

光ファイバ検出器を用いた放射性
腐食生成物挙動の高精度測定法の開発

1996年8月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター

システム開発推進部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor
and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-machi, O-arai-machi,
Higashi-Ibaraki, Ibaraki-Ken 311-13, Japan.

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation)1996

光ファイバ検出器を用いた放射性 腐食生成物挙動の高精度測定法の開発

住野 公造*1, 青山 卓史*1, 江本 武*2

要 旨

高速炉プラントにおける放射性腐食生成物(CP)の1次冷却系内の移行挙動を精度よく把握することは、プラントの保守・点検や補修作業時の放射線被ばくを低減させる上で極めて重要である。このため、高速実験炉「常陽」では、定期検査ごとに主要な被ばく源である ^{60}Co 、 ^{54}Mn 等のCP核種の機器・配管への付着密度とそれによる γ 線量率分布の測定を実施している。

本測定に、近年実用化が進んでいるプラスチック・シンチレーション光ファイバ(PSF)検出器を適用し、その特性を活かすことにより高精度で迅速に測定できる手法を開発した。本開発では、検出感度に関しては、「常陽」実機の放射線場でも有効にPSFを使用できるように、ファイバ素子の太さや本数を変えて検出感度を調製した数種類のファイバを製作し、約0.01~10mSv/hまでのワイドレンジで測定できるように改良した。また、ポジション・センシティブな検出器としてのPSFの特徴を最大限に活用できるようにするため、応答関数を用いた逐次近似法によるアンフォールディング技術を適用し、高速炉の1次冷却系の γ 線量率分布のような微細な空間分布測定にも適用可能な感度範囲と高い位置分解能を得るようにした。

本測定手法を用いて、「常陽」1次冷却系の γ 線量率の測定を行い、従来の熱蛍光線量計(TLD)による測定との比較を行った。この結果、測定値取得までの所要時間をTLDの約2日から数分間に短縮すると同時に、高分解能の連続的な空間 γ 線量率分布として測定することができ、高速炉プラントのCP挙動測定の高精度化と迅速化を実現した。

*1 動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター 実験炉部 技術課

*2 " " " 安全管理部 放射線管理課

Development of Accurate CP Distribution Measurement FBR Plant Using a Plastic Scintillation Fiber Detector

Kozo SUMINO*¹, Takafumi AOYAMA*¹ and Takehiko EMOTO*²

ABSTRACT

It is important to accurately evaluate Corrosion Products (CPs) behavior in a FBR plant to reduce the personnel exposure due to CP deposition. A series of measurements of the gamma-ray dose rate distribution has been carried out in the Experimental Fast Reactor JOYO to characterize the CP behavior in the primary coolant system.

The Plastic Scintillation Fiber (PSF), which is a position sensitive radiation detector that can detect the radiation dose rate at the relevant position in the fiber, was introduced to upgrade the gamma-ray distribution measurement in JOYO.

In order to apply the PSF for the JOYO environment, the specification of the fiber was modified to obtain a wide range of sensitivity from about 0.01mSv/h up to 10mSv/h. This range covers the gamma-ray dose rate in the JOYO primary coolant system. In higher gradients of dose rate distribution than that of the PSF's position resolution, the measured data were unfolded by using the response matrix with a successive approximation method to reproduce the narrow distribution.

As a result of the study on PSF, the continuous gamma-ray dose rate distribution was able to be measured by PSF in a few minutes, whereas point data at 1m intervals were laboriously obtained by a set of Thermo-luminescence Dosimeters (TLDs). It was confirmed that the measurement of CP behavior upgraded significantly by using a detailed gamma-ray dose rate distribution.

*¹ Reactor Technology Section, Experimental Reactor Division, Oarai Engineering Center, PNC

*² Radiation Control Section, Health and Safety Division, Oarai Engineering Center, PNC

目 次

1. 緒 言	1
2. 測定装置の概要	2
2.1 測定の方法	2
2.2 検出器の仕様	2
2.3 検出器の比較	3
3. 測定位置と方法	6
3.1 測定位置	6
3.2 測定方法	6
3.3 測定値の校正	6
4. 測定結果	13
4.1 配管・機器の表面線量率分布	13
4.2 作業エリアの空間線量率分布	13
5. 結 言	20
6. 謝 辞	21
7. 参考文献	22

図 リ ス ト

図 2. 1	測定装置とその出力結果の概略図	4
図 2. 2	P S F 検出器	5
図 3. 1	P S F による γ 線量率分布測定位置	9
図 3. 2	P S F による γ 線量率分布測定状況	10
図 3. 3	校正照射 ($10 \mu\text{Sv/h}$) した場合の波高分布	11
図 3. 4	コリメートした γ 線の照射結果	12
図 4. 1	配管周方向の表面線量率分布	15
図 4. 2	配管エルボ部軸方向の表面線量率分布	16
図 4. 3	中間熱交換器 (A) の軸方向の表面線量率分布	17
図 4. 4	中間熱交換器間の通路上 (約 1 m) の空間線量率分布	18
図 4. 5	1 次主循環ポンプ周辺の垂直方向の空間線量率分布	19

1. 緒 言

高速炉プラントにおける放射性腐食生成物（CP）の1次冷却系内の移行挙動を精度よく把握することは、プラントの保守・点検や補修作業時の放射線被ばくを低減させる上で極めて重要である。このため、「常陽」では、定期検査ごとに主要な被ばく源である ^{60}Co 、 ^{54}Mn 等のCP核種の機器・配管への付着密度とこれに起因する γ 線量率分布を測定し、そのデータに基づきCP挙動解析法を開発整備してきた⁽¹⁾。

これまでの測定では、CP付着に起因する1次主冷却系の γ 線量率分布は、熱蛍光線量計（TLD）を用い、約1ヶ月かけて主要な機器・配管廻りの代表点約2000点のポイント測定を行ってきた⁽²⁾。しかし、TLDの場合、測定値を得るまで約2日間要することとリーダーによる読み取り操作で手間がかかるため、TLDの測定データにより配管・機器毎の γ 線量率分布図を作成するのは容易な作業ではなかった。

この γ 線量率の分布測定に、近年実用化が進んでいるプラスチック・シンチレーション光ファイバ（PSF）を適用し、その特性を活かすことにより高精度で迅速に測定できる手法を開発した。

本報告書は、PSFの概要、 γ 線量率分布測定手法、測定結果およびその適用性評価についてまとめたものである。

2. 測定装置の概要

PSFによる γ 線量率測定装置の概要を従来測定に用いていたTLDとともに示す。

2.1 測定の原理

(1) PSFによる測定⁽³⁾

測定装置とその出力結果の概略図を図2.1に示す。

γ 線の入射によりPSF中で発光したシンチレーション光が両端の光電子増倍管(PMT)に到達するが、その時間差は発光地点とPMTまでの距離の差に比例する。そこで、2つのPMTの出力を飛行時間(TOF)回路で分析することにより、波高分析器のチャンネルで放射線の入射位置を、また計数率によって放射線の強度を求めらる。

(2) TLDによる測定

TLD素子に γ 線が入射すると入射量に比例して電子が励起状態に励起される。この励起した電子は外部から励起エネルギーに対応した熱を加えない限り、準安定状態にとどまっている。照射済の素子に熱を加えると、捕獲電子は基底状態に戻り、その際に γ 線の強度に比例した熱蛍光を発するため、この蛍光量を計測することにより γ 線量を求める。

2.2 検出器の仕様

(1) PSF検出器⁽³⁾⁽⁴⁾

PSFは、これまで動燃と東大の共同研究によって測定手法の開発が行なわれてきており、素子にプラスチックを用いることにより光伝送手段に利用される石英等の光ファイバに比べて特に可撓性に優れている特長を持つ。検出素子のコア部にポリスチレン、クラッド部にポリメチルメタクリレート(PMMA)を用いており、ポリスチレンの発光が約300nm付近にピークを持つ短波長の光でファイバー中での減衰が大きいことから、さらに波長シフト材としてブチーPBDおよびBDBを入れて2段階程度で420nmより長い波長に変換している。これによりファイバー中の減衰が小さくなり、高い検出効率を得ることが可能になっている。

これをさらに「常陽」実機へ適用するにあたっては、これまでの開発過程で試験的に測定してきた線量率を超える高線量率場での使用となるため、ファイバ径や束ねる

素子の本数を変えることにより、検出感度を変えた数種類のファイバを新たに製作し、約0.01~10mSv/hまでのワイドレンジの線量率を測定できるように改良した。

以下に製作したファイバーと線量率からみた測定対象箇所を示す。

- ① 長さ5m 1mmφ×10本 (低線量用 ~数100μSv/h)

