JAEA-Research 2016-011 DOI:10.11484/jaea-research-2016-011



# プラスチックシンチレーションファイバ測定技術の 福島第一原子力発電所における汚染水管理への応用

Application to Contaminated Water Management in the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station using the Plastic Scintillation Fiber

> 眞田 幸尚 山田 勉 佐藤 義治 西澤 幸康 石橋 聖 渡辺 将久 鳥居 建男

Yukihisa SANADA, Tsutomu YAMADA, Yoshiharu SATO, Yukiyasu NISHIZAWA Satoshi ISHIBASHI, Masahisa WATANABE and Tatsuo TORII

> 福島研究開発部門 福島環境安全センター

Fukushima Environmental Safety Center Sector of Fukushima Research and Development

September 2016

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, 2016

# プラスチックシンチレーションファイバ測定技術の 福島第一原子力発電所における汚染水管理への応用

日本原子力研究開発機構

福島研究開発部門 福島環境安全センター 眞田 幸尚、山田 勉<sup>\*1</sup>、佐藤 義治、西澤 幸康<sup>\*1</sup>、 石橋 聖<sup>\*2</sup>、渡辺 将久<sup>+1</sup>、鳥居 建男<sup>+2</sup>

(2016年6月23日 受理)

東京電力ホールディングス福島第一原子力発電所では、汚染水の管理が社会的な問題となっ ており、海洋への流出を防ぐためシビアな対応が必要な状況が続いている。タンクや側溝内の 水中における放射性物質濃度をダイレクトに測定し、モニタリングする手法として、プラスチ ックシンチレーションファイバ (PSF)の適用が考えられる。そこで、汚染水タンクの漏洩監 視や側溝における簡易的なモニターとして適用するために、福島第一原子力発電所敷地内にお いて、基礎的な検討を行った結果をまとめる。

福島環境安全センター (南相馬駐在):〒975-0036 福島県南相馬市原町区 萱浜字巣掛場 45-169

+1 企画調整室

+2 廃炉国際共同研究センター

- ※1 技術開発協力員(株式会社ヴィジブルインフォメーションセンター)
- \*1 日本放射線エンジニアリング株式会社 (2016年3月まで技術開発協力員)
- \*2 原電エンジニアリング株式会社(2015年3月まで技術開発協力員)

JAEA-Research 2016-011

# Application to Contaminated Water Management in the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station using the Plastic Scintillation Fiber

Yukihisa SANADA, Tsutomu YAMADA<sup>\*1</sup>, Yoshiharu SATO, Yukiyasu NISHIZAWA<sup>\*\*1</sup>, Satoshi ISHIBASHI<sup>\*2</sup>, Masahisa WATANABE<sup>+1</sup> and Tatsuo TORII<sup>+2</sup>

Fukushima Environmental Safety Center, Sector of Fukushima Research and Development, Japan Atomic Energy Agency Haramachi-ku, Minamisoma-shi, Fukushima-ken

(Received June 23, 2016)

In the Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, management of the contaminated water becomes the social problem, and the situation that severe correspondence is necessary continues to prevent an outflow to the ocean. Plastic Scintillation Fiber (PSF) can apply as technique to direct measure the concentration of radioactive material in the water at a tank and drainage. In this report, the results of fundamental test were summarized to apply for monitoring of leakage to the tank and monitoring of drainage in the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station.

Keywords: Plastic Scintillation Fiber, Contaminated Water, Fukushima Daiichi Nuclear Power Station

\*2 Nuclear Engineering and Services Company (Collaborating Engineer until March, 2015)

<sup>+1</sup> Planning and Co-ordination Office

<sup>+2</sup> Collaborating Laboratories for Advanced Decommissioning Science

X1 Collaborating Engineer (Visible Information Center, Inc.)

<sup>\*1</sup> Japan Radiation Engineering Co. Ltd. (Collaborating Engineer until March, 2016)

# 目次

1.はじめに
2. プラスチックシンチレーションファイバ
2.1. PSF の基本的な構成
2.2. 線源試験例
2.3. PSF の温度特性
3. 福島第一原子力発電所への適用案8
4. 側溝におけるPSFモニター11
4.1. 既知の汚染水サンプルを用いたキャリブレーション11
4.2. モニターとしての信頼性
4.2.1. 試作機の製作
4.2.2. 既存モニター用サンプリング枡における長期試験
4.2.3. 側溝内における長期試験
4.2.4. β γ 弁別型 PSF の開発
5. 汚染水タンクの漏洩検知
5.1. 長尺 PSF の開発
5.2. 既知の汚染サンプルを用いたキャリブレーション測定
5.3. 検出下限値の評価
6. 汚染水タンク周辺の堰内における滞留水の放射性物質濃度評価
6.1. モニターとしての信頼性 41
6.2. バックグラウンドの計測から検出下限値の評価
7.まとめ
8.課題とシステム設計
謝辞
参考文献

# Contents

1. Introduction1
2. Plastic scintillation fiber
2.1. Basic characteristic of PSF
2.2. Example of source test
2.3. Temperature response of PSF
3. Application plan to the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station
4. Monitor of radionuclide concentration in drainage side-ditch11
4.1. Calibration11
4.2. Reliability as the monitor of PSF
4.2.1. Prototype system
4.2.2. Long term testing in the drainage basin for the existing monitor 16
4.2.3. Long term testing in the drainage side-ditch25
4.2.4. Development of PSF which can discriminate $\beta$ -ray and $\gamma$ -ray
5. Leak detection of the contaminated water tank
5.1. Development of continuous length of PSF
5.2. Calibration
5.3. Detection limit
6. Evaluation of radionuclide concentration in water at weir around contaminated water
tank
6.1. Reliability as the monitor of PSF 41
6.2. Detection limit
7. Summary
8. Problem of current system and system design for practical monitor
Aknowledgement
References

# 図 リスト

Fig.	1-1	東京電力福島第一原子力発電所全景	2
Fig.	2-1	PSF の外観及び測定原理	3
Fig.	2-2	<sup>137</sup> Cs 照射装置により PSF 全体に照射した例	4
Fig.	2-3	<sup>137</sup> Cs 点線源を PSF に照射した例	5
Fig.	2-4	PSFの計数率と温度との関係(屋外におけるデータ)	7
Fig.	3-1	発電所敷地内における汚染水管理への適用案	9
Fig.	3-2	試験の経緯1	0
Fig.	4-1	キャリブレーション試験風景1	3
Fig.	4-2	汚染水濃度と PSF 計数率の関係1	4
Fig.	4 <b>-</b> 3	検出下限値と測定時間の関係1	4
Fig.	4-4	試作機の外観1	<b>5</b>
Fig.	4-5	側溝の場所と既存のモニターの設置場所1	8
Fig.	4 <b>-</b> 6	既存モニターの概要1	8
Fig.	4-7	既存モニター用のサンプリング舛における試験状況1	9
Fig.	4-8	既存モニター用のサンプリング舛における試験結果2	0
Fig.	4-9	既存のγ線モニターと PSF モニターの計数率の比較 2	1
Fig.	4-10	既存のβ線モニターと PSF モニターの計数率の比較2	2
Fig.	4-11	既存のγ線モニターと PSF の計数率の散布図2	3
Fig.	4-12	既存のβ線モニターと PSF の計数率の散布図 2	3
Fig.	4-13	PSF モニターの計数率とサンプリングによる測定結果の比較	4
Fig.	4-14	検出下限値と測定時間及びバックグラウンド線量率の関係2	4
Fig.	4-15	側溝内における試験状況2	6
Fig.	4-16	PSF モニターの計数率データ2	7
Fig.	4-17	PSF モニターの計数率と既存モニターの濃度測定値のトレンドの比較 2	8
Fig.	4-18	βγ線弁別測定型 PSF の構成	0
Fig.	4-19	βγ線弁別測定型 PSF に β線点線源を照射した場合の位置スペクトル	0
Fig.	4-20	βγ線弁別測定型 PSF にγ線点線源(Cs-137, 3.4×10 <sup>6</sup> Bq)を照射した場合のピーク計数	ζ
率	•••••		1
Fig.	4-21	βγ線弁別測定型 PSF の板状線源を使用した試験結果	1
Fig.	5-1	50 mPSF に対し、5 m おきに <sup>137</sup> Cs 点線源を PSF に照射した例	3
Fig.	5-2	PSF の長さと点線源に対するレスポンスの関係	3
Fig.	5-3	汚染水用 PSF システムの外観3	4
Fig.	5-4	発電所敷地内における PSF 試験場所	7
Fig.	5-5	既知の汚染水による試験風景(上:汚染水と PSFの接触、下:容器とシステム)3	8
Fig.	5-6	No.1 検出器における汚染水サンプルによる位置スペクトル	9
Fig.	5-7	PSFの計数率と濃度の関係	9

