

## 「常陽」におけるCP付着分布の測定と評価（Ⅲ）

1993年12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ください。

〒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

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, 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)

## 「常陽」におけるCP付着分布の測定と評価（Ⅲ）

茶谷恵治\*，伊藤和寛\*\*，伊藤主税\*  
Setyadi Windyosusanto\*\*\*、鈴木惣十\*、坪正義\*

### 要　　旨

高速実験炉「常陽」では、高速炉の保守、点検時における作業員の被ばく低減化を目的として、各定期検査期間を利用し、1次主冷却系における放射性腐食生成物（CP）の管壁付着密度と線量率の測定を実施し、CP挙動解析コードの高度化に反映させてきた。

これまでの7回の測定の結果、主要なCP核種は<sup>54</sup>Mnと<sup>60</sup>Coであり、<sup>54</sup>Mnは主中間熱交換器（IHX）から原子炉容器入口までのコールドレグ（HL）配管に、<sup>60</sup>Coは原子炉容器出口からIXH入口までのホットレグ（CL）配管に移行し易いことなどが明らかとなっている。本研究では8回目の測定である「常陽」の第10回定期検査期間中（今回）の測定結果を中心に実プラントにおけるCP挙動の評価を進めた。主な結果を次に示す。

- (1) 1次主冷却系内のCP付着分布および表面線量率分布は、過去の測定結果と同じ形状を示し、特異な傾向は観察されなかった。
- (2) 今回の1次主冷却系内のCP付着密度および配管表面線量率は、次に示すように飽和傾向を示した第9回定期検査期間中の測定値とほぼ同じであり、CPのビルドアップは飽和に達したと考えられる。
  - ① 1次主冷却系配管（Aループ）のCP付着密度は、HL、IHXから主循環ポンプ入口までのCL(1)、主循環ポンプ出口から原子炉容器入口までのCL(2)について、それぞれ、<sup>54</sup>Mnが約30kBq/cm<sup>2</sup>、約60kBq/cm<sup>2</sup>、約130kBq/cm<sup>2</sup>であり、<sup>60</sup>Coが約9kBq/cm<sup>2</sup>、約3kBq/cm<sup>2</sup>、約8kBq/cm<sup>2</sup>である。
  - ② 1次主冷却系配管の表面線量率は、HLで約0.5mSv/h、CL(1)で約0.6mSv/h、CL(2)で約1mSv/hである。
- (3) 測定値（E）と“PSYCHE91”による計算値（C）のC/E値は、CP付着密度に対して0.9から1.5、線量率に対して1.6であり、計算値は測定値と比較的良く一致する。

\* 大洗工学センター 実験炉部 技術課

\*\* 現（大洗工学センター 実験炉部 原子炉一課）

\*\*\* インドネシア原子力庁 ジョックジャカルタ研究所（科学技術庁の原子力研究交流制度の研究生として、平成5年5月から11月まで技術課に在籍。）

## Measurement and Evaluation of the Radioactive Corrosion Product Behavior in the Primary Sodium Loops of "JOYO" (III)

K. Chatani\*, K. Ito\*\*, C. Ito\*  
S. Windyosusanto\*\*\*, S. Suzuki\*  
and M. Akutsu\*

### Abstract

Deposition density and gamma dose rate of the radioactive corrosion product (CP) have been measured along the primary sodium loop in Experimental Fast Reactor "JOYO" during every annual inspection in order to make clear the CP behavior and to verify the CP behavior analysis code "PSYCHE".

As a result of the previous seven CP measurements, it is made clear that major CP nuclides deposited in the primary sodium loops are  $^{54}\text{Mn}$  on the cold leg (CL) piping (from the outlet of the Intermediate Heat Exchanger (IHX) to the inlet of the reactor vessel (R/V)) and  $^{60}\text{Co}$  on the hot leg (HL) piping (from the outlet of the R/V to the inlet of the IHX), and so on. In this study the CP behavior has been evaluated by using the measurement results during the 10th annual inspection.

The results of this study are summarized as follows:

- (1) The distribution of the measured CP deposition density and gamma dose rate show the same tendency observed previously and no unusual phenomenon is observed.
- (2) The buildup of  $^{54}\text{Mn}$  and  $^{60}\text{Co}$  is seemed to reach saturation because the average CP deposition density and the averaged dose rate is the same value as measured in the 9th annual inspection.
  - (a) Deposition density of  $^{54}\text{Mn}$  is  $30\text{kBq}/\text{cm}^2$  for HL piping,  $60\text{kBq}/\text{cm}^2$  at CL(1) piping (from the outlet of the IHX to the inlet of the pump) and  $130\text{kBq}/\text{cm}^2$  at CL(2) piping (from the outlet of the pump to the inlet of the R/V). Deposition density of  $^{60}\text{Co}$  is  $9\text{kBq}/\text{cm}^2$  at HL piping,  $3\text{kBq}/\text{cm}^2$  at CL(1) piping and  $9\text{kBq}/\text{cm}^2$  at CL(2) piping.
  - (b) Dose rate is  $0.5\text{mSv}/\text{h}$  at HL piping,  $0.6\text{mSv}/\text{h}$  at CL(1) piping and  $1\text{mSv}/\text{h}$  at CL(2) piping.
- (3) As a comparison between "PSYCHE" calculation(C) and measurement (E), C/E ratio is 0.9 to 1.5 for CP deposition density, and 1.6 for dose rate. The agreement between calculation and measurement is fairly good.

\* Experimental Reactor Division, Reactor Technology Section

\*\* Present Address (Experimental Reactor Division, JOYO Operation Section)

\*\*\* Yogyakarta Nuclear Research Center, Indonesian National Atomic

## 目 次

1. 緒 言 .....	1
2. 高速炉におけるCP挙動の概要 .....	2
3. 『常陽』におけるCP測定 .....	5
3. 1 プラント構成 .....	5
3. 2 『常陽』の運転実績およびCPの測定時期 .....	6
4. CP測定の方法および条件 .....	14
4. 1 測定時のプラント状態 .....	14
4. 2 測定に使用した機器と測定条件 .....	14
4. 3 測定位置と検出器の取付方法 .....	15
4. 4 測定値の校正および規格化方法 .....	15
5. 測定結果 .....	30
5. 1 CP付着分布 .....	30
5. 2 1次主冷却系配管の表面線量率 .....	31
5. 3 機器の表面線量率 .....	31
6. 評 価 .....	48
6. 1 CP付着分布の推移 .....	48
6. 2 表面線量率分布の推移 .....	49
6. 3 測定値と計算値の比較 .....	49
7. 結 言 .....	63
謝 辞 .....	65
参考文献 .....	66
付録 1次主冷却系配管の表面線量率の推移 .....	67

## 表 リ ス ト

表2.1 プラント運転および保守・補修の観点から見た1次系内の主要線源	3
表3.1 高速実験炉「常陽」の主要目	7
表3.2 Mk-I 運転実績データ	8
表3.3 Mk-II 運転実績データ	9
表3.4 「常陽」におけるCP付着分布測定の履歴	11
表4.1 高純度Ge半導体検出器の諸性能	17
表4.2 熱螢光線量計(TLD)の諸性能	17
表4.3 測定ポイント数	18
表5.1 第10回定検時 <sup>54</sup> Mn付着量測定結果	33
表5.2 第10回定検時 <sup>60</sup> Co付着量測定結果	34
表5.3 第10回定検時 <sup>58</sup> Co付着量測定結果	35
表5.4 第10回定検時1次主冷却系配管(A)表面線量率分布の測定結果	36
表5.5 第10回定検時1次主冷却系配管(B)表面線量率分布の測定結果	37
表5.6 第10回定検時主中間熱交換器(A)表面線量率分布の測定結果	38
表5.7 第10回定検時主中間熱交換器(B)表面線量率分布の測定結果	39
表5.8 第10回定検時主循環ポンプ(A)表面線量率分布の測定結果	40
表5.9 第10回定検時主循環ポンプ(B)表面線量率分布の測定結果	41
表5.10 第10回定検時オーバーフローカラム(A)表面線量率分布の測定結果	42
表6.1 1次主冷却系配管(A)のCP付着分布測定結果の推移	51
表6.2 1次主冷却系配管の平均表面線量率の推移(TLD)	52
表6.3 1次主冷却系配管(A)のCP付着分布測定結果計算結果の比較	53
表6.4 CP挙動解析モデルパラメータ	54

## 図 リ ス ト

図 2. 1	高速炉におけるCP挙動の概念図	4
図 3. 1	「常陽」1次および2次主冷却系の概要	12
図 3. 2	「常陽」運転履歴	13
図 4. 1	CP測定用鉛コリーメータ	19
図 4. 2	ガンマ線スペクトルの測定位置	20
図 4. 3(1)	1次主冷却系配管（A）表面線量率分布の測定位置	21
図 4. 3(2)	主中間熱交換器（A）表面線量率分布の測定位置	22
図 4. 3(3)	主循環ポンプ（A）表面線量率分布の測定位置	23
図 4. 3(4)	オーバーフローカラム（A）表面線量率分布の測定位置	24
図 4. 3(5)	1次主冷却系配管（B）表面線量率分布の測定位置	25
図 4. 3(6)	主中間熱交換器（B）表面線量率分布の測定位置	26
図 4. 3(7)	主循環ポンプ（B）表面線量率分布の測定位置	27
図 4. 4	ガンマ線スペクトル測定値の減衰補正法のフロー	28
図 4. 5	Ge半導体検出器の校正体系、方法および校正係数の算出結果	29
図 5. 1	1次主冷却系配管表面のGe半導体検出器によるガンマ線スペクトル例 (ホットレグ部)	43
図 5. 2	第10回定検時CP測定位置と付着量の関係	44
図 5. 3	第10回定検時1次主冷却系配管（A）の表面線量率分布	45
図 5. 4	第10回定検時主中間熱交換器（A）の表面線量率分布	46
図 5. 5	第10回定検時主循環ポンプ（A）の表面線量率分布	47
図 6. 1(1)	1次主冷却系配管（A）における <sup>54</sup> Mn付着密度	55
図 6. 1(2)	1次主冷却系配管（A）における <sup>60</sup> Co付着密度	56
図 6. 2(1)	1次主冷却系配管（A）における <sup>54</sup> Mn付着密度の推移	57
図 6. 2(2)	1次主冷却系配管（A）における <sup>60</sup> Co付着密度の推移	57
図 6. 3	1次主冷却系配管（A）の表面線量率の推移	58
図 6. 4(1)	1次主冷却系配管（A）における <sup>54</sup> Mnの付着密度の 計算値と測定値の比較	59

図 6. 4(2) 1 次主冷却系配管 (A : ホットレグ) における <sup>60</sup> Co付着密度の 計算値と測定値の比較	60
図 6. 4(3) 1 次主冷却系配管 (A : コールドレグ) における <sup>60</sup> Co付着密度の 計算値と測定値の比較	61
図 6. 5 1 次主冷却系配管 (A) の表面線量率の計算値と測定値の比較	62

## 1. 緒 言

高速炉の1次主冷却系では、炉心で放射化された燃料集合体および構造材料の成分が放射性腐食生成物（Radioactive Corrosion Product : CP）としてナトリウム中に移行する。このCPはナトリウムの流動により冷却系に運ばれて機器や配管の内壁に付着する。ナトリウムドレン後のCPの付着量は原子炉の積算運転時間の経過とともに増加し、冷却系配管の表面線量率が上昇して保守・補修作業の主要な被ばく源となっている。このため炉心におけるCPの発生量と冷却系における移行・沈着挙動を明らかにして、被ばく線量率を定量的に評価することが重要である。

これらの課題に対応するため、高速実験炉「常陽」では原子炉施設の定期検査期間を利用して冷却系機器・配管に付着しているCP核種と表面線量率を測定し、その推移を調べてきた<sup>(1)</sup>、<sup>(2)</sup>。さらに、炉外試験の結果を基にCPの発生、移行、付着をシミュレーションするための解析コード“PSYCHE”を開発し、「常陽」のCP測定結果により本コードの整備と改良を図り、今後の線量率の推移予測と将来の大型炉における線量率評価に備えている。

本報告書は、「常陽」の第10回定期検査期間時に実施した1次主冷却系配管、機器まわりのCP付着分布と表面線量率の測定結果およびCP付着量と表面線量率の推移についてまとめたものである。

## 2. 高速炉におけるCP挙動の概要

高速炉プラントの運転および保守点検や補修時の放射線量率の観点からみた1次主冷却系内の主要な線源を表2.1に示す。線源はCP、核分裂生成物、トリチウム、燃料および放射化Na等から成り、この中で燃料破損を生じていない場合のプラントの保守点検や補修時に問題となる線源はCPである。

発生するCPの主なものは、燃料被覆管材や炉心構成材等が中性子の照射により放射化したのちナトリウム中に溶出したもの、あるいは主循環ポンプの軸受などで代表される動的部部分における接触・摺動で生じる摩擦・摩耗粉が、ナトリウムの流動によって炉心に運ばれ放射化したものである。

CPは一般に1次冷却系内を移行し、炉内構造物である集合体等の鋼壁や冷却系機器および配管の壁面に付着する。これらCPの挙動の概念を図2.1に示す。CPの付着は1次主冷却系の放射化をもたらすばかりでなく、燃料集合体や機器のナトリウム洗浄設備の放射化をもたらして保守・補修時の作業員の被ばく源となっている。したがって、プラント各部のCP付着分布および表面線量率を実測することは、高速炉におけるこれらCP挙動の解明と被ばく低減対策を図る上で重要である。

表2.1 プラント運転および保守・補修の観点から見た1次系内の主要線源

核種	生成核反応	半減期 (日)	γ線エネルギー (MeV)	備考
<sup>54</sup> Mn	<sup>54</sup> Fe(n, p)	312	0.83	高速炉で最も優勢なCP, 純Ni材によりNa中で捕獲可能
<sup>60</sup> Co	<sup>59</sup> Co(n, γ)	1,924	1.17, 1.33	炉心材料中の不純物Coとコバルト基表面硬化材から発生
<sup>58</sup> Co	<sup>58</sup> Ni(n, p)	71	0.81	<sup>58</sup> Coの中性子吸収断面積が大きく、一部が <sup>60</sup> Coに転換し消滅する
<sup>51</sup> Cr	<sup>50</sup> Cr(n, γ)	28	0.32	
<sup>55</sup> Fe	<sup>54</sup> Fe(n, γ)	949	MnX-ray(EC)*	生成量が多いが放射線場形成には寄与しない
<sup>110m</sup> Ag	<sup>109</sup> Ag(n, γ)	253	0.658, 0.88	生成源は炉心および構造材料中の不純物Ag
<sup>124</sup> Sb	<sup>123</sup> Sb(n, γ)	60	0.60, 1.69	生成源は炉心および構造材料中の不純物Sbあるいは更に低融点合金シール材の混入
<sup>182</sup> Ta	<sup>181</sup> Ta(n, γ)	115	1.22	生成源はNb添加鋼におけるNbに伴う不純物Ta
<sup>137</sup> Cs	Fission	$1.1 \times 10^4$	0.66	主要核分裂生成物、ガラス質カーボン材によりNa中で捕獲可能
<sup>131</sup> I	Fission	8	0.36	事故評価上注目され、コールドトラップで除去される
<sup>85</sup> Kr	Fission	3,927	$0.67(\beta^-)^*$	$\beta^-$ <sup>85</sup> Kr → <sup>85</sup> Rb(n, γ) <sup>86</sup> Rb(19日)**により <sup>86</sup> Rb源となる
<sup>133</sup> Xe	Fission	5	0.08	$\beta^-$ <sup>133</sup> Xe → <sup>133</sup> Cs(n, γ) <sup>134</sup> Cs(748日)により <sup>134</sup> Cs源となる
<sup>135</sup> Xe	Fission	0.4	0.25	$\beta^-$ <sup>133</sup> Xe → <sup>135</sup> Cs( $1.1 \times 10^6$ 日)**(n, γ) <sup>136</sup> Cs(13日)**により <sup>136</sup> Cs源となる
<sup>140</sup> Ba/La	Fission	12.8/1.7	0.54, 1.60	破損燃料継続運転(RBCB)の場合に見出されよう
<sup>95</sup> Zr/Nb	Fission	64/35	0.76, 0.77	
<sup>239</sup> Pu	Fuel	$8.8 \times 10^6$	$5.2(\alpha)^*$	核燃料とナトリウムが直接接触する場合放出される
<sup>3</sup> H	Ternary fission <sup>10</sup> B(n, α) <sup>7</sup> Li(n, nα) <sup>10</sup> B(n, 2α)	4,500	$0.019(\beta^-)^*$	核燃料の3体核分裂反応と中性子制御材Bの速中性子反応により生成、被覆管壁を拡散し、燃料破損のない場合もNa中に移行
<sup>24</sup> Na	<sup>23</sup> Na(n, γ)	0.625	1.4, 2.8, 4.2	
<sup>22</sup> Na	<sup>23</sup> Na(n, 2n)	950	0.51, 1.27	<sup>22</sup> Naの中性子吸収断面積が大きく、 <sup>23</sup> Naにかなり転換、消滅させ得る

\* 非γ核種

EC: 軌道電子捕獲, α: α核種, β-: β核種, \*\*(半減期)

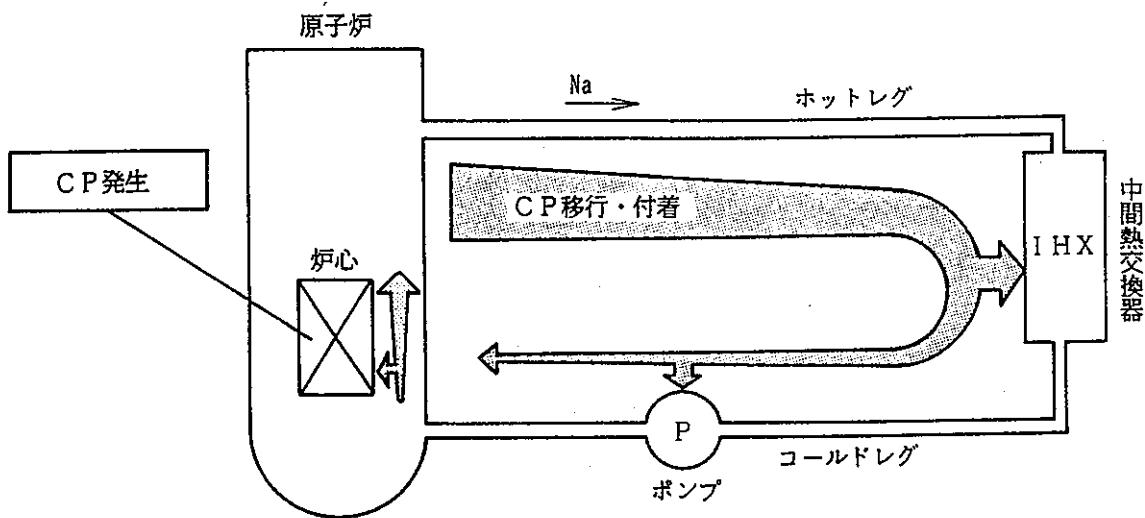


図2.1 高速炉におけるCP挙動の概念図

### 3. 『常陽』におけるCP測定

#### 3.1 プラント構成

「常陽」は、図3.1に示すように、原子炉容器を中心として2系統の主冷却系（AループおよびBループ）、補助冷却系、オーバーフロー系および純化系から構成されている。原子炉の主要目を表3.1に示す。

主冷却系は1次系と2次系からなり、このうちCP挙動に関連するのは1次主冷却系である。1次主冷却系は主中間熱交換器、1次主循環ポンプ、配管および弁類等より構成されている。1次主冷却系のナトリウムは総量で137.7m<sup>3</sup>が充填されており、このナトリウムは1次主循環ポンプの定格運転により1ループ当たり約1260m<sup>3</sup>/hの流量で循環している。原子炉100MW出力時の原子炉容器出口ナトリウム温度は約500°C、入口温度は約370°Cであり、この温度差分の熱量が主中間熱交換器を介して2次主冷却系に伝達される。1次主冷却系の主循環ポンプおよび主中間熱交換器は1ループに1基づつ設置されている。これらの機器をつないでいる1次系の配管は全て2重管構造で、その全長は約85m/ループである。ナトリウムと接する内管の直径は、各領域の圧力損失を考慮して、原子炉容器出口から主中間熱交換器入口までが20<sup>B</sup>（内径：489.0mm, Hot-leg）, 主中間熱交換器出口から主循環ポンプ入口までが18<sup>B</sup>（内径：441.4mm, Cold-leg.1）, 主循環ポンプ出口から原子炉容器入口までが12<sup>B</sup>（内径：305.5mm, Cold-leg.2）となっており、それぞれの領域のナトリウムの流速は、約1.9m/s, 約2.3m/sおよび約4.8m/sと異なっている。

1次主冷却系ナトリウムの純度は、オーバーフロータンクと接続されている純化系のコールドトラップで制御される。純化系の定格ナトリウム流量は9m<sup>3</sup>/hである。純化目標はプラギング温度で150°C以下と定められており、コールドトラップもこの温度を維持するため150°C以下で運転される。また、同系統内に設けられているナトリウムサンプリング装置で1次主冷却系のナトリウムをサンプリングして注目している元素について化学分析し、その推移を確認している。

### 3. 2 『常陽』の運転実績およびCPの測定時期

「常陽」は、昭和52年4月増殖用炉心（Mk-I）で初臨界を達成し、翌年7月には定格の熱出力50MWに到達し、その後出力上昇を図り熱出力75MWの増殖炉心を実証した。昭和57年1月から照射用炉心（Mk-II）への移行を開始して58年3月には目標とした熱出力100MWを達成し、増殖用炉心から照射用炉心に移行した。これまでの主要な運転実績を図3.2に、その詳細を表3.3及び表3.4に示す。この間、定期検査期間を利用して表3.5に示す様にCP付着分布と表面線量率を測定してきた。

一方、CP挙動に密接に関係する1次ナトリウム純化系のコールドトラップはCP低減のために昭和54年12月以降設定温度を150°Cから120°C前後に変更して運転された。しかしながら、照射用炉心への移行作業（Mk-II移行）時期を境にしてコールドトラップの圧力損失が年々増加する傾向を示し始め、原子炉運転中のナトリウム純度管理が困難になってきた。この主な原因として、コールドトラップのメッシュ部の空隙率が小さく、さらにメッシュへのナトリウム流入部が不純物による局部閉塞を起こしやすい構造であるためと考えられた。そこで従来のコールドトラップのメッシュより空隙率を大きくし、ナトリウム流入部で局部的な閉塞を起こしにくい構造とした新型のコールドトラップ（「もんじゅ」1次系コールドトラップと同一構造）を作成し、第6回定期検査中に交換した。機能試験の結果、新型コールドトラップは設定温度120°Cでも順調運転できることが確認された。Mk-II第16サイクル以降、設定温度130°Cで運転されてきており、コールドトラップの低温運転による冷却系機器・配管へのCP沈着の低減化が期待される。

表3.1 高速実験炉「常陽」の主要目

主 要 目	MK - I		MK - II	
	第1期	第2期	初期	平衡
熱特性				
原子炉熱出力 MWt	50	75	100	100
一次冷却系冷却材流量 t/h	2200	同 左	同 左	同 左
一次冷却材原子炉入口温度 °C	370	同 左	同 左	同 左
出口温度 °C	435	468	500	同 左
核特性				
炉心組成比				
燃料／冷却材／構造材	36.2/40.1/20.9		36.7/37.3/22.8	
炉心燃料装荷量 kg				
PuO <sub>2</sub>	154	156	194	219
UO <sub>2</sub>	713	723	481	544
プランケットUO <sub>2</sub> 装荷量 kg				
軸方向	1150	1170	—	—
径方向	7600	7640	—	—
炉心中性子束 n/cm <sup>2</sup> · sec				
平均	1.3 × 10 <sup>15</sup>	1.9 × 10 <sup>15</sup>	2.9 × 10 <sup>15</sup>	2.6 × 10 <sup>15</sup>
最高	2.2 × 10 <sup>15</sup>	3.2 × 10 <sup>15</sup>	5.4 × 10 <sup>15</sup>	5.1 × 10 <sup>15</sup>
炉心				
炉心部組成比				
燃料領域				
(燃料／冷却材／構造材)	37/37/23	同 左	同 左	同 左
炉心部冷却材流量 kg/sec	440	450	480	—
反射体部冷却材流量 kg/sec	110	100	40	—
炉心構成要素				
炉心燃料集合体本数	67	68	54	61
半径方向				
プランケット集合体本数	191	190	—	—
集合体当たり要素本数				
炉心	91		127	—
プランケット	19	同 左	—	—

表3.2 Mk-I 運転実績データ

(Mk-I 初期臨界～75MW-第6サイクル運転終了まで)

・積算運転時間 : 12956 [h], 137.4日(50MW) + 282.6日(75MW)

・積算熱出力 : 673330 [MWH], [164850.5MW(50MW) + 5.8479.8(75MW)]

