム同位体分析においては、表5.1に示したように、全ての装置で改良前に比べて改良後のTE法ではランダム誤差が小さくなっており、F検定の結果においても全てが99%有意で差があることから、TE法の改良により、改良前

に比べて顕著に分析精度が向上したと言える。

一方、ウラン同位体分析では、表 5.3, 5.4 に示されるように、両者に大きな差はなく、1 号機の U500 のように改良後の方がランダム誤差が大きくなっているケースも見られる。F 検定の結果においても、そのケースでは有意な差が認められており、その他では全て有意な差はない。よって、ウラン同位体分析では、TE 法の改良によって、効果は認められなかったと言える。

表 6.2 改良前後の TE 法におけるランダム誤差の差の評価結果

	NBS947	U200	U500
MS 1 号機	**	—	<u>**</u> ¹⁾
MS 2 号機	**	—	—
MS 3 号機	**	—	—
MS 4 号機	**	—	—

** : 99%有意、— : 有意差なし

1) 誤差は改良後が大

6-2 システマティック誤差への影響

従来法では、標準試料によって装置毎に校正定数を求め、測定値は校正定数によって補正されるために、原理的には装置間の誤差は発生しない。(現実的には、表 5.5, 5.6 に示されるように、校正時の誤差により、若干の装置間誤差が生じることがある) 一方、TE 法は校正定数を有しない絶対法であるため、原理的には装置間誤差を生じないが、実際には、質量分析装置の測定系において生じる様々な誤差要因(検出器の検出効率、アンプの直線性など)により、装置間誤差の問題が生じる可能性がある。

図 6.1~6.3 において示されるように、従来法では各装置間で有意な差は認められないが、TE 法では改良前後ともに有意な差が認められる。よって、上記のような問題により、TE 法では装置間に測定のバイアスが生じていると考えられる。この装置間の誤差はシステマティック誤差であり、4 章において評価しているように 0.009~0.016%である。この値は ITV と比較しても十分に小さい値であり、現状では問題となるものではない。

しかしながら、表 5.2, 表 5.4 および表 5.5 に示すように、ランダム誤差とシステマティック誤差を合わせたトータル誤差は、従来法と改良後の TE 法を比較した場合、ランダム誤差のみに比べて大きな差はなくなっており、TE 法による分析誤差への改善の効果は、それほど顕著なものではなくなっている。ランダ

Δ誤差のトータル誤差への寄与は測定の繰り返しにより小さくなることを考慮すると、システムティック誤差をできる限り小さくすることが、分析誤差を低下させるために重要であり、今後、装置間誤差をできる限り小さくするような対策をとることが重要である。

6-3 標準試料の表示値とのかたより

従来法では、標準試料によって装置毎に校正定数を求め、測定値は校正定数によって補正されるために、原理的には標準試料の表示値とのかたよりは生じない。一方、TE法では、標準試料の値を基準としていないために、標準試料の測定値が表示値と一致するとは限らない。そこで、従来法、改良前TE法、改良後TE法に関して、当該期間中の測定データと標準試料の表示値との相対誤差について、全平均および信頼率95%の信頼区間を求めた。その結果を図6.1～6.3に示す。なお、信頼区間は以下の式で算出した。

全装置の平均値の信頼区間： $\pm 1.96 \times \sqrt{(\sigma_{\text{ran}}^2/n + \sigma_{\text{sys}}^2)}$

各装置の平均値の信頼区間： $\pm t(n, 0.05) \times \sqrt{V/n}$

ここで、n：測定数

従来法において信頼区間の幅が広い主な理由は、測定数が他に比べて少ないことによる。また、特にTE法の場合において、全装置の平均値の信頼区間が各装置の信頼区間よりもかなり広がっているのは、上記の式でわかるように、TE法の場合に特徴的な装置間の誤差(σ_{sys})の信頼区間への寄与が、測定数が多くなっても変わらないためである。

