JAEA-Technology 2017-036 DOI:10.11484/jaea-technology-2017-036



「常陽」原子炉容器内構造物の放射化量と ガンマ線量率分布の測定評価(その2)

Measurement and Analysis of In-vessel Component Activation and Gamma Dose Rate Distribution in Joyo (II)

> 山本 崇裕 伊藤 主税 前田 茂貴 伊東 秀明 関根 隆

Takahiro YAMAMOTO, Chikara ITO, Shigetaka MAEDA, Hideaki ITO and Takashi SEKINE

高速炉研究開発部門 大洗研究開発センター 高速実験炉部

Experimental Fast Reactor Department Oarai Research and Development Center Sector of Fast Reactor Research and Development

Ţ

February 2018

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) 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, 2018

「常陽」原子炉容器内構造物の放射化量とガンマ線量率分布の測定評価(その2)

日本原子力研究開発機構 高速炉研究開発部門 大洗研究開発センター 高速実験炉部 山本 崇裕、伊藤 主税、前田 茂貴、伊東 秀明、関根 隆

(2017年12月18日 受理)

高速実験炉「常陽」では、計測線付実験装置の不具合に起因した燃料交換機能の一部阻害 に係る復旧措置の一環として、平成26年5月に旧炉心上部機構を撤去し、キャスクに収納し た。旧炉心上部機構は、「常陽」建設時より30年以上使用された機器であり、高い表面線量 率を有する。炉心上部機構交換作業用設備の合理的かつ安全な設計・製作・運用に資するた め、「常陽」では、原子炉容器内の空間線量率を旧炉心上部機構撤去前に直接測定し、C/E補 正する手法を導入することで、計算誤差に係る設計余裕を低減し、旧炉心上部機構の表面線 量率の評価値について最適化を図った。

本研究では、当該評価手法が妥当であったことを検証するため、プラスチックシンチレー ション光ファイバ(PSF)検出器を用いて、旧炉心上部機構を収納したキャスクの軸方向 γ 線強度分布を測定し、計算値と比較した。主な結果を以下に示す。

- (1) 軸方向 γ 線強度分布は、キャスクの形状に応じたピークを有し、その位置は、計 算値と一致した。
- (2) 軸方向 γ 線強度分布の測定値と計算値の C/E は、1.1~1.7 であった。なお、旧炉心 上部機構の表面線量率の評価時には、保守性の確保に留意した上で、原子炉容器内の 線量率測定結果を反映している。

以上より、「常陽」旧炉心上部機構の表面線量率評価に用いた手法は、十分な信頼性を有 することが確認できた。ナトリウム冷却型高速炉における原子炉容器内保守・補修において は、機器設計条件や作業環境条件の設定が重要である。高速炉で長期間使用した大型構造物 の当該線量率評価手法を適用した前例はなく、ここで蓄積された経験は、「常陽」の復旧の みならず、稀少な知見として、有用なものと考える。

大洗研究開発センター:〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002 番地

Measurement and Analysis of In-vessel Component Activation and Gamma Dose Rate Distribution in Joyo (II)

Takahiro YAMAMOTO, Chikara ITO, Shigetaka MAEDA, Hideaki ITO and Takashi SEKINE

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

(Received December 18, 2017)

In the experimental fast reactor Joyo, the damaged upper core structure (UCS) was received into the cask in May 2014 for its replacement as a part of the restoration work of the incident concerning with the irradiation test sub-assembly named MARICO-2 (material testing rig with temperature control). The dose rate on UCS surface was quite high due to the activation for over 30 years operation. In order to attain the optimum safety design, manufacture and operation of equipment for UCS replacement, the method to evaluate UCS surface dose rate was developed on the basis of C/E obtained by the in-vessel dose rate measurement in Joyo.

In order to verify the evaluation method, the axial gamma-ray distribution measurement on the surface of the cask, which contained UCS, was conducted using a plastic scintillating optical fiber (PSF) detector. This paper describes the comparison results between calculation and measurement as follows.

- (1) The measured axial gamma-ray distribution on the cask surface had a peak on proper location with considering the cask shielding structure and agreed well with the calculated distribution.
- (2) The C/E of axial gamma-ray distribution on the cask surface was ranged from 1.1 to 1.7. It was confirmed that the calculation for UCS replacement equipment design had a margin of conservatively.

Then, the results showed that the applied evaluation method for UCS replacement equipment design was sufficiently reliable. In the in-vessel repair work for sodium cooled fast reactors (SFRs), the design and work condition estimation are important. The accumulated experience provides valuable insights into further improvements for in-vessel repair techniques in SFRs.