\* 原子炉運転実績表に基づくものである。

サイクル	項目	運転期間	*運転時間 [h]	BFPD [日]	*熱出力 [MWH]	定格
0'	低出力試験	S52. 4.20 ~ S52. 11.19	360.8	0.0057	6.8	第1回
0	50MW-出力上昇試験	S53. 4.18 ~ S53. 9.16	2312.6	47.6	57061.6	
1	50MW-第1サイクル	S53. 10.27 ~ S53. 12.11	1067.0	43.0	51598.3	
2	50MW-第2サイクル	S54. 1.12 ~ S54. 2.26	1077.4	43.7	52469.0	
2'	特殊試験	S54. 4.11 ~ S54. 5.26	245.1	3.1	3714.8	
0	75MW-性能試験	S54. 7. 3 ~ S54. 8.23	981.0	26.9	48468.9	
1	75MW-第1サイクル	S55. 1.16 ~ S55. 3. 9	1034.0	39.3	70713.0	
1'	特殊試験	S55. 4.14 ~ S55. 4.21	39.7	0.2	291.0	
2	75MW-第2サイクル	S55. 5. 8 ~ S55. 6.24	1074.0	41.0	73732.0	
3	75MW-第3サイクル	S55. 7.14 ~ S55. 9. 4	1055.0	40.3	72465.0	
4	75MW-第4サイクル	S56. 3.12 ~ S56. 5.11	1243.7	45.4	81729.9	
4'	特殊試験	S56. 5.25 ~ S56. 5.29	145.9	3.4	6115.0	
5	75MW-第5サイクル	S56. 6.19 ~ S56. 8. 9	1143.5	44.4	79980.0	第2回
5'	特殊試験	S56. 9.11 ~ S56. 10. 4	57.7	0.0033	5.9	第3回
6	75MW-第6サイクル	S56. 11. 2 ~ S56. 12.23	1117.7	41.7	74979.1	
	照射用炉心(Mk-II) 移行作業					

表3.3 Mk-II運転実績データ(1/2)

\*1 JOYDAS オンラインデータ

サイクル	運転期間	原子炉起動回数 (回)	最大熱出力 (MW)	本サイクル <sup>*1</sup> 積算熱出力 (MWH)	積算熱出力 <sup>*1</sup> (MWH)	本サイクル運転時間 (H)	積算運転時間 (H)	100MW <sup>*1</sup> 相当日数 (EFPD)	定検
0	S57.11.17～ S58.7.31	80	100	66744	66744	1492.76	1492.76	27.81	
1	S58.8.9～ S58.9.30	8	100	103344	170088	1181.10	2673.86	43.06	
2	S58.10.12～ S59.12.2	8	100	108240	278328	1161.40	3835.26	45.10	
3	S59.4.19～ S59.6.10	9	100	105120	383448	1178.83	5014.09	43.80	
4	S59.6.25～ S59.8.12	5	100	102216	485664	1121.12	6135.21	42.59	
5	S59.9.3～ S60.10.22	5	100	107592	593256	1139.49	7274.70	44.83	
6	S59.11.26～ S60.1.12	1	100	107136	700392	1135.68	8410.38	44.64	
7	S60.2.11～ S60.3.31	2	100	105000	805392	1145.83	9556.21	43.75	
7'	S60.4.17～ S60.4.19	1	100	5040	810432	66.83	9623.04	2.10	
7''	S60.4.26～ S60.4.27	1	100	821	811253	35.75	9658.79	0.342	
8	S60.12.2～ S61.1.21	4	100	105960	917213	1171.33	10830.12	44.15	
9	S61.2.12～ S61.3.31	4	100	101808	1019021	1106.87	11936.99	42.42	
10	S61.4.25～ S61.6.11	2	100	106848	1125869	1134.58	13071.57	44.52	
11	S61.7.4～ S61.8.20	2	100	106656	1232525	1136.58	14208.15	44.44	
12	S61.9.13～ S61.10.29	2	100	102720	1335245	1107.09	15315.24	42.80	
12'	S61.11.13～ S61.11.14	2	100	910	1336155	36.61	15351.85	0.379	
12''	S61.11.24～ S61.11.26	2	50	3264	1339419	61.93	15413.78	1.36	
12'''	S61.12.3～ S61.12.5	2	50	3480	1342899	60.45	15474.23	1.45	
13	S62.8.31～ S62.10.31	5	100	130080	1472979	1416.12	16890.35	54.20	
14	S62.11.28～ S62.1.30	3	100	142776	1615755	1503.73	18394.08	59.49	

7' サイクル (FFDL炉内試験)

7" サイクル (自然循環試験)

12' サイクル (MPR照射試験)

12" サイクル (フィードバック反応度試験(I))

12'" サイクル ( " (II))

表3.3 Mk-II運転実績データ (2/2)

\*1 JOYDAS オンラインデータ

サイクル	運転期間	原子炉起動回数(回)	最大熱出力(MW)	本サイクル <sup>*1</sup> 積算熱出力(MWH)	積算熱出力 <sup>*1</sup> (MWH)	本サイクル運転時間(H)	積算運転時間(H)	100MW <sup>*1</sup> 相当日数(EFPD)	定検
15	S63. 2.29～S63. 5.12	2	100	166560	1782315	1748.38	20142.46	69.40	第7回
15'	S63. 6.14～S63. 6.24	4	1	29	1782344	25.39	20167.85	0.012	
15''				12	1782356	15.36	20183.21	0.005	
15'''				14	1782370	16.08	20199.29	0.006	
16	S63. 8.2～S63. 9.6	4	100	75816	1858186	834.48	21033.77	31.59	第8回
17	H1. 1.18～H1. 4.1	4	100	164040	2022226	1741.00	22774.77	68.35	
18	H1. 5.8～H1. 7.19	3	100	164064	2186290	1716.99	24491.76	68.36	
19	H1. 8.15～H1. 10.26	2	100	167424	2353714	1717.06	26208.82	69.76	
20	H1. 11.22～H2. 1.4	2	100	98324	2452038	1018.79	27227.61	40.97	第9回
20'	H2. 1.17～H2. 1.22	2	100	9013	2461051	108.90	27336.51	3.76	
21	H2. 9.6～H2. 11.18	3	100	167801	2628852	1722.54	29059.05	69.92	
22	H2. 12.22～H3. 3.4	2	100	167464	2796316	1713.82	30772.87	69.78	
23	H3. 4.6～H3. 6.1	2	100	129036	2925352	1331.75	32104.62	53.77	第10回
23'	H3. 6.16～H3. 6.17	1	95	578	2925930	23.55	32128.17	0.241	
23''	H3. 6.29～H3. 7.7	6	0.85	13	2925943	94.63	32222.80	0.005	
23'''	H3. 9.2～H3. 9.10	1	100	17707	2943650	202.48	32425.28	7.38	
24	H4. 3.14～H4. 5.5	9	100	100934	3044584	1173.24	33598.52	42.06	第10回
24'	H4. 6.16～H4. 6.17	1	100	441	3045025	22.97	33621.49	0.184	
25	H4. 8.14～H4. 10.22	2	100	154062	3199087	1648.88	35270.37	64.19	
25'	H4. 11.25～H4. 11.29	1	100	7988	3207075	102.67	35373.04	3.33	
26	H4. 12.21～H5. 2.2	2	100	96208	3303283	1029.25	36402.29	40.09	第10回
27	H5. 2.20～H5. 3.26	3	100	72920	3376203	785.51	37187.80	30.38	

15' サイクル (FFD感度校正試験(I))

15'' サイクル (" (II))

15''' サイクル (" (III))

20' サイクル (反応率測定試験)

23' サイクル (PTM試験)

23'' サイクル (CR値詳細測定試験)

23''' サイクル (INTA-2試験)

24' サイクル (PTM試験 #02)

25' サイクル (FFDL炉内試験(II))

第10回

表3.4 「常陽」におけるCP付着分布測定の履歴

No.	測定実施日	γ線スペクトル 測 定	表面線量率 測 定	備 考
第1回	1979年9月		○	第1回定検時
第2回	1980年12月		○	第2回定検時
第3回	1982年7月	○	○	第3回定検時
第4回	1983年7月		○	
第5回	1984年1月	○	○	第4回定検時
第6回	1985年9月	○	○	第5回定検時
第7回	1987年5月	○	○	第6回定検時
第8回	1988年10月	○	○	第7回定検時
第9回	1990年4月	○	○	第8回定検時
第10回	1991年12月	○	○	第9回定検時
第11回	1993年6月	○	○	第10回定検時

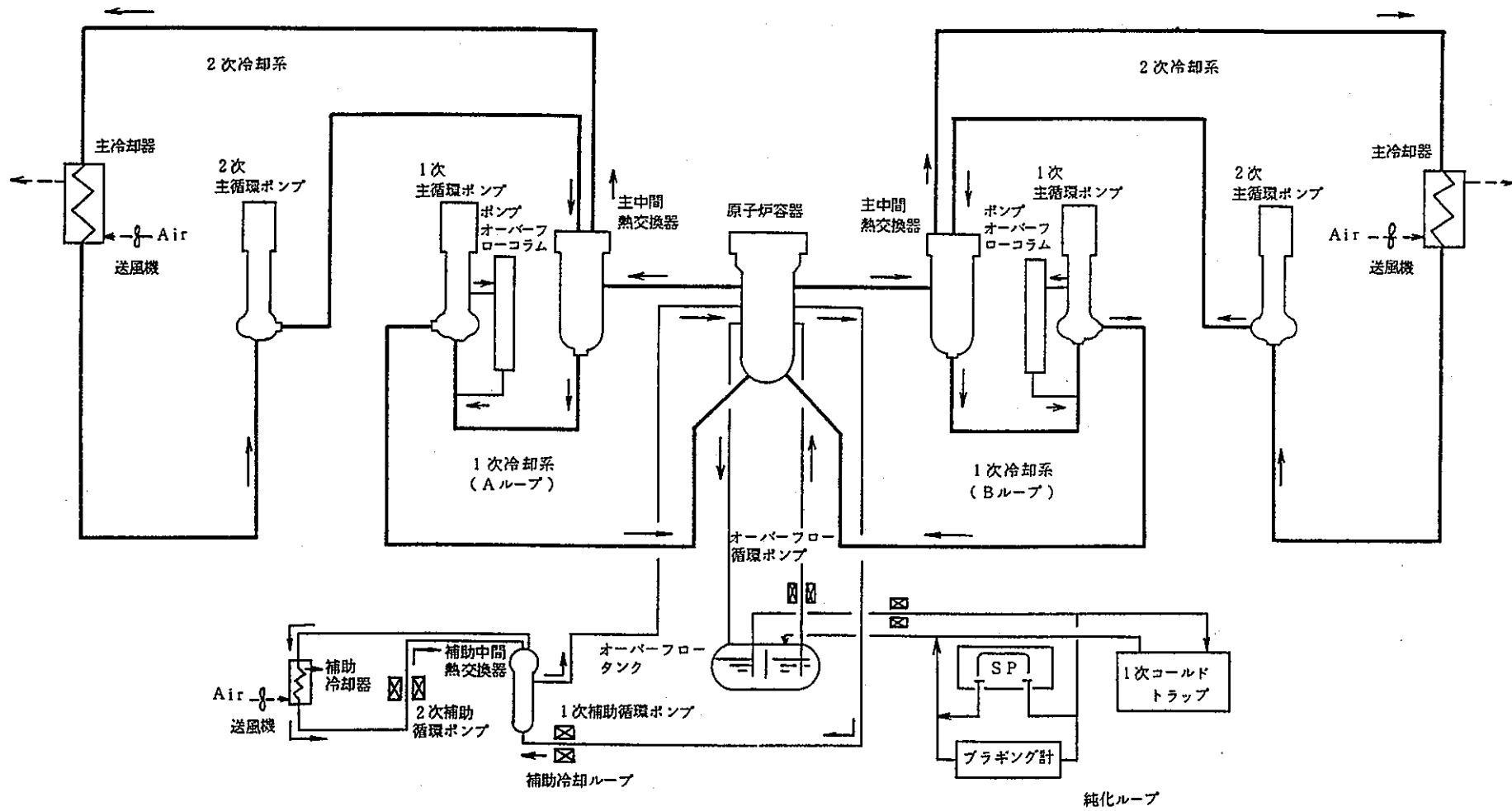


図3.1 「常陽」1次および2次主冷却系の概要

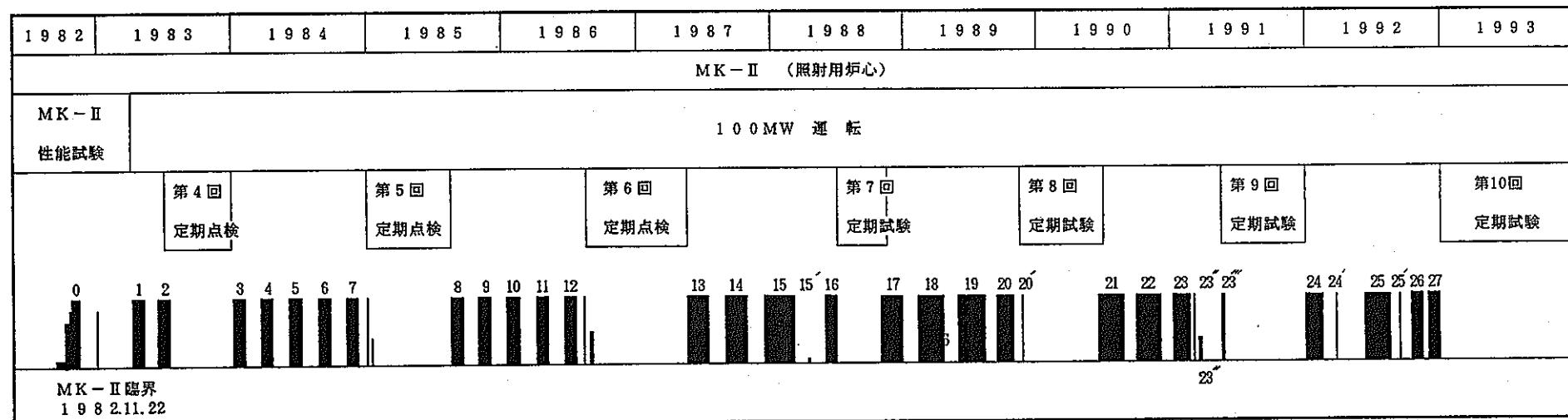
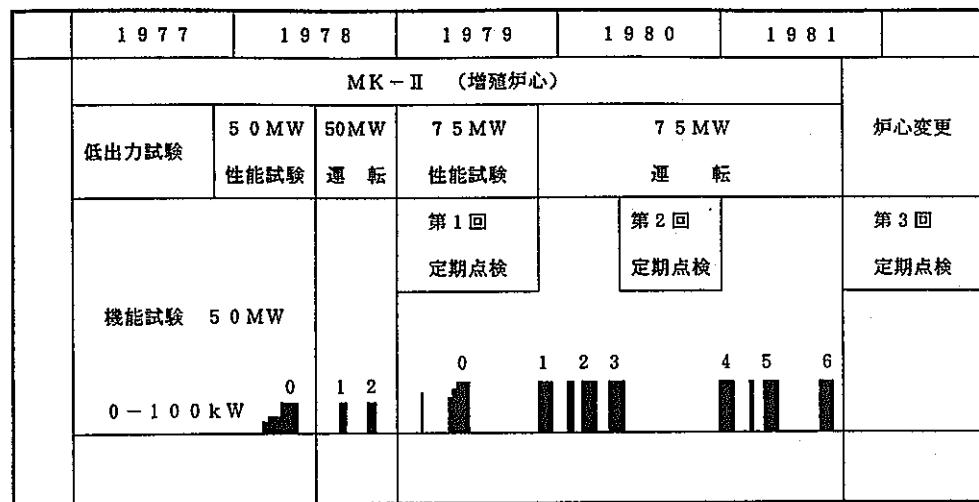


図3.2 「常陽」運転履歴

#### 4. CP測定の方法および条件

##### 4.1 測定時のプラント状態

「常陽」の各定期検査期間におけるCP付着分布と表面線量率の測定は、その経時的な変化を調べる目的から、初回から測定の位置および方法を統一して行っている。以下に第10回定期検査におけるCP測定を一例として示す。

「常陽」は、Mk-II炉心第27サイクルの運転を終了して1993年3月27日から第10回定期検査に入った。1次主冷却系のナトリウムは同年6月3日にダンプタンクにドレンされ、主冷却系は全て室温まで降温されていた。また、原子炉建家の床下各室は窒素ガス雰囲気から空気雰囲気に置換され、立入り可能な状態になった。この第10回定期検査期間を利用して1次主冷却系各部のCP付着密度と表面線量率を測定した。

測定期間：1993年6月14日\*～7月16日

\* 原子炉停止後 ; 80日経過日より測定開始

1次主冷却系ナトリウムドレン後；11日経過日より測定開始

##### 4.2 測定に使用した機器と測定条件

###### (1) ガンマ線スペクトルの測定

- (a) 検出器 ; 高純度ゲルマニウム(Ge)半導体検出器
- (b) コリメータ ; 鉛製、コリメータ直径 $\phi 20\text{mm}$
- (c) 計測時間 ; 実効時間で1000秒～2000秒

検出器の諸性能を表4.1に、またガンマ線の入射方向を制限するコリメータの構造を図4.1に示す。

###### (2) 表面線量率の測定

- (a) 測定器 ; 熱蛍光線量計(TLD)
- (b) アニーリング ; 照射前 $400^{\circ}\text{C}$ 、5分
- (c) 照射時間 ; 約6時間
- (d) 安定化時間 ; 照射後バックグンドの部屋で約40時間

測定器の諸性能を表4.2に示す。表面線量率の測定ではTLD素子をアーラで焼き

#### 4.3 測定位置と検出器の取付方法

CPの測定はこれまでに各定期検査期間を利用して行われてきたが、測定の対象とする位置が異なると測定結果の整合性がとれなくなる。このため、測定位置にはマークを施している。ガンマ線スペクトルの測定位置を図4.2に、表面線量率の測定位置を図4.3に示す。また測定の対象とした総ポイント数をまとめて表4.3に示す。

##### (1) 高純度Ge半導体検出器の設置方法

ガンマ線スペクトルの測定位置にはコリメータ付き高純度Ge半導体検出器が一義的に位置が決まるような専用のレールを設けている。本測定では測定マークを確認しながらレールの上に検出器を乗せた。

##### (2) TLD素子の取り付け方法

TLD素子による表面線量率の測定は素子を粘着テープで密着させて行った。Aループは、ナトリウム主配管では長手方向約1m間隔、周方向4箇所に個別に貼付け、また中間熱交換器の胴体部分には長手方向約20cm間隔、主循環ポンプの胴体部分には長手方向10cm間隔で粘着テープに予め所定の本数分貼付けておき、それを周方向8箇所(45°間隔)に取り付けた。Bループは、IHX出入口のナトリウム主配管を対象に、Aループと同様に長手方向約1m間隔、周方向4箇所に個別に貼付けた。また、中間熱交換器の胴体部分には長手方向約18cm間隔、主循環ポンプの胴体部分には長手方向10cm間隔で粘着テープに予め所定の本数分貼付けておき、それを周方向4箇所(90°間隔)に取り付けた。

#### 4.4 測定値の校正および規格化方法

##### (1) CP核種の同定、測定値の校正および規格化法

CP核種は測定対象部から放出されるガンマ線のスペクトロスコピーを行い、その光電ピークのガンマ線エネルギーにより同定した。次に、測定時の同定核種毎の計数率を原子炉運転停止直後の時点に減衰補正し、これまでの測定データと比較検討できるようにした。これら一連の規格化フローを図4.4に示す。フロー中、注目核種の計数率は、ガンマ線スペクトルデータを簡易核種解析用プログラム“GAMMA-V”を用いて処理し、算出された。さらに、ここで得られた計数率から配管のCP付着密度に換算するには、検出体系での校正定数を決定しなければならない。このため、1次主冷却系配管のモックアップ装置と<sup>54</sup>Mnおよび<sup>60</sup>Coの専用の校正用標準面線源を作成し、これ

らの装置と実際CP測定で使用するコリメータ付き高純度ゲルマニウム半導体検出器により予め校正定数を求めた。図4.5に校正定数の求め方および求めた校正定数を示す。配管へのCP付着密度の解析にはここで求めた校正定数を用いた。

## (2) 表面線量率の規格化

表面線量率を測定するためのTLD 素子はガンマ線で照射すると照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。照射済みの素子に熱を加えると、捕獲電子は基底状態に戻り、その際吸収線量に比例した熱蛍光を発する。従って、TLD 素子による表面線量率の測定ではこの蛍光量を計測すれば直ちに照射線量が求められる。しかし、実際の測定では照射前のバックグラウンド値があるため、予めこのバックグラウンド値を測定しておき照射後の読み取り線量から差し引いた。

表 4.1 高純度Ge半導体検出器の諸性能

項 目	性 能
検出器メー カ 型 式	ORTEC製 Model. 1G12-13210-S Serial No. 21-P-668D
検出器形 状	直 径 44.4mm 同軸型 長 さ 53.5mm
検出器有効体積	73.4cm <sup>3</sup>
使 用 電 壓	Posi 8.0kV
エネルギー分解能	<sup>60</sup> Coの1.332MeV δに対し 1.8keV FWHM
Photo Peakと Compton Plateau の高さの比	Peak/Compton = 47.8
検 出 効 率	15.0%

表 4.2 热螢光線量計 (TLD) の諸性能

項 目	性 能
型 式	UD-200S (松下電器産業製)
素 子 材 質	CaSO <sub>4</sub> : Tm
エネルギー依存性	±40% (>30keV)
測 定 範 囲	0.1mR~20R
感 度 均 一 性	バラツキ ±10%以内 再 現 性 ±5%以内
フェーディング量	8% / 年以下

表4.3 測定ポイント数

測定器	測定対象	測定ポイント数
Ge検出器	1次主冷却系配管 (A)	17 (内2点は機器部)
	1次主冷却系配管 (B)	3
TLD素子	1次主冷却系配管 (A)	$90 \times 4$ * <sup>1</sup>
	1次主冷却系配管 (B)	$93 \times 4$ $(15 \times 4)^{*2}$
	主中間熱交換器 (A)	$38 \times 8$
	主中間熱交換器 (B)	$39 \times 8$ $(39 \times 4)^{*2}$
	主循環ポンプ (A)	$35 \times 8$
	主循環ポンプ (B)	$37 \times 8$ $(37 \times 4)^{*2}$
	オーバーフローカラム (A)	$15 \times 4$
	オーバーフローカラム (B)	$15 \times 4$ (0) <sup>*2</sup>

(注) \*<sup>1</sup> :  $\times 4$ ,  $\times 8$  は径方向のポイント数。\*<sup>2</sup> : 第9回定期検時の測定ポイント数。

