

高速炉における放射性腐食生成物挙動評価手法の整備

—「常陽」における挙動評価と解析コードの検証—

1992年10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)

高速炉における放射性腐食生成物挙動評価手法の整備 — 「常陽」における挙動評価と解析コードの検証 —

飯沢克幸* , 茶谷恵治* , 伊藤和寛*
鈴木惣十* , 金城勝哉** , 坪正義*

要 旨

高速炉放射性腐食生成物(CP)挙動解析コード"PSYCHE"の改良整備と検証を目的として、高速実験炉「常陽」の運転経験を通じて得られたCP測定結果に基づき、1次ナトリウム冷却系と燃料洗浄廃液CP挙動について評価し、その機構の検討と解析モデルの検証を行った。得られた評価結果は次のとおりである。

- (1) 1次ナトリウム冷却系配管・機器管壁に移行する主なCP核種は ^{54}Mn 、 ^{60}Co で、 ^{54}Mn が最優勢である。それに対し炉心部CP付着に関連した燃料洗浄廃液中では ^{60}Co が最大核種で、外側反射体洗浄時の発生量が特に多くなる。これは粒子状放射性腐食生成物が炉内滞在中に更に放射化されたものである。
- (2) 冷却系内の ^{54}Mn の管壁付着速度は、ホットレグ(HL)では炉心材料中の放射化生成物に対応し推移するが、コールドレグ(CL)ではそれを越えて上昇する。そのためビルドアップはHLでは比較的早期に飽和するが、CLでは長期間にわたり持続した。 ^{60}Co の管壁付着速度は、炉心での放射化生成と放出を通じて、燃料交換及び冷却材中酸素濃度の影響を強く受け、更に管壁付着物の剝離・再放出による変動を示す。これ等を勘案すれば ^{60}Co のビルドアップは全領域では \sim 同等で緩やかである。
- (3) ^{54}Mn の配管付着分布は初期にはHLが優勢であるが、付着速度のふるまいを反映して時間経過とともにCLが優勢となる。 ^{60}Co の分布レベルはHLで優勢で時間経過にともなう分布パターンの変化は少ない。
- (4) ^{54}Mn のHLでの付着機構は管壁中拡散であり、CLでは管壁面上での合金粒子形成が主である。 ^{60}Co の付着機構はHLを含め全域的に管壁面上での合金粒子形成が主で、鉄分の多い微視的表面組織に取り込まれていると考えられる。
- (5) ナトリウム系内のCP挙動に関する「溶解・析出モデル」のモデルパラメータの感度調査と上記評価結果に基づく最適化により、解析コード評価精度(C/E)として、主配管部の ^{54}Mn と ^{60}Co のビルドアップに対して全期間を通じた平均でそれぞれ1.36及び1.03、線量率分布に対して1.61を得た。

本研究から得られた結論は次のとおりである。「溶解・析出モデル」により1次系全域にわたる ^{54}Mn の挙動をよく再現できる。 ^{60}Co の場合は主配管部等高流速部に対しては妥当な結果を与えるもの、粒子移行分が存在し、それ等は主ポンプオーバーフロー部や炉心反射体領域等の冷却材低流速部に集積する傾向を示す。

* 大洗工学センター 実験炉部 技術課

** 大洗工学センター 実験炉部 技術課, (現, 総務部 訴訟対策室)

Evaluation of Radioactive Corrosion Products Behaviour
in Primary Systems of Experimental Fast Reactor JOYO

Katsuyuki Iizawa * , Keiji Chatani * , Kazuhiro Ito *
Soju Suzuki * , Katsuya Kinjo ** and Masayoshi Akutsu *

Abstract

An evaluation about the radioactive corrosion product (CP) behaviour in sodium cooling systems of a fast reactor is presented in this report, based on the obtained measurement results in the operating experience of JOYO. The objective of this work is to update the calculational model for predicting the release and deposition behaviour of CP in primary sodium cooling systems of a fast reactor. The evaluation results are as follows;

- (1) The main radionuclides of CPs transported to the out-of-reactor primary sodium loop are ^{54}Mn and ^{60}Co , and ^{54}Mn is the most dominant. On the other hand, ^{60}Co is the most dominant nuclide found in the liquid waste from spent fuel cleaning, which is produced by removal of activated CP deposits from surfaces of core sub-assemblies in sodium cleaning.
- (2) The deposition rate of ^{54}Mn onto the hot-leg (HL) piping walls corresponds fairly with the saturation of radioactivity induced in core materials by activation, on the other hand, that onto the cold-leg (CL) piping walls has been being accelerated. The deposition rate of ^{60}Co , due to the dependency of activation and release in a core, is strongly affected by the re-fuelling pattern and the oxygen concentration in sodium, and suggests the detaching process of deposits from wall surfaces.
- (3) Although ^{54}Mn was transported and deposited preferentially in the HL of the primary cooling system in an early stage, the transport and deposition in the CL regions has overcome that in the HL along operating time. ^{60}Co was transported and deposited preferentially in the HL and the similar distribution pattern has been maintained throughout the operating periods.
- (4) The solution - precipitation model for CP behaviour in flowing sodium system was verified via the sensitivity test of model parameters and optimizing them on the above mentioned results, giving the measured to calculated values of 1.36 or 1.03 for ^{54}Mn or ^{60}Co buildup, and 1.61 for the dose rate distribution, respectively.

The following was concluded from this work. The behaviour of ^{54}Mn is well reproduced in the whole regions of primary sodium system by using the solution - precipitation model. The behaviour of ^{60}Co in higher sodium velocity regions reasonably agrees with the prediction from the model, however the hot spot of ^{60}Co is formed in lower velocity regions of sodium flow, such as outer radial reflector regions in a core and overflow regions of a main pump, suggesting that some parts of ^{60}Co is transported in particulate in sodium flow.

* Experimental Reactor Division, Reactor Technology Section

** Administration Division, Litigation Support Office

目 次

1. 緒 言	1
2. ナトリウム冷却系内のCP挙動と解析評価手法	3
2.1 CP挙動の特徴と機構	3
2.2 CP挙動解析モデル	5
2.3 高速炉CP挙動解析コード”PSYCHE”	6
3. 「常陽」におけるCP測定と評価手法	16
3.1 ナトリウム冷却系CP測定と評価システム	16
3.1.1 測定方法	16
3.1.2 評価システム	17
(1) 高速炉CP線源評価システム	17
(2) 計算方法	18
3.2 燃料洗浄廃液CP測定と評価方法	20
4. 「常陽」におけるCP測定評価結果と考察	30
4.1 1次ナトリウム冷却系におけるCP測定結果	30
4.2 1次ナトリウム冷却系におけるCP核種とビルドアップ傾向	31
(1) CP核種	31
(2) ビルドアップ傾向	33
4.3 1次ナトリウム冷却系管壁CP付着飽和特性	34
(1) ビルドアップの飽和特性	34
(2) 管壁付着速度	37
4.4 1次ナトリウム冷却系管壁CP付着分布特性	43
4.5 燃料洗浄廃液CP特性	48
5. 高速炉CP挙動解析コードの検証結果と考察	84
5.1 解析モデルパラメータの感度評価	84
5.1.1 調査結果	84
5.1.2 インベントリ-計算	85
(1) マスバランス	85

(2) ^{54}Mn のインベントリ	85
(3) ^{60}Co のインベントリ	86
5.1.3 付着分布	86
(1) ^{54}Mn の付着分布	86
(2) ^{60}Co の付着分布	87
5.2 「常陽」CP評価結果による解析コードの検証	88
(1) モデルパラメータの最適化	88
(2) 管壁付着分布の評価精度 (C/E)	91
(3) 線量率評価	91
(4) 挙動推定と予測評価	93
5.3 「常陽」CP評価結果による炉心部CP挙動評価手法の検討	94
5.3.1 制御棒上部案内管壁へのCP付着の推定	94
(1) 評価手法	94
(2) 評価結果	97
5.3.2 燃料集合体及び外側反射体CP付着挙動	99
6. 今後の課題	140
7. 結論	141
謝辞	143
参考文献	144
付録1 「常陽」CP挙動評価計算リスト	147
付録2 「常陽」1次主冷却系配管及び機器周りの線量率評価結果	149
付録3 「常陽」1ナトリウム冷却材中酸素濃度評価について	155

表 リ ス ト

表 3.1-1	1次ナトリウム冷却系CP測定用検出器仕様	23
表 4.1-1	1次ナトリウム冷却系主配管（Aループ）CP付着分布測定結果	51
表 4.5-1	炉心構成要素洗浄廃液CP測定結果	53
表 4.5-2	炉心構成要素洗浄時CP発生量の推定	54
表 5.1-1	CP挙動解析モデルパラメータ（「溶解・析出モデル」）	102
表 5.2-1	CP管壁付着密度の計算値と測定値の比較	103
表 5.3-1	CR及びCRD-UGT追加領域パラメータ	104
表 5.3-2	UGT管壁CP付着量の推定	105
表 A1	「常陽」CP挙動評価計算リスト	146
表 A2- 1		
～ -21	「常陽」1次主冷却系配管及び機器周りの線量率	148
		～ 153

図 リ ス ト

図 2.1-1	ナトリウム中遷移金属元素の溶解度	8
図 2.1-2	管壁表面付着CP粒子	9
図 2.1-3	ナトリウム1次冷却系におけるステンレス鋼成分、放射性核種の質量移行模式図	10
図 2.2-1	CP挙動解析モデル（「溶解・析出モデル」）	11
図 2.2-2	解析式	12
図 2.3-1	FBRにおけるCP挙動計算	15
図 3.1-1	1次ナトリウム冷却系主配管壁CP付着分布測定位置	24
図 3.1-2	Ge半導体検出器-コリメータシステム	25
図 3.1-3	1次ナトリウム冷却系主配管線量率分布測定位置	26
図 3.1-4	高速炉CP線源評価システム	27
図 3.1-5	グラフ作成プログラム”CPEGRAPH”構成図	28
図 3.2-1	燃料洗浄廃液処理基本プロセスフロー	29
図 4.1-1	コールドトラップCPビルドアップ分布測定結果	55
図 4.2-1	1次ナトリウム冷却系主配管壁CP付着分布核種割合 ($^{54}\text{Mn}/^{60}\text{Co}$)の比較	56
図 4.2-2	1次ナトリウム冷却系主配管壁CPビルドアップ (a) ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{58}Co ビルドアップの比較	57
	(b) ^{54}Mn のビルドアップ	58
	(c) ^{60}Co のビルドアップ	59

図 4.3-1	Mk-II 炉心期運転・停止サイクル下での管壁付着ないし炉心材料の放射化生成放射能飽和因子 (R=一定)	60
	(a) ^{54}Mn の飽和因子 (管壁付着ないし燃料交換のない場合の放射化生成、4 及び 6 サイクル燃料交換の 3 ケース)	60
	(b) ^{60}Co の飽和因子 (管壁付着ないし燃料交換のない場合の放射化生成、4 及び 6 サイクル燃料交換の 3 ケース)	61
	(c) ^{58}Co の飽和因子 (管壁付着ないし燃料交換のない場合の放射化生成、4 及び 6 サイクル燃料交換の 3 ケース)	62
図 4.3-2	1 次ナトリウム冷却系主配管壁付着 CP の飽和特性	63
	(a) ^{54}Mn の飽和特性	63
	(b) ^{60}Co の飽和特性	64
図 4.3-3	1 次ナトリウム冷却系主配管壁 CP 付着速度の推移	65
	(a) ^{54}Mn 配管壁付着速度 (HL)	65
	(b) ^{54}Mn 配管壁付着速度 (CL/1)	66
	(c) ^{54}Mn 配管壁付着速度 (CL/2)	67
	(d) ^{60}Co 配管壁付着速度 (HL)	68
	(e) ^{60}Co 配管壁付着速度 (CL/1)	69
	(f) ^{60}Co 配管壁付着速度 (CL/2)	70
図 4.3-4	1 次ナトリウム冷却系主配管壁 CP 付着速度と炉心材料中放射化生成放射能飽和因子の推移の比較	71
	(a) ^{54}Mn の比較	71
	(b) ^{60}Co の比較	72
図 4.3-5	1 次ナトリウム冷却系主配管壁 CP 付着速度適合式	73
	(a) ^{54}Mn の適合式	73
	(b) ^{60}Co の適合式	74
図 4.3-6	1 次ナトリウム冷却系主配管壁 CP ビルドアップの予測	75
	(a) ^{54}Mn のビルドアップ予測	75
	(b) ^{60}Co のビルドアップ予測	76
図 4.3-7	FFTF 1 次ナトリウム冷却系における線量率ビルドアップの推移	77

図 4.4-1	1次ナトリウム冷却系主配管壁CP付着分布（第9回定期検査時）	78
	（a）全測定値を用いた分布図	78
	（b）異常分布値を除いた分布図	79
図 4.4-2	CP付着密度のCL/2のCL/1に対する比の推移	80
図 4.4-3	1次ナトリウム冷却系主配管壁CP付着分布の推移	81
	（a） ^{54}Mn 付着分布の推移	81
	（b） ^{60}Co 付着分布の推移	81
図 4.4-4	CP付着密度の増加比（第9回/第3回定期検査時）の比較	82
図 4.5-1	炉心構成要素洗浄時CP発生量の推定	83
図 5.1-1	拡散係数（D）感度	106
	（1） ^{54}Mn 、（2） ^{60}Co 、（3） ^{58}Co	106~108
図 5.1-2	界面前進速度（ u_d ）感度	109
	（1） ^{54}Mn 、（2） ^{60}Co	109~110
図 5.1-3	化学的分配係数（ β' ）感度	111
	（1） ^{60}Co 、（2） ^{58}Co	111~112
図 5.1-4	拡散係数（D）依存性	113
	（1） ^{54}Mn 、（2） ^{60}Co 、（3） ^{58}Co	113~117
図 5.1-5	界面前進速度（ u_d ）依存性	118
	（1） ^{54}Mn 、（2） ^{60}Co	118~121
図 5.1-6	化学的分配係数（ β' ）依存性	122
	（1） ^{60}Co 、（2） ^{58}Co	122~124
図 5.2-1	CP付着分布の計算と測定結果の比較	125
	（a） ^{54}Mn	125
	（b） ^{60}Co	127
図 5.2-2	CPビルドアップ推移の計算と測定結果の比較	129
	（a） ^{54}Mn	129
	（b） ^{60}Co	130

図 5.2-3	CPビルドアップに対するC/Eの推移	131
	(a) ^{54}Mn	131
	(b) ^{60}Co	131
図 5.2-4	1次冷却系主配管線量率分布の計算値と測定値の比較(第9回定期検査時)	132
図 5.2-5	1次冷却系主配管線量率(領域平均)の推移	133
	(a) HL	133
	(b) CL/1	133
	(c) CL/2	133
図 5.2-6	1次冷却系主配管線量率(領域平均)のC/Eの推移	134
図 5.2-7	IHX線量率(周方向平均)の推移	135
	(a) 上部(GL-7000)	135
	(b) 中央部(GL-8000)	135
	(c) 下部(GL-9400)	135
図 5.2-8	主ポンプ線量率(周方向平均)の推移	136
	(a) 上部(GL-6463)	136
	(b) 中央部(GL-6863)	136
	(c) 下部(GL-7463)	136
図 5.2-9	CP蓄積分布の推定(第9回定期検査時)	137
図 5.3-1	UGT簡易モデル	138
図 5.3-2	UGT管壁中CP濃度分布	139
	(a) ^{60}Co	139
	(b) ^{58}Co	139
	(c) ^{54}Mn	139

1. 緒 言

高速実験炉「常陽」では、高速炉プラント保守時における作業者の被ばく低減化と放射性廃棄物低減化のための手法の確立を目的として、プラントにおける放射線源挙動の解明及びその低減対策に係わる研究開発と適用経験の蓄積が行われて来た[1]。この場合被ばくをもたらす重要な線源は、原子炉炉心部で発生し、1次ナトリウム冷却系に移行、蓄積する放射性腐食生成物(CP)である。これ等CP線源の低減対策を効果的且つ計画的に進めるためには、実プラントにおけるCP挙動の事実を以て現象解明を行い、ここから得られる知見に基づき線源挙動評価手法の整備と低減対策の適用を実施してゆく必要がある。本報告書は実験炉の運転経験から得られたCP実測データに基づく、高速炉実プラントにおけるCP挙動現象の解明、評価及び高速炉CP挙動解析コード“PSYCHE”[2]の検証に関するものである。CP挙動に関し注目するプラント領域は、まず1次ナトリウム冷却系であるが、燃料洗浄・廃液処理系におけるCP挙動も重要である。

実験炉におけるCP測定の主なもの、Mk-II炉心移行時の第3回定期検査以来第9回までの毎定期検査時に行われて来た、1次ナトリウム冷却系主配管・機器管壁のCP付着分布と線量率分布測定(「床下CP測定」と記す)である[3],[4],[5]。その他1次系コールドトラップのCP測定[6]や燃料洗浄廃液のCP測定調査等もある。解析コードは、主としてCP挙動炉外試験により構築された「溶解・析出モデル」に基づくものであるが、実機への適用性は上述の「床下CP測定」データにより検証されて来た[2]。本研究では、まず、最近の「床下CP測定」結果[5]において、「常陽」1次ナトリウム冷却系のCPビルドアップに飽和期の特徴と思われるものが現れたことから、過去7回の長期にわたり蓄積されたCP測定データの詳細評価により、実プラントにおけるCP挙動現象の特徴の全体像を把握し得る段階に到りつゝあるものと判断し、それ等の定量的な評価と機構に関する検討を進めることとした。更に、高速炉CP挙動解析コードについて、これ等の結果に基づく改良整備を行ってコードの検証精度を確認し、高速増殖原型炉「もんじゅ」性能試験時のCP測定事前評価等に備えることとした。

「常陽」の「床下CP測定」データの評価においては、1次冷却系統主配管部と中間熱交換器(IHX)、ポンプ等の機器におけるCP蓄積の飽和特性と分布特性に現れる特徴を定量的に示し、それ等をもたらす機構について解析コードを援用して検討する。飽和特性については、配管壁でのCPビルドアップの推移より管壁付着速度の推定を行い、

特にコールドレグ配管領域での ^{54}Mn のビルドアップが、通常の放射能飽和則による予測より長期化した現象について検討する。付着分布については、そのパターンと推移が ^{54}Mn と ^{60}Co でそれぞれに特有の様相を呈していることを示し、それ等に見られる多様性と共通性に関して評価する。この評価結果をCP挙動解析モデル（「溶解・析出モデル」）[2]のモデルパラメータの適用法と最適値に反映させ、解析コードによる測定結果の再現性の確認により、これ等核種の管壁付着機構の検討を行う。次に、燃料洗浄廃液のCPについてであるが、これは「常陽」の運転経験を通じて明確化して来た実プラントでの被ばく対策上重要となるCP挙動現象である。最近の経験から外側反射体を洗浄した場合に特に高濃度のCP廃液が発生することが明らかとなって来ている。この燃料洗浄廃液へのCPの放出は、炉心集合体表面へのCPの付着や放射化に起因しているのだが、その発生機構を明確化する必要がある。そのためにまず、ドライバー燃料や外側反射体の洗浄廃液のCP測定データから、集合体当たりのCP発生量の推定を行い、そこに見られる特徴を明らかとする。次いで、解析コードを用いた炉心集合体表面へのCP付着挙動計算の測定結果との比較、検討により、発生機構に関して考察する。更に、CPの炉心部での付着挙動は上述の実際上の理由からだけではなく、そこが1次冷却系統全体の中でも優勢な付着領域となり、CP発生領域であること、相まってCP挙動全体に与える影響が大きいことから、注目しておく必要がある。そこで、本研究では先の炉心集合体に加え、炉心上部構造領域に当たる制御棒上部案内管壁でのCP付着挙動に関しても、測定データと解析コードにより検討を行う。

高速炉CP挙動解析コードに関しては、まず、実機体系下での「溶解・析出モデル」自体の振舞いを調査するため、モデルパラメータの感度調査を行う。感度調査に付するモデルパラメータはCP核種の管壁中拡散係数(D)、コバルトの化学的分配係数(β')、CP核種の付着に対する界面前進速度(u_d)である。この感度調査は、解析コードがCP挙動の予測手段として有効であるばかりでなく、実機において観察されるCP挙動現象の分析手段としても有効であることを確認するためのものでもある。次に、モデルパラメータについて、従来は炉外試験結果により解析的に決定したものを、一部について実機データとの整合を図るため調整して用いて来たが、本研究において実機におけるCP挙動現象を基に再評価し最適化を図る。

2. ナトリウム冷却系内のCP挙動と解析評価手法

本章ではナトリウム冷却系内のCP移行現象の特徴と機構について基本的事項のレビューを行い、CP挙動モデルの一つで合金中の拡散を基本メカニズムとする「溶解・析出モデル」と、これに基づく高速炉CP挙動解析コード“PSYCHE”について述べる。

2.1 CP移行の特徴と機構 [7]

ナトリウム冷却高速炉のCPは、燃料被覆管材等の炉心構成材料であるステンレス鋼の放射化により生成され、そこからナトリウム冷却材中にCP成分として溶け出し発生する。ナトリウム中に溶出したCPは冷却材により運ばれ、1次ナトリウム冷却系内をある程度循環しつつ、炉外の配管、機器（IHX、ポンプ、コールドトラップ等）管壁のみならず、炉心の燃料集合体や反射体等の炉心構成要素表面にも付着する。付着はほぼ完全に進み、冷却材中に蓄積されるものゝ割合は極僅かである。炉心構成要素表面に付着したCPは質量移行放射能に加え炉内滞在中に更に放射化され、物質質量としては微量であっても強い放射化生成物となり、燃料交換等による構成要素の炉外取り出しとナトリウム洗浄時に洗浄廃液中に移行する。従って、プラント1次ナトリウム冷却系と洗浄・廃液処理設備のCP汚染現象の解明と低減対策が課題となる。

高速炉プラントの1次ナトリウム冷却系の運転、保守における主要なCP核種は ^{54}Mn と ^{60}Co であり、 ^{58}Co がこれに続くが量的には少ない。これ等はステンレス鋼成分あるいは不純物コバルトの (n, γ) や (n, p) 反応等による放射化により生成される。1次ナトリウム冷却系ループ管壁へのビルドアップは ^{54}Mn が最大核種で、例えば「常陽」の場合、 ^{60}Co の約20倍となり、この状況はポンプ等の機器洗浄廃液でも同様である。一方、燃料洗浄廃液では ^{60}Co が最大核種で ^{54}Mn を相当上回り、その他 ^{58}Co や ^{51}Cr 及び ^{18}Ta 、 ^{95}Zr - ^{95}Nb 等のステンレス鋼構成金属元素や微量添加元素等の放射化生成放射能も検出される。その他、ナトリウム中あるいはコールドトラップの低温管壁に微量の $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 、 ^{124}Sb 、 ^{65}Zn 等が見い出されることがある。

これは構造材料中に極微量不純物として存在するこれ等の元素が、ナトリウム中溶解度が高いため選択的に溶け出し放射化されたものである。そこでナトリウム中の腐食生成物の濃度レベルは、化学成分としても放射能から言っても、管壁における蓄積量にその

まゝ対応しているわけではない。

炉心材料中における重要なCP核種生成核反応は、 $^{54}\text{Fe}(n, p)^{54}\text{Mn}$ 、 $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$ 、 $^{58}\text{Co}(n, \gamma)^{60}\text{Co}$ である。前2者は速中性子反応でその反応率は炉心中心部の燃料領域で高いが、後者は中性子スペクトルの軟化する炉心の外側あるいは上、下部領域で高い。合金中からのCPの溶出は、これ等元素の合金中での化学的安定性とナトリウム中溶解度（より正確には合金とナトリウム中の活量）により支配される。図2. 1-1に示すようにこれ等元素のうち、Mn、Niの溶解度は他の成分に比べて高めで良く似ている。これに比べてCoは1桁以上小さい。これは炉心部腐食領域で ^{54}Mn は溶け出し易く、 ^{60}Co 、 ^{58}Co はそれに比べて溶けだし難いという傾向をもたらす。 ^{54}Mn の溶出は合金内部からの拡散により促進されるため、表面の減肉（界面後退）による放出を越えて、超化学量論的溶出傾向（hyperstoichiometric release）を示す。一方、 ^{60}Co 、 ^{58}Co は、界面後退による表面からの放出が主体となると考えられ、どちらかと言えば腐食領域に保持され易いので、亜化学量論的溶出傾向（hypostoichiometric release）を示す。実プラントの ^{58}Co の場合は、更に炉心材料からのNiの選択的溶出の結果、標的核の ^{58}Ni の表面濃度も低下するため、接液表面での ^{58}Co の放射化生成濃度は低下し、放出量はより一層減少する傾向となる。これ等の理由により ^{54}Mn の発生量が ^{60}Co 、 ^{58}Co に比べて相当多くなる。CP発生量は温度が高いほど多く、ナトリウム中酸素濃度は低いほど少ない。酸素濃度には ^{60}Co の溶出速度の方が ^{54}Mn より敏感に反応する[8]。この酸素濃度効果はステンレス鋼のベース金属である鉄の腐食がNaとの複合酸化物形成によるためと推定される。即ち、 ^{60}Co の溶出は肉減りの実体である鉄のNa腐食に伴っているのに対し、 ^{54}Mn 溶出は管壁内部からの拡散支配であるためと推定される。しかしこの酸素濃度依存機構に関しては、今日までのところ最終的な決着はまだついていない。

CPはNa中を溶解種として運ばれるのか、粒子として運ばれるのか、どちらが主要であるかは未だ決着のついていない問題である。しかし、Ni金属表面へのCPの付着が一特に ^{54}Mn の場合に顕著である—ステンレス鋼に比べて大きくなる等、管壁表面材質の影響が明らかに存在することは、管壁表面上での溶解種の析出を予測させる充分な理由がある。「常陽」1次Na冷却系配管でのCP付着分布の推移から、 ^{54}Mn の管壁付着機構は炉心部出口やホットレグ（HL）の高温部で管壁中拡散、コールドレグ（CL）部等温度降下とともに管壁表面析出が主体となること、一方、 ^{60}Co 、 ^{58}Co の場合は全領

域にわたって表面析出が主体となると推定される。ナトリウム環境下での質量移行現象の研究において、図 2. 1-2に示すようにFe-Ni-Crの3元系状態図の析出線上に沿った組成を有する合金粒子の形成が確認されている。MnやCoの場合も同様に、単体相の析出としてではなく、Fe-Ni-MnあるいはFe-Co等の合金相として析出しているものと考えられる [9]。CoはNa中溶解度が低いため、この合金粒子は高温でも形成され易くなるものと考えられる。Naループ内でCP元素あるいはその放射性核種の移行は、それ等に特有の選択的移行挙動を示す。即ち、 ^{54}Mn は回路内の移動性が高く（MnやNiは回路内をある程度循環していると考えられる）、（模擬）中間熱交換器（IHX）の温度降下部からCL領域に優先的に移行し、一方 ^{60}Co 、 ^{58}Co は移動性が低く（Coは回路内をほぼ1循環する間に、質量移行を完結すると考えられる）、発生領域近傍の高温部に優先的に移行する傾向を示す。実プラントの場合、Na冷却系の純化系に設置されたコールドトラップによるCPの除去は、それほど大きくはならないと考えられる。何故なら、CP金属元素の溶解度は中高温部でも低く付着速度も速いから、主循環回路内での付着が大きく流量配分の少ない最下流域のコールドトラップまで輸送されるものゝ割合は少なくなるからである。従って、コールドトラップによるCP低減効果は、その直接的除去と言うより冷却材中酸素濃度を下げ腐食速度を低減することの効果によるものである。Naループの等温部のCP付着分布（下流効果）解析は、Na中から管壁面への移行について、 ^{60}Co の移行は管壁面上のNa境界膜（粘性底層）拡散律速、 ^{54}Mn はNa/管壁界面反応（析出）律速と境界膜拡散律速の中間ケースとなることを示す [11]。これは、溶出側にも拡張し得るものと考えられる。以上述べたところに基づきナトリウム系内におけるCP移行を模式化し、図 2. 1-3に示した。

2. 2 CP挙動解析モデル

前節に述べたナトリウム系内のCP挙動の特徴を再現するための一つのCP挙動解析モデルが開発されて来た [10], [11]。このモデルは管壁中の拡散を基本メカニズムとし、ナトリウム中での溶解化学種の移行と管壁での析出のイメージが強いもので、「溶解・付着モデル」（Solution-Precipitation Model）と称する。本モデルにおけるCP質量移行の駆動力は、管壁あるいは析出物中の核種等の成分のナトリウム中飽和濃度（平衡濃度）と現実の濃度との差による。質量移行は図 2. 2-1に示すように次の素過程から