Keywords: Fast Reactor, Joyo, Upper Core Structure, Plastic Scintillating Optical Fiber, Gamma-ray Dose Rate

目次

1.	緒言	1
2.	PSF	検出器を用いたキャスクの軸方向γ線強度分布測定の概要
3.	PSF	検出器によるキャスクの軸方向γ線強度分布の測定計画
4.	PSF	検出器の特性確認
	4.1	PSF 検出器の概要
	4.2	位置校正試験
	4.3	γ 線感度特性試験 ······14
5.	PSF	検出器によるキャスクの軸方向γ線強度分布の測定結果
6.	測定	結果と計算結果の比較
7.	結言	
謝	辞	
参	考文献	25
付	録- 1	28
付	録-2	
付	録-3	

目次

1.]	Introduction 1						
2.	(Outline of axial gamma-ray distribution measurement using PSF2						
3.]	Plan	of axial gamma-ray distribution measurement using PSF					
4.]	PSF	characteristic test ······9					
	4.	1	Outline ·····9					
	4.	2	Position Calibration test					
	4.	3	Gamma-ray sensitivity characteristic test 14					
5.]	Meas	surement results 19					
6.	(Com	parison between Calculation and Measurement 21					
7.	(Conc	lusion ····· 24					
A	ckn	owle	dgments 25					
Re	References 25							
Ap	ope	ndix	-1					
Ap	ope	ndix	-2					
A	Appendix -3 · · · · · · · · · · · · · · · · · ·							

図リスト

义	2.1	プラン	~ ト概念図
义	2.2	原子炸	戸容器、回転プラグ及び炉心上部機構の構造
义	2.3	炉心_	上部機構交換作業の概略手順4
义	2.4	PSF	検出器を用いたキャスクの軸方向γ線強度分布測定の設備配置図5
义	3.1	キャン	スク軸方向 γ 線強度分布の測定体系詳細図
义	3.2	専用ネ	台具を用いた PSF 設置作業時の状況
义	4.1.1	PS	F 検出器の構成10
义	4.2.1	ポイ	イント照射時の計数率分布(PSF 位置分解能確認結果)
义	4.2.2	位置	置校正試験結果
义	4.3.1	γ総	泉感度特性試験体系概念図
义	4.3.2	PSI	Fの感度分布
义	4.3.3	同時	時偶発係数の原因
义	4.3.4	同時	持偶発計数の処理(873μGy/h 一様照射時の場合)
义	4.3.5	同時	寺偶発計数の影響を排除した計数率分布(二次関数フィッテイング)18
义	4.3.6	PSI	Fの位置における線量率依存性18
义	5.1	PSF	検出器によるキャスクの軸方向γ線強度分布の測定結果
义	6.1	キャン	スク軸方向γ線強度分布の測定値と計算値の比較結果
义	6.2	測定値	直と計算値の C/E 値の分布
义	付録	1-2.1	旧 UCS 表面 γ線量率分布評価手順
义	付録	1-2.2	旧 UCS 表面 у線量率分布 ······29
义	付録	1-2.3	γ 線量率分布計算を行った QAD 計算モデル30
义	付録	1-3.1	軸方向線量率分布の評価位置
义	付録	1-4.1	PSF 位置の軸方向線量率分布評価結果及び軸方向γ線強度分布の算出結果…33
义	付録	1-4.2	最適化した軸方向線量率分布
义	付録	2-1	線源の 11 グループへの分割36
义	付録	2-2	各代表点での 11 グループからの寄与率
义	付録	2-3	線源強度修正後の旧炉心上部機構表面線量率分布の評価結果との比較38
义	付録	3-1	PSF 検出器応答関数の導出方法40
义	付録	3-2	測定値と応答結果の比較

This is a blank page.

1. 緒言

高速実験炉「常陽」では、計測線付実験装置の不具合に起因した燃料交換機能の一部阻害に係るトラブル¹⁾²⁾³⁾の復旧措置の一環として、平成26年5月~12月に炉心上部機構を交換した。

旧炉心上部機構は、「常陽」建設時より 30 年以上使用された機器であり、高い表面線量率を有 する。炉心上部機構交換作業用設備の合理的かつ安全な設計・製作・運用に資するため、旧炉心 上部機構の表面線量率の最適な評価値が必要となった。

そこで、炉回転プラグ上部の2箇所の貫通孔からγ線検出器を挿入し、旧炉心上部機構を含む 原子炉容器内の空間線量率分布を測定し、計算値を補正することによって計算誤差に係る設計余 裕を低減して、旧炉心上部機構の表面線量率評価値の最適化を図った⁴⁾。補正方法としては、2 箇所の貫通孔の測定の線源寄与の割合が旧炉心上部機構とそれ以外の構造物で違うことを利用し、 測定値と測定箇所における線量率計算値から旧炉心上部機構からの寄与のみを分離した C/E 値を 算出し、線量率計算値をその C/E 値で補正する方法とした。ただし、高速炉の原子炉容器内の大 型構造物の線量率評価について、過去に当該評価手法を適用した実績はなかったため、今回、旧 炉心上部機構引抜時に、旧炉心上部機構を収納したキャスクの軸方向γ線強度分布をプラスチッ クシンチレーション光ファイバ (PSF)検出器を用いて測定し、得られた測定値と上記補正手法 を適用した表面線量率評価値に基づく計算値を比較することで、旧炉心上部機構の表面線量率評価

2. PSF 検出器を用いたキャスクの軸方向 γ 線強度分布測定の概要

「常陽」は、我が国で最初の高速増殖炉として、昭和 52 年に増殖炉心(MK-I 炉心)で初臨 界を達成し、プルトニウムの増殖性等のナトリウム冷却型高速炉(SFR)に関する種々の貴重な データと運転保守経験を蓄積した。その後、照射用炉心(MK-II 炉心:昭和 57 年に初臨界達成) を経て、現在、高性能照射用炉心(MK-III 炉心:平成 15 年に初臨界達成)での運転により、高 速増殖炉実用化に向けた燃料・材料開発等に供している。「常陽」のプラント概念図を図 2.1 に示 す。「常陽」は、ループ型 SFR であり、炉心で発生した熱(熱出力:140MWt)は、1 次主冷却 系により、主中間熱交換器を介して 2 次主冷却系に伝達され、主冷却機において大気中に放出さ れる。原子炉定格出力運転時の原子炉入口・出口ナトリウム温度は約 350℃・約 500℃である。 原子炉停止時にあっては、ナトリウム温度は約 200℃に保持される。

