JAEA-Technology
2019-012
DOI:10.11484/jaea-technology-2019-012

HTTR の起動用中性子源の交換時期の推定

Estimation of Exchange Time for Neutron Startup Sources of HTTR

小野 正人　小澤 太教　藤本 望

Masato ONO, Takayuki KOZAWA and Nozomu FUJIMOTO

高速炉・新型炉研究開発部門
大洗研究所
高温ガス炉研究開発センター
高温工学試験研究炉部

Department of HTTR
HTGR Research and Development Center
Oarai Research and Development Institute
Sector of Fast Reactor and Advanced Reactor Research and Development

September 2019

Japan Atomic Energy Agency　日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

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

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2019

JAEA-Technology 2019-012

HTTR の起動用中性子源の交換時期の推定

日本原子力研究開発機構
高速炉・新型炉研究開発部門　大洗研究所
高温ガス炉研究開発センター　高温工学試験研究炉部
小野　正人、小澤　太教、藤本　望*

（2019 年 6 月 13 日　受理）

高温工学試験研究炉部では、原子炉の起動及び広領域中性子検出器の計数率の確認を目的として、起動用中性子源 ^{252}Cf を用いているが、半減期が約 2.6 年と短いことから適切な時期に交換する必要がある。交換時期の推定には、広領域中性子検出器の「WRM 計数率低」の警報発報を防ぐために、半減期のみならず、ゆらぎを考慮する必要がある。このため、広領域中性子検出器の計数率と標準偏差の関係式等から計数率の最小値を予測する手法を考案した。本手法を用いて広領域中性子検出器の計数率の変化を予測した結果、計数率が 3.0cps に低下するのが 2022 年、1.5cps に低下するのが 2024 年となり、2024 年までに交換を完了する必要があることが明らかとなった。

大洗研究所：〒311-1393　茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002 番地
＊　九州大学

JAEA-Technology 2019-012

Estimation of Exchange Time for Neutron Startup Sources of HTTR

Masato ONO, Takayuki KOZAWA and Nozomu FUJIMOTO*

Department of HTTR, HTGR Research and Development Center,
Oarai Research and Development Institute,
Sector of Fast Reactor and Advanced Reactor Research and Development,
Japan Atomic Energy Agency,
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received June 13, 2019)

The High Temperature Engineering Test Reactor has a neutron source of ^{252}Cf to start up the reactor and to confirm count rates of wide range monitors. The half-life of ^{252}Cf is short, about 2.6 years, so it is necessary to replace at an appropriate time. In order to estimate the period to replace, it is necessary to consider not only the half-life but also the fluctuation of the count rate of the wide range monitor to prevent alarm. For that reason, the method has been derived to predict a minimum count rate from relationship between the count rate and the standard deviation of the count rate of the wide range monitors. As a result of predicting the count rate using this method, it was found that the minimum count rate reaches to 3.0cps in 2022 and 1.5cps in 2024. Therefore, it is necessary to exchange ^{252}Cf by 2024.

Keywords: HTTR, Neutron Startup Source, Wide Range Monitor, Attenuation

* Kyushu University

目　次

1.　はじめに ----------1
2.　HTTR の起動用中性子源と広領域中性子検出器の概要 ----------1
　2.1 起動用中性子源 ----------1
　2.2 広領域中性子検出器 ----------1
3.　計数率の測定値 ----------2
4.　計数率の最小値の予測 ----------3
5.　まとめ ----------3
謝辞 ----------4
参考文献 ----------4

Contents

1.　Introduction ----------1
2.　Outline of Neutron Startup Source and Wide Range Monitor of HTTR ----------1
　2.1 Neutron Startup Source ----------1
　2.2 Wide Range Monitor ----------1
3.　Measurement of WRM Count Rate ----------2
4.　Prediction of Minimum WRM Count Rate ----------3
5.　Conclusion ----------3
Acknowledgements ----------4
References ----------4

This is a blank page.

1. はじめに

日本原子力研究開発機構の HTTR（高温工学試験研究炉 : High Temperature Engineering Test Reactor）は、高温ガス炉技術基盤の確立と高度化を目的として大洗研究所に建設された日本初の高温ガス炉である [1]。

HTTR では、原子炉の起動及び広領域中性子検出器（WRM）の計数率の確認を目的として、^{252}Cf（3.7GBq×3 個）を炉内に装荷している。^{252}Cf の半減期は約 2.6 年であるため、時間経過による ^{252}Cf の強度低下に伴い計数率が低くなり、使用目的を果たせなくなるおそれがある。また、^{252}Cf の交換には、米国からの輸入、日本アイソトープ協会との協議等を含めて約 3 年の期間を要する。そのため、^{252}Cf の交換計画は、交換時期を適切に予測して、作成しなければならない。

計数率は ^{252}Cf の半減期に従い減衰するため、計数率の平均値を予測することは容易である。しかしながら、実際の計数率は平均値を中心にゆらぐため、ゆらぎを考慮した計数率を予測する必要がある。ゆらぎを考慮した計数率の最小値を予測することが可能となれば、「WRM 計数率低」の警報の発報時期を予測すること及び ^{252}Cf の適切な交換時期を計画することができる。

ゆらぎを考慮した計数率の最小値を予測するに当たって、WRM の計数率の測定結果を用いて、計数率と標準偏差の関係式を導出するとともに、平均値を中心とした計数率のゆらぎの分布を把握した。得られた関係式等から計数率の最小値を予測する手法を確立し、今後の計数率の推移を得た。

本報では、計数率の最小値を予測する手法及び今後の計数率の推移について報告する。

2. HTTR の起動用中性子源と広領域中性子検出器の概要

2.1 起動用中性子源

HTTR では、優れた中性子収率を有し、高い使用温度（約 600℃）で安定な ^{252}Cf を中性子源として採用しており、^{252}Cf を装荷した 3 つの中性子源ホルダが炉内に装荷されている [2]。HTTR 起動用中性子源の仕様を表 2.1 に示す [3]。^{252}Cf の半減期は約 2.6 年であること及び WRM の健全性を確認するために所定レベル以上の計数率が必要なことから、中性子源の定期的な交換が必要である。2015 年に 3 回目の中性子源交換を実施した [4]。

中性子源を格納する中性子源ホルダは SUS316L 製の円柱状のキャプセルで、炉心黒鉛構造物の一つである制御棒案内ブロック内に装荷される。制御棒案内ブロック内の中性子源ホルダの配置を図 2.1 に示す。中性子源ホルダが装荷された 3 体の制御棒案内ブロックは、燃料領域にある制御棒案内カラムの最上段に、120°間隔で装荷されている。原子炉圧力容器の断面図を図 2.2 に示す。