なる。①管壁中の拡散と表面の溶解（肉減り）または表面付着（表面析出物層の成長）、②管壁/Na界面における移行（原子の溶解あるいは酸素に媒介された溶解または合金粒子の析出）、③界面から乱流主流域へのNa境膜中拡散、④Na流による回路内の輸送である。解析式の定式化は図2. 2-2 (a), (b), (c)に示したが、次のようにして得られる。まず、管壁、界面、ナトリウム境膜における質量フラックスを定式化し、次に連続の条件からこれ等を等値することにより、総括質量フラックスとモデルパラメータの定式化が得られる。管壁中の拡散は合金成分が置換型金属元素の場合は拡散深さが浅く、減肉や表面析出による界面移動の影響を無視出来ないため、1次元で無限厚みのモデルではあるが、境界移動型の拡散方程式により記述される。この拡散方程式を、境界条件、初期条件、質量保存則を考慮して解くことにより、管壁中あるいはナトリウム中のCP濃度が得られる。これを用いて質量フラックスが解析的に定式化される [11], [2]。解析モデルパラメータは、管壁中拡散係数(D)、総括物質移動係数(K)、化学的分配係数(β)、界面移動速度(u or u_a)（肉減りあるいは析出に対応する後退と前進）の5種類である。これ等は、MnとCoに見られたナトリウム中におけるこれ等の選択的挙動特性に基づき、Mn型とCo型に分けて設定されており、材料試験及び炉外ループ試験結果により原型を定め、最適値は計算結果を「常陽」のCP測定結果に適合することにより、整備、決定する方針で進めて来た [2]。第5章でモデルパラメータの感度調査を行い、また第4章で述べる「常陽」実測データの評価結果を踏まえ最適値の見直しを行う。

2. 3 高速炉CP挙動解析コード "PSYCHE"

このCP移行モデルに基づき高速炉プラント体系におけるCP挙動計算を行うための計算コード"PSYCHE"を開発して来た [2]。これは、実機体系における物質移動現象に対する一種のシミュレーションコードである。これは放射性同位体と安定元素双方の移行挙動を取扱い得るが、CP核種の生成、溶出によるCPの発生は、もっぱら炉心部で起こり、Na中に放出されたCPは、冷却材により循環回路内を運ばれ、ある程度循環しつつ、冷却系機器・配管壁及び炉心集合体の一部領域の表面に付着し蓄積していくとするものである。この計算過程は、図2. 2-3に示すようにプラント体系構成（形状、配置）、炉心の核反応（中性子フラックスと断面積）、冷却材条件（温度、流速、酸素濃度）、運転計画（運転と停止サイクル、燃料交換と炉心構成）を模擬し、これ等に規定

されながら進められる。更に、このコードで計算された1次Na冷却系におけるCP付着分布を基に、QAD-CGコードを用いて、配管・機器周りのガンマ線量率分布が計算される。第5章で「常陽」実測結果を用いて本コードの検証を行う。

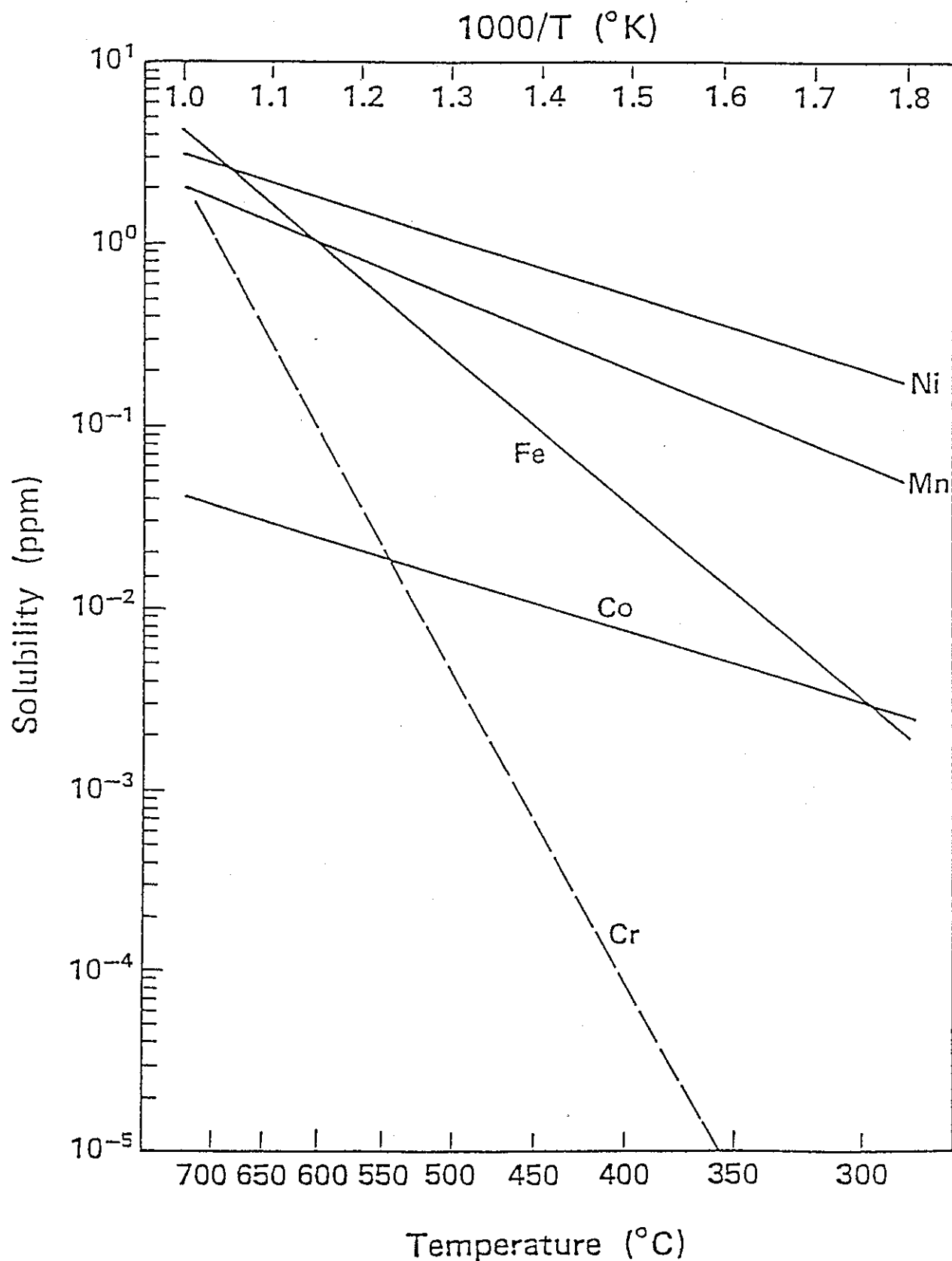
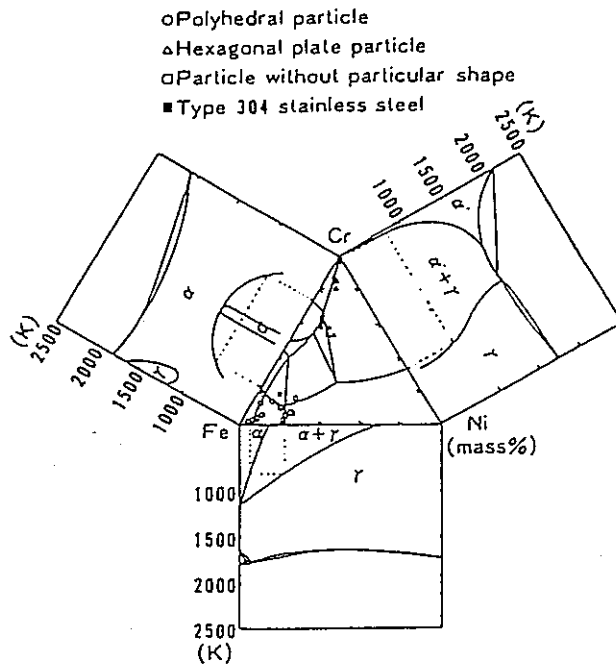
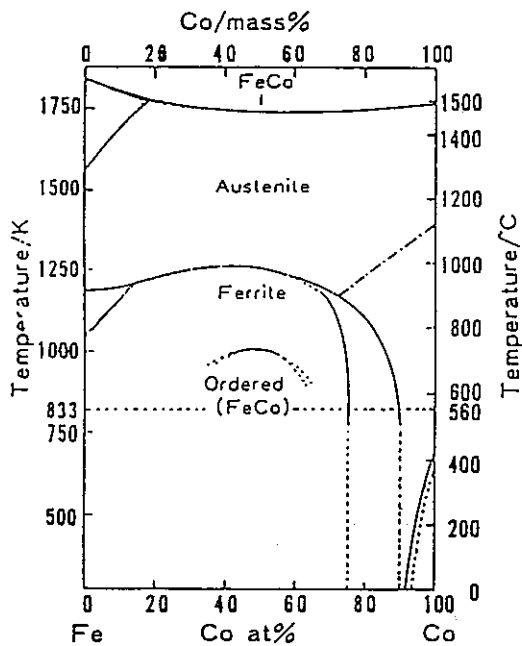


図 2.1-1 ナトリウム中遷移金属元素の溶解度



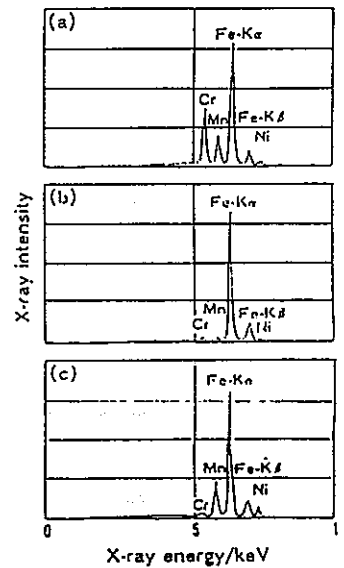
(a) Concentration of Fe, Cr and Ni in deposited particles shown in a Fe-Cr-Ni diagram



(b) Iron-cobalt alloy phase diagram.



Fig. SEM features and EDX analyses of deposited particles on Type 304 stainless steel, facing an iron-manganese alloy piece, after immersing in sodium at 833 K for 3.6×10^3 ks.
 (a) Fine particle on Type 304 stainless steel.
 (b) Polyhedral shaped particle deposited.
 (c) Other polyhedral particle deposited.



(c) Analysis of particles contained manganese on steel surface

図 2.1-2 管壁表面付着 CP 粒子 (横田等[9]による)

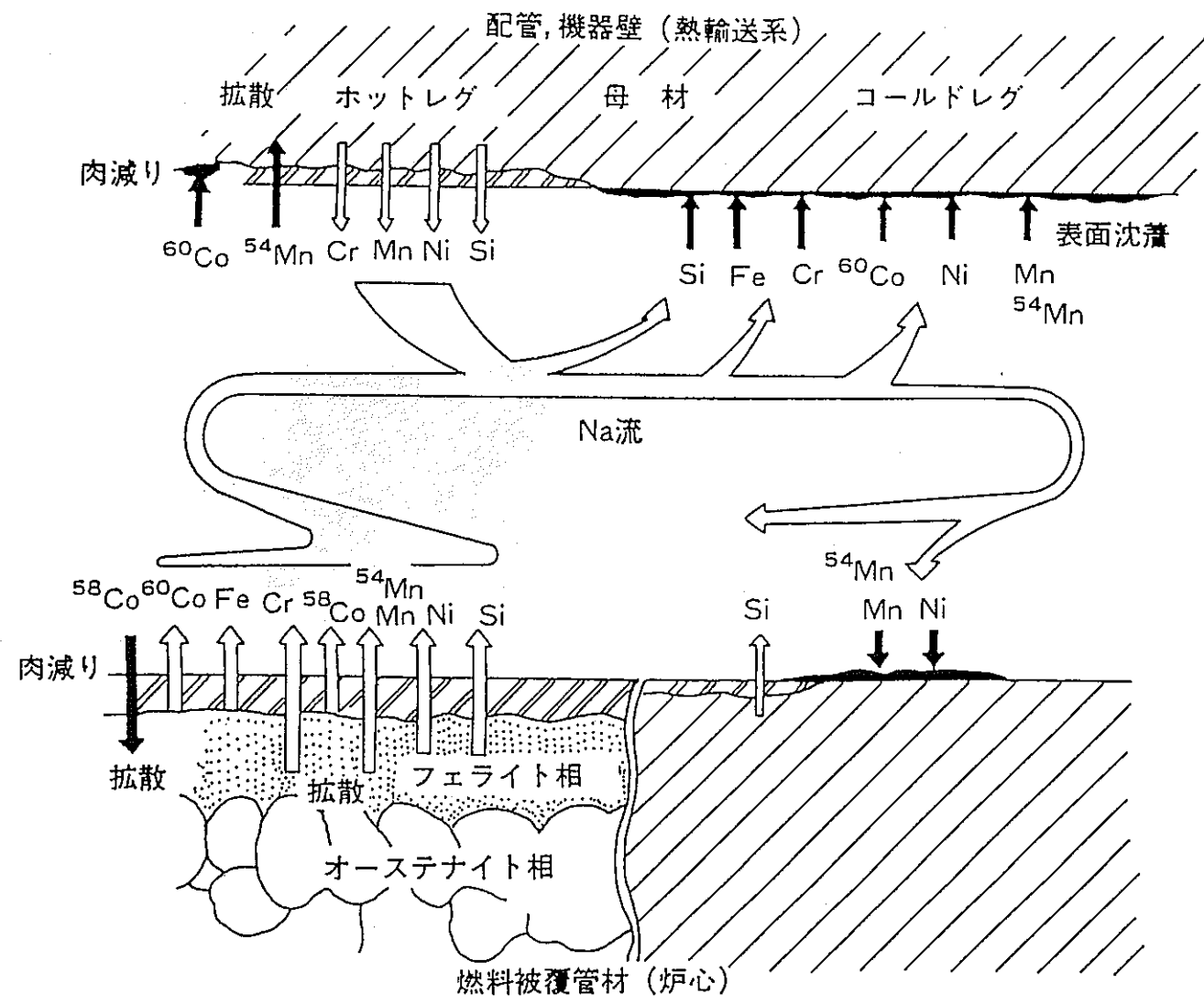


図 2.1-3 ナトリウム1次冷却系におけるステンレス鋼成分、放射性核種の質量移行模式図

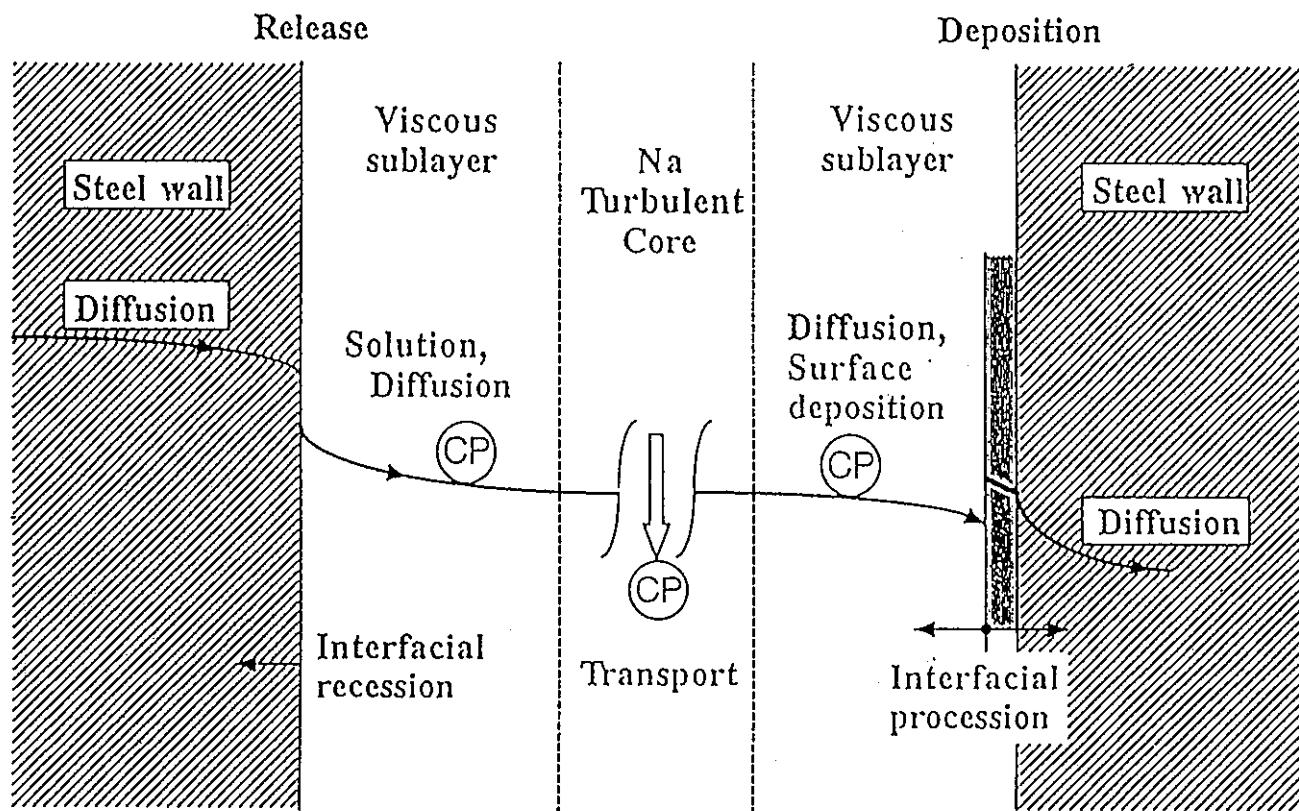


図 2.2-1 CP 挙動解析モデル (「溶解・析出モデル」)

Mass Flux for Release (+) or Deposition (-)

$$\pm J = D \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=0} \pm u C_i \quad \left[\begin{array}{l} \text{right side sign} \\ + \text{ bulk corrosion} \\ - \text{ bulk deposition} \end{array} \right] \quad (1)$$

$$\left. \begin{array}{l} \pm J = k_c C_i - k'_p C'_i \quad (\text{for highly leached species : Mn and Ni isotopes etc.}) \\ \text{or} \\ k_c C_i \theta' - k'_p C'_i \quad (\text{for weakly leached species : Co isotopes etc.}) \end{array} \right\} \quad (2)$$

$$\pm J = k' (C'_i - C') \quad (3)$$

图 2.2-2 解析式

Overall Mass Flux from Eqs. (1), (2) and (3)

$$\pm J = K' \left[\frac{C_i}{\beta \text{ or } \beta'} - C' \right] \quad (4)$$

$$K' = k'k_p' / (k' + k_p') \quad (5)$$

$$\left. \begin{array}{l} \beta = k_p' / k_c \quad (\text{for highly leached species}) \\ \text{or} \\ \beta' = \beta / \theta' \quad (\text{for weakly leached species}) \end{array} \right\} \quad (6)$$

図 2.2-2 (続き)

Diffusion Equation (+ bulk corrosion - bulk deposition)

for release

$$D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \pm u \frac{\partial C}{\partial x} - \lambda C + R = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (8)$$

$\lambda \rightarrow \lambda + \int \sigma \phi dE_n$ for nuclides such as ^{58}Co or ^{182}Ta
with large neutron cross section

for deposition

$$D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \pm u \frac{\partial C}{\partial x} - \lambda C = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (9)$$

Boundary Condition for Either Release or Deposition

$$D \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=0} = \left(\frac{K'}{\beta \text{ or } \beta'}, \mp u_{c \text{ or } d} \right) C_i - K' C' \quad (10)$$

Initial Condition

$$C(\text{at } t=0) = \begin{cases} 0 & \text{for active deposition} \\ C_o & \text{for stable release and deposition,} \\ & \text{or active release} \end{cases} \quad (11)$$

Mass Balance

$$\frac{\partial C'}{\partial y} = 4 \frac{K'}{vd} \left(\frac{C_i}{\beta \text{ or } \beta'} - C' \right) \quad (12)$$

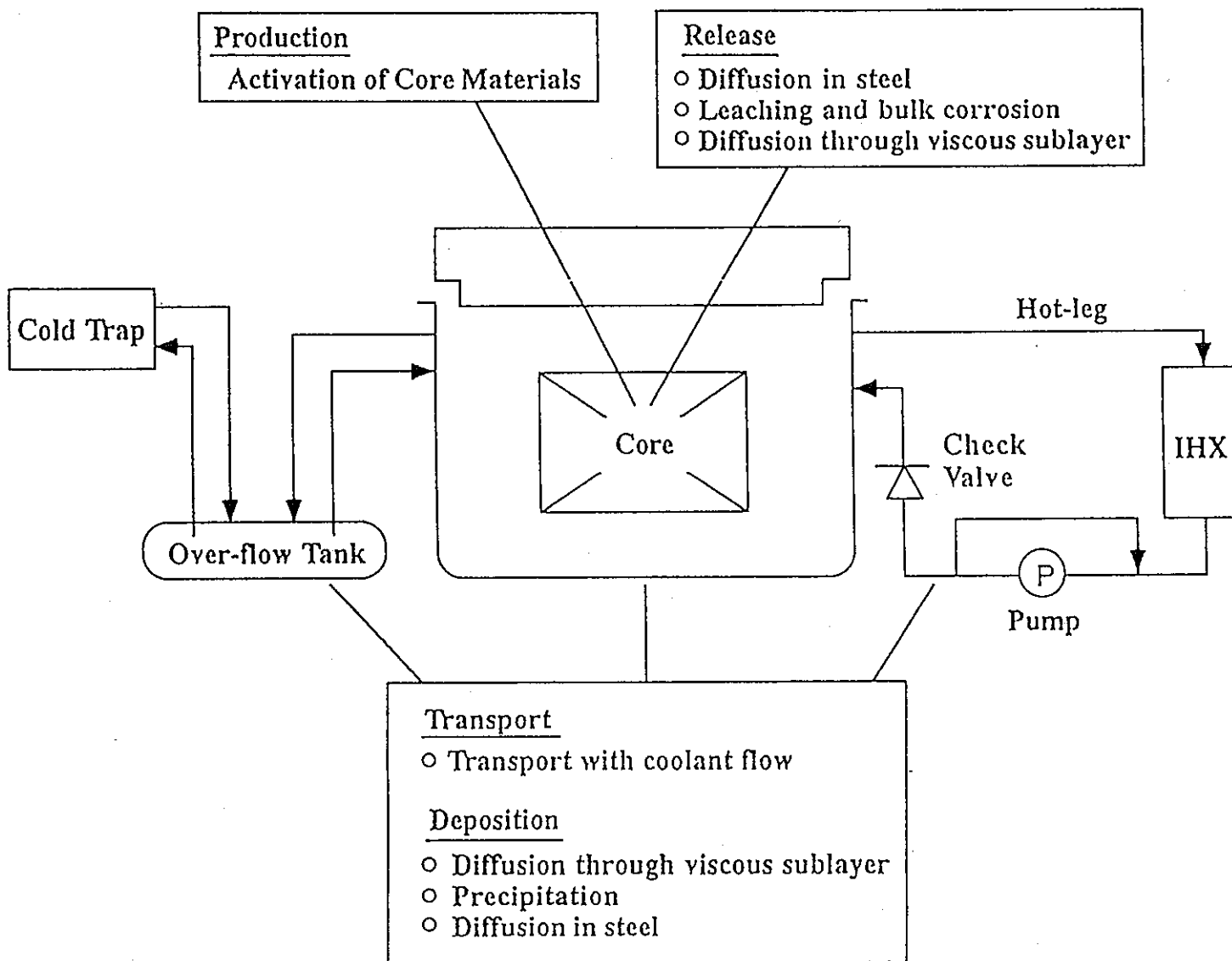


図 2.3-1 FBRにおけるCP挙動計算

3. 「常陽」におけるCP測定と評価方法

本章では今回の解析評価に使用したナトリウム冷却系における「床下CP測定」と、燃料洗浄廃液CP測定におけるデータ取得と評価方法について述べる。

3. 1 ナトリウム冷却系CP測定と評価システム

3. 1. 1 測定方法

「常陽」では実機におけるCP挙動解明と高速炉CP挙動解析コードの検証を目的として、「床下CP測定」と称して1次ナトリウム冷却系のCPの測定を実施して来た。測定は1982年の第3回定期検査(Mk-I終了)時以来、各定期検査ごとに実施され、1991年12月の第9回定期検査時測定までに計7回のデータが蓄積された。測定は1次ナトリウム冷却系主配管(主としてAループ)管壁付着のCP付着分布、並びに主配管及び中間熱交換器(IHX)と主ポンプまわりの線量率分布測定からなっている。CP付着分布測定は、図3. 1-1に示す主配管系の各測定位置にコリメータシステムに組み込んだ高純度Ge半導体検出器を設置し実施された。検出器系は図3. 1-2に示すように、あらかじめ実験炉主配管形状(ホットレグ(HL:REACTOR OUTLET-IHX): $\phi_{ID}489\text{mm}$, コールドレグ-1(CL/1:IHX-PUMP): $\phi_{ID}441.4\text{mm}$, コールドレグ-2(CL/2:PUMP-REACTOR INLET): $\phi_{ID}305.5\text{mm}$)でアレンジされたモックアップ線源を用いて校正され、計数率を管壁付着密度($\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$)に変換するための変換係数($\mu\text{Ci}/\text{cm}^2/\text{cpm}$)が決定された。測定点はAループ主配管13点、Bループ3点、及びIHX、主ポンプ各1点である。線量率測定は熱蛍光線量率計(TLD)と CaSO_4 (Tm)を用いたTLD素子により実施された。その方法は、あらかじめ校正されたTLD素子を配管・機器の保温構造物の外表面に取り付け、数時間照射し、48時間フェーディング(暗中保管)後に熱蛍光線量計にて照射量を測定するものである。線量率分布の測定点は、配管系に対しては図3. 1-3に示すように冷却材の流れに沿って約1m間隔で且つ周方向に 90° 毎に取られている。IHX、ポンプ、ポンプオーバーフローカラム等の機器については、上下及び周方向にかなり細かく測定点が設定されている。各定期検査時における測定点の総数は1400~2000点にのぼる。表3. 1-1には上述のガンマ線スペクトルと線量率の検出器の主な仕様をまとめて示した。尚、上記測定法の詳細については各定期検査時のCP測定結果と評価に関する報告書[3],[4],[5]を参照されたい。

次に、プラントの現場での測定上重要になると考えられる、半導体検出器によるガンマ線スペクトル測定時のノイズ対策に関して、これまでの「床下CP測定」作業から得られた2、3の経験的知見について述べる。1次ナトリウム冷却系室である「床下CP測定」環境は、半導体検出器を用いるような精密測定にとっては決して理想的な環境ではなく、しばしば誘導ノイズ等のノイズ対策に苦しむことになるが、これに的確に対処出来ないと無益な被ばくを被ることになる。これによる攪乱を極小化し、データの劣化を最小限に抑えるために有効と考えられる対策の幾つかを以下に記す。①検出器と測定電子回路（高圧電源、増幅器、MCA等）の距離は必要最小限にとどめ、信号、プリアンプ、高圧電源ケーブルは空中配線を避けること、②インピーダンスマッチングを行うこと、③床上の鉄板や金属構造物にはノイズが渦巻いているので、必要に応じて検出器及び測定回路系（MCA等）はビニールシートでくるんで周辺と絶縁し、測定回路側で測定システム全体の1点接地化（周辺の配管類を利用する）をはかること、④場所と時間帯によりノイズが特に多い場合もあるので、その可能性が高い場合には測定電子回路の設置場所を変えたり、測定を他作業の少ない時間帯にずらすこと、⑤測定系の電源には出来るだけ安定化電源を用いることである。

3. 1. 2 評価システム

(1) 高速炉CP線源評価システム

「常陽」から得られるCP測定データの解析評価により、実機における挙動の特徴を定量的に評価し、これ等の結果を高速炉CP挙動解析コード”PSYCHE”の改良整備と検証に効果的に反映してゆくための評価システムをPC-9801上で作成して来た。

これは、最終的にはOEC-LAN上のFACOM-パーソナルコンピューター・システムを用いて、挙動解析コードと組み合わせて用いる「高速炉CP線源評価システム」の構築を目標としたものである。本報告書第4章に述べるCP測定データの各種評価を行うために用いた、評価システムの構成を図3.1-4に示す。本システムは測定データに基づき主として各種のグラフ解析によりCP挙動の評価を行うためのもので、データベース作成（Original Data Processing）、データ編集（Data Compilation for Graphics）、グラフィックス（Graphics）の各プログラム群から構成されている。図には、本システムの完成時点に組み込まれるFACOM上で作動する高速炉CP挙動解析コード（Simulation Calculation of CP Behaviour in LMFBR）も示されている。データベース作

成プログラム群は、測定データファイル作成と修正あるいは確認（CPDFMAKE.BAS, CPDFCHK.BAS）、運転スケジュール作成と修正（SCHEMAKE.BAS）、解析コードによる計算結果データファイル作成と修正あるいは確認（XYDFMAKE.BAS, MNDFCRCT.BAS, CODFCRCT.BAS）、線量率データファイル作成と修正あるいは確認（DRCRCT.BAS）から構成されている。更にこれ等のプログラムをバックアップするための予備プログラム（XYDFMAKE.BAS, XYDFCHK.BAS, XYDFCRCT.BAS）が用意されている。データ編集プログラム群は、データベースファイルより幾つかの目的に応じてデータの加工処理を行い単純なX-Yイメージのデータファイルを作成し、グラフ作成に供するためのものである。本プログラム群はCPのビルドアップの経時変化あるいは系統内分布解析（放射性崩壊補正機能を含む）（CPDFUSE.BAS, CPDFUSEB.BAS, 予備としてXYDFUSEB.BAS）、管壁CP付着速度計算（CPDEPOR.BAS）、管壁CPビルドアップ計算（CPBUILD.BAS）、管壁付着CPの剝離推定計算（HAKURI.BAS）、放射能飽和因子計算（ACTSATF.BAS）、線量率分布解析（DRUSE.BAS, DRUSEC.BAS）の各プログラム群より構成される。グラフ作成は、データ編集プログラム群により作成されたX-Yファイルあるいは与えられた計算式により、グラフィックスプログラム群（CPEGRAPH.BAS, CGRAPH.BAS）により行われる。図3.1-5にグラフ作成プログラムCPEGRAPH.BASのツリーチャートを示した。これ等のプログラムはMS-DOS版ディスクBASICで作成されているため、ユーザーのニーズに応じた各種の変形や追加が容易であり、またプログラムの進行は対話形式で行われるから初心者にも操作し易いかたちになっている。高速炉CP挙動解析コードについては、既に第2章において述べたとおりであるが、更に詳細を知りたい場合には報告書[2]あるいは社内報告資料として登録されている取扱マニュアル[13]を参照されたい。

