

JAERI-Tech

JP0250390

2002-055



高温工学試験研究炉の燃料及び核分裂生成物挙動評価
のための γ 線エネルギー分析装置の校正試験

2002年7月

植田 祥平・飛田 勉*・高橋 昌史*・沢 和弘

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

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

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

This report is issued irregularly.

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

高温工学試験研究炉の燃料及び核分裂生成物挙動評価のための γ 線エネルギー分析装置の校正試験

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

植田 祥平・飛田 勉*・高橋 昌史**・沢 和弘

(2002年5月14日受理)

高温工学試験研究炉（HTTR）の運転中の燃料及び気体状核分裂生成物挙動を評価するにために、1次冷却材中の短半減期希ガス濃度から被覆燃料粒子の破損率を推定している。そのため、原子炉保護設備の電離箱を用いた1次冷却材放射能計装、燃料破損検出装置によるNaI(Tl)シンチレーション検出器を用いた領域別のベータ線測定に加えて、1次ヘリウムサンプリング設備の試料採取装置を用いて1次冷却材を採取し、試料中の短半減期希ガスの定量分析を γ 線エネルギー分析装置により行っている。この測定値に基づき、核種毎の希ガス濃度及び放出率（R/B）値を求めている。そのため、HTTRの運転に先立ち、 ^{133}Xe 線源及び固体線源を用いて希ガス濃度の絶対値を求めるための γ 線エネルギー分析装置の校正試験を実施した。本報では、 γ 線エネルギー分析装置の校正方法及び結果について述べる。

大洗研究所 : 〒311-1394 茨城県東茨城郡大洗町成田町新堀 3607

* 原子力エンジニアリング株式会社

** 原子燃料工業株式会社

Calibration Test of γ -energy Analysis System
for Fuel and Fission Gas Behavior
during High Temperature Engineering Test Reactor Operation

Shohei UETA, Tsutomu TOBITA*, Masashi TAKAHASHI** and Kazuhiro SAWA

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

(Received May 14, 2002)

In order to estimate the fuel performance and fission gas behavior during High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) operation, failure fraction of the coated fuel particle is estimated from concentration of short-lived fission gas in the primary coolant. Therefore, in addition to the primary coolant radioactivity measurement with ionization chamber in safety protection system and β -ray measurement for seven hot plenum regions with NaI(Tl) scintillation detector in the fuel failure detection system, sample of the primary coolant gas is obtained in a bottle using the grab sample apparatus. The type and activity of fission gas in the grab sample are measured using gamma spectroscopy with an intrinsic Ge detector (γ -energy analysis system). Based on the measured fission gas activity, fission gas concentrations in the primary coolant and those release fraction, (R/B), from fuel are evaluated. Before the HTTR operation, the energy analysis system was calibrated by ^{133}Xe gas standard source and solid standard sources. This report describes the calibration methods and results of the γ -energy analysis system of the HTTR.

Keywords : HTTR, Fuel, Failure, Fission Gas, Primary Coolant, R/B,
Radioactivity, Gamma Spectroscopy, Standard Source, Calibration

* Nuclear Engineering Company, Ltd.

** Nuclear Fuel Industry Company, Ltd.

目次

1. はじめに	1
2. 試験内容	4
2.1 γ 線エネルギー分析装置	4
2.2 ^{133}Xe 体積標準線源の製作	4
2.3 固体線源	5
2.4 固体線源による校正試験	5
2.5 ^{133}Xe 体積標準線源による校正試験	5
2.6 形状補正係数の算出	6
3. 結果と考察	11
3.1 測定結果	11
3.2 形状補正係数に対する各線源の効果	11
3.3 許容差を用いた形状補正係数の評価	12
4. まとめ	23
謝辞	23
参考文献	24

Contents

1. Introduction	1
2. Test Items	4
2.1 γ -energy Analysis System	4
2.2 Manufacture of ^{133}Xe Gas Standard Source	4
2.3 Solid Standard Sources	5
2.4 Calibration Test with Solid Standard Sources	5
2.5 Calibration Test with ^{133}Xe Gas Standard Source	5
2.6 Calculation of Geometric Correction Factor	6
3. Results and Discussions	11
3.1 Results	11
3.2 Effects of Standard Sources for Geometric Correction Factors	11
3.3 Estimation of Geometric Correction Factors by General Rules for Permissible Tolerance	12
4. Conclusions	23
Acknowledgement	23
References	24

1. はじめに

高温ガス炉の燃料は、軽水炉等の燃料とは異なり、直径 500~600 μm 程度の燃料核をセラッミクスで多層被覆した球を基本単位としている。このため、軽水炉や高速炉のように金属製の被覆管を用いた燃料では被覆管温度を 650°C 以上にすることは困難であるのに対し、高温ガス炉の燃料では、その被覆層の温度が 1000°C 以上でも使用上問題なく、冷却材温度を極めて高温にできる。高温工学試験研究炉（HTTR : High Temperature Engineering Test Reactor）の燃料体を Fig. 1-1 に示す。HTTR 燃料はピン・イン・ブロック型であり、燃料棒と六角柱黒鉛ブロックから構成される。被覆燃料粒子は四重被覆のいわゆる TRISO 型で、燃料核は直径 600 μm の低濃縮（平均 6%）二酸化ウランである。被覆燃料粒子は黒鉛粉末およびフェノール樹脂バインダとともに焼結し燃料コンパクトとする。燃料棒は、この燃料コンパクトと黒鉛スリーブから成り、六角柱黒鉛ブロックに空けた穴に挿入される。ヘリウムガスは燃料コンパクトを封入している黒鉛スリーブと黒鉛ブロック間の環状流路を流れる。

軽水炉燃料の設計方針では、初期破損は許容しておらず、また運転中に破損が生じた場合には、異常又は事故として取り扱うことになるが、高温ガス炉燃料では、炉心内の膨大な数の被覆燃料粒子（HTTR では約 10^9 個）を全く破損させないことは不可能である。このため、HTTR の燃料に対する設計方針では多少の燃料破損は許容しており、「初期破損率は 0.2% 以下」、「運転中の追加破損は十分許容しうる小さな値に制限する」と定めている^(1,2)。すなわち、HTTR 燃料は運転中の微小な追加破損が許容されている。そのため、HTTR の運転に当たっては、破損率を定量的に推定し、異常の有無を判断する必要がある。

燃料粒子の被覆層は短半減期の希ガスをほぼ完全に閉じ込めることができるために、短半減期希ガスは、主に被覆層（PyC 層及び SiC 層）が全て破損した燃料粒子（貫通破損粒子）及び燃料コンパクトの黒鉛素地部（マトリックス部）の汚染ウランから放出される⁽³⁾。希ガスには短半減期のものが多く、放射平衡が成り立つため、1 次冷却材中の核分裂性希ガス濃度は燃料の汚染ウラン及び貫通破損粒子からの放出を反映する。

希ガスの通常時の放出割合は、放出速度と生成速度の比である（R/B）値で表すことができる。（R/B）値は、照射下における被覆燃料粒子の破損の程度、燃料寿命の予測評価の上で有用な因子である。希ガスの（R/B）値は、サンプリング測定結果から計算で求めることができる。

HTTR では、原子炉運転中の燃料の健全性を監視するために、手サンプリング測定を行っている。手サンプリング測定では、1 次冷却材の一部を容器に採取し、Ge 検出器を備えた γ 線エネルギー分析装置により γ 核種分析を行い、原子炉本体の計装では検出できないレベルの放射能を詳細に分析する。HTTR では、照射中に燃料から放出される FP ガスについて、Kr については ^{85m}Kr 、 ^{87}Kr 、 ^{88}Kr 、 ^{89}Kr の 4 核種、Xe について ^{131}Xe 、 ^{135m}Xe 、 ^{135}Xe 、 ^{137}Xe 、 ^{138}Xe の 5 核種を測定、解析を行い、原子炉運転中の燃料の健全性について総合的な評価を行っている⁽⁴⁾。

希ガスの (R/B) 値を算出するためには、1 次冷却材中の核分裂希ガス濃度を高い精度で測定する必要がある。また、HTTR の 30MW 定格運転モード及び高温試験運転モードでは、燃料温度も高温になり、放出される FP ガス量も多くなることから、燃料の健全性確保はより精度の高い評価が必要である。そこで、 γ 線エネルギー分析装置により測定する FP ガスの分析精度を高めることを目的として、Ge 検出器の校正試験を行った。