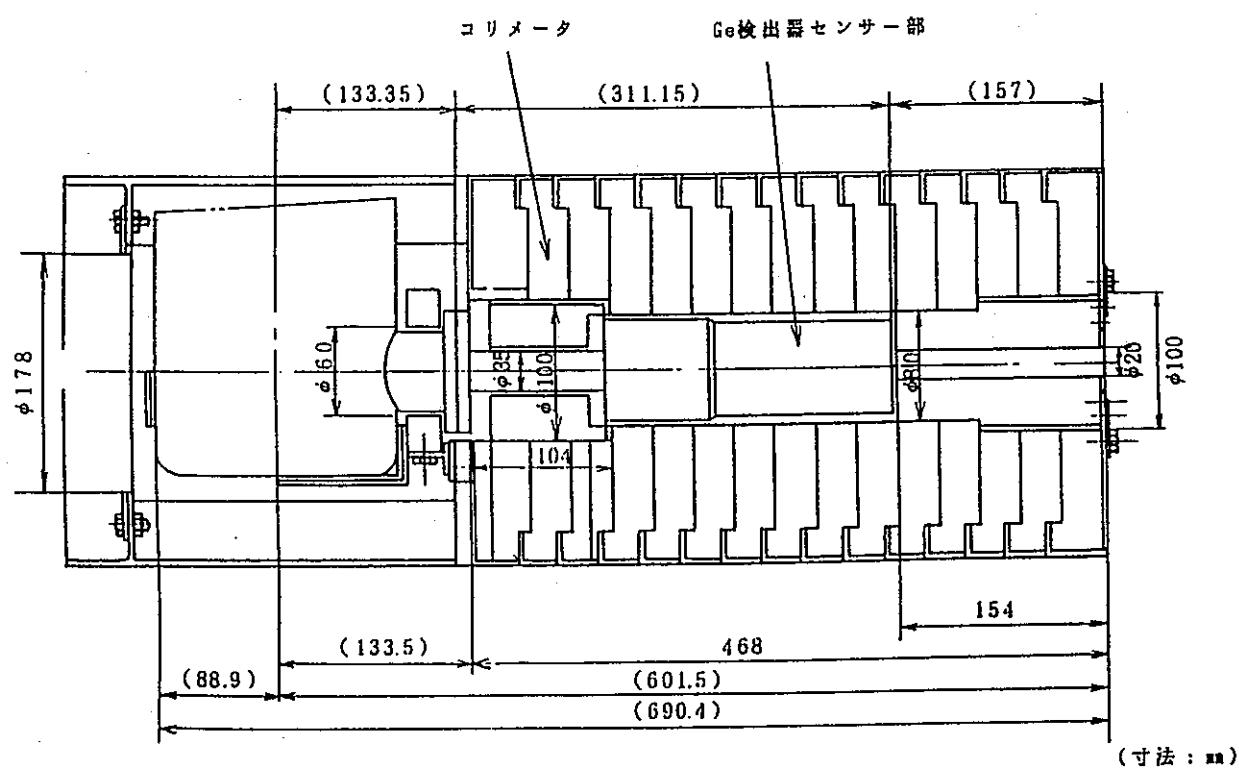
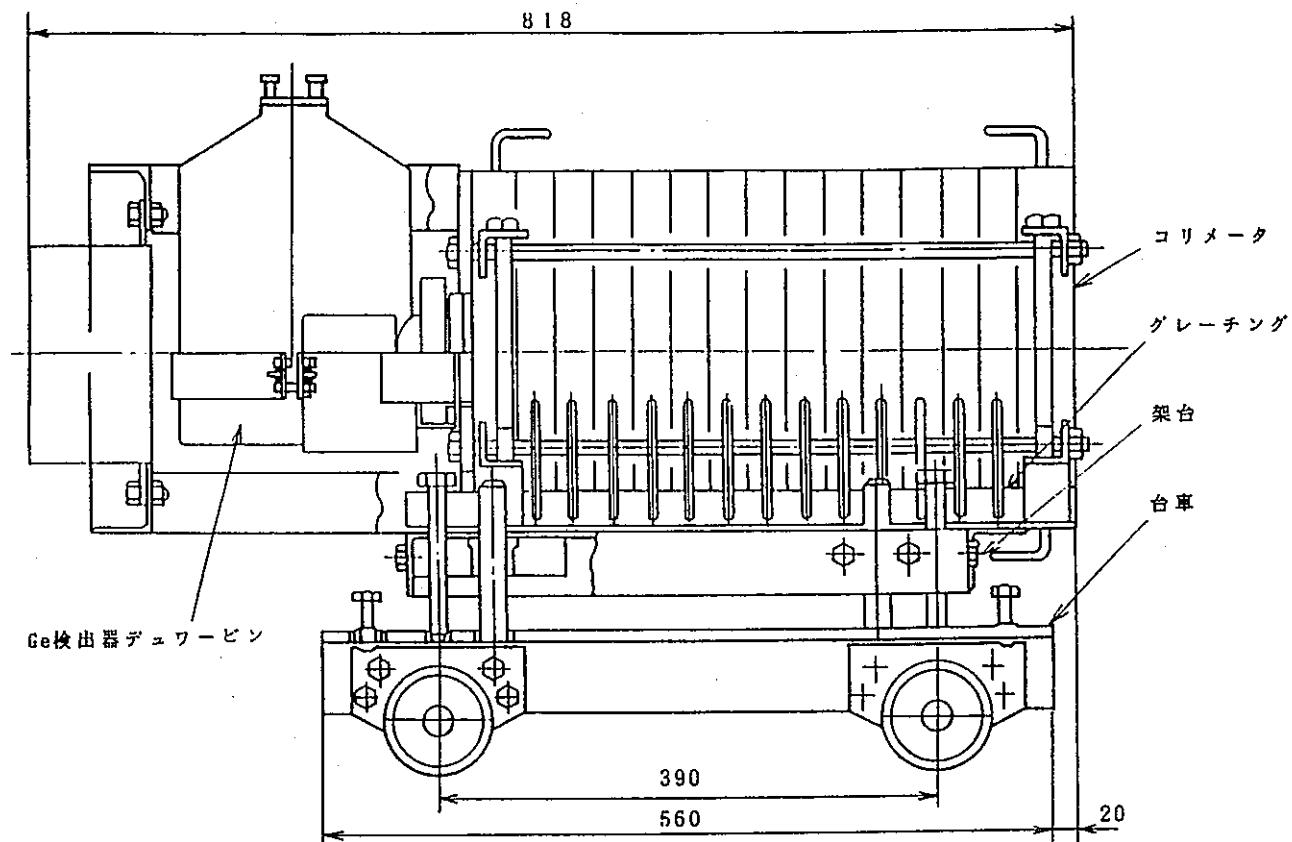
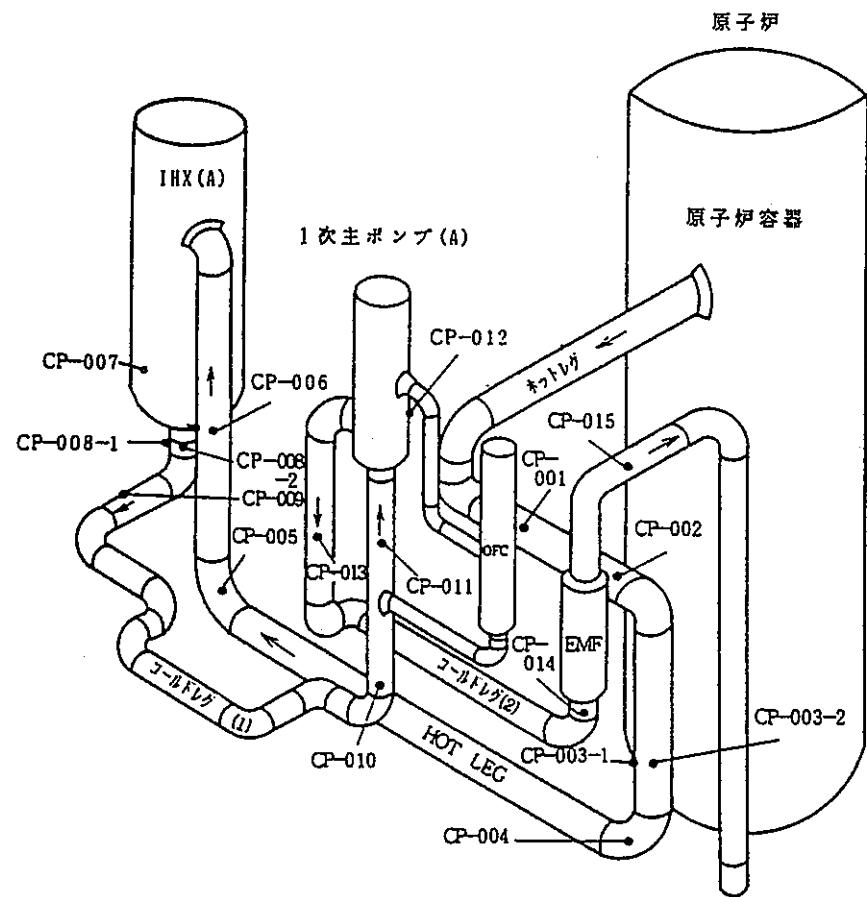
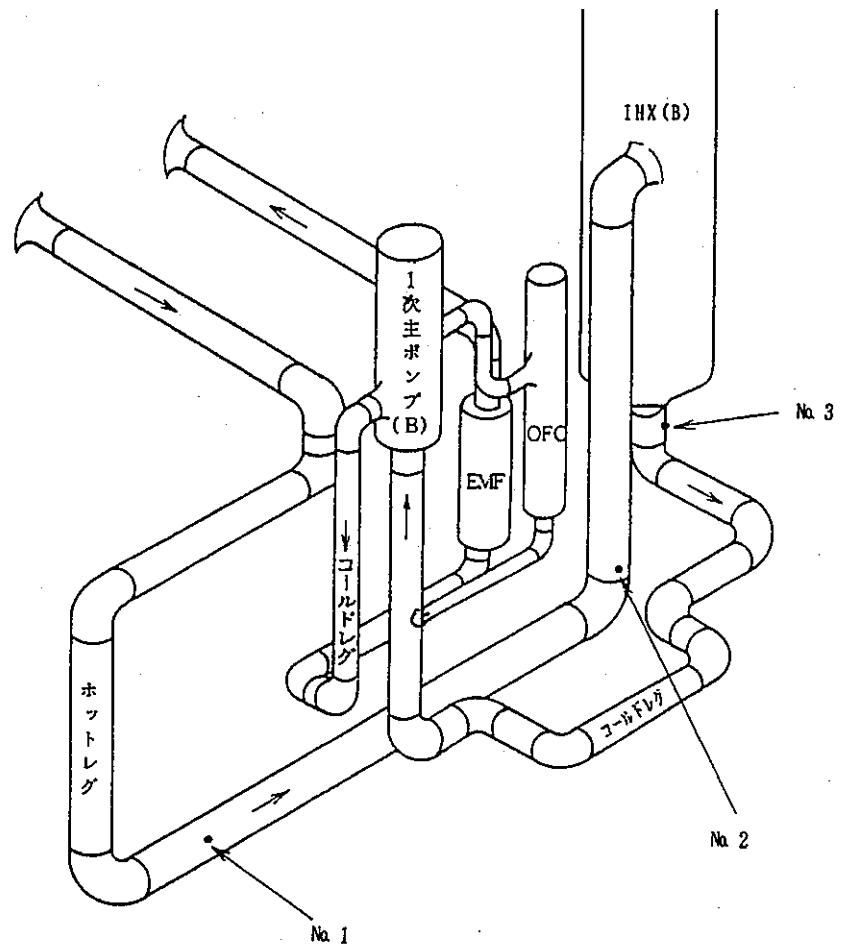