従来法では、NBS947およびU200の信頼区間が表示値と一致しない装置が多くあった。その原因としては、校正時の誤差、校正時と測定時の測定条件の違いなどが考えられる。

TE法では、ほとんどの信頼区間が表示値と一致しておらず、標準試料の表示値と有意な差を示しているのが殆どであり、表示値に対してはバイアスを有している。しかしながら、標準試料の表示値の誤差から算出した同位体比測定における誤差は、U235/238比測定についてU200では±0.10%、U500では±0.14%、Pu240/239比測定についてNBS947では±0.12%であり、TE法による測定値の平均値と信頼区間は全てその範囲内であることから、TE法によるプルトニウム・ウラン同位体分析においてバイアスはないと言える。

TE法の改良前後では、U200、U500の測定では大きな差はないが、図6.1に示されるように、NBS947ではPu240/239比が全体的に低下して、標準試料の表示値に近づいている。この理由は次のように推定される。

改良前のプログラムでは、イオン化フィラメント調整中に温度が必要以上に上昇していたために、イオン化フィラメント調整中に試料のイオン化が進んでしまい、計数ロスが生じていたと考えられる。このロスは、イオン化温度の低いプルトニウムにおいて顕著であり、さらに、質量差別効果により質量数の小さい核種の方がイオン化が速いことにより、同位体測定結果にバイアスが生じていたことになる。イオン化側フィラメントの調整方法と測定開始条件を変更するプログラムの改良を行ったことにより、計数ロスが無くなり、より正確な測定が可能になったため、プルトニウム同位体比測定値は表示値に近づくとともに、ばらつきも小さくなった。一方、ウラン同位体比については、改良前のロスが小さかったことから、改良後の測定値に変化は現れなかったものと考えられる。