原子炉容器、回転プラグ及び炉心上部機構の構造を図 2.2 に示す。原子炉容器は、内径約 3.6m・ 高さ約 10m の円筒容器構造を有し、炉心燃料集合体や炉内構造物等を内包する。原子炉容器内の ナトリウムは自由液面を有し、当該液面上は、ナトリウムが化学的に活性であることを踏まえ、 アルゴンガス雰囲気となっている。

原子炉容器とその上部に設置された回転プラグ(炉心上部機構を含む)は、アルゴンガス(カ バーガス)のバウンダリを形成している。回転プラグは、大回転プラグ及び小回転プラグで構成 される。大回転プラグ及び小回転プラグの直径は、それぞれ4730mm、2870mmであり、各々、 約3200mmの厚さを有する。炉心上部機構は、小回転プラグの貫通孔(案内スリーブ)に挿入さ れたものであり、カバーガスバウンダリの一部を構成し、直径:最大約1345mm、高さ:約6330mm の円筒構造を有する機器である。

炉心上部機構交換作業は、①旧炉心上部機構ジャッキアップ試験、②旧炉心上部機構収納及び ③新炉心上部機構挿入のステップで構成される(図 2.3 参照)。PSF 検出器を用いたキャスクの 軸方向γ線強度分布の測定は、上記②の旧炉心上部機構収納作業後に実施した。PSF 検出器を用 いたキャスクの軸方向γ線強度分布測定時の設備配置イメージを図 2.4 に示す。





図 2.2 原子炉容器、回転プラグ及び炉心上部機構の構造



JAEA-Technology 2017-036



3. PSF 検出器によるキャスクの軸方向 γ線強度分布の測定計画

旧炉心上部機構は、炉心の上方に設置された機器であり、基本的に、下方ほど放射化量(表面線量率)が大きいことと、キャスクの取扱い上の要求から重量を削減する目的で、キャスクは、 旧炉心上部機構表面線量率分布に応じて、遮蔽厚さを4種類(段)とした多段構造を有する。こ れらを踏まえ、PSF検出器によるキャスクの軸方向γ線強度分布の測定においては、C/E補正を 用いた旧炉心上部機構の表面線量率評価手法の妥当性検証が目的であることから、以下の考えに 基づき、測定位置を検討した。

- ・ 旧炉心上部機構における放射化量(表面線量率)が大きく、PSF 設置位置においても、 十分な計数率を得ることができるキャスク下側を測定対象とする(作業環境や工程等を踏 まえ、計測時間は 600s とした)。
- PSF 設置位置において、特徴的な軸方向 γ 線強度分布を示す部位として、遮蔽厚さが変化するキャスクの段付き部に着目する。なお、キャスク下端を 0cm とした場合、段付き部は、127cm、262.5cm、388.5cm に位置する。

上記を踏まえて検討した PSF 検出器によるキャスクの軸方向 γ 線強度分布の測定位置等を図 3.1 に示す。PSF は、後述の特性試験の結果から、軸方向 420cm(キャスク下端を 0 とした高さ 約 64cm~484cm)の領域を測定対象とした。なお、PSF は、キャスク最下段の表面に接触させ るものとし、設置治具により固定した(図 3.2 参照)。また、旧炉心上部機構がキャスクに収納さ れる前にバックグラウンド測定を実施し、旧炉心上部機構収納後の軸方向 γ 線強度分布の測定値 から差し引いた。



図 3.1 キャスクの軸方向 y 線強度分布の測定体系詳細図



図 3.2 専用治具を用いた PSF 設置作業時の状況

4. PSF 検出器の特性確認

4.1 PSF 検出器の概要

使用した PSF 検出器の構成を図 4.1.1 に示す。PSF 検出器は、PSF、光電子増倍管 (PMT)、 ファストプリアンプ (Fast Amp)、コンスタントフラクションディスクリミネータ (CFD)、 遅延回路 (Delay)、高圧電源 (HV)、時間-波高変換器 (TAC)、アナログーデジタル変換 器 (ADC) 及び多重波高分析器 (MCA) 等により構成される。PSF 検出器の主な仕様を以 下に示す。

\mathbf{PSF}	: BICRON 社製 BCF-10	*	長さ 1000cm/直径 1mm×5 本
PMT	: 浜松ホトニクス社製 R1635P	*	ヘッドホン 10mm φ
Fast Amp	: ORTEC 社製 VT120A		
CFD	: ORTEC 社製 584		
Delay	: ORTEC 社製 425A	*	遅延時間 48ns
HV	: ORTEC 社製 556	*	電圧 1250V
TAC	: ORTEC 社製 567	*	レンジ 500ns
ADC	: APTEC 社製 3004	*	MCA に内蔵
MCA	: APTEC 社製 3004		