(2) 計算方法

次に、ACTSATF.BASあるいはCPDEPOR.BASプログラムによる、原子炉運転スケジュールを考慮した放射能飽和因子とCPビルドアップ測定データからの管壁付着速度の計算方法について述べる。計算の基本式は次のとおりである。

$$\frac{dN}{dt} = R - \lambda N \quad (3.1-1)$$

但し、N：CP核種付着密度（atom/cm²），R：CP核種付着速度（atom/cm²/s），

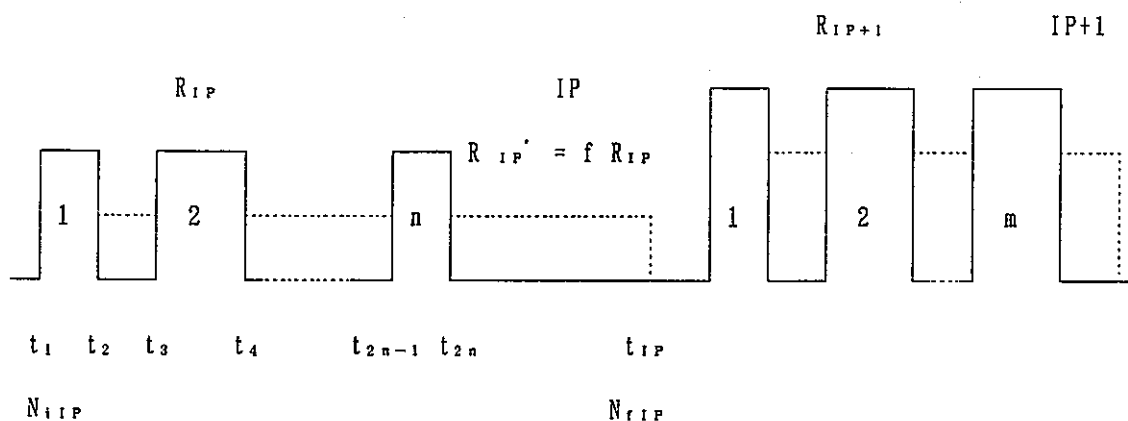
λ：CP核種崩壊定数（1/s）

R＝一定とみなせる場合、(3.1-1)式の解は次式で表される。

$$\lambda N = R (1 - e^{-\lambda t}) \quad (3.1-2)$$

となる。尚、(3.1-1)を放射化生成量計算に適用する場合は、Rは核反応率(atom/s)と読み替える。実際の原子炉運転である断続運転パターンにおける放射能計算を行う場合は、管壁付着速度あるいは核反応率Rは各運転年次期間中ではそれぞれに特有の一定値を取るステップ関数として近似し、(3.1-2)を用いてそれぞれの期間中の放射能付着量あるいは生成量計算を行い、これに評価時点までの崩壊補正を行ったうえで、同様に計算された各期間からの寄与を加算する方式で行う。下図は与えられた運転・測定スケジュールのもとで、CPの放射化生成あるいは管壁付着インベントリ計算における飽和因子とCP管壁付着速度を計算するためのモデルを示したものである。ここで、IP: プラント運転年次期あるいは定期検査No.、n: IP期における原子炉運転サイクルNo.、 t_{2n-1} or t_{2n} : 第nサイクルにおける運転開始あるいは終了時刻、 t_{IP} : 第IP回定期検査時のCP測定開始時刻、 N_1 : IP期第1サイクル運転開始時における核種量、 N_{IP} : 第IP回定期検査時測定開始時における核種量、 R_{IP} : IP期原子炉運転中における管壁付着速度、 f : IP期原子炉停止Naループ運転中における管壁付着速度の原子炉運転中のそれに対する割合(全期間中一定と仮定)である。

運転・測定スケジュール/放射化生成・配管付着モデル



管壁付着速度あるいは核反応率Rを一定とした場合の飽和因子は(3.1-3)式により計算される。放射化生成量計算の場合は、原子炉炉心期(例えばMk-II)を通じ反応率Rは各領域では一定で、且つ空間分布の変動も少ないと考えられるから、R=一定の仮定はよく成立するものと考えられる。

時刻 飽和因子

(IP = 1)

$$t_1 : 0 = a_1$$

$$t_2 : a_1 e^{-\lambda(t_2-t_1)} + \{1 - e^{-\lambda(t_2-t_1)}\} = a_2$$

$$t_3 : a_2 e^{-\lambda(t_3-t_2)} = a_3$$

$$t_4 : a_3 e^{-\lambda(t_4-t_3)} + \{1 - e^{-\lambda(t_4-t_3)}\} = a_4$$

$$t_5 : a_4 e^{-\lambda(t_5-t_4)} = a_5$$

$$t_6 : a_5 e^{-\lambda(t_6-t_5)} + \{1 - e^{-\lambda(t_6-t_5)}\} = a_6$$

以下同様の繰り返し規則性により計算を進める。 (3.1-3)

管壁付着速度の場合は、上記モデルに示すとおり各定期検査 (IP) 毎にビルドアップ測定値があるので、(3.1-2b) 式により次の計算式が得られる。

$$R_{IP} = \lambda \{N_{IP} - N_{IP} e^{-\lambda(t_{IP}-t_1)}\} / F_{IP} \quad (3.1-4)$$

但し、

$$F_{IP} = [\{1 - e^{-\lambda(t_2-t_1)}\} e^{-\lambda(t_{IP}-t_2)} + \{1 - e^{-\lambda(t_4-t_3)}\} e^{-\lambda(t_{IP}-t_4)} + \dots + \{1 - e^{-\lambda(t_{2n}-t_{2n-1})}\} e^{-\lambda(t_{IP}-t_{2n})}] + f [\{1 - e^{-\lambda(t_3-t_2)}\} e^{-\lambda(t_{IP}-t_3)} + \{1 - e^{-\lambda(t_5-t_4)}\} e^{-\lambda(t_{IP}-t_5)} + \dots + \{1 - e^{-\lambda(t_{IP}-t_{2n})}\} e^{-\lambda(t_{IP}-t_{IP})}]$$

ところで管壁付着ビルドアップや放射化量の飽和値は、 $R = \text{一定の連続運転の場合には、}$
 (3.1-2b) 式により、 $(\lambda N)_s = R \text{ (Bq/cm}^2 \text{ or Bq)}$ $R = \text{一定の断続運転の場合には、}$
 $(\lambda N)_s < R \text{ (Bq/cm}^2 \text{ or Bq)}$ であり $R \times \text{飽和因子 (充分大きな } t \text{)}$ により推定される。

3. 2 燃料洗浄廃液 CP 測定と評価方法

「常陽」から取り出される使用済炉心構成要素は、原子炉付属建屋内に設置された燃料洗浄設備において蒸気洗浄と脱塩水洗浄により、表面に付着、残留しているナトリウムの除去が行われる。その際、洗浄廃液中への CP の移行により高濃度の CP 廃液が発生し、燃料洗浄・廃液処理設備の運転、保守時の作業者の被ばく原因となっている。本設

備における被ばく低減対策を進めるため、これまでに幾つかの調査[1], [14]、及び除染技術 [1] あるいは廃液フィルター[15]の研究開発と適用が実施され成果をあげて来た。しかしながら、近年、Mk-II炉心外側反射体が交換のため炉外に取り出され洗浄が行われるに及んで、再び廃液中でのCP発生量の増大が観察されて来ている。この現象の原因解明を進めるためには、まず、洗浄体（ドライバー燃料集合体と外側反射体）当たりの廃液CP発生量について定量的に評価しておく必要がある。次章において燃料洗浄・廃液処理設備の操業に伴って得られているデータに基づく評価結果について示すが、本節ではその方法について述べる。

洗浄体当たりの廃液CP発生量を求めるためには、特定の炉心構成要素を洗浄した場合に発生する廃液中のCP核種を測定するのが最も単純で直接的であるが、これまでに入手されているデータは通常の設定操業に伴うもので、種類が混在した複数の洗浄体からの廃液CP核種の分析結果である。図3.2-1に「常陽」における燃料洗浄廃液処理のフロー[1]を示したが、核種分析のための廃液サンプルは廃棄物処理建屋内の洗浄廃液中和槽から洗浄廃液を攪拌しながら採取されたものである。本評価で用いたデータ（表4.5-1参照）は1990年6月から翌年3月にかけて（平成2年度）行われた、外側反射体を含む炉心構成要素に対する洗浄作業[16]から得られたものである。洗浄廃液移送プロセスは次のとおりである。炉心構成要素1体当たりの洗浄廃液発生量は公称 1.2 m^3 （蒸気洗浄、脱塩水洗浄3回）で、発生した廃液は原子炉建屋内の沈降防止槽に貯留した後廃棄物処理建屋に移送される。沈降防止槽の容量は通常レベルで 2.0 m^3 となっており洗浄体1体分の廃液しか受入れることが出来ないため、1体洗浄する毎に廃棄物処理建屋内の洗浄廃液中和槽に移送されている。沈降防止槽では洗浄廃液CPの壁面への付着の監視と防止のため、沈降防止槽下部表面線量率の測定と循環ポンプを用いた洗浄が行われている。洗浄中和槽から採取された廃液中CPの核種分析はGe半導体検出器を用いて行われているが、その測定結果からCP発生量を導出するうえで重要なのは燃料洗浄槽から洗浄廃液中和槽までの移送効率と採取槽内での攪拌平均性である。この点に関して現在のところ未だ必ずしも最終的な判定を下せる訳ではないが、上述の運転状況から推して現在得られているデータはCP発生量の推定に対して、概ね耐え得るものと考えられる。

今回のCP発生量評価の対象とした洗浄バッチには、ドライバー燃料集合体、特殊燃料集合体等の照射試験用集合体、制御棒、内側及び外側反射体等多様なものが含まれ、各

洗浄バッチも複雑に入り組んでいるので、洗浄体一体あたりの評価を進めるためには洗浄バッチに関するモデル化が必要である。洗浄体については、ドライバー燃料集合体と外側反射体が多数であること、並びに外側反射体からのCP発生量が特に多いことから、ドライバー燃料集合体（PFD）型と外側反射体（NFRM）型の2型にモデル化する。洗浄バッチは時系列で対応を確認し、相互の干渉はないものとしてモデル化する。そうして得られる洗浄体数はPFD型が40体、NFRM型が10体であり、洗浄作業は10バッチである。この洗浄評価モデルに基づき最小自乗法により洗浄体あたりのCP発生量を求める。観測方程式は次のとおりである。

$$Q_i = a m_i + b n_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, 10 \quad (3.2-1)$$

但し、Q：廃液放射能、m：PFD型要素数、n：NFRM型要素数、a：PFD型要素CP放出量、b：NFRM型要素CP放出量。a、bは次式で表される。

$$a = \frac{\sum_i m_i Q_i \sum_i n_i^2 - \sum_i n_i Q_i \sum_i m_i n_i}{\sum_i m_i^2 \sum_i n_i^2 - (\sum_i m_i n_i)^2} \quad (3.2-2)$$

$$b = \frac{\sum_i m_i Q_i \sum_i m_i n_i - \sum_i n_i Q_i \sum_i m_i^2}{(\sum_i m_i n_i)^2 - \sum_i m_i^2 \sum_i n_i^2} \quad (3.2-3)$$

表 3.1-1 1次ナトリウム冷却系CP測定用検出器仕様

(a) 高純度Ge半導体検出器

項 目	性 能
検出器メーカー 型 式	ORTEC製 Model. 1612-13210-S Serial. No. 21-P-663D
検出器形状	同軸型 直径 44.4mm 長さ 53.5mm
検出器有効体積	73.4cm ³
使用電圧	Posi 3.0kV
エネルギー分解能	⁶⁰ Coの1.332MeV 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%

(b) 熱蛍光線量計(TLD)

項 目	性 能
型 式	UD-200S (松下電器産業製)
素子材質	CaSO ₄ :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

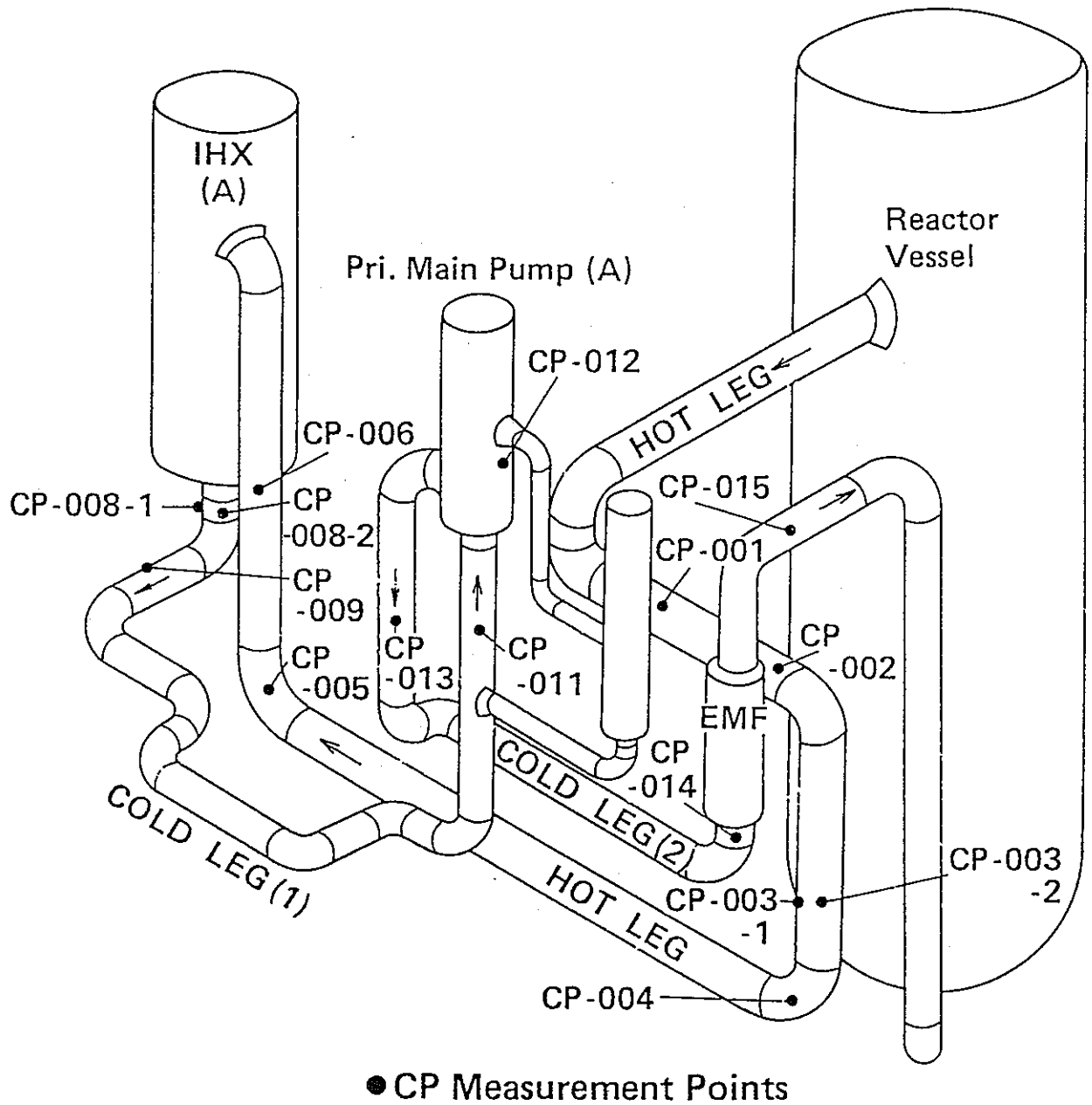
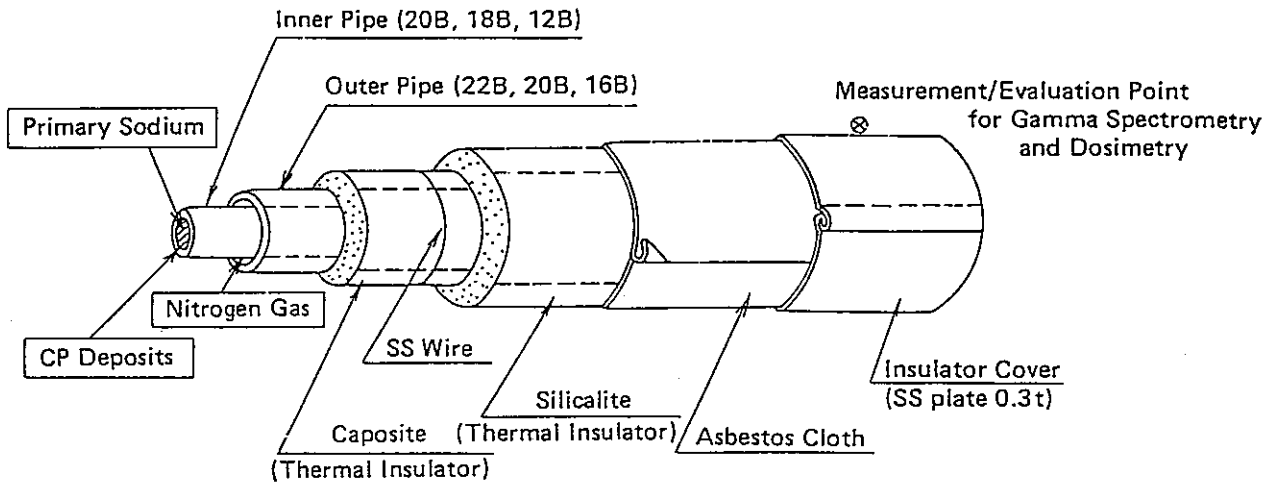
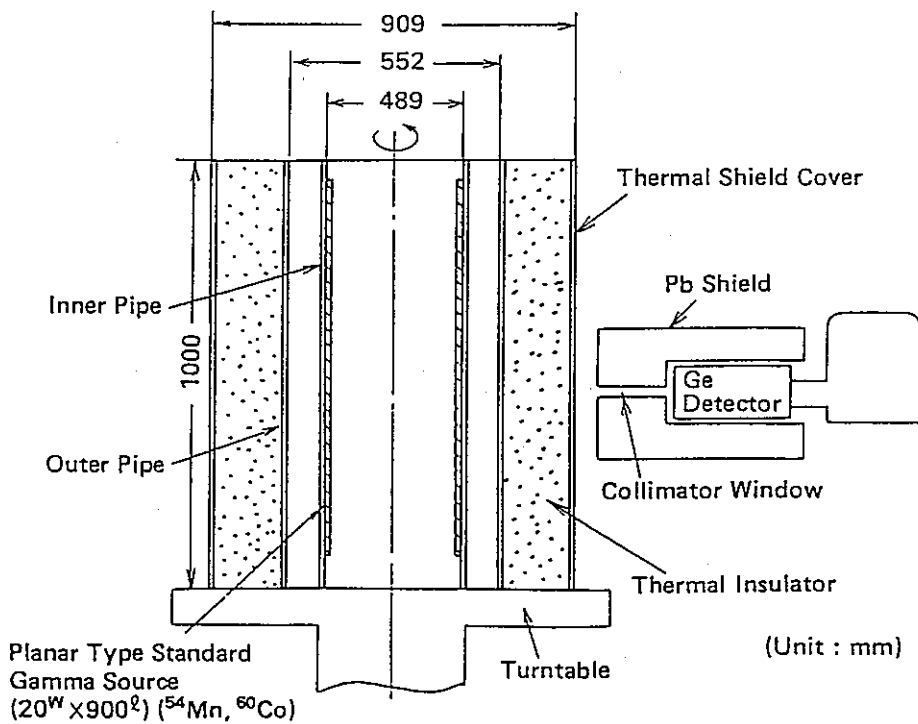


図 3.1-1 1次ナトリウム冷却系主配管壁CP付着分布測定位置

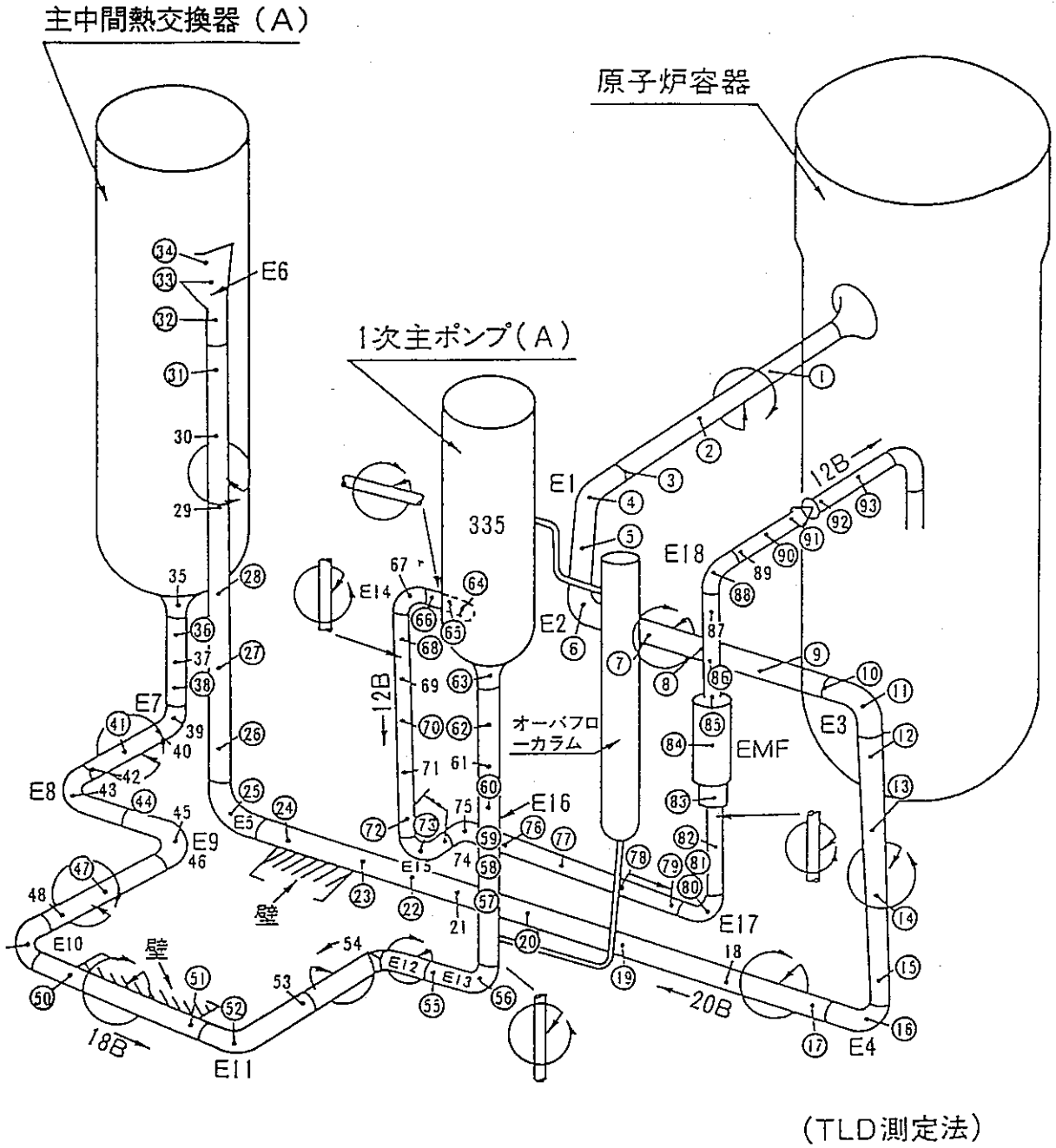


(a) Geometrical Layout for Measurement Points and Sodium Piping

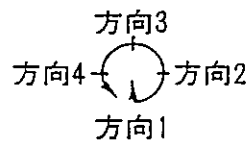


(b) Piping Mock-up Arrangement for CP Measurement System Calibration (Vertical Cut).

図 3.1-2 Ge 半導体検出器-コリメータシステム



配管周方向の位置



○印は計算により線量率評価を行った点を示す。このうち測定点75~84については全方向、その他の点については方向1についてのみ計算

図 3.1-3 1次ナトリウム冷却系主配管線量率分布測定位置

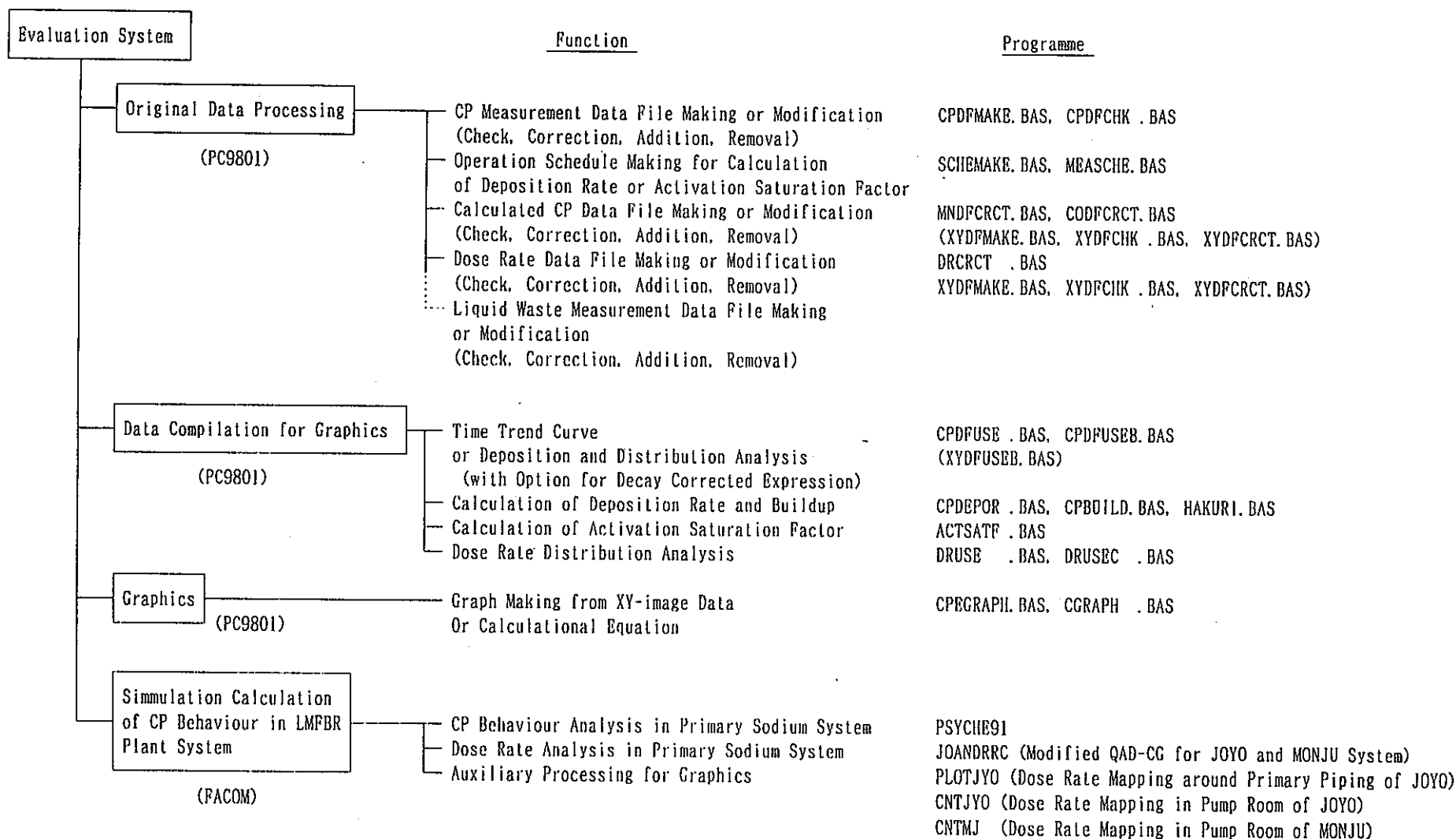
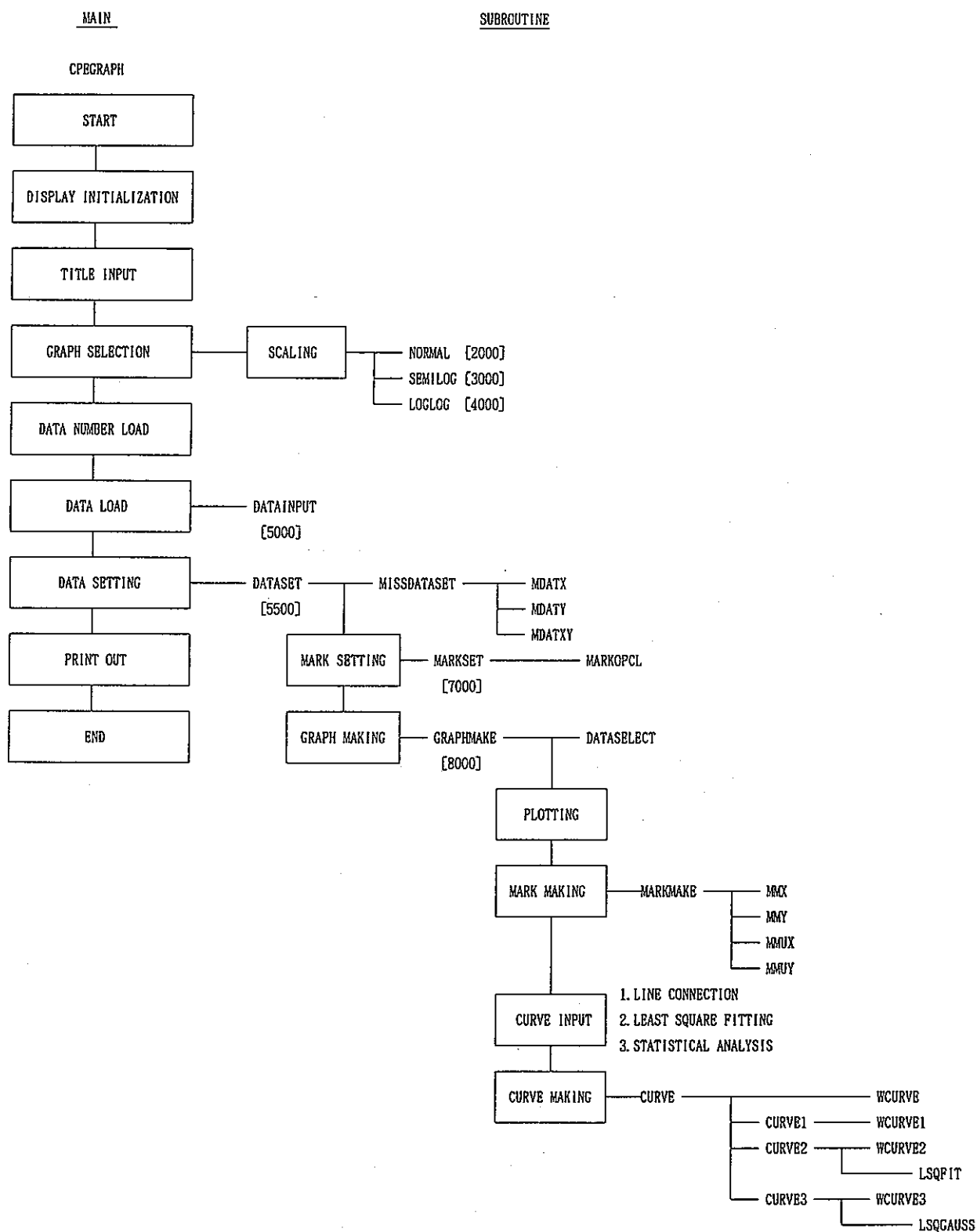