測定する範囲が狭く (~4m)、比較的低線量 (~0.5mSv/h) となる配管表面。

- ② 長さ10m 1mmφ×19本 (低線量用 ~数100μSv/h)

可能な限り広い測定範囲が要求され、比較的低線量 (~0.5mSv/h) となる作業空間。

- ③ 長さ10m 0.25mmφ×1本 (高線量用 ~10mSv/h)

測定する範囲が広く (~6m)、高線量 (~3mSv/h) となる中間熱交換器表面。

PSF検出器 (高線量用) を写真2.1に示す。なお、PSFは全てφ10数mmの遮光チューブに入っている。

(2) TLD

TLD素子は、通常作業被ばく管理に用いられるUD-200Sであり、CaSO₄に活性化物質としてTmを添加した結晶 (CaSO₄:Tm) を使用し、1μSv/h~200mSv/hの線量測定範囲をもつ。

2.3 検出器の比較

本測定で用いたPSF (高線量用) とTLDの諸性能の比較表を以下に示す。

項目	PSF	TLD
型式	BCF-10 [10m 0.25mmφ×1本] (BICRON製)	UD-200S (松下電器産業製)
検出範囲	連続 (10m)	ポイント
線量率測定範囲	10μSv/h~10mSv/h	1μSv/h~200mSv/h
測定時間	数分間	約2日間*
エネルギー依存性	±5% (500~1500keV)	±40% (>30keV)
感度均一性	±10%以内	バラツキ ±10%以内
位置分解能	約60cm	なし

* 線量を読み取るには、初期フェーディングの影響を除くため、照射時間 (約6時間) の他にバックグラウンドの雰囲気約40時間置く必要がある。

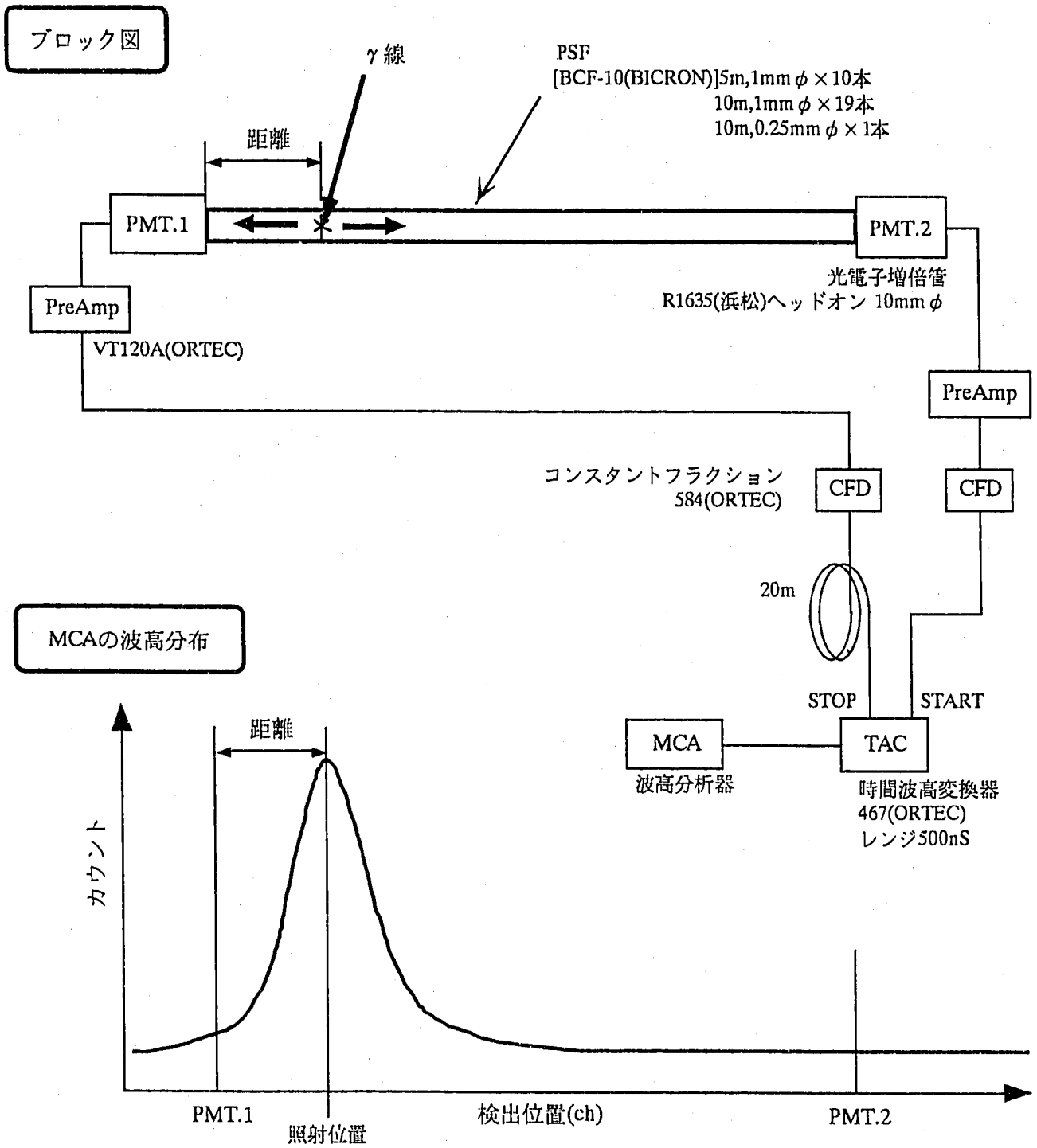


図 2. 1 測定装置とその出力結果の概略図

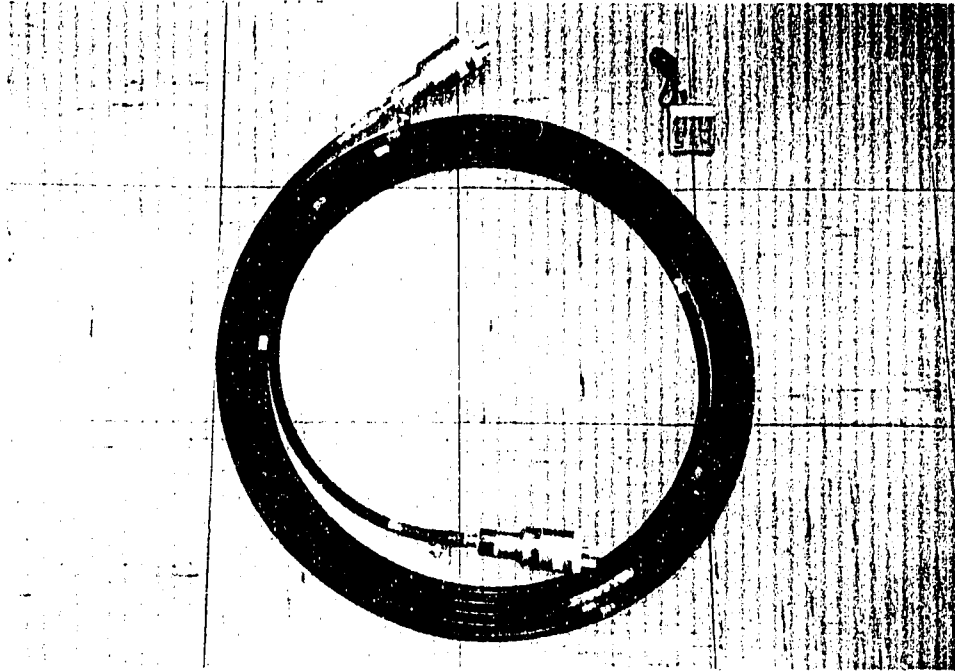


図 2.2 P S F 検出器

3. 測定位置と方法

測定は「常陽」第11回定期検査期間中の1995年10月11日～11月2日（その他のGe半導体検出器による核種分析作業等も含む）の期間に実施した。

3.1 測定位置

PSFによる γ 線量率測定位置を図3.1に示す。

配管・機器の表面部については、従来のTLDの測定結果から代表的な位置を選択した。配管については、ホットレグ配管（HL①）、中間熱交換器と主循環ポンプ間のコールドレグ配管(1)（CL①）、主循環ポンプと炉容器入口間のコールドレグ配管(2)（CL②）の周方向およびCP付着挙動が変わるエルボ部（EB①, ②, ③）の軸方向と周方向について測定を行った。また、機器については、その内部構造に起因してCP付着分布が大きく変わる中間熱交換器（A）の軸方向と周方向について測定を行った。