Fig. 5-8	No.1 及び No.2 検出器における汚染水サンプルによる位置スペクトル	39
Fig. 5-9	検出下限値とバックグランド線量率及び測定時間の関係	40
Fig. 6-1	汚染水タンク連続測定試験風景	42
Fig. 6-2	BG 測定時における位置スペクトル	43
Fig. 6-3	BG 線量率と計数率の関係	43
Fig. 6-4	連測測定試験における計数率の変動(第1期)	44
Fig. 6-5	連測測定試験における計数率の変動(第2期)	45
Fig. 6-6	検出下限値とバックグランド線量率及び測定時間の関係	46
Fig. 8-1	機器の構成イメージ	50

# 表 リスト

Table 4-1	使用した汚染水サンプルと濃度条件及	び PSF の言	計数率	12
Table 5-1	汚染水サンプル調整条件			36
Table 5-2	長尺 PSF のレスポンスと検出下限値	(Bq/mL)		36

#### 1. はじめに

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震に起因して、東京電力福島第一原子力発電所事故 (以下、福島原子力発電所事故)が発生した。この事故により、周辺環境に放射性物質が拡散した。

日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構)では、福島原子力発電所事故以来、プラスチ ックシンチレーションファイバ(以下、PSF)を用いた放射線計測装置の現場適用について研 究を行っている<sup>1)</sup>。PSF は、1980年代に高エネルギー物理の分野で荷電粒子の飛跡測定等を 目的として開発された<sup>2)</sup>。その後、飛行時間差(TOF)法と組み合わせることによって、線量 率分布の測定用に開発、利用されてきた<sup>3,4)</sup>。本検出器の優位な点は、検出部をひも状に製作 することができ、かつ検出部の放射線量の分布を計測できることにある。近年、納富らは、PSF を用いた線量率分布測定システムを原子炉周りで照射することによって、中性子とy線の混合 場で使用できることを実証した<sup>5)</sup>。また、高田らは、レートメータと組み合わせることにより、 位置検出型のエリアモニターとしても応用している<sup>6)</sup>。このように、PSF の技術は発電所の敷 地内を中心に研究されてきたが、広い範囲を連続的に測定するニーズがあまりなかったことも あり、広く普及することはなかった。

福島原子力発電所事故以来、放射性セシウムにより汚染されている地域では、従来のサーベ イメータによる"点"の測定では汚染の全体像をつかむことは難しいこともあり、PSFを用いた 放射線測定システムの応用が広がっている。例えば、除染前後に測定を行い除染の効果の確認 に使用されたり、樹木や建物の壁等これまでサーベイメータによる測定が困難な場所での測定 に使用されたりしている<sup>8</sup>。また、PSFを水底の堆積物のダイレクトな測定に応用し、農業用 のため池の水底の放射性物質の濃度マップを作成した例もある 9-11)。

東京電力福島第一原子力発電所(以下、発電所という)では、汚染水の管理が社会的な問題 となっており、海洋への流出を防ぐためシビアな対応が必要な状況が続いている 7。現状の発 電所敷地内の写真について Fig. 1-1 に示す。事故直後、原子炉建屋やタービン建屋内の汚染水 は、セシウム吸着装置(KURION or SARRY)により懸濁体の放射性物質を除き、タンク内に 保管された。この処理済みの汚染水は RO (Reverse Osmosis) 濃縮水と呼ばれ、懸濁体になり やすい <sup>137</sup>Cs 等の y 線放出核種は取り除かれているものの、水溶体になりやすい <sup>90</sup>Sr の濃度が 比較的高いことが特徴である。最近では、他核種除去設備(ALPS)の配備により RO 濃縮水の 処理が進められており、放射性核種濃度の高い汚染水を保管したタンクは少なくなってきてい る。しかしながら、タンクからの漏洩事象は何件か発生しており、その漏洩監視手法の確立が 望まれている。また、敷地内に降り注いだ雨水は、外観では汚染水との区別が難しいため、タ ンクに一時保管している。この雨水についても現場で放射性物質濃度を評価できれば、放射性 物質濃度の分析の手間や一時的にタンクに保管する労力を省くことができる。一方で、敷地内 のタンク周辺は汚染水が漏洩しても土壌に浸透しないようにコーティング作業が進められてお り、漏洩した汚染水は雨水とともに側溝に流入する。現在、側溝の海洋放出口付近では、放射 性物質濃度をダイレクトにモニターする装置が設置されており、海洋放出手前で検知が可能で あるが、より上流側にモニターする装置があると原因調査のために重要な知見となることが考 えられる。また、モニター方法は、簡便でコストのかからない方法が望まれている。そのよう なニーズに、位置検出が可能であり、ひも状の形状を工夫することによりフレキシブルな形状 を実現できる PSF は有用であると考えられる。

本報告書では、PSFの測定技術を発電所敷地内における汚染水管理に適用することを目的とし、基礎試験を実施した結果についてまとめる。



Fig. 1-1 東京電力福島第一原子力発電所全景

# 2. プラスチックシンチレーションファイバ

2.1. PSF の基本的な構成

PSFを用いたライン測定型の放射線分布測定システムの標準的な構成を Fig. 2-1 に示す。検 出部は、中芯部(コア)に放射線に有感なポリスチレンを母材としたものを、コアを囲むクラ ッドに PMMA (Polymethyl methacrylate)を使用した直径 1 mm、長さ 20 m の PSF で構成 されいている。この PSF を 19 本束ねて、ビニールチューブで覆うことにより遮光し、その両 端に光電子増倍管を接続される。PSF 内に放射線が入射するとシンチレーション光を発してフ ァイバの両端に伝搬するが、入射位置によりファイバの両端への光の到達時間が異なる。この 時間差を両端に設置した光電子増倍管 (PMT: Photomultiplier Tube)により電気信号に変換 して、放射線の入射位置を特定する (Time of Flight TOF 法)。この時間差は、検出部からの 信号を処理する TAC (Time to Amplitude Converter)を用いて時間情報から波高情報に変換 される。さらに、TAC から出力される信号を MCA (Multi-channel Analyzer) に入力し、放射 線の入射位置を示す位置のスペクトルとして表示した。これらのデータを処理する計測部は、 FPGA (Field-Programmable Gate Array)上に構成した。システムは、検出部とデータ処理部 をつなぐケーブル、コネクタは防水構造となっている。



Fig. 2-1 PSF の外観及び測定原理

2.2. 線源試験例

<sup>137</sup>Csの線源を使用した PSF の応答特性例を Fig. 2-2 に示す。図に示すように、PSF の中央 部分が最も計数率が高く(感度が高い)、両端に近づくほど感度が下がる傾向にある。これは、 PSF 内の光の減衰特性及び時間差が短くなり不感時間の影響が大きくなることに起因する。こ のような位置特性は、線量が一定な場所で測定データを取得し、最大の感度を示す場所を1に 規格化し、それぞれの位置の感度の割合をあらかじめ算出しておくことにより補正することが できる。システムの不感時間は、パルスの整形幅から推定すると10 ns 程度である。Fig. 2-3 には、点線源の照射試験結果を示す。このように、点線源を配置した場所を中心にピークとし て観測できる。この場合、位置分解能の指標となるピークの半値幅は、40 cm 程度となる。



Fig. 2-2<sup>137</sup>Cs 照射装置により PSF 全体に照射した例



Fig. 2-3<sup>137</sup>Cs 点線源を PSF に照射した例 (10 kBq, 300 秒測定)

- 5 -

2.3. PSF の温度特性

一般的に、光電子増倍管は温度により感度変化することが知られており、PSF もその影響が考えられる。PSF に使用されている浜松ホトニクス社製光電子増倍管(以下、PMT) R9880Uは、マルチアルカリ光電面であり、ファイバの発光波長領域では-0.3 %/℃で感度 が減少する<sup>12)</sup>。PSF のシステムとしての温度特性を把握するため、10 m で 10 本バンドル の PSF システムを使用して、温度と計数率の関係を調査した例を示す。