図 3.1-4 高速炉 CP 線源評価システム



□ : FUNCTION IN PROGRAMME FLOW
 [] : HEAD LINE NUMBER OF SUBROUTINE

図 3.1-5 グラフ作成プログラム”CPEGRAPH”構成図

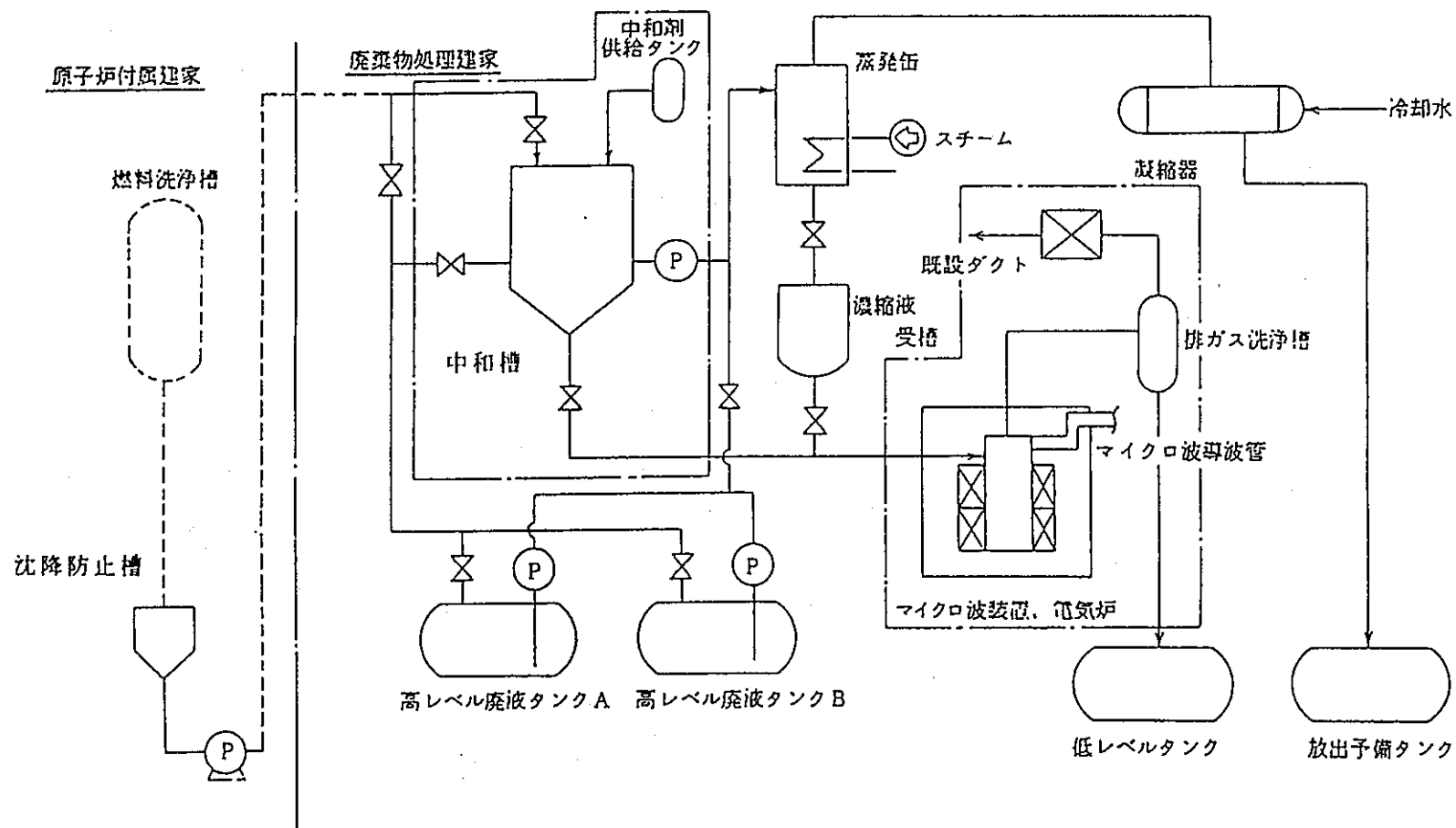


図 3.2-1 燃料洗浄廃液処理基本プロセスフロー

4. 「常陽」におけるCP測定評価結果と考察

本章では「常陽」1次ナトリウム冷却系におけるCP測定結果の検討評価を行い、実プラントにおけるCP挙動の特徴とその機構について考察する。また、燃料洗浄廃液CP測定データにより炉心構成要素洗浄体あたりのCP発生量を評価し、その発生機構について検討する。

4. 1 1次ナトリウム冷却系におけるCP測定結果

表4. 1-1に第3回から第9回定期検査時までの計7回の1次主冷却システムループ(A)配管壁におけるCP付着分布測定結果[3],[4],[5]を示す。各定期検査時のCP測定は原子炉停止後短くて約1ヶ月長くて半年程度冷却してから行われているので、測定値は全て各定期検査に先行する運転サイクルの原子炉停止直後(定格サイクル運転直後または特殊試験サイクルのある場合にはその直後)に減衰補正してある。しかしこうした減衰補正法では、原子炉停止時の燃料交換作業中等のナトリウム冷却系運転期間中におけるCP移行が無視されているので問題がないわけではない。CPの配管壁付着速度の評価のところでこの点につき検討を加えたい。

測定値のうち*印を付けているのは、スペクトル測定データにおける光電ピークの統計精度あるいはその状況が悪く、信頼性が充分でないと見なされるもの(^{58}Co の場合)と隣接するCP分布と比べて異常分布を与える測定値(CP-003(1),(2)での ^{54}Mn 、CP-010での全検出核種及びその他幾つかの測定)である。このうち異常分布は毎回あるいはしばしば同位置で繰り返される傾向がある。その原因はCP-010の位置のように配管エルボ部に近接し、検出器系設置におけるジオメトリ上の問題と考えられるものもあるが、CP-003の場合のようにそのような測定法上の問題が少ないのに、 ^{54}Mn の測定値にのみ毎回同様の異常分布を与える場合がある。後者についてはこの位置でのCP挙動過程自体に含まれているある種の特異性を示すものかもしれない。但し、CPのHL、CL/1、CL/2領域における平均的挙動を論ずる場合には、これ等の特異点は除外して取り扱う。表中のCP-007及びCP-012はIHXとポンプに対する測定値であるが、計数率から付着密度への変換係数が求められていないので定量化は出来ないが、計数率の規格化により機器内のCPビルドアップについて若干の検討を行う。1次冷却システム主配管及びIHX、ポンプ等の線量率分布測定結果の評価は主として次章の高速

炉CP挙動解析コードの検証のなかで行うが、これまでに得られている測定結果を解析コードによる計算結果[5],[12]と併せ、付録として表A2-1~21に示す。また、1次冷却系コールドトラップのCP測定は、不純物酸素の捕獲性能の検証と関連して実施されて来た[6]。CP捕獲器として見た場合、どの程度の低減効果を発揮しているかは放射線測定結果の定量化が行われていないため、十分な議論を行うことは出来ない。しかしながら、機器内での相対的なCPビルドアップ分布測定結果から、主循環系でのナトリウム環境とは相当異なりナトリウムループ内では一つの特異な条件下にある領域でのCP挙動に関する知見を与えるものと期待出来る。図4.1-1にコールドトラップ測定結果の一例を示す。

4.2 1次ナトリウム冷却系CP核種とビルドアップ傾向

(1) CP核種

測定結果により原子炉容器から出た炉外のナトリウムループで検出されるCP核種は、 ^{54}Mn 、 ^{60}Co 、 ^{58}Co である。最優勢核種は ^{54}Mn で ^{60}Co がそれに続き、 ^{58}Co は極めて少ない。この「常陽」における経験は既に第2章で述べた炉外ループ試験等の結果とも合致したナトリウム系内におけるCP挙動の重要な特徴であり、海外炉の経験とも共通している[17],[19]。「常陽」1次ナトリウム冷却系における ^{60}Co と ^{54}Mn の主配管系統各領域での管壁付着密度の比率は、第9回定検時の測定ではHLで1:3.5、CL/1で1:17、CL/2で1:19であり、CL/1とCL/2では殆ど変わらず、 ^{60}Co の割合はHLに比べCLでは小さい。 ^{60}Co の線量率への寄与は概ねHLで40%、CLで15%程度と考えられる。この割合は時間経過に伴っても変化している。図4.2-1にMk-I終了時の第3回定期検査とMk-II第9回定期検査時点の $^{54}\text{Mn}/^{60}\text{Co}$ の比を比較して示す。核種割合はCLでは初期から現在まで運転期間中を通じて殆ど変わっていないが、HLでは運転経過に伴って ^{54}Mn の割合が減少し ^{60}Co の割合が次第に増加して来たことを示している。これは ^{60}Co と ^{54}Mn ではHL管壁における付着機構に顕著な相違があり、半減期に基づく飽和特性も異なるため、詳細は後節で述べる。 ^{58}Co は ^{60}Co と化学的性質は同一で放射化生成量も充分であるにもかかわらず、原子炉容器外のナトリウムループに殆ど移行して来ないのは、既に一部2.3節で触れておいたが次の要因によると考えられる。① ^{58}Co は $^{58}\text{Ni}(n,p)$

^{58}Co で生成されるが、標的核元素のニッケルはナトリウム中に溶出し易いので、腐食領域炉心材料 ナトリウム接液表面の ^{58}Ni 濃度は管壁内部（平均濃度にあたる）に比べて減少している。従って、 ^{58}Co の放射化濃度についても溶出に実効的な表面濃度は低くなり、放射化量の充分性にもかかわらずナトリウム中への移行量自体が少なくなる。

② ^{58}Co の生成は速中性子反応によるから、発生領域は炉心部中心領域に集中している。

一方、 ^{60}Co は (n, γ) 反応で生成されるため、核反応率は炉心外周部で大きく発生領域はナトリウム温度も高い炉心出口領域が優勢になると考えられる。 ^{58}Co のナトリウム中の移行挙動特性は ^{60}Co と同一であるから、溶出しても直ぐ近傍の管壁に付着する傾向が強い。従って、発生領域のあり方の違いから ^{58}Co の方が ^{60}Co より炉心内の下流（出口）領域に向けて付着領域として利用出来る面積が大きくなり、炉心部付着割合が多くなる。③ ^{58}Co の中性子捕獲反応断面積はかなり大きく（熱中性子に対して： $\sigma_a = 1880 \text{ b}$ 、熱外中性子に対して： $I_a = 6890 \text{ b}$ ）、 ^{58}Co （安定）への核種変換（消滅）にも留意しなければならないと考えられる。

次に「常陽」のナトリウム冷却系の測定では検出されていないが、ステンレス鋼の放射化と腐食により冷却材中へ放出されると考えられる他の核種について述べる。 ^{51}Cr の場合は、半減期が比較的短いので測定までの冷却期間内での崩壊が大きいこともあるが、ナトリウムループ内での質量移行の特性による要因の方が大きい。即ち、既に述べたように合金成分であるクロムはナトリウム中溶解度が極めて低いため、ナトリウム中に溶出し難く且つ溶出しても直ぐ近傍に付着し易いため、炉心部の腐食領域に留まる傾向が強く、炉外のループに移行するものが少なくなることを示す。そのためナトリウムループ中で検出されないが、燃料洗浄廃液中には見い出されている。 ^{59}Fe は $^{58}\text{Fe}(n, \gamma)^{59}\text{Fe}$ で生成されるが、標的核 ^{58}Fe の存在比が0.3%と低く且つ反応断面積も他の鉄同位元素に比較し小さいため、生成量が少なくなることによる。この他半減期が2.6年で比較的長く生成量も無視出来ない ^{55}Fe がある。しかしこの核種は ^{55}Mn の基底状態へ軌道電子捕獲により崩壊するため、マンガンの蛍光X線のみを放出するだけであるから外部放射線場の形成には寄与せず、主として放射性廃棄物において注目しておくべき放射能である。この種の核種には半減期が極めて長いニッケルからの幾つかの中性子誘導放射能（ ^{59}Ni , ^{63}Ni ）も存在する。これ等はナトリウムループ中にも管壁に付着して存在しているものと考えられる。その他、炉心材料の高温強度や耐照射特性を改善するため添加されている微量元素に関連して生成される ^{182}Ta とニオブの誘導放射能、

^{95}Zr - ^{95}Nb (核分裂生成物以外の生成ルートであることに注意) もあるが、 ^{51}Cr と同様燃料洗浄廃液中に見い出されるだけである。これ等微量成分から生成される半減期の比較的長い核種として、更に ^{124}Sb 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 、 ^{65}Zn 等がナトリウムサンプル中に見い出されることがある。これは、構造材料中に不純物として存在するこれ等の元素は、ナトリウム中での溶解度が極めて高いので選択的に溶け出しナトリウム中での検出が容易となるためである。これ等はコールドトラップでも検出されることがあるものと予想される。

(2) ビルドアップ傾向

図 4. 2-2 (a), (b), (c) に HL, CL/1, CL/2 における ^{54}Mn 、 ^{60}Co 、 ^{58}Co の管壁付着密度の推移を、Mk-I 臨界以来の原子炉運転経過日数に対して示す。図中の番号は定期検査番号である。図のグラフには定期検査期間中は放射性崩壊のみで、燃料交換作業中等の原子炉停止ナトリウムループ運転中の CP 移行はないと仮定しカーブを追加し書き入れてある。(a) 図には全体の様相を示したが、 ^{54}Mn の ^{60}Co 、 ^{58}Co に対する優勢ぶりが一目瞭然である。(b)、(c) 図に ^{54}Mn と ^{60}Co の推移を個別に示す。縦軸のレンジは ^{54}Mn を ^{60}Co の 10 倍に取っている。 ^{54}Mn の付着レベルの順位は CL/2、CL/1、HL であり、運転経過と共に CL 領域への移行の優先性が際立ってくる。HL 部は放射能飽和則と合致するパターンと考えられる。これ等は次節以降で述べるように、マンガンは合金々属成分である遷移金属元素のなかではナトリウム中溶解度が比較的高く、また HL と CL 領域で異なる管壁付着機構が働いているためと考えられる。CL/1, 2 では最新の第 9 回定期検査時の値は前回に比べて下降(しかし後に述べるように、第 8 回と第 9 回定期検査時の測定値はデューティサイクルである第 20 と第 23 サイクル直後に補正して見れば同等であることに注意)を示したものの、第 8 回定期検査時点まで一貫して上昇を続け、第 17~20 サイクル間(第 7 回と第 8 回定期検査間)で特に鋭い上昇を示すグラフとなっている。一方、 ^{60}Co の付着レベルの順位は HL、CL/2、CL/1 であり、 ^{54}Mn と対照的に HL への移行が優先的となる。これはコバルトはマンガンとナトリウム中溶解度と管壁付着機構の点で対称的に相違し、たとえ高温領域であっても線源近傍への移行が優勢となるためである。ビルドアップ傾向は、Mk-II 性能試験及び第 0 サイクル~第 2 サイクル間(第 3 回~第 4 回定期検査間)の HL, CL の全てと、第 8~第 12 サイクル間(第

5回～第6回定期検査間)でのHL部での急激な上昇を除けばビルドアップの進行は緩慢である。一部に見られた急激な上昇の原因を明らかとするため、図中に炉外ループ試験[8]から ^{60}Co の発生量に強い影響を与えることが明らかとなっているナトリウム冷却材中の酸素濃度を各運転年次期に対して示した。これはプラグ計温度とサンプリングナトリウム分析値の相関式から決定した値で、詳細は本報告書の付録-3に示しておいた。最初のビルドアップの急上昇は全領域で起こっている。この間の酸素濃度は第2サイクル運転時には1.9ppmの低いレベルが達成されたもの、性能試験時よりそれまでは3ppm以上の高いレベルで運転された。これがMk-II開始期であるにもかかわらずこの間のビルドアップに急上昇をもたらした原因と考えられる。第2の上昇は最初の場合と様子が異なって上昇領域に偏りがあり、HL部で顕著でCLではそれほどでもない。

この偏りは以降の ^{60}Co 分布におけるHLでの最優位性を決定している意味において注目しておくべき現象である。この時期は1次系コールドトラップの圧損増加のため制御温度が上昇し、酸素濃度も3.9ppmまで上昇した時期と重なっており、これが原因であった可能性が大きい。第6回定期検査時には1次系コールドトラップは、外側アニュラスでその内筒側に断熱隔壁を有する広流入域メッシュ方式の新型コールドトラップに交換され[18]、酸素濃度は3.9ppmからまずその特性試験期の2.3ppmへと低減され、続いて第16サイクル以降、130℃でのコールドトラップの本格的な低温運転に入った後は1.7ppmのレベルに維持されて来ている。この間の ^{60}Co のビルドアップには ^{54}Mn の場合に観測されたような急激な上昇は含まれていない。その他にビルドアップの変動要因となり得るものに、Mk-II炉心移行における炉心材料中の不純物コバルト濃度の変動が考えられる。従ってコバルトの場合は燃交により持ち込まれる炉心材料中の不純物コバルトの細やかな変動にも、常に留意しておくことが重要である。更に、次節で述べるように燃料交換状況やパターン変更等も変動要因として重要である。

4.3 1次ナトリウム冷却系管壁CP付着飽和特性

(1) ビルドアップの飽和特性

CPの管壁ビルドアップは、管壁に付着したCPの剝離等による冷却材中への再放出過程を無視出来るとすれば、冷却材中からの付着速度と放射能飽和因子により決定される。そこでまずここで、ビルドアップの推移は飽和因子によりもっぱら支配されているかどうか

かについて検討する。 図 4. 3-1 (a), (b), (c) に (3. 1-3) 式により計算した、 ^{54}Mn 、 ^{60}Co 、 ^{58}Co の「常陽」Mk-II 炉心期における飽和因子を示す。これは管壁付着速度あるいは放射化生成速度を一定と仮定した場合のもので、炉心材料の放射化生成と管壁付着の両者に対して利用出来る。但し、図中には燃料交換のない場合とある場合のグラフが示されているが、管壁付着評価に適用されるのは前者の場合に相当するものである。 ^{58}Co のグラフは参考として示した。なお、付着速度の変動がある場合のビルドアップの「飽和因子」については後段の脚注を参照されたい。また、以降において各運転年次期の飽和因子の平均値で議論する場合は、サイクル運転終了時の値を期間内のサイクル運転日数を重みとして平均したものをを用いることとする。(a) 図より ^{54}Mn の場合は第 5 回定期検査時まで(最初の 2 ケ年)は急速に上昇するが、それ以降は上昇は緩やかで 10~20% 前後の上昇変動の範囲内である。一方、 ^{60}Co の場合は (b) 図に示すようにこれまで一貫して上昇して来ている。図 4. 3-2 (a), (b) は ^{54}Mn と ^{60}Co のビルドアップの飽和性を、上述の Mk-II 期の飽和因子のふるまいと比較し調べたものである。(a)、(b) 図では各定期検査時の配管壁付着密度測定値と飽和因子計算値を第 5 回定期検査時の値に規格化し、原子炉積算出力に対してプロットした。この規格化時点は Mk-II の比較的初期ではあるが、Mk-I 期からのビルドアップの影響が少なく、且つ高酸素濃度によるビルドアップ上昇の特異性が観察されなかった時点を選んで設定したものである。(a) 図に ^{54}Mn に対する結果を示す。HL における測定値と計算値はよく一致している。ところで第 4 回定期検査時点で規格化すると計算値が測定値を上回りよく一致しなくなる。これは第 4 回定期検査時点の測定値には Mk-I 期からのビルドアップの影響が残っているためである。上記により ^{54}Mn の HL における管壁付着速度はほぼ一定でビルドアップは放射能飽和則に沿って推移していることを示唆している。ところが CL/1 と 2 の測定値は計算値を大幅に上回っており、最大である第 8 回定期検査時の測定値では計算値の 2~2.5 倍となっている。これは CL での ^{54}Mn のビルドアップは管壁付着速度の変動を含み、放射能飽和則からの予測を越えて進行して来たことを示唆するものである。一方、 ^{60}Co は (b) 図に示すように各領域の測定値はレベルに若干の差が見られるもの、いずれも緩やかな上昇であるよく似た変動パターンを示す。また測定値は計算値より下回る傾向を示し、若干ではあるが HL より CL でその傾向が強くなる。これは管壁付着速度の変動(注)を示唆しており、あるいはまた飽和因子の上昇を緩和する、例えば管壁付着 ^{60}Co の冷却材中への再放出の

ような過程により、見かけ上の短半減期化が起こっていることを示すものかもしれない（即ち、 $dN/dt = R - \lambda N - kN$ ，ここで k は再放出の速度定数 (1/s) で、その解は $\lambda N = R (1 - e^{-(\lambda + k)t}) \times \lambda / (\lambda + k)$ となり、管壁付着放射能の飽和因子に対して見かけ上半減期が $\lambda / (\lambda + k)$ 倍に短縮されたかのような効果をおよぼす）。

(注) 付着速度の変動がある場合は、(3.1-1) 式は次式

$$\frac{dN}{dt} = R(t) - \lambda N \quad (4.3-1)$$

のように一般化され、その解は初期条件が $t=0$ において $N=0$ である場合は

$$N = e^{-\lambda t} \int_0^t e^{\lambda t} R(t) dt \quad (4.3-2)$$

で与えられる。従って、 $t_0 (=0), t_1, t_2, t_3, \dots, t_k, t_{k+1}$ の時系列においては

$$N_{k+1} = e^{-\lambda t_{k+1}} \sum_{i=0}^k \int_{t_i}^{t_{i+1}} e^{\lambda t} R(t) dt \quad (4.3-3)$$

で表される。ここで $R(t)$ を 3.1.2 (2) 節で述べたような間歇型ステップ関数とすると、(4.3-3) 式は次式となる。

$$N_{k+1} = \sum_{i=0}^k \frac{R_i}{\lambda} \left\{ 1 - e^{-\lambda (t_{i+1} - t_i)} \right\} e^{-\lambda (t_{k+1} - t_{i+1})} \quad (4.3-4)$$

$$i, k = 0, 1, 2, \dots$$

但し、 i が奇数の時 $R_i = 0$ とする。さてこれを第 M サイクルの R_M で規格化すると、ビルドアップ λN_{k+1} の飽和因子に相当する因子は、

$$SF_{k+1} = \sum_{i=0}^k \frac{R_i}{R_M} \left\{ 1 - e^{-\lambda (t_{i+1} - t_i)} \right\} e^{-\lambda (t_{k+1} - t_{i+1})} \quad (4.3-5)$$

で与えられる。従って、付着速度の変動を考慮する場合はそうでない場合に対して、各サイクルに対する変動因子 R_i/R_M の補正を行わなければならない。

(2) 管壁付着速度

CPビルドアップ測定値はプラント管理上実的な量であるが、このまゝでは各運転年次の運転スケジュールの相違を含んだまゝであるので、CP挙動の時間経過に含まれる物理化学的機構を論ずるには問題を残している。そこでビルドアップ測定データから(3.1-4)式により、各運転年次における管壁付着速度を推定した。図4.3-3(a)～(f)に ^{54}Mn と ^{60}Co の各領域における付着速度の推定結果を示す。これ等の推定では、原子炉停止時でナトリウムループ運転期間中(ナトリウム運転条件:温度 250°C 、流量 20% 等)のCP発生と移行は無視出来る($f=0$)と仮定している。また図中には後述の方法による次回の第10回定期検査時点における予測結果も示しておいた(以下の図表でも同様とする)。CPの管壁付着速度は冷却材中のCP種の濃度と密接に関連しており(第2章で述べた「溶解・析出モデル」では 管壁付着速度=総括物質移動係数×付着係数×冷却材中濃度 であり濃度とは比例関係にある)、その濃度は炉心材料中での放射化生成濃度と直接的な関連がある。従って付着速度と放射化生成量の推移について、それ等の相関性を検討することが重要である。まず ^{54}Mn の場合であるが、HL部とCL部では様相が明らかに異なり、HL部の付着速度は前項(1)で予測したとおり概ね一定のレベルで推移しているが、CL部では第7回定期検査時点まで原子炉積算出力に対してはほぼ直線的な増加を示した。HL部での値はMk-I期では $1.1 \mu\text{Ci}/\text{cm}^2/\text{a}$ 、第9回定期検査時点までのMk-II期の各運転年次に対して各々 1.5 、 1.5 、 2.0 、 1.3 、 1.8 、 $1.5 \mu\text{Ci}/\text{cm}^2/\text{a}$ で、Mk-I期とMk-II期で相違が認められるものゝMk-II期ではほぼ一定のレベルで推移しており、その平均値は $1.6 \pm 0.2 \mu\text{Ci}/\text{cm}^2/\text{a}$ である。この結果と前項で検討したビルドアップの飽和特性の結果により、HL部での ^{54}Mn 付着の放射能飽和則との適合性は確定される。飽和レベルは既に示した飽和因子(図4.3-1(a)参照)を適用すると、 $1.0 \mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ 程度と推定され、これまでに観察された最大の付着密度とほぼ合致する。ところでこのような付着速度の推移は炉心材料の放射化濃度の推移と適合し得るのであろうか? 炉心における放射化生成量の推移は、まず、反応率が一定の場合(3.1-3)式で表される核種の半減期により決まる飽和因子により支配される。実プラントの場合にはこれに加えて燃料交換が重要な影響因子となり、これは飽和因子のレベルを下げまたその上昇を緩和する効果をもたらす。従ってこの影響度合いは半減期が長くなるほど大きく、 ^{54}Mn より ^{60}Co に対してこの効果は大きくなる。実際の燃料交換は一定期間炉内で燃焼運用後

(シャフリング等) 原子炉停止時に炉外へ取り出し、新燃料と取り替えることにより行われる。飽和因子にこの効果を考慮に入れるためには、燃料交換割合をRFとすると(3.1-3)式における原子炉運転停止期間に対する飽和因子項を、

$$a_{2n+1} = (1 - RF) a_{2n} e^{-\lambda(t_{2n+1} - t_{2n})} \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

に置き換えて計算すればよい。既出の図4.3-1(a), (b), (c)に⁵⁴Mn、⁶⁰Co、⁵⁸Coに対する計算結果が示されている。図には燃料交換を考慮しない場合及び4サイクルと6サイクル燃料交換の2ケースの計算結果が比較し示されている。図4.3-4(a), (b)に管壁付着速度と放射化生成放射能の飽和因子の推移を原子炉積算出力に対してプロットし、また比較し易いようにそれぞれ第5回定期検査時点に規格化して示す。(a), (b)図はそれぞれ⁵⁴Mnと⁶⁰Coに対する結果である。また、下表は⁵⁴Mnについてこれ等を数値で比較し示したものである。図(a)よりHL部で