PSF 検出器は、以下に示す測定原理により、連続的な y 線強度分布を測定できる 5.6.7.8)。

- ① γ線が PSF に入射して発するシンチレーション光が PSF 両端の PMT に到達する までの時間差 (START 信号が入り、STOP 信号が出るまでの時間:以下「検出時間」 という。)を測定する。なお、STOP 信号側の PMT の下流には、遅延回路を設置し ており、シンチレーション光が当該 PMT に到達した信号を一定時間遅延させて TAC に入力させることで、START 信号と STOP 信号の入力タイミングが逆転することを 防止している。
- ② 上記検出時間を TAC により電圧信号に変換し、ADC を介してデジタル信号を MCA に送信する。
- ③ 上記デジタル信号は、MCA において、電圧に応じたチャンネル番号に変換され、 当該チャンネルでは、y線が入射したことがカウントされる。

キャスク軸方向γ線強分布測定実施にあたり、標準線源を用いて、使用する PSF 検出器 の位置校正試験及びγ線感度特性試験を実施した。これらの試験結果を踏まえ、キャスク 軸方向γ線強度分布測定では相対的に好感度である端部から 290~710cm(中心から± 210cm(合計 420cm))の範囲を使用することとした。また、PSF における線量率分布か らγ線強度分布を算出するための応答関数を作成した。



図 4.1.1 PSF 検出器の構成

4.2 位置校正試験

位置校正試験は、¹³⁷Cs 標準線源を用いた PSF のポイント照射により、 γ 線入射位置と MCA チャンネルの相関を確認することを目的とする。

ただし、PSF 検出器においては、 γ 線が PSF に入射して発するシンチレーション光が、 PSF 内を直進して PMT に到達する場合と PSF 内を散乱して PMT に到達する場合では、光 路長が異なるため、測定対象である検出時間(START 信号が入り、STOP 信号が入るまで の時間)に誤差を生じる ⁵⁶⁰⁷⁾⁸⁾。その結果、同じ位置に γ 線が入射した場合にあっても、該 当する MCA のチャンネルだけにカウントが積算されるのではなく、当該チャンネルを中心 とした分布を形成する。例として、コリメートした ¹³⁷Cs 標準線源を用いたポイント照射時 の計数率分布を図 4.2.1 に示す。当該測定において、得られた計数率分布の半値幅 (FWHM) は約 43cm 分であった。

上記の PSF の性質を踏まえ、位置校正試験の手順を以下に示す。

- PSF 端部からの距離 50~850cm の範囲において、100cm 刻みでポイント照射(600 秒)を実施し、計数率分布を測定する。
- ② 得られた計数率分布を以下の正規分布関数でフィッティングし、ピーク中央値から 10 までの範囲の計数率分布を抽出する。

$$y = ae^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}}$$

a: ピーク高さ
b: ピーク中央値
c: 標準偏差
y: 計数率
x: チャンネル

③ 抽出した計数率分布を用いた正規分布関数によるフィッティングを行い、再フィッティング前後のピーク中央値が一致するまで繰り返すことにより、最終的な MCA チャンネル番号をピーク中央値とした。

位置校正試験結果を図 4.2.2 に示す。PSF 端部からの距離 50~850cm の範囲が、MCA チャンネル 223~600 に相応すること、また、良好な線形性を有することを確認した。



図 4.2.1 ポイント照射時の計数率分布 (PSF 位置分解能確認結果)



※ 1ch.幅:約2.1cm

図 4.2.2 位置校正試験結果

4.3 γ線感度特性試験

 γ 線感度特性試験は、 γ 線の入射位置による PSF の感度の差異の確認を目的とする。 γ 線感 度特性試験体系を図 4.3.1 に示す。ここでは、¹³⁷Cs 標準線源からの γ 線による PSF の一様照射 (873、436.5、87.3、8.73 μ Gy/h の 4 ケース、照射時間: 600s)を実施し、計数率分布を測定した。 なお、今回使用した PSF 検出器は γ 線エネルギーが 0.5~1.5MeV の範囲においてエネルギ ーの違いによる計数率への影響がない ⁶ため、 γ 線エネルギー依存性については考慮しなか った。

試験結果を図 4.3.2 に示す。なお、PSF 検出器を用いた測定においては、同時偶発計数の影響 を排除する必要がある。同時偶発計数は、任意の γ 線が PSF に入射して発するシンチレーション 光が STOP 側の PMT に到達する前に、後続の異なる γ 線の PSF 入射により発するシンチレーシ ョン光が STOP 側の PMT に到達することにより生じる事象 (一例:図 4.3.3 参照)であり ^{5,6,8}、感度 特性を把握するためには、測定結果から同時偶発計数を引き、補正することでこの影響を排除する 必要がある。同時偶発計数の算定方法を以下に示す。

- PSF (0~1000cm)の範囲外(MCA チャンネル: (a) 0cm より外側、(b) 1000cm より外側)における計数率と PSF 位置の関係を図 4.3.4 に示す領域 (a-1)、(a-2)、(b-1)、 (b-2)の各範囲で、1 次関数でフィッティングする。
- ② 領域(a-1)及び(a-2)におけるフィッティング直線の交点を A、領域(b-1)及び
 (b-2)におけるフィッティング直線の交点を B とする。
- ③ AとBを結ぶ1次関数式を求め、これを同時偶発計数分布とする。