試験は、実際の使用環境中でデータを取得するために、屋外にて暴露実験を実施した。実 環境中では、ラドンの影響があるため、Cs-137の線源を PSF の横に配置し、ラドンによる 計数の影響が無視できる状態とした。試験は、夏季と冬季に実施した。温度は、データロガ ー付の温度計を配置し、PSF と同時にデータを1週間取得した。Fig. 2-4 に温度と計数率の 関係を示す。なお、計数率はそれぞれの最大値を1に規格し、Fig. 2-4 (a)に夏季、Fig. 2-4 (b) に冬季のデータを示している。この結果からも温度が低くなるにつれ、計数率は上昇傾向に あることが分かり、線形近似した直線の傾きから、両データとも-0.1 %/℃となった。これ らのデータは、PMT の温度特性と概ね同様とみることができる。本試験結果から、PSF の システムとしての温度特性は、PMT の温度特性に依存し、PMT の温度特性のメーカ試験値 である-0.3 %/℃程度の感度変化を考慮すべきと考えられる。



(a) 夏季、(b) 冬季

## 3. 福島第一原子力発電所への適用案

発電所敷地内における汚染水管理への適用について立案した。立案した3つの適用案について Fig. 3-1 に示す。また、以下にこれらの適用案を実現するために必要な試験、開発要素及び 実施内容の概要について示す。

① 側溝における PSF モニター

・既知の汚染水サンプルを用いたキャリブレーション

福島第一原子力発電所構内で貯留されている既知の汚染水サンプルと PSF を接触させ、<sup>90</sup>Sr 及び放射性セシウムの濃度に対する PSF のレスポンスを算出する。

・モニターとしての信頼性(長期観測試験)

製作したシステムを長期的に実際の側溝に設置し、機器としての耐久性を確認する。

・実際の側溝に流れる排水の分析結果との比較測定(レスポンスの妥当性)

上記の長期観測試験で取得したデータを周辺の別のモニタリング機器やサンプルを実験室で 測定したデータと比較し、キャリブレーション測定で設定したレスポンスの妥当性を確認する。

② 汚染水タンクの漏洩検知

・ 長尺 PSF の開発

タンクは胴回りが約 40 m であるため、40 m 以上の PSF の開発を実施する。また、 $\beta$ 線を 測定できるように、ファイバのカバーを最適化する。

・既知の汚染サンプルを用いたキャリブレーション測定

タンクからの汚染水漏洩を模擬するため、福島第一原子力発電所構内で貯留されている既知 の汚染水サンプルと PSF を接触させ <sup>90</sup>Sr に対するレスポンスを求める。また、実際のタンク 周辺におけるバックグラウンド (BG) から検出下限値を算出する。

③ 汚染水タンク周辺の堰内における滞留水の放射性物質濃度評価

・モニターとしての信頼性(連続試験)

製作したシステムを長期的に実際の汚染水タンクに設置し、機器としての耐久性を確認する。

・BGの計測から検出下限値の評価

上記の連続試験時における BG データを基に、検出下限値の評価を行う。本使用方法におけるレスポンスは、①及び②で求めたレスポンスを使用する。

これらの試験を行った時系列について、Fig. 3-2に示す。



② 汚染水タンクの漏洩検知







Fig. 3-1 発電所敷地内における汚染水管理への適用案

大項目	中項目	H25年度	(2013)	H26年度(2	2014)	H27年度 (2015)		
		4-10	11-3	4-10	11-3	4-10	11-3	
<ol> <li>① 側溝に おける放射 性物質濃度 モニター</li> </ol>	JAEA試験			サンプリ	ング枡長期試験	非水溝長期試験	☆ 実液校正 (11月)	
	現場適用						☆ 実液校正 (3月)	
②汚染水タ ンクの漏洩 検知			☆ ☆ 予備試験 (11月, 2月)					
<ol> <li>③汚染水タ</li> <li>ンク周においの</li> <li>堀内にお水の</li> <li>放射性物質</li> <li>濃度評価</li> </ol>			☆ ☆ 予備試験 (11月,2月)	<b>長</b> 期試験 (6/24-25, 7/31-	8/1)			
委員会 • 会議等	調整	☆ 汚染水対策現地 会議で提案 (9月)	☆ 汚染水対策現地調 で試験結果報告 (2	☆ 整会議 汚染水対 【月) で試験約	村策現地調整会議 結果報告 (7月)	☆ 汚染水対策3 で東電より根	地調整会議 討結果報告 (7月)	

Fig. 3-2 試験の経緯

### 4. 側溝における PSF モニター

4.1. 既知の汚染水サンプルを用いたキャリブレーション

側溝における放射性物質濃度のモニターとして使用することを想定し、福島第一原子力 発電所構内で PSF のキャリブレーション試験を実施した。キャリブレーションには、福島 第一原子力発電所内で発生した汚染水を用い、あらかじめサンプルの実験室で測定を行っ た Sr-90 の濃度が支配的なサンプル (Sr sample) 及び放射性セシウムの濃度が支配的なサ ンプル (Cs sample) を元に、希釈することにより約 1,000 Bq/L~10,000 Bq/L の濃度サン プルを作成した。サンプルの濃度条件について Table 4-1 に示す。

試験は、福島第一原子力発電所内の環境管理棟の実験室において、100 L のたらいに汚染 水サンプルを投入し、PSF を巻いて直接接触させ計数率を記録した。試験時の写真を Fig. 4-1 に示す。PSF は、1 mm  $\phi$  の SCSF-3HF を 20 m で 19 本バンドルしたものを使用した。

試験における濃度と計数率の関係を Fig. 4-2 に示す。このように、濃度と計数率はよい 相関関係にあることが分かった。近似した 1 次関数の傾きから計数率から濃度への換算係 数 (Conversion Factor: *CF*) を求めると、Sr: 9.64 (Bq/L)/cps 及び Cs: 3.92 (Bq/L)/cps とな った。

*CF*の測定結果から検出下限値の評価を試みた。ここでは、汚染水タンクからの漏洩検知を想定し、1 m 当たりの検出下限値 (minimum significant activity; *MSA*) を評価する。 検出下限値の評価は、IAEA<sup>13)</sup> のレポートを参考にして、式(1)から行った。

$$MSA = \frac{1.56}{CF} \sqrt{\frac{n_b}{t_s} \left(1 + \frac{t_s}{t_b}\right)} \tag{1}$$

ここで、nb: BG 計数率 (cps), ts: 測定時間, tb: BG 測定時間である。BG の計数率は、環境 管理棟の実験室内で計測した PSF の計数率とサーベイメータで測定した空間線量率を比較 した結果から 0.003 (µSv/h)/cps を算出し設定した。ここでは、福島第一原子力発電所内の 側溝における最大線量率として計測されている 20 µSv/h として計算した。BG の測定時間 (tb) は、10,000 s とし、測定時間 (ts)を変化させて計算した結果を Fig. 4-3 に示す。検出下 限値は、測定時間が長くなれば小さくなるが、10 分間の測定時間で Sr: 51 Bq/L 及び Cs: 21 Bq/L となることが分かった。本結果から、このような汚染水サンプルを用いたキャリブレ ーションが可能であること及び今回試験した PSF は、福島第一原子力発電所内の側溝管理 に使用する上で十分な感度を有することが分かった。

Sr sample		conc.	3.27E+04	1 Bq/L				
積算	総放射能	希釈水	濃度	全量		赵雪安	PSF計数率	PSF計数率
サンプル量(L)	(Bq)	(L)	(Bq/L)	(L)		布朳平	(cps)	NET (cps)
BG	0	48.75	(	)	48.75	0%	360	-
1.25	4.08E+04	48.75	817		50.00	2.5%	385	25
2.5	8.17E+04	48.75	1594		51.25	4.9%	432	72
10	3.27E+05	48.75	5561		58.75	17.0%	827	467
20	6.53E+05	48.75	9504		68.75	29.1%	1276	916
Cs sample		conc.	5.01E+04	1 Bq/L				
積算	総放射能	希釈水	濃度	全量		圣皇资	PSF計数率	PSF計数率
サンプル量(L)	(Bq)	(L)	(Bq/L)	(L)		布利平	(cps)	NET (cps)
BG	0	29.00	(	)	29.00	0%	794	-
0.5	2.50E+04	29.00	554		29.50	1.7%	919	126
1	5.01E+04	29.00	1089		30.00	3.3%	1074	280
5	2.50E+05	29.00	4804		34.00	14.7%	1952	1158
10	5.01E+05	29.00	8377		39.00	25.6%	2933	2140