⁵⁴Mnの放射化生成量飽和因子と管壁付着速度の比較

定期検査		4 **	5	6 **	7	8	9	10 ***
飽和因子	4 Cy燃交	0.137 (.572)	0.239 (1)	0.234 (.978)	0.242 (1.01)	0.308 (1.29)	0.283 (1.18)	0.212 (.885)
	6 Cy燃交	0.142 (.532)	0.267 (1)	0.272 (1.02)	0.275 (1.03)	0.346 (1.30)	0.323 (1.21)	0.247 (.924)
	燃交なし	0.153 (.452)	0.339 (1)	0.394 (1.16)	0.394 (1.16)	0.468 (1.38)	0.451 (1.33)	0.372 (1.10)
管壁付着速度*	HL	1.53 (1.05)	1.45 (1)	1.95 (1.34)	1.33 (.915)	1.77 (1.21)	1.53 (1.05)	1.72 (1.18)
	CL/1	1.21 (.717)	1.69 (1)	3.03 (1.79)	2.78 (1.64)	4.49 (2.66)	4.01 (2.38)	4.41 (2.61)
	CL/2	2.04 (.498)	4.09 (1)	4.84 (1.18)	5.73 (1.40)	7.64 (1.87)	7.62 (1.86)	8.10 (1.98)

* $\mu\text{Ci}/\text{cm}^2/\text{a}$
*** 予測値

** 酸素濃度の高い運転を含む
() 第5回定期検査時に対する比率

の付着速度の推移は、規格化時点以降は燃料交換のある場合の推移パターンに沿った動きとなっていると見なせる。燃料交換は飽和因子レベルの低下に最も効果があり、4及び6サイクル燃料交換に対して第9回定期検査時でそれぞれ37%と28%減となる。しかし、規格化時点以前では測定値が計算値を上回り、炉心材料中の放射化生成濃度の上昇を反映した推移とはなっていない。これはMk-I期とMk-II初期では管壁付着速度

を支配する因子のうち、冷却材中濃度以外の因子に上昇変動のあったことを示す。即ち、おそらく付着係数が初期ほど大きかったと考えられる。こうした傾向は管壁付着機構が拡散である場合に理論的に予測されることである。また、酸素濃度の高かった第6回定期検査時に対しては測定値は高めである。以上を勘案すれば管壁付着速度と炉心材料の放射化生成濃度の相関は概ね妥当なものであると考えられる。

さてこれに対して、CL領域では図4.3-3(b), (c)と図4.3-4の(a)に示し、また既に触れて来たようにHL部とは全く様相が異なり、管壁付着速度は第8回定期検査時まで運転経過とともに増加を続け、この増加傾向は規格化時点以前の0~7サイクル運転間は炉心材料における放射化生成の飽和因子の上昇と合致するもの、それ以降今日に到るまで飽和因子の上昇を明らかに凌駕している。これがCL領域における ^{54}Mn の飽和到達の長期化をもたらして来た直接的原因である。上記表により飽和因子の計算値が最大を示す第8回定期検査時でも、第5回定期検査時点に対する倍率は燃料交換を考慮しない場合と燃料交換を考慮する2つの場合に対して、それぞれ1.4, 1.3倍にしかならず、CL/1とCL/2の測定値における2.7及び1.9倍と食い違っている。しかも第5回定期検査時以降はHL部のふるまいから推定されたように、炉心材料の放射化濃度はほぼ同等のレベルにあったと考えられるから、このCL領域における付着速度の上昇傾向をこの推移で説明することは出来ない。従ってこのような増加現象をもたらす要因は、冷却材中の酸素濃度や燃料交換条件等のプラント条件のうちに見い出すことは出来ず(^{54}Mn の場合は材料中の不純物の影響は直接的にはないことに注意)、CP質量移行機構のうちを求めるべきものと考えられる。管壁付着速度を支配する3つの因子のうちおそらく付着係数の変化、即ちCL部でのマンガンの管壁付着機構に特有の過程、例えばCL管壁面上での付着サイト形成あるいは腐食生成物の付着の進行により表面が母材基質とは異なるものに変化してゆき、その結果時間経過に伴って ^{54}Mn の付着が進み易くなるような過程があると考えざるを得ない。上記の機構に関して更に議論を進めるためには、次節に述べるCP付着分布の評価を行ってからにしなければならない。これは冷却系におけるCP蓄積を促進する現象で厄介な問題を提起しているが、既にFFFでも観察されている図4.3-7で示すような、CPビルドアップの予想を大幅に越える増大[17],[19]と共通した現象と考えられる。

さて、 ^{60}Co の場合は、図4.3-3(d)~(f)に示すように、管壁付着速度は ^{54}Mn に比べるとHLとCL領域による傾向差は認められないが、各運転年次における出

入りは相当大きい。特に冷却材中酸素濃度の高かった0～2サイクル（第4回定期検査時点）及び8～12サイクル（第6回定期検査時点）間の付着速度は他に比べて高く、これはHLでは特に顕著であり、CLでは0～2サイクル間でそうである。これ等は高酸素濃度による炉心材料からの放出速度上昇の結果を明白に示しているものと考えられる。また13～16サイクル間（第7回定期検査時点）のそれは他に比べると極めて低い。この点については後ほど付着放射能の管壁からの剥離過程を想定して検討を行ってみる。これ等変動に隠されるため付着速度と炉心材料中の放射化生成濃度の推移との対応を調べることは、 ^{54}Mn の場合程には明瞭にはゆかない。図4.3-4(b)と下表に3～7サイクル間の管壁付着速度と飽和因子の比較を示す。図では比較のため3～7サイクル間の第5回定期検査時点のものに規格化している。また本図では上記の付着速度の高

^{60}Co の放射化生成量飽和因子と管壁付着速度の比較

定期検査		4 **	5	6 **	7	8	9	10 ***
飽和因子	4 Cy燃交	0.0243 (.572)	0.0522 (1)	0.0581 (.978)	0.0607 (1.01)	0.0802 (1.29)	0.0783 (1.18)	0.0599 (.885)
	6 Cy燃交	0.0254 (.532)	0.0603 (1)	0.0749 (1.02)	0.0800 (1.03)	0.103 (1.30)	0.104 (1.21)	0.0853 (.924)
	燃交なし	0.0275 (.452)	0.0821 (1)	0.189 (1.16)	0.184 (1.16)	0.231 (1.38)	0.264 (1.33)	0.273 (1.10)
管壁付着速度*	HL	0.0448 (3.41)	0.233 (1)	0.0684 (3.59)	0.246 (.434)	0.0297 (1.46)	0.0998 (1.08)	0.0740 (1.12)
	CL/1	0.137 (2.43)	0.0564 (1)	0.0851 (1.51)	0.0230 (.407)	0.0373 (.661)	0.0719 (1.27)	0.0554 (.982)
	CL/2	0.258 (2.46)	0.105 (1)	0.0835 (.796)	0.0216 (.205)	0.0724 (.690)	0.132 (1.26)	0.0948 (.904)
	平均比	(2.77)	(1)	(1.97)	(.349)	(.939)	(1.20)	(1.00)

* $\mu\text{Ci}/\text{cm}^2/\text{a}$

*** 予測値

** 酸素濃度の高い運転を含む

() 第5回定期検査時に対する比率

かった時点のものは除外した。この推移の傾向は燃料交換を考慮しない飽和因子では全く再現出来ず、燃料交換を考慮した場合のそれと比較的接近しているが、測定値は全体として低めであり第7回定期検査時点では特にそうである。この原因として考えられるもの、一つが管壁付着放射能の再放出過程（例えば折出粒子の離脱）の存在である。評価法は既に触れておいたが以下のとおりである。再放出速度定数を k (s^{-1}) とすると、

サイクル運転中に対して $dN/dt = R - \lambda N - kN$ 、従って $N = N_0 e^{-(\lambda+k)t} + \{1 - e^{-(\lambda+k)t}\} R/(\lambda+k)$ 、サイクル停止中に対して $dN/dt = -\lambda N$ 、従って $N = N_0 e^{-\lambda t}$ である。これに運転スケジュールを考慮して計算する。

評価は測定値が飽和因子を下回る13サイクル運転以降に対して行い、その間における管壁付着速度は本来燃料交換を考慮した飽和因子に比例しているはずのものと仮定して行った。その間について6サイクル燃料交換とすると、速度定数と付着に対する再放出割合の推定結果は次表のようになる。本推定より再放出速度定数は同一領域でナトリウム条件

60°Cの再放出過程の推定

運転サイクル		13～16		17～20		21～23	
推定値		速度定数 (s ⁻¹)	割合 (%)	速度定数 (s ⁻¹)	割合 (%)	速度定数 (s ⁻¹)	割合 (%)
領域	H L	7.88(-4)	62～65	2.16(-4)	15～16	5.36(-4)	35～38
	CL/1	1.44(-3)	66～69	1.60(-3)	59～64	6.3(-4)	27～29
	CL/2	2.21(-3)	78～82	1.92(-3)	59～65	7.56(-4)	28～30

が変化しなくても各運転期で変動している。その値が全ての領域で最も大きかった時期は13から16サイクルにかけてである。その後時間経過とともに次第に減少しつつあるように思われる。また各領域の値を比べるとCL/2 > CL/1 > HLの傾向を示す。

次に原子炉停止時でナトリウムループ運転中の影響について検討する。この間における代表的なナトリウム条件は燃料交換作業中のもので、主循環系は温度250°C、流量20%で概ね等温状態であり、純化系は原子炉運転時と基本的には変わることはない。尚、原子炉定格運転時の条件は原子炉入口/出口温度=370/500°C、主循環系流量=1100 t/h/ループ×2ループ、純化系流量=10 t/hである。原子炉停止、ナトリウムループ運転条件下でのCP移行について、直接に知ることが出来るような測定を実施していないので、ここではその影響はどの程度のものであるかを調査するため、(3.1-4)式におけるf値(原子炉停止、ナトリウムループ運転時のCP移行割合)をパラメータとして調査した。一般的に言って上記の原子炉停止時の低温且つ温度差の小さいプラント状態下ではCP移行は少ないと考えられ、例えばナトリウム中におけるステンレス鋼に対する一般腐食式を用いてCP発生量を評価してみると、原子炉運転時に対し

て1/1000程度にすぎない。更に、温度差が小さいことはCPの移行を抑制する方向に働く。f=0.01と0.05の場合の評価結果を下表に示したが、影響は小さく問題になることはないと考えられる。

管壁付着速度に対するf値の影響 (R(f)/R(f=0))

核種	原子炉運転期 (サイクル)	f = 0.01	f = 0.05
^{54}Mn	13~16	0.99	0.95
	17~20	0.99	0.95
	21~23	0.98	0.92
^{60}Co	13~16	0.99	0.96
	17~20	0.99	0.96
	21~23	0.99	0.94

さてここで飽和特性に関連して先述の管壁付着速度に基づき、第10回定期検査時のCPビルドアップの予測を行う。そのため管壁付着速度を原子炉積算出力にプロットし適合式を最小自乗法により求める。図4.3-5(a), (b)に ^{54}Mn と ^{60}Co の結果を示す。適合式は上昇度合いの漸減を考慮し $y = a + \ln x$ を用いた。 ^{60}Co の場合は酸素濃度が高く付着速度が異常に高かった2時点のものを除外した。 ^{54}Mn のデータのばらつきは少なく ^{60}Co の場合は相当に大きい。しかしここでは敢えてそれを問わず適合している。図中に適合式の係数と相関係数を示してある。 ^{54}Mn の結果は満足のゆく適合性を示している。 ^{60}Co の場合は相関係数は $R^2 = 0.20 \sim 0.35$ である。

この適合式と24~27サイクルの運転スケジュールに基づき計算したビルドアップの予測結果を、図4.3-6(a), (b)に示した。 ^{54}Mn のHL, CL/1, CL/2の付着密度はそれぞれ0.850, 2.18, 4.00 $\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ が得られ、 ^{60}Co に対しては0.223, 0.126, 0.209 $\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ が得られた。これ等の値はいずれも27サイクル運転終了直後の予測値である。第9回定期検査時と比べると ^{54}Mn の場合はそれぞれ6%、7%、6%の増加であり、 ^{60}Co についてはそれぞれ2%減、3%増、5%増であり変動は僅かである。

以上述べたところにより、 ^{54}Mn の管壁付着機構はHLとCL領域で異なり、CL領域での付着過程には一種の加速機構が作用しており、付着速度の経時の上昇をもたらしていると考えられる。HL領域での付着機構は従来からの認識の範囲内にあり、その速度はプラント条件とも整合的であると考えられる。一方、 ^{60}Co の場合は、ナトリウム中

酸素濃度や炉心材料中不純物コバルト濃度の変動、あるいは燃料交換条件等のプラント条件の影響を受け易く測定結果はしばしば攪乱されるので、その評価のためには慎重を期さなければならない。しかしこれ等の影響を勘案して測定結果を評価すると、その付着機構には ^{54}Mn の場合のようなHL、CL領域による違いは認められず、プラント条件と整合的な傾向にあり、この整合性は付着放射能の再放出過程を考慮すると改善されるように思われる。また、CPビルドアップの飽和状況については ^{54}Mn のHLでのビルドアップは飽和期に達していると考えられるが、その他についてはプラントの運転条件等を考慮した場合実質的な飽和性を期待出来るものゝ、まだその確証には充分でなく今後とも何等かの観測を続けることが望ましい。また、CP発生源である炉心材料の放射化生成量に対する燃料交換の影響は大きく、飽和因子レベルの低下と上昇度の緩和をもたらし、核種の半減期が長くなればなるほどその効果は大きくなり、例えば「常陽」の場合、燃料交換による ^{60}Co の削減割合は60%から70%になっている。これは逆に言えば燃料の長寿命化をはかる場合、CP発生源の増大化も進行することを意味している。

4.4 1次ナトリウム冷却系管壁CP付着分布特性

本節では1次冷却系配管長に沿ったCPの管壁付着分布特性について述べる。図4-4-1(a)、(b)に最新の第9回定期検査時点におけるCP付着分布測定結果を示した。図(a)は全ての測定値をプロットしたものである。図中の番号は図3.1-1に示した測定位置の番号を示す。CP-003(1)、(2)と008(1)、(2)は周2方向から測定されており、図中のプロットはその平均値である。 ^{54}Mn の分布ではCP-003とCP-010の測定値が異常な落ち込みを示している。これ等の落ち込みは毎回の測定で繰り返し観察されている。CP-010の場合は ^{60}Co の測定値も落ち込みを示しており、この位置は配管エルボ近傍であるため測定ジオメトリー上の問題があるものと考えられる。CP-003の位置はこのような測定法上の問題は考えられず、しかも ^{54}Mn の測定値のみ顕著に落ち込むので、測定法上の問題と言うよりCP挙動自体にかゝっていると考えられる。 ^{60}Co の場合はCP-010の他に009の測定値も若干の異常性を示す。図(b)はこれ等異常分布を与える則定点を除外し全体をより見易くして示したものである。 ^{54}Mn の付着分布はHLよりCLで高く、CL/2の方がCL/1より高い。一方、 ^{60}Co はHLがCLより高く、CLでは ^{54}Mn の場合

と同様 $CL/2$ が $CL/1$ より高い。このパターンは従来から主張されている核種の選択的挙動 [2] と概ね合致している。 ^{54}Mn 、 ^{60}Co とも温度が同等の $CL/2$ での付着が $CL/1$ より高いのは、流速の違いを反映しているものと考えられる。即ち、 $CL/1$ と $CL/2$ の流速は配管径の相違からそれぞれ 2.32 及び 4.84 m/s であり、レイノルズ数 (Re) 比で 1 : 1.44 となる。図 4.4-2 に CP 付着密度の $CL/2$ の $CL/1$ に対する比の時間経過を示す。 ^{54}Mn の場合は、運転経過とともに極僅かに減少を示すもの、第 6 回定期検査時以降は一定と見なせる。 ^{60}Co の場合、初期におけるこの比は ^{54}Mn より高く 2.7 で、時間経過とともにその約 1/2 まで次第に減少し第 6 回定期検査時以降は概ね一定となっている。第 6 回定期検査時以降の平均値はそれぞれ 1.82 ± 0.12 と 1.54 ± 0.08 である。この流速効果を $(Re)^x$ で表すと ^{54}Mn に対して $x = 1.6$ 、 ^{60}Co に対して $x = 1.1$ となる。このように、これまでに得られている炉外試験結果からは、 ^{60}Co の方が ^{54}Mn に比べて流速効果が強いと言われていたが、「常陽」の測定結果からは逆となった。これには前節で検討した ^{60}Co の再放出過程が関与しており、 $CL/2$ の速度定数 k が $CL/1$ より若干大きくなることに関連しているかもしれない。また質量移行の境膜拡散モデル (Nernst Model) における流速効果では理論上 $X = 0.83$ であるが、得られた指数はこれより高めとなっている。

さて次に管壁付着分布の推移について検討する。 ^{54}Mn と ^{60}Co に対する結果を図 4.4-3 (a), (b) に示す。用いたデータは分布の特質を見易くするため先述の異常分布は除外している。両者には鮮やかな差異性と共通性が含まれている。図 (a) の ^{54}Mn の付着分布は、前節で述べた管壁付着速度の場合と同様に HL と CL で特徴的な違いを示し、また HL では緩やかな上昇を示すだけでその推移は既に述べたように付着速度一定の放射能飽和則に沿っており、現在では飽和期に入っていると見なせるが、CL では上昇を続けて来たことがわかる。分布のパターンも初期には HL が優勢であったが、第 5 回定検時以降では CL が優勢になり今では HL を圧倒している。それに対して図 (b) の ^{60}Co の分布の推移には ^{54}Mn に見られるような HL と CL の間での相違はなく、上昇の仕方には領域による偏りは認められない。分布のパターンも初期から今日まで一貫しており時間経過に伴う変化は少ない。上昇度合いは最初の第 3 回から第 4 回定期検査時点にかけての急上昇を除けば、 ^{54}Mn の HL の場合によく似た緩やかな上昇となっている。最初の急上昇は既に検討したように冷却材中高酸素濃度の影響による。図

4. 4-4には第9回と第3回定期検査時の付着密度の比で見た各核種の増加比を示した。

^{60}Co の増加比には各領域においてそれほど大きな変動はないが、 ^{54}Mn の場合はHLとCLでは全く異なっている。両核種を比べるとHLでは特徴的な相違が認められるのに対してCLでは同等である。 $^{54}\text{Mn}/^{60}\text{Co}$ の核種比率も既に述べたように(図4.2-1)、第3回と第9回定期検査時点で比較するとCLでは同等であるがHLでは相違している。これ等は先の付着分布の推移とあわせて見ると、 ^{60}Co の全領域における管壁付着機構と ^{54}Mn のCL領域におけるそれとの間に何等かの共通性のあることを示すものと考えられる。

前節で述べた飽和特性と上述の分布特性の考察から、CP管壁付着機構に対して次のように推定出来る。まず ^{54}Mn の付着機構はHLとCLで相違しており、既に述べたようにHL領域では管壁中拡散により付着しており、CLでは管壁表面での合金粒子形成による析出を主体として、これに拡散も加味された付着機構と考えられる(拡散機構の加味は次章に述べる解析コードモデルパラメータ感度調査の結果による)。合金粒子は第2章で論じたところにより、マンガンを取り込み易いニッケル、鉄分を主成分とするものと考えられる。この微視的組織は高温側で溶け出した金属成分の質量移行により形成されるのか、ナトリウム環境中における管壁母材表面の変質によるものなのか、現在のところ必ずしも明確にはなっていない。後者に関しては比較的高温領域で観察されたニッケル、鉄分富化粒子の由来について次のような主張が行われている。即ち、母材表面に亜クロム酸ナトリウム($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_4$)が形成され、この過程において周辺組織からのCrが取り込まれ、且つ亜クロム酸ナトリウムの微視的組織の成長に伴う体積膨張の結果、この組織の周辺がニッケル、鉄分の富化状態となり、且つマイクロクレビスが発生することにより、上述の合金粒子が管壁表面に出現すると言うものである[20]。いずれにせよCL領域で付着速度に加速現象が起こるのは、 ^{54}Mn の付着サイトとして働くこうした合金粒子の形成がナトリウムループの運転の経過とともに進行する結果と考えられる。ところで最初に ^{54}Mn の分布がHLで優勢であったことは、ナトリウム環境中での質量移行によるにせよ材料表面の変質によるにせよ、管壁母材表面の変化が未だ少ないプラント初期では、全域的に拡散機構が優勢であることを示している。一般に拡散の質量フラックスは初期ほど大きく時間経過とともに減少するが、これは初めほど拡散速度の速い表面近傍の浅い層の拡散となるが、表面濃度が上昇し冷却材中の濃度との平衡濃度に近接するにつれ、管壁母材中への溶け込みに利用出来る領域がより深い領域に移っていくからであ

る。 コールドレグは温度が低いのでこうした傾向は比較的速く進行し、初期には優勢であった管壁付着における拡散機構は次第に後退し、表面付着が優勢になってくるのである（図 2.2-2に示す(1)式の質量フラックス式参照）。 上述したところはこれに加えて、プラントの運転経過とともに表面付着速度の質量移行論上の加速化現象が認められたことを示すものである。 今後「もんじゅ」性能試験時のCP挙動を評価する場合これ等の点を留意しておくべきである。 一方 ^{60}Co の場合はHLでもCLでも管壁表面での合金粒子の形成による析出が付着機構の主体であり、HLではこれに管壁中拡散が加味されていると考えられる。 この合金粒子は鉄分に富んだもので炉心、HL、CLの1次冷却系全温度領域で安定であると考えられる。 因みに放出過程においてもコバルトと鉄分のふるまいはよく似ており、冷却材中酸素濃度に対する鋭敏性は共通している [8]。 しかし現在までのところ、ナトリウム、鉄、コバルト、酸素の関連は現象論の段階に止まっており、本格的な解明は今後に残された課題である。 HLでの付着機構が ^{54}Mn と ^{60}Co で異なるのはマンガンとニッケルの溶解度は遷移金属元素のなかでは比較的高いが、コバルトは極端に低いことによるものと思われる。 こゝで上記考察を踏まえてナトリウム冷却系中のCP低減化について若干述べる。 冷却材中酸素濃度の抑制、炉心材料中の不純物コバルト低減、非コバルト基表面硬化材の適用は、CP低減対策として確立された技術と評価出来る。 これ等はいずれも ^{60}Co の低減化に効果のあるものである。 更に、 ^{60}Co の場合は後述するように粒子形態の移行がかなり重要な役割を演じているものと考えられ、フィルターや流動の性質を利用した分離方法の有効性を期待出来る。 しかし ^{54}Mn の低減対策として開発されて来た純ニッケルをgetter材として用いたCPトラップは、ニッケルの溶け出しの下流部のCP付着に対する影響を慎重に見極める必要があり、更に加えてニッケルの放射化による長半減期の放射能生成の問題もあるので、これを適用する場合は炉心部内では高温域への設置は避ける必要がある。 新しい手法としてはインヒビショニング法の系譜の中の低減化技術の研究開発が考えられる。 そのうちの一つとして考えられるのは、炉心材料中のマンガン濃度を現行の2%台から0.5%以下に減少させる方法の有効性の検討である。 同位体自己拡散の問題は未解明だが材料中のマンガン濃度を下げると、ナトリウム中濃度とバランスしマンガン (^{55}Mn) の溶出は低下することが既に報告されている [21]。

さて次にIHXとポンプの計数率データ (CP-007と-012) について考察する。 機器部における $^{60}\text{Co}/^{54}\text{Mn}$ 計数率比を配管部と比較すると次表のようになる。

IHXはHLとCL/1と2の間、ポンプはCL/1と2のいずれより高く、IHXよりは低い。第7回定期検査時の結果で言えばIHXはCL/1の2.6倍、HLの0.6倍、ポンプはCL/1、2の各々1.4倍と1.7倍である。ポンプの場合は明らかに前後の配管部より⁶⁰Coの核種割合が大きくなっている。IHXもCP-007の位置は温度的にはむしろCL/1に近いことを考えると⁶⁰Coの割合が高い。これ等の結果は機器内では配管部に比べて⁶⁰Coの割合が多くなることを示唆している。コールドトラップのCP測定でも下部管板部に⁶⁰Coの鋭い蓄積分布のピークが観察されている[6]。

⁶⁰Co/⁵⁴Mn計数率比の比較

領域	計数率比
H L	0.294
IHX-A	0.175
CL/1	0.0677
PUMP-A	0.0915
CL/2	0.0529

更に、次節で述べるように炉心部の外側反射体洗浄時に⁶⁰Coを主成分とする高濃度のCP廃液が発生する。これ等の現象は、先述の配管部における⁶⁰Coの再放出過程の推定とも関連し、⁶⁰Coの粒子挙動機構の存在を示唆しているように思われる。プラント管理上これ等機器内に蓄積したり炉心集合体に付着したりするCPは重要な意味を有すると考えられるので、今後における評価手法の高度化が課題である。また、機器内CP付着に対する測定データの定量化のためには計測上の工夫が必要である。計測システムの定量化の3つの要素は、線源、コリメータシステムのジオメトリー、検出器の固有検出効率（1個の光子が入射した時の光電ピークとしてのレスポンス）である。このうちの2つが決まれば他の1つは決まる。そこで先ずジオメトリーが決定されているコリメータシステムと通常の標準線源を用いて検出器の固有検出効率を実験的に決定する。次の段階では計算機上に対象機器の線源（単位線源の付着した）と測定に用いるコリメータシステムを組み合わせた線源機器-コリメータシステムの幾何形状モデルを構築し、遮蔽計算によりジオメトリーの算出を行い、先に求めた検出器の固有検出効率を用いて測定条件下での検出効率を決定する。本手法を確立出来れば複雑形状の線源の計数率に対しても $\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ に変換可能となり、Ge半導体検出器のプラント現場における適用拡大をはかることが出来る。

4. 5 燃料洗浄廃液CP特性

表4. 5-1に1990年6月から翌年3月(平成2年度)にかけて行われた、外側反射体を含む炉心構成要素の洗浄廃液CP測定結果を示す。この測定結果と3. 2節で述べた評価方法により求めた構成要素1体当たりのCP発生量を、表4. 5-2及び図4. 5-1に示す。検出放射能のほとんどはステンレス鋼構成元素と高温強度改良のために添加された微量元素の放射化生成核種であるが、 ^{181}Hf だけは $^{180}\text{Hf}(n, \gamma)$ ^{181}Hf による生成であるとしてもその由来が不明である。廃液中の最優勢核種は ^{60}Co で、ドライバー燃料に対し $0.017\text{Ci}/\text{体}$ 、外側反射体に対し $0.041\text{Ci}/\text{体}$ であり、 ^{54}Mn が優勢な冷却系の配管部とは全く様相が異なる。 ^{54}Mn に対する倍率はそれぞれ7倍と15倍になる。また発生量とその核種割合はドライバー燃料と外側反射体で異なる。まず発生量は外側反射体で多くドライバー燃料の約4倍であり、両者の間では ^{54}Mn 、 ^{58}Co 等の速中性子反応生成核種がほぼ同等であるのに対して、 ^{60}Co 、 ^{181}Hf 、微量添加元素に関連した放射能等の中性子捕獲反応生成核種は外側反射体で多くなる。即ち、 ^{60}Co 2.4倍、微量添加元素関連核種9.4倍、 ^{181}Hf はなんと65倍にもなる。このようにドライバー燃料の洗浄廃液では ^{60}Co と ^{58}Co 、 ^{54}Mn 、 ^{51}Cr 等が主要で、 ^{181}Hf 、微量添加元素に関連した放射能は僅かであるのに対して、外側反射体では ^{60}Co と ^{181}Hf 、微量添加元素に関連した放射能が主要となっている。

炉心構成要素の洗浄により発生するCPは、ナトリウム中でこれ等表面に付着した放射性腐食生成物が炉心内で中性子照射により更に放射化され、洗浄時に離脱したものであるとすれば、 ^{60}Co が ^{54}Mn より優勢になることやドライバー燃料と外側反射体で核種内訳の相違をもたらすのは、ナトリウム環境下における腐食生成物のコバルトを含む粒状物の照射と冷却材流動システム内におけるその特異な移行挙動の相乗効果と考えられる。まず炉心部で放射性腐食生成物が最も多く付着するのは炉心部入口や反射体領域等の中温領域である。更に、 ^{60}Co 、 ^{58}Co はその質量移行の特性からして、線源直下の炉心出口領域にも付着する。このように炉心部でのCP付着領域は炉心外周部が主要である。これ等外周部では中性子スペクトルは軟化しており、特に外側反射体ではその度合いは大きい。従って炉心構成要素に付着し更に放射化されたCPの核種内訳が ^{60}Co 優勢になることや、外側反射体ほど中性子捕獲反応生成核種が優勢になることは傾向としては妥当である。更に外側反射体はMk-IIの初めから20サイクル終了時まで炉内に滞在して

いたことを考慮すると、 ^{60}Co を始めCPがドライバー燃料に比べてより多く発生することは充分考えられる。しかし外側反射体で ^{181}Hf がドライバー燃料に比べて65倍も、また ^{60}Co の2.4倍に比して微量添加元素に関連した放射能が9.4倍も多くなるのは何故だろうか？ ^{181}Hf の由来が不明で確かなことが言えないが、もしハフミニウムが外側反射体にのみ微量元素として含まれていたとするならば、ナトリウム中で極狭い領域で質量移行現象が起こっているか、あるいは洗浄時に水腐食現象が無視出来ないほど起こっているかのどちらかであると考えられる。この他炉内におけるCP挙動現象に関する情報として制御棒上部案内管の測定結果もあるが、これ等も含めた炉内CP挙動については次章で更に検討を加えたい。