同時偶発計数の影響を排除した計数率分布 (0cm~1000cm の範囲) を図 4.3.5 に示す。また、ここでは、当該計数率分布を二次関数でフィッティングし、PSF の位置 300、400、500、600 及び 700cm において、線量率が 873、436.5、87.3、8.73 μ Gy/h の場合の計数率を算出し、線量率と計数率の相関を確認した。確認結果を図 4.3.6 に示す。線量率と計数率は、良好な線形性を有しており、PSF の γ 線感度は、線量率に依存しないことが確認できた。PSF端部からの距離 573cm (図 4.2.1 を求めた) での計数率を分母として規格化した場合、相対感度は 0.513~1.002 (0cm~1000cm の範囲) となる。



図 4.3.1 γ線感度特性試験体系概念図



図 4.3.2 PSF の感度分布



- A点にγ線が入射し、シンチレーション光(START側:ピンク(A1)/STOP側/青(A2)) が発生
- 2 発光A1がSTART側PMTに到達し、計測を開始
- ③ 一方、A2がSTOP側PMTに到達する前に、B点に後続のY線が入射し、シンチレーション 光(START側:黒(B1)/STOP側/赤(B2))が発生
- 4 B2がSTOP側PMTに到達し、計測を停止
- ⑤ 測定された時間差(A1-B2)は、A点・B点のどちらにも一致しない入射点を提示

図 4.3.3 同時偶発係数の原因



- PSF (0~1000cm)の範囲外(MCAチャンネル: (a)-500~0cm、(b) 1000 ~2000cm)の領域(a-1)、(a-2)、(b-1)、(b-2)について、1次関 数でフィッティングする。
- ② 領域(a-1)及び(a-2)におけるフィッティング直線f1(x)とf2(x)の交点 をA、領域(b-1)及び(b-2)におけるフィッティング直線f3(x)とf4(x) の交点をBとする。
- ③ AとBを結ぶ1次関数式を求め、これを同時偶発計数分布(赤点線)とする。

図 4.3.4 同時偶発計数の処理(873µGy/h 一様照射時の場合)



図 4.3.5 同時偶発計数の影響を排除した計数率分布(二次関数フィッテイング) (縦軸片対数)



図 4.3.6 PSF の位置における線量率依存性

5. PSF 検出器によるキャスクの軸方向 γ 線強度分布の測定結果

「常陽」では、平成26年5月22日に、旧炉心上部機構をキャスクに収納した。PSF 検出器に よるキャスクの軸方向γ線強度分布の測定は、5月23日に実施された。なお、測定時にあっては、 キャスク下面に設置されたドアバルブを「閉」とし、プラント内から隔離された状態(測定結果 が原子炉容器内の線源の影響を受けない状態)とした。

PSF 検出器によるキャスクの軸方向 γ 線強度分布の測定結果を図 5.1 に示す。軸方向 γ 線強度 分布は、遮蔽厚さが切り替わる段付き部にピークを有することを確認した。



図 5.1 PSF 検出器によるキャスクの軸方向 γ線強度分布の測定結果

6. 測定結果と計算結果の比較

キャスクの軸方向γ線強度分布について、測定値と計算値を比較した結果を図 6.1 に示す。な お、計算値は、点減衰核計算コード QAD-CGGP2(QAD)を用いて、PSF 位置における軸方向 線量率分布を評価し、これに応答関数を乗じて、軸方向γ線強度分布を求めたものである。なお、 QAD による PSF 位置の軸方向線量率分布及び軸方向γ線強度分布の算出方法等については、付 録-1 に示す。

図 6.1 に示すように、測定結果と計算結果は、遮蔽厚さが切り替わる位置(3ヶ所:上段、中 段、下段)にピークを有する。このうち、2 つの大きなピーク(中段、下段)は、測定結果にお いて 151.5cm 及び 285.9cm に、計算結果は 149.3cm 及び 277.4cm に位置する。ピーク位置の差 は、2~8cm であり、PSF の位置分解能や設置誤差等を踏まえれば、ピーク位置は一致したと判 断できる。

軸方向 C/E 分布を図 6.2 に示す。上方(高さ約 410cm より上)は計算結果が過小評価になっ ていることがわかる。この理由としては、旧炉心上部機構の上部(413.4cm 以上の領域)は、線 量率評価時に回転プラグに収まっており回転プラグによる遮蔽があったこと、また炉心から距離 が離れていることから、表面線量率が低いと判断されたため、QAD における計算において、線 源を設定しなかったことが考えられる。当該部位を除いた C/E は 1.1~1.7 である。旧炉心上部機 構の表面線量率の最適化においては、原子炉容器内の線量率測定結果を反映する際に、軸方向領 域毎の C/E の最低値を用いて補正することとし、保守性を確保したものとしているため、当該結 果は妥当と判断できる。



図 6.1 キャスク軸方向γ線強度分布の測定値と計算値の比較結果



図 6.2 測定値と計算値の C/E 値の分布

7. 結言

「常陽」では、炉心上部機構交換作業用設備の合理的かつ安全な設計・製作・運用に資するため、原子炉容器内の空間線量率測定結果に基づく補正により、計算誤差に係る設計余裕を低減して、旧炉心上部機構の表面線量率評価値の最適化を図った。最適化にあたり、炉上部回転プラグ2箇所の貫通孔の測定では線源寄与の割合が旧炉心上部機構とそれ以外の構造物で違うことを利用し、旧炉心上部機構からの寄与のみを分離した C/E 値で線量率計算値を補正する手法を導入した。