また、複数の機器や配管内のCPからの γ 線の混成場であり、これまで詳細な γ 線の空間分布を測定していなかった保守作業エリアについても測定を行った。測定は、①2基の中間熱交換器間をつなぐ通路上約1mの位置、②1次主循環ポンプ下部の通路上約1mの位置および③主循環ポンプの保守作業エリアである主循環ポンプ周辺の垂直方向について行った。

3.2 測定方法

前項で選択したPSFを各配管・機器表面または作業空間に設置後、適当な間隔で粘着テープで固定して測定を行なった。測定状況を図3.2に示す。測定時間は、 γ 線の強度によって変更し、300～1000秒とした。

3.3 測定値の校正

(1) 感度不均一性と換算係数

PSFは図3.3に示すように位置による感度の不均一性をもつため、あらかじめ国家標準とトレーサビリティのとれた照射施設（使用線源： ^{137}Cs ）で校正照射を行ない、位置毎の換算係数（ $\mu\text{Sv/h} \cdot \text{cm/cps}$ ）を求めておき、測定結果から線量率への換算を行った。

(2) アンフォールディング法

また、PSFは図3.4に示すように検出器固有の位置分解能（10mの検出器で半値幅で約60cm、5mの検出器で約30cm）を持つため、線量率が急激に変化する場合には、PSFの出力結果（波高分布）からそのまま線量率に変換すると、測定した線量率分布が平坦化される傾向がある。

この様な場合には、コリメートしたγ線を照射し、あらかじめ応答関数（照射位置と応答の関係）を求めておき、測定結果から逐次近似法により入射γ線分布を再現するアンフォールディング法が有効である。

アンフォールディングの手法を以下に説明する。

PSFの出力結果（波高分布）は、次式のように表される。

$$C(x') = \int_0^{\infty} R(x', x) \times D(x) dx \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで

$C(x')$: 測定波高分布

$R(x', x)$: 検出器の応答関数（位置xに入射したγ線が波高分布の位置x'に相当するパルスを生じさせる確率）

$D(x)$: 実際の線量率分布

この(1)式は計算を容易にするために次のようにマトリックスを用いて書き直すことができる。

$$C = R \times D$$

$$= \begin{vmatrix} c \\ \vdots \\ c \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} & \dots & r_{k1} \\ r_{12} & r_{22} & r_{32} & \dots & r_{k2} \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} & \dots & r_{k3} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{1k} & r_{2k} & r_{3k} & \dots & r_{kk} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \vdots \\ d_k \end{vmatrix} \quad \dots\dots\dots (2)$$

k : 位置区分

未知線量率分布Dは(2)式においてRの逆マトリックスを乗ずることにより求められるが、この手法はピークを持つスペクトルに対しては振動を与えたり、負の解を与えたりするため適当ではない。そのためここでは逐次近似法を用いて解析を行うこととした。

入射γ線スペクトルNにおいて逐次回数j後のi番目のエネルギーをもつ要素は以下のように与えられる。

$$d_i^{(j)} = n_i^{(j-1)} \times c_i^{(0)} / c_i^{(j-1)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$d_i^{(j)}$: 線量率分布Dにおいて逐次回数j後のエネルギーi番目の要素

$c_i^{(0)}$: 測定波高分布のエネルギーi番目の要素

$c_i^{(j-1)}$: 式(2)で算出されたベクトルCの逐次回数j-1回目の要素

ここで計算には初期スペクトルとして $D^{(0)}$ が必要であるが、測定波高分布 $C^{(0)}$ を用いた。

逐次近似計算では、各チャンネルのj回目とj-1回目の値の比が判定基準以内である場合を収束条件と判断して打ち切り、その時の $d_i^{(j)}$ を線量率分布とした。