	第3回定検時(MK-I) (1981 12/23 0:00)			第4回定検時(MK-II) (1983 12/3 0:00)			第5回定検時(MK-II) (1985 5/1 0:00)			第6回定検時(MK-II) (1986 12/6 0:00)			第7回定検時(MK-II) (1988 9/7 0:00)			第8回定検時(MK-II) (1990 1/23 0:00)			
	⁵⁴ Mn	⁶⁰ Co	⁵⁸ Co	⁵⁴ Mn	⁶⁰ Co	⁵⁸ Co	⁵⁴ Mn	⁶⁰ Co	⁵⁸ Co	⁵⁴ Mn	⁶⁰ Co	⁵⁸ Co	⁵⁴ Mn	⁶⁰ Co	⁵⁸ Co	⁵⁴ Mn	⁶⁰ Co	⁵⁸ Co	
	0.529	0.0472	—	—	—	—	0.738	0.148	—	0.845	0.275	—	0.750	0.305	0.0241*	0.910	0.306	0.044*	0.1
	0.399	0.0270	—	0.539	0.0725	—	0.772	0.0917	—	1.033	0.156	—	0.720	0.161	0.0349*	1.091	0.196	0.068	0.1
1)	0.0613*	0.0609	—	0.102*	0.191	—	0.173*	0.155	—	0.263*	0.361	—	0.235*	0.280	0.0607	0.272*	0.272	0.111	0.1
2)	0.205 *	0.0298	—	0.292*	0.0780	—	0.461*	0.0776	—	0.643*	0.161	—	0.406*	0.147	0.0463	0.645*	0.192	0.095	0.1
	0.532	0.0472	—	0.616	0.114	—	0.920	0.112	—	1.132	0.279	—	0.826	0.235	—	1.199	0.282	0.034*	0.1
	0.480	0.0407	—	0.566	0.111	—	0.762	0.225	—	1.095	0.350	—	0.703	0.223	—	1.167	0.298	0.064	0.1
	0.356	0.0129	—	0.447	0.0488	—	0.684	0.0653	—	0.829	0.0905	—	0.741	0.0907	0.0452	0.954	0.103	0.072	0.1
1)	0.459	0.0380	—	0.542	0.103	—	0.775	0.125	—	0.987	0.239	—	0.748	0.206	0.0507	1.064	0.236	0.0820	0.1
													18.22	3.023	—	30.73	3.056	—	23.
1)	0.159	0.0116	—	0.364	0.0771	—	0.724	0.100	—	1.289	0.109	—	1.338	0.103	0.0284*	2.401	0.103	0.045*	1.1
2)	0.166	0.0107	—	0.356	0.0603	—	0.721	0.0979	—	1.380	0.102	—	1.494	0.0999	0.0381*	2.634	0.107	0.055*	2.1
	0.207	0.0086	—	0.389	0.0331	—	0.826	0.0640	—	1.545	0.0362*	—	1.194	0.0334*	0.0396*	2.659	0.054*	0.064	2.1
													0.229*	0.0248*	—	0.701*	0.044*	0.007*	0.1
	0.199	0.0095	—	0.407	0.0321	—	0.999	0.0359	—	1.499	0.112	—	1.608	0.0919	0.0164*	2.490	0.108	0.024*	2.1
1)	0.183	0.0101	—	0.379	0.0507	—	0.818	0.0745	—	1.428	0.108	—	1.409	0.0983	—	2.546	0.106	0.064	2.1
													53.04	4.498	—				81.
	0.265	0.0069	—	0.621	0.356 *	—	1.462	0.411 *	—	2.322	0.0914	—	2.583	0.0823	0.0347	4.054	0.090	0.049*	3.1
	0.606	0.0430	—	0.915	0.124	—	2.733	0.146	—	3.152	0.246	—	3.760	0.167	0.0253*	6.090	0.189	0.063*	4.1
	0.268	0.0321	—	0.436	0.0806	—	1.489	0.143	—	1.844	0.156	—	2.015	0.177	0.0182*	3.230	0.217	—	2.1
1)	0.233	0.0272	—	0.377	0.122	—	1.285	0.145	—	2.44	0.121	—	2.733	0.142	0.0247	4.452	0.185	—	3.1

表 4.5-1 炉心構成要素洗浄廃液CP測定結果(会川等[14], 鈴木等[16]に基づく)

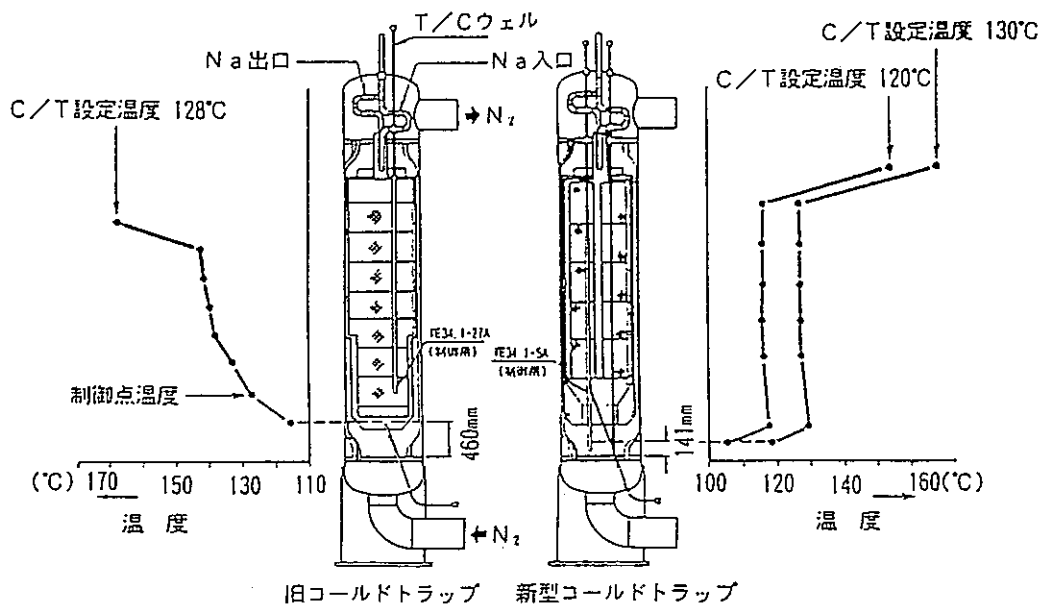
洗浄バッチ	洗浄年月日 採取年月日	洗浄要素	要素数		廃液量 (m ³)	放射能濃度 (Bq/cm ²) / 放射能 (Bq)											備考
			PF型	NFRM型		⁶⁰ Co	⁵⁸ Co	⁵⁴ Mn	⁵¹ Cr	⁵⁹ Fe	¹⁸¹ Hf	²² Na	⁹⁵ Zr	⁹⁵ Nb	¹⁸² Ta	¹²⁴ Sb	
2-E-2	H2 6/21- 6/25 6/26	PF2 322, 317, 306 NFR 11A, 10Q, 10V	6	0	5.9	2.4 E2 1.42 E9	8.7 E1 5.13 E8	9.4 E1 5.55 E8	—	—	—	—	—	5.2 E0 3.07 E7	9.3 E0 5.49 E7	—	
2-E-3	6/27- 6/28 7/4	NFRM 0G, 0H, 0A, 09	0	4	5.3	4.2 E2 2.23 E9	1.9 E1 1.01 E8	6.2 E1 3.29 E8	—	—	1.1 E2 5.83 E8	—	2.1 E2 1.11 E9	2.8 E2 1.48 E9	1.4 E2 7.42 E8	—	
2-E-4	7/9 - 7/10	PF2 311, 315	2	0	4.2	1.8 E2 7.56 E8	3.0 E1 1.26 E8	5.9 E1 2.48 E8	—	—	2.3 E1 9.66 E7	—	4.4 E1 1.85 E8	6.7 E1 2.81 E8	3.8 E1 1.60 E8	—	機器洗浄試運転廃液 2.1m ³ を含む
2-E-5	7/12- 7/15 7/23	PF2 238, TCR 204 PRH 010, TNS 002 MFR 11E	5	0	5.2	1.2 E2 6.24 E8	2.3 E1 1.20 E8	4.6 E1 2.39 E8	—	—	7.9 E0 4.11 E7	—	1.5 E1 7.8 E7	2.3 E1 1.20 E8	1.3 E1 6.76 E7	—	
2-E-6	7/21- 7/23 7/30	NFR 11P, 11Q	2	0	3.1	1.8 E2 5.58 E8	2.3 E1 7.13 E7	5.2 E1 1.61 E8	—	—	3.2 E0 9.92 E6	—	4.2 E0 1.30 E7	6.7 E0 2.08 E7	—	—	機器洗浄試運転廃液 1.1m ³ を含む
2-E-8	11/23- 11/26	PF2 303, 257, 252 PRS 021, PRA 032 CR 305M	6	0	7.4	7.0 E2 5.18 E9	7.4 E1 5.48 E8	7.5 E1 5.55 E8	1.0 E2 7.4 E8	—	—	—	—	—	—	—	機器洗浄試運転廃液 1.0m ³ を含む
2-E-9	11/26- 11/29	NFRM 1A, 13, 0W, 0P	0	4	5.2	1.8 E3 9.36 E9	—	—	1.7 E2 8.84 E8	—	1.7 E3 8.84 E9	—	—	6.0 E2 3.12 E9	2.0 E2 1.04 E9	—	
2-E-10	11/29- 12/5 12/5	PF2 307, NFR 11T, 11R, PF2 319, 314	5	0	3.8	1.8 E3 6.84 E9	7.5 E1 2.85 E8	8.7 E1 3.31 E8	2.0 E2 7.6 E8	—	2.6 E2 9.88 E8	—	1.6 E2 6.08 E8	1.9 E2 7.22 E8	—	—	
2-E-11	12/8 - 12/12	TCR 203, PF2 308, 251, 256, 302, 318	6	0	5.5	5.3 E2 2.92 E9	1.4 E2 7.7 E8	8.4 E1 4.62 E8	1.6 E2 8.8 E8	—	1.7 E2 9.35 E8	—	1.1 E2 6.05 E8	9.9 E1 5.45 E8	3.4 E1 1.87 E8	—	
2-E-12	H3 3/18- 3/25	PF2 309, 324, 310, 323, 316, 329, 320 CR 302M, NFRM 0Q, 03	8	2	9.0	1.0 E3 9 E9	1.3 E2 1.17 E9	1.2 E2 1.08 E9	8.7 E1 7.83 E8	—	1.3 E2 1.17 E9	—	9.1 E1 8.19 E8	7.9 E1 7.11 E8	5.9 E1 5.31 E8	—	

表 4.5-2 炉心構成要素洗浄時CP発生量の推定

単位；Bq/S/A，（ ）内は%

核種 S/A	総計	⁶⁰ Co	⁵⁸ Co	⁵⁴ Mn	⁵¹ Cr	⁵⁹ Fe	¹⁸¹ Hf	²² Na	⁹⁵ Zr	⁹⁵ Nb	¹⁸² Ta	¹²⁴ Sb
ドライバー燃料 (PFD型)	1.04 [9] (100)	6.30 [8] (60.3)	9.47 [7] (9.1)	8.96 [7] (8.6)	1.06 [8] (10.1)	—	1.68 [7] (1.6)	—	6.29 [7] (6.0)	2.75 [7] (2.6)	1.72 [7] (1.6)	—
外側反射体 (NFRM型)	3.96 [9] (100)	1.51 [9] (38.2)	6.14 [7] (1.6)	1.02 [8] (2.6)	1.70 [8] (4.3)	—	1.10 [9] (27.8)	—	2.54 [8] (6.4)	5.39 [8] (13.6)	2.20 [8] (5.6)	—

注) 1. []内は指数
 2. ドライバー燃料 (PFD型) 40体
 内訳；PFD24, PRA1, PRH1, PRS1, CR2, TCR2, TNS1, NFR7, MFR1
 外側反射体 (NFRM型) 10体



新型及び旧コールドトラップ内部温度分布

- 第7回定検時 (S63 10)
- 第8回定検時 (H2 3)

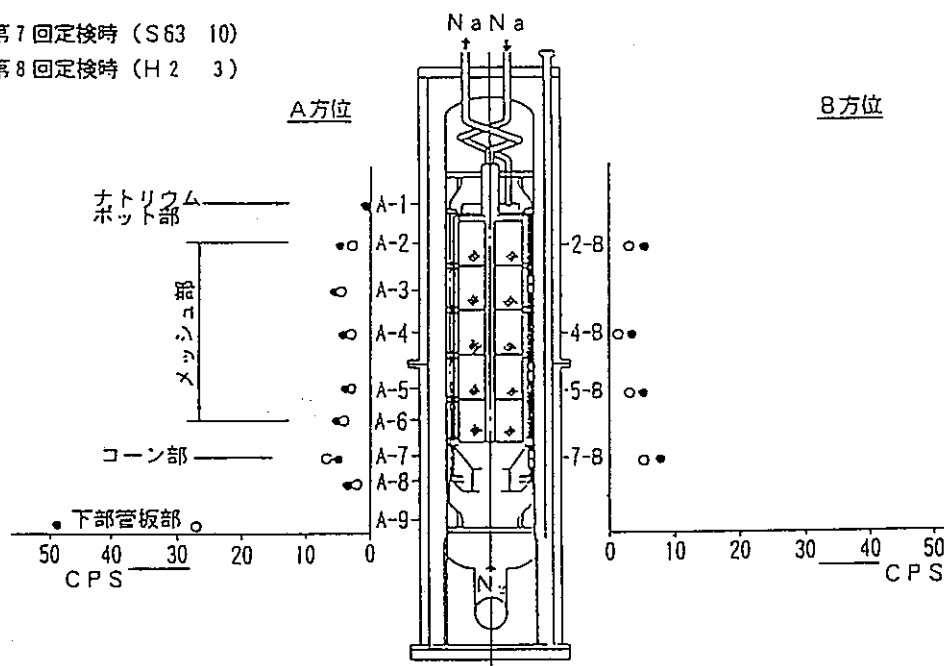


図 4.1-1 コールドトラップCPビルドアップ分布測定結果 (住野等[6]による)

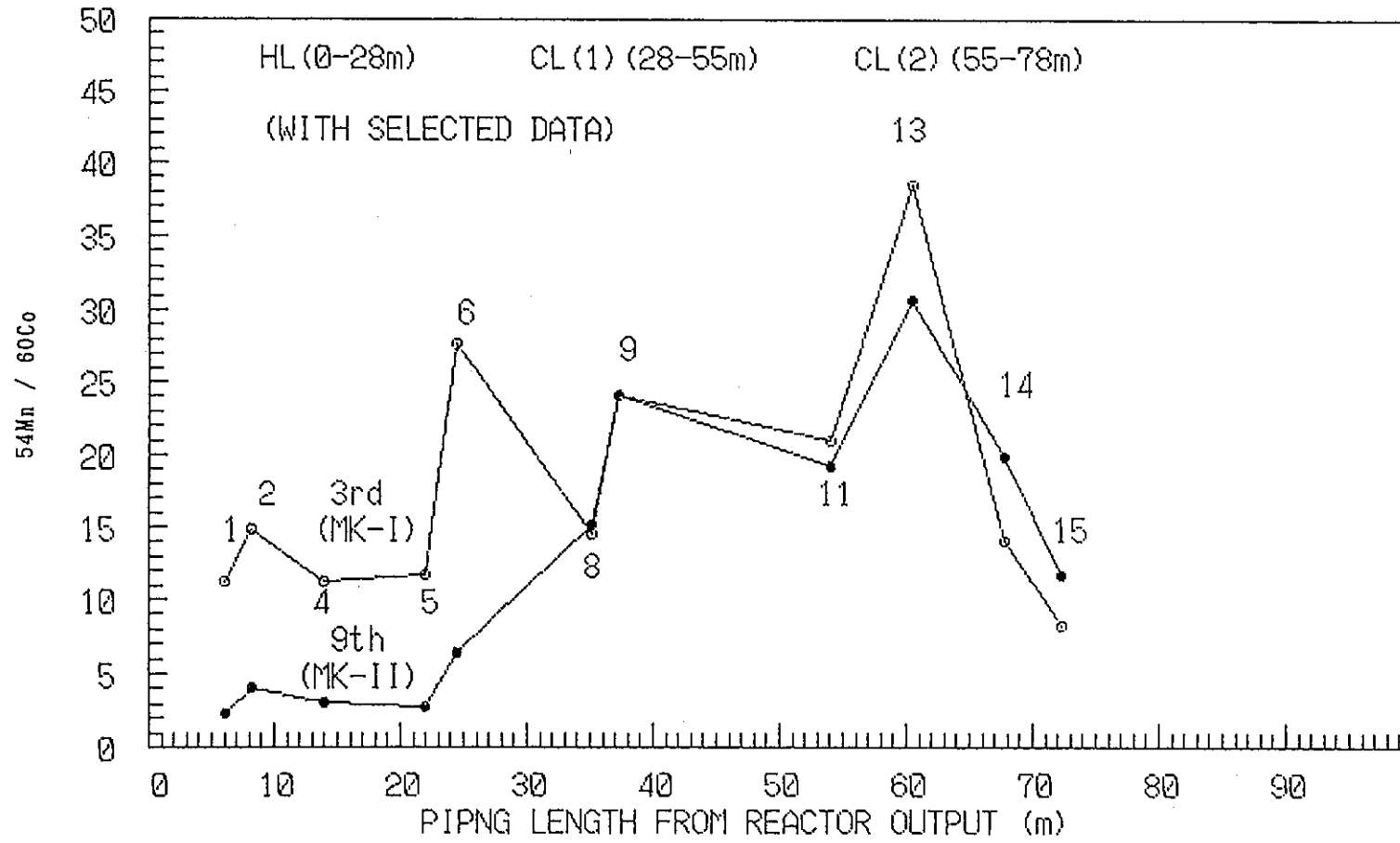
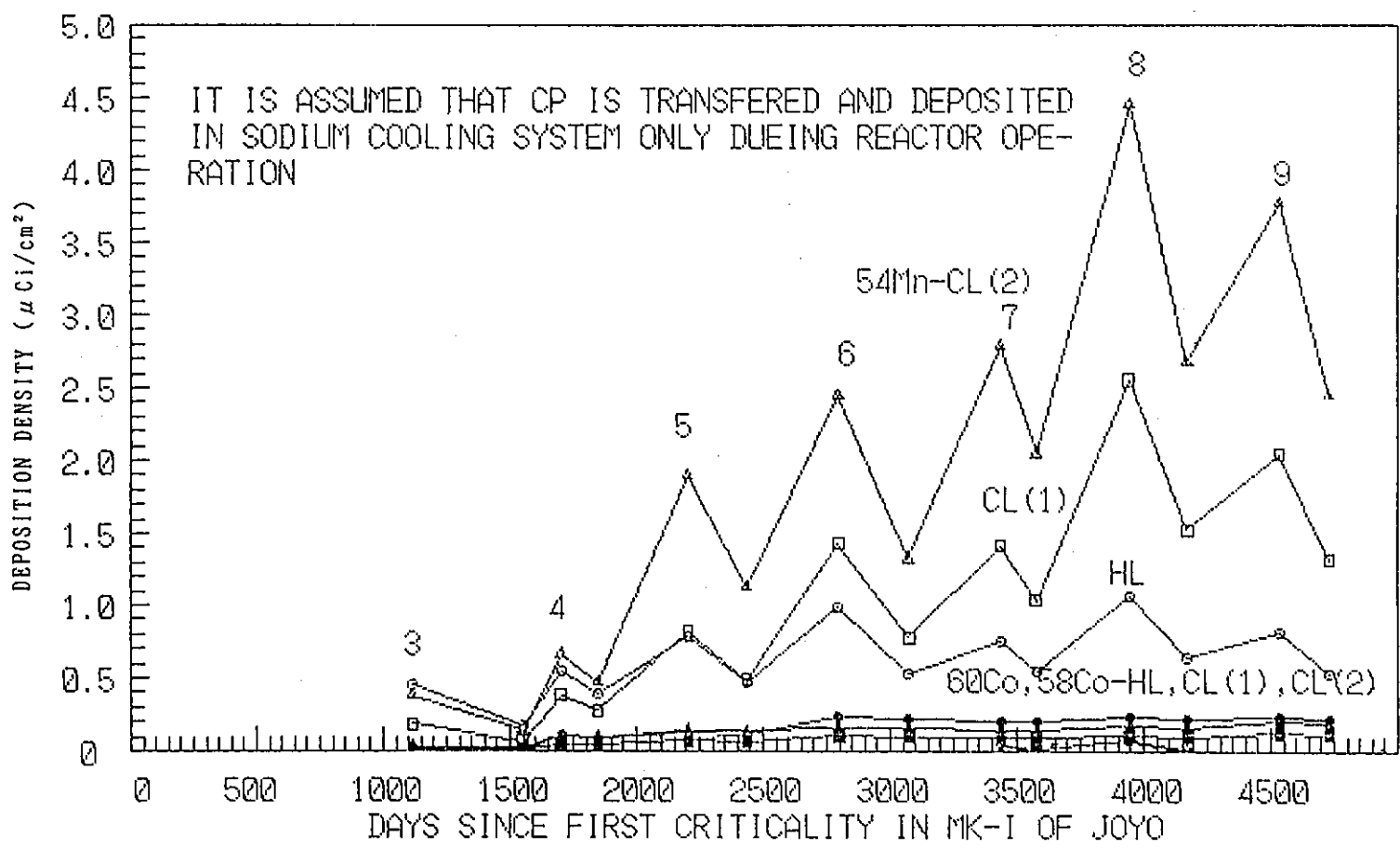
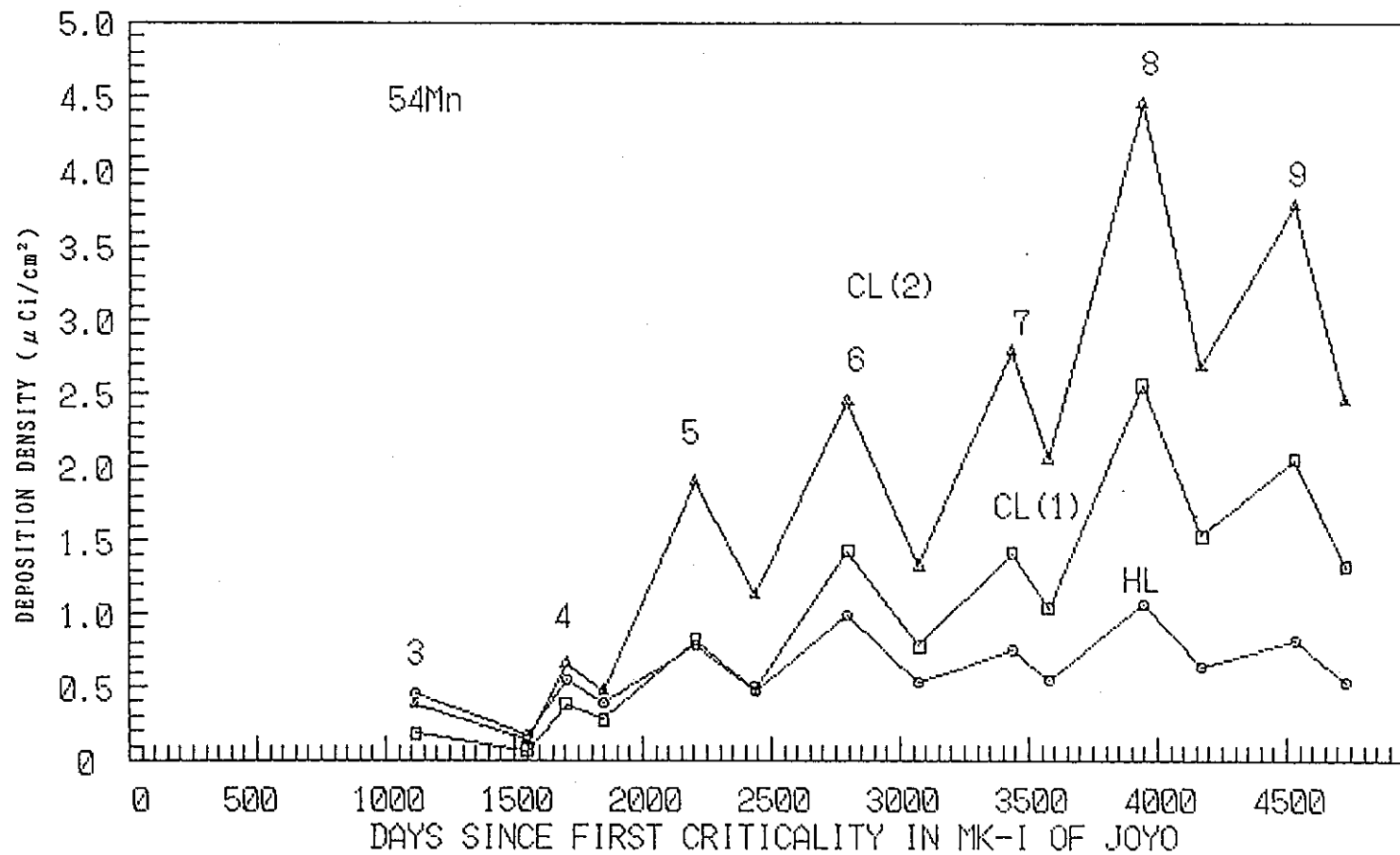


図 4.2-1 1次ナトリウム冷却系主配管壁CP付着分布核種割合 ($^{54}\text{Mn}/^{60}\text{Co}$) の比較



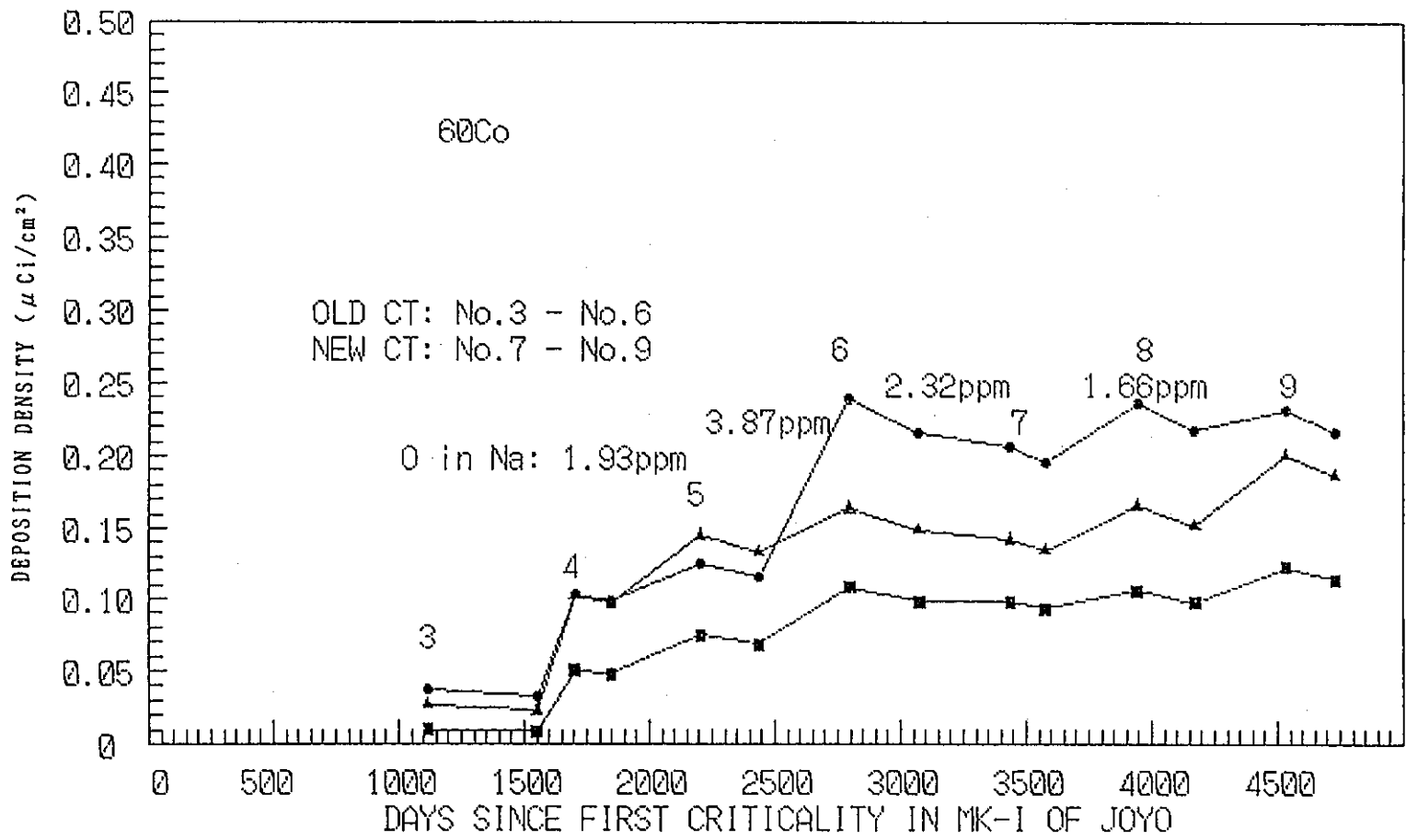
(a) ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{58}Co ビルドアップの比較

図 4.2-2 1次ナトリウム冷却系主配管壁CPビルドアップ (1/3)