Ge 検出器を使用するためには、線源からの γ 線エネルギーに対する MCA の分解能を把握するためのエネルギー校正と、検出器の計数効率を把握するための効率校正の二つを行う必要がある。

エネルギー校正試験は、予定している測定核種を考慮して、これらの γ 線エネルギー範囲を十分にカバーするよう調整した標準線源を使用する必要がある。一方、Ge 検出器の計数効率は、測定する試料の形状、密度、距離等の測定条件により変化する。特に、HTTR で使用しているサンプリングボトルは特殊な形状であることから、一般的な形状（コイン形状など）の固体線源のみ使用した場合、手サンプリング測定時の計数効率は校正時と大きく異なる。

そのため、Ge 検出器は測定試料と同じ条件の標準試料で校正を行う必要がある。従って、手サンプリング測定のように測定対象が気体である場合、どちらの校正試験においても気体状標準線源で行うことが望ましい。しかし、使用できる気体状線源は、半減期や γ 線エネルギー等を考慮すると核種が限定され、この条件を満たす γ 線エネルギーを放出する核種の選択は困難である。そこで、本校正試験では、サンプリングボトルと同寸法かつ同形状の ^{133}Xe 線源を新たに製作し、固体線源とガス状線源の両方を用いて校正試験を行うこととした。これにより、計数効率とガス状線源の相関関係から形状補正係数を求めた。

本報では、第 2 章で標準線源の製作及び校正試験の方法を、第 3 章で校正試験の結果を示すとともに考察を行う。

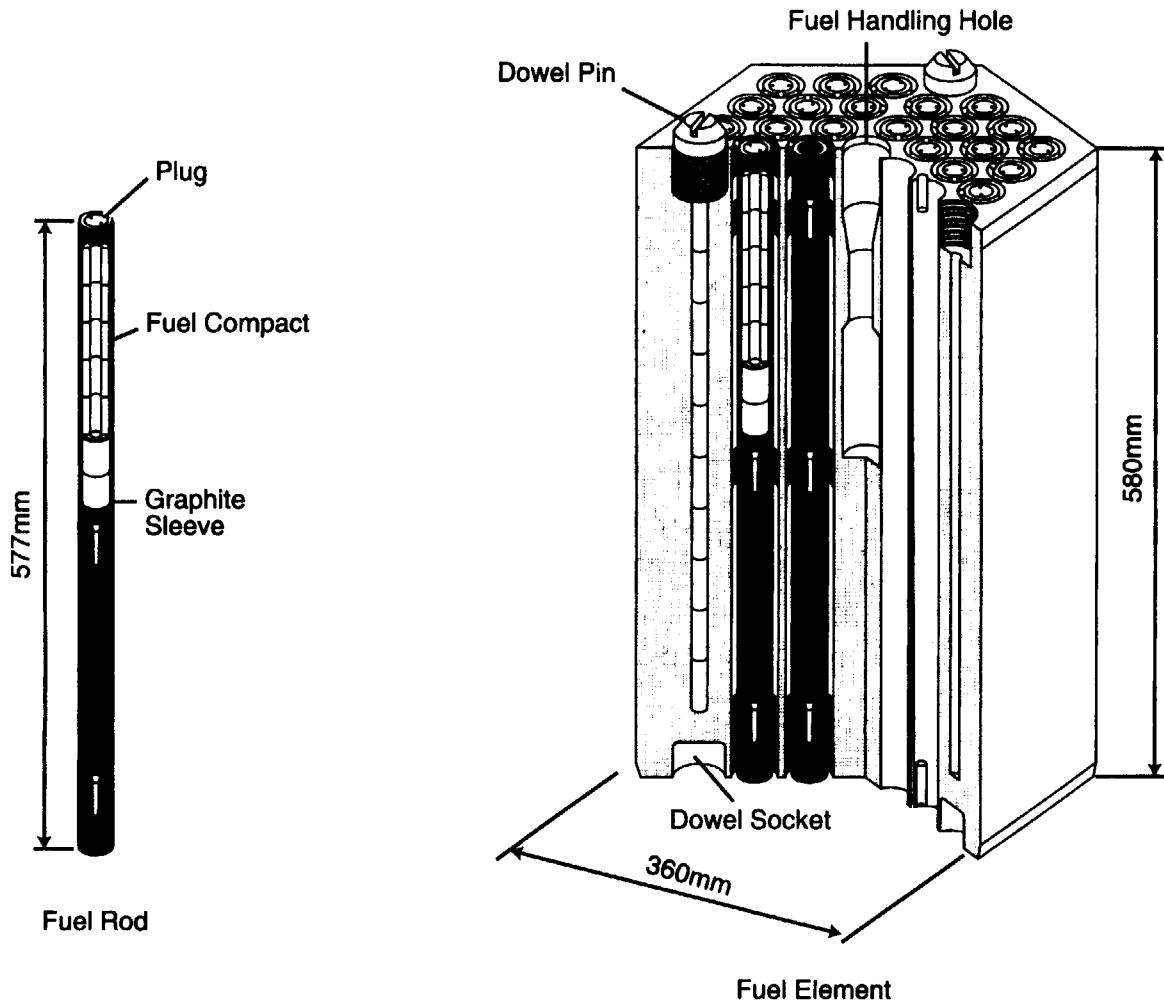


Fig.1-1 Fuel rod and fuel element of the HTTR.

2. 試験内容

Ge 検出器を使用するためには、線源からの γ 線エネルギーに対する MCA の分解能を把握するためのエネルギー校正と、検出器の計数効率を把握するための効率校正の二つを行う必要がある。気体状線源と同程度の計数効率の得られる固体状の標準線源を選び、Ge 検出器のエネルギー校正及び効率校正を行った。

さらに、実際にサンプリング測定する試料は気体状であることから、校正試験に使用した固体線源は、実際のサンプリング容器と幾何学的形状及び密度が異なる。また、試料の材質及び密度が異なる。自己遮へいにより、検出素子に入射する線密度が異なる。そのため、サンプリング容器と同形状の気体状線源を用いて再度効率校正を行い、形状補正係数を算出することとした。

2.1 γ 線エネルギー分析装置

手サンプリング測定では、 γ 線エネルギー分析装置によりサンプリングガス中の核分裂生成物ガス濃度を定量分析する。 γ 線エネルギー分析装置の構成を Fig. 2-1 に示す。 γ 線エネルギー分析装置は、Ge 検出器及び鉛製遮へい体を含む検出部、波高分析器（MCA）及び核種分析のためのパソコンにより構成される。

また、HTTR では、Fig. 2-2 に示すようなサンプリング容器を使用している。サンプリング容器の容積は約 1200cm^3 である。使用している純 Ge γ 線検出素子は、アルミ製のエンドキャップ（約 1.27mm 厚さ）で包まれており、側部からの γ 線入射も頂部と同じく検出をする。そこで、計数効率の向上を考慮し、 γ 線検出器の検出素子部との対面を大きく、相対距離を短くするように Ge 検出器の頭頂部を包み込む形状（ウエル型）としている。これにより、同容積である容器の中でも、計数効率の向上に寄与する形状になっている。

出力上昇試験における手サンプリング測定では、液体窒素冷却式 (LiqN_2) と電気冷却式（電冷式）の Ge 検出器を使用した。Table 2-1 に、使用した液体窒素冷却式と電気冷却式の γ 線検出器の特性を示す。

2.2 ^{133}Xe 体積標準線源の製作

一般に、放射線検出器などの校正用標準ガスとして市販されているのは、 ^3H 、 ^{85}Kr 及び ^{133}Xe があり、このうち γ 線源は ^{133}Xe 及び ^{85}Kr である。

^{85}Kr 及び ^{133}Xe の半減期及び放出される γ 線エネルギーを Table 2-2 に示す。 ^{85}Kr の検出可

能な γ 線(151keV)は半減期4.48時間で減衰するため、長期間使用するための線源としては適さない。一方、 ^{133}Xe の主要な γ 線(81keV)の半減期は5.24日であり、標準線源として放射能強度を数100kBqのオーダーで製作した場合、1~2ヶ月程度は使用可能である。今回は、検出器の形状補正係数を算出することを目的として、後者を選択した。