本研究では、この旧炉心上部機構の表面線量率評価手法が妥当であったことを検証するため、 プラスチックシンチレーション光ファイバ(PSF)検出器を用いて、旧炉心上部機構を炉内から 引き上げキャスクに収納した状態で、キャスクの軸方向γ線強度分布を測定し、旧炉心上部機構 の表面線量率評価値に基づく計算値と比較した。主な結果を以下に示す。

- (1) 軸方向 γ 線強度分布は、キャスクの形状に応じたピークを有し、その位置は、計算値と測 定値で一致した。
- (2) キャスク表面の軸方向 γ 線強度分布の C/E は、1.1~1.7 であった。なお、旧炉心上部機構 の表面線量率の評価時には、保守性の確保に留意した上で、原子炉容器内の線量率測定結果 を反映している。

以上より、「常陽」旧炉心上部機構の表面線量率評価に用いた手法の妥当性が確認された。ナト リウム冷却型高速炉における原子炉容器内保守・補修においては、機器設計条件や作業環境条件 の設定が重要である。高速炉で長期間使用した大型構造物の当該線量率評価手法を適用した前例 はなく、ここで蓄積された経験は、「常陽」の復旧のみならず、稀少な知見として、有用なものと 考える。

謝辞

QAD コードによる計算や各種実験においては、検査開発株式会社の枡井氏に多大なるご助成 をいただいた。また、高速実験炉部、高速炉技術課、高速炉第1課、高速炉第2課、保全・照射 技術開発課、環境監視線量計測課の多くの方々のご協力をいただいた。ここに記して、感謝の意 を表する。

参考文献

- Takashi SEKINE, Takashi ASHIDA et al. : "Restoration work for obstacle and upper core structure in reactor vessel of experimental fast reactor Joyo", FR '09, Kyoto, JAPAN (2009).
- Misao TAKAMATSU, Takashi ASHIDA et al. : "Restoration work for obstacle and upper core structure in reactor vessel of experimental fast reactor Joyo (2)", FR '13, Paris, FRANCE (2013).
- Eiji OKUDA, Chikara ITO et al. : "Restoration for damaged components in reactor vessel of the experimental fast reactor Joyo", 2013 ANS Winter Meeting, Washington, USA (2013).
- 4) 伊東 秀明他: "「常陽」原子炉容器内構造物の放射化量とガンマ線量率分布の測定評価"、 JAEA-Technology 2010-049(2011), 129p.
- 江本 武彦他: "シンチレーションファイバーを用いた線量率分布測定"、 PNC TN9410 96-299(1996), 74p.
- 6) 青山 卓史他: "高速実験炉「常陽」における放射性腐食生成物の付着分布(第11回定期検査時の測定と評価)"、PNC TN9410 98-004(1997), 74p.

This is a blank page.

付録資料

- 付録-1 QAD による PSF 位置の軸方向線量率分布及び 軸方向γ線強度分布の算出方法等
- 付録-2 QAD モデルにおけるγ線源分布等
- 付録-3 軸方向線量率分布から軸方向γ線強度分布を求 める際に使用する応答関数の作成方法等

付録-1

QAD による PSF 位置の軸方向線量率分布及び軸方向 γ線強度分布の算出方法等

1. 概要

機器の設計に使用した旧炉心上部機構の表面線量率分布評価値は、計算により求めた旧炉心上部 機構の表面線量率分布(計算のアウトプット)を炉内占領率測定 C/E 補正したものである。PSF 検出器を用いた軸方向γ線強度分布の測定結果と計算結果を比較するためには、PSF 位置におけ る軸方向表面線量率分布を計算により評価した上で、これを PSF 検出器で測定するものとして、 軸方向γ線強度分布に変換する必要がある。PSF 位置の軸方向線量率分布及び軸方向γ線強度分 布の算出方法等を以下に示す。

2. PSF 位置の軸方向線量率分布の評価方法

旧炉心上部機構の表面線量率分布の評価方法の概要を以下に示す(図 付録 1-2.1 参照)。また、 旧炉心上部機構の表面線量率分布を図 付録 1-2.2 に示す。

- ① 2 次元輸送計算コード DORT-RZ により、原子炉容器内の中性子束分布を評価し、計算 コード ORIGEN2 により、原子炉容器内の主要な部位のγ線源強度を算出する。
- ② 上記 γ 線源強度をインプットとし、点減衰核計算コード QAD-CGGP2R を用いて原子炉 容器内の線量率分布を算出する。なお、当該計算では、3 次元モデルを使用した。
- ③ 原子炉容器内の線量率分布測定を実施し、上記計算結果と比較することで、C/E を評価 した。原子炉容器内のγ線源は、旧炉心上部機構とそれ以外の構造物に区分される。C/E 評価に当たっては、その寄与割合を考慮して、Cucs/Eucs及び Ccore/Ecore を求めている。
- ④ QAD により旧炉心上部機構の表面線量率分布を計算し、これを Cucs/Eucs で除して補 正したものを、最終的な旧炉心上部機構の表面線量率分布とする。