図4.1 CP測定用鉛コリメータ

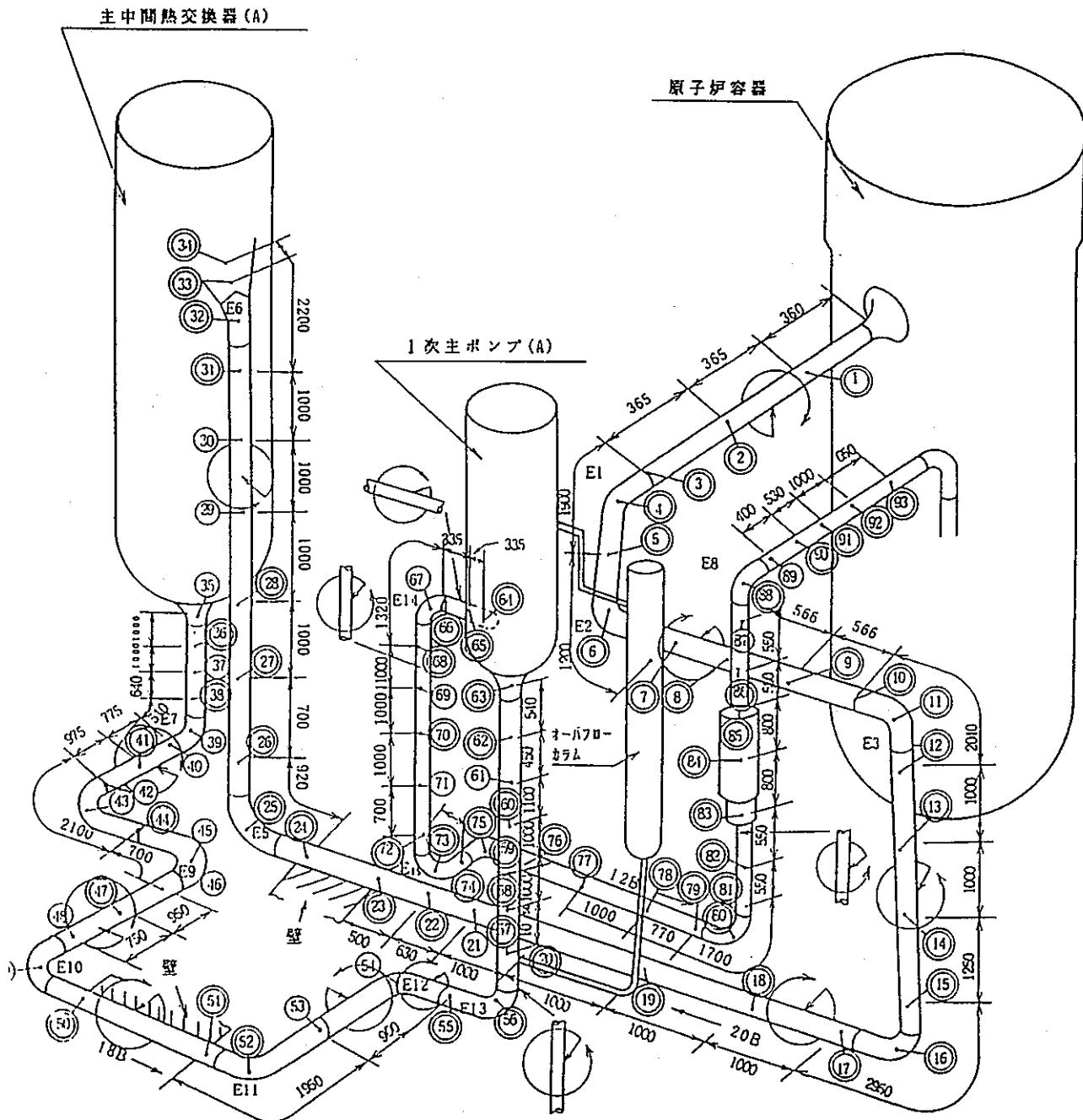


(a) A ルー プ



(b) B ルー プ

図4.2 ガンマ線スペクトルの測定位置



注記 1) ①～⑩ 測定点の位置を示す。

なお、配管周方向の位置は下記に従う。



図 4.3(1) 1 次主冷却系配管 (A) 表面線量率分布の測定位置

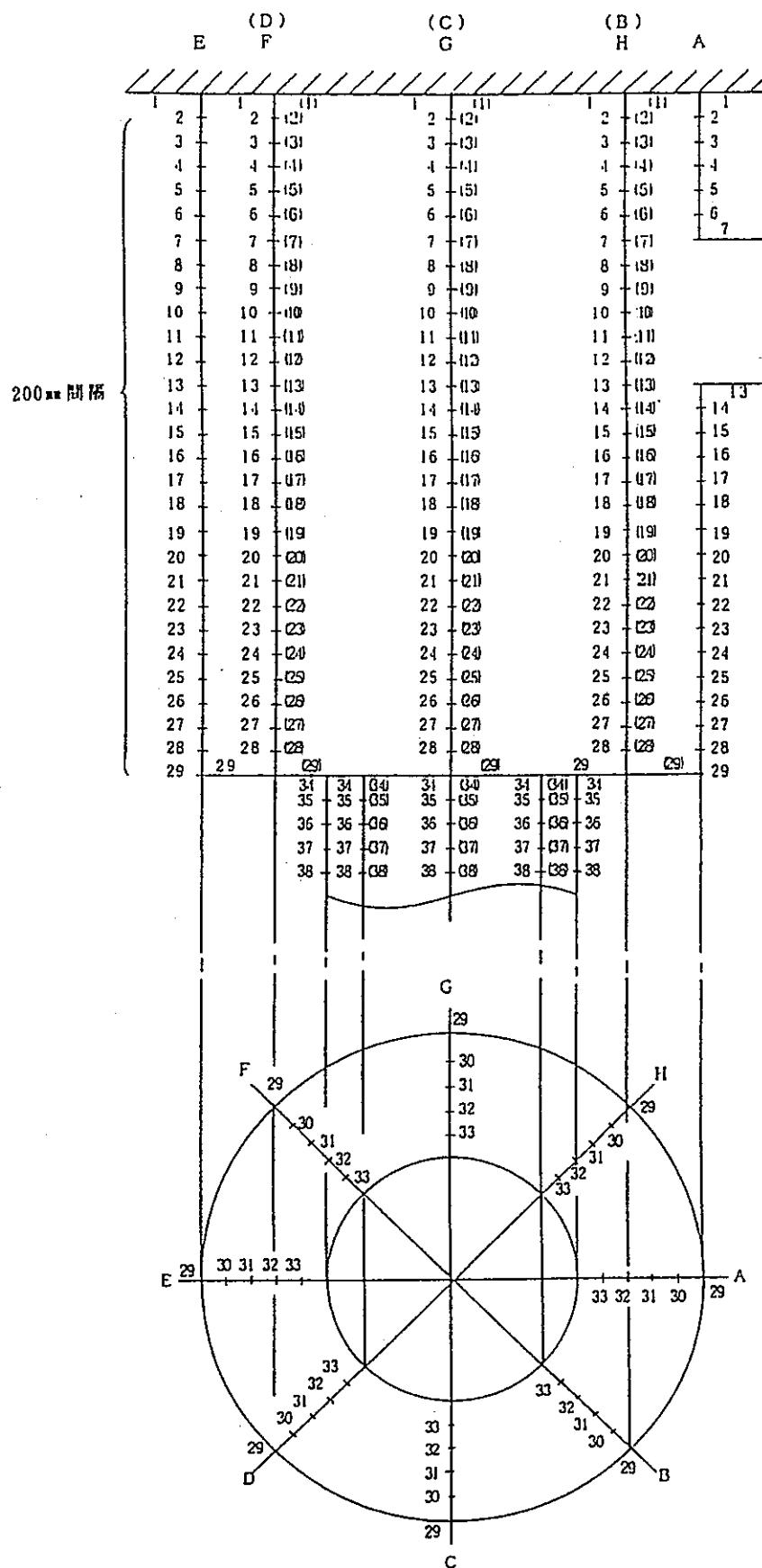


図4.3(2) 主中間熱交換器（A）表面線量率分布の測定位置

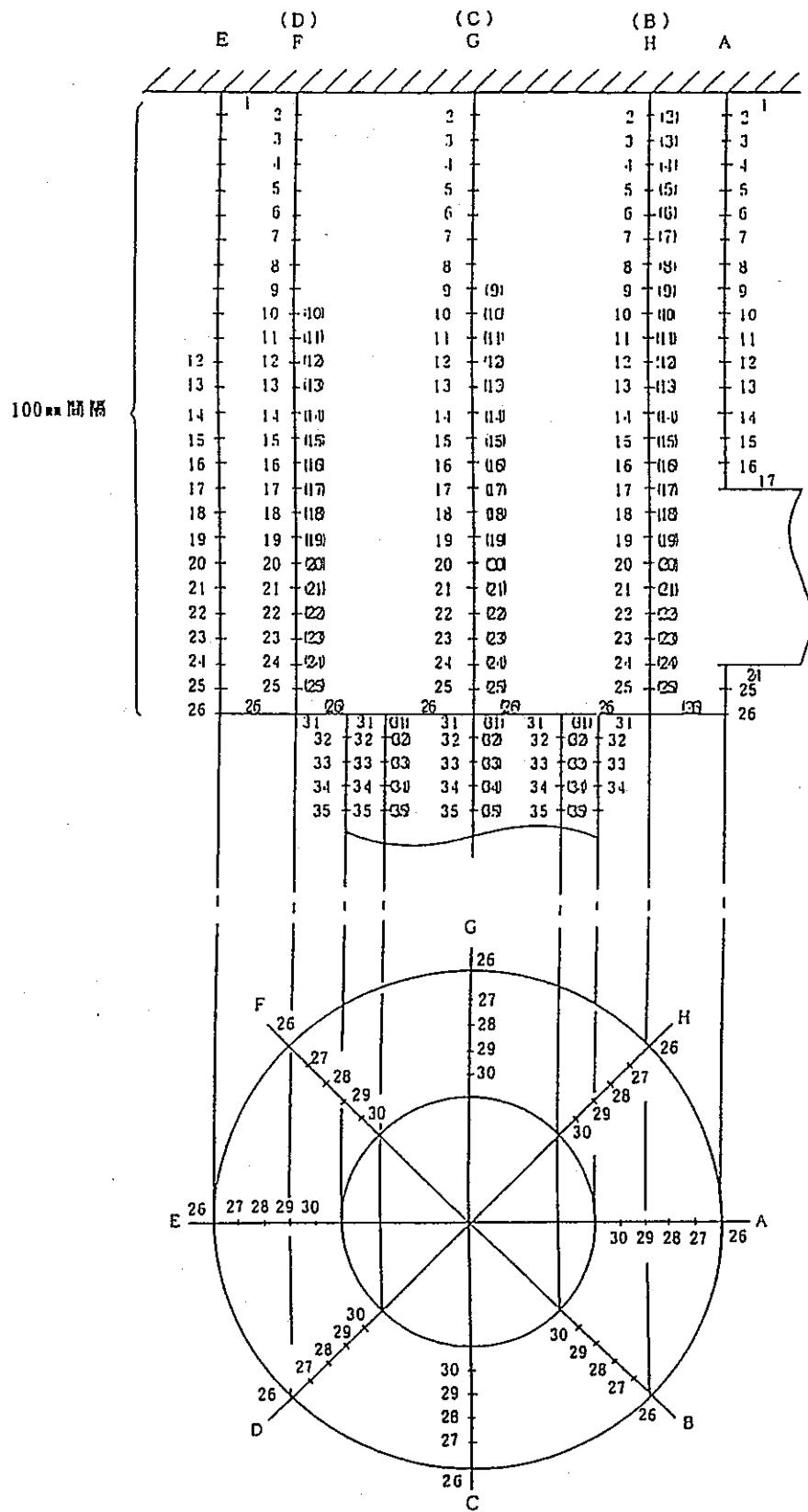


図4.3(3) 主循環ポンプ(A) 表面線量率分布の測定位置

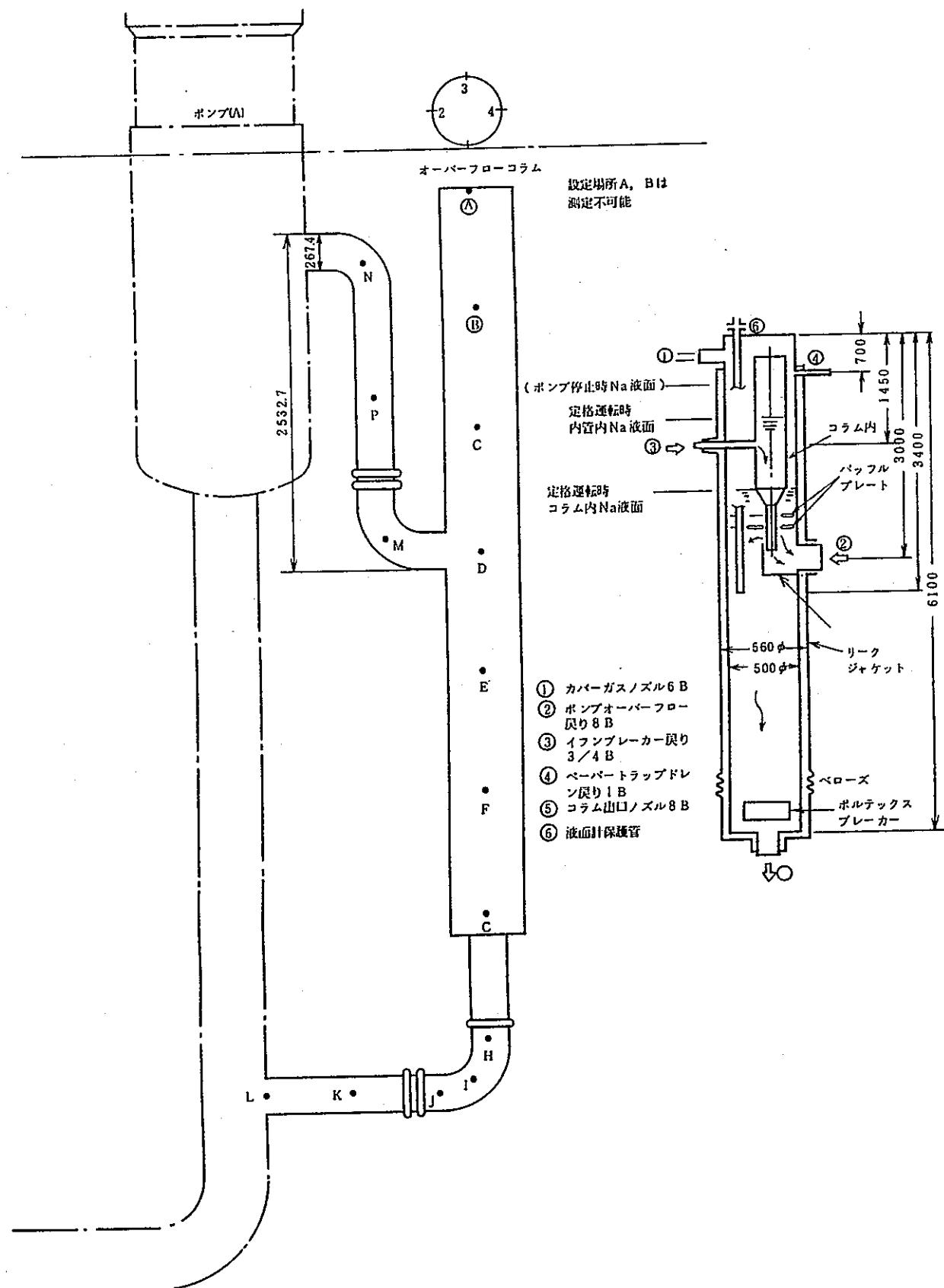


図4.3(4) オーバーフロー柱(A) 表面線量率分布の測定位置

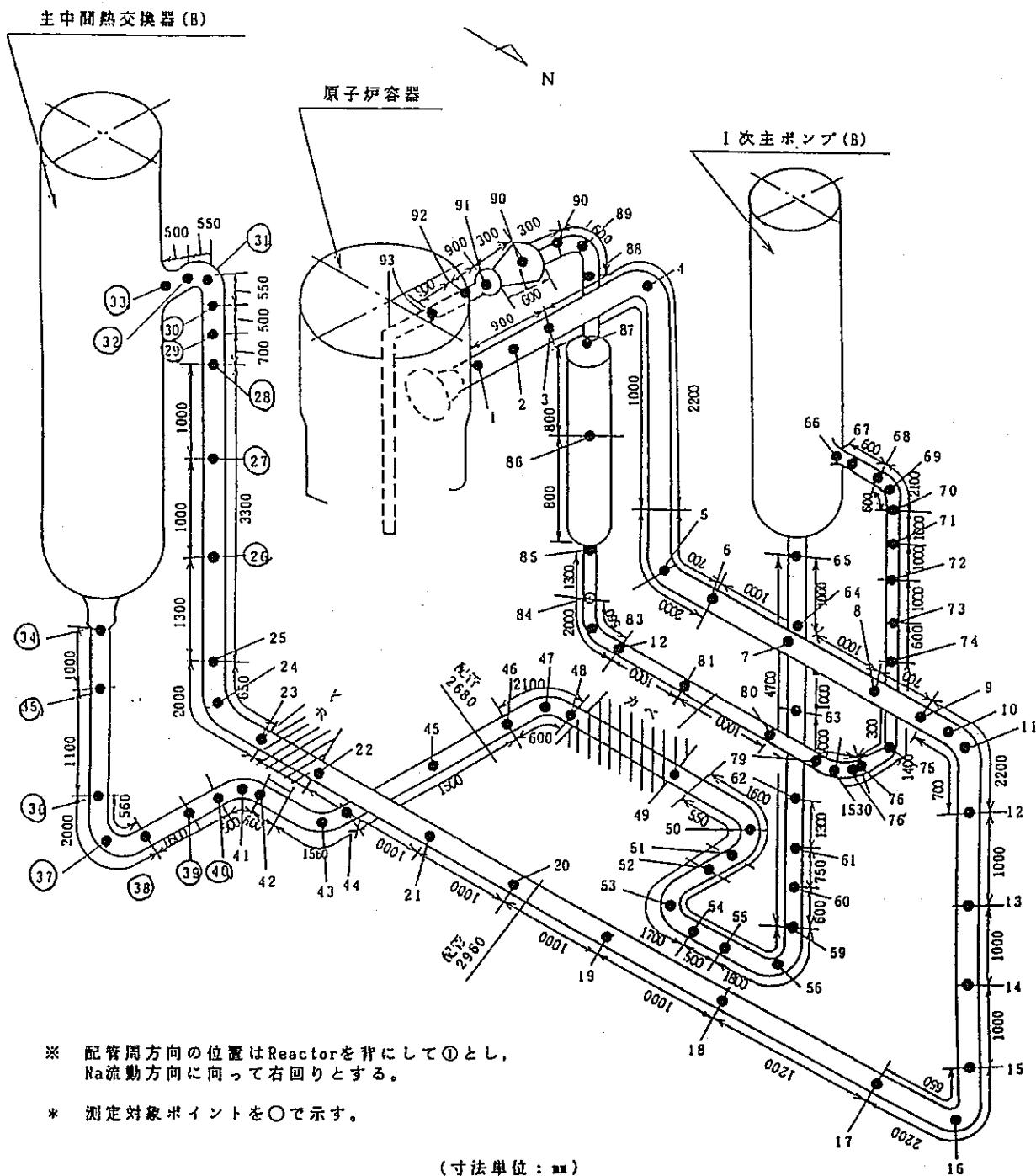


図 4.3(5) 1 次主冷却系配管 (B) 表面線量率分布の測定位置

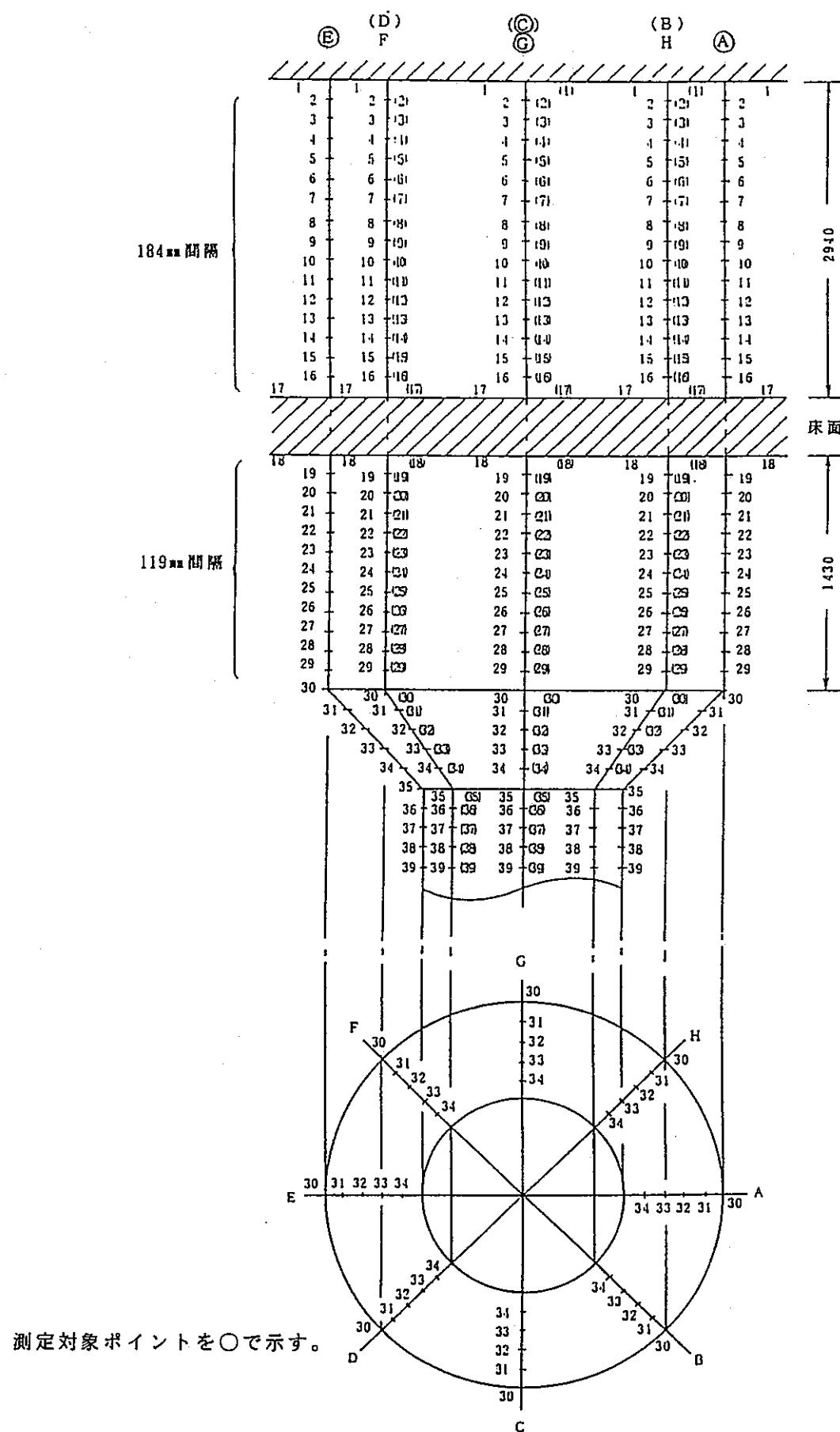


図4.3(6) 主中間熱交換器（B）表面線量率分布の測定位置

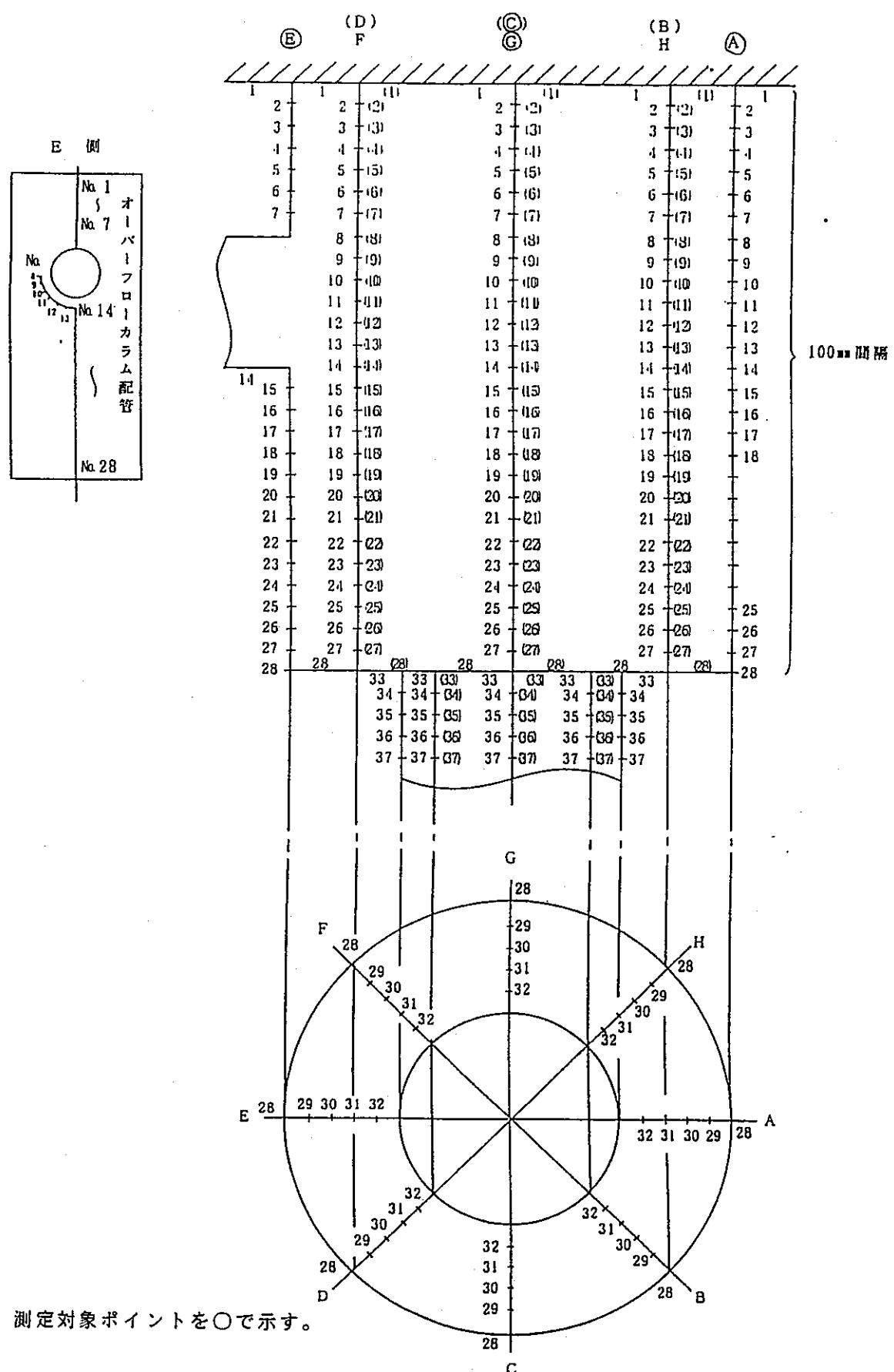


図4.3(7) 主循環ポンプ(B)表面線量率分布の測定位置

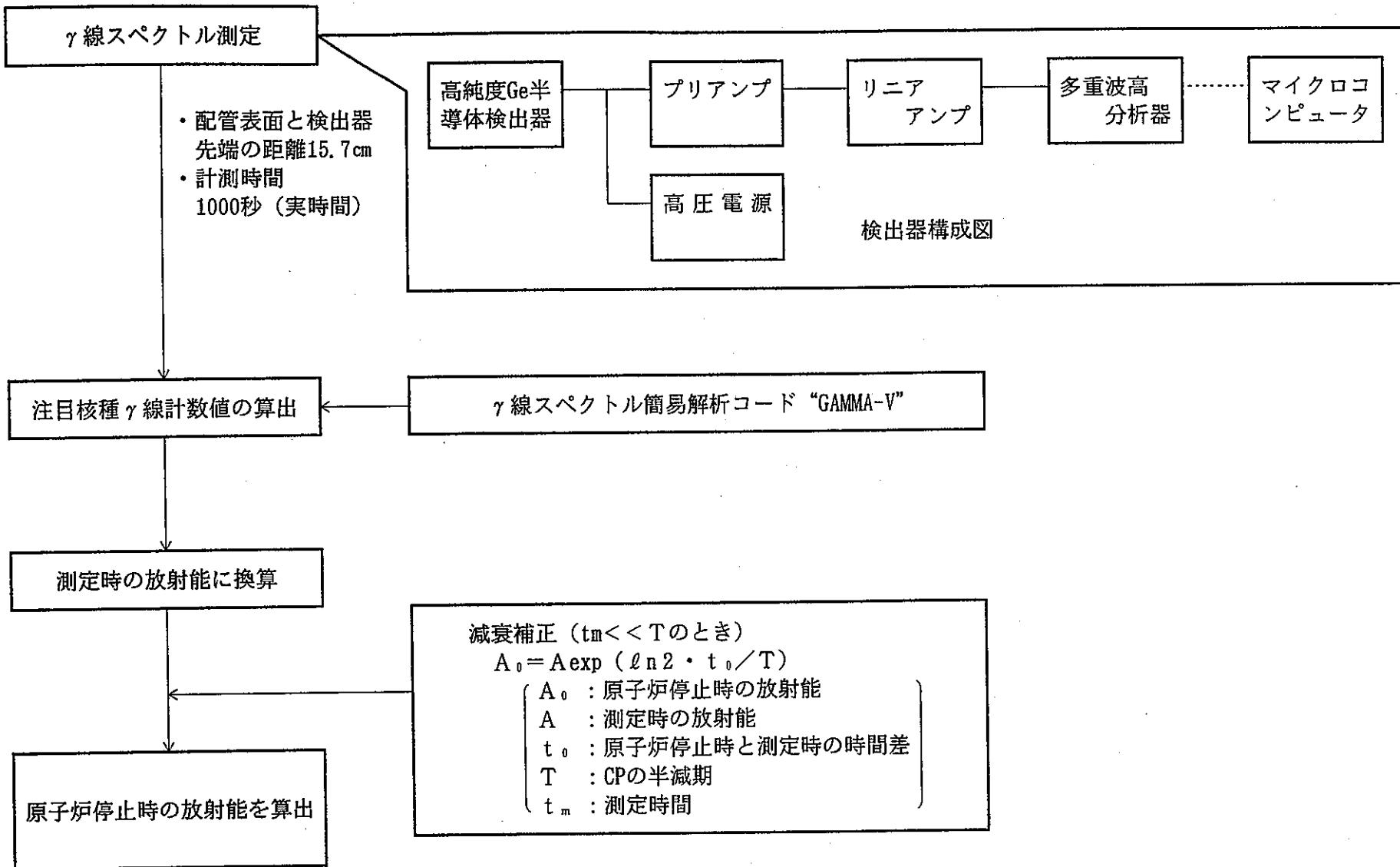


図4.4 ガンマ線スペクトル測定値の減衰補正法のフロー

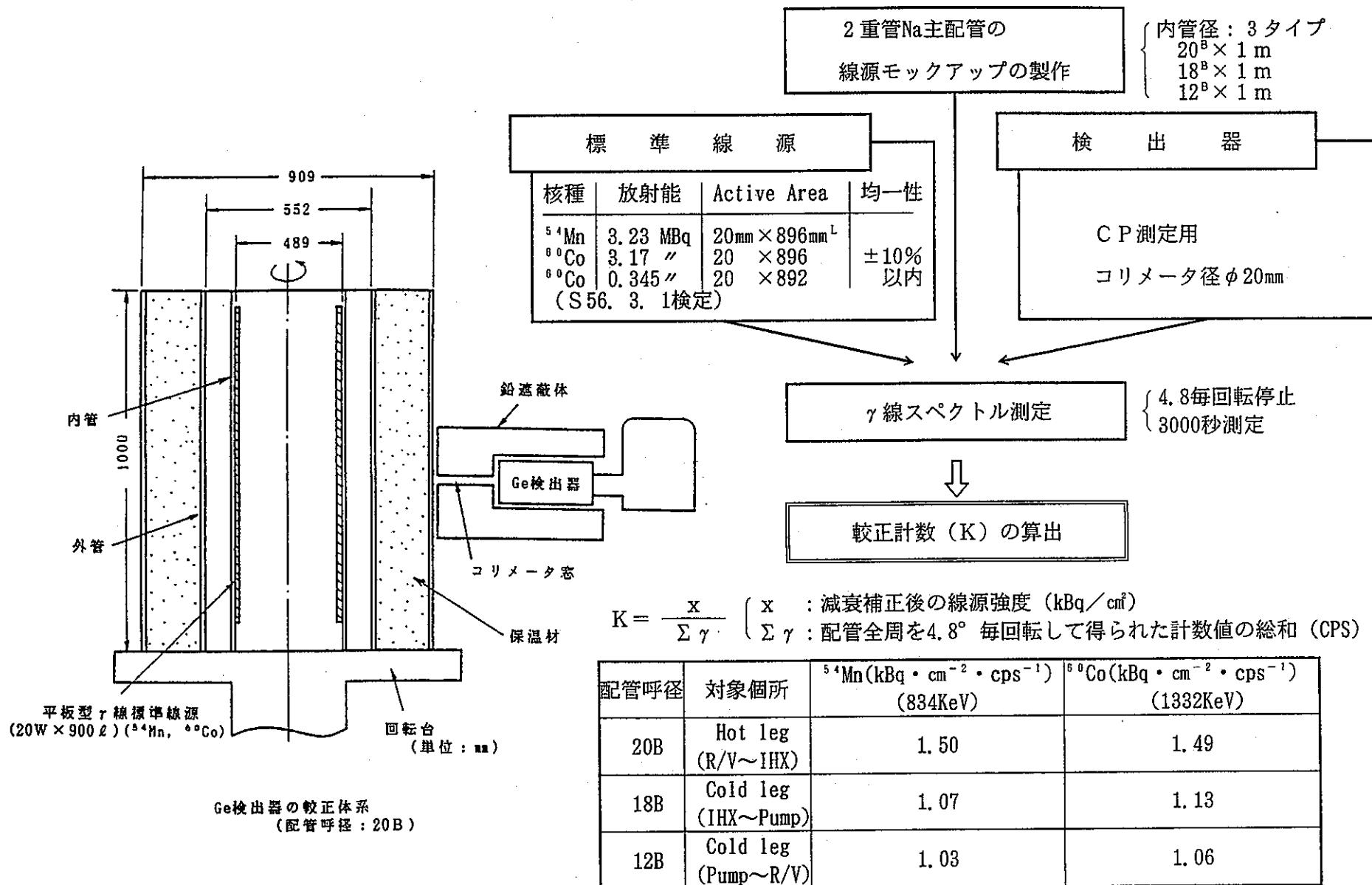


図 4.5 Ge半導体検出器の校正体系、方法および校正係数の算出結果

## 5. 測 定 結 果

本章では、第10回定期検査期間中に測定した結果を報告する。

### 5.1 CP付着分布

#### (1) ガンマ線スペクトル

高純度Ge半導体検出器を用い、一次主冷却系AループおよびBループの測定対象部についてガンマ線スペクトルを測定し、放射性核種を定量分析した。定量分析した主要な核種は<sup>54</sup>Mnと<sup>60</sup>Coであり、いくつかの位置で微量の<sup>58</sup>Coが検出された。ガンマ線スペクトルの一例を図5.1に示す。いずれの測定位置でも主要な核種であった。

#### (2) 管壁CP付着密度

<sup>54</sup>Mnと<sup>60</sup>Coの計数率から管壁付着密度を求めた結果を表5.1と表5.2に示す。いずれも校正定数により測定時点の付着密度を求め、さらに減衰補正して原子炉停止直後の付着密度に換算したものである。この中から測定ポイント数の多いAループの配管各部について、測定位置とCPの付着密度の関係を図5.4に示す。図中、測定ポイントが周方向で2箇所あるCP-003およびCP-008については、その平均値で示した。また、<sup>58</sup>Coについては、配管のモックアップ装置で校正定数を求めていないため、<sup>54</sup>Mnと<sup>60</sup>Coの校正定数から一次の線形近似により<sup>58</sup>Coの校正定数を定め管壁付着密度に換算した。結果を表5.1から表5.3および図5.4に示す。

Aループの各測定ポイントにおけるCPの最大付着密度は、<sup>54</sup>Mnがコールドレグ部で約175kBq/cm<sup>2</sup>、<sup>60</sup>Coがホットレグ部で約11.8kBq/cm<sup>2</sup>および<sup>58</sup>Coがホットレグ部で約3.13kBq/cm<sup>2</sup>であった。

#### (3) CP付着分布の特徴

Aループの主配管のうち、原子炉容器出口から主中間熱交換器入口までをホットレグ(HL)、中間熱交換器出口から主循環ポンプ入口までをコールドレグCL(1)、主循環ポンプ出口から原子炉容器入口までをCL(2)として領域を区分し、それぞれの領域でのCPの付着分布をみると、次のような特徴が認められた。

① <sup>54</sup>Mnの付着量はCL配管に多く、しかも高流速側(CL(2))ほど多い。

領域別付着密度の割合：

$$HL : CL(1) : CL(2) = 1.0 : 2.5 : 4.2$$

②  $^{60}\text{Co}$ の付着量はHL配管に最も多いが、CL(2)にも多い。

領域別付着密度の割合：

$$\text{HL} : \text{CL}(1) : \text{CL}(2) = 1.0 : 0.36 : 0.88$$

③ 各領域における $^{54}\text{Mn}$ の付着密度に対する $^{60}\text{Co}$ の付着密度はつぎのとおりであった。

$$\text{HL} : 0.28$$

$$\text{CL}(1) : 0.04$$

$$\text{CL}(2) : 0.06$$

## 5.2 1次主冷却系配管の表面線量率

TLD素子を用いて1次主冷却系配管各部の表面線量率を測定した。表5.4と図5.3にAループ側、表5.5にBループ側の測定結果を示す。以下に得られた結果をまとめて示す。

- ① 全体系を測定したAループについては、原子炉容器および主循環ポンプの出口配管部に局所的な高線量率ポイントがあった。
- ② 配管のポイント最大表面線量率はAループ側が主循環ポンプ入口配管部（ポイント65、方向1）で $2.2\text{mSv/h}$ であった。

## 5.3 機器の表面線量率

### (1) 主中間熱交換器の表面線量率

主中間熱交換器A（IHX-(A)）およびB（IHX-(B)）の表面線量率測定結果を表5.6および表5.7に、胴体部分（IHX-(A)；ポイント1～29）を三次元的に表示したものと図5.4にそれぞれ示す。得られた結果は以下の通りである。

- ① IHX-(A)の胴体部分の表面線量率の分布は、過去の測定値と同じ傾向と示し周方向の分布はほぼ均一で、高さ方向でみるとシュラウドシールリング部（ポイント13前後）が平均表面線量率の約1.3倍、下部管板部（ポイント21前後）が約3.0倍となっていた。

一方、IHX-(B)でも、過去の測定値と同じ傾向を示し、周方向の分布は不均一である。高さ方向でみると、1次系配管入口部（ポイント5～7、方向A）で平均表面線量率の約3.5倍、シュラウドシールリング部（ポイント13前後）で平均表面線量率の約1.8倍、下部管板部（ポイント19前後）で約1.5倍を示した。

② 最大表面線量率はIHX-(A)が下部プレナム部(ポイント22, 方向G)で約2.2mSv/h, IHX-(B)が出口配管部(ポイント35, 方向E)で約6.3mSv/hであった。

③ 平均表面線量率はIHX-(A)が約0.61mSv/h, IHX-(B)が約2.4mSv/hであった。

(2) 主循環ポンプおよびオーバフローカラムの表面線量率

主循環ポンプA(PUMP-(A))およびB(PUMP-(B))の表面線量率測定結果を表5.8および表5.9に示す。一例として、図5.9にPUMP-(A)の胴体部分(ポイント1~26)の表面線量率を三次元表示する。また、Aループのオーバフローカラムの表面線量率測定結果を表5.10に示す。

得られた結果は以下の通りである。

① ポンプ胴体の表面線量率分布はPUMP-(A)とPUMP-(B)のいずれも局所的なピークを除き周方向分布がほぼ均一で、高さ方向ではNa液位部(ポイント7)を境としてカバーガス部の表面線量率が低く、Na接液部が高い。局所的にはオーバフロー配管取付部と軸受台の位置が他よりもいくらか高めであった。

② 主循環ポンプの最大表面線量率はいずれもオーバフロー配管接続部(ポイント13, 方向E)の直下でPUMP-(A)が3.0mSv/h, PUMP-(B)が2.8mSv/hであった。また、オーバフローカラムではボルテックスブレーカ部(A)が3.4mSv/hであった。