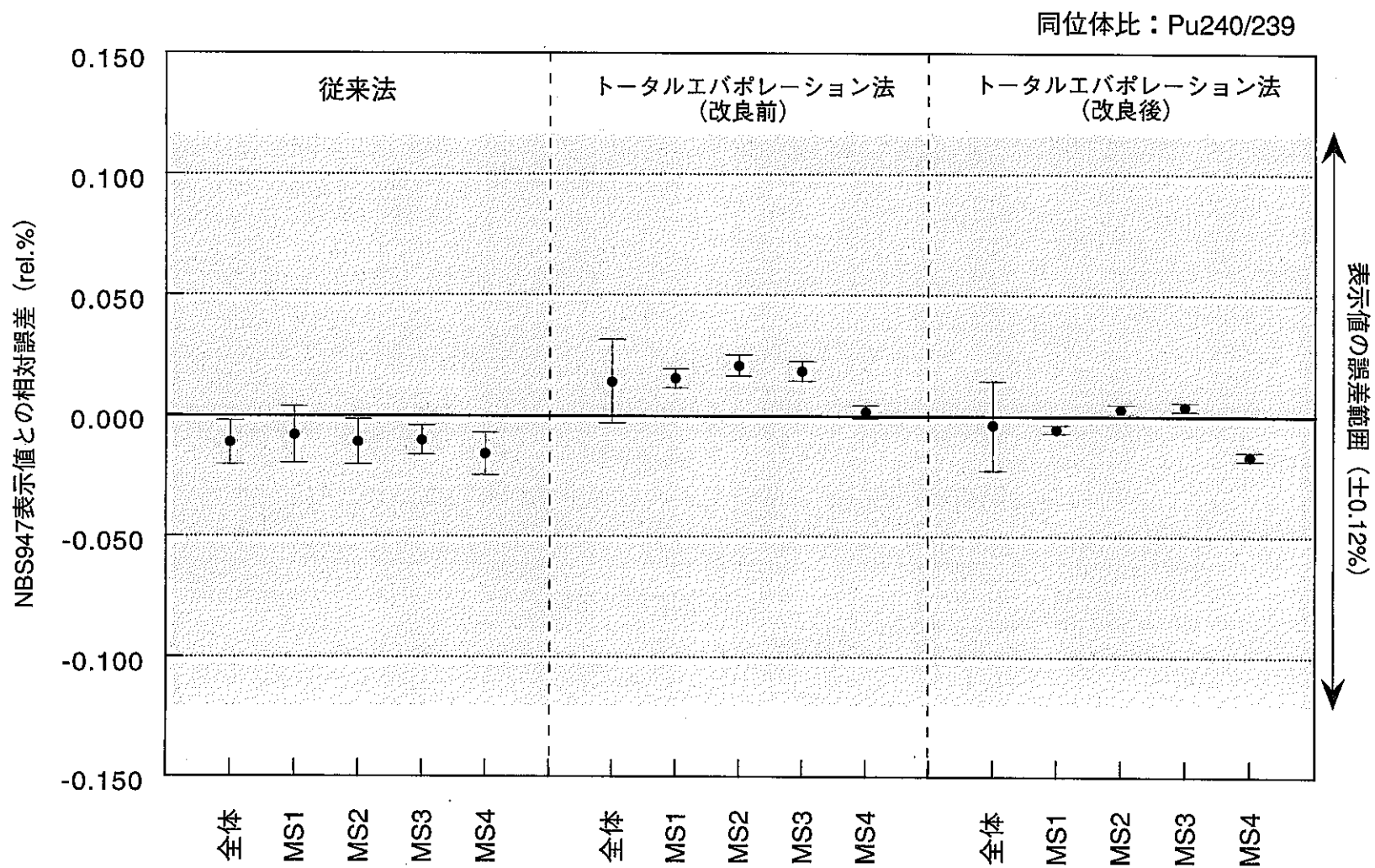


図6.1 NBS947の測定値の平均値と信頼限界

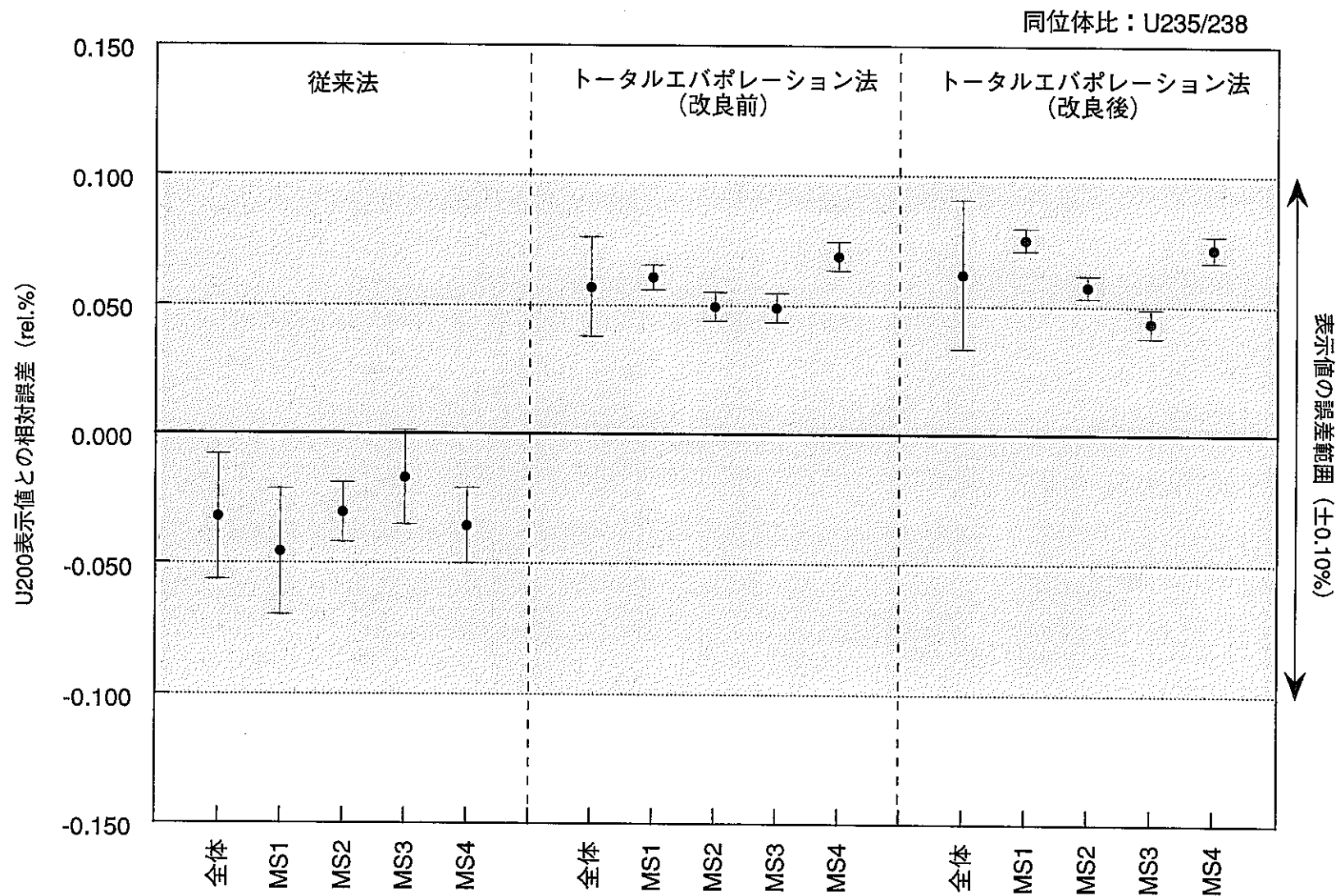


図6.2 U200の測定値の平均値と信頼限界

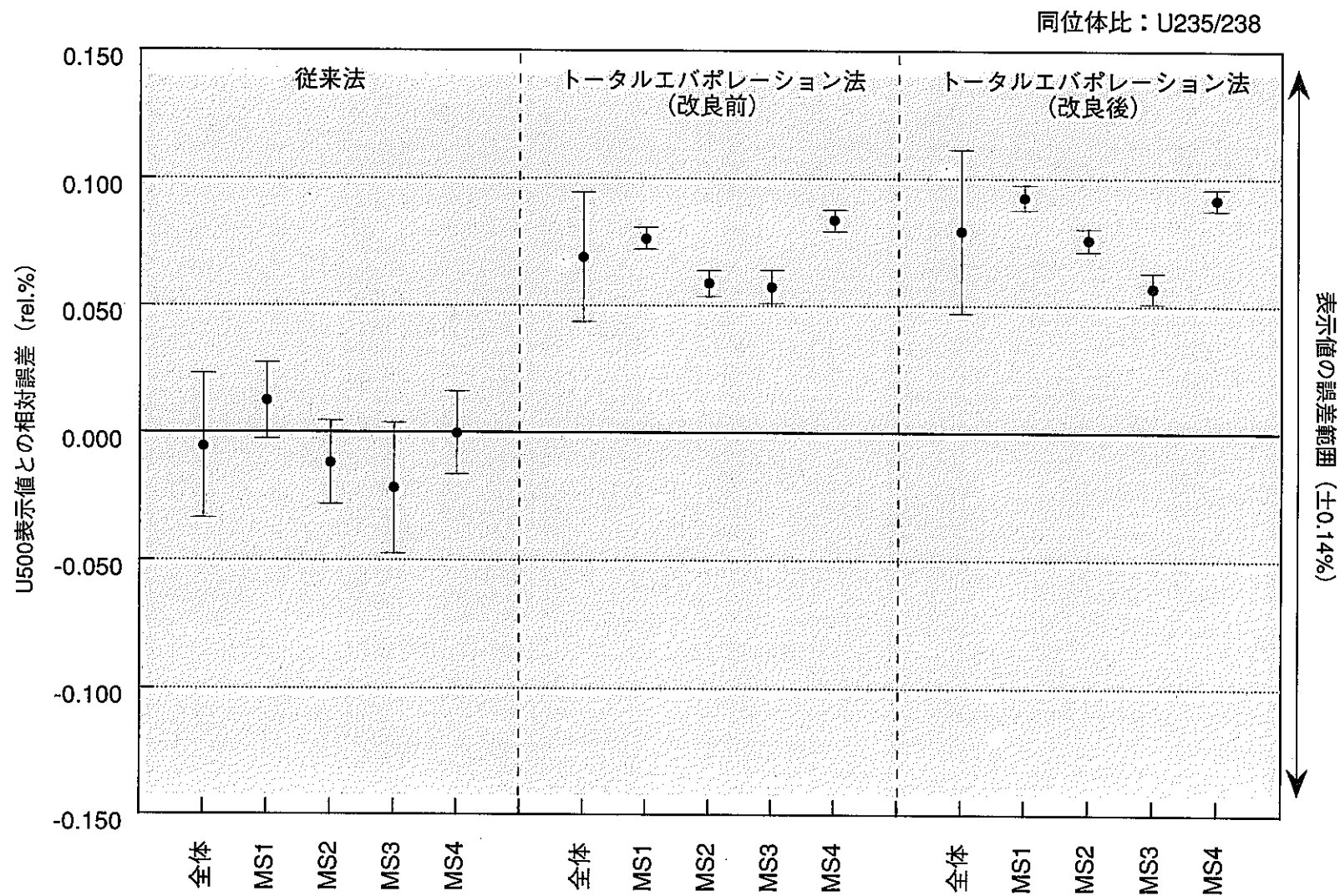


図6.3 U500の測定値の平均値と信頼限界

7. まとめ

プルトニウム・ウラン同位体分析における 1998 年 9 月～2000 年 12 月までの標準試料測定による日常管理データを評価したことにより、各質量分析装置毎のランダム誤差を求めるとともに、実試料の分析における分析誤差を推定した。その結果、以下の結論が得られた。