^{133}Xe 体積標準線源の製作において、気体状線源を容器に直接封入することは技術的に相当困難であるため、Fig. 2-3に示すように、ガスサンプリング容器とほぼ同じ形状のステンレス容器を製作し、その中に市販用として取り扱われている ^{133}Xe 標準ガスの入ったガラス製容器を入れて、その入口を溶接、密封することとした。アンプルを容器内に密封後、気密漏洩検査をし、漏れのないことを確認した後、容器全体を振って内部の ^{133}Xe ガスの入ったガラス容器を壊し、 ^{133}Xe ガスをステンレス製容器全体に均一に分散させた。このように製作した ^{133}Xe 標準線源の仕様をTable 2-3に示す。

2.3 固体線源

エネルギー校正及び効率校正のための固体線源は、測定対象となるFP希ガス核種のエネルギー幅を十分担保し、放射能強度が本試験での測定試料とほぼ同程度のものを選定した。今回は、約10種類の核種を均一に混合した、形状の異なる3線源(GW329、21E、91E)を使用した。Table 2-4及びTable 2-5に固体線源の仕様を示す。

GW329は薄型のコイン形状であるが、幾何学的形状の影響が小さい、点線源に近いものとして選定した。一方、21E及び91Eは幾何学的形状に違いを持たせるため、高さのある線源として選定した。

2.4 固体線源による校正試験

^{133}Xe 体積標準線源による測定前に、2.3項で述べた固体線源を用いて、エネルギー分解能を把握するためのエネルギー校正と、計数効率を把握するための効率校正の二つを行っている。実際の測定体系を模擬するため、サンプリングガス計測と同じ形状及び寸法で製作したステンレス製容器に固体線源を入れ、Fig. 2-4に示すように、検出器ヘッド上面に対面する容器底面の上に固体線源を載せて測定した。

2.5 ^{133}Xe 体積標準線源による校正試験

^{133}Xe 体積標準線源による校正試験では、製作直後の線源は放射能強度が高いため、製作日から一定期間減衰させた後に測定することとした。計測時間は線源の強さ、計測による誤差

を少なくすることを考慮して、 ^{133}Xe の計数量が 100000 カウント以上になるよう設定した。そのため、製作から約 45 日間を経た後（約 560000Bq）より校正試験を開始した。

測定体系は、Fig. 2-4 に示した固体線源による校正試験時と同じである。測定データは、ガンマ線エネルギースペクトルの取得後、核種分析プログラムにより標準線源の検定日から測定時点までの経過時間の減衰補正を行った。これにより、測定データは検定日時点の放射能として取得した。

2.6 形状補正係数の算出

Table 2-3 に示した検定時の放射能は、サンプリングボトルへ封入する前の放射能濃度であり、ボトルの形状効果を考慮しなくて良い。この時、容器形状による効率の違いは、検定時の放射能に対する測定値の比として表すことができ、以下の式により表される。

$$\text{形状補正係数 } f = \frac{\text{検定時の放射能 } [Bq]}{\text{測定値 } [Bq]}$$

Table 2-1 Specifications of Ge-semiconductor gamma-ray detectors.

項目	液体窒素冷却式 (EG&G)	電気冷却式 (JAERI)
モデル番号	GEM-33190	GEM-35190-S
相対効率	33%	35%
分解能	1.90 keV	1.90 keV
エンドキャップ	アルミ 1.27 mm	アルミ 1.27 mm
検出素子	純 Ge	純 Ge
検出素子寸法	56.6×65.1 mm	57.8×78.5 mm
不感層	0.7 mm	0.7 mm

Table 2-2 Gamma-ray energy of ^{133}Xe .

核種	崩壊形式 (娘核種)	半減期	γ 線のエネルギー — (keV)	放出率 (%)
^{85}Kr	(IT→) β^- (^{85}Rb) (21.4%)	4.480h	151.159	75.0
	β^- (^{85}Rb) (78.6%)		129.820 281.01 450.85 580.65 731.812	0.3 <0.0007 0.011 <0.0007 0.007
^{133}Xe	(IT→) β^- (^{133}Cs)	10.756y	362.81 514.0067 151.159 129.820	2.2×10^{-6} 0.43 2.2×10^{-6} 4.3×10^{-7}
		5.243d	80.997 79.623 160.613 223.234 302.853 383.851	38.0 0.27 0.066 0.00012 0.0048 0.0024

Table 2-3 Specifications of ^{133}Xe gas standard source.

試料番号	HP288
製作日	-----
放射能検定日	2000/12/15 21:00
放射能強度	236MBq

Table 2-4 Specifications of solid standard sources.

試料番号	GW329	21E	91E
製作日	-----	2000 2/23	2000 2/23
形状 (線源部)	Φ 50mm	50(mm Φ)-20(mmH)	46(mm Φ)-60(mmH)
(形状寸法)	Φ 70mm×3mm	-----	-----
正味重量(g)	-----	39.76	100.6 (g)
目安容積(mL)	-----	39	100 (mL)
目安密度(g/cm ³)	-----	1.02	1.01 (g/cm ³)
容器種類	-----	アクリル特注容器 50Φ	ポリ瓶 46Φ
放射能検定日	1999 12/1 21:00	2000 2/25 21:00	2000 2/25 21:00

Table 2-5 Inventory of solid standard sources.

核種	半減期	エネルギー(keV)	放出率 (%)	放射能(Bq)		
				GW329	21E	91E
²⁴¹ Am	432.7±0.5Y	59.537±0.001	35.9±0.4	3330	436.1	1103
¹⁰⁹ Cd	462.6±0.4D	88.034±0.002	3.65±0.06	17900	1749	4426
⁵⁷ Co	271.77±0.10D	122.061±0.001	85.68±0.13	678	76.85	194.5
		136.474±0.001	10.67±0.13			
¹³⁹ Ce	137.64±0.03D	165.857±0.006	79.87±0.06	798	57.94	146.6
²⁰³ Hg	46.9D	279	77	1680	-----	----
⁵¹ Cr	27.703±0.004D	320.084±0.001	9.85±0.09	-----	196.4	496.9
¹¹³ Sn	115.08±0.03D	391.7027±0.004	64.89±0.17	2970	285.9	723.4
⁸⁵ Sr	64.85±0.01D	514.009±0.012	99.29±0.04	3080	114.8	290.4
¹³⁷ Cs	30.15±0.02Y	661.60±0.003	85.2±0.2	3200	635.1	1607
⁶⁰ Co	5.271±0.001Y	1173.240±0.004	99.89±0.02	3580	608.0	1538
		1332.500±0.005	99.983±0.00			
⁸⁸ Y	106.62±0.02D	898.042±0.004	94.1±0.5	5870	292.2	739.3
		1836.060±0.013	99.36±0.05			