2.2 広領域中性子検出器

HTTR の中性子計装は、広領域中性子計装と出力領域中性子計装の 2 系統からなり、原子炉

の起動領域から定格原子炉出力の 120%までの中性子束レベルを測定する。各系統は 3 チャンネルの検出器を有する。

HTTR は炉内温度が高いことから、炉心内ではなく固定反射体ブロックの上部に広領域中性子計装を、圧力容器の外側に出力領域中性子計装をそれぞれ設置している。それぞれの中性子検出器の装荷位置を図 2.3 に示す。

WRM は、原子炉の停止状態から定格出力の 30%（9MW）までの中性子束を計測し、異常な出力上昇に対して原子炉スクラム信号を発信するために用いられるとともに、原子炉の未臨界を確認するためにも使用される。そのため、低温未臨界時に所定レベル以上の計数率を計測できることを確認する必要がある。HTTR ではこれらの条件を満たすべく、中性子源及び WRM 感度等の諸元を決定している。WRM の基本仕様を表 2.2 に示す [5]。

「WRM 計数率低」の警報の設定範囲は 1～10^6cps であり、通常の設定値は 3cps としている。中性子源の強度低下に伴い WRM 計数率低の設定値を変更する場合、基盤の誤差を考えると、1.5cps が設定できる。

3. 計数率の測定値

WRM により測定した計数率と予測値を図 3.1 に示す。図 3.1 に示す WRM 計数率の各プロットは毎週日曜日（24 時間（1440 分））に 10 分間隔で取得した 144 個のデータの平均値であり、データ取得期間は 1999 年 3 月から 2019 年 5 月の約 20 年である。また、予測値は、中性子源を交換した初期値のカウント数が 2005 年 10 月頃では 23cps ないし 25cps であること及び 2015 年 11 月頃では 23cps ないし 26.5cps であることから、これらの初期値が中性子源の半減期（約 2.6 年）に従って減少すると予測したものである。図 3.1 から、WRM のⅠ、Ⅱ、Ⅲ系は、ほぼ同じ値を示しながら、^{252}Cf の半減期で推移している。計数率がばらついている原因は、制御棒の引き抜き状態、WRM の交換作業中等によるものである。

WRM のⅠ、Ⅱ、Ⅲ系の計数率と標準偏差の関係を図 3.2 に示す。図 3.2 は、検出器の動作不能や交換作業中のデータを含めた全てのデータを記載している。図 3.2 から、計数率が高いと標準偏差が大きい傾向がある。図 3.3 は、図 3.2 に示す全データから検出器の動作不能や交換作業中のデータ等をノイズとして削除して求めた標準偏差と、これらのデータから導出した計数率と標準偏差の近似直線を示す。近似線を線形近似により取得した理由は、標準偏差は計数率の平方根に比例するが [6]、線形近似の相関関数が指数近似の相関関数よりも良好な値であるため及び計数率が低いときに保守的に標準偏差が大きくなるためである。図 3.3 に示す近似直線の式を用いれば、計数率（ϕ）に対応した標準偏差（σ）の値を算出することが可能である。近似直線の式を式(1)に示す。

$$\sigma = 0.0219 \times \phi + 0.1433 \qquad (1)$$

図 3.4 は計数率の 0.1cps ごとの頻度分布であり、WRM の 3 チャンネルはいずれも同様な挙

動を示すため、図 3.4 では代表としてチャンネルⅡのみを示している。図 3.4 の分布は、正規分布（平均値 4.18、標準偏差 0.24）を示している。分布のすそを拡大し、対数表示したものを図 3.5 に示す。図 3.5 から、計数率の低い方では、4～5σまで計数率が分布し、5σ以降は計数率が分布していない。なお、データの分布が正規分布と仮定すれば、±3σの範囲に 99.73%のデータが含まれていることになる。本データでは、±3σの範囲（3.46～4.90）に 99.47%のデータが含まれている。

4. 計数率の最小値の予測

前章から、今後の計数率の最小値を予測する。最小値を予測する手法を以下に示す。

① ^{252}Cf の半減期から計数率を求め、式(1)により標準偏差を算出する。

② 標準偏差は 4～5σまで分布することから、①で算出した標準偏差に 4～5 を乗じる。

③ ①で求めた計数率と②で求めた 4～5σの差が計数率の最小値となる。

上記の手順により予測した計数率の最小値を図 4.1 及び図 4.2 に示す。図 4.1 は、2011 年から 2016 まで（第 3 回中性子源交換前）の計数率の最小値を予測したものである。同図では 2012 年中頃に計数率の最小値が 3.0cps、2014 年中頃に計数率の最小値が 1.5cps となった。測定では、2012 年 6 月に 3.0cps 以下の警報が、2014 年 6 月に 1.5cps 以下の警報が発報しており、予測値と測定値が一致していることを確認した。なお、計数率が 1.5cps となり「WRM 計数率低」の警報が発報した際は、あらかじめ定めた措置により WRM が正常であることを確認していた。

図 4.2 は、今後の計数率の最小値を予測したものである。図 4.1 では、前述のとおり中性子源交換直後の初期値のカウント数は 3 チャンネルの最小値と最大値がそれぞれ 23cps と 25cps であり、計測値と予測値が良く一致していることから、23cps と 4σの差（23cps－4σ）及び 25cps と 5σの差（25cps－5σ）を記載している。一方、図 4.2 では、前述のとおり中性子源交換直後の初期値のカウント数は 3 チャンネルの最小値と最大値がそれぞれ 23cps と 26.5cps であり、保守的に今後の推移を予測するために、計数率が最小値の 23cps と標準偏差が最大の 5σとの差（23cps－5σ）も記載している。図 4.2 から、WRM の計数率の最小値は 2022 年に 3.0cps に、2024 年に 1.5cps に到達することが分かる。

5. まとめ

高温工学試験研究炉部では、起動用中性子源 ^{252}Cf の適切な交換時期を計画するために、WRM の計数率の最小値を予測した。計数率は ^{252}Cf の半減期に従い減衰するため、計数率の平均値を予測することは容易である。しかしながら、「WRM 計数率低」の警報の発報時期を予測するため及び ^{252}Cf の適切な交換時期を計画するためには、ゆらぎを考慮した計数率の最小値を予

測する必要がある。

ゆらぎを考慮した計数率の最小値を予測するに当たって、これまで長期間に渡って蓄積したWRM の計数率の測定結果を利用することで、初めて計数率と標準偏差の関係式を取得するとともに、平均値を中心とした計数率のゆらぎの分布を把握した。得られた関係式等から計数率の最小値を予測する手法を確立し、今後の計数率の推移を得た。その結果、WRM の計数率の最小値は 2022 年に 3.0cps に、2024 年に 1.5cps に到達することが分かった。本結果は、事前に予算確保、協議等が必要な ^{252}Cf の交換作業に対して、効率的な ^{252}Cf の交換計画の立案に利用できるものであると考える。

謝　辞

本評価を行うにあたり、篠崎正幸 高温工学試験研究炉部長、石塚悦男 同部 HTTR 技術課長に御指導、御助言頂きました。さらに、運転データ等の取得にあたり HTTR 運転管理課各位にご協力をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

1) S. Saito, et al., : “Design of High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR)”, JAERI 1332, (1994), 247p.
2) 竹田　他, “高温工学試験研究炉の本設中性子源に対する取扱い技術の確立”, JAERI-Tech 99-053, 1999, 57p.
3) 高温工学試験研究炉部　編, “HTTR（高温工学試験研究炉）の試験・運転と技術開発（2013 年度）”, JAEA-Review 2014-041, 2014, 140p.
4) 島﨑　他, “HTTR 起動用中性子源用の輸送容器の開発”, JAEA-Technology 2016-038, 2017, 36p.
5) 篠原　他, “高温工学試験研究炉（HTTR）の使用済広領域中性子検出器の動作不能調査 －サンプル試験及び破壊試験－”, JAEA-Technology 2012-032, 2012, 29p.
6) 飯田　編, “放射線概論　第 1 種放射線試験受験用テキスト　第 6 版”, 通商産業研究社, 東京, pp.381-383 (2005).