③ 平均表面線量率は、

PUMP-(A) ポンプ本体 ; 1.1mSv/h

オーバフローカラム ; 1.3mSv/h

PUMP-(B) ポンプ本体 ; 1.2mSv/h

であった。

表5.1 第10回定検時<sup>54</sup>Mn付着量測定結果

測定位置	測定日	計数率 (cps)	較正係数 (kBq/cm <sup>2</sup> /cps)	付着量 (kBq/cm <sup>2</sup> )			
				測定時	原子炉停止時 : 1993. 3. 26		
					実測値	平均値	
A LOOP HOT LEG (R/V～IHX)	CP-001	1993. 6. 15 15:32	15.1	1.50	22.6	27.1	30.0
	CP-002	1993. 6. 15 14:37	17.6		26.4	31.6	
	CP-003-1	1993. 6. 16 10:26	5.03		7.56	* 9.07	
	CP-003-2	1993. 6. 16 14:17	7.50		11.3	*13.5	
	CP-004	1993. 6. 18 10:23	17.9		26.9	32.4	
	CP-005	1993. 6. 23 15:09	18.3		27.5	33.6	
	CP-006	1993. 6. 23 13:57	13.8		20.8	25.3	
A LOOP COLD LEG (IHX～PUMP)	CP-008-1	1993. 6. 29 15:23	53.3	1.07	57.1	70.5	74.4
	CP-008-2	1993. 6. 30 9:46	58.3		62.5	77.3	
	CP-009	1993. 6. 29 14:21	57.1		61.2	75.5	
	CP-010	1993. 6. 18 11:17	20.2		21.6	*26.0	
	CP-011	1993. 6. 16 15:17	63.0		67.5	80.7	
A LOOP COLD LEG (PUMP～R/V)	CP-013	1993. 6. 17 14:50	90.6	1.03	93.0	112	127
	CP-014	1993. 6. 16 11:24	142		145.9	175	
	CP-015	1993. 6. 15 11:23	77.5		79.5	95.2	
B LOOP HOT LEG (R/V～IHX)	CP-No.1	1993. 6. 24 16:08	5.63	1.50	8.46	10.3	25.8
	CP-No.2	1993. 6. 29 10:08	22.8		34.2	41.3	
B LOOP COLD LEG (IHX～PUMP)	CP-No.3	1993. 6. 24 10:07	67.8	1.07	72.7	88.7	88.7

注) \*印の付いたものは平均値から除く

表5.2 第10回定期検査時<sup>60</sup>Co付着量測定結果

測定位置	測定日	計数率 (cps)	較正係数 (kBq/cm <sup>2</sup> /cps)	付着量 (kBq/cm <sup>2</sup> )		原子炉停止時 : 1993. 3. 26	
				測定時	実測値		
					平均値		
A LOOP HOT LEG (R/V～IHX)	CP-001	1993. 6. 15 15:32	7.67	1.49	11.4	11.8	8.45
	CP-002	1993. 6. 15 14:37	5.13		7.65	7.87	
	CP-003-1	1993. 6. 16 10:26	7.28		10.9	11.2	
	CP-003-2	1993. 6. 16 14:17	3.69		5.50	5.67	
	CP-004	1993. 6. 18 10:23	5.96		8.89	9.16	
	CP-005	1993. 6. 23 15:09	6.17		9.20	9.50	
	CP-006	1993. 6. 23 13:57	2.58		8.85	3.98	
A LOOP COLD LEG (IHX～PUMP)	CP-008-1	1993. 6. 29 15:23	1.59	1.13	1.80	1.86	3.07
	CP-008-2	1993. 6. 30 9:46	1.69		1.92	1.99	
	CP-009	1993. 6. 29 14:21	1.26		1.43	*1.48	
	CP-010	1993. 6. 18 11:17	2.05		2.32	*2.39	
	CP-011	1993. 6. 16 15:17	4.60		5.22	5.37	
A LOOP COLD LEG (PUMP～R/V)	CP-013	1993. 6. 17 14:50	3.55	1.06	3.77	3.89	7.47
	CP-014	1993. 6. 16 11:24	8.11		8.61	8.87	
	CP-015	1993. 6. 15 11:23	8.85		9.39	9.67	
B LOOP HOT LEG (R/V～IHX)	CP-No.1	1993. 6. 24 16:08	4.87	1.49	7.27	7.51	11.8
	CP-No.2	1993. 6. 29 10:08	10.4		15.6	16.1	
B LOOP COLD LEG (IHX～PUMP)	CP-No.3	1993. 6. 24 10:07	8.38	1.13	9.49	9.80	9.80

注) \*印の付いたものは平均値から除く

表5.3 第10回定検時<sup>58</sup>Co付着量測定結果

測定位置	測定日	計数率 (cps)	較正係数 (kBq/cm <sup>2</sup> /cps)	付着量 (kBq/cm <sup>2</sup> )	
				測定時	原子炉停止時 : 1993. 3. 26
					実測値
A LOOP HOT LEG (R/V~IHX)	CP-001	1993. 6. 15 15:32	0.349	1.54	0.537 *1.19
	CP-002	1993. 6. 15 14:37	0.554		0.854 1.88
	CP-003-1	1993. 6. 16 10:26	0.911		1.40 3.13
	CP-003-2	1993. 6. 16 14:17	0.812		1.25 2.79
	CP-004	1993. 6. 18 10:23	0.309		0.476 *1.08
	CP-005	1993. 6. 23 15:09	0.541		0.833 1.99
	CP-006	1993. 6. 23 13:57	0.537		0.827 1.98
A LOOP COLD LEG (IHX~PUMP)	CP-008-1	1993. 6. 29 15:23	0.398	1.07	0.425 1.07
	CP-008-2	1993. 6. 30 9:46	0.482		0.515 1.31
	CP-009	1993. 6. 29 14:21	0.576		0.615 1.56
	CP-010	1993. 6. 18 11:17	0.186		0.199 *0.451
	CP-011	1993. 6. 16 15:17	0.371		0.397 *0.884
A LOOP COLD LEG (PUMP~R/V)	CP-013	1993. 6. 17 14:50	0.469	1.02	0.481 *1.08
	CP-014	1993. 6. 16 11:24	0.434		0.444 *0.989
	CP-015	1993. 6. 15 11:23	—		— —
B LOOP HOT LEG (R/V~IHX)	CP-No1	1993. 6. 24 16:08	1.07	1.54	1.65 3.99
	CP-No2	1993. 6. 29 10:08	0.937		1.44 3.65
B LOOP COLD LEG (IHX~PUMP)	CP-No3	1993. 6. 24 10:07	0.754	1.07	0.805 1.94 1.94

注) \*印の付いたものは平均値から除く



表5.5 第10回定検時 1次主冷却系配管（B）表面線量率分布の測定結果

単位: mSv/h

No.	T L D 位 置				平均
	.. 1 ..	.. 2 ..	.. 3 ..	.. 4 ..	
26	2.94E-01	1.67E-01	1.49E-01	3.15E-01	2.31E-01
27	2.08E-01	1.21E-01	1.51E-01	2.53E-01	1.83E-01
28	2.14E-01	1.22E-01	1.22E-01	2.64E-01	1.81E-01
29	5.36E-01	9.25E-01	2.33E-01	1.23E-01	4.55E-01
30	4.77E-01	1.11E+00	5.19E-01	2.62E-01	5.92E-01
31	7.17E-01	1.18E+00	6.34E-01	7.39E-01	8.18E-01
32	2.09E+00	5.19E+00	1.76E+00	7.18E+00	4.06E+00
33	3.13E+00	5.60E+00	4.17E+00	5.93E+00	4.71E+00
34	2.20E+00	2.20E+00	2.18E+00	2.81E+00	2.35E+00
35	6.10E-01	6.33E-01	7.62E-01	8.76E-01	7.20E-01
36	5.34E-01	5.81E-01	5.77E-01	5.05E-01	5.49E-01
37	3.87E-01	3.83E-01	4.27E-01	6.06E-01	4.50E-01
38	4.65E-01	3.29E-01	5.07E-01	6.05E-01	4.77E-01
39	2.99E-01	2.43E-01	4.42E-01	4.61E-01	3.16E-01
40	5.87E-01	4.17E-01	4.40E-01	4.85E-01	4.82E-01

表5.6 第10回定検時主中間熱交換器（A）表面線量率分布の測定結果

単位: mSv/h

No.	T L D 位置							
	-- A --	-- B --	-- C --	-- D --	-- E --	-- F --	-- G --	-- H --
1	8.35E-02	9.93E-02	6.55E-02	7.02E-02	6.08E-02	7.40E-02	3.72E-01	6.73E-02
2	1.55E-01	1.56E-01	8.91E-02	7.86E-02	7.80E-02	1.14E-01	3.16E-01	1.31E-01
3	2.34E-01	2.22E-01	1.42E-01	1.10E-01	1.36E-01	1.65E-01	2.32E-01	1.98E-01
4	3.26E-01	2.77E-01	2.02E-01	1.49E-01	1.98E-01	1.72E-01	2.18E-01	2.42E-01
5	4.28E-01	3.54E-01	2.59E-01	3.81E-01	2.64E-01	2.63E-01	2.39E-01	3.02E-01
6	4.94E-01	4.30E-01	3.17E-01	3.34E-01	3.27E-01	3.27E-01	3.48E-01	4.08E-01
7	4.83E-01	4.83E-01	4.04E-01	4.67E-01	3.92E-01	3.71E-01	4.03E-01	4.57E-01
8	---	5.11E-01	4.64E-01	5.53E-01	4.44E-01	4.34E-01	4.78E-01	5.03E-01
9	---	5.58E-01	5.26E-01	5.80E-01	5.52E-01	5.21E-01	4.72E-01	5.82E-01
10	---	5.96E-01	5.81E-01	6.50E-01	6.68E-01	6.81E-01	5.01E-01	5.95E-01
11	---	6.25E-01	6.24E-01	7.12E-01	8.51E-01	8.23E-01	5.80E-01	6.05E-01
12	---	7.19E-01	6.53E-01	5.99E-01	1.09E+00	1.03E+00	7.71E-01	6.40E-01
13	8.49E-01	6.95E-01	7.15E-01	3.56E-01	1.24E+00	1.10E+00	7.60E-01	7.09E-01
14	7.66E-01	6.82E-01	7.22E-01	4.80E-01	1.14E+00	8.53E-01	7.46E-01	6.07E-01
15	6.89E-01	6.83E-01	6.45E-01	6.31E-01	8.68E-01	7.20E-01	7.68E-01	5.69E-01
16	7.16E-01	7.76E-01	7.17E-01	5.84E-01	6.82E-01	7.25E-01	7.21E-01	6.26E-01
17	8.95E-01	9.17E-01	7.97E-01	5.80E-01	7.20E-01	8.11E-01	8.15E-01	8.27E-01
18	8.20E-01	1.21E+00	9.29E-01	6.87E-01	8.66E-01	1.05E+00	9.54E-01	9.49E-01
19	1.96E+00	1.43E+00	1.15E+00	8.74E-01	1.24E+00	1.48E+00	1.29E+00	1.32E+00
20	1.58E+00	2.00E+00	1.61E+00	1.28E+00	1.76E+00	2.04E+00	1.72E+00	1.53E+00
21	2.23E+00	2.00E+00	2.17E+00	1.58E+00	2.20E+00	1.87E+00	2.06E+00	2.04E+00
22	2.10E+00	9.67E-01	2.32E+00	2.12E+00	2.46E+00	1.10E+00	2.05E+00	1.57E+00
23	1.12E+00	6.09E-01	1.09E+00	1.96E+00	1.03E+00	6.67E-01	9.47E-01	6.62E-01
24	6.25E-01	4.72E-01	5.71E-01	8.51E-01	5.49E-01	4.86E-01	5.81E-01	5.02E-01
25	4.50E-01	4.06E-01	4.28E-01	4.91E-01	4.84E-01	4.48E-01	5.24E-01	4.21E-01
26	3.92E-01	2.83E-01	3.71E-01	4.03E-01	3.61E-01	3.16E-01	4.33E-01	3.81E-01
27	2.61E-01	2.41E-01	2.87E-01	3.43E-01	2.75E-01	2.65E-01	3.04E-01	2.26E-01
28	2.30E-01	2.24E-01	2.50E-01	2.29E-01	2.36E-01	2.61E-01	2.84E-01	2.62E-01
29	2.25E-01	2.57E-01	2.32E-01	2.20E-01	2.34E-01	2.58E-01	2.60E-01	2.54E-01
30	2.36E-01	2.31E-01	2.05E-01	2.16E-01	2.20E-01	2.35E-01	2.62E-01	2.73E-01
31	3.09E-01	2.81E-01	2.36E-01	2.73E-01	2.89E-01	3.26E-01	2.82E-01	2.87E-01
32	4.28E-01	3.77E-01	3.65E-01	3.71E-01	3.87E-01	4.19E-01	3.85E-01	3.67E-01
33	5.65E-01	5.86E-01	5.13E-01	5.23E-01	5.40E-01	5.88E-01	4.73E-01	5.67E-01
34	8.08E-01	7.50E-01	7.13E-01	7.84E-01	7.74E-01	7.23E-01	7.72E-01	7.87E-01
35	6.39E-01	6.60E-01	5.22E-01	5.80E-01	6.35E-01	6.45E-01	6.38E-01	6.23E-01
36	5.42E-01	5.59E-01	5.02E-01	4.79E-01	4.96E-01	5.41E-01	5.36E-01	5.32E-01
37	4.25E-01	4.29E-01	3.76E-01	3.62E-01	3.92E-01	3.99E-01	3.90E-01	3.93E-01
38	3.42E-01	3.65E-01	2.98E-01	2.90E-01	3.21E-01	3.27E-01	3.46E-01	3.32E-01

表5.7 第10回定検時主中間熱交換器（B）表面線量率分布の測定結果

単位: mSv/h

No.	T L D 位 置			
	-- A --	-- C --	-- E --	-- G --
1	1.26E+00	4.33E-01	7.53E-01	6.71E-01
2	1.68E+00	5.44E-01	9.53E-01	9.99E-01
3	2.66E+00	7.68E-01	1.02E+00	1.40E+00
4	3.68E+00	1.36E+00	1.95E+00	1.85E+00
5	6.23E+00	1.88E+00	1.66E+00	2.33E+00
6	1.13E+01	2.78E+00	2.05E+00	2.42E+00
7	7.46E+00	2.88E+00	2.30E+00	1.90E+00
8	5.85E+00	1.41E+00	1.14E+00	2.05E+00
9	3.35E+00	1.18E+00	1.06E+00	1.97E+00
10	3.40E+00	6.71E-01	9.30E-01	1.90E+00
11	3.68E+00	8.75E-01	8.00E-01	1.62E+00
12	3.93E+00	1.04E+00	7.37E-01	1.59E+00
13	4.03E+00	1.21E+00	8.05E-01	1.47E+00
14	4.63E+00	1.49E+00	1.03E+00	1.60E+00
15	2.75E+00	2.12E+00	1.26E+00	1.52E+00
16	2.38E+00	2.35E+00	8.81E-01	1.08E+00
17	1.62E+00	1.28E+00	7.06E-01	1.02E+00
18	1.91E+00	2.51E+00	4.10E+00	2.60E+00
19	1.42E+00	2.56E+00	3.93E+00	2.21E+00
20	8.74E-01	1.77E+00	2.42E+00	1.35E+00
21	6.99E-01	1.03E+00	1.77E+00	1.11E+00
22	4.75E-01	7.71E-01	1.50E+00	9.66E-01
23	4.83E-01	8.63E-01	1.37E+00	1.15E+00
24	5.56E-01	1.46E+00	1.66E+00	1.79E+00
25	7.18E-01	1.18E+00	2.22E+00	1.61E+00
26	7.07E-01	1.46E+00	2.29E+00	1.91E+00
27	7.53E-01	1.65E+00	3.01E+00	2.16E+00
28	6.89E-01	2.05E+00	3.93E+00	2.28E+00
29	6.48E-01	1.98E+00	3.60E+00	2.37E+00
30	7.31E-01	2.06E+00	3.60E+00	2.07E+00
31	1.03E+00	2.56E+00	4.22E+00	2.51E+00
32	1.52E+00	3.09E+00	4.72E+00	3.32E+00
33	2.09E+00	3.90E+00	5.77E+00	4.03E+00
34	3.48E+00	4.81E+00	6.27E+00	4.71E+00
35	3.87E+00	5.69E+00	6.31E+00	5.60E+00
36	3.56E+00	5.20E+00	4.53E+00	4.99E+00
37	3.25E+00	4.55E+00	4.86E+00	3.86E+00
38	2.61E+00	3.44E+00	3.28E+00	2.97E+00
39	2.22E+00	2.41E+00	2.69E+00	2.18E+00

表5.8 第10回定期検査時主循環ポンプ（A）表面線量率分布の測定結果

単位: mSv/h

No.	T L D 位置							
	-- A --	-- B --	-- C --	-- D --	-- E --	-- F --	-- G --	-- H --
1	2.34E-01	---	---	---	---	---	---	---
2	2.33E-01	1.61E-01	---	---	---	4.77E-01	3.58E-01	2.98E-01
3	2.74E-01	1.67E-01	---	---	---	5.38E-01	4.20E-01	3.50E-01
4	2.74E-01	1.83E-01	---	---	---	6.38E-01	4.88E-01	4.37E-01
5	2.76E-01	2.80E-01	---	---	---	6.93E-01	6.01E-01	5.20E-01
6	3.68E-01	2.97E-01	---	---	---	7.70E-01	6.90E-01	6.28E-01
7	4.77E-01	4.06E-01	---	---	---	9.71E-01	8.05E-01	8.16E-01
8	5.77E-01	4.61E-01	---	---	---	1.09E+00	1.05E+00	1.08E+00
9	7.31E-01	5.90E-01	7.86E-01	---	---	1.45E+00	1.35E+00	1.35E+00
10	8.77E-01	7.61E-01	9.57E-01	1.09E+00	---	1.84E+00	1.73E+00	1.75E+00
11	1.37E+00	1.05E+00	1.16E+00	1.33E+00	---	2.00E+00	2.12E+00	2.23E+00
12	1.26E+00	1.35E+00	1.30E+00	1.47E+00	1.62E+00	2.07E+00	2.18E+00	2.58E+00
13	1.36E+00	1.44E+00	1.42E+00	1.55E+00	2.01E+00	2.15E+00	2.28E+00	2.98E+00
14	1.46E+00	2.07E+00	1.33E+00	1.66E+00	2.34E+00	2.00E+00	2.02E+00	2.64E+00
15	1.60E+00	2.42E+00	1.36E+00	1.64E+00	2.70E+00	1.95E+00	1.82E+00	2.26E+00
16	1.81E+00	2.76E+00	1.30E+00	1.57E+00	2.73E+00	1.72E+00	1.57E+00	1.96E+00
17	2.05E+00	2.61E+00	1.29E+00	1.61E+00	3.27E+00	1.81E+00	1.55E+00	2.05E+00
18	---	1.91E+00	1.27E+00	1.48E+00	3.02E+00	1.75E+00	1.51E+00	1.88E+00
19	---	1.53E+00	1.31E+00	1.66E+00	2.37E+00	1.67E+00	1.48E+00	1.91E+00
20	---	1.60E+00	1.28E+00	1.64E+00	2.15E+00	1.58E+00	1.33E+00	1.70E+00
21	---	1.57E+00	1.13E+00	1.54E+00	2.07E+00	1.50E+00	1.08E+00	1.56E+00
22	---	1.59E+00	1.10E+00	1.34E+00	1.96E+00	1.29E+00	1.03E+00	1.27E+00
23	---	1.50E+00	9.56E-01	1.18E+00	1.95E+00	1.16E+00	9.29E-01	1.05E+00
24	1.66E+00	1.19E+00	8.36E-01	8.64E-01	1.82E+00	1.07E+00	8.63E-01	1.05E+00
25	1.40E+00	1.17E+00	7.98E-01	9.25E-01	1.64E+00	1.05E+00	8.37E-01	9.34E-01
26	1.33E+00	1.03E+00	7.41E-01	9.19E-01	1.48E+00	9.48E-01	8.43E-01	8.82E-01
27	1.22E+00	7.86E-01	7.01E-01	8.73E-01	8.90E-01	9.40E-01	8.05E-01	8.64E-01
28	1.25E+00	1.01E+00	8.39E-01	9.74E-01	8.44E-01	1.04E+00	1.02E+00	1.05E+00
29	1.34E+00	1.13E+00	9.64E-01	1.14E+00	1.19E+00	1.15E+00	1.20E+00	1.18E+00
30	1.32E+00	1.18E+00	1.13E+00	6.60E-01	1.18E+00	1.08E+00	1.35E+00	1.25E+00
31	1.08E+00	1.27E+00	1.22E+00	1.37E+00	1.23E+00	1.05E+00	1.37E+00	1.30E+00
32	8.84E-01	1.14E+00	1.14E+00	1.14E+00	1.10E+00	1.08E+00	1.11E+00	1.15E+00
33	9.74E-01	9.89E-01	9.87E-01	1.07E+00	9.31E-01	1.00E+00	8.58E-01	9.88E-01
34	9.54E-01	9.69E-01	8.58E-01	9.61E-01	8.29E-01	9.94E-01	8.78E-01	9.54E-01
35	9.45E-01	9.90E-01	9.14E-01	9.46E-01	8.71E-01	9.45E-01	8.57E-01	9.65E-01

表5.9 第10回定検時主循環ポンプ（B）表面線量率分布の測定結果

単位: mSv/h

NO.	T L D 位 置			
	-- A --	-- C --	-- E --	-- G --
1	2.17E-01	1.44E-01	7.30E-01	6.14E-01
2	2.61E-01	1.85E-01	5.77E-01	6.04E-01
3	2.88E-01	1.86E-01	5.35E-01	6.80E-01
4	3.52E-01	2.24E-01	5.30E-01	7.05E-01
5	4.43E-01	2.44E-01	5.65E-01	8.89E-01
6	5.39E-01	3.04E-01	6.96E-01	9.97E-01
7	6.43E-01	6.56E-01	9.53E-01	1.16E+00
8	7.73E-01	7.74E-01	1.04E+00	1.32E+00
9	9.87E-01	9.23E-01	9.96E-01	1.52E+00
10	1.15E+00	1.05E+00	1.02E+00	1.68E+00
11	1.36E+00	1.21E+00	1.20E+00	1.80E+00
12	1.62E+00	1.21E+00	1.57E+00	1.98E+00
13	1.87E+00	1.35E+00	1.76E+00	1.94E+00
14	1.98E+00	1.40E+00	1.79E+00	1.96E+00
15	2.33E+00	1.44E+00	1.94E+00	1.90E+00
16	2.63E+00	1.15E+00	2.01E+00	1.87E+00
17	2.75E+00	1.39E+00	2.00E+00	1.75E+00
18	2.57E+00	1.40E+00	2.00E+00	1.86E+00
19	---	1.49E+00	1.88E+00	1.95E+00
20	---	1.53E+00	1.88E+00	1.92E+00
21	---	1.60E+00	1.72E+00	1.83E+00
22	---	1.67E+00	1.70E+00	1.62E+00
23	---	1.64E+00	1.55E+00	1.42E+00
24	---	1.49E+00	1.49E+00	1.09E+00
25	2.03E+00	1.43E+00	1.54E+00	9.79E-01
26	1.60E+00	1.21E+00	1.47E+00	8.25E-01
27	1.44E+00	9.47E-01	1.41E+00	9.19E-01
28	1.15E+00	8.68E-01	1.40E+00	1.02E+00
29	1.31E+00	7.51E-01	1.09E+00	9.57E-01
30	1.27E+00	8.32E-01	1.10E+00	1.05E+00
31	1.15E+00	9.33E-01	1.18E+00	1.16E+00
32	1.18E+00	1.10E+00	1.25E+00	1.26E+00
33	1.22E+00	1.13E+00	1.29E+00	1.29E+00
34	1.05E+00	1.05E+00	1.15E+00	1.19E+00
35	1.10E+00	9.15E-01	1.13E+00	1.08E+00
36	1.12E+00	8.91E-01	1.04E+00	1.06E+00
37	1.03E+00	8.10E-01	9.97E-01	1.14E+00

表5.10 第10回定検時オーバーフローカラム（A）表面線量率分布の測定結果

単位: mSv/h

測定 位置	T L D 位 置			
	.. 1 ..	.. 2 ..	.. 3 ..	.. 4 ..
A	- - -	- - -	- - -	- - -
B	- - -	- - -	- - -	- - -
C	1.09E+00	1.12E+00	7.70E-01	9.80E-01
D	6.61E-01	1.05E+00	1.26E+00	1.47E+00
E	1.26E+00	3.99E-01	5.48E-01	6.68E-01
F	6.06E-01	4.98E-01	4.12E-01	4.15E-01
G	2.80E+00	2.03E+00	2.22E+00	2.64E+00
H	1.60E+00	1.44E+00	7.58E-01	6.98E-01
I	1.67E+00	2.08E+00	1.46E+00	3.43E+00
J	1.13E+00	1.16E+00	1.09E+00	1.37E+00
K	1.18E+00	1.52E+00	1.15E+00	7.81E-01
L	1.07E+00	1.26E+00	8.40E-01	1.11E+00
N	1.52E+00	2.13E+00	1.22E+00	1.22E+00
P	1.48E+00	1.72E+00	1.12E+00	1.12E+00
M	1.28E+00	1.01E+00	1.07E+00	1.22E+00