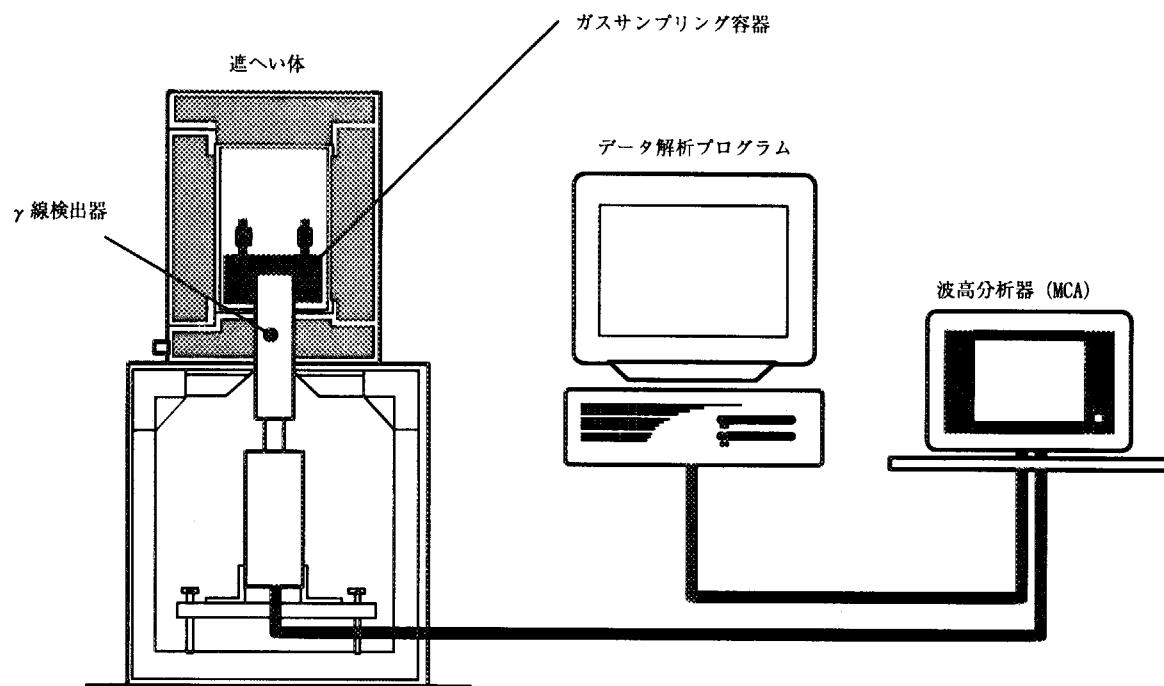
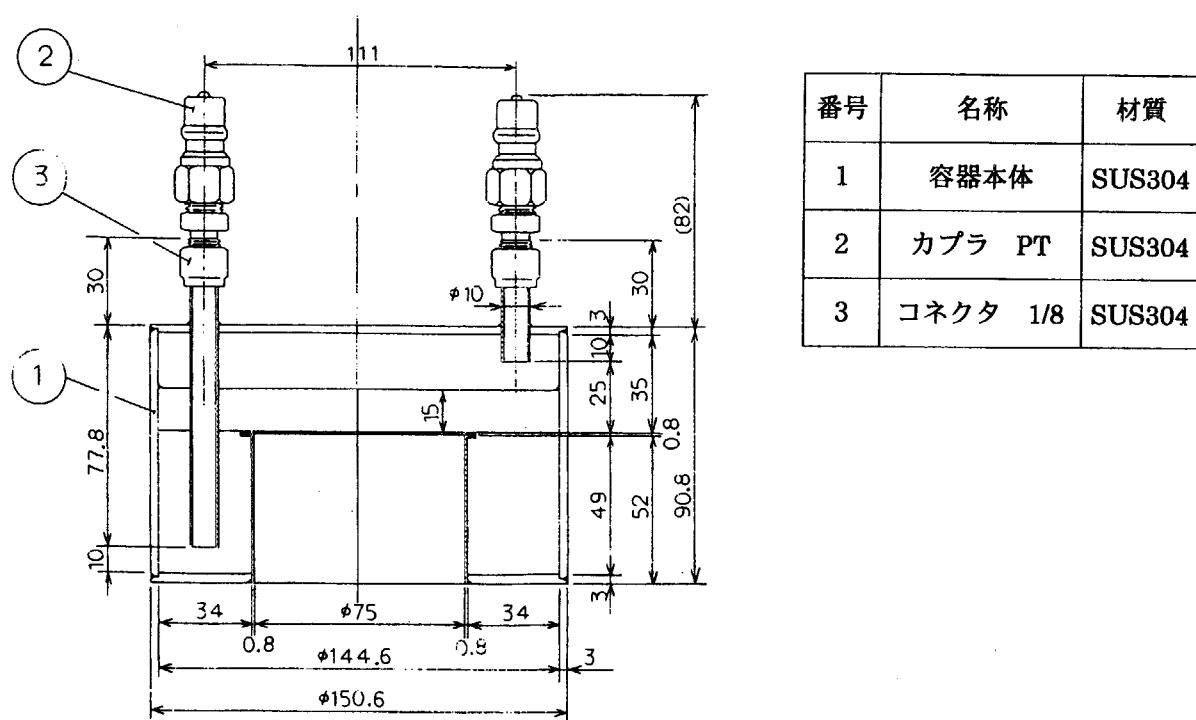
Fig.2-1 γ -energy analysis system.

Fig.2-2 Configuration of sampling bottle.

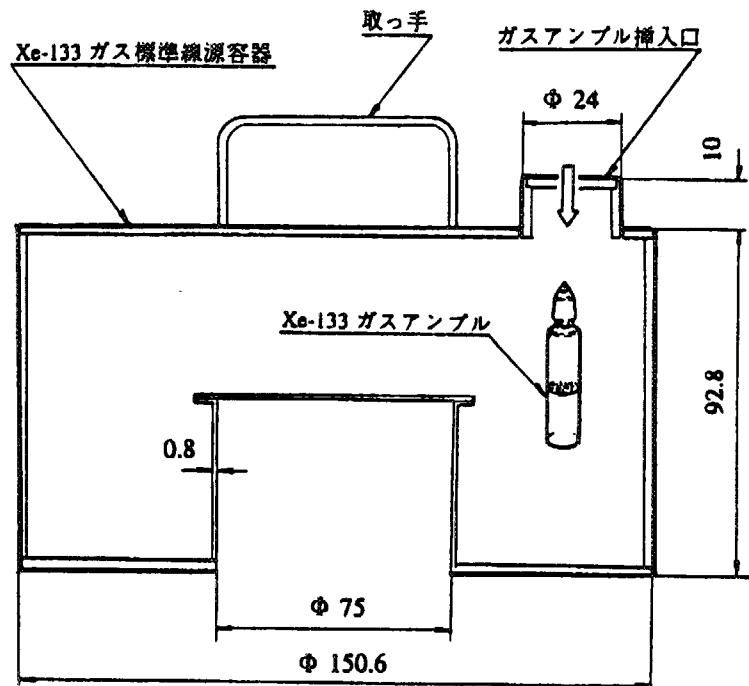


Fig.2-3 Configuration of ^{133}Xe gas standard source.

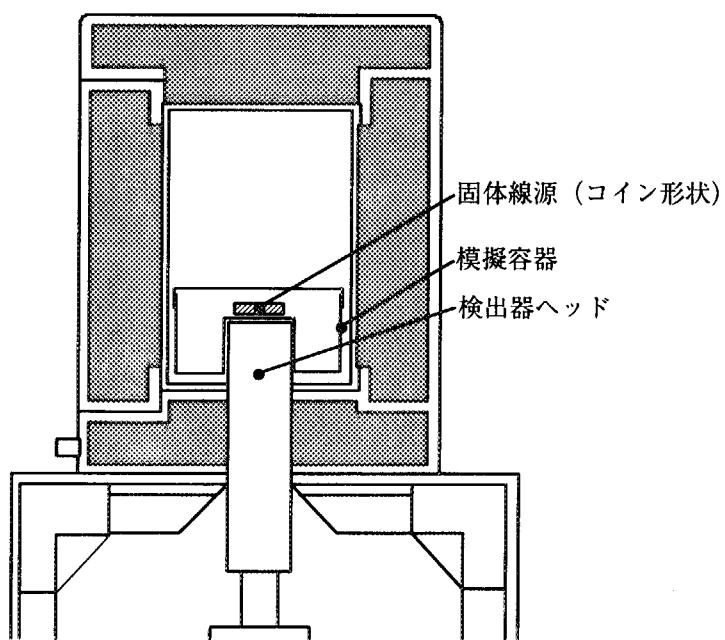


Fig.2-4 Arrangement of solid standard source measurement.

3. 結果と考察

3.1 測定結果

液体窒素冷却式及び電気冷却式の Ge 検出器について、 ^{133}Xe 標準線源によりエネルギースペクトルを取得した。この時、GW329、21E、91E 固体線源から求めたエネルギー校正条件と効率校正条件をそれぞれ用いて定量分析し、比較した。液体窒素冷却式の検出器の結果を Table 3-1 及び Fig. 3-1 に、電気冷却式の検出器の結果を Table 3-2 及び Fig. 3-2 にそれぞれ示す。また、それぞれの Ge 検出器について、各固体線源による校正条件を使用した場合の形状補正係数を算出した結果を Table 3-1 及び Table 3-2 にあわせて示す。また、測定期間における形状補正係数の変化を Fig. 3-3 及び Fig. 3-4 に示す。

その結果、GW329、21E の場合、測定値は検定時点の放射能より過少に評価され、91E では過大に評価された。これは、 ^{133}Xe 標準線源の形状に対して GW329、21E は計数効率が良く、91E は計数効率が悪いことを示している。

また、Fig. 3-1 より、測定初期の不感時間が大きい時点では、MCA のハードウェア特性により測定値が過大評価され、形状補正係数がやや大きくなつた。

3.2 形状補正係数に対する各線源の効果

固体線源の形状により計数効率が異なるのは、自己吸収の効果のためと考えられる。標準線源 GW329、21E は線源の形状が薄く、径も小さいため、点線源と考えることができる。その結果、自己吸収の効果が小さく、 γ 線検出器の検出部に対面隣接した状態で計測されるため、計数効率が良くなる。一方、91E 線源はポリ瓶に入ったもので、 γ 線検出器との対面面積は前 2 者と相違ないが、高さのある形状により自己吸収の効果が生じる。特に、スペクトルの低エネルギー側では自己吸収の効果が大きいため、距離による減衰の効果も加わり、計数効率が低くなっているものと考えられる。これより、GW329 による形状補正係数が最も信頼できる値と言える。