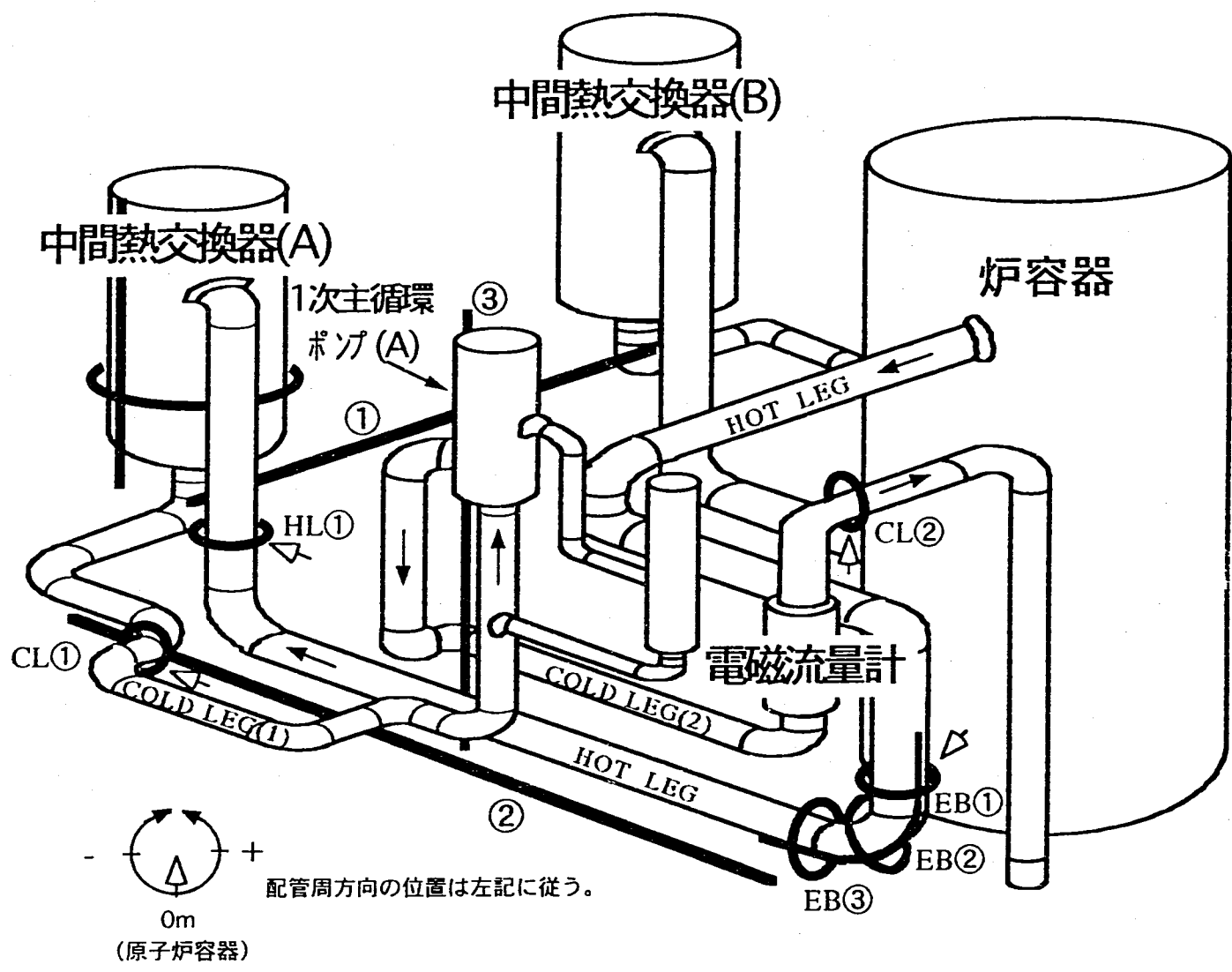


図3.1 PSFによる γ 線量率分布測定位置

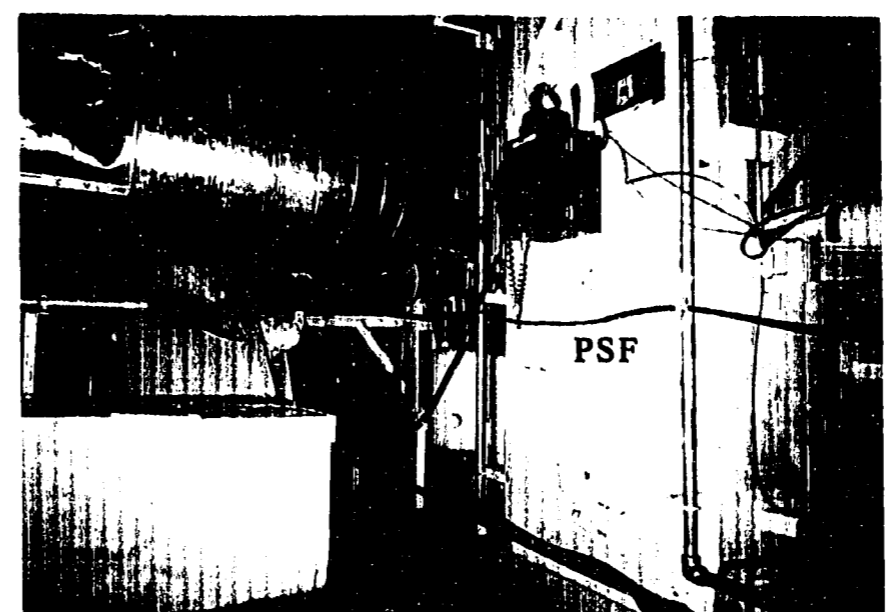
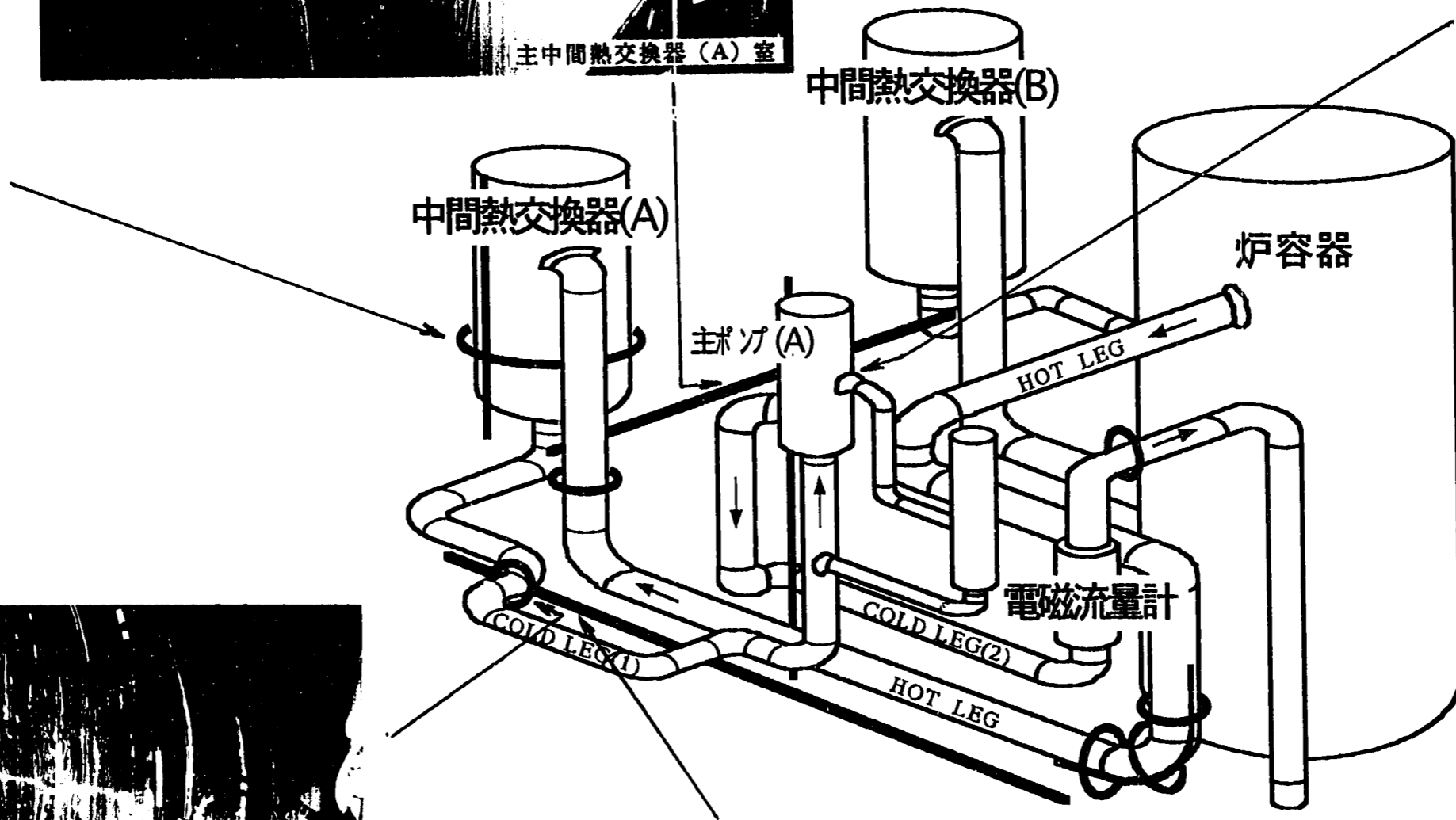