表 2.1　HTTR 起動用中性子源の仕様 [3)]

種類	^{252}Cf
数量	11.1GBq (3.7 GBq × 3)
カプセル寸法	φ 7.8mm × h 10mm
最高使用温度	800℃
最高使用圧力	4.7MPa

表 2.2　HTTR 広領域中性子検出器の仕様 [5)]

項目	仕様
1. 寸法	
(1) 外径	φ38mm
(2) 検出器全長	387mm
(3) ケーブル長	約 8m
2. コネクタ	TRC-3SP-M
3. 材料	
(1) 主要材料	インコネル
(2) 電離箱絶縁材	アルミナセラミック
(3) 中性子有感物質	濃縮ウラン
(4)　封入ガス	Ar + N_2 + He
4. 絶縁抵抗	
(1) HV 極 C-I	10^{10} Ω以上
(2) SIG 極 C-I	同上
(3) I-O（共通）	10^{8} Ω以上
5. 使用条件	
(1) 周囲温度	通常時：450℃
	事故時：550℃
	（ただし、コネクタ部は 80℃）
(2) 熱中性子束	1×10^{11} $cm^{-2}\cdot s^{-1}$
(3) γ線束	1×10^{8} Gy/h
(4) 最高使用圧力	4.7MPaG
6. 動作定格	
(1) 動作電圧	約 300V
(2) 熱中性子感度（パルス）	0.1cps/($cm^{-2}\cdot s^{-1}$)±20%
(3) 熱中性子感度（直流）	約 1.6×10^{-14} A/($cm^{-2}\cdot s^{-1}$)±20%
(4) 電流パルス	1.6μA
(5) 電荷パルス	6.5×10^{14} C
(6) 電荷収集時間	150ns 以下

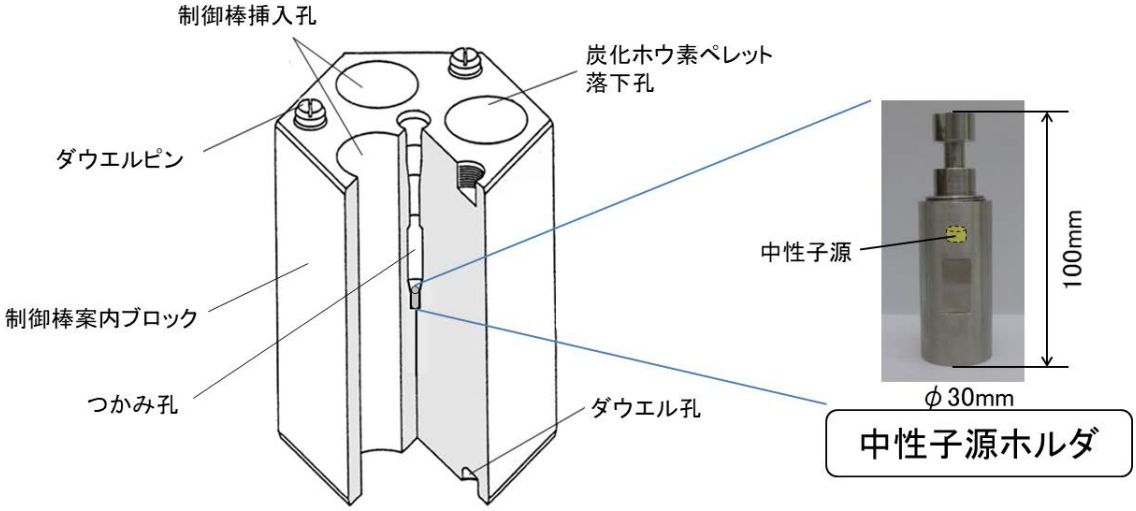

図 2.1　制御棒案内ブロック中の中性子源ホルダの配置 [4)]

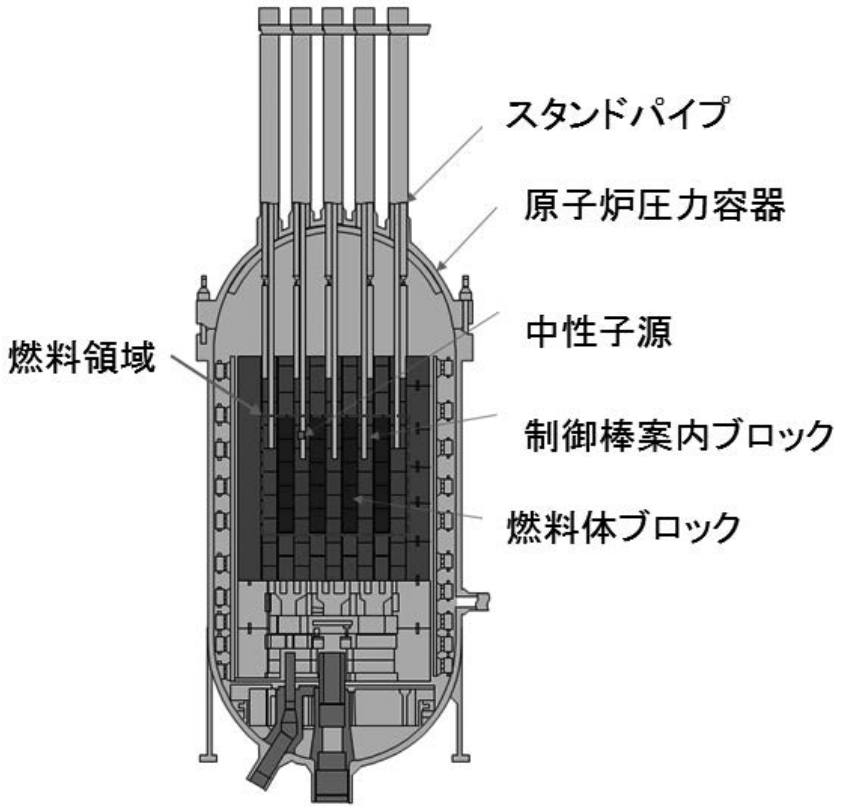

図 2.2　中性子源ホルダ入りの制御棒案内ブロックの配置 [4)]