一方、 ^{133}Xe 体積標準線源は気体であるため、容器形状を考慮しても自己吸収の効果は無視できることと考えられる。厳密に言えば、固体線源と比較すると形状寸法が大きいため、距離による減衰効果により計数効率が低くなると考えられる。しかしながら、 ^{133}Xe により求めた形状補正係数は、低エネルギー (Table 2-2 より約 80keV) 側で得られたものであり、その他の高いエネルギーの γ 線については、自己吸収による計数効率の低下は低いと考えられ、実際のサンプリング試験においては安全側に濃度評価されると考えられる。

3.3 許容差を用いた形状補正係数の評価^(5,6)

本校正試験において、それぞれの検出器について複数回の測定を行い、形状補正係数を求めたが、不感時間による測定誤差やばらつきを考慮した最終値を統計的に決定する必要がある。そこで、分析・試験の許容差通則による検討を行った。

許容差として代表的なのは、室内許容差と室間許容差である。室内許容差は、同一試験室内における最終値を決めるために2回以上の測定を行ったとき、それらの測定値の異常の有無を判定するのに用いる。また、室間許容差は、異なる試験室間における測定値の差を判定するために用いる。

以下では、一つの試験室において2回以上の測定を繰り返しで行ったときに適用する室内許容差により検討を行った。

(1) 試験方法の検討

本検討では、同一試験室（K-103室）で同一の測定器（それぞれ液体窒素冷却式、電気冷却式）を用いて行う繰り返し測定である。

試験回数については独自に決めて良いことから、本検討では、¹³³Xe標準線源が校正用試料として有効である期間に測定したデータ全てについて検討した。電気冷却式については7データ、液体窒素冷却式については20データをそれぞれ用いた。

(2) 異常値の検定

複数の試験室による測定の場合、1試験室の1個の範囲R（測定回数n）についてRを求め、R管理図を書いて上方管理限界D₄Rを超える点があるかどうかを調べる。また、各試験室での平均値を統計的に検討する。

R管理図の管理限界は次の公式によって計算する。D₃, D₄は試料の大きさnによって決まる値である。

$$\text{上方管理限界 : } UCL = D_4 \bar{R}$$

$$\text{下方管理限界 : } LCL = D_3 \bar{R}$$

また、範囲の平均値は以下で表す。

$$\bar{R} = \frac{\sum R}{k} \quad (k:組の数)$$

本検討では同一試験室における測定（k=1）で、データ数は1点であることから上方管理限界を越えることはない。これ以降では、室間にに関するパラメータについては考慮する必要が

ないものとして検討した。

(3) 分散分析

同一試験室の n 個の測定値について、一元配置の分散分析を行う。以下に、分散分析に用いるパラメータを示す。

ℓ	: 試験室の数 (本検討では 1 である)
n	: 測定回数
x_i	: i 番目の測定値
x_0	: 測定値の平均に近い任意の数値
h	: 数値補正項 (1 とする)

$$S_T = \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2 - CT}{h^2}, \quad y_i = (x_i - x_0) \times h \quad : \quad \ell=1 \text{ における全変動}$$

$$S_L = \frac{T^2 - CT}{h^2}, \quad T = \sum_{i=1}^n y_i \quad : \quad \text{室間変動 } (\ell=1 \text{ の時、 } 0 \text{ となる})$$

$$S_E = S_T - S_L \quad : \quad \text{室内変動}$$

$$\phi_E = (\ell - 1) \times n \quad : \quad \text{自由度}$$

$$V_E = \frac{S_E}{\phi_E} \quad : \quad \text{室内分散}$$

$$CT = \frac{T^2}{\ell n} \quad : \quad \text{修正項}$$

さらに、分散分析の結果から、次の式により室内繰り返し精度 $\hat{\sigma}_w$ を推定する。

$$\hat{\sigma}_w = \sqrt{V_E}$$

測定値について、以上の式を用いて分散分析を行った結果を、Table 3-3 及び Table 3-4 に整理する。

(4) 許容差の算出・決定

繰り返し測定に適用する室内許容差は $D_2(0.95)\hat{\sigma}_w$ で与えられる。 $D_2(0.95)$ は、範囲 R (測定値の最大値と最小値との差) の分布の上方管理限界 (許容差を算出するときの確率が片側 95%) を算出するための係数である。⁽⁵⁾ その結果、求められた室内許容差を併せて Table 3-3

及び **Table 3-4** に示す。

ここで算出した値が、技術的に満足な値かどうかを、変動係数 CV (%) により判定した。許容差を判定するための変動係数は以下の式で与えられる。判定基準は、おおむね 10% 以下である。

$$CV \ (\%) = \hat{\sigma}_w \times 100 / \hat{x}$$

その結果を併せて **Table 4-3** に示す。どちらも 10% 以下であったことから、**Table 3-3** 及び **Table 3-4** の室内許容差は技術的に満足な値であると言える。

(5) 許容差の適用による形状補正係数の決定

試験のやり直しが困難で、測定回数が多い場合、同一試験室において、同一試料を n 回繰り返し測定したとき、n 個の測定値の範囲 R が許容差未満のときは、その n 個の測定値の平均値を最終値として報告する。

測定値の範囲 R と室内許容差を比較した結果を **Fig. 3-5** に示す。その結果、範囲 R は室内許容差未満に包絡した。よって、最終的な形状補正係数として、GW329 について液体窒素冷却式では 2.7、電気冷却式では 3.1 が得られた。

Table 3-1 Result of measurement of ^{133}Xe gas standard source by LN_2 cooled detector.

校正条件	工ネルギー校正	経過日数(日)		定量分析値(Bq)					
		0		GW329			21E		
		2000/12/15 21:00	2.36E+08	GW329	GW329	GW329	GW329	GW329	GW329
固体線源									
測定年月日	経過日数(日)	測定時間(sec)	不感時間(%)	定量分析値(Bq)	形状補正係数	定量分析値(Bq)	形状補正係数	定量分析値(Bq)	形状補正係数
2001/1/30 13:48	45.7	1000	26	9.280E+07	2.543	1.629E+08	0.690	3.191E+08	1.352
2001/1/30 15:03	45.8	3000	26	9.274E+07	2.545	1.628E+08	0.690	3.189E+08	1.351
2001/1/31 14:55	46.7	3000	22	9.187E+07	2.569	1.613E+08	0.683	3.159E+08	1.338
2001/2/1 11:04	47.6	3000	20	9.121E+07	2.587	1.601E+08	0.678	3.136E+08	1.329
2001/2/2 13:33	48.7	3000	17	9.053E+07	2.607	1.589E+08	0.673	3.113E+08	1.319
2001/2/5 10:44	51.6	3000	11	8.896E+07	2.653	1.562E+08	0.662	3.059E+08	1.296
2001/2/6 20:14	53.0	3000	9	8.855E+07	2.665	1.555E+08	0.659	3.045E+08	1.290
2001/2/7 13:40	53.7	3000	9	8.835E+07	2.671	1.551E+08	0.657	3.038E+08	1.287
2001/2/8 16:56	54.8	3000	7	8.809E+07	2.679	1.546E+08	0.655	3.029E+08	1.283
2001/2/9 17:48	55.9	3000	7	8.778E+07	2.688	1.541E+08	0.653	3.018E+08	1.279
2001/2/13 16:01	59.8	3000	4	8.718E+07	2.707	1.530E+08	0.648	2.997E+08	1.270
2001/2/14 16:20	60.8	3000	3	8.717E+07	2.707	1.530E+08	0.648	2.997E+08	1.270
2001/2/15 16:01	61.8	3000	3	8.703E+07	2.712	1.528E+08	0.647	2.992E+08	1.268
2001/2/16 15:25	62.8	3000	3	8.684E+07	2.718	1.525E+08	0.646	2.986E+08	1.265
2001/2/19 15:25	65.8	3000	2	8.678E+07	2.719	1.523E+08	0.646	2.984E+08	1.264
2001/2/20 15:11	66.8	3000	2	8.692E+07	2.715	1.526E+08	0.647	2.989E+08	1.266
2001/2/21 17:24	67.8	3000	2	8.655E+07	2.727	1.519E+08	0.644	2.976E+08	1.261
2001/2/22 17:00	68.8	10000	1	8.649E+07	2.729	1.518E+08	0.643	2.974E+08	1.260
2001/2/23 12:36	69.7	50000	1	8.552E+07	2.760	1.501E+08	0.636	2.940E+08	1.246
2001/2/27 10:57	73.6	30000	1	8.538E+07	2.764	1.499E+08	0.635	2.936E+08	1.244

Table 3-2 Result of measurement of ^{133}Xe gas standard source by electric-cooled detector.