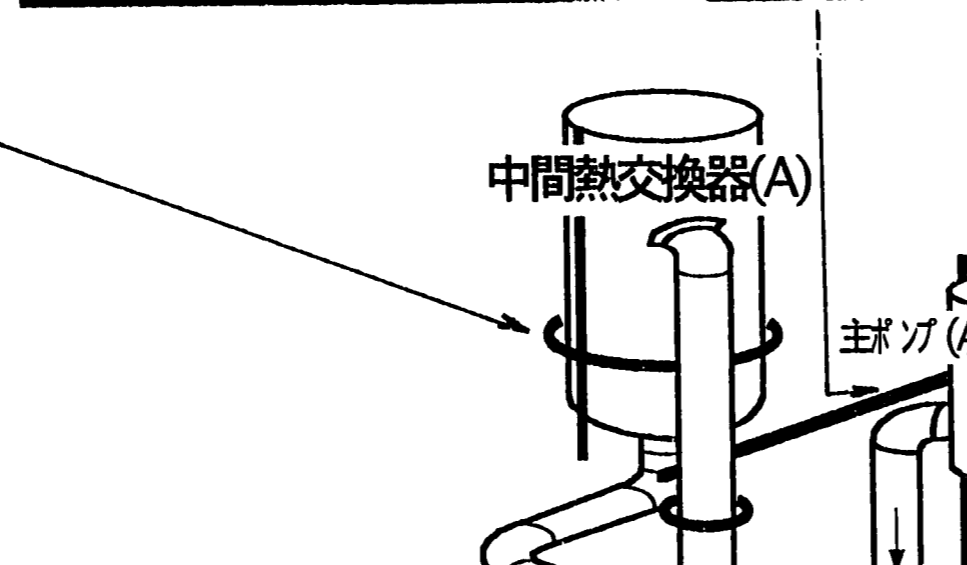
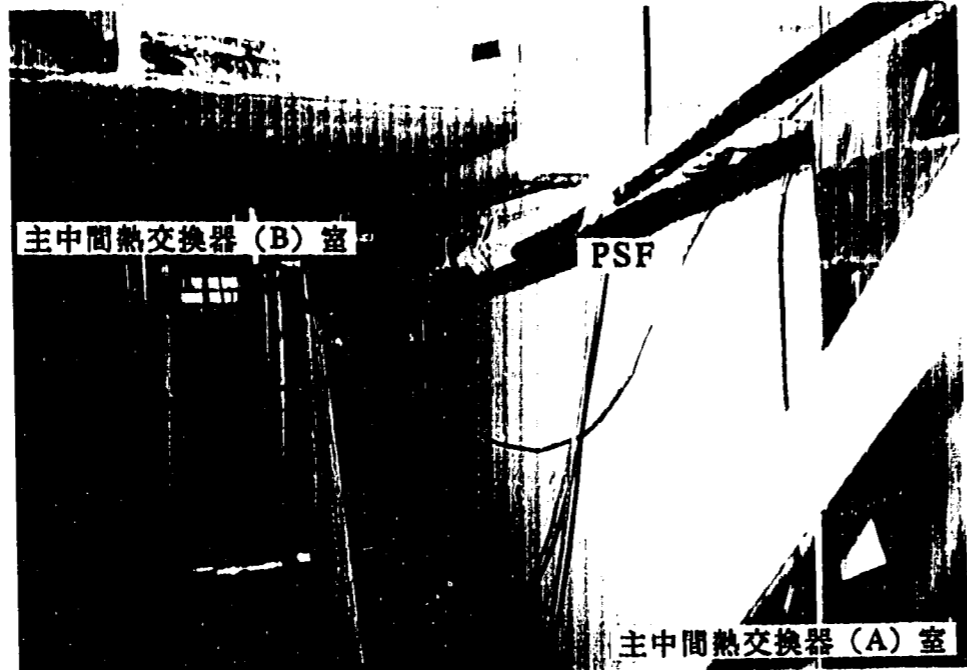
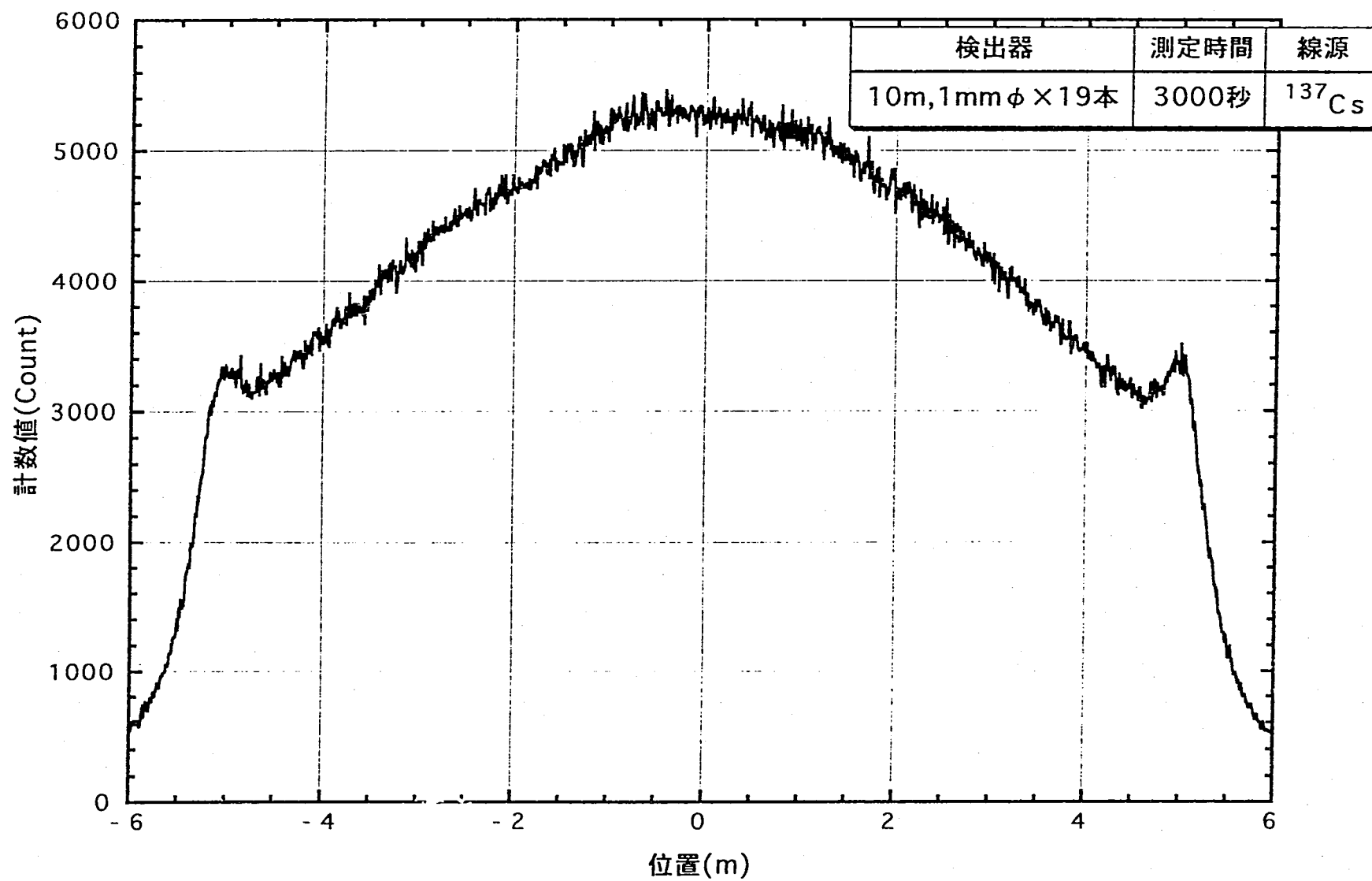
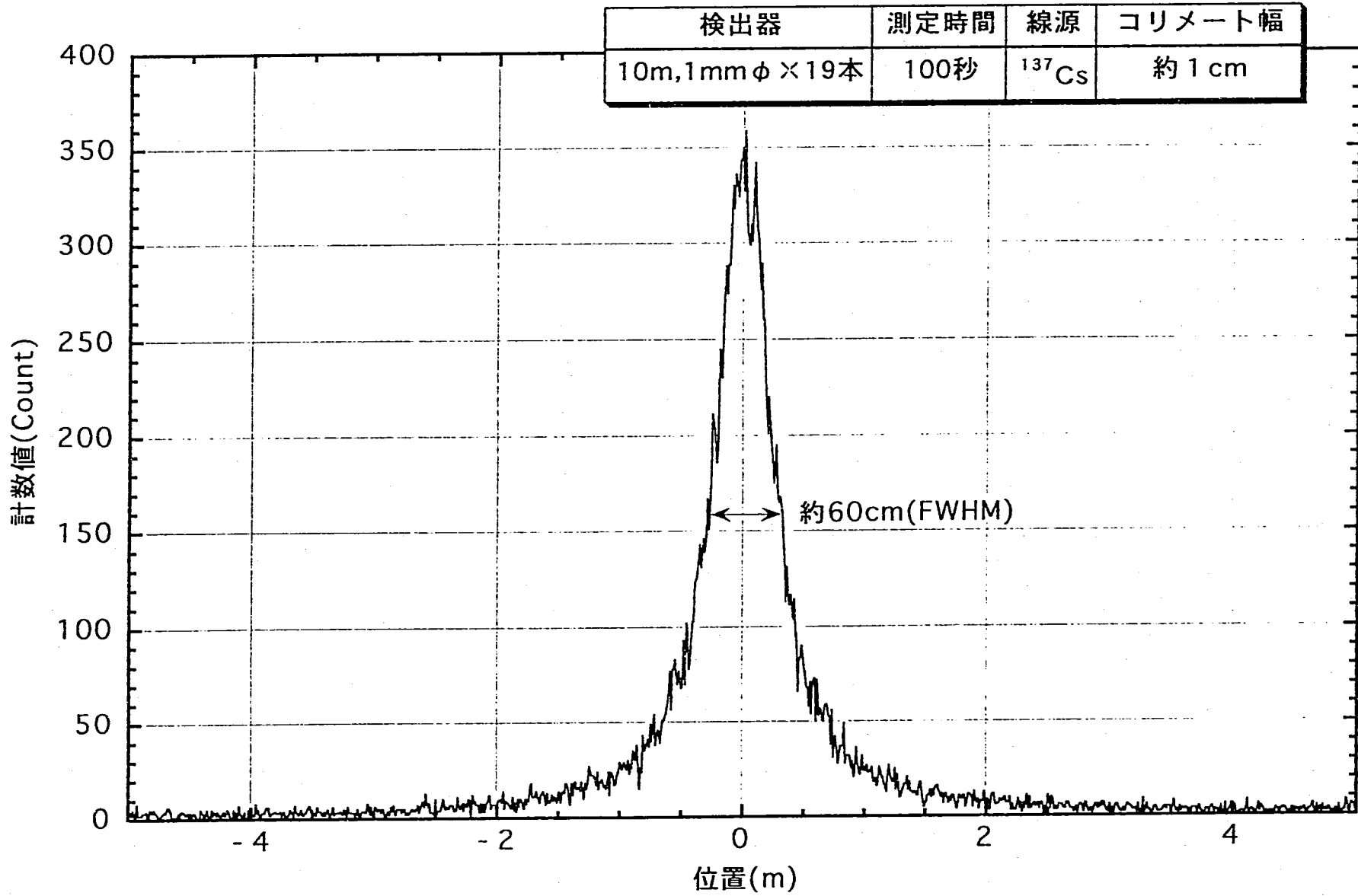