# Table 4-1 使用した汚染水サンプルと濃度条件及び PSF の計数率

# (使用した PSF: SCSF-3HF, 1 mm φ 20 m, 19 本バンドル)

# JAEA-Research 2016-011



ファイバとたらい



雨水受け入れタンク水



放水路立坑水



汚染水分取



濃度調整



計測

Fig. 4-1 キャリブレーション試験風景









4.2. モニターとしての信頼性

4.2.1. 試作機の製作

モニターとして製作するための基礎データ取得を目的とし、試作したシステムの外観を Fig. 4・4 に示す。ファイバ部には、550 nm 付近に伝達する光の波長のピークを持つマルチ クラッドタイプのクラレ社製 SCSF-3HF の直径 2 mm の PSF を選定した。また、PMT に は浜松ホトニクス社製の R9880U を選定した。PSF は 50 m、10 本をバンドルし、PMT へ の電源の供給線や信号線をβ線が遮蔽されない程度の薄いフレックス管に収納した。計測 系は、ボックスに防滴性のボックスに収納し、任意の時間間隔でデータを保存できるよう にソフトウエアを構築した。また、更なる信頼性のある測定を実現するため、専用のデー タロガーを開発しデータを取得できるようにした。





4.2.2. 既存モニター用サンプリング枡における長期試験

長期試験は、実用機の設計に盛り込むべき知見を得ることを目的とし、①既設の側溝放 射線モニター(以下、既存モニター)用サンプリング舛における試験と②側溝内の2か所 で長期試験を実施した。側溝の場所と既存モニターの設置場所について Fig. 4-5 に示す。

側溝の放射性物質濃度管理には、既設の固定式モニターが設置されている。側溝の水は 枡に汲みあげられ、本舛内の水はさらに側溝モニター室に輸送され、β線とγ線をダイレ クトに測定することで連続監視を行っている。Fig. 4-6 に既存の側溝モニターの概要につい て示す<sup>14)</sup>。同場所において、50 m の PSF を鉄製の網状の芯に巻いて、舛内に固定し10分 間毎の連続測定を行った。既存モニターの設置されている枡内の PSF モニターの設置状況 について Fig. 4-7 に示す。

試作した PSF モニターをサンプリング枡に設置した試験は、2014 年 8 月 24 日から実施 した。現地には、1~2 カ月毎に確認し、データの取得状況を確認した。2015 年 3 月 18 日 までの連続測定結果を Fig. 4·8 に示す。データは、水中にある部分 PSF の計数率と地上に 出た部分の PSF の計数率をそれぞれ 1 m ごとで集計し平均値として示した。データは、当 初連続で測定ができていたものの、途中でシステムが停止する現象が確認された。システ ムの停止の原因については、ソフトウエアのバグ、基盤の配置による熱暴走が確認された。 システムの異常については、2015 年 4 月に回収を行った。水中での計数率は、地上と比較 して 1/5 程度であった。地上のデータ計測の時間による規則的な変動を示したのに対し、水 中のデータは不規則な変動を示した。地上における規則的なデータの変動幅は、±10%程度 であり、機器の温度依存性が−10℃から 40℃までで、最大 10%程度であることを考慮する と温度特性が原因となっている可能性が高い。一方、水中での変動は、温度特性では説明 がつかない。この原因を考察するために、既存モニターの指示値と比較を行った。

データの変動が特徴的であった、2014 年 10 月 31 日から 2014 年 12 月 10 日までのデー タ抽出し、既存モニターの  $\gamma$  線データとの比較を Fig. 4-9 に、既存モニターの  $\beta$  線データ との比較を Fig. 4-10 に示す。図には、(a)に PSF モニターの計数率 (データ取得前の 3 時 間分のデータの平均値を BG)として減算、(b)に PSF モニターと既存モニターの計数率、(c) に既存モニター(データ取得前の 3 時間分のデータの平均値を BG として減算)を示す。なお、 図中において既存モニターを TEPCO gamma もしくは TEPCO beta と表記する。このよ うに、PSF モニターと既存モニターのデータの変動傾向は、概ね同様な傾向を示した。  $\gamma$ 線と  $\beta$  線を比較しても同様な傾向である。このことから、水中での PSF のデータの変動は、 何らかの水中の放射線を計数したことが原因であると考えられる。

既存モニターは、線源試験等により一つの換算係数により水中の放射性物質濃度に換算 されている。そこで、既存のモニターとの比較することにより、濃度換算係数(Conversion Factor: *CF*)の算出を試みた。また、試算した濃度換算係数を基に、検出下限値(minimum significant activity; *MSA*)の評価を試みた。まず、CFの算出を目的として、Fig. 4-9 及び Fig. 4-10 に示した同時間における PSF モニターと既存モニターの計数率を比較した。既存 の $\gamma$ 線モニターとの比較を Fig. 4-11 に、 $\beta$ 線モニターについて Fig. 4-12 に示す。それぞれの図には、左に計数率を単純に比較した散布図、右に Fig. 4-9 及び Fig. 4-10 で示したデータ取得前の 3 時間分のデータの平均値を BG として減算したデータを比較した散布図を示す。既設のモニターは、検出器が枡の下方に設置されているため、枡に蓄積する汚泥の影響を受けて、計数率が徐々に上昇する傾向にある。また、その汚泥を人為的に除去しているため、一定の期間ごとに BG が急激に変動する。よって、単純に比較すると、相関が悪いように見える。一方、上述した手法により、BG を減算すると Fig. 4-11 及び Fig. 4-12 の右に示すように、相関性が向上する。

Fig. 4-11 及び Fig. 4-12 の右図の散布図に対し、1 次関数で近似し、傾きを CF とすると、 PSF の水中の放射性物質濃度に対する *CF*は、PSF の計数率を  $\gamma$ 線放出核種と仮定した場 合は 162 Bq/L/cps、  $\beta$ 線放出核種と仮定した場合は 17 Bq/L/cps となる。*CF*の妥当性を確 認するために、東京電力が実施しているサンプリングした枡内の水を実験室において全  $\beta$ 線と全  $\gamma$ 線を測定した結果との比較を行った。サンプリングは、1 時間に 1 回を目途に行わ れているため、PSF モニターの計数率と単純な比較は難しいが、サンプリング時間に近い PSF の計数率を抽出し、比較した散布図を Fig. 4-13 に示す。濃度の範囲が狭いが、  $\gamma$ 線つ いては相関性が確認出来る。  $\beta$ 線については、ばらつきの大きい結果となったが一定の相 関性がみられた。近似曲線の傾きを換算係数と仮定すと  $\gamma$ 線放出核種が 36 Bq/L/cps、  $\beta$ 線 放出核種が 15 Bq/L/cps となる。上記の既存のモニターとの比較から求めた CF と比べると、  $\beta$ 線は放出核種についてはよく一致したものの、  $\gamma$ 線放出核種については 20 %程度の差が みられた。この結果は、サンプリングの結果は時間軸的に点であり、必ずしも PSF の測定 結果と同じサンプルが測定されているとは言えないこと、サンプルでの有意値検出のデー タが少なく、濃度の範囲も狭いことと考え合わせると、概ね同程度にあると考えてよい。

*CF*の測定結果から検出下限値の評価を試みた。検出下限値の評価は、前章で述べた方法 と同様に式(1)から行った。 $n_b$ はデータ取得前の3時間分のデータの平均値を採用した。評 価結果を Fig. 4-14 に示す。PSF の計数率を $\gamma$ 線放出核種と仮定すると26.7 Bq/L、 $\beta$ 線放 出核種と仮定すると2.9 Bq/L となる。これらの評価結果は、暫定的なもので、実際の値付 けには液体線源等を用いたキャリブレーションを実施することが望ましい。



Fig. 4-5 側溝の場所と既存のモニターの設置場所



# Fig. 4-6 既存モニターの概要<sup>14)</sup>

http://www.tepco.co.jp/news/2014/images/140717e.pdfから作図











Fig. 4-9 既存の γ線モニターと PSF モニターの計数率の比較

(a) PSF モニター (データ取得前の3時間分のデータの平均値をBGとして減算)

(b) PSF モニターの計数率と既存モニターの濃度換算値

(c) 既存モニター(データ取得前の3時間分のデータの平均値をBGとして減算)