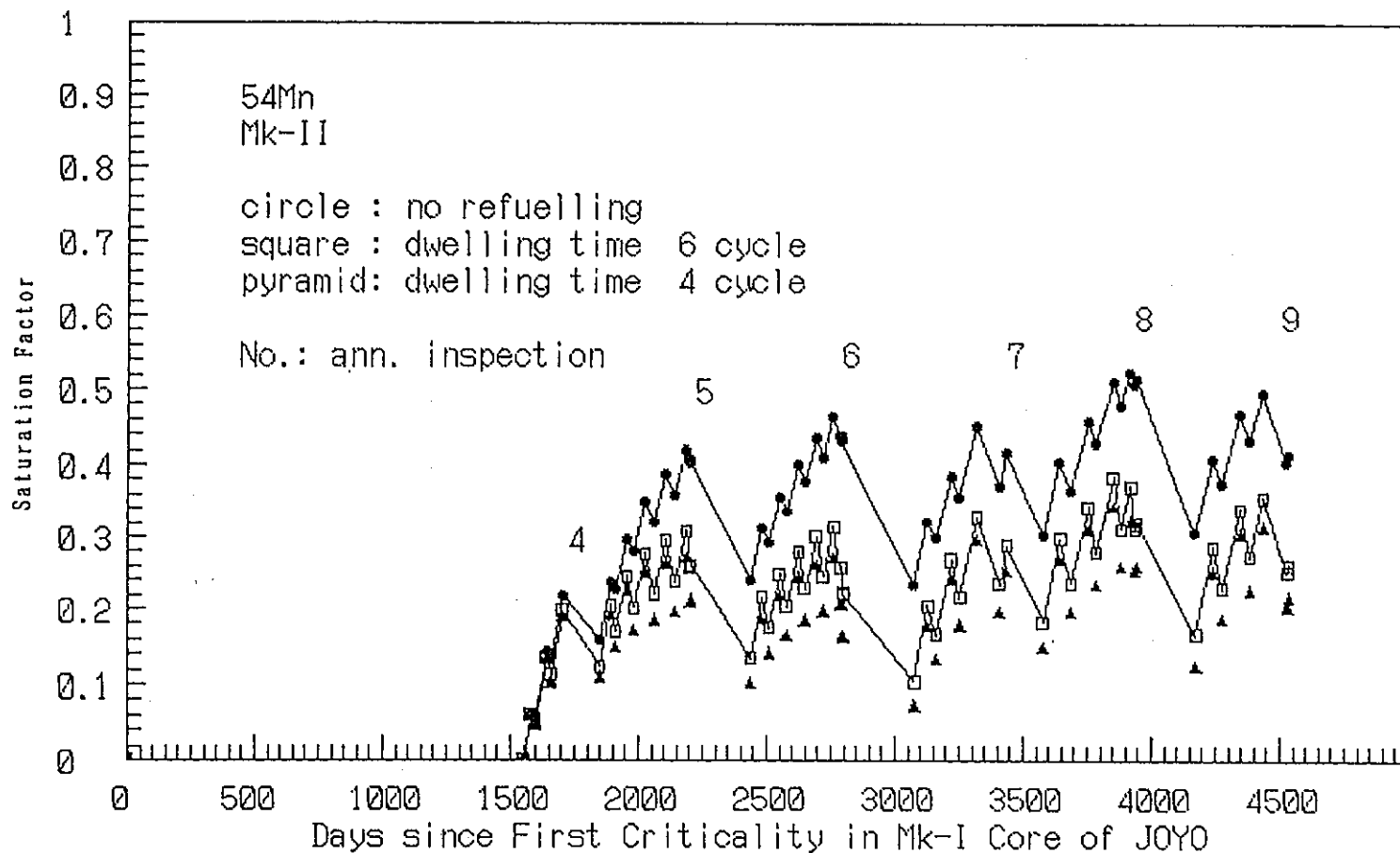
(b) ⁵⁴Mnのビルドアップ

図 4.2-2 1次ナトリウム冷却系主配管壁CPビルドアップ(2/3)



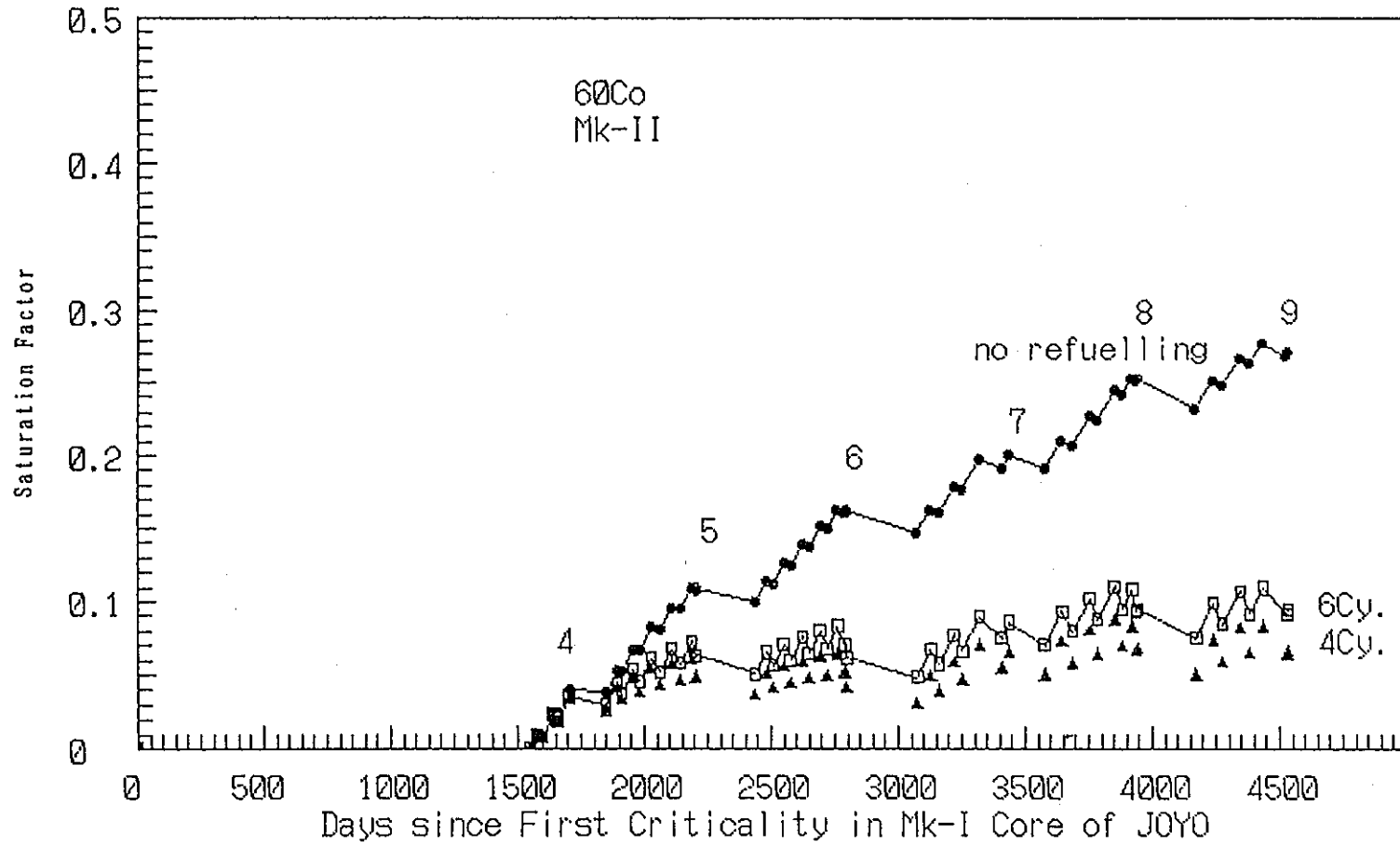
(c) ^{60}Co のビルドアップ

図 4.2-2 1次ナトリウム冷却系主配管壁CPビルドアップ (3/3)



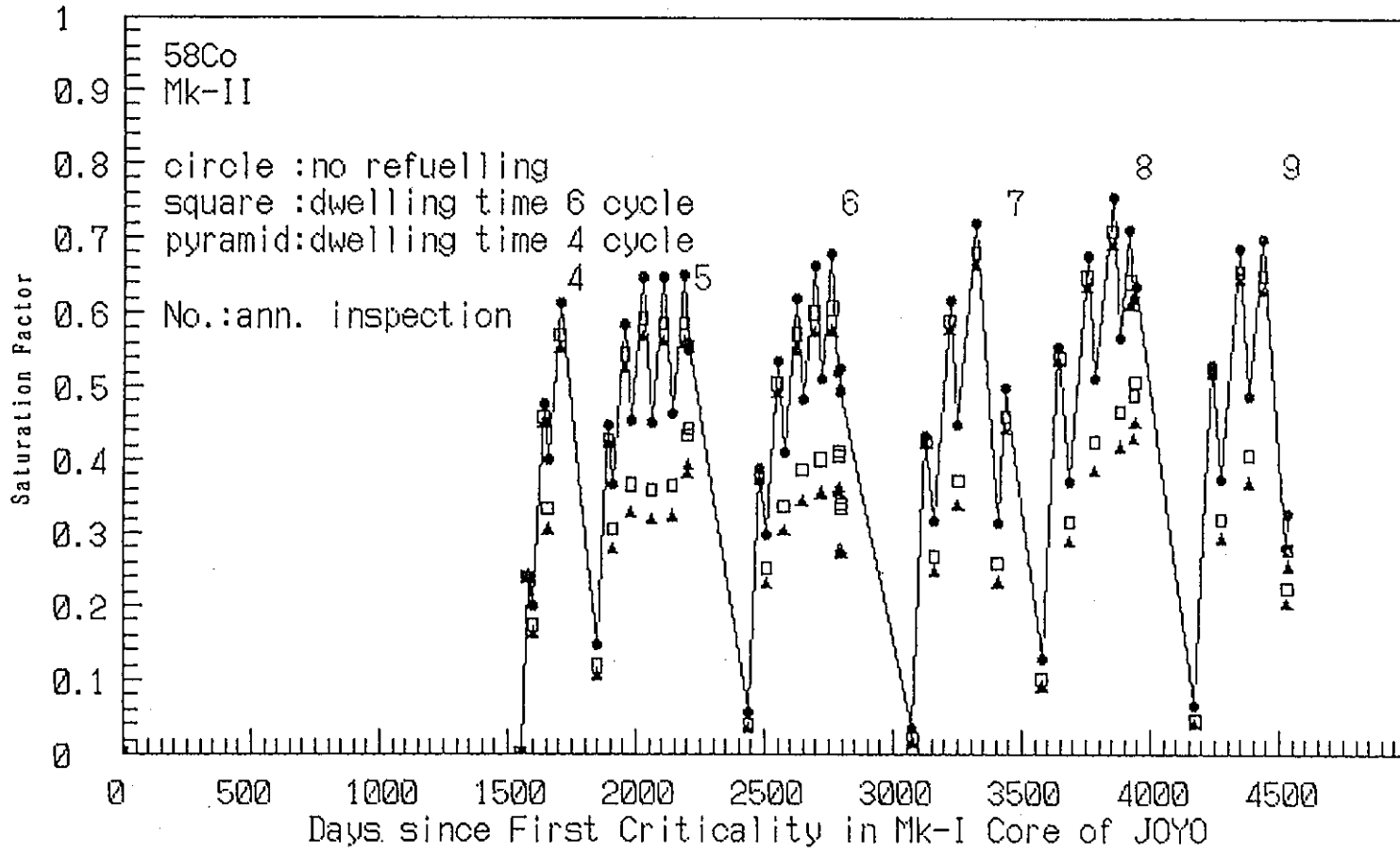
(a) ^{54}Mn の飽和因子 (管壁付着ないし燃料交換のない場合の放射化生成、4及び6サイクル燃料交換の3ケース)

図 4.3-1 Mk-II 炉心期運転・停止サイクル下での管壁付着ないし炉心材料の放射化生成放射能飽和因子 (R=一定) (1/3)



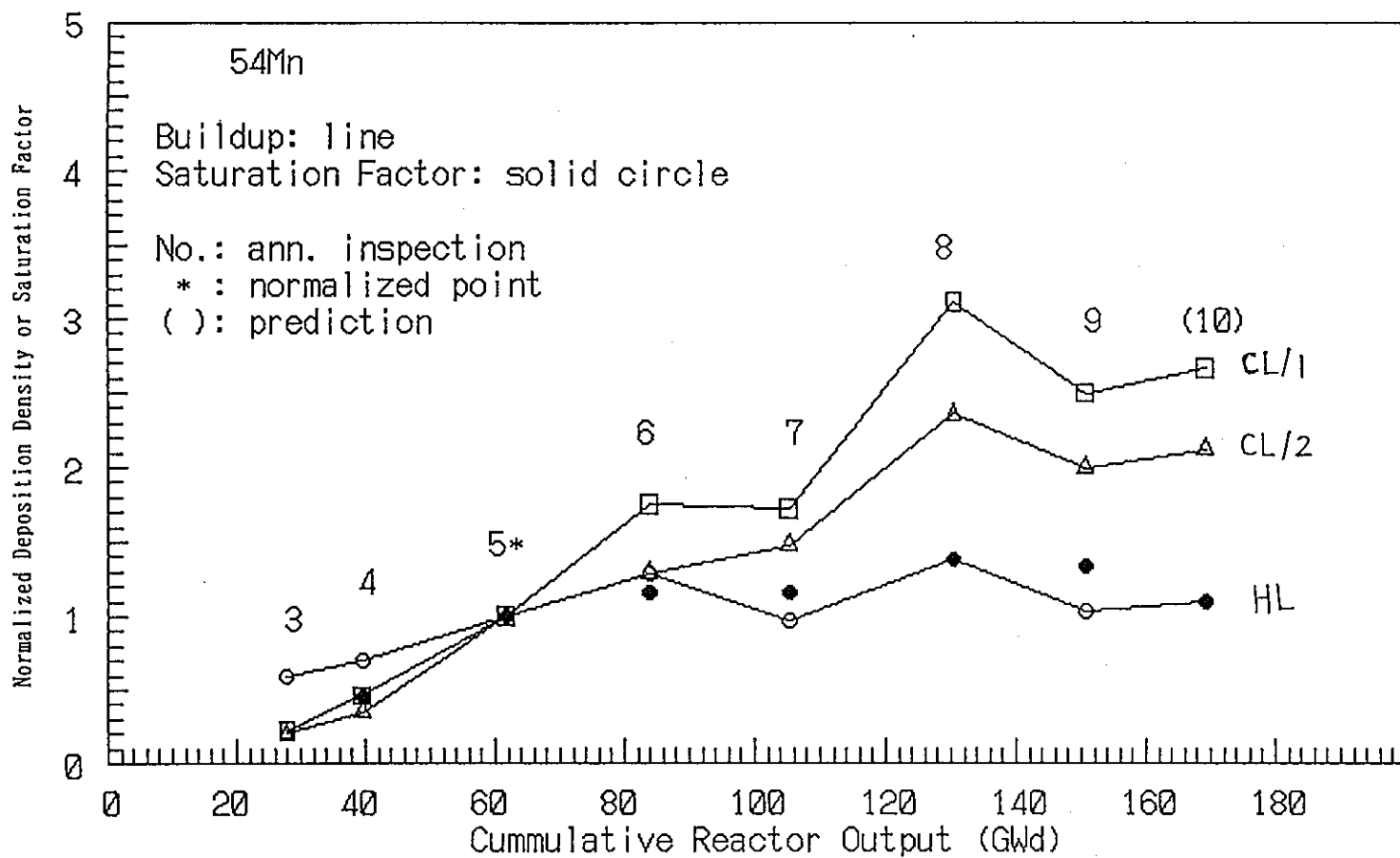
(b) ^{60}Co の飽和因子 (管壁付着ないし燃料交換のない場合の放射化生成、4 及び 6 サイクル燃料交換の 3 ケース)

図 4.3-1 Mk-II 炉心期運転・停止サイクル下での管壁付着ないし炉心材料の放射化生成放射能飽和因子 (R=一定) (2/3)



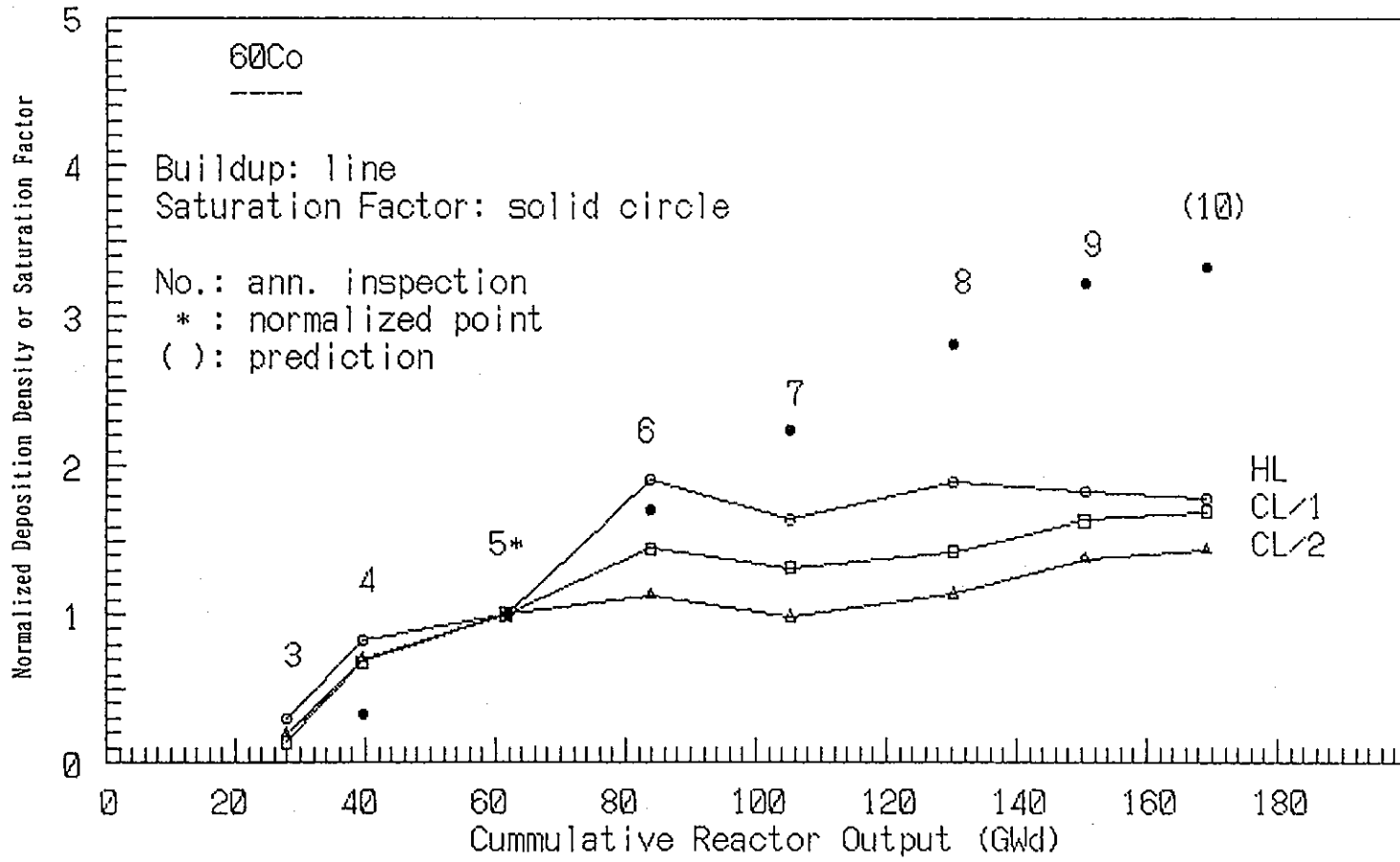
(c) ^{58}Co の飽和因子 (管壁付着ないし燃料交換のない場合の放射化生成、4及び6サイクル燃料交換の3ケース)

図 4.3-1 Mk-II 炉心期運転・停止サイクル下での管壁付着ないし炉心材料の放射化生成放射能飽和因子 (R=一定) (3/3)



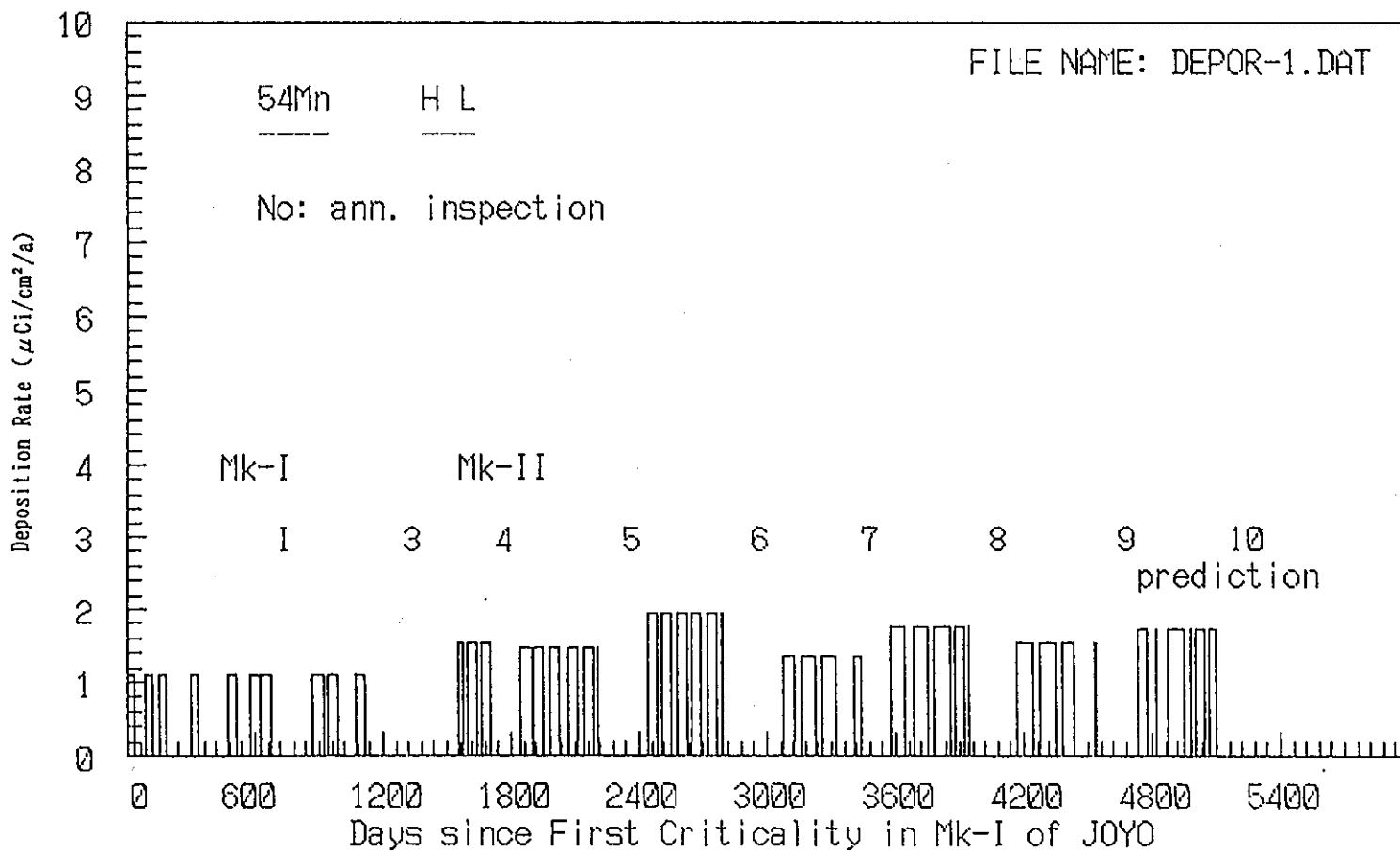
(a) ^{54}Mn の飽和特性

図 4.3-2 1次ナトリウム冷却系主配管壁附着CPの飽和特性(1/2)



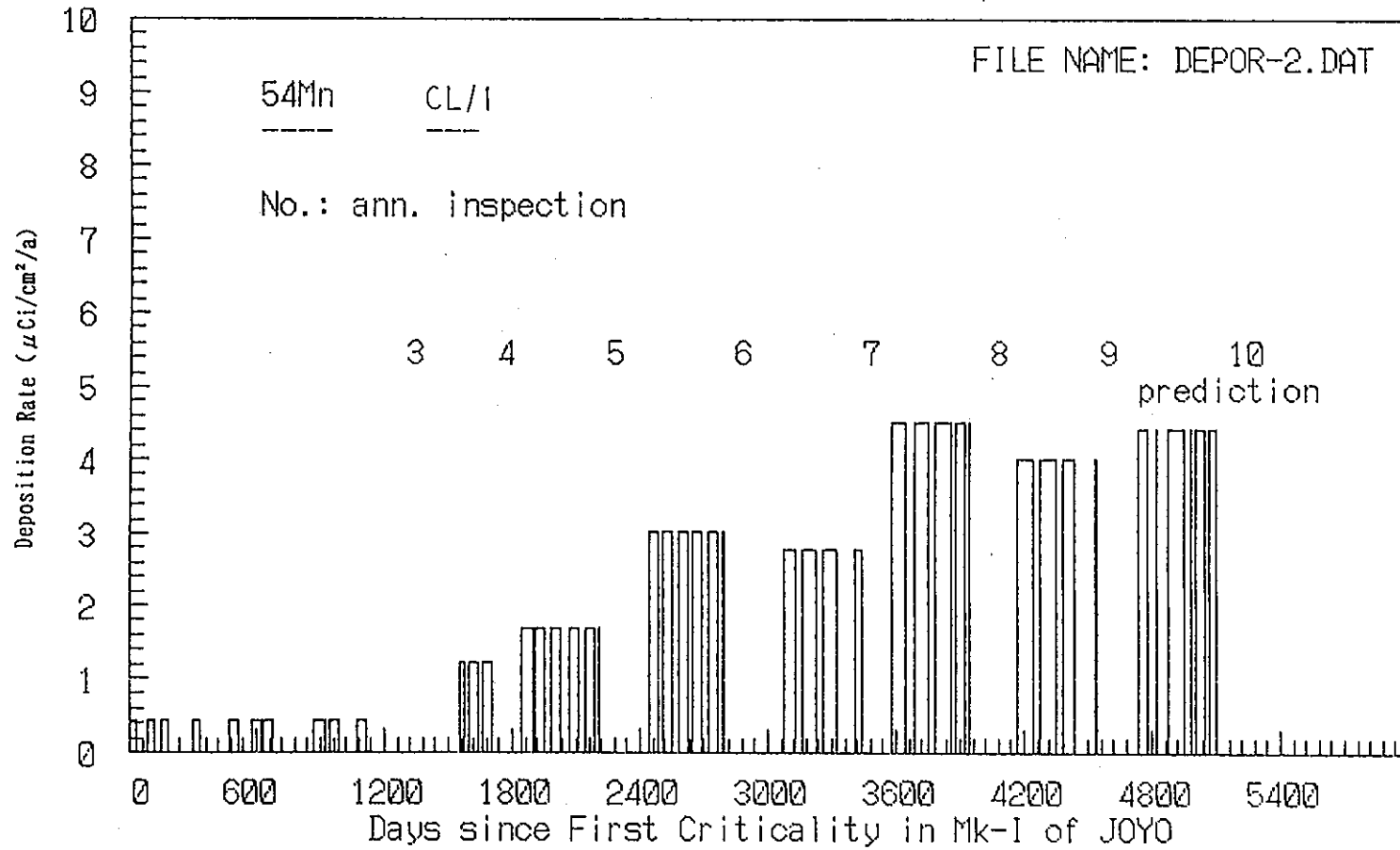
(b) ⁶⁰Co の飽和特性

図 4.3-2 1次ナトリウム冷却系主配管壁附着CPの飽和特性 (2/2)



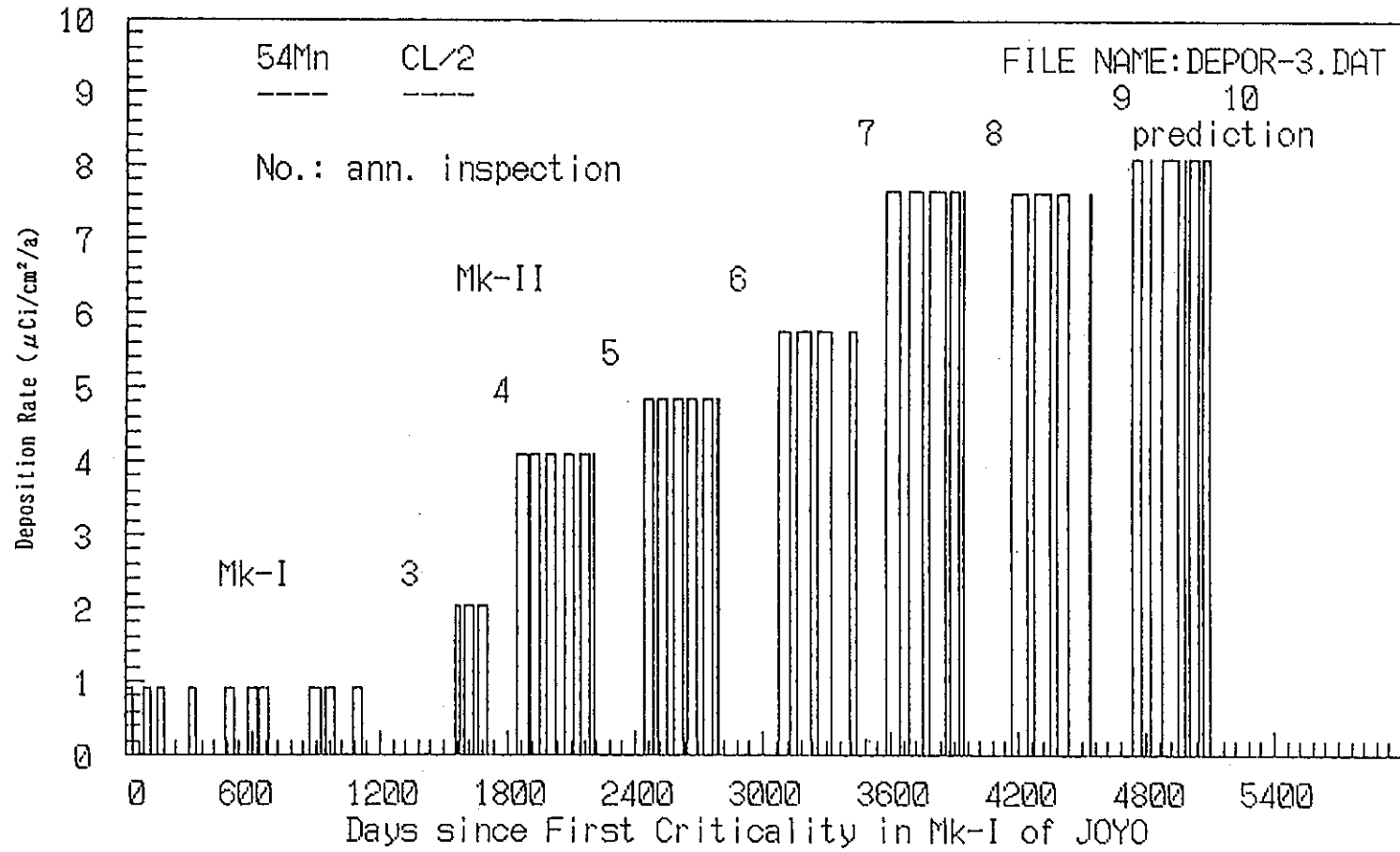
(a) ^{54}Mn 配管壁付着速度 (HL)