検定年月日		経過日数(日)		定量分析値(Bq)			
2000/12/15 21:00		0		2.36E+08			
校正条件	工ネルギー校正		GW329		GW329		91E
	効率校正		GW329		GW329		
測定年月日	経過日数(日)	測定時間(sec)	不感時間(%)	定量分析値(Bq)	形状補正係数	定量分析値(Bq)	形状補正係数
2001/3/15 9:20	90	30000	0	7.690E+07	3.069	1.340E+08	1.761
2001/3/16 16:09	91	50000	0	7.669E+07	3.077	1.336E+08	1.766
2001/3/19 10:23	94	50000	0	7.661E+07	3.081	1.335E+08	1.768
2001/3/21 15:44	96	50000	0	7.678E+07	3.074	1.338E+08	1.764
2001/3/22 17:01	97	50000	0	7.576E+07	3.115	1.320E+08	1.788
2001/3/23 16:49	98	100000	0	7.636E+07	3.091	1.331E+08	1.774
2001/3/29 13:45	104	100000	0	7.644E+07	3.087	1.332E+08	1.772

Table 3-3 Results of calculation of geometric correction factor for LN₂ cooled detector.

固体線源	GW329	21E	91E
形状補正係数 (20 点) 平均値	2.673	1.523	0.777
測定値の範囲 R	0.221	0.126	0.064
S _E	0.088	0.029	0.007
V _E	0.005	0.002	4E-4
室内繰り返し精度	0.068	0.039	0.020
室内許容差	0.341	0.194	0.099
変動係数 CV (%)	0.5	0.5	0.5

Table 3-4 Results of calculation of geometric correction factor for electric cooled detector.

固体線源	GW329	21E	91E
形状補正係数 (7 点) 平均値	3.085	1.770	0.845
測定値の範囲 R	0.046	0.027	0.013
S _E	0.001	5E-04	1E-04
V _E	2E-04	8E-05	2E-05
室内繰り返し精度	0.015	0.009	0.004
室内許容差	0.064	0.037	0.018
変動係数 CV (%)	0.5	0.5	0.5

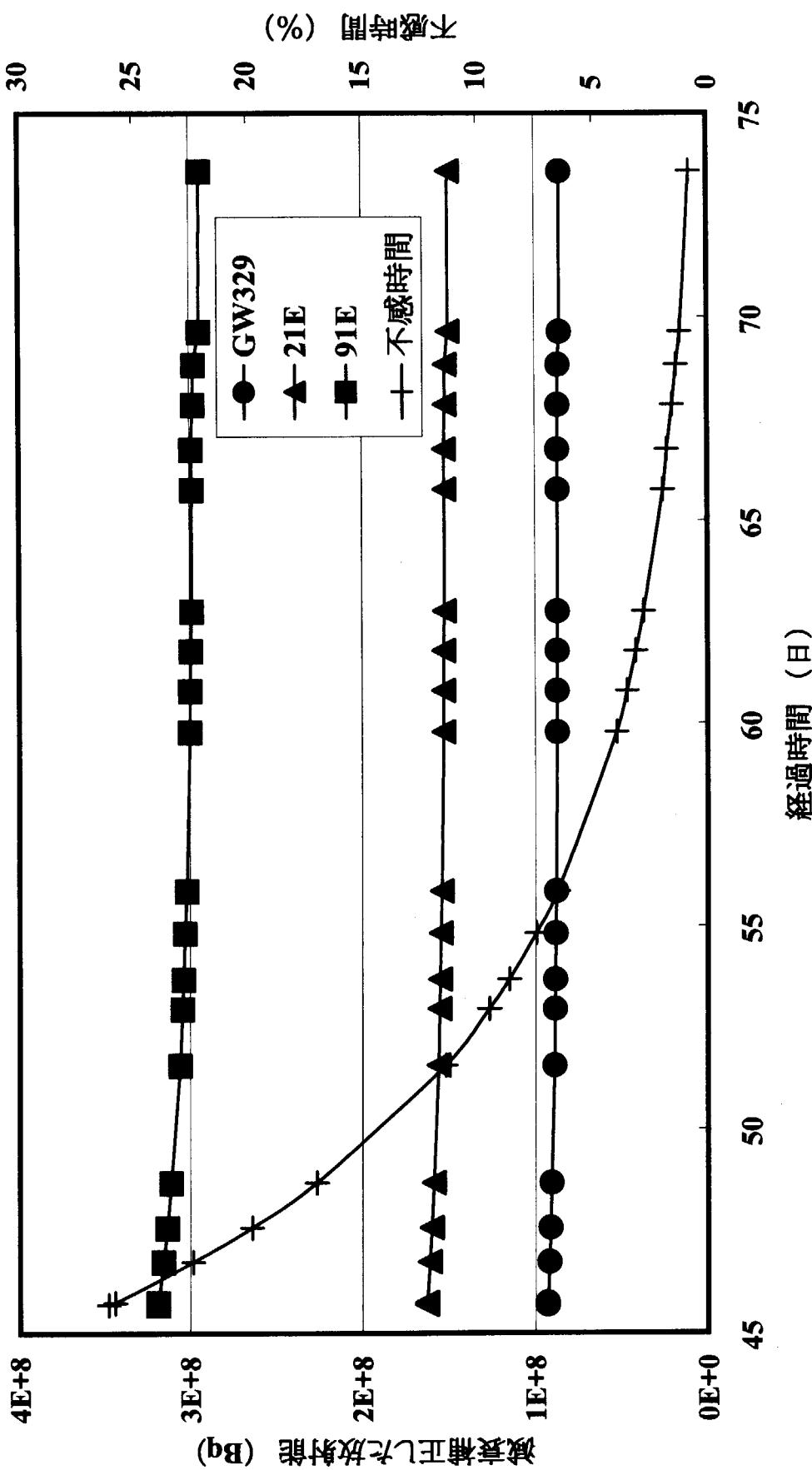


Fig.3-1 Decay-corrected radioactivity of ^{133}Xe gas standard source measured with LN_2 cooled detector.