# Fig. 4-10 既存のβ線モニターと PSF モニターの計数率の比較

- (a) PSF モニター (データ取得前の3時間分のデータの平均値をBGとして減算)
- (b) PSF モニターの計数率と既存モニターの濃度換算値
- (c) 既存モニター(データ取得前の3時間分のデータの平均値をBGとして減算)

















**Fig. 4-14 検出下限値と測定時間及びバックグラウンド線量率の関係** (左:測定時間と検出下限値の関係、バックグラウンド線量率 20 µ Sv/h と固定 右: バックグラウンド線量率と検出下限値の関係、測定時間 600 s に固定) 4.2.3. 側溝内における長期試験

発電所構内には、サンプリング枡のようなモニタリングする上で条件の良い場所は限られて いる。側溝内を流れる排水を直接モニタリングできることは、設置個所を選ばず多地点の設置 が可能となり、万が一の漏洩時の原因調査の観点からも有効であると考えられる。そこで、側 溝への適用のための長期試験を行った結果について示す。前章で述べたサンプリング枡との違 いは、常時に流れがあること及び排水の量(深さ)が変化することにある。長期試験を行った。 側溝への設置状況について Fig. 4-15 に示す。PSF はサンプリング枡で使用したものと同じも のを使用した。側溝は、水深が浅かったため、50 m の PSF を約 15 cm の高さに巻いて水中に 沈め、10 分間毎の連続測定を行った。

側溝においては、2015 年 6 月 12 日から 2015 年 11 月 6 日までの約 5 か月間データを取得 した。Fig. 4-16 に取得したデータを示す。PSF モニターは、前章で示したシステム上の不具 合を改善したため、データの欠測は見られず、有効にデータと取得できることが分かった。本 試験のように、枡ではなく流れのある側溝に直接 PSF を沈めてもデータを取得でき、側溝内の 排水を直接モニタリングすることも可能であると考える。

試験を行った側溝内には、比較のために他の検出器を設置することは難しい状況であるが、 前章で述べたサンプリング枡は、試験を行った側溝に近い場所から取水している。そこで、計 数値の変動について既存モニターとの比較を行った。Fig. 4-17 に PSF モニターの計数値、既 存モニターの濃度換算結果及び1日1回実施されるサンプリング枡内のサンプルを実験室で測 定して濃度を評価した結果及び降水量について示す。図のように、PSF モニターと既存モニタ ーの計数値の変動はあまり整合していないように見える。原因としては、PSF モニター設置場 所のバックグラウンドが高いこと考えられる。PSF モニターの計数値を見ると、Fig. 4-8 で示 したサンプリング枡での計測値より数 10 倍高くなっている。また、Fig. 4-16 に示したように 地上部分の PSF の結果と水中部分の計数率が同じ傾向を示し、水中の計数率は地上の半分程度 にしか下がっていないことを考え合わせると、実際の設置場所の線量率が高いこと(約 15 µ Sv/h) 及び水深が浅いので周辺のバックグラウンドヶ線の遮蔽効果が小さいことが示唆される。 いずれにしろ試験期間中における既存の側溝モニターで測定された放射性物質濃度は Fig. 4-14 に示した検出下限値を超える事象が少なったことから現時点における原因の考察は難し いと考える。今後、同様な試験を他の条件(バックグラウンド線量率、水深等)で継続し、デ ータの蓄積が必要と考える。











Fig. 4-17 PSF モニターの計数率と既存モニターの濃度測定値のトレンドの比較
 (a) PSF、(b) 既存 β 線用モニター、(c) 既存 γ 線用モニター、
 (d) サンプリング枡におけるサンプル測定結果、(e) 降水量

4.2.4. β γ 弁別型 PSF の開発

1F 側溝の汚染水漏洩検知を行う上で、よりきめの細やかな管理を行うために、 $\beta$ 線と $\gamma$ 線を 弁別して測定することが望まれている。ここでは、 $\beta$ 線を遮蔽するコンジット管を利用し、 $\beta$  $\gamma$ を弁別して測定する手法について検討した。

通常用いられている典型的な PSF (SCSF-3HF, 2mm Φ, 10本)のコンジット管の半分は $\beta$ 線を遮蔽する金属製に、残りの半分は $\beta$ 線を遮蔽しにくい樹脂製のコンジット管とした検出器を製作した。製作した $\beta \gamma$ 弁別型 PSF について Fig. 4-18 に示す。両コンジット管は PSF を曲 げられる程度の柔らかさを有しているものを選定した。製作した $\beta \gamma$ 弁別型 PSF に Sr-90 の $\beta$ 線点線源 (1.5×10<sup>4</sup> Bq)を照射した試験を実施した。Fig. 4-19 に金属製コンジット管部と樹 脂製コンジット管部に密着させた位置スペクトルの結果を示す。このように、金属製コンジット管部における計数率に比べて 0.16 倍となり、 $\beta$ 線に 対し金属製コンジットは十分な遮蔽効果を有していることが分かる。また、金属製コンジット 管部で計数されている値は、 $\beta$ 線源と PSF の間に 1 cm のアクリル板を配置した場合も計数さ れたことから、線源の金属板と $\beta$ 線の相互作用による制動放射線の影響であると考えられる。

また、γ線に対する遮蔽状況を確認するために、γ線点線源(3.4×10<sup>6</sup> Bq)を PSF の位置 毎に密着させ測定したピーク計数率の比較を Fig. 4·20 に示す。遮蔽の厚い真ん中の接合部は 若干相対的に計数率が低くなっているが、樹脂製コンジット管部と金属製コンジット管部に有 意な差は見られなかった。このことから、γ線に対するレスポンスの違いはないと考えてよい。

さらに、放射性セシウムのように $\gamma$ 線と $\beta$ 線が混在した場合のスペクトルを模擬するため、 福島県内で採取した放射性セシウムを含む土壌を油性塗料に混ぜ、木板上に塗った簡易的な面 線源を用いて試験を行った。試験は、樹脂製コンジット管部と金属製コンジット管部に線源を を密着させ、スペクトルデータを取得した。また、 $\beta$ 線が測定できていることを確認するため、 PSF と線源間に 1 cm のアクリル板を配置しデータを取得した。試験結果について Fig. 4-21 に示す。アクリル板を配置することにより、樹脂コンジット管側の計数率は 15 %減少するのに 対し、金属コンジット管側の計数率は 5 %の減少にとどまった。これは、アクリルがない状態 では線源から出る放射性セシウムの $\beta$ 線を樹脂コンジット管側で計数できていたが、アクリル により遮蔽され計数が下がっていると考えられる。このことから、放射性セシウムから放出さ れる $\beta$ 線についても計数可能であることが確認できた。





**Fig. 4-19** β γ 線弁別測定型 PSF に β 線点線源を照射した場合の位置スペクトル (使用線源: Sr-90, 1.5×10 4 Bq)



Fig. 4-20 β γ線弁別測定型 PSF にγ線点線源 (Cs-137, 3.4×10<sup>6</sup> Bq) を 照射した場合のピーク計数率



Fig. 4-21 β γ線弁別測定型 PSF の板状線源を使用した試験結果

### 5. 汚染水タンクの漏洩検知

5.1. 長尺 PSF の開発

汚染水測定用のシステムとして、前述の環境用の PSF システムをベースとして、以下の 2 点について性能を満足するようなシステムを製作した。

- 長さ:50 m
- 点線源に対するレスポンス:1mの計数で比較して環境で使用している20mのPSFの と同オーダー

PSFの線源に対する感度は、PSF内の光の減衰とPSFとPSFの光の波長に最適なPMTを 予備的な試験を経て選定した。PSFには550nm付近に伝達する光の波長のピークを持つにマ ルチクラッドタイプの直径2mmであるKuraray社製 SCSF-3HFを選定した。また、PMT には浜松ホトニクス社製のR9880Uを選定した。PSFは10本をバンドルし、専用のチューブ に収納した。以下、この組み合わせを汚染水用PSFと表記する。

製作したシステムについて、<sup>137</sup>Csの点線源(2.725 MBq)を用いて性能確認を行った。まず、 50 mのファイバに 50 m おきに点線源を接触させ、位置と MCA のチャンネル数の関係を確認 した。Fig. 5-1 に線源の照射位置と得られた位置スペクトルについて示す。このように、5 m おきにチャンネル数が均等にピークが観測され、PSFの位置とチャンネル数の直線性は良好で あった。