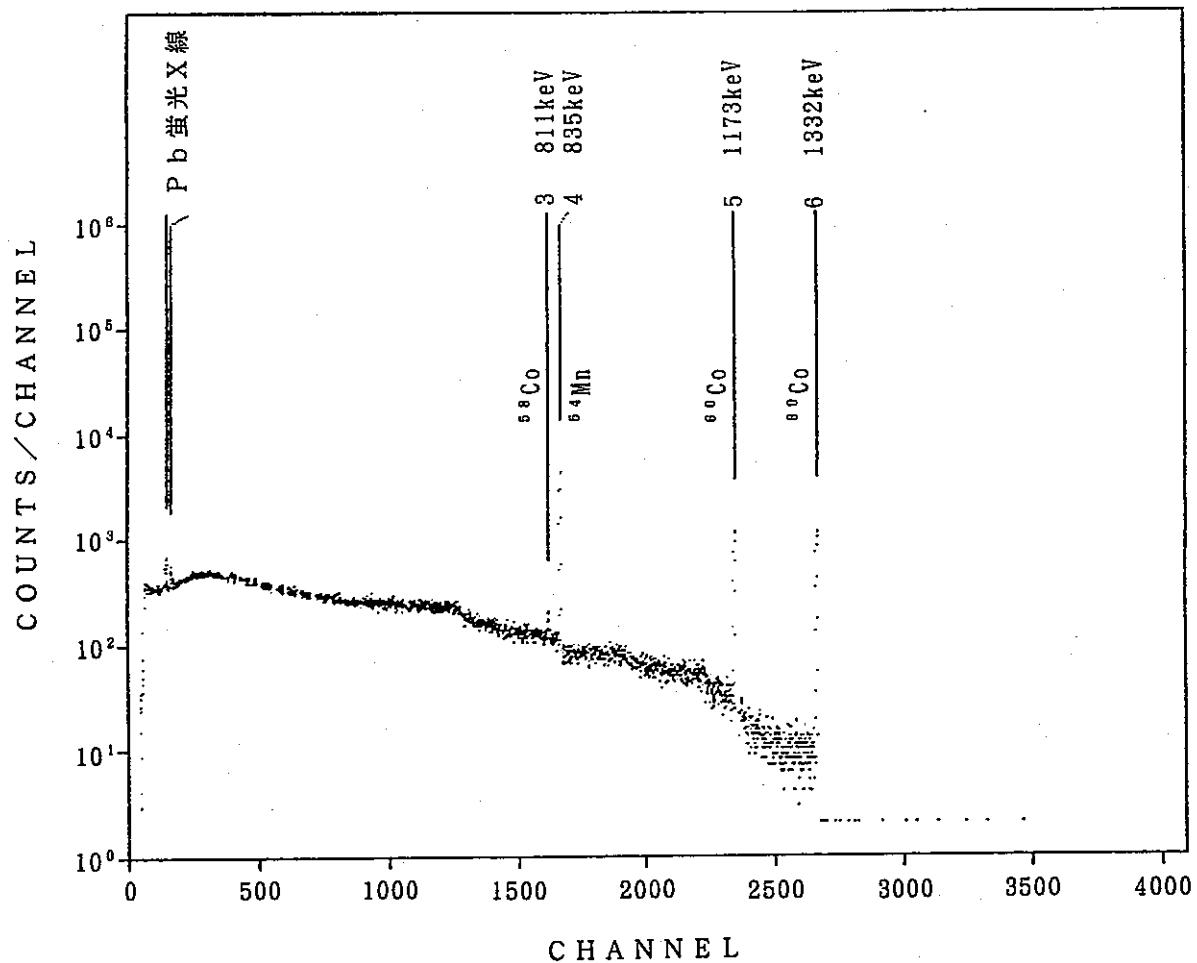


図 5.1 1 次主冷却系配管表面のGe半導体検出器による  
ガンマ線スペクトル例（ホットレグ部）

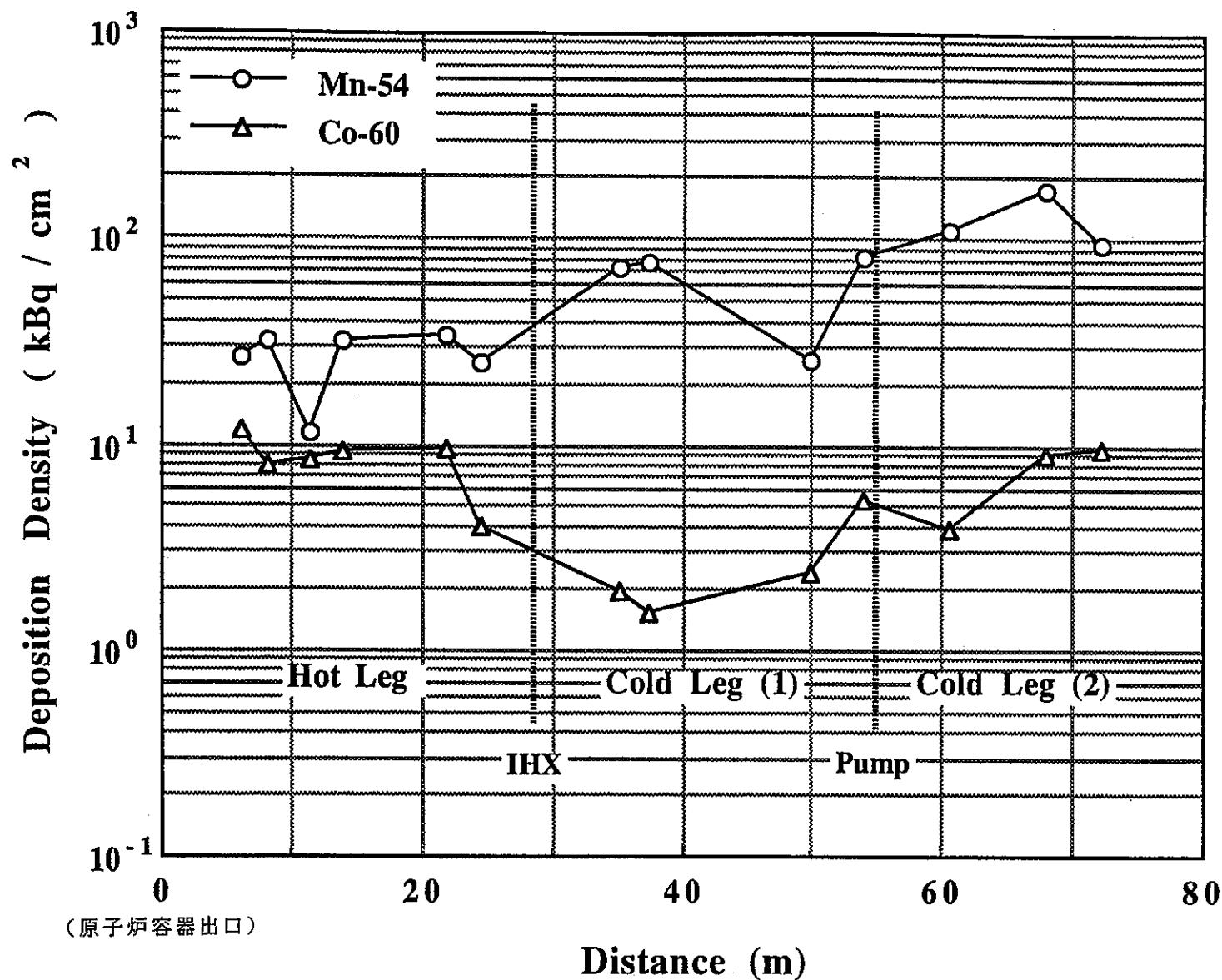


図 5.2 第10回定期検査時CP測定位置と付着量の関係

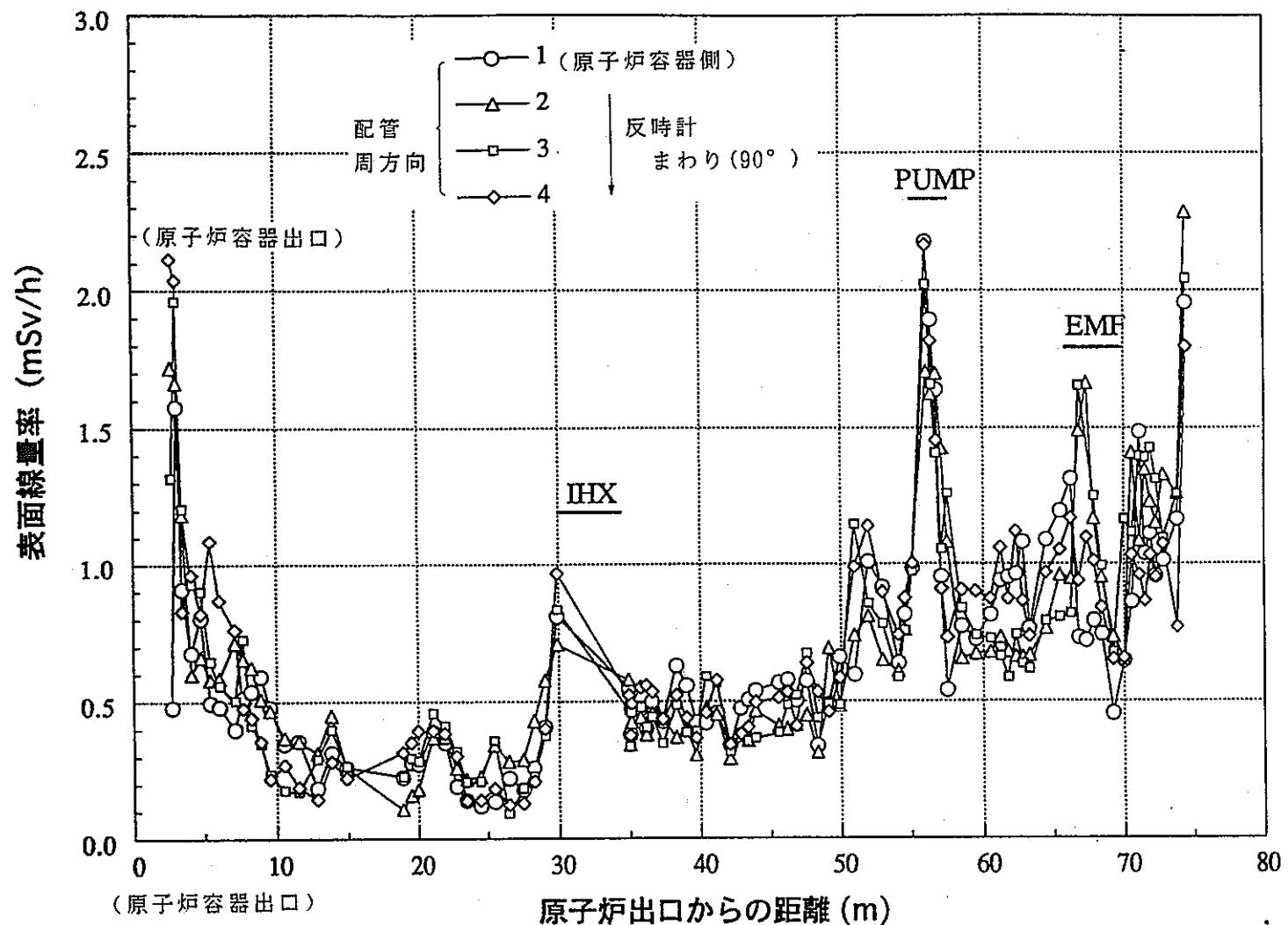


図5.3 第10回定検時1次主冷却系配管(A)の表面線量率分布

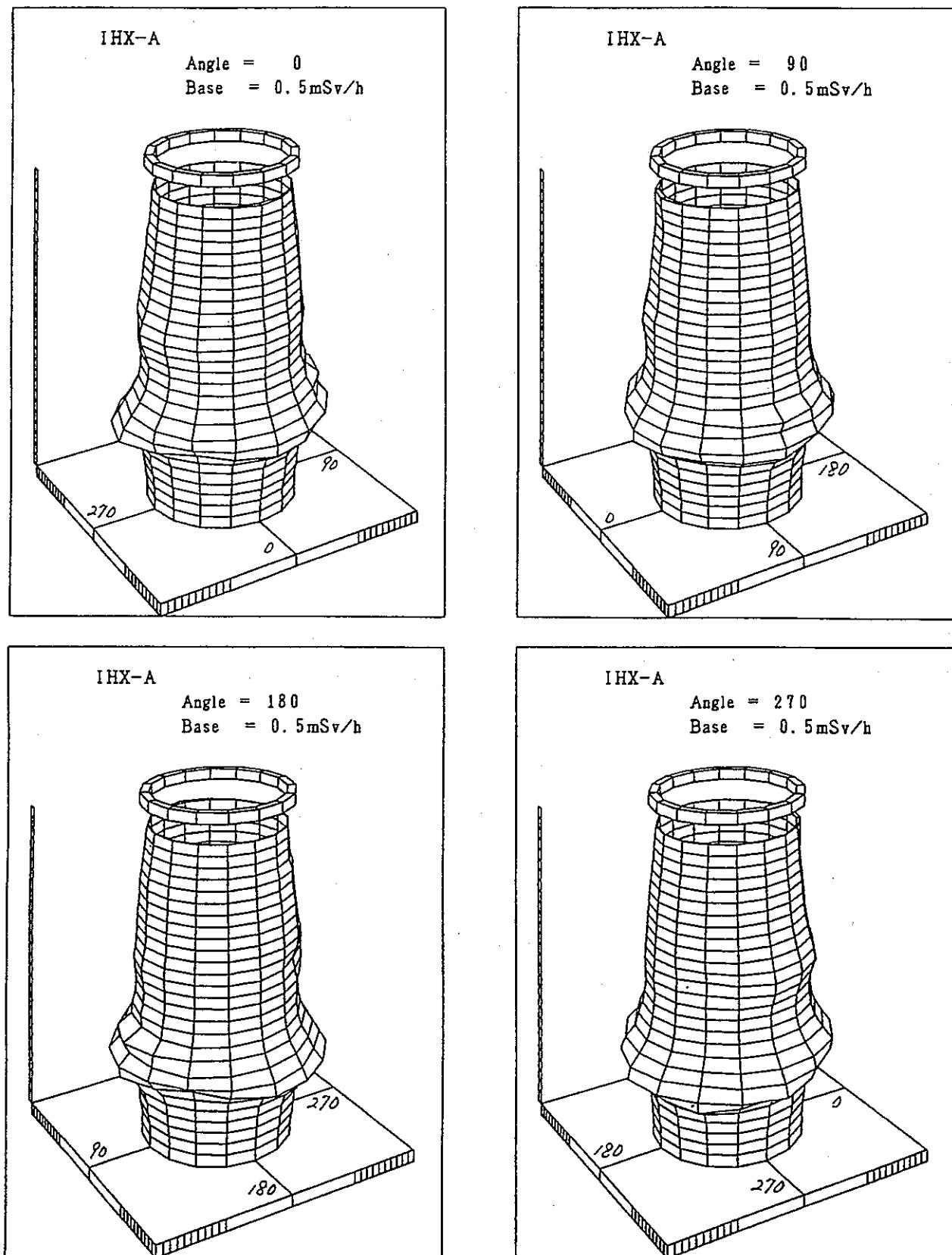


図5.4 第10回定検時主中間熱交換器（A）の表面線量率分布

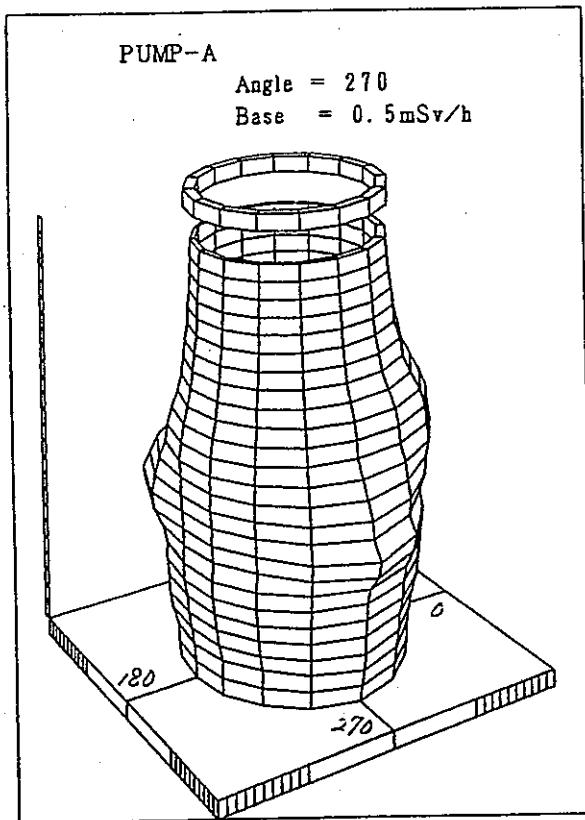
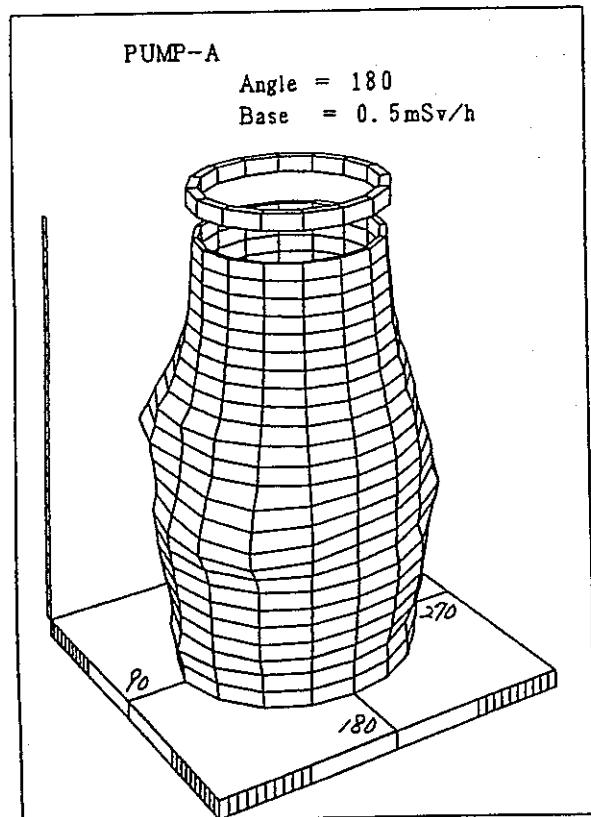
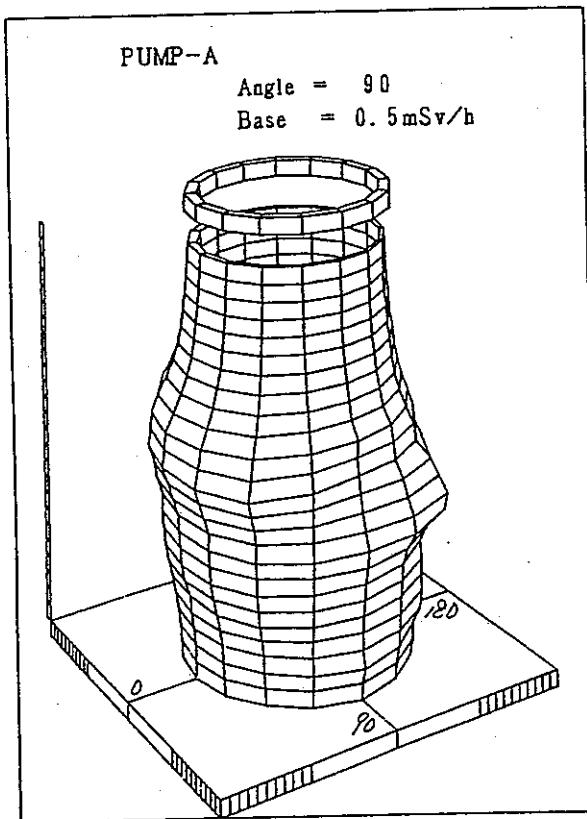
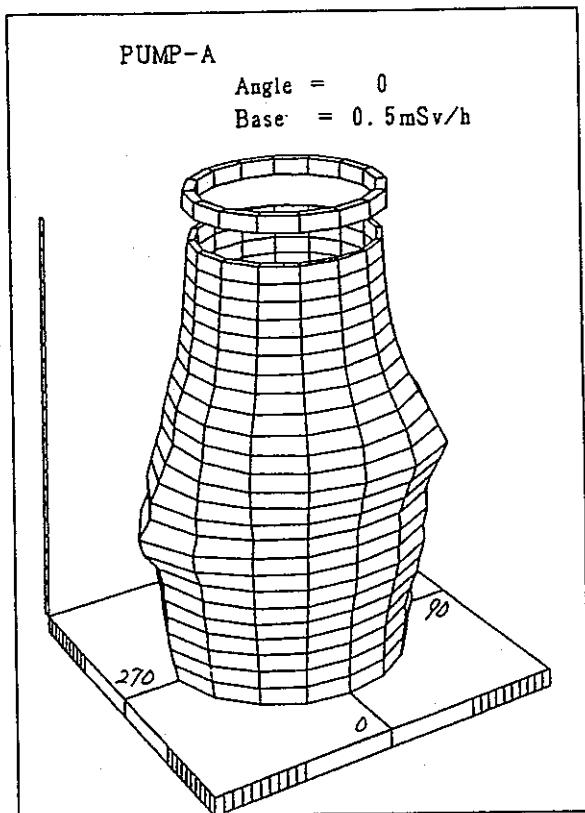


図5.5 第10回定検時主循環ポンプ（A）の表面線量率分布

## 6. 評 價

### 6.1 CP付着分布の推移

「常陽」1次主冷却系配管（Aループ）のCP付着分布について第3回～第10回定期検査期間中の測定データの推移を表6.1、図6.1および図6.2に示す。<sup>54</sup>Mnの付着分布と<sup>60</sup>Coの付着分布には、特徴的な差が見られる。<sup>54</sup>Mnの付着分布は、ホットレグ（HL）では、緩やかな上昇を示した後飽和に達しているが、コールドレグ（CL）では急激な上昇を示し4～4.5運転実効年（<sup>54</sup>Mnの半減期の約4倍）を過ぎて（第9回定期検査以降）飽和に達している。一方、<sup>60</sup>Coの付着分布は、CLおよびHLとともに同程度の上昇を示し、今回、飽和傾向を示している。これらCPの付着挙動については、CP挙動解析コード“PSYCHE”による解析を通じて、<sup>54</sup>MnはHL領域では管壁中拡散、CL部では管壁表面での析出（構造材料の腐食生成物との共沈）により、<sup>60</sup>Coは全領域に渡り管壁表面析出による過程であると考えられている<sup>(1), (2)</sup>。また、<sup>54</sup>Mnおよび<sup>60</sup>Coの付着密度はともに、CL(2)の方がCL(1)より大きい。これは、流速の違い（CL(1)：2.32m/s CL(2)：4.84m/s）によるものと考えられる。

<sup>54</sup>Mnと<sup>60</sup>CoのHLおよびCL領域における付着密度の平均値の推移を図6.2に示す。<sup>54</sup>Mnの付着密度は図6.2(1)に示すように、CL(2)、CL(1)、HLの順に高く、いずれの領域とも第8回定期検査期間中の測定値の原子炉積算出力130,400MWD（4 EFPY）で最大値を示した後、150,600MWD（4.5 EFPY）の第9回定期検査時に減少を示し、168,700MWD（5 EFPY）の今回の第10回定期検査期間中の測定では前回と同程度の値を示した。これより、<sup>54</sup>Mnのビルトアップは4～4.5 EFPY経過の時点で飽和に達したと考えられる。また、<sup>60</sup>Coの付着密度は、図6.2(2)に示すようにHL、CL(2)、CL(1)の順に高く、今回の測定結果は前回と同程度の値を示し、飽和傾向が見られる。なお、第3回と第4回定期検査期間中および第5回と第6回定期検査期間中における測定値が急激に上昇しているが、これは原子炉運転時の1次冷却材中の酸素濃度の上昇と対応していることが明らかとなっている<sup>(3)</sup>。即ち、第6回定期検査期間中にコールドトラップが交換され、本格運転に入った第7回定期検査以降1.7ppmで運転されているが、上記の定期検査間の原子炉運転時には3ppm以上で運転されていた。

## 6.2 表面線量率分布の推移

各領域における配管表面の線量率（各定期検査における測定時点）の平均値の推移を表6.2および図6.3に示す。各定期検査における測定時点での原子炉停止後の冷却期間は早いもので40日（第7回定期検査）、長いもので170日（第3回定期検査）であり、その他のものはその間に分布している。第8回～第10回定期検査中における測定までの冷却期間は、ほぼ80～90日の前後である。線量率はCL(2)が最も高く、次いでCL(1)、HLの順で、これは管壁に付着した<sup>54</sup>Mnの付着分布の傾向と一致している。このように線量率は、<sup>54</sup>Mnが支配因子となっている。また、今回の線量率レベルは前回と同じくCL(2)が約1mSv/h、CL(1)とHLが約0.5mSv/hであり、付着分布と同じく飽和傾向を示している。

機器表面の線量率の推移について、Aループの主中間熱交換器をナトリウム流入部（ポイント10）、中間部（ポイント15）および下部プレナム部（ポイント22）に分けると次のような傾向が見られる。即ち、各位置の表面線量率は、第8回定期検査期間中<sup>(3)</sup>の測定までは増加（ナトリウム流入部：0.9mSv/h、中間部：1.0mSv/h、下部プレナム部：2.5mSv/h）したが、第9回定期検査期間中の測定では減少し（ナトリウム流入部：0.6mSv/h、中間部：0.8mSv/h、下部プレナム部：1.8mSv/h）、第10回定期検査期間中の測定では同程度（ナトリウム流入部：0.6mSv/h、中間部：0.7mSv/h、下部プレナム部：1.8mSv/h）であった。また、Aループの主循環ポンプの場合は、オーバーフローノズルより下側をオーバーフローノズル部（ポイント11）、軸受け部（ポイント15）および吐出ノズル部（ポイント：21）に分けて見ると次の様な傾向が見られる。即ち、第8回定期検査期間中の測定までは増加<sup>(3)</sup>がみられたが、第9回～第10回定期検査期間中の測定では同程度（オーバーフローノズル部1.6～1.7mSv/h、軸受け部2.0～2.2mSv/h、吐出ノズル部1.5～1.7mSv/h）である。以上のように、機器表面の線量率レベルも、配管のCP付着分布と同じく飽和傾向を示している。