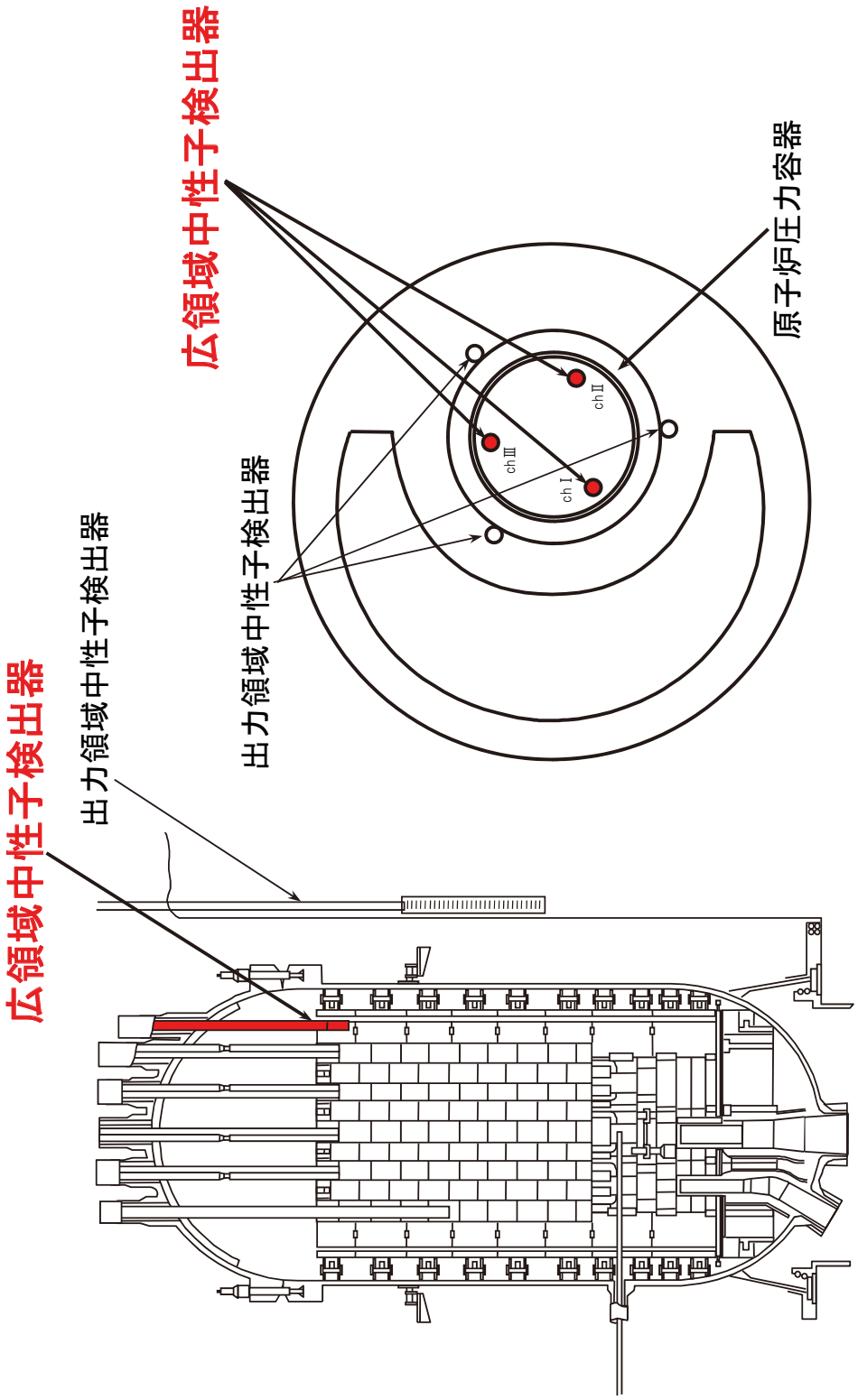

図 2.3　中性子検出器の装荷位置

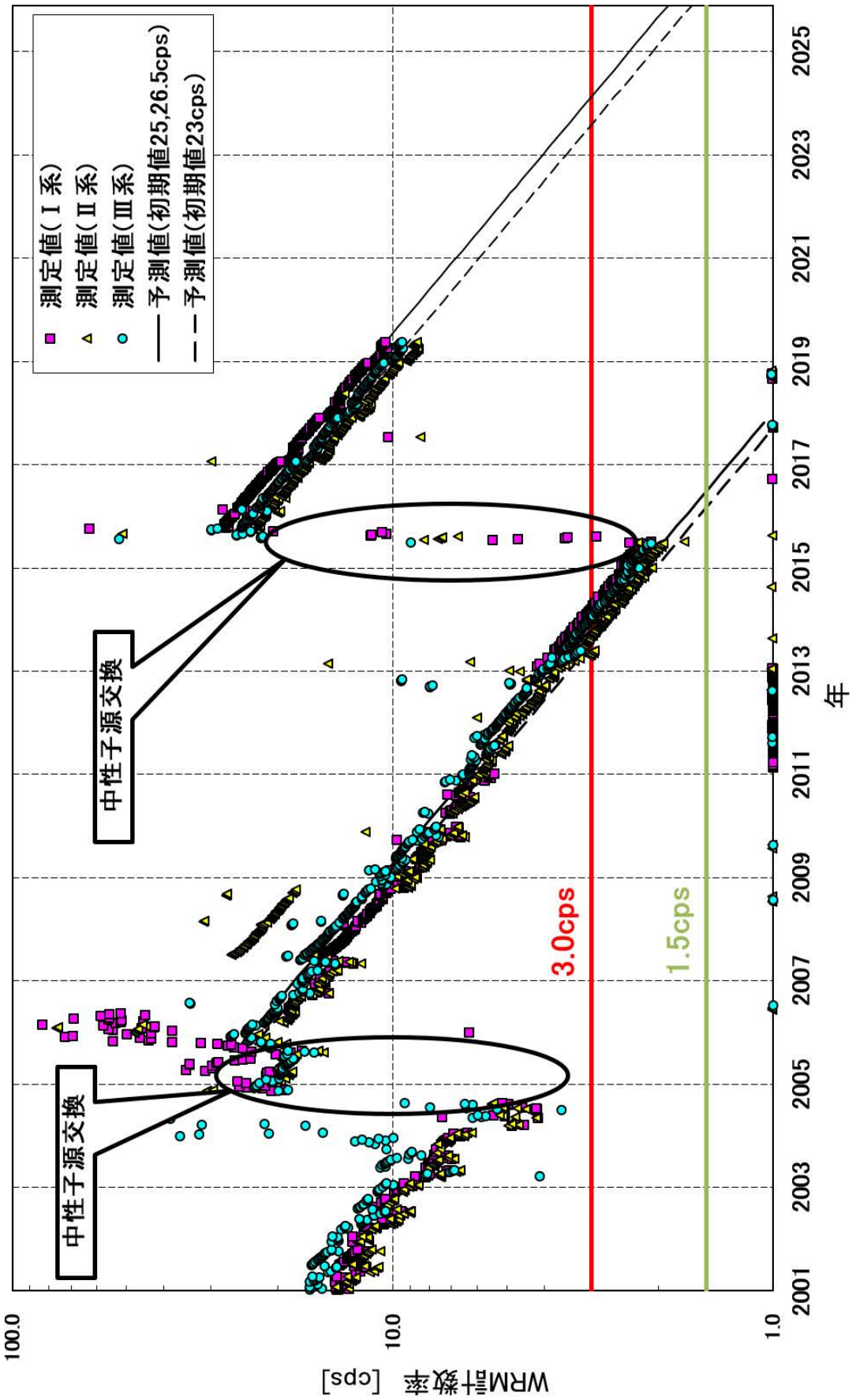

図 3.1　WRM により測定した計数率と予測値

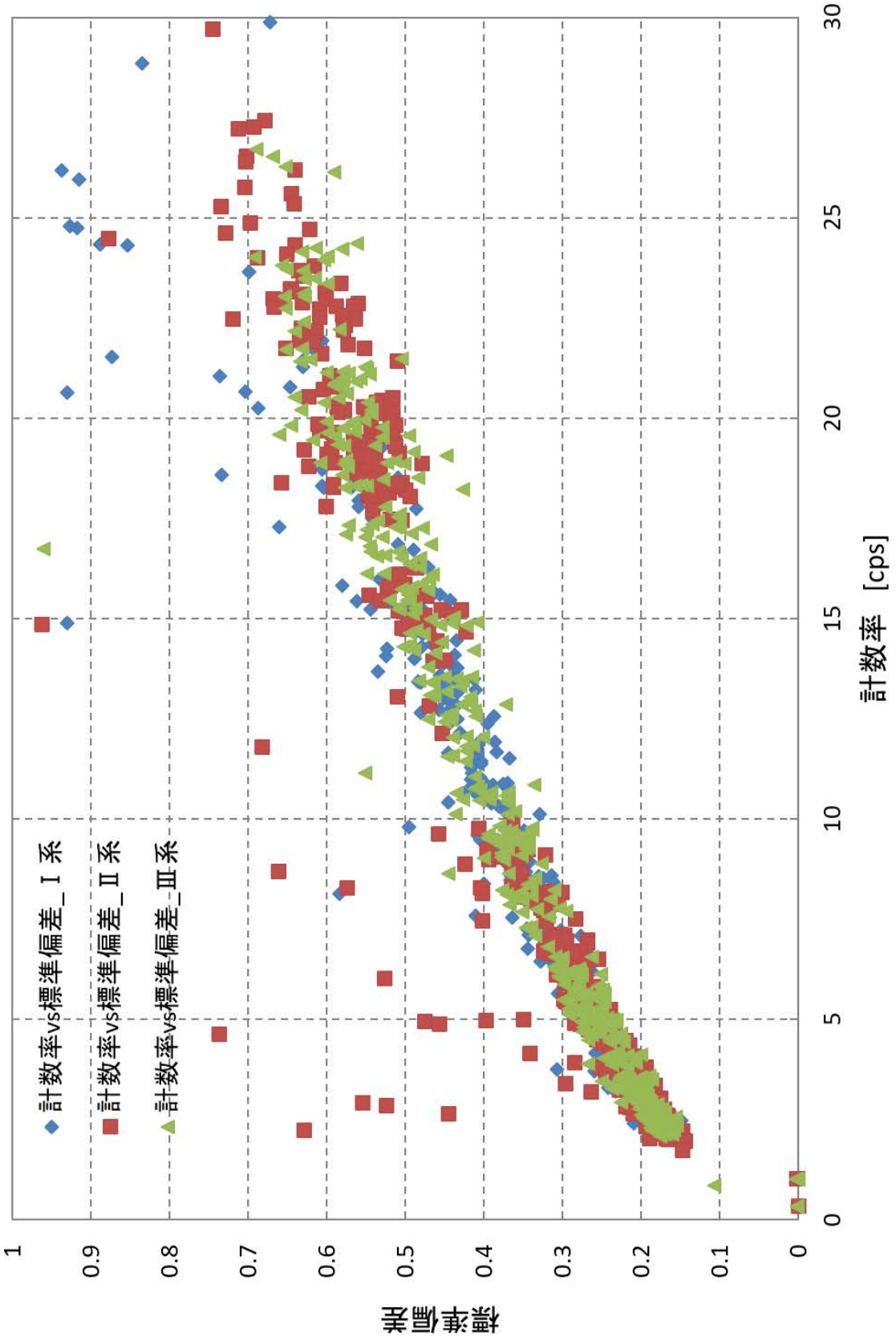

図 3.2　計数率と標準偏差の関係（データ処理前）

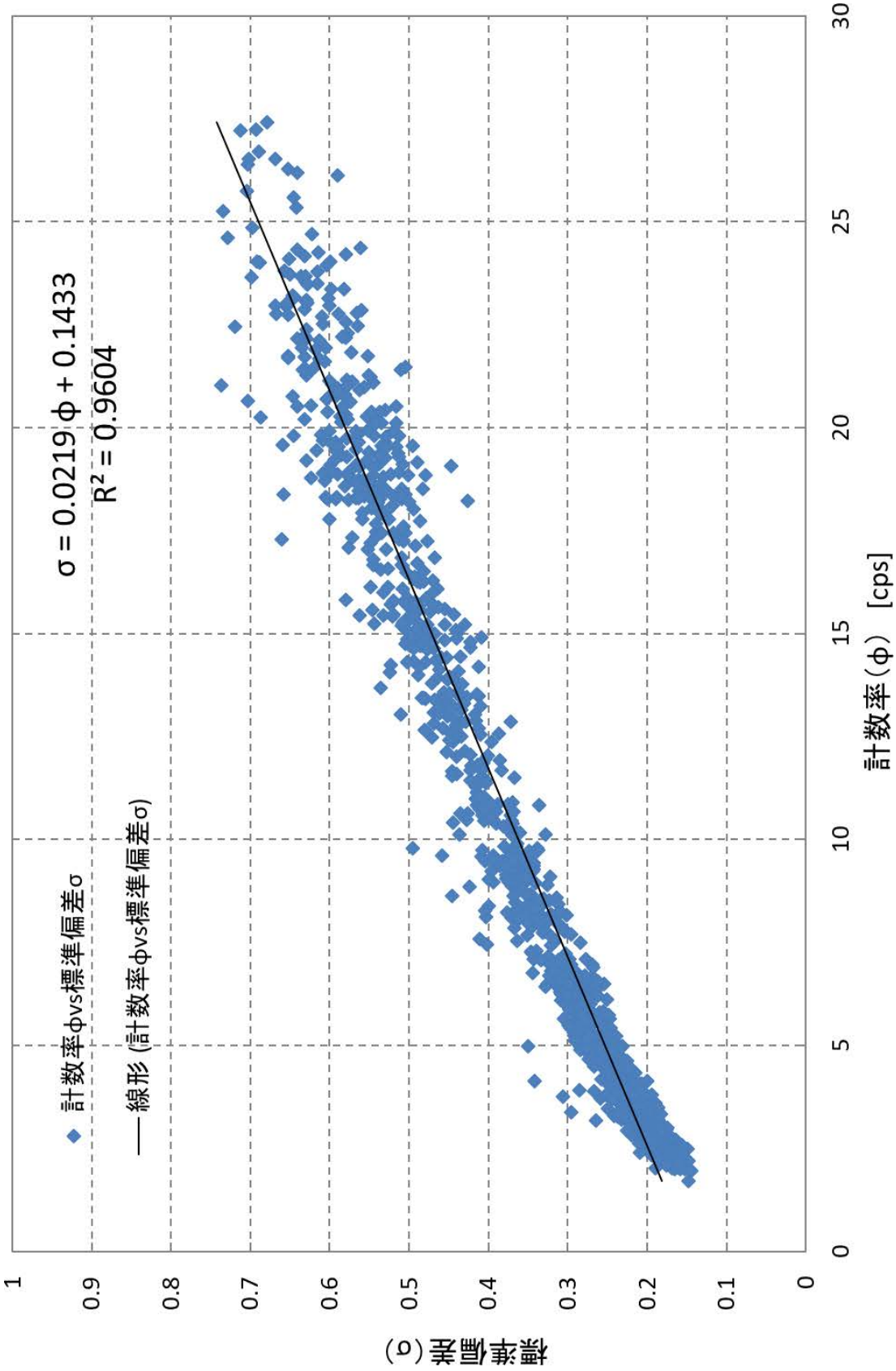

図 3.3　計数率と標準偏差の関係式

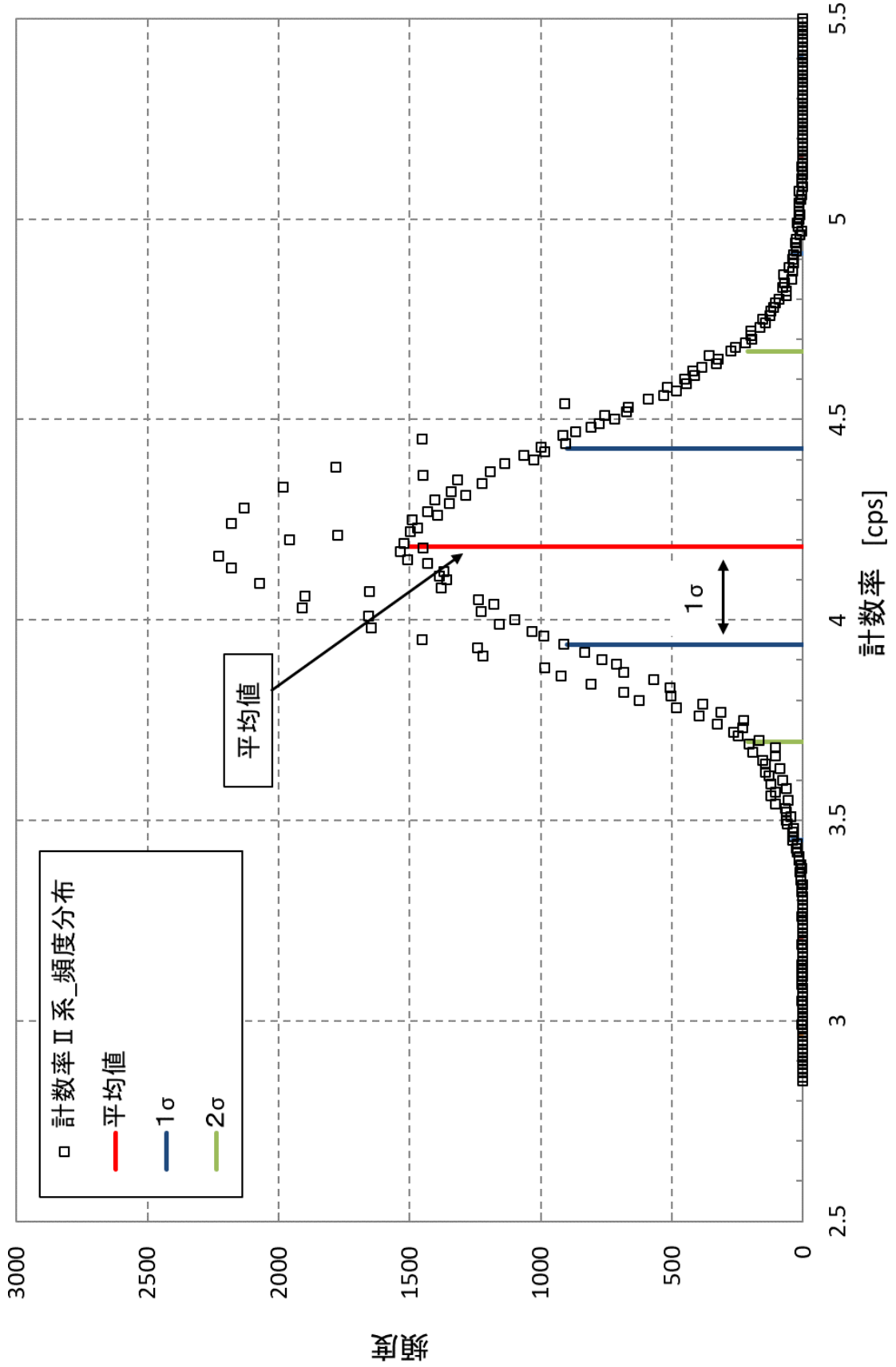

図 3.4　計数率の分布（全体）

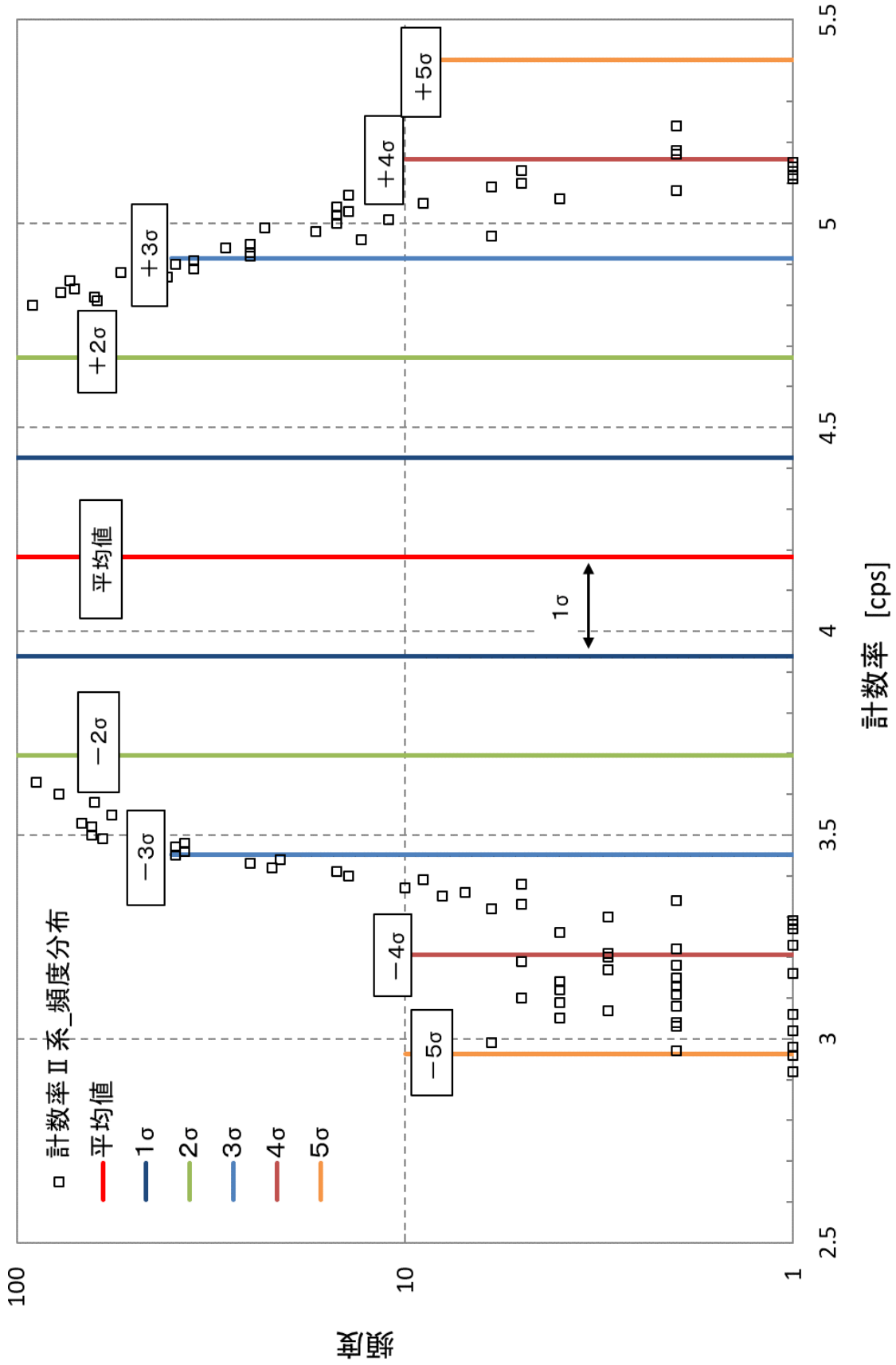

図 3.5 計数率の分布（拡大）

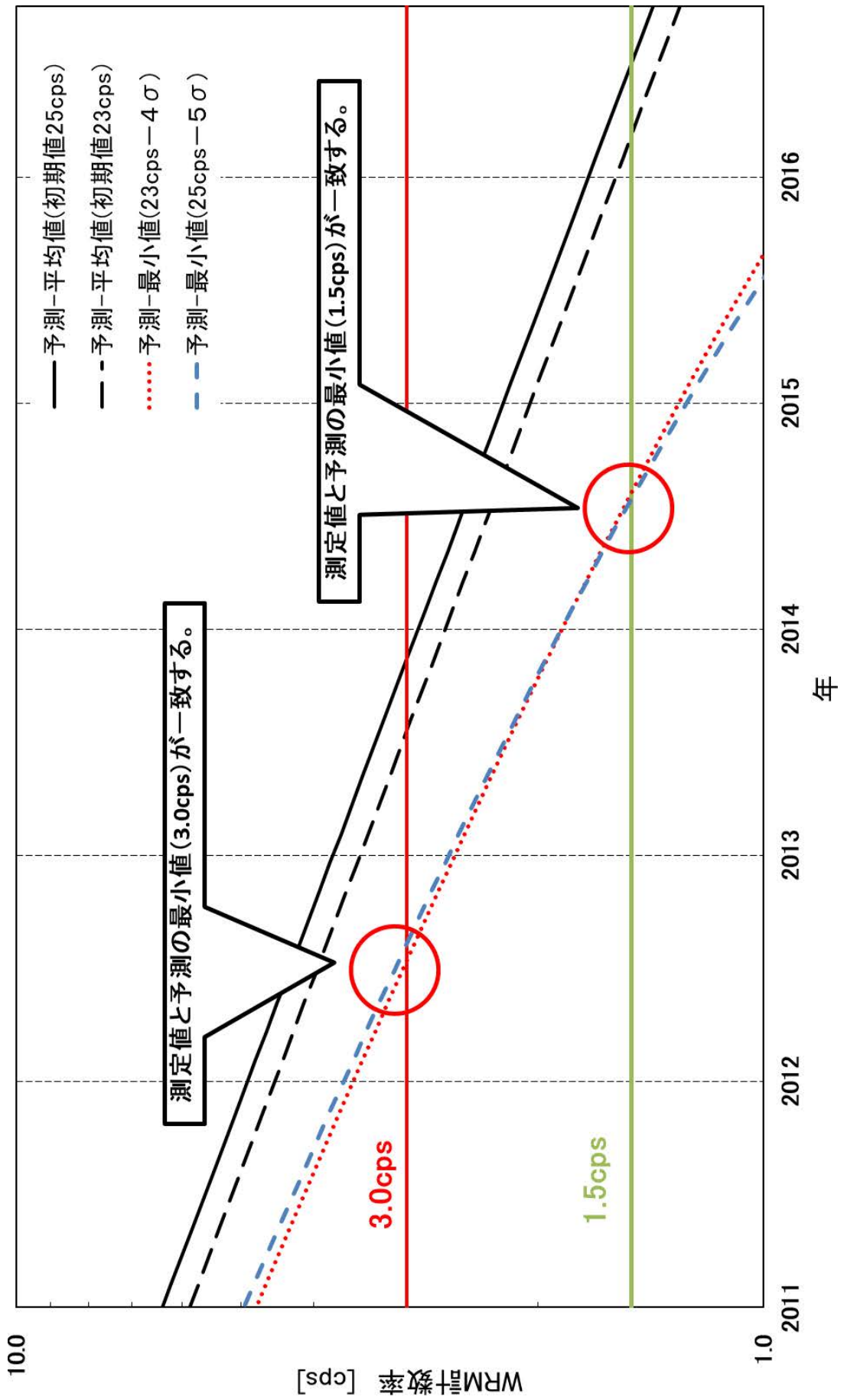

図 4.1　従来のデータに基づく計数率の最小値の予測精度の検証

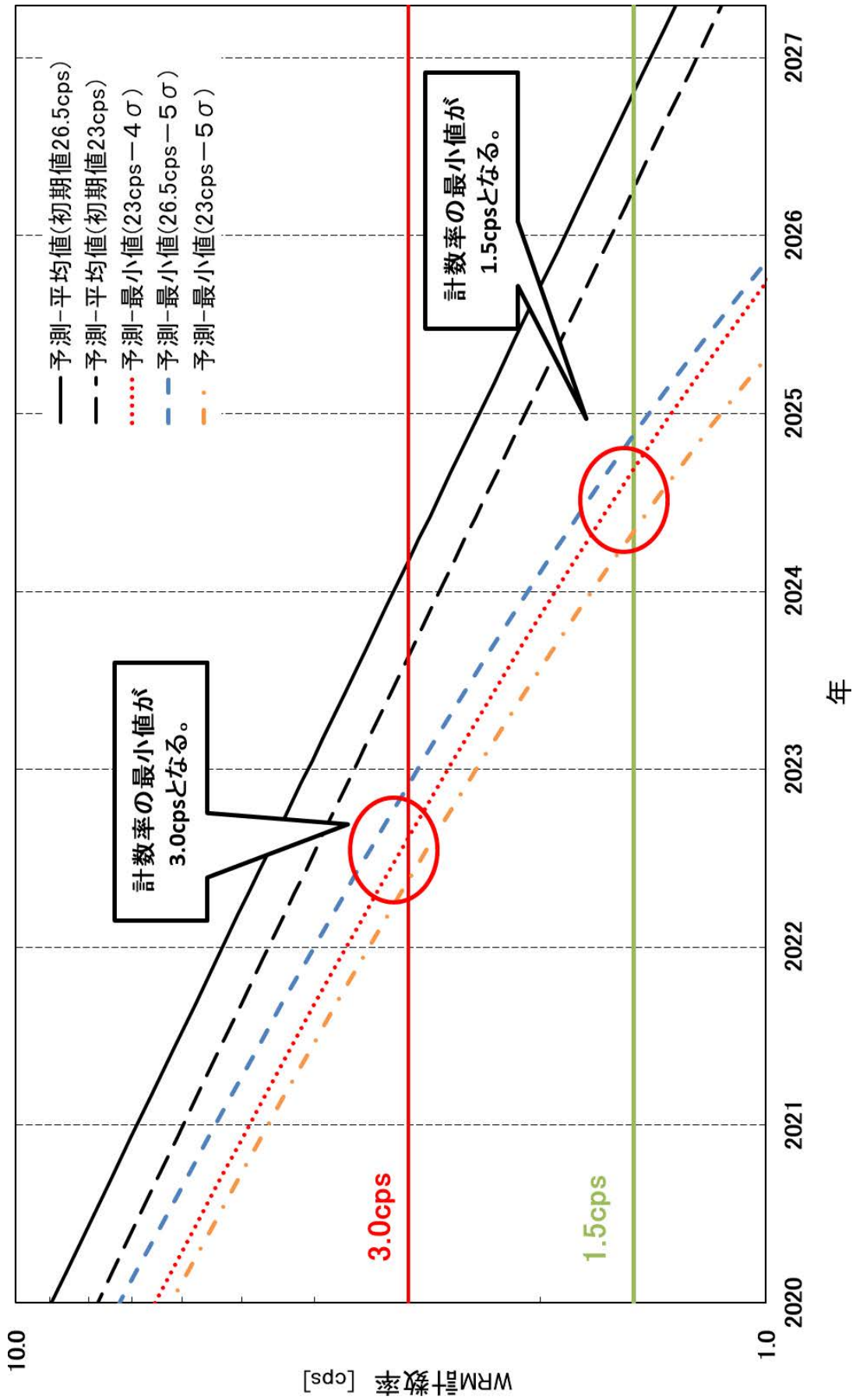

図 4.2　将来の計数率の最小値の予測

This is a blank page.

国際単位系（SI）

表１．SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	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

表２．基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

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

(a) 量濃度（amount concentration）は臨床化学の分野では物質濃度（substance concentration）ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元１をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の１は通常は表記しない。