また、同線源を用いて、PSFの長さとレスポンスの関係を評価した。結果を Fig. 5-2 に示す。 ここで、比較用に環境中で使用している PSF (Kuraray 社製 SCSF-81, 1 mm, 19 本バンドル) と比較する。以下、本 PSFを環境用 PSF と表記する。汚染水用 PSF は、10m、20 m 及び 50 m を作成し点線源を接触させ、1 m 当たりの計数率を測定した。ここで、1 m 当たりの計数率 を線源の放射能で除した値をレスポンスと定義する。図に示すように、ファイバの長さとレス ポンスの関係は負の相関関係にあり、50 m の PSF は同形式のファイバと比較して 5 %の数値 となった。一方、環境用 PSF と比較すると、20 m のレスポンスと比較すると 20 % となり、 測定に耐えうるレベルとなった。

ファイバは、PMT への電源の供給や信号線をβ線を遮蔽しない程度の薄いフレックス管に 収納した。計測系は、ボックスに防滴性のボックスに収納し、任意の時間間隔でデータを保存 できるようにソフトウエアを構築した。開発したファイバの外観を Fig. 5-3 に示す。







Fig. 5-2 PSF の長さと点線源に対するレスポンスの関係





5.2. 既知の汚染サンプルを用いたキャリブレーション測定

汚染水タンクにおける漏洩監視に PSF を適用するために、実際に発電所敷地内において試験を実施した。試験概要と目的について以下に示す。また、Fig. 5-4 に敷地内の試験場所について示す。また、詳細については次章以降に示す。

・既知の汚染水による校正

[場所] 5・6 号機ホットラボ室

[試験内容] 別の標準的な放射能測定手法により測定した既知の汚染水サンプルに PSF を浸 漬させ計数率と濃度の関係を求める。

[目的] 汚染水に対する PSF のレスポンス評価

既知の汚染水には、東京電力ホールディングスにより、液体シンチレーション検出器により 全  $\beta$ 線の放射性物質濃度を定量した既知の汚染水サンプルを用いた。汚染水サンプルの濃度は、  $4.5 \times 10^3$  Bq/mL であった。汚染水サンプルは、3 種類の濃度(約 900 Bq/mL,約 560 Bq/mL,約 230 Bq/mL)に希釈した。使用したサンプルの条件について Table 5-1 に示す。希釈した汚染 水サンプル1 L を、1 m ×1 m×1 mの水槽にいれ、その中に PSF を浸した。PSF の中心付 近の 40 cm 部分が汚染水中に沈むようにし 100 秒間の測定を行った。Fig. 5-5 に作業風景を示 す。試験に使用した PSF は、前述した SCSF-3HF の直径 2 mm のタイプを 10 本バンドルし た検出器と比較用に SCSF-3HF の直径 1 mm のタイプを 10 本バンドルしたものの 2 種類用 意した。以下、これらをそれぞれ No.1、No.2 と表記する。

No.1 検出器を濃度の異なる汚染水に接触させた PSF の位置スペクトルについて、Fig. 5-6 に示す。このように、濃度が大きいとピークの面積が大きくなることが分かる。このピーク面 積を積算し、測定時間で除すことで計数率を算出し、濃度との関係を Fig. 5-7 にプロットした。 濃度と PSF の計数率は、正の相関関係にある。同様に、No.2 についても同様な試験を行った 結果、No.1 の結果と同様に正の相関関係にあった。このプロットに近似した 1 次関数の傾きが PSF のレスポンス (Conversion Factor for contaminated water: CFw) と定義すると、No.1 は 0.37 cps/(Bq/mL)、No.2 は 0.19 cps/(Bq/mL)となり、汚染水に対し No.2 は No.1 の約半分 となった。Fig. 5-8 に、汚染水サンプル 230 Bq/mL を使用して No.1 と No.2 で測定した例を 示す。このように、ピークの面積は、No.2 は No.1 の約半分となっている。

Sr sample	C	onc.	4.50.E+03 Bq	/L		No.1 (2 mm_10bundle)	No.2 (1mm_10bundle)
積算	総放射能	希釈水	濃度	全量	希釈率	PSF計数率	PSF計数率
サンプル量(L)	(Bq)	(L)	(Bq/L)	(L)		NET (cps)	NET (cps)
0.15	6.75.E+02	0.60	900	0.75	20.0%	749	275
0.15	6.75.E+02	0.45	563	1.2	12.5%	610	211
0.15	6.75.E+02	1.80	225	3	5.0%	487	136

Table 5-1 汚染水サンプル調整条件

# Table 5-2 長尺 PSF のレスポンスと検出下限値(Bq/mL)

No		1	2
バンドル数		10	10
ファイバ径		2	1
1 mあたりの感度 (cps/[Bq/mL])	CFw	0.37	0.19
50 mあたりの感度 (cps/[Bq/mL]	CFw_50m	18	9.3
1 mあたりの感度 (cps/[µSv/h])	CFd	13	2.6
50 mあたりの感度 (cps/[µSv/h]	CFd_50m	650	130
1 mあたりの検出下限値 (Bq/mL) *		0.94	0.84
50 mあたりの検出下限値 (Bq/mL)*		0.13	0.12

\* 周辺線量率: 10 µSv/h; 測定時間 3600 s



Fig. 5-4 発電所敷地内における PSF 試験場所



Fig. 5-5 既知の汚染水による試験風景(上:汚染水とPSFの接触、下:容器とシステム)



Fig. 5-6 No.1 検出器における汚染水サンプルによる位置スペクトル



Fig. 5-7 PSF の計数率と濃度の関係



Fig. 5-8 No.1 及び No.2 検出器における汚染水サンプルによる位置スペクトル (汚染水サンプル 230 Bq/mL を使用)

5.3. 検出下限値の評価

上記の CFwの測定結果から検出下限値の評価を試みた。ここでは、汚染水タンクからの漏洩 検知を想定し、1 m 当たりの検出下限値を評価する。検出下限値(minimum significant activity; MSA)の評価は式(1)から行った。

ここで、 $n_b$ : BG 計数率 (cps),  $t_s$ : 測定時間,  $t_b$ : BG 測定時間である。なお、 $n_b$  は第7章で説 明する実際の発電所敷地内で取得した $\gamma$ 線線量率と PSF の関係から $\gamma$ 線の線量率換算係数 (Conversion Factor for dose rate: CFd) を評価した。実際の数値は、Table 5-2 に示したよう に No.1 は 13 cps/( $\mu$  Sv/h)、No.2 は 2.6 cps/( $\mu$  Sv/h)となった。

算出結果の例として BG の線量率と検出下限値の関係及び測定時間と検出下限値の関係について Fig. 5-9 に示す。式(1)のとおり、測定時間と BG の計数率は検出下限値算出の上で支配的なパラメータとなり、測定時間が長いかバックグランドの計数率が低いほど検出下限値は低くなる。No.1 と No.2 を比較すると No.2 の方が評価された検出下限値が低かった。この結果は、換算係数の違いが関係していると考えられる。Table 5-2 に換算係数と実際の適用条件に近い条件(周辺線量率: 10  $\mu$  Sv/h; 測定時間 3600 s)における検出下限値の算出例を示す。No.1 と No.2 の *CF*<sub>w</sub>を比較すると No.2 の方が 50%であるのに対し、*CF*<sub>d</sub>は No.2 の方が 20%となっていることが分かる。すなわち、No.2 は No.1 と比較して、  $\beta$ 線の感度は 50 %で  $\gamma$ 線の感度は 20 %程度となる結果、BG の計数が比較的小さくなるため、結果として検出下限値が低くなることを示している。検出下限値を低くするには、  $\beta$ 線の感度を高めるだけでなく、  $\gamma$ 線の感度を落とすことが効果的であることを示している。



Fig. 5-9 検出下限値とバックグランド線量率及び測定時間の関係 (PSF1mあたりの検出下限値)