## 6.3 測定値と計算値の比較

第28サイクル運転直後の1次主冷却系配管（Aループ）のCP付着密度について、CP挙動解析コード“PSYCHE”による計算値(C)と測定値(E)の比較を行った。比較結果を表6.3および図6.4に示す。“PSYCHE”的計算で用いたモデルパラメータ<sup>(3)</sup>を表6.4に示す。これらのモデルパラメータは、第3回～第9回定期検査期間時のCP測定データを基に設定したものである<sup>(3), (4)</sup>。C/B値は、<sup>54</sup>Mnについては0.9～1.0、<sup>60</sup>Coについては1.0

～1.5の範囲にあり、上記のモデルパラメータを用いることにより、計算値は測定値を良く再現していることがわかる。

また、図6.4には<sup>54</sup>Mnと<sup>60</sup>Coの付着密度の推移を示している。<sup>54</sup>Mnおよび<sup>60</sup>Coのコールドレグの付着密度は、図6.4(1)および図6.4(3)に示すように第5回～第7回定期検査にかけて計算値が大きく測定値を上回っている。これは、設定したモデルパラメータの内コールドレグ領域での付着速度（仮想界面前進速度）が、大きすぎることを意味している。“PSYCHE”の評価精度の向上と汎用化を図る上で、このパラメータの見直しが課題の一つになるものと考えられる。

CP付着密度の計算結果に基づいて計算した配管表面の線量率を測定値と比較して図6.5に示す。C/Eの平均値は1.6であり、概ね満足できる結果となっている。また、CP核種の線量率寄与割合については、上記の計算結果より、HL領域では<sup>54</sup>Mnが65%、<sup>60</sup>Coが35%、CL領域ではそれぞれ80%と20%と推定される。

表6.1 1次主冷却系配管(A)のCP付着分布測定結果の推移

(単位:kBq/cm<sup>2</sup>)

測定領域	測定位置	第3回定検時(MK-I) (1981 12/23)			第4回定検時(MK-II) (1983 12/3)			第5回定検時(MK-II) (1985 5/1)			第6回定検時(MK-II) (1986 12/6)			第7回定検時(MK-II) (1988 9/7)			第8回定検時(MK-II) (1990 1/23)			第9回定検時(MK-II) (1991 9/11)			第10回定検時(MK-II) (1993 3/26)					
		<sup>54</sup> Mn	<sup>60</sup> Co	<sup>58</sup> Co	<sup>54</sup> Mn	<sup>60</sup> Co	<sup>58</sup> Co	<sup>54</sup> Mn	<sup>60</sup> Co	<sup>58</sup> Co	<sup>54</sup> Mn	<sup>60</sup> Co	<sup>58</sup> Co	<sup>54</sup> Mn	<sup>60</sup> Co	<sup>58</sup> Co	<sup>54</sup> Mn	<sup>60</sup> Co	<sup>58</sup> Co	<sup>54</sup> Mn	<sup>60</sup> Co	<sup>58</sup> Co	<sup>54</sup> Mn	<sup>60</sup> Co	<sup>58</sup> Co			
ホ ット レ グ 配 管	CP-001	19.6	1.75	-	-	-	-	27.3	5.48	-	31.3	10.2	-	27.8	11.3	0.892*	33.7	11.3	1.63*	27.1	11.8	-	27.1	11.8	1.19*			
	002	14.8	0.999	-	19.9	2.68	-	28.6	3.39	-	38.2	5.77	-	26.6	5.96	1.29*	40.4	7.25	2.52	31.9	7.97	0.862*	31.6	7.87	1.88			
	003(1)	2.27*	2.25	-	3.77*	7.07	-	6.40*	5.74	-	9.73*	13.4	-	8.70*	10.4	2.25	10.1	10.1	4.11	7.17*	8.27	0.809*	9.07*	11.2	3.13			
	003(2)	7.59*	1.10	-	10.8	2.89	-	17.1	2.87	-	23.8	5.96	-	15.0	5.44	1.71	23.9	7.10	3.52	16.1	5.70	0.609*	13.5	5.67	2.79			
	004	19.7	1.75	-	22.8	4.22	-	34.0	4.14	-	41.9	10.3	-	30.6	8.70	-	44.4	10.4	1.26*	35.3	11.4	90.5	32.4	9.16	1.08			
	005	17.8	1.51	-	20.9	4.11	-	28.2	8.33	-	40.5	13.0	-	26.0	8.25	-	43.2	11.0	2.37	30.9	10.8	-	33.6	9.50	1.99			
	006	13.2	0.477	-	16.5	1.81	-	25.3	2.42	-	30.7	3.35	-	27.4	3.36	1.67	35.3	3.81	2.66	23.4	3.16	0.145*	25.3	3.98	1.98			
	領域平均 <sup>1)</sup>	17.0	1.40	-	20.1	3.80	-	28.7	4.62	-	36.5	8.84	-	27.7	7.62	1.88	39.4	8.72	3.03	29.7	8.44	-	30.0	8.45	2.35			
IHX	CP-007*															18.2	3.02	-	30.7	3.06	-	23.3	1.23	-	22.7	2.54	-	
	CP-007*																											
コ ー ル ド レ 配 グ 管 (1)	CP-008(1)	5.88	0.429	-	13.5	2.85	-	26.8	3.70	-	47.7	4.03	-	49.5	3.81	1.05*	68.8	3.81	1.67*	67.1	4.67	-	70.5	1.86	1.07			
	008(2)	6.14	0.396	-	13.2	2.23	-	26.7	3.62	-	51.1	3.77	-	55.3	3.70	1.41*	97.5	3.96	2.04*	74.3	4.66	0.941*	77.3	1.99	1.31			
	009	7.66	0.318	-	14.4	1.23	-	30.6	2.37	-	57.2	1.34*	-	44.2	1.24*	1.47*	98.4	2.00*	2.37	79.1	3.28*	1.13*	75.5	1.48*	1.56			
	010															8.47*	0.918*	-	25.9	1.63*	0.259*	22.0	2.96*	-	26.0	2.39*	0.451	
	011	7.36	0.352	-	15.1	1.19	-	37.0	1.33	-	55.5	4.14	-	59.5	3.40	0.607*	92.1	4.00	0.888*	81.2	4.23	-	80.7	5.37	0.884			
	領域平均 <sup>1)</sup>	6.76	0.374	-	14.0	1.87	-	30.2	2.76	-	52.8	3.98	-	52.1	3.64	-	94.2	3.92	2.37	75.4	4.52	-	74.4	3.07	1.31			
主ポンプ	CP-012*																53.0	4.50	-	-	-	-	81.3	7.68	-	55.9	7.13	-
	CP-012*																											
コ ー ル ド レ 配 グ (2)	CP-013	9.81	0.255	-	23.0	13.2	-	54.1	15.2	-	85.9	3.38	-	95.6	3.05	1.28	150	3.83	1.81*	140	4.53	0.695*	112	3.89	1.08*			
	014	22.4	1.59	-	33.9	4.59	-	101	5.40	-	117	9.10	-	139	6.18	0.936*	225	6.99	0.331*	174	8.75	-	175	8.87	0.989*			
	015	9.92	1.19	-	16.1	2.98	-	55.1	5.29	-	68.2	5.77	-	74.6	6.55	0.673*	120	8.03	-	105	8.94	-	95.2	9.67	-			
	領域平均 <sup>1)</sup>	14.0	1.01	-	24.3	3.79	-	70.1	5.35	-	90.3	6.09	-	103	5.26	1.28	165	6.12	-	139	7.40	-	127	7.47	-			

1) \*印の測定値を除く平均値 2) 単位はcps

(注) 原子炉停止直後に補正。

表 6.2 1 次主冷却系配管の平均表面線量率の推移 (TLD)

(単位 : mSv/h)

測定年月 測定位置	第1回定検 1979年9月 (MK-I)	第2回定検 1980年12月 (MK-I)	第3回定検 1982年7月 (MK-I end)	<sup>1)</sup> 1983年7月 (MK-II)	第4回定検 1984年1月 (MK-II)	第5回定検 1985年9月 (MK-II)	第6回定検 1987年4月 (MK-II)	第7回定検 1988年10月 (MK-II)	第8回定検 1989年5月 (MK-II)	第9回定検 1991年12月 (MK-II)	第10回定検 1993年3月 (MK-II)
A Loop Hot Leg (R/V~IHX)	<sup>2)</sup> 0.0190	<sup>2)</sup> 0.0610	0.0805	0.0918	0.284	0.304	0.416	0.547	0.665	0.459	0.499
A Loop Cold Leg#1 (IHX~Pump)	<sup>2)</sup> 0.0210	<sup>2)</sup> 0.0500	0.0696	0.0661	0.249	0.376	0.419	0.607	0.816	0.550	0.541
A Loop Cold Leg#2 (Pump~R/V)	<sup>2)</sup> 0.0330	<sup>2)</sup> 0.0940	0.144	0.138	0.421	0.590	0.874	1.19	1.30	1.01	1.06
B Loop Hot Leg (R/V~IHX)	—	—	0.128	—	0.535	0.633	0.914	1.08	0.800	—	—
B Loop Cold Leg#1 (IHX~Pump)	—	—	0.0870	—	0.312	0.544	0.531	0.789	0.744	—	—
B Loop Cold Leg#2 (Pump~R/V)	—	—	0.149	—	0.425	0.661	1.01	1.33	1.46	—	—
積算炉出力 (MWd)	$8.89 \times 10^3$	$1.79 \times 10^4$	$2.81 \times 10^4$	$3.08 \times 10^4$	$3.98 \times 10^4$	$6.23 \times 10^4$	$8.46 \times 10^4$	$1.07 \times 10^5$	$1.32 \times 10^5$	$1.52 \times 10^5$	$1.70 \times 10^5$

1) After plant Characteristic test performed at 55 MW

$$2) \left( \begin{array}{l} \text{第1回及び第2回定検時の} \\ \text{平均線量率} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{l} \text{第1回及び第2回定検時の} \\ \text{GMテ-ペイメ-タによる平均線量率} \end{array} \right) \times \left( \begin{array}{l} \text{第3回定検時のTLD 素子による線量率と} \\ \text{GMテ-ペイメ-タによる平均線量率の比} \end{array} \right)$$

表6.3 1次主冷却系配管(A)のCP付着分布測定結果計算結果の比較(原子炉停止直後に補正)

(单位 : kBq/cm<sup>3</sup>)

表 6.4 CP挙動解析モデルパラメータ

(a)  $^{54}\text{Mn}$ 

モデルパラメータ（最適化）	Mk - I	Mk - II
拡散係数 (D)	1. 1 D	0. 5 D
CL仮想界面前進速度 ( $u_e$ )	$0.8 u_e^{-1}$ $0.8 \times 1.8 u_e^{-2}$	$2.5 u_e^{-1}$ $2.5 \times 1.8 u_e^{-2}$
HL仮想界面移動速度	肉減り $u_e$	肉減り $u_e$

## \* 1 適用領域

- ・ IHX 及び CL / 1 配管
- ・ ナトリウム純化系及び OF / T 出口～炉容器入口までの配管（復路）

## \* 2 適用領域

- ・ ポンプ及び CL / 2 配管
  - ・ 炉心下部 (Mk - I は下部プランケット、Mk - II は下部反射体及び下部プレナム) 及び外側反射体 (A)
- ここでのファクター 1.8 は「常陽」 CL 主配管部での CP 付着速度の流速依存性に基づく。

(b)  $^{60}\text{Co}$ 

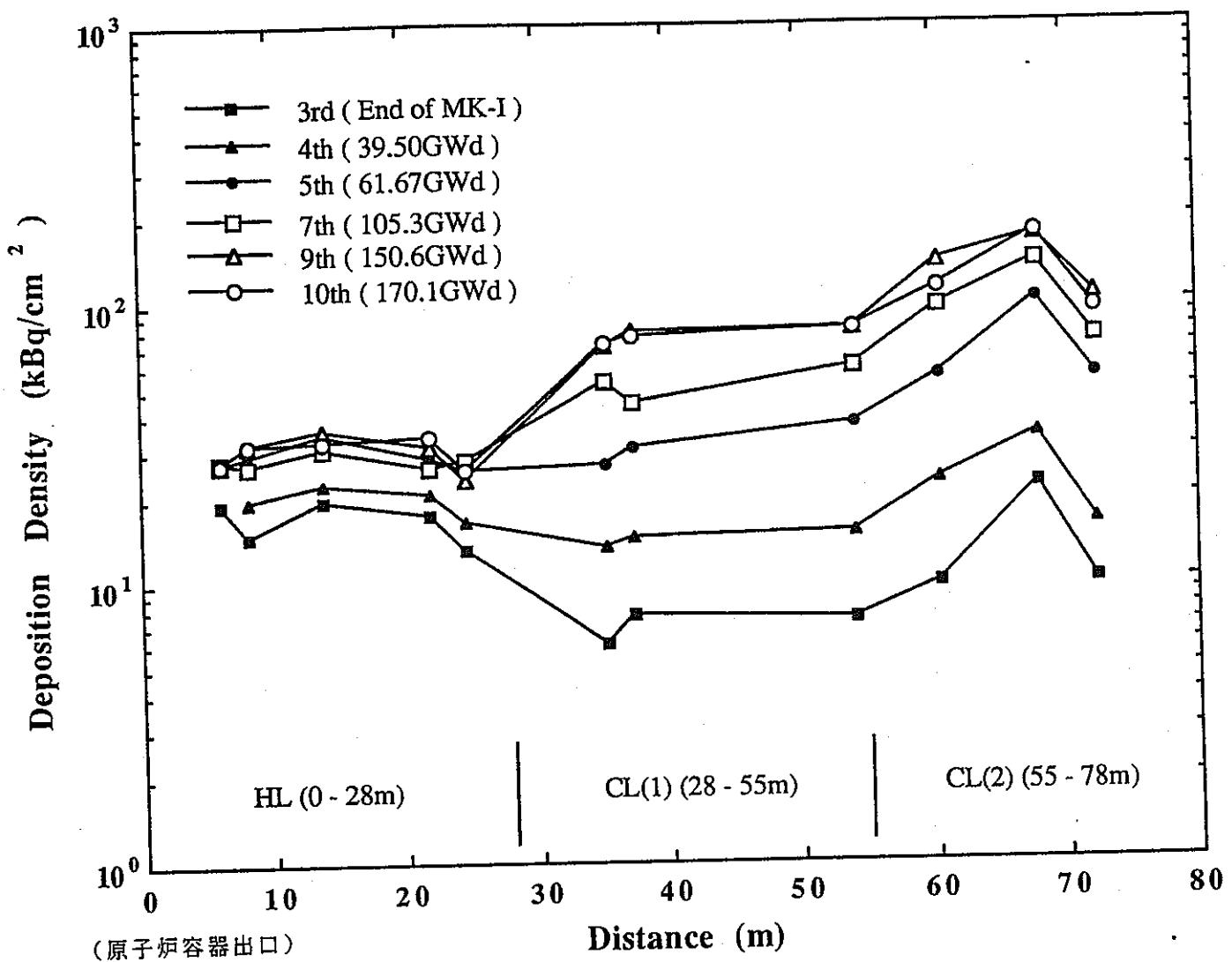
モデルパラメータ（最適化）	Mk - I	Mk - II
拡散係数 (D)	D	D
化学的分配係数 ( $\beta'$ )	$10\beta'$	$10\beta'$
CL仮想界面前進速度 ( $u_e$ )	$0.3 u_e^{-1}$ $0.3 \times 1.8 u_e^{-2}$	$1.8 u_e^{-1}$ $1.8 \times 1.8 u_e^{-2}$
HL仮想界面移動速度	肉減り $u_e$	折出 $25 u_e$
不純物コバルト組成	100 ppm	300 ppm

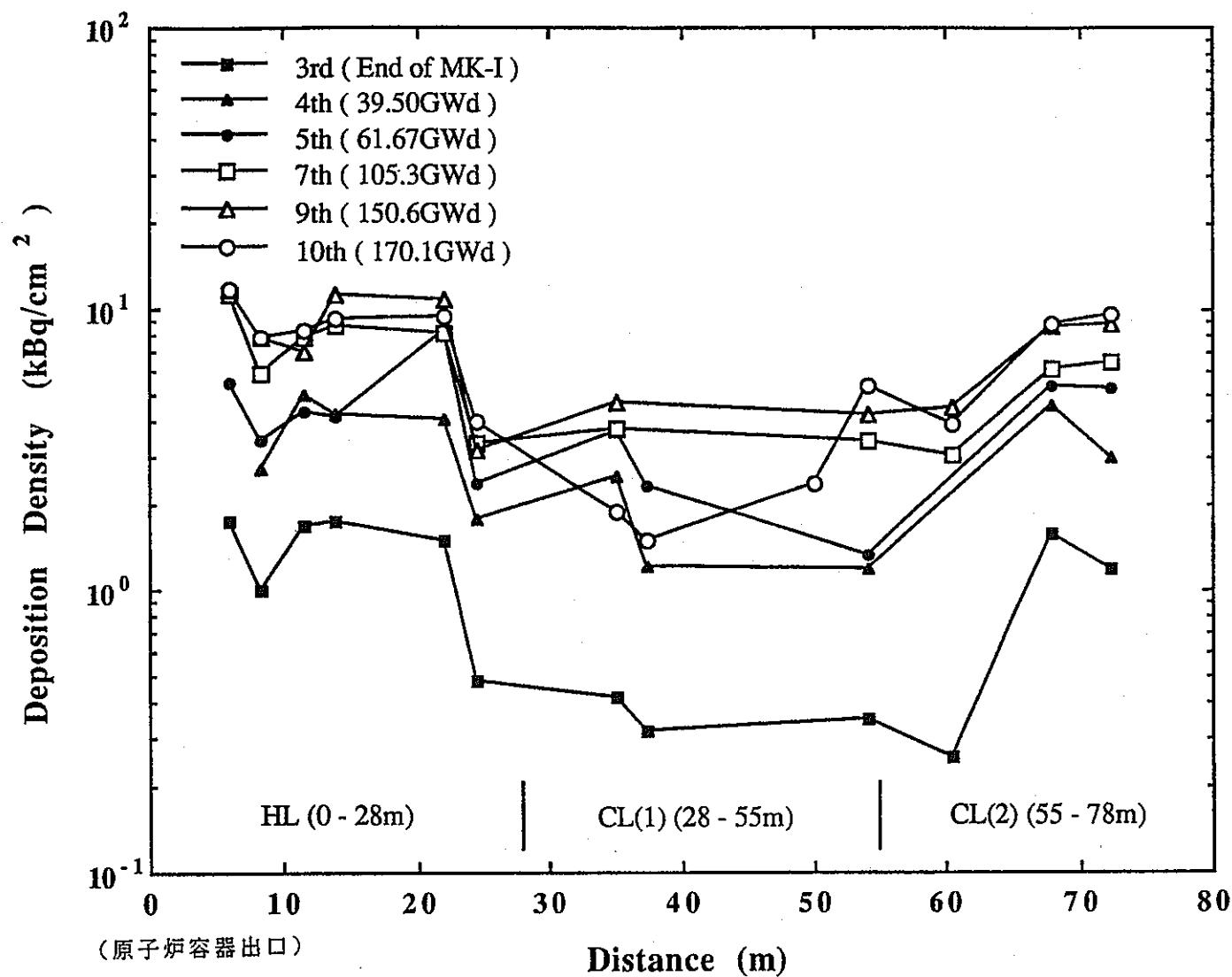
\* 1, \* 2 は  $^{54}\text{Mn}$  に同じ。

## (参考)

Symbol (unit)	評価式
D (cm <sup>2</sup> /s)	$D = 1.32 \times 10^{-4} \exp\left(-\frac{42.1}{RT}\right)$
u (cm/s)	$u_e = 3.17 \times 10^{-12} \times e^{0.003}$ $\times \exp\left(12.63 - \frac{22.0}{RT} - 0.00591 \frac{L}{d}\right)$ $u_d(\text{mod. I}) = 3.17 \times 10^{-12} \times 4.02 \exp\left(\frac{2.29}{RT}\right)$
$\beta$ or $\beta' = \beta/\theta'$	for Manganese Type $\beta = 1.50 \times 10^0 \exp(2.13/RT)$ for Cobalt Type $\beta' = 9.93 \times 10^6 \exp(1.69/RT), \theta' = X'/12$
K' (cm/s)	for Manganese Type $K' = \frac{k' k'_p}{k' + k'_p}$ $k'_p = 5.05 \times 10^{-3} \exp(3.46/RT)$ for Cobalt Type $K' \approx K' = 0.023 R e^{0.03} S c^{\frac{1}{3}} D' / d$ $D' = 5.1 \times 10^{-4} \exp(-0.032/K_B T)$