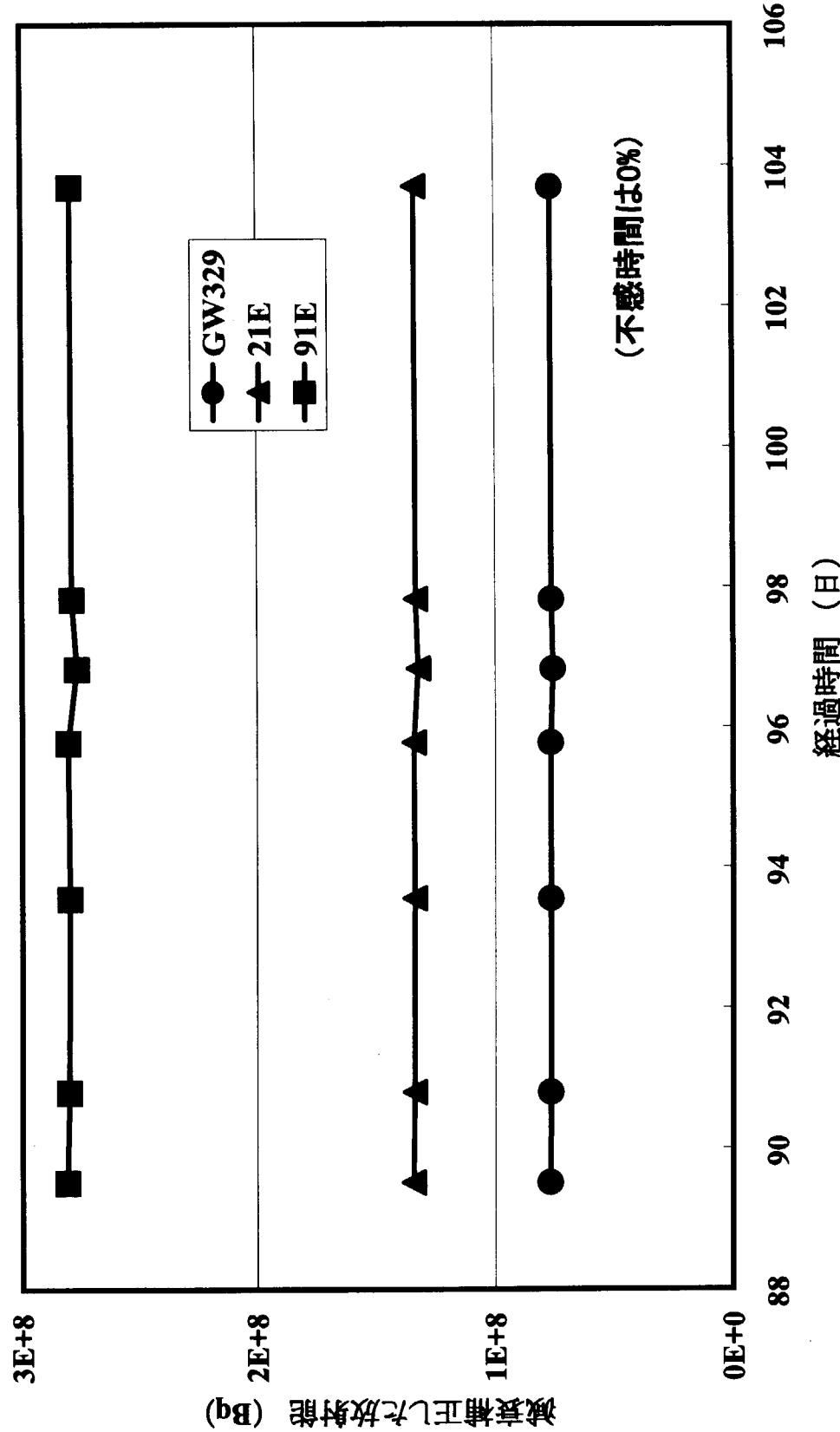


Fig.3-2 Decay-corrected radioactivity of ^{133}Xe gas standard source measured with electric cooled detector.

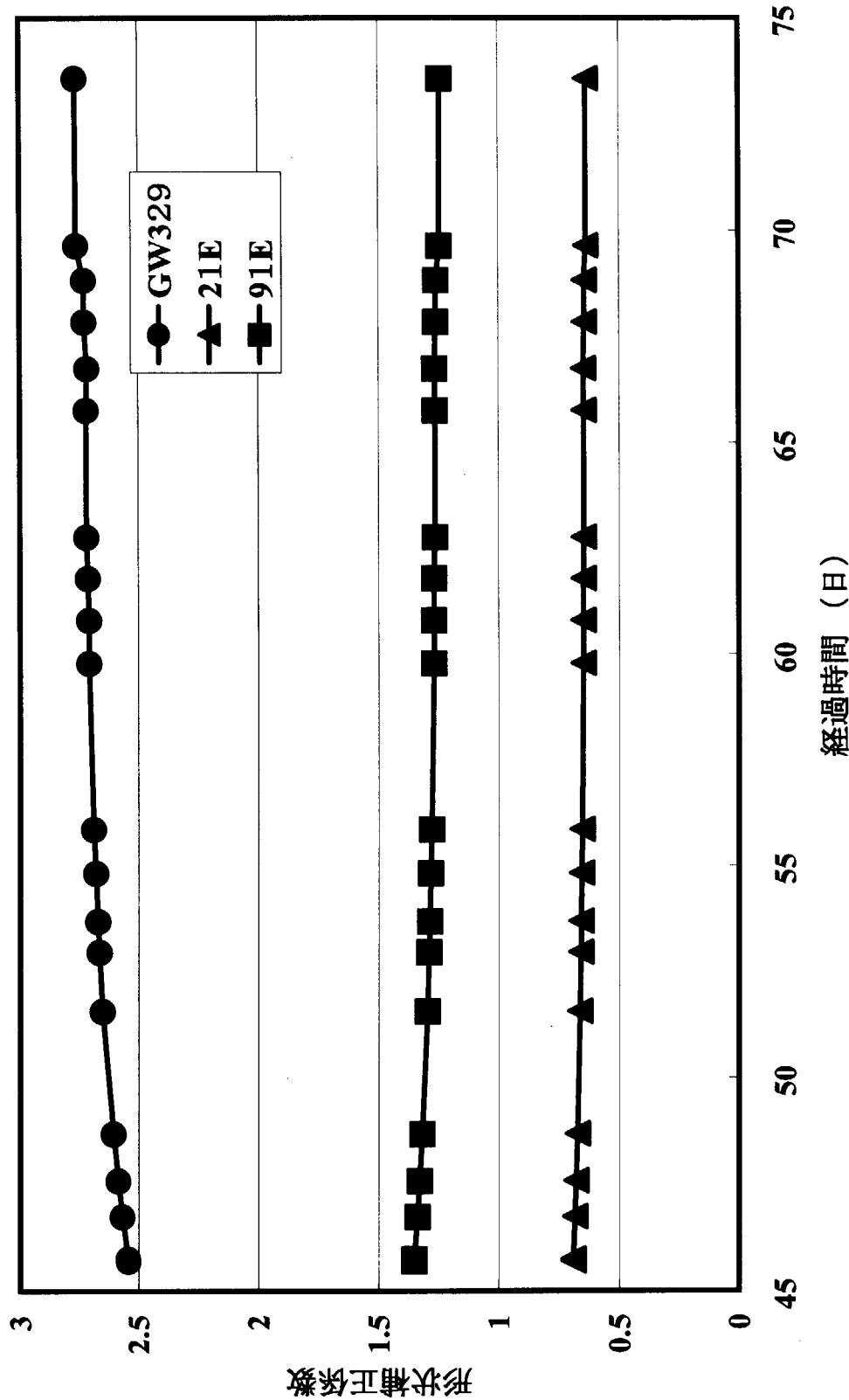


Fig.3-3 Geometric calculation factor of LN_2 detector.