図3.2 PSFによる γ 線量率分布測定状況

図3.3 校正照射 ($10\mu\text{Sv/h}$) した場合の波高分布

図 3.4 コリメートした γ 線の照射結果

4. 測定結果

4.1 配管・機器の表面線量率分布

(1) 配管周方向および軸方向分布

図4.1にホットレグ配管(HL①)、コールドレグ配管(1)(CL①)、コールドレグ配管(2)(CL②)の周方向の表面線量率分布を、図4.2に配管エルボ部(EB①, ②, ③)の軸方向の表面線量率分布をTLDの測定結果とともに示す。

図に示すようにPSFを適用することにより、配管周方向および軸方向の詳細な表面線量率の連続分布を明らかにすることができた。従来の測定では、過去11回測定してデータを蓄積してきた知見から、代表点を押さえるように経験的にTLD素子を配置していたが、この測定箇所の妥当性をPSFによる連続分布測定により確認できた。

(2) 中間熱交換器軸方向分布

図4.3に中間熱交換器(A)の軸方向(IHX①)の表面線量率分布をTLDの測定結果とともに示す。

中間熱交換器は、その内部構造に起因して水平配管部にCPが沈着しやすいため、図に示すように軸方向の2ヶ所にピークのある線量率分布を形成するが、PSFの測定では検出器固有の位置分解能(半値幅:約60cm)よりも微細な線量率分布であるため、PSFの直接の出力結果では分布が鈍っている(図4.3中「アンフォールディング前」で図示)。この場合には、アンフォールディング法を採用することによりピークを精度良く求めることができた(図4.3中「アンフォールディング後」で図示)。

4.2 作業エリアの空間線量率分布

(1) 2基の中間熱交換器間の通路上

図4.4に2基の中間熱交換器間をつなぐ通路上約1mの空間線量率分布をTLDの測定結果とともに示す⁽⁵⁾。

2基の中間熱交換器はその構造が大きく異なり、Naの流れが滞留するサブマージプレートや大型の熱応力緩衝用カバーを持つB号機に多くのCPが付着している(総量でA号機の約2倍)。本測定において、その中間熱交換器間のCPの付着量の違いによる作業空間の線量率への影響が明確になり、主中間熱交換器(A)室よりも(B)室側で線量率が増加していることがPSFによる連続分布測定で確認された。これは、両中間熱交換器に付着しているCPに加えて、(B)室側のみにある1次補助冷却系

のホットレグ配管（定期検査期間中もNaをドレンしていない）内の放射化Na（ ^{22}Na ：半減期2.6y）の影響によるものである。

(2) 1次主循環ポンプ周辺の垂直方向

図4.5に主循環ポンプ周辺の垂直方向の空間線量率分布を示す。

図に示すように主循環ポンプ部で線量率が高く、特に主循環ポンプの軸受け部でピークが確認された。一方、下部にいくに従い線量率は低下し、通路上（PSF 0 m位置）では、0.1mSv/h以下になることが確認された。また、主循環ポンプ部で線量率が急激な変化をするため、アンフォールディングを行った結果、この部分で改善が見られた。

これら機器・配管の間の通路等の保守作業エリアについては、複数の機器や配管内の付着CPからの γ 線の混成場であり、これまで詳細な γ 線の空間分布を測定していなかったが、PSFの採用により連続分布の同時測定が可能となり、データの拡充を図ることができた。