PSF 位置の軸方向線量率分布は、上記で整備した旧炉心上部機構のモデルを用いた上で、その 周囲にキャスクやドアバルブ等(炭素鋼)を配置し、旧炉心上部機構がキャスク内に収納された 状態を模擬した体系を構築し、評価した。QAD計算モデル構造を図付録1-2.3に示す。なお、 機器の設計に使用した旧炉心上部機構の表面線量率分布は、計算により求めた旧炉心上部機構の 表面線量率分布を直接的に C/E 補正したものであるため、本計算においては、旧炉心上部機構の モデルにおける y 線源強度を見直す必要があった(付録-2参照)。



図 付録 1-2.1 旧 UCS 表面 γ 線量率分布評価手順



図 付録 1-2.2 旧 UCS 表面 y 線量率分布



3. 軸方向 y 線強度分布の算出方法

軸方向線量率分布の評価位置を図 付録 1-3.1 に示す。PSF 位置における軸方向 y 線強度分布の 評価にあたっては、キャスク下端から鉛直方向に約 600cm の範囲に約 2.1cm ピッチで評価点を 配置するものとし、合計 282 点を対象とした。軸方向線量率分布から軸方向 y 線強度分布への変 換には、以下に示す式を用いる。なお、ここで、M:計数率 (cps)、S:線量率 (Gy)、R:応答 (cps/Gy)、K:補正係数とする。n=1~282 とし、S1~Snには、上記 282 点の軸方向線量率が 入力される (検出器応答関数 KR の作成方法:付録-3 参照)。



図 付録 1-3.1 軸方向線量率分布の評価位置

4. PSF 位置の軸方向線量率分布の評価結果及び軸方向 γ 線強度分布の算出結果

PSF 位置の軸方向線量率分布の評価結果及び軸方向 γ 線強度分布の算出結果を図 付録 1-4.1 に示す。なお、機器の設計に使用した旧炉心上部機構の表面線量率分布は、軸方向領域毎の C/E の最低値を用いて補正することとし、保守性を確保したものである。そのため、今回の測定において、C/E は 1.1~1.7 となり、計算結果は測定結果を上回る。

当該 C/E (1.1~1.7)を用いて、最適化した軸方向線量率分布の評価結果を図 付録 1-4.2 に示 す。PSF 測定範囲外(高さ 64cm 以下及び 484cm 以上)は C/E が存在しないため、高さ 64cm より低い位置については高さ 64cm の C/E を用い、高さ 484cm より高い位置は高さ 484cm の値 を用いて最適化した(図 付録 1-4.2 破線部)。今回、ガイガーミュラー計数管(テレテクター) を用いた空間線量率のポイント測定も実施している。当該測定結果についても合わせて、 図 付録 1-4.2 に示す。最適化後の軸方向線量率分布は、空間線量率のポイント測定結果と一致し

ており、ここでも一連の計算手法等が妥当であることが確認できた。







図 付録 1-4.2 最適化した軸方向線量率分布

付録-2

QAD モデルにおける γ線源分布等

機器の設計に使用した旧炉心上部機構の表面線量率分布は、計算により求めた旧炉心上部機構の表面線量率分布を直接的に C/E 補正したものであるため、本計算においては、旧炉心上部機構のモデルにおける y 線源強度を見直す必要があった。

γ線源強度の見直しは、旧炉心上部機構表面線量率分布の評価結果に一致させることを目標と した。ただし、当該評価に寄与する主な線源は、構造材であるステンレス鋼の不純物である 59Co の放射化によって生じる 60Co であることから、線源設定している旧炉心上部機構を軸方向に 11 グループに分割(図 付録 2-1 参照)し、グループ毎に一律に補正することを基本とした。補正手 順を以下に示す。

- ① 旧炉心上部機構表面線量率分布における代表点(11ヶ所)における線源グループの寄与率を評価する。評価結果を図付録 2-2 に示す。なお、これらの代表点においては、旧炉心上部機構表面線量率分布の評価に用いた Cucs/Eucsが設定されている。
- ② 代表点における線量率への寄与率が大きい線源グループに対し、当該点における Cucs/Eucsを用いた補正を行う。
- ③ 補正したγ線源強度により、旧炉心上部機構表面線量率分布を計算し、基準とした旧炉 心上部機構表面線量率分布の評価結果と比較する。
- ④ 補正した γ線源強度により計算した旧炉心上部機構表面線量率分布が基準となる評価結果に一致するまで、上記①~③を繰り返す。

補正したγ線源強度により、旧炉心上部機構表面線量率分布を計算し、基準とした旧炉心上部 機構表面線量率分布の評価結果との比較を図付録 2-3 に示す。両者は概ね一致しており、γ線源 強度の補正を適切に実施できたものと考える。



図 付録 2-1 線源の 11 グループへの分割



			線源グループ寄与率(%)									
高さ (cm)	Cucs / Eucs	① 7.0- 21.0	2 21.0 - 46.7	3 46.7 - 52.0	4) 52.0- 57.0	57.0 - 65.5	6 65.5- 110.0	⑦ 110.0 - 163.0	8 163.0 - 216.0	9 216.0 - 269.0	10 269.0 - 325.0	1) 325.0 - 413.4
370	1.00	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.1	0.1	0.1	0.4	85.8	13.4
247	2.94	0.3	0.9	0.8	1.8	0.5	3.0	7.0	26.9	54.6	4.2	0.0
217	2.27	0.5	1.0	1.2	2.7	0.6	4.2	8.1	42.3	38.7	0.7	0.0
166	2.27	0.6	1.0	1.3	3.6	0.8	6.0	47.2	38.7	0.8	0.0	0.0
148	2.27	0.8	1.3	1.9	4.8	1.5	12.0	68.9	8.7	0.2	0.0	0.0
112	1.96	0.6	1.1	2.0	6.4	4.4	38.6	45.1	1.8	0.1	0.0	0.0
88	1.96	1.0	1.5	3.3	12.6	12.5	64.3	4.4	0.3	0.0	0.0	0.0
58	1.43	3.2	0.5	5.9	26.9	13.7	47.8	1.9	0.2	0.0	0.0	0.0
46	1.43	40.4	25.7	5.0	0.4	1.4	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22	1.69	55.9	31.0	10.0	2.7	0.1	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	1.69	74.3	17.9	5.8	1.7	0.1	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