- 1) プルトニウム・ウラン同位体分析におけるランダム誤差およびシステムティック誤差は、ITV を十分満足していた。
- 2) 各装置の標準試料測定データの平均値と標準試料の表示値との間の差は、表示値の誤差の範囲内であり、プルトニウム・ウラン同位体分析において、バイアスは認められなかった。
- 3) TE 法を導入することにより特にプルトニウム同位体分析において顕著なランダム誤差の改善が見られた。一方、分析装置間にバイアスが生じたことにより、装置間誤差がシステムティック誤差として現れた。

8. 今後の課題

(1) 装置間誤差の解消

プルトニウム・ウラン同位体分析における分析誤差は ITV を十分満足しているものの、TE 法の導入により、装置間の誤差が生じていることがわかった。この誤差のレベルは問題ないとはいえ、同位体希釈質量分析法では 2 回の同位体測定の結果からプルトニウム・ウラン濃度を求めるために、濃度分析における分析精度を向上させるためには、同位体分析の精度はできる限り向上させることが望ましい。装置間の誤差の原因は、質量分析装置の精密な校正作業によって取り除かれると期待されるため、今後、そのような校正を実施することが必要である。

(2) ウラン同位体分析における精度の向上

TE 法の導入によりプルトニウム同位体分析においては顕著な分析誤差の改善が図られたが、ウラン同位体分析においては、期待された効果は現れていない。これは、プルトニウムとウランのイオン化の特性の違いからやむを得ない面もあるものの、現状で精度が向上しない原因を検討し、何らかの改善策を講じていく必要がある。