#### 6. 汚染水タンク周辺の堰内における滞留水の放射性物質濃度評価

6.1. モニターとしての信頼性

・汚染水タンクにおける BG 測定と検出下限値の算出

[場所] A-A5 処理水貯槽、G6-A6 処理水貯槽

[試験内容] 典型的な汚染水タンクの周辺における BG γ 線と計数率の関係

[目的] BG 計数率を評価し検出下限値を評価

・汚染水タンクにおける連続データ取得

[場所] H5 処理水貯槽

[試験内容] 連続的な測定試験

[目的] 連続測定における課題抽出

汚染水測定用システムの検出下限値を算出するため、実際の汚染水タンクに配置し、BG の 測定を行った。測定場所、風景及びサーベイメータで測定した線量率について、Fig. 6-1 に示 す。PSF を設置したタンクは、H5 と言われるエリアに設置されており、バックグラウンドの 線量率は、29~105 µ Sv/h であった。堰内には雨水がたまる仕組みになっており、一定量を 超えると汲みあげられタンクに保管される。PSF はタンクの最下部に設置し、10 分ごとにス ペクトルデータを自動保存した。システムへの給電は、現場に設置されている工事用の電源を 用い、瞬停(5 分以内)の際にもデータ欠損しないように無停電電源を経由した。試験は 2 期 にわたって実施した。

第1期:2014年6月24日14:20~2014年6月25日9:30 (19時間:116データ)

第2期:2014年7月31日12:00~2014年8月1日14:00(26時間:159データ)

Fig. 6-2 に、BG 測定時における PSF の位置スペクトルを示す。

試験場所は、Fig. 6-1 に示したとおり、場所により線量率に差があった。PSF の設置場所に おいて $\gamma$ 線のサーベイメータ(日立製作所社製 PDR-303)で測定した結果と PSF の計数率 の関係を Fig. 6-3 に示す。PSF の計数率は、3 m に該当するチャンネルの計数率を平均化して 比較した。図に示すように、PSF の計数率は線量率の測定結果をよくトレースしている。この 結果から、各場所における線量率の測定結果と PSF の1 m 計数率の比を取り、線量率換算係 数 (Conversion Factor for dose rate: CFd)と 定義すると No.1 は 13 cps/( $\mu$  Sv/h)、No.2 は 2.6 cps/( $\mu$  Sv/h)となる。

連続した測定の結果を Fig. 6-4 及び 6-5 に示す。このように、計数率の変動幅は±5 %程度 であり、安定したデータであった。また、場所ごとに分割しても、傾向に目立った変化はなく 設置期間当時に線量率の変動要因はなかったものと考えられる。このように、本システムで、 連続的な汚染水タンクの監視が可能であることを示している。なお、両期間とも電源の停止と 考えられる事象により、予定より早くシステムが停止していた。データとしては、24 時間近く 稼働しており、今回の試験の目的は達成していると考える。実際の現場でモニタリングを実施 する際には、停電しない電源を準備するか、停電後自動的に復帰するプログラムの追加が望ま しい。











Fig. 6-3 BG 線量率と計数率の関係

(PSF は比較のため 3m ごとに平均し図示)



Fig. 6-4 連測測定試験における計数率の変動(第1期)



Fig. 6-5 連測測定試験における計数率の変動(第2期)

6.2. バックグラウンドの計測から検出下限値の評価

汚染水タンクが設置されている堰内の雨水の放射性物質濃度測定を想定し、50 m あたりの 検出下限値の評価を試みた。50 m あたりの検出下限値を評価するには、50 m あたりの PSF のレスポンス ( $CF_{W_50m}$ ) が必要であるが、汚染水サンプルでの 50 m の PSF 全体の試験は不 可能であったため、CF<sub>d</sub>を 50 倍し、PSF の感度で補正した。また、 $CF_{W_50m}$ についても同様に 求めた。算出結果を、Table 5-2 に示す。この  $CF_{W_50m}$ と  $CF_{W_50m}$ から検出下限値を算出した 例を Fig. 6-6 に示す。バックグラウンド線量率が大きくなる及び測定時間が短くなるほど検出 下限値は大きくなる。なお、現場での適用条件に近い条件 (周辺線量率: 10  $\mu$  Sv/h; 測定時間 3600 s) では、No.1 及び No.2 でそれぞれ、0.13 Bq/mL 及び 0.12 Bq/mL となった。現在、堰 内の濃度基準は、0.01 Bq/mL で管理されており、検出下限値を低くするには更なる工夫が必 要である。



Fig. 6-6 検出下限値とバックグランド線量率及び測定時間の関係 (PSF 50 m あたりの検出下限値)

### 7. まとめ

本研究において、得られた成果を以下にまとめる。

①側溝における PSF モニター

・既知の汚染水サンプルを用いたキャリブレーション

福島第一原子力発電所構内で貯留されている既知の汚染水サンプルと PSF を接触させ、<sup>90</sup>Sr 及び放射性セシウムの濃度に対する PSF のレスポンスを算出した。評価したレスポンスから、 測定条件やバックグラウンド線量率を設定した検出下限値は、Sr: 51 Bq/L 及び Cs: 21 Bq/L と なった。

・モニターとしての信頼性(長期観測試験)

製作したシステムを長期的に実際のサンプリング舛に設置し、機器としての耐久性を確認した。サンプリング枡に設置されていた校正済みの既存モニターと比較すると、計数値は同様な 傾向を示した。

・実際の側溝に流れる排水の分析結果との比較測定(レスポンスの妥当性)

上記の長期観測試験で取得したデータを周辺の別のモニタリング機器やサンプルを実験室で 測定したデータと比較し、キャリブレーション測定で設定したレスポンスの妥当性を確認する。 試験場所近くから取水している既存のモニターと PSF の計数値を比較したが、相関は見られな かった。今後、同様な試験を他の条件(バックグラウンド線量率、水深等)で継続し、データ の蓄積が必要と考える。

②汚染水タンクの漏洩検知

・ 長尺 PSF の 開発

タンクは胴回りが約 40 m であるため、40 m 以上の PSF を開発した。また、 $\beta$ 線を測定 できるように、ファイバのカバーを最適化した。

・既知の汚染サンプルを用いたキャリブレーション測定

タンクからの汚染水漏洩を模擬するため、福島第一原子力発電所構内で貯留されている既知 の汚染水サンプルと PSF を接触させ <sup>90</sup>Sr に対するレスポンスを求めた。レスポンスは、No.1 は 0.37 cps/(Bg/mL)、No.2 は 0.19 cps/(Bg/mL)であった。

③汚染水タンク周辺の堰内における滞留水の放射性物質濃度評価

・モニターとしての信頼性(連続試験)

製作したシステムを長期的に実際の汚染水タンクに設置してデータを取得した。データは良 好に取得できたが、不安定な電源によりデータが取得できなかったことから電源再投入時の再 起動機能等、反映すべき課題を抽出した。

・BGの計測から検出下限値の評価

上記の連続試験時における BG データを基に、検出下限値の評価を行った。現場での適用条件に近い条件(周辺線量率: 10 μ Sv/h; 測定時間 3600 s)では、No.1 及び No.2 でそれぞれ、 0.13 Bq/mL 及び 0.12 Bq/mL となった。

## 8. 課題とシステム設計

前述のように、現状の設計における PSF モニターは、長期的な測定においてデータが取得で きない場合があることが分かった。原因と対策について、以下に示す。

○共通

- 1) FPGA 回路プログラム実装方法の変更
  - [原因] FPGA 内部回路実装方法の変更を実施
  - [対策] 直接的な原因ではないが動作が安定するため現地で設定を変更
- 2) ノイズの混入

[原因] 通信ケーブル、AC電源ケーブル双方からのノイズ混入に対して耐性が弱い。

- [対策] ノイズ混入防止用フェライトコア通信ケーブルを現地で実装
- ○PC ベースのシステム
- 1) PC 制御ソフトバグ(PSF+PC 運用時)
  - [原因] 時間制御プログラムのバグ
  - [対策] 実機製作時に対応
- ○データロガーシステム
- 1) 電気設計ミス
  - [原因] データロガー電源制御部配線に設計ミスがあり電源リセットが効かない。
  - [対策] データロガーの配線を現地で変更
- 以上を踏まえて、推奨する実用機の仕様を以下に示す。

○機器の構成と基本機能

- ・機器の構成イメージを Fig. 8-1 に示す。
- ・測定モード:全計数率測定 / 位置検出モード
- ・計数処理モード:レートメータ処理/カウンタ処理選択
- ・自己診断機能:電源(HV、LV)監視、計数"0"チェック、自動再起動
- ○検出部
- ・基本設計は、試作機と同等。
- ・設置場所に応じて PSF の長さを変更(5m~20m)
- ・Kuraray 製 SCSF-81J (2mmΦ) 10 本バンドル
- ・片側の配線は折り返し、PSF と一緒にバンドルする。
- ・測定上限:1mSv/h(均一線量場環境)
- ・位置分解能:2m(半値幅相当)