- 95 -

図6.1(1) 1次主冷却系配管(A)における $^{54}\text{Mn}$ 付着密度

図 6.1(2) 1 次主冷却系配管 (A) における $^{60}\text{Co}$ 付着密度

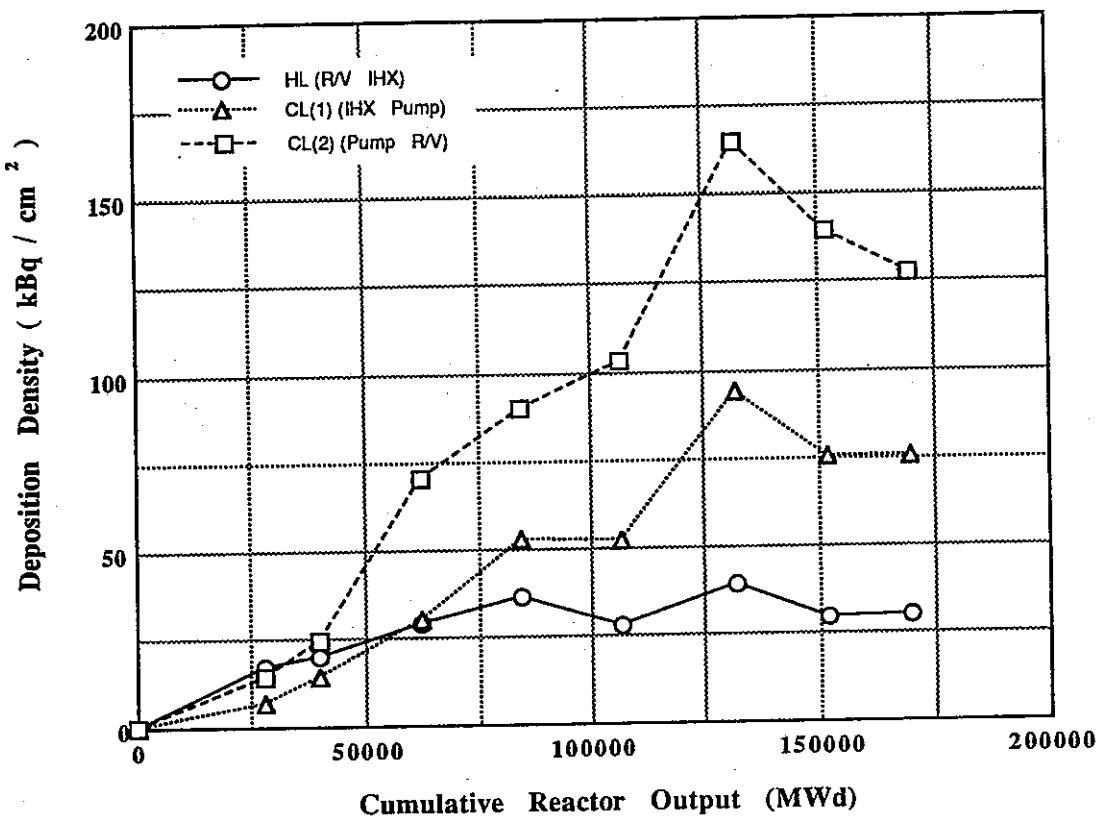


図 6. 2 (1) 1 次主冷却系配管 (A) における<sup>54</sup>Mn付着密度の推移

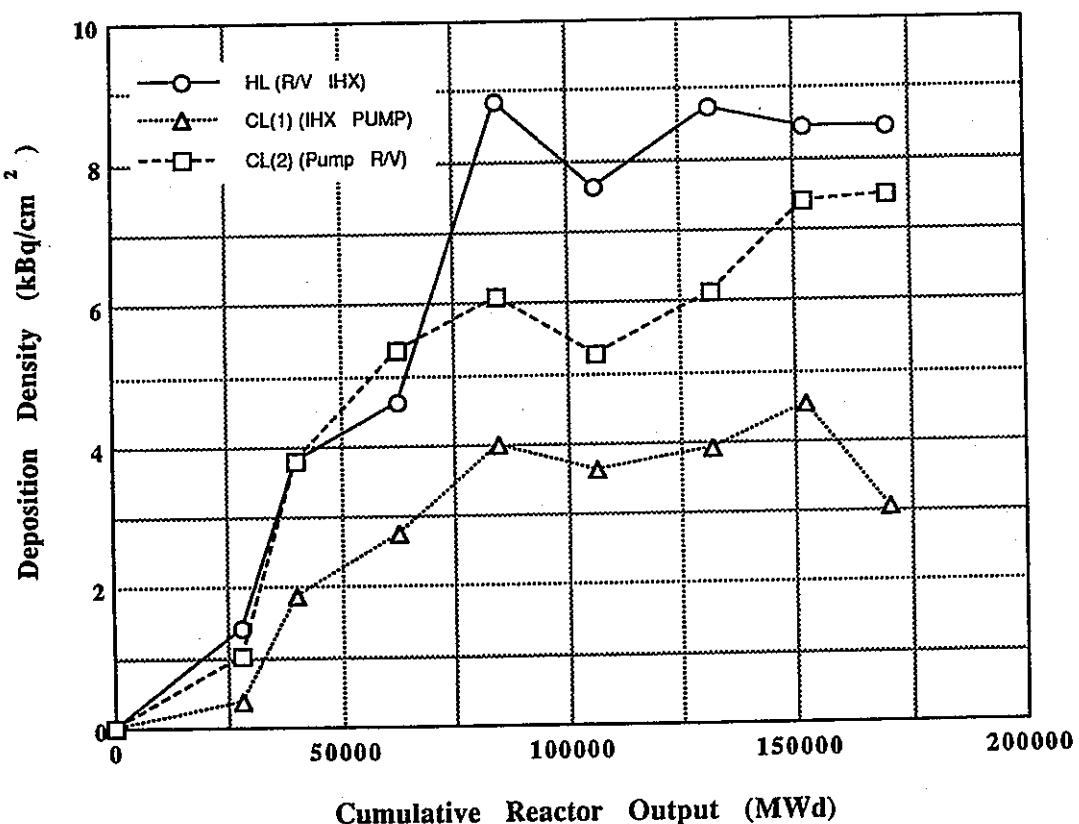


図 6. 2 (2) 1 次主冷却系配管 (A) における<sup>60</sup>Co付着密度の推移

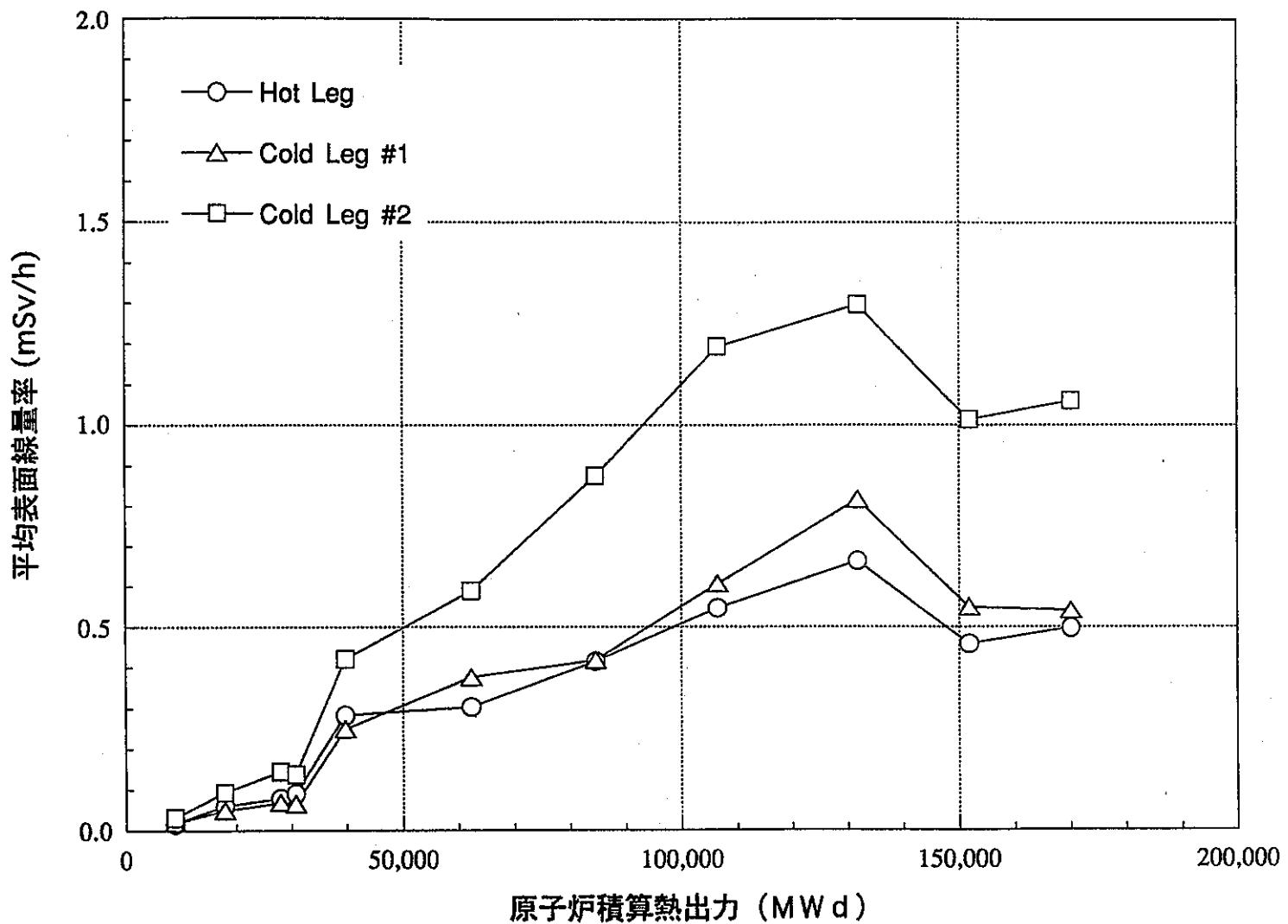


図 6.3 1 次主冷却系配管 (A) の表面線量率の推移

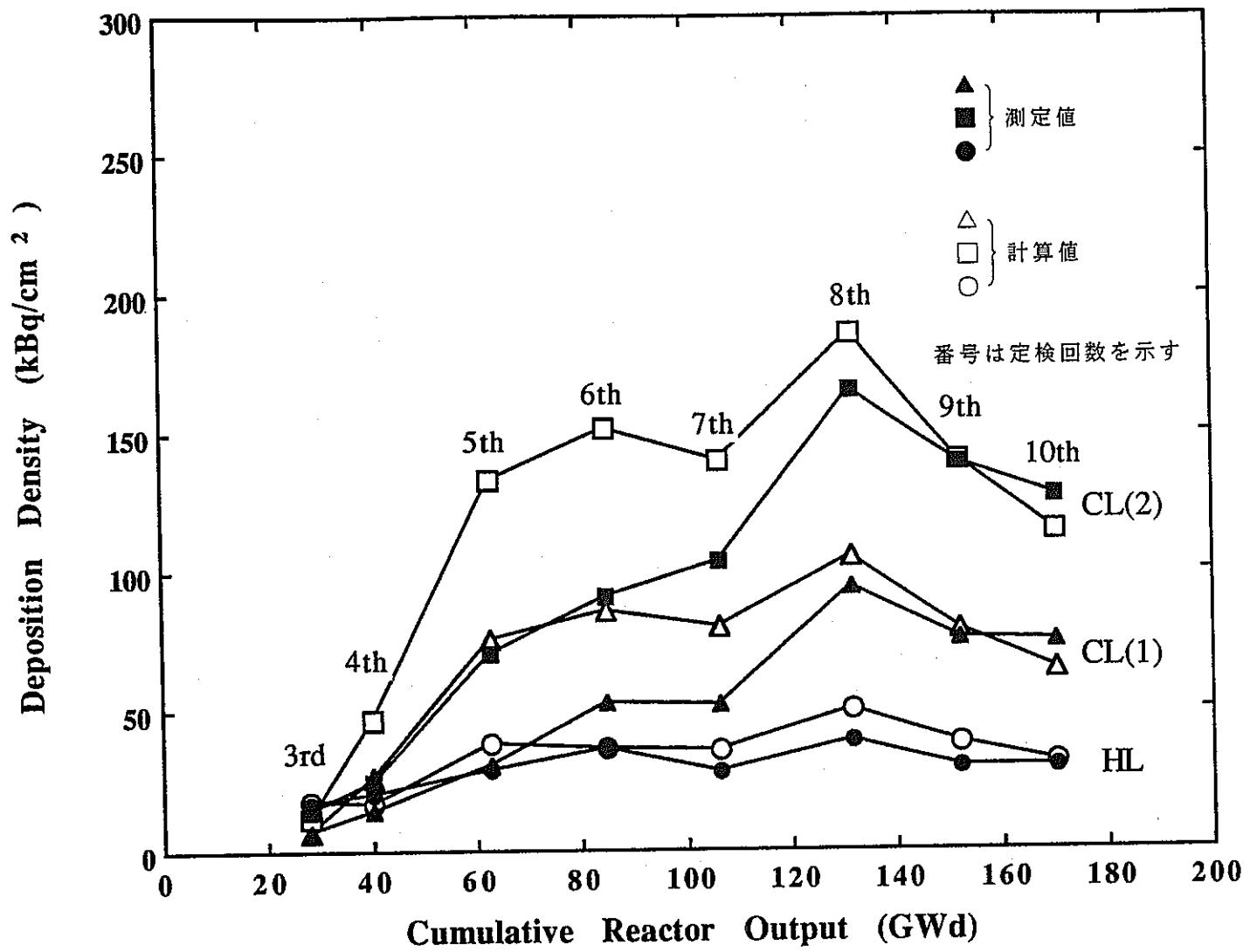


図 6.4(1) 1 次主冷却系配管 (A) における $^{54}\text{Mn}$ の付着密度の計算値と測定値の比較

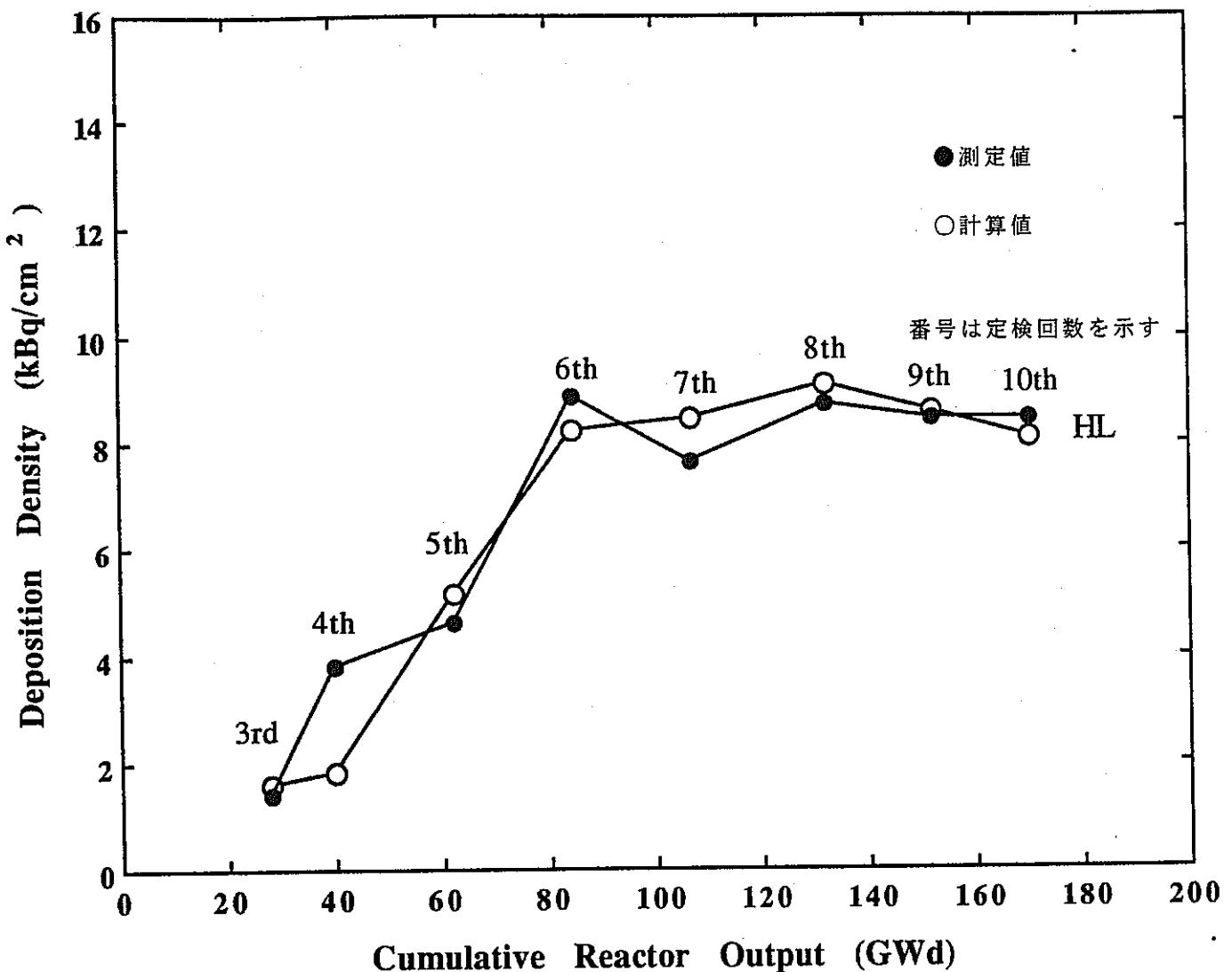


図 6.4(2) 1 次主冷却系配管 (A : ホットレグ) における $^{60}\text{Co}$ 付着密度の計算値と測定値の比較

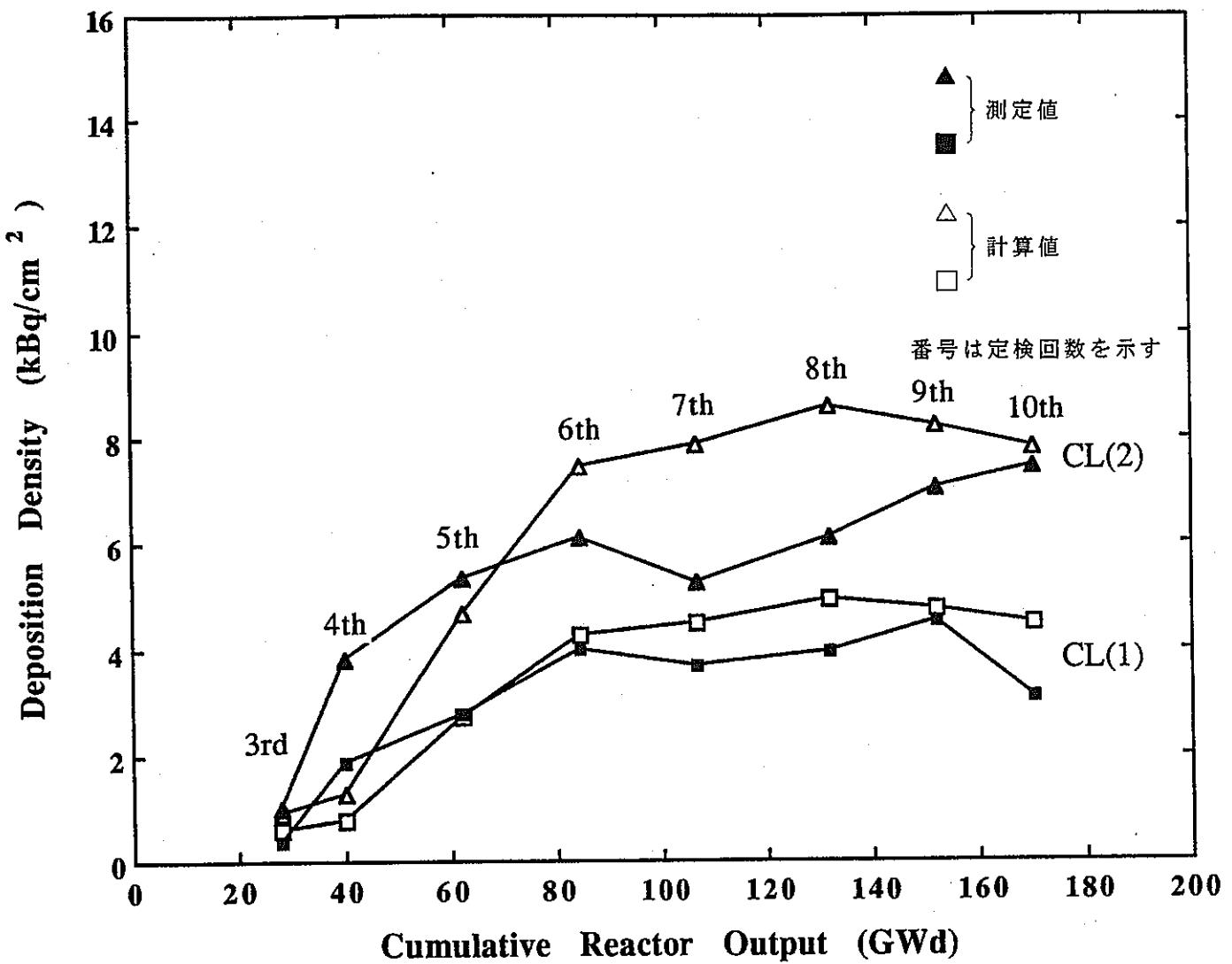


図 6.4(3) 1次主冷却系配管 (A : コールドレグ) における $^{60}\text{Co}$ 付着密度の計算値と測定値の比較

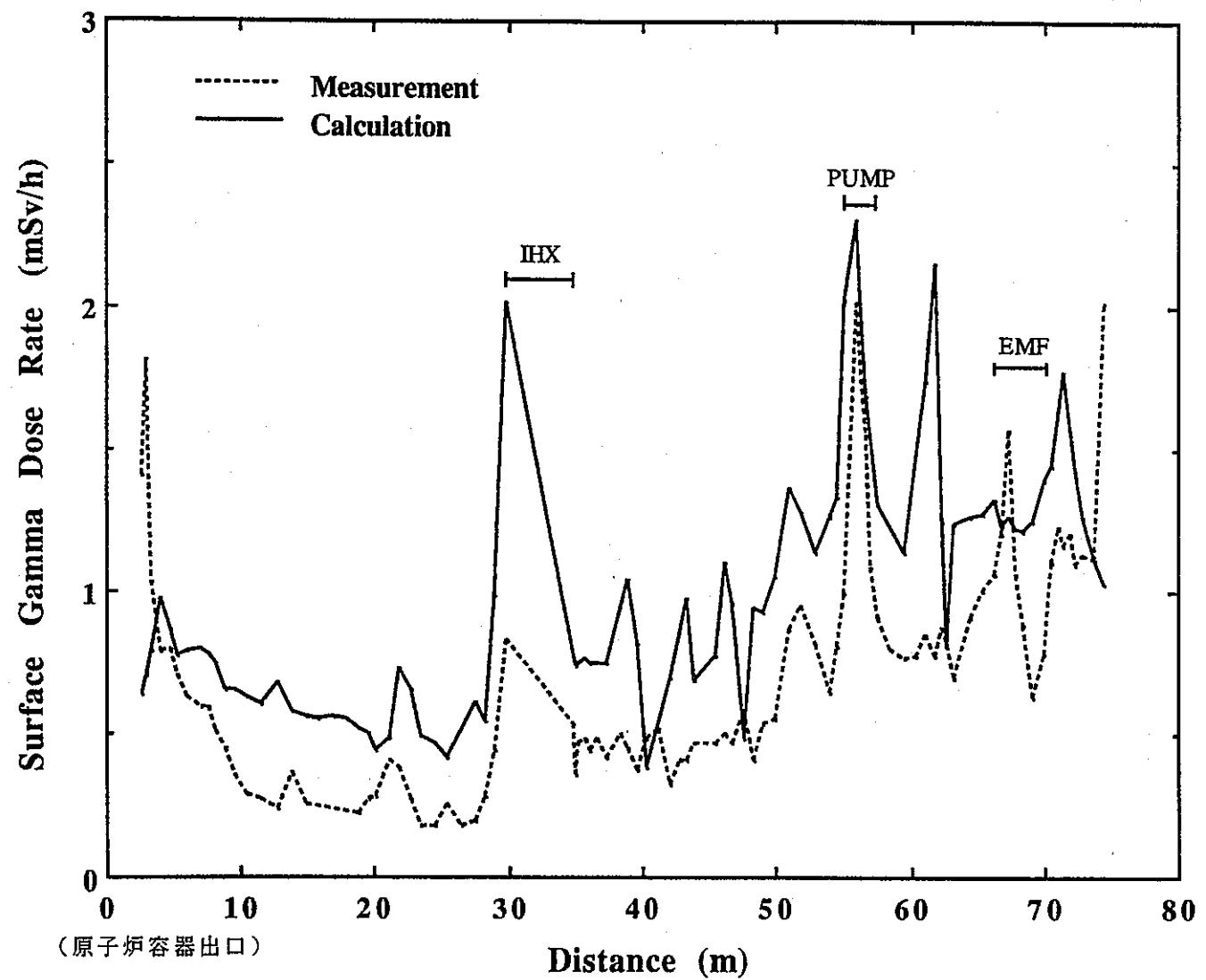


図 6.5 1 次主冷却系配管 (A) の表面線量率の計算値と測定値の比較

## 7. 結 言

高速におけるCP挙動の解明と挙動解析コードの改良と検証を目的として、「常陽」の定期検査期間を利用し、1次主冷却系配管と機器を対象にCPの付着分布と表面線量率の測定を行ってきた。本報告では、第10回定期検査期間中に実施した測定結果とこれまでに蓄積した計8回のデータとの比較を行った。主な結果を次に示す。

(1) 1次主冷却系における主要なCP核種は<sup>54</sup>Mnと<sup>60</sup>Coであり、これらの核種の付着分布の特徴は次の通りである。

① <sup>54</sup>Mnの付着量は、主中間熱交換器から原子炉容器入口までのコールドレグに多く、しかも下流側ほど多い。

② <sup>60</sup>Coの付着量は、原子炉容器出口から主中間熱交換器までのホットレグに多い。

③ <sup>54</sup>Mnの付着量は、ホットレグでは<sup>60</sup>Coの約4倍、コールドレグでは約20倍である。

(2) 1次主冷却系配管における<sup>54</sup>Mnと<sup>60</sup>Coの付着量は、前回の第9回定期検査期間中の測定値とほぼ同程度であり、飽和に至ったと考えられる。今回の各配管領域の測定値の平均を次に示す。

① <sup>54</sup>Mnの付着量は、ホットレグで30kBq/cm<sup>2</sup>、主中間熱交換器から主循環ポンプ入口までのコールドレグ(1)で約60kBq/cm<sup>2</sup>、主循環ポンプ出口から原子炉容器入口までのコールドレグ(2)で約130kBq/cm<sup>2</sup>である。

② <sup>60</sup>Coの付着量は、ホットレグで約9kBq/cm<sup>2</sup>、コールドレグ(1)で約3kBq/cm<sup>2</sup>、コールドレグ(2)で約8kBq/cm<sup>2</sup>である。

(3) 1次主冷却系配管および機器表面の線量率分布も、前回の第9回定期検査期間中の測定値とほぼ同程度であり、飽和に至ったと考えられる。また、線量率分布は、過去の測定結果と同じ分布を示し、特異な点は見られなかった。

① 今回の各配管(Aループ)領域の線量率測定値の平均は、ホットレグで約0.5mSv/h、コールドレグ(1)で約0.6mSv/h、コールドレグ(2)で約1mSv/hである。

② 主中間熱交換器(Aループ)の表面線量率は、ナトリウム流入部で約0.6mSv/h、中間部で約0.7mSv/h、下部プレナム部で約1.8mSv/hである。

③ 主循環ポンプ(Aループ)の表面線量率は、オーバーフローノズル部で約1.6mSv/h、軸受け部で約2mSv/h、吐出ノズル部で約1.5mSv/hである。

(4) CP付着量について測定値と計算値を比較した結果、計算値は測定値をファクター2以内で再現しており、良好な結果であった。

今後、「常陽」におけるCP挙動の測定データを蓄積し、挙動解析コード“PSYCHE”的精度向上と汎用化に反映させる予定である。また、「常陽」の改造計画（MK-III計画）に伴う主中間熱交換器の交換作業の被ばく低減に資するため、“PSYCHE”を用いた線量率分布の予測計算を実施する予定である。

謝 辞

本研究の実施にあたり、もんじゅ建設所 技術開発部開発推進室 飯沢克幸氏には計算作業における助言を、また、検査開発株式会社 枝井智彦氏および佐井川拓也氏には測定と測定データの整理に御助勢を頂いた。ここに深く感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

(1) 高橋、他：「常陽」におけるCP沈着分布の測定と評価

PNC SN9410 90-016 (1989)

(2) 飯沢、他：「常陽」におけるCP付着分布の測定と評価（Ⅱ）

PNC ZN9410 92-224 (1992)

(3) 飯沢、他：高速炉における放射性腐食生成物挙動評価手法の整備

PNC ZN9410 92-345 (1992)

(4) 中山、他：高速炉CP線源評価システムプログラム整備作業

PNC PJ9134 93-001 (1993)

## 付 錄

1次主冷却系配管の表面線量率の推移  
(第3回～10回定検時測定値)