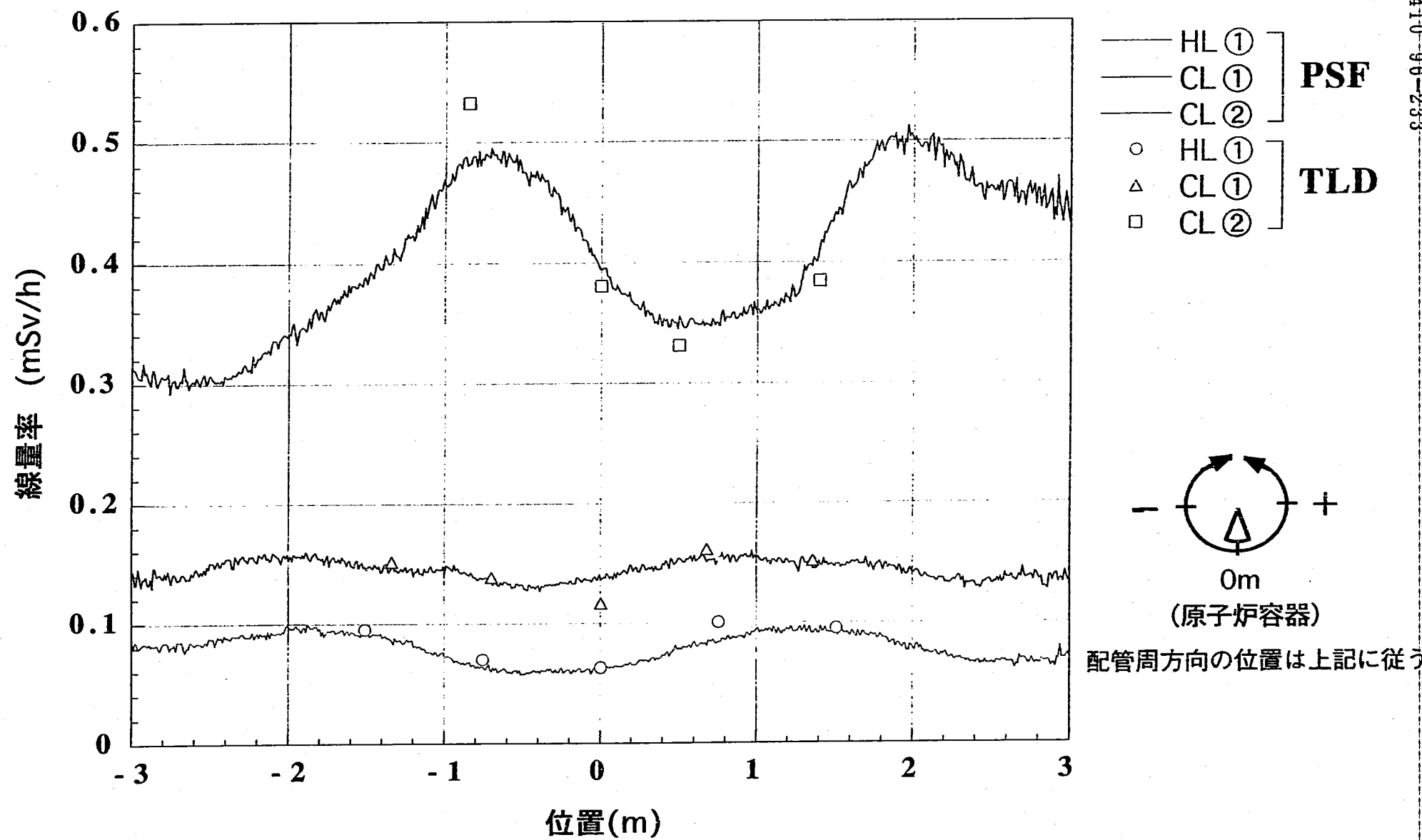


図4.1 配管周方向の表面線量率分布

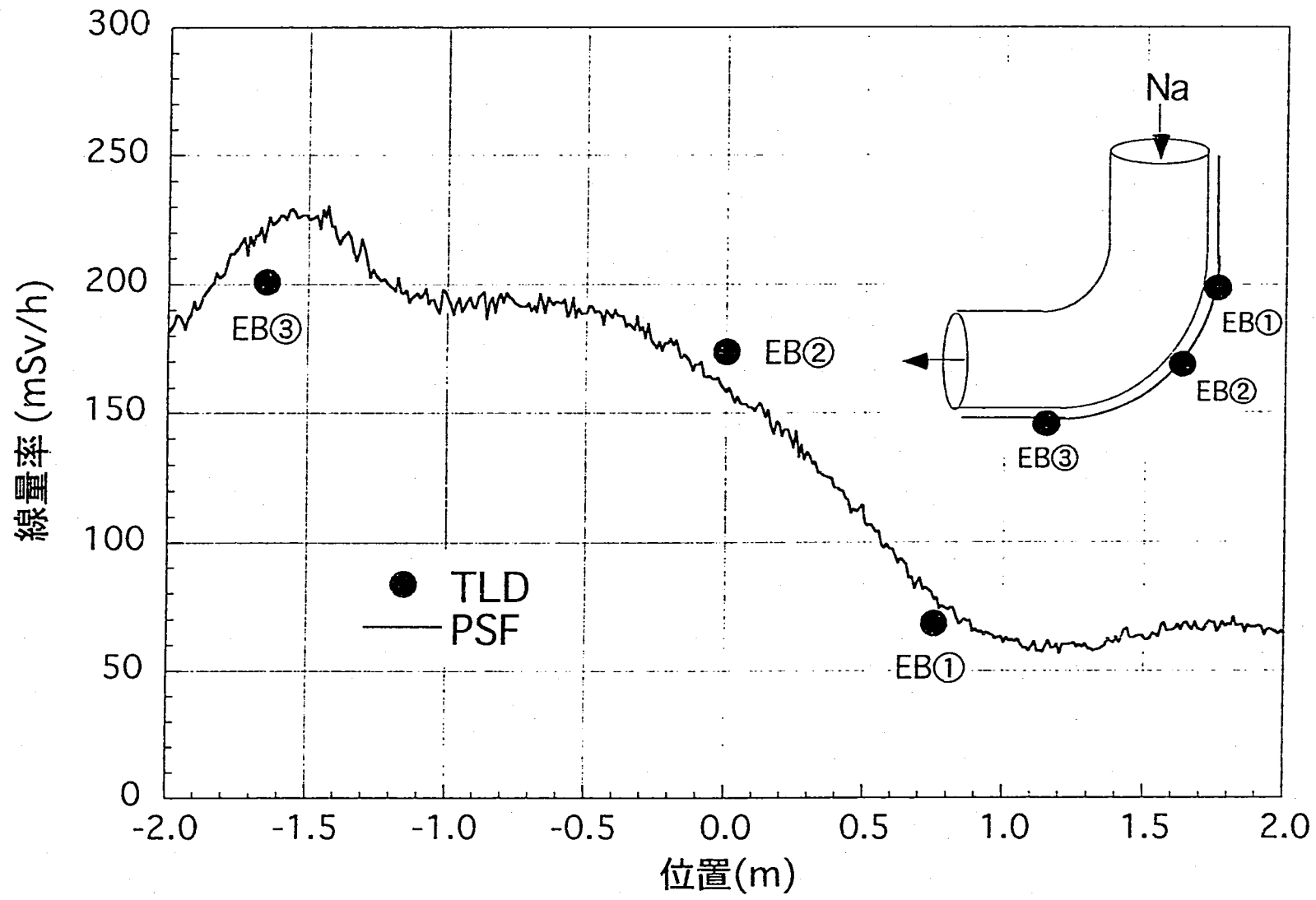


図4.2 配管エルボ部軸方向の表面線量率分布

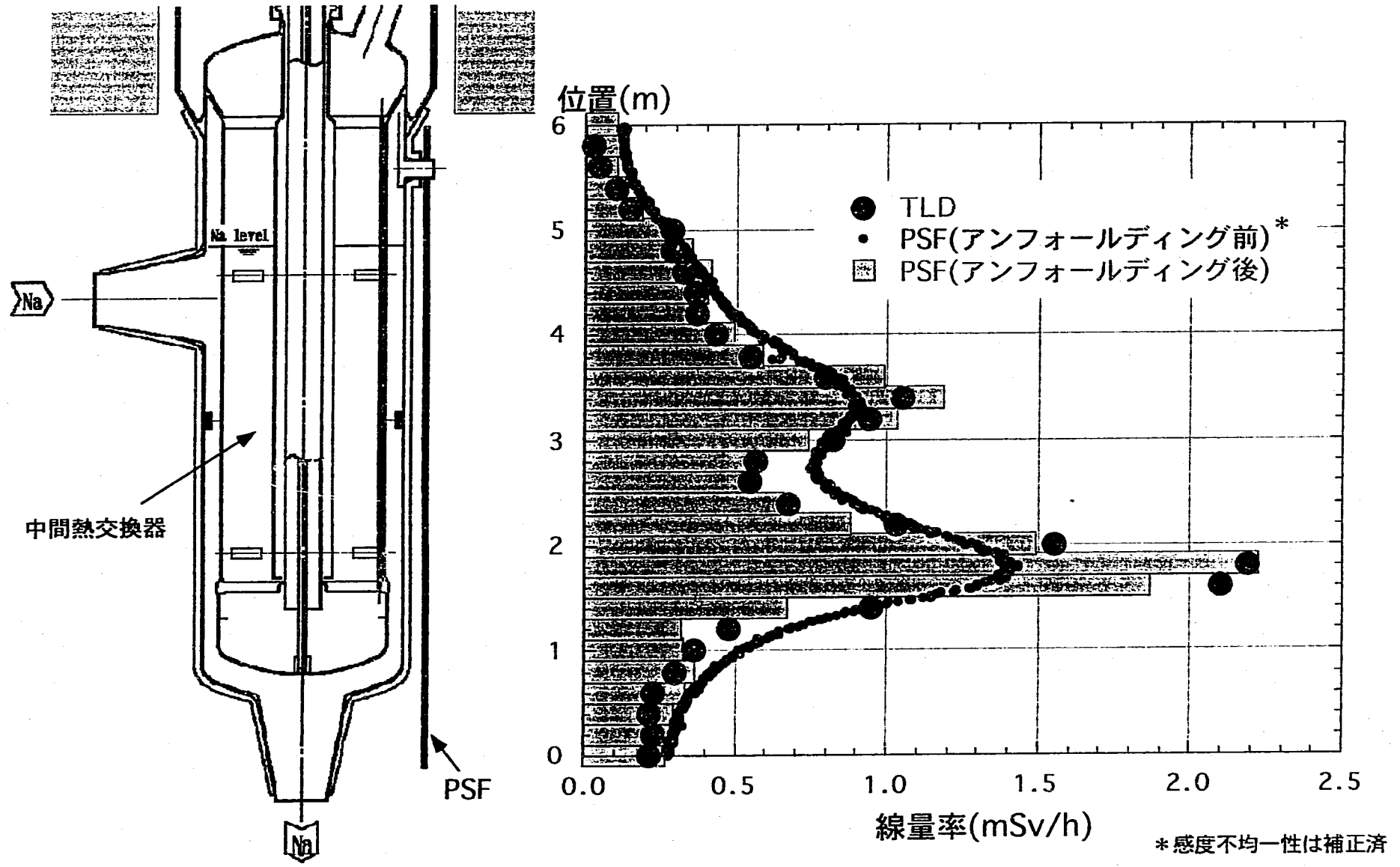


図4.3 中間熱交換器 (A) の軸方向の表面線量率分布

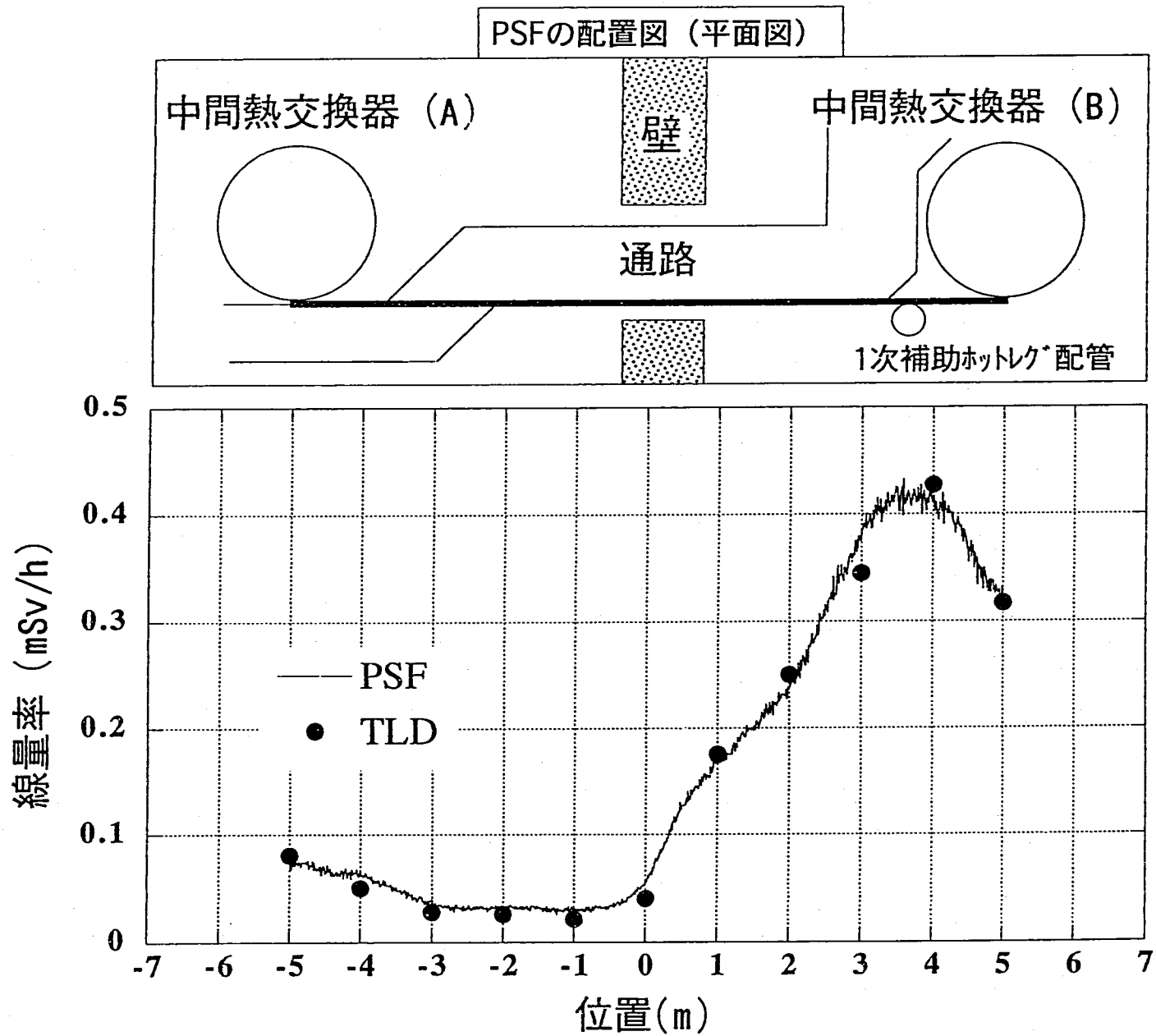


図4.4 中間熱交換器間の通路上 (約1 m) の空間線量率分布

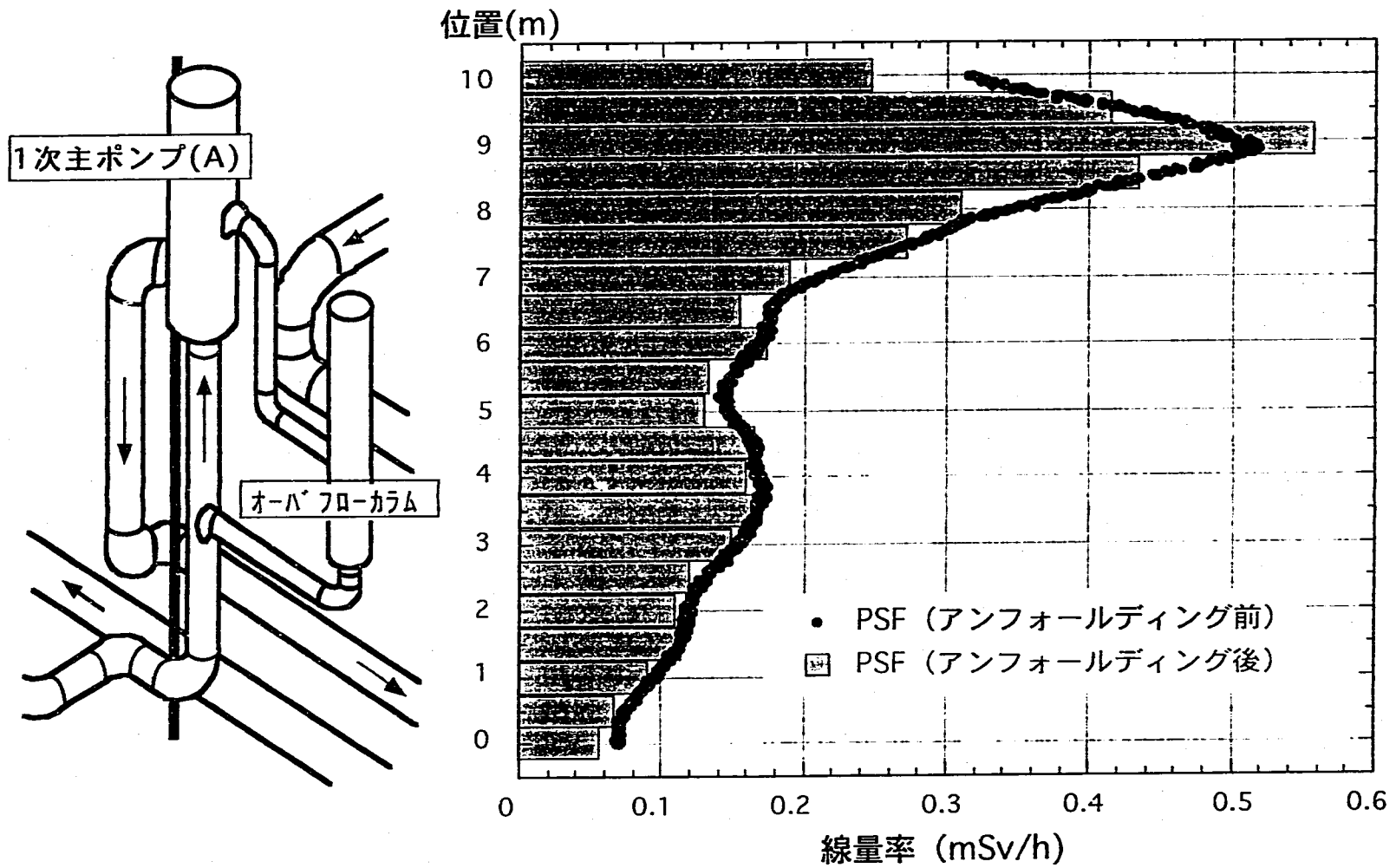


図4.5 1次主循環ポンプ周辺の垂直方向の空間線量率分布

5. 結 言

近年実用化が進んでるプラスチック・シンチレーション光ファイバ（PSF）を「常陽」1次主冷却系のCPに起因する γ 線量率分布の測定に適用し、その特性を活かすことにより高精度で迅速に測定できる手法を開発した。

本測定手法を用いた結果、得られた成果を以下に示す。

- (1) 従来のTLDによる代表ポイント測定と比較して、最大10mまでの連続的な分布測定が可能となり、詳細なCP挙動が把握できるようになった。また、測定値を得るまでの所要時間を、TLDの場合の約2日から数分間に短縮できた。
- (2) アンフォールディング法を用いることにより微細な分布を精度よく測定でき、 γ 線量率の測定精度が向上した。
- (3) ファイバの素子の太さや本数を変えて検出感度を調製した数種類のファイバを製作し、約0.01~10mSv/hまでのワイドレンジで測定できるように改良したことにより、「常陽」実機の放射線場でも有効に使用できることを確認した。