・万が一検出器が汚染した場合を想定し、ファイバ表面には除染が容易となるコーティング もしくはチューブで覆うこと。

・光電子増倍管(PMT)、MPPC(Multi-Pixel Photon Counter)等の光センサであること。 また、ファイバの波長を考慮し最適なものを選定すること。

・高速、低ノイズ型であり、互いの波長特性が合致すること。

・小型、少電力であること。

・光検出素子/プリアンプ用の信号線及び電源線は、複合ケーブルであること。

・水密構造とすること。

○データ測定部

・計測は、電源スイッチ1つにより自動的に開始すること。

・測定データは、PSFの全計数率とする(スペクトルはオプション)。

・測定時間は10分毎とし、データは内部メモリに時間とともに保存する。

・光検出素子/プリアンプの信号出力同軸ケーブル及び電源ケーブルは、複合ケーブルを適用 すること。

・複合ケーブルの耐環境性能は、耐環境性能(IP68)を満足すること。

・データ処理装置は、(1)検出部に示した測定性能が達成できる TOF 回路及びエミュレータ を有すること。なお、TOF 回路とエミュレータ (PC)の接続は、USB とすること。

・データ処理装置は、小型・軽量・少電力設計とすること。

・TOF 回路は、点検・校正時を除き、調整フリーとすること。(基本的に調整要つまみをケース外部に持たない。)

・エミュレータは、操作が簡単であること。

・測定結果は、CSV ファイルで出力可能であること。

・制御用のソフトウエアでは、10分×100回の連続測定が可能であること。

・7インチタッチパネル付 LCD 表示器使用

・各種設定値をタッチパネルにて設定

・スペクトル表示

・トータルカウントトレンドグラフ表示(表示期間制限あり)

・PSF 機器異常を LCD に表示及び通信機能にて機器異常発報

・HV 異常: PSF 電源 OFF 機器異常発報

LV 異常:同上

・計数 "0": PSF 電源 OFF 一定時間後電源自動投入測定開始するも再度計数 "0"の場合に 発報

・1回の測定データをWi-FiもしくはLANで送信できること。

○電源

・バックアップ電池内蔵:バックアップ時間4時間

・DC12V(ACアダプターにて駆動)



Fig. 8-1 機器の構成イメージ

## 謝辞

本機器の有用性を理解し、社内の調整に尽力いただいた東京電力・石沢昇氏、白木洋也氏、 現地での試験を調整いただいた東京電力・馬上悟氏、安井勝弘氏、清岡英男氏、仲元樹氏、中 葉仁氏に深く感謝いたします。また、機器の発電所敷地内への搬入・設置に協力いただいた日 本原子力研究開発機構福島研究開発部門の皆様に感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 鳥居建男,眞田幸尚,面で捉える汚染分布の測定技術-ファイバー検出器による放射 性セシウムの測定-,Isotope News, 714, pp. 25-29, 2013.
- 2) Takasaki, F., Saito, H., Shimizu, T. Kondo, S. and Shinji, O., Development of plastic scintillation fiber, Nucl. Inst. Meth. **A262**, pp. 224-228, 1987.
- Soramoto, S., Notani, M., Fukano, Y., Imai, S., Iguchi, T., and Nakazawa, M., A study of distributed radiation sensing method using plastic scintillation fiber, KEK Proceedings, 93-8, pp. 171-173, 1993.
- 4) 江本武彦,鳥居建男,野崎達夫,安藤秀樹,シンチレーション光ファイバによる放射線 空間分布測定,放射線,21,pp. 49-58, 1995.
- 5) 納富昭弘, 杉浦紳之, 伊藤哲夫, 鳥居建男, 15m 長シンチレーションファイバーを用い た線量分布のオンライン評価, 近畿大学原子力研究所年報, **46**, pp. 1-8, 2009.
- 6) 高田千恵, 斉藤圭, 橋本周, 位置検出型ファイバーエリアモニタの開発, 保健物理, 38, pp. 243-247, 2003.
- 7) 東京電力ホールディングスホームページ,汚染水対策の主な取り組み (2016 年 2 月参照).

http://www.tepco.co.jp/decommision/planaction/waterprocessing/index-j.html

- 8) Gamo, H., Kondo, M., Hashimoto, T., Tayama, R., Tsukiyama, T., Development of a PSF-detector for contaminated areas, Prog. Nucl. Sci. Tech., **4**. pp. 695-698, 2014.
- 9) 眞田幸尚,鳥居建男,水底の放射性物質濃度分布測定技術-福島県内の農業用ため池 への適用-,日本原子力学会誌, **57**, pp. 94-98, 2015.
- 10) 眞田幸尚,高村善英,卜部嘉,土田清文,西澤幸康,山田勉,佐藤義治,平山弘克,西原 克哉,伊村光生,石田睦司,石橋聖,佐瀬隆聡,鈴木元和,森英治,米澤重晃,鳥居建男, 水底の in-situ 放射線分布測定手法の開発,JAEA-Research 2014-005, 2014, 67 p.
- Sanada, Y., Urabe, Y., Orita, T., Takamura, Y., Torii, T., In-situ measurement of radiation distribution in bottom sediments of irrigation ponds using plastic scintillation fiber, Proceedings of ICONE-23, 23th International Conference on Nuclear Engineering, Chiba, Japan, May 17-21, 2015, (CD-ROM), ICONE23-2120, 5 p, 2015.
- 12) 浜松ホトニクスホームページ, 製品カタログ (2016年2月参照)

http://hadron.kek.jp/~yuasa/SpotScan/Catalog/HPK/PMT/PMT\_constructionj.pdf

- 13) IAEA, Assessment of occupational exposure due to intakes of radionuclides, IAEA safety standards series, No. RS-G-1.2, 1999.
- 14) 東京電力 HP, 側溝放射線モニタについて, (2016 年 2 月参照) http://www.tepco.co.jp/news/2014/images/140717e.pdf

\_

表 1. SI 基本単位						
II 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 <sup>2</sup>				
体 積 立方メートル	m <sup>3</sup>				
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 <sup>-1</sup>				
密度,質量密度キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>				
面 積 密 度 キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>				
比体積 立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg				
電 流 密 度 アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>				
磁 界 の 強 さ アンペア毎メートル	A/m				
量 濃 度 <sup>(a)</sup> , 濃 度 モル毎立方メートル	mol/m <sup>8</sup>				
質量濃度 キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>				
輝 度 カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>				
屈 折 率 <sup>(b)</sup> (数字の) 1	1				
比 透 磁 率 <sup>(b)</sup> (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

	SI 旭立甲位					
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 <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m		
立体鱼	ステラジアン <sup>(b)</sup>	$sr^{(c)}$	1 (b)	$m^2/m^2$		
周 波 数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz	-	s <sup>-1</sup>		
力	ニュートン	Ν		m kg s <sup>-2</sup>		
E 力 , 応 力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	$m^{-1} kg s^{-2}$		
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 <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>		
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 <sup>2</sup>	$kg s^{2} A^{1}$		
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 <sup>(e)</sup>	°C		K		
光東	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>	cd		
照度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> cd		
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		s <sup>-1</sup>		
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 <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	$m^2 s^{-2}$		
酸素活性	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol		

酸素活性(1) ダール kat [s<sup>1</sup> 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ども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 <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>		
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>		
表 面 張 九	リニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>		
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>		
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 <sup>-3</sup>		
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 <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>		
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>		
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>		
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s A		
表面電荷	「クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A		
電東密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> s A		
誘 電 辛	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 <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>		
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 <sup>-1</sup> 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 <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>		
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	$m^{-3} s^{-1} mol$		

表 5. SI 接頭語						
乗数	名称	名称 記号 乗数		名称	記号	
$10^{24}$	<b>э</b> 9	Y	10 <sup>-1</sup>	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 <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>	
リットル	L, 1	1 L=1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>	
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 <sup>-19</sup> J		
ダル	- F	$\sim$	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> 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 <sup>11</sup> 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 <sup>5</sup> 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 <sup>-10</sup> 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 <sup>-7</sup> J		
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N		
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =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 <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> lx		
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>		
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 <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T		
エルステッド <sup>(a)</sup>	Oe	1 Oe ≙ (10 <sup>3</sup> /4 π)A m <sup>-1</sup>		
(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 <sup>10</sup> 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 <sup>-2</sup> Gy
$\scriptstyle  u$				Д	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> 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 <sup>-15</sup> 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 <sup>-4</sup> 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	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$