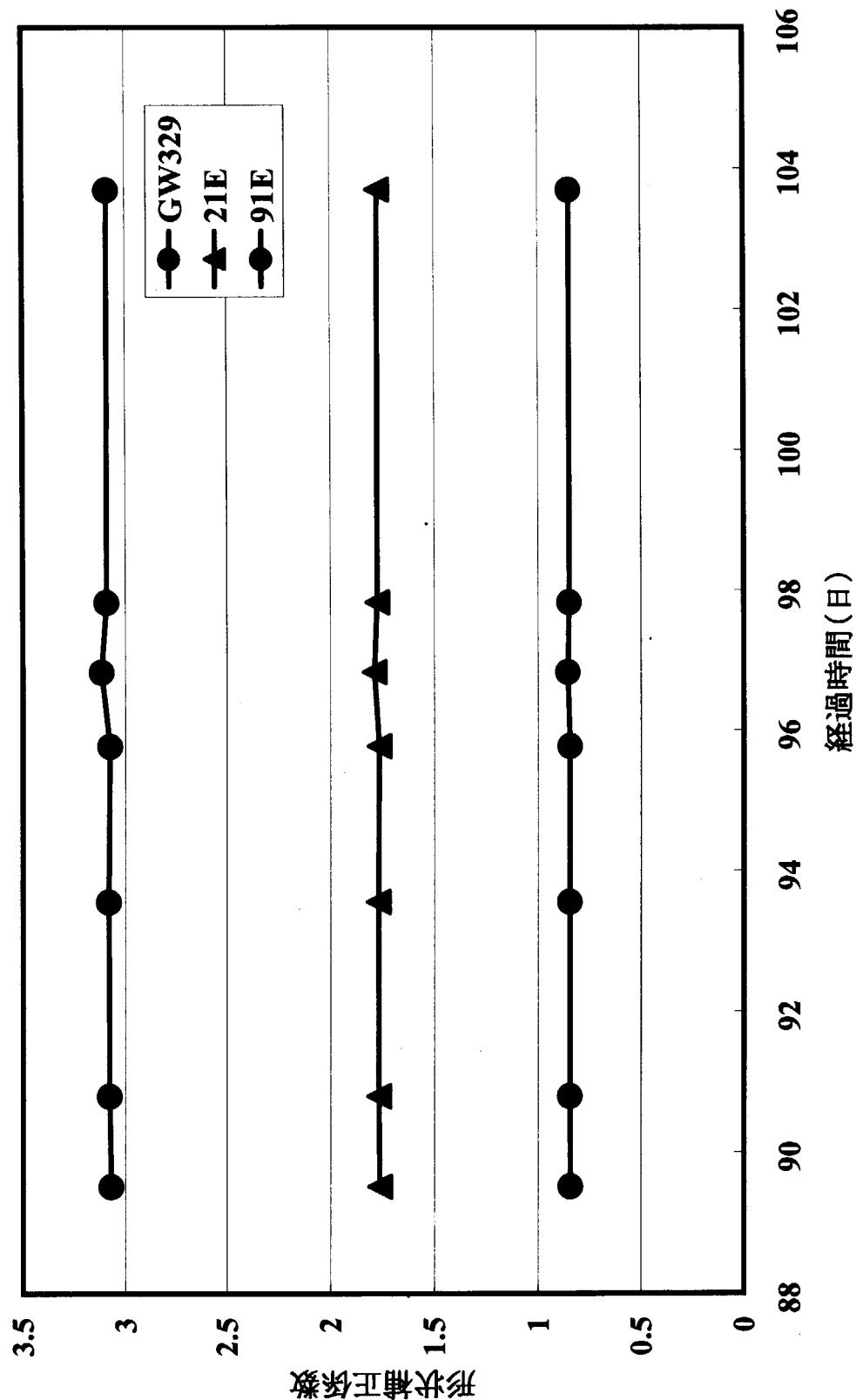


Fig.3-4 Geometric calculation factor of electric cooled detector.

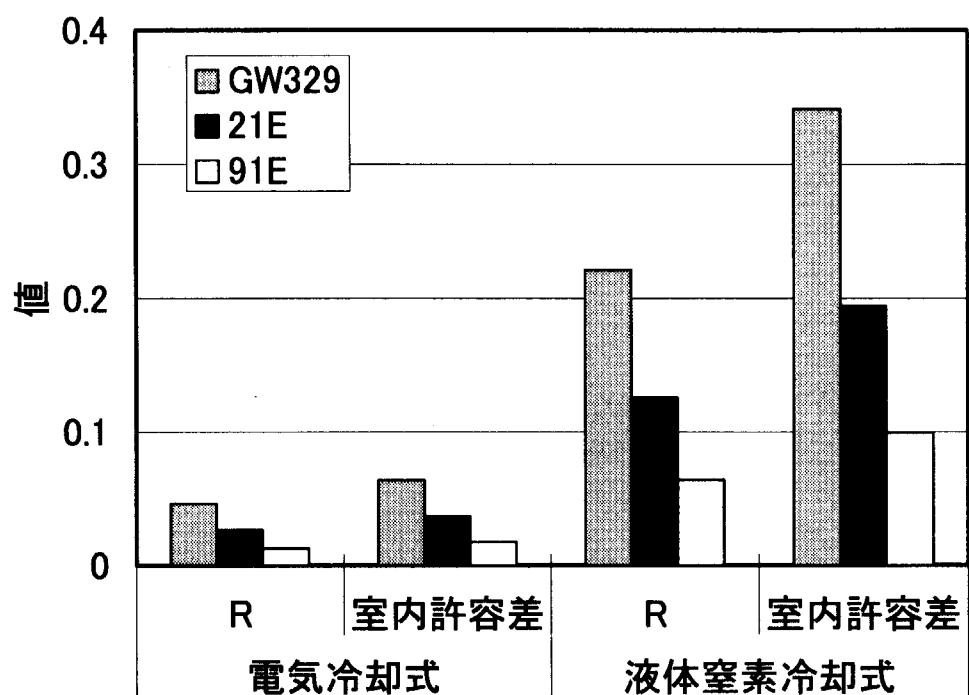


Fig. 3-5 Comparison with ranges(R) and permissible tolerances.

4. まとめ

HTTR 運転中の 1 次冷却材サンプリング及びガンマ線核種分析に用いるサンプリング容器について、容器形状による計数効率を補正するため、 ^{133}Xe 体積標準線源及び固体線源を用いて校正試験を行い、以下の結果が得られた。

- ① 相対効率及び冷却方式の異なる 2 つの検出器について校正試験を行い、それぞれ異なる形状補正係数が得られた。
- ② ^{133}Xe 体積標準線源の測定値並びに形状補正係数については、固体線源の形状による自己吸収の違いがみられた。
- ③ 各検出器の形状補正係数を許容差通則により統計的に評価し、最終的に液体窒素冷却式では 2.7、電気冷却式では 3.1 が得られた。

これにより、HTTR 運転中の 1 次冷却材中の核分裂生成物ガス濃度及び放出率評価を行う上で、より正確な報告値が期待できる。

謝辞

本検討を行うにあたり有益なコメントを頂いた伊与久達夫 HTTR 技術開発室長に感謝致します。また、校正試験を行うにあたり御協力頂いた、東海研究所保健物理部環境放射線管理課川崎克也氏に感謝致します。また、本報をまとめるにあたり御協力頂いた高温工学試験研究炉開発部の皆様方に感謝致します。

参考文献

- (1) 林君夫、塙沢周策、沢和弘、佐藤貞夫、他：高温工学試験研究炉用燃料の設計方針、製作性及び総合的健全性評価、JAERI-M 89-161 (1989) .
- (2) K.SAWA, S.SUZUKI, S.SHIOZAWA : Safety Criteria and Quality Control of the High Temperature Engineering Test Reactor Fuel、Nucl. Eng. Des., 208, 305 (2001) .
- (3) K.SAWA, S.UETA, J.SUMITA, K. VERFONDERN : Prediction of Fuel and Fission Gas Release Behavior during the High Temperature Engineering Test Reactor Operation by JAERI and FZJ Modeling Approach、J. Nucl. Sci. Technol., 38, 411-419 (2001) .
- (4) 沢和弘、飛田勉、植田祥平、鈴木修一、他：HTTR 出力上昇試験における燃料及び核分裂生成物挙動の検討（その 1：15MWまでの結果）JAERI-Research 2001-002 (2001).
- (5) 日本規格協会編：JIS ハンドブック 14 品質管理、JIS-Z8402-1974 分析試験の許容差通則、P.602 (1988).
- (6) 日本規格協会編：JIS ハンドブック 14 品質管理、JIS-Z9021-1954 管理図法、P.429 (1988).

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

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

表3 固有の名称をもつSI組立単位

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

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	L, L
トン	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、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- 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開発理事会指令では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。

換算表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf	圧	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	0.101972	0.224809		1	10.1972	9.86923	7.50062×10^3	145.038
	9.80665	1	2.20462		0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	4.44822	0.453592	1		0.101325	1.03323	1	760	14.6959

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa} \cdot \text{s} (\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ポアズ)} (\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s}))$$

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

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}	$= 4.184 \text{ J (熱化学)}$		
	9.80665	1	2.72407×10^{-6}	2.34270	9.29487×10^{-3}	7.23301	6.12082×10^{19}	$= 4.1855 \text{ J (15 } ^\circ\text{C)}$		
	3.6×10^6	3.67098×10^5	1	8.59999×10^5	3412.13	2.65522×10^6	2.24694×10^{26}	$= 4.1868 \text{ J (国際蒸気表)}$		
	4.18605	0.426858	1.16279×10^{-6}	1	3.96759×10^{-3}	3.08747	2.61272×10^{19}	仕事率 1 PS (仏馬力)		
	1055.06	107.586	2.93072×10^{-4}	252.042	1	778.172	6.58515×10^{21}	$= 75 \text{ kgf} \cdot \text{m/s}$		
	1.35582	0.138255	3.76616×10^{-7}	0.323890	1.28506×10^{-3}	1	8.46233×10^{18}	$= 735.499 \text{ W}$		
	1.60218×10^{-19}	1.63377×10^{-20}	4.45050×10^{-26}	3.82743×10^{-20}	1.51857×10^{-22}	1.18171×10^{-19}	1			

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad	照射線量	C/kg	R	線量当量	Sv	rem
	1	2.70270×10^{-11}		1	100		1	3.876		1	100
	3.7×10^{10}	1		0.01	1		2.58×10^{-4}	1		0.01	1

(86年12月26日現在)

高温工学試験研究炉の燃料及び核分裂生成物挙動評価のための γ 線エネルギー分析装置の校正試験