- (4) 形状が長尺・短径で、可撓性に優れている特長を活かして、複数の機器・配管からの γ 線の混成場となる保守作業エリアの空間 γ 線量率分布データを拡充できた。
- (5) 従来代表点を押さえるように経験的に配置していたTLD素子の測定箇所の妥当性をPSFの連続分布により確認できた。

以上より、本測定手法を用いることによって、測定値取得までの所要時間をTLDの約2日から数分間に短縮すると同時に、高分解能の連続的な空間 γ 線量率分布として測定することができ、高速炉プラントのCP挙動測定の高精度化と迅速化を実現した。

6. 謝 辞

本研究の実施にあたり、実験炉部技術課の伊藤主税氏、安全管理部放射線管理課の齊藤圭氏、検査開発（株）の枅井智彦氏及び佐井川拓也氏に測定と測定データの整理に助勢を頂いた。ここに深く感謝の意を表します。

7. 参考文献

- (1) 伊藤 和寛他, 「高速実験炉『常陽』における放射性腐食生成物の測定と評価」 :
日本原子力学会「1993年春の年会」予稿集, J53, p.521 (1993年3月)
- (2) 動燃事業団 大洗工学センター実験炉部, 「『常陽』における高速炉技術の成果と将来展望」 : PNC TN1340 91-001 (1992年4月)
- (3) 森 千鶴夫他, 「放射線計測における光ファイバーの応用」 : 日本原子力学会誌,
Vol. 38, No. 1, P. 33~38 (1996)
- (4) 江本 武彦他, 「シンチレーション光ファイバーによる放射線空間分布測定」 :
放射線, Vol. 21, No. 3, P. 49~58 (1995)
- (5) 住野 公造他, 「高速炉プラントのCP挙動測定へのシンチレーション光ファイバの
適用」 : 日本原子力学会「1996年春の年会」予稿集, F9, p. 281 (1996年3月)