表３．固有の名称と記号で表されるSI組立単位

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

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b)ラジアンとステラジアンは数字の１に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の１は明示されない。
(c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性核種の放射能（activity referred to a radionuclide）は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g)単位シーベルト（PV,2002,70,205）についてはCIPM勧告2（CI-2002）を参照。

表４．単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	$m^{-1}\ kg\ s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	$kg\ s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m\ m^{-1}\ s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m\ m^{-1}\ s^{-2}=s^{-2}$
熱流密度，放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	$kg\ s^{-3}$
熱容量，エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}$
比熱容量，比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2\ s^{-2}\ K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	$m\ kg\ s^{-3}\ K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m^3	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m^3	$m^{-3}\ s\ A$
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ s\ A$
電束密度，電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ s\ A$
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2\ kg\ s^{-2}\ mol^{-1}$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}\ mol^{-1}$
照射線量（X 線及びγ線）	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1}\ s\ A$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2\ s^{-3}$
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=m^2\ kg\ s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2\ sr)$	$m^2\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=kg\ s^{-3}$
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m^3	$m^{-3}\ s^{-1}\ mol$

表５．SI 接頭語

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

表６．SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	’	1’=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	”	1”=(1/60)’=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 $hm^2=10^4m^2$
リットル	L, l	1 L=1 l=1 $dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	1 t=10^3 kg

表７．SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

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

表８．SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

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

表９．固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10^{-7} J
ダイン	dyn	1 dyn=10^{-5}N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm^{-2}=0.1Pa s
ストークス	St	1 St =$1cm^2\ s^{-1}$=$10^{-4}m^2\ s^{-1}$
スチルブ	sb	1 sb =1cd cm^{-2}=10^4cd m^{-2}
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm^{-2} =10^4lx
ガル	Gal	1 Gal =1cm s^{-2}=$10^{-2}ms^{-2}$
マクスウエル	Mx	1 Mx = 1G cm^2=10^{-8}Wb
ガウス	G	1 G =1Mx cm^{-2} =10^{-4}T
エルステッド[a]	Oe	1 Oe ≙ $(10^3/4\pi)$A m^{-1}

(a) ３元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≙ 」は対応関係を示すものである。

表10．SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10^{10}Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10^{-4}C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10^{-2}Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10^{-2}Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10^{-9}T
フェルミ		1 フェルミ=1 fm=10^{-15}m
メートル系カラット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10^{-4}kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1 cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー），4.184J（「熱化学」カロリー）
ミクロン	μ	1 μ =1μm=10^{-6}m

（第8版，2006年）