図 付録 2-2 各代表点での 11 グループからの寄与率



線源強度修正後の旧炉心上部機構表面線量率分布の評価結果との比較 付録 2-3 X

付録-3

軸方向線量率分布から軸方向γ線強度分布を求める際に使用する応答関数の作成方法等

応答関数は、PSF における線量率分布から計数率分布を算出することを目的とする。応答関数の作成手順を以下に示す(図付録 3·1 参照)。なお、計数率分布及び線量率分布のメッシュサイズは、MCA チャンネル幅に対応しており約 2.1cm である。

- ① 一ヶ所に線量率 S を与えた場合の各 MCA チャンネルにおける計数率 M の分布は、コリ メートした ¹³⁷Cs 標準線源を用いたポイント照射 (PSF 端部からの距離 550cm の位置時の 計数率分布と同じ形状を有すると仮定する。
- MCA チャンネル i に線量率 S の照射を想定し、計数率 M の分布より、応答 R を設定する。
- ③ 全ての MCA チャンネルについて、当該チャンネルにのみ線量率Sの照射を想定した場合の計数率Mの分布を作成し、当該分布より応答Rを設定する。なお、PSF検出器は照射位置によりγ線感度が異なることを踏まえ、これらの計数率Mの分布作成に当たっては、対象の位置に応じた相対感度を乗じるものとする。
- ④ 設定した応答 R を以下に示す行列式として整理する。なお、ここで、M:計数率(cps)、 S:線量率(Gy)、R:応答(cps/Gy)、K:補正係数とする。補正係数 K の算定には、γ線 感度特性試験結果を使用する。S1~Sn に 87.3 Gy を入力し、得られた M1~Mn とγ線感度特 性試験における計数率分布を比較すること(図 付録 3・2 参照)で K を求める。

$$\begin{pmatrix} M_1 \\ \vdots \\ M_n \end{pmatrix} = \mathbf{K} \begin{pmatrix} R_{1,1} & \cdots & R_{n,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{1,n} & \cdots & R_{n,n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ \vdots \\ S_n \end{pmatrix}$$





This is a blank page.

_

表 1. SI 基本単位					
甘大昌	SI 基本単位				
本平里	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	Α			
熱力学温度	ケルビン	Κ			
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
AI 立長 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 ⁸
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	t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

	SI 旭立単位					
組立量	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		
立体鱼	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	Ν		m kg s ⁻²		
E 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	С		s A		
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 1}$		
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	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$		
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^{-1}$		
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$kg s^{2} A^{1}$		
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^2 A^2$		
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K		
光東	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		

酸素活性(1) ダール kat [s¹ mol]
 (w)SH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。
 (h)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。
 (a)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)へルツは周期現象についてのみ、ペラ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。 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。それシウス度とケルビンの
 (a)やレシウス度はケルビンの特別な名称で、温度器や温度開隔を表す整備はとおらの単位で表しても同じである。
 (b)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物告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

	SI組立単位			
組立量	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	
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²	
表 面 張 九	リ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	
電東密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A	
誘 電 卒	コアラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$	
透 磁 率	ペンリー毎メートル	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	ダレイ毎秒	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}	э 9	Y	10 ⁻¹	デシ	d	
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	с	
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m	
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ	
10^{12}	テラ	Т	10^{-9}	ナノ	n	
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	р	
10^{6}	メガ	М	10^{-15}	フェムト	f	
10^3	+ 1	k	10^{-18}	アト	а	
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z	
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	v	

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	۰	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 ⁴ m ²			
リットル	L, 1	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm 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							
3	名称		記号	SI 単位で表される数値			
電子	ボル	ŀ	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J			
ダル	- F	\sim	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg			
統一原	子質量単	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 ⁵ Pa	
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	Μ	1 M=1852m	
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{-12} \text{ cm})^2=10^{-28} \text{ m}^2$	
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s	
ネーパ	Np	ci単位しの粉結的な間接け	
ベル	В	対数量の定義に依存。	
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	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s			
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{ m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$			
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$			
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx			
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²			
マクスウエル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$			
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 π)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	ユ		IJ	ſ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq		
$\scriptstyle u$	\sim	ŀ	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$		
ラ				K	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy		
$\scriptstyle u$				L	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv		
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$		
フ	T.		N	"		1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m		
メー	ートル	/系	カラゞ	ット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10 ⁻⁴ kg		
ŀ				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa		
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa		
+1	ы		11	_		1 cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J		
15	Ц		9		cal	(「IT」カロリー), 4.184J(「熱化学」カロリー)		
3	ク			~	u	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$		