図 4.3-3 1次ナトリウム冷却系主配管壁CP付着速度の推移 (1/6)



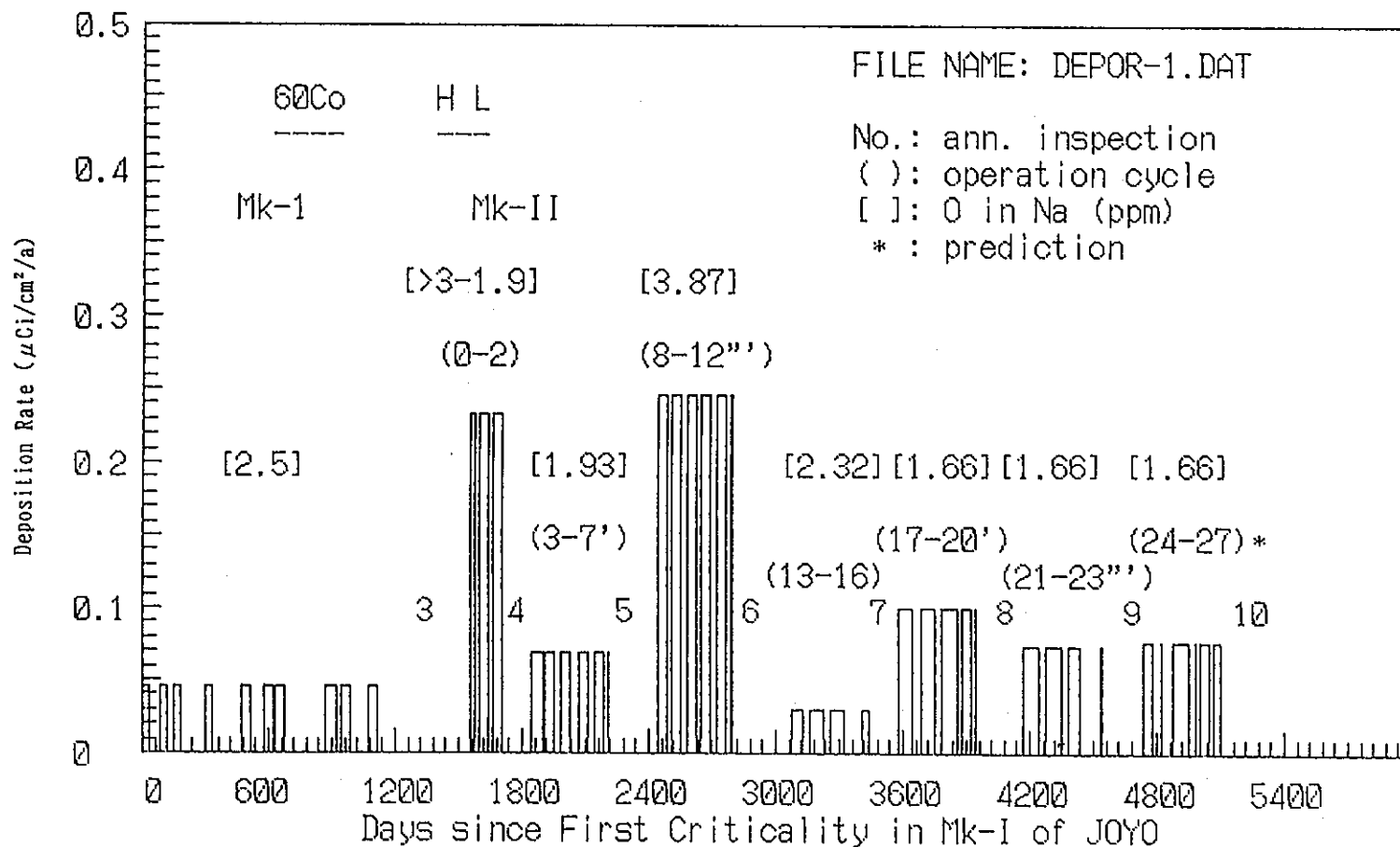
(b) ^{54}Mn 配管壁付着速度 (CL/1)

図 4.3-3 1次ナトリウム冷却系主配管壁CP付着速度の推移 (2/6)



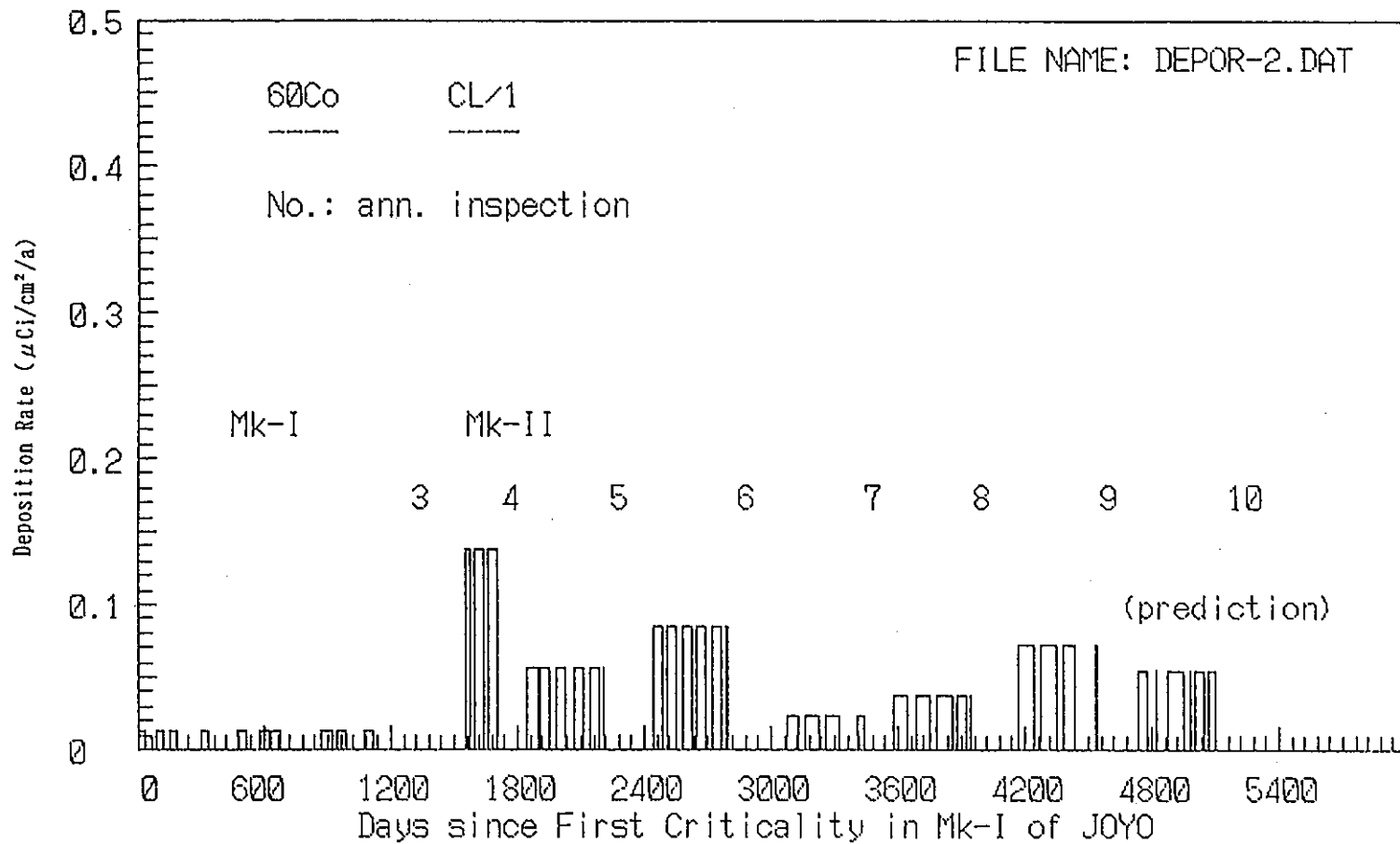
(c) ^{54}Mn 配管壁付着速度 (CL/2)

図 4.3-3 1次ナトリウム冷却系主配管壁CP付着速度の推移 (3/6)



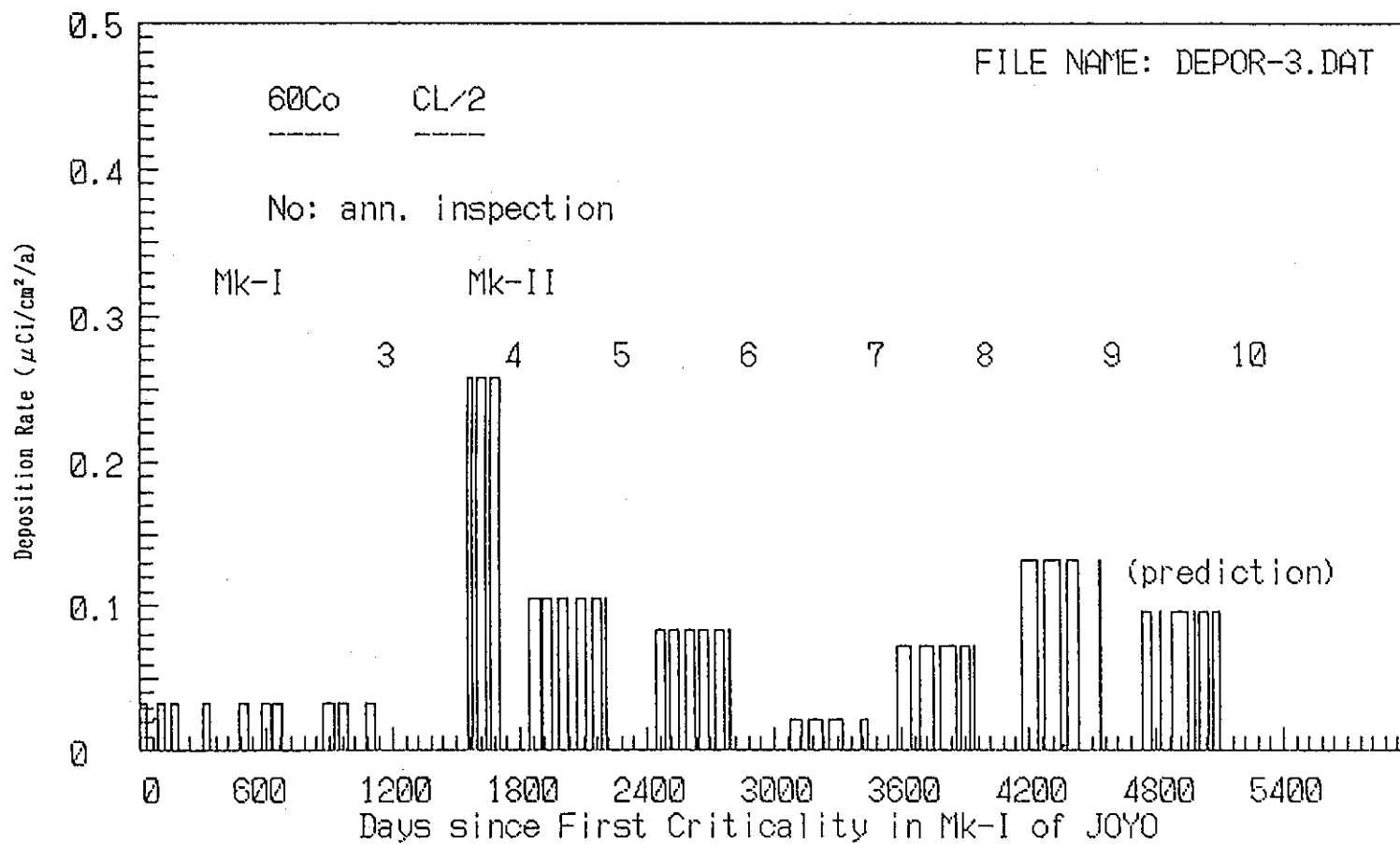
(d) ⁶⁰Co 配管壁付着速度 (HL)

図 4.3-3 1次ナトリウム冷却系主配管壁CP付着速度の推移 (4/6)



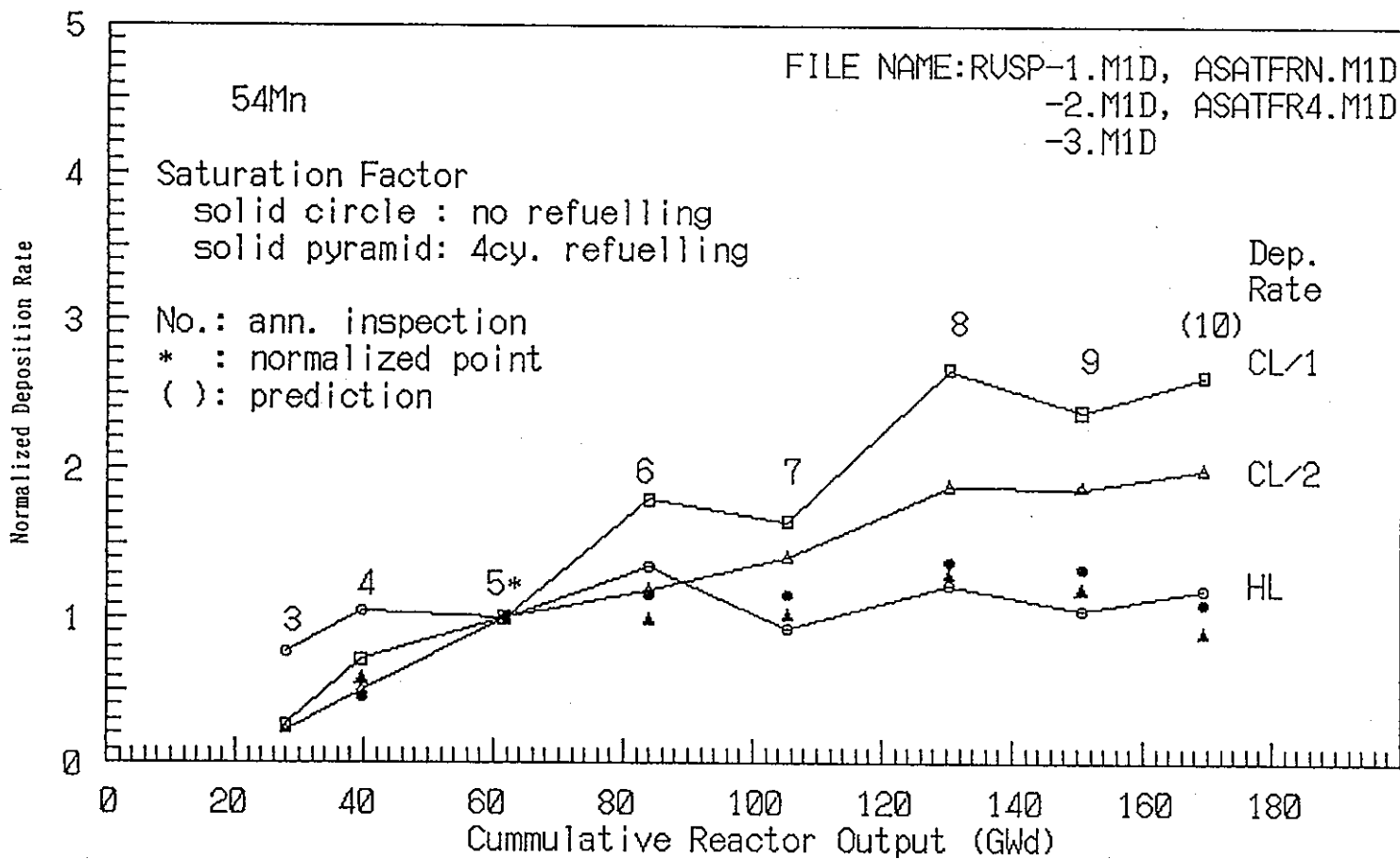
(e) ^{60}Co 配管壁付着速度 (CL/1)

図 4.3-3 1次ナトリウム冷却系主配管壁CP付着速度の推移 (5/6)



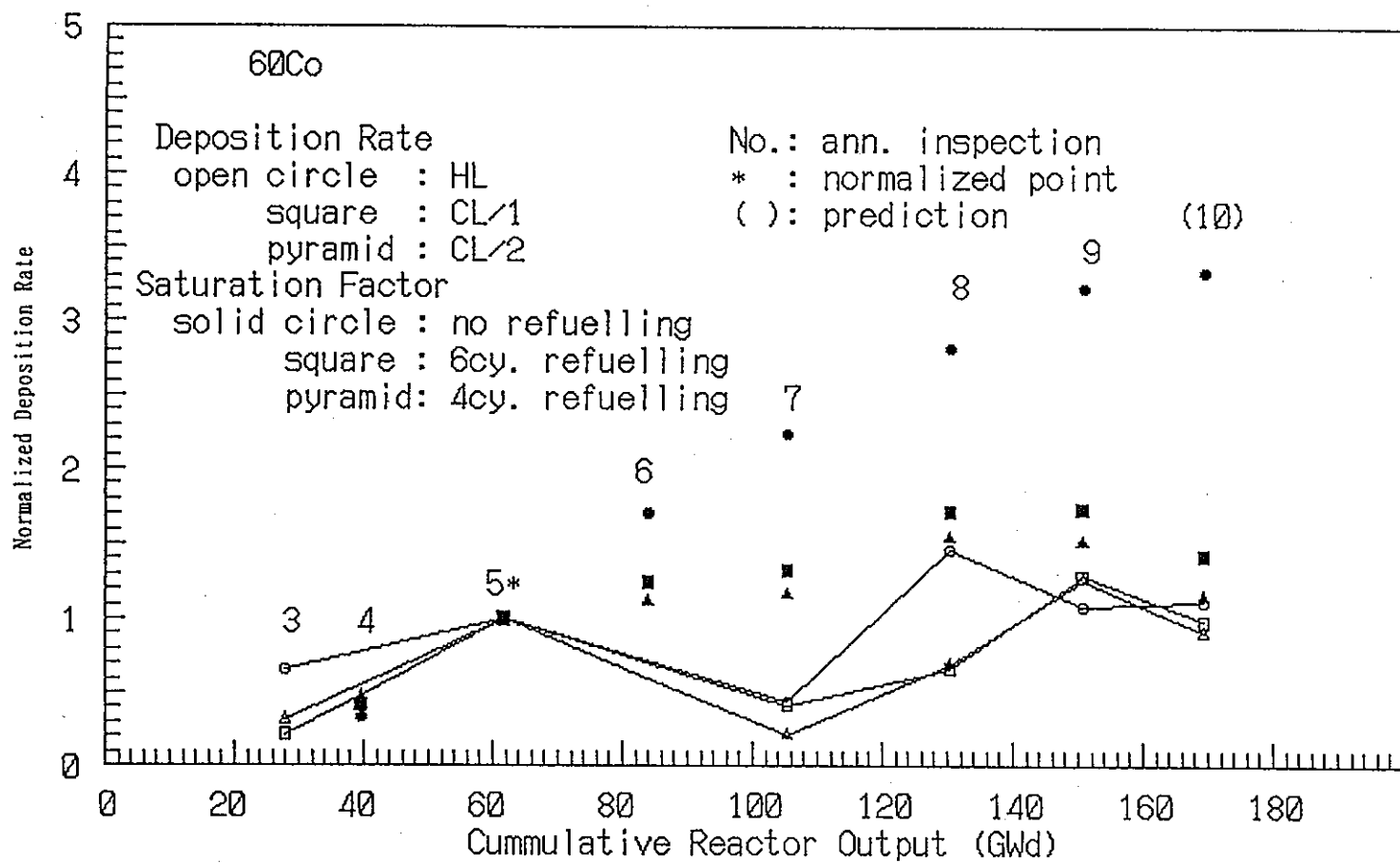
(f) ^{60}Co 配管壁付着速度 (CL/2)

図 4.3-3 1次ナトリウム冷却系主配管壁CP付着速度の推移 (6/6)



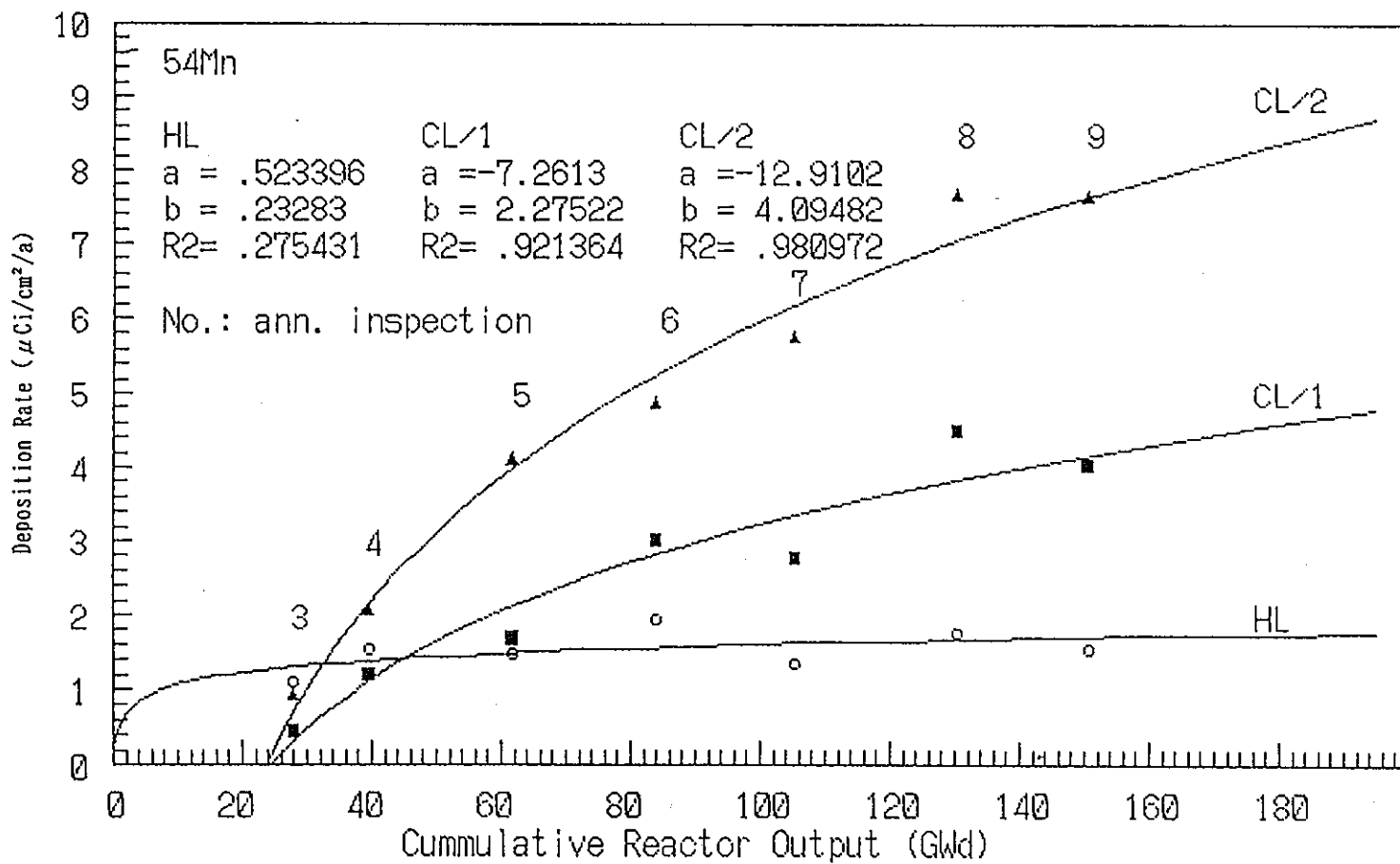
(a) ^{54}Mn の比較

図 4.3-4 1次ナトリウム冷却系主配管壁CP付着速度と炉心材料中放射化生成放射能飽和因子の推移の比較 (1/2)



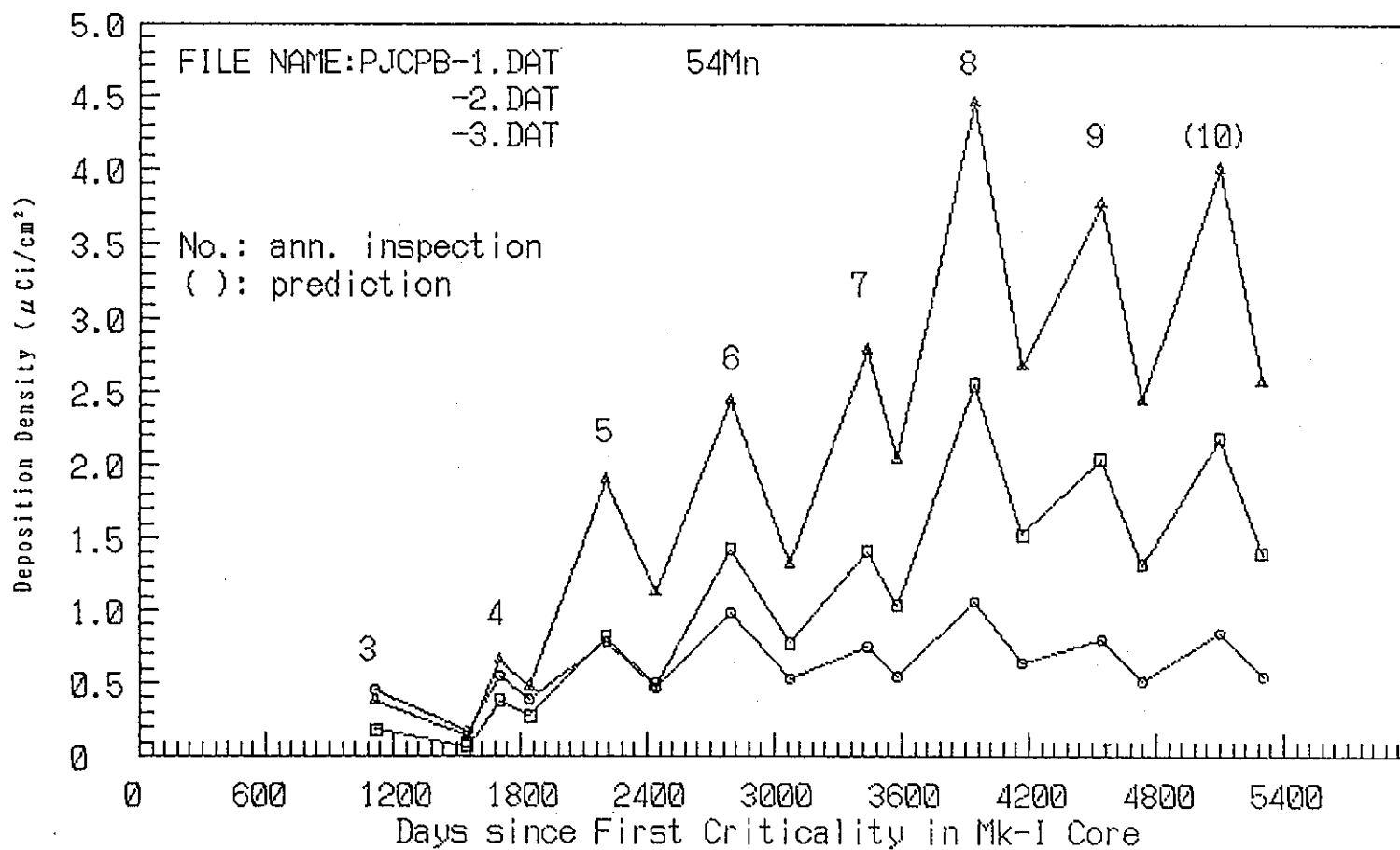
(b) ⁶⁰Co の比較

図 4.3-4 1次ナトリウム冷却系主配管壁CP付着速度と炉心材料中放射化生成放射能飽和因子の推移の比較 (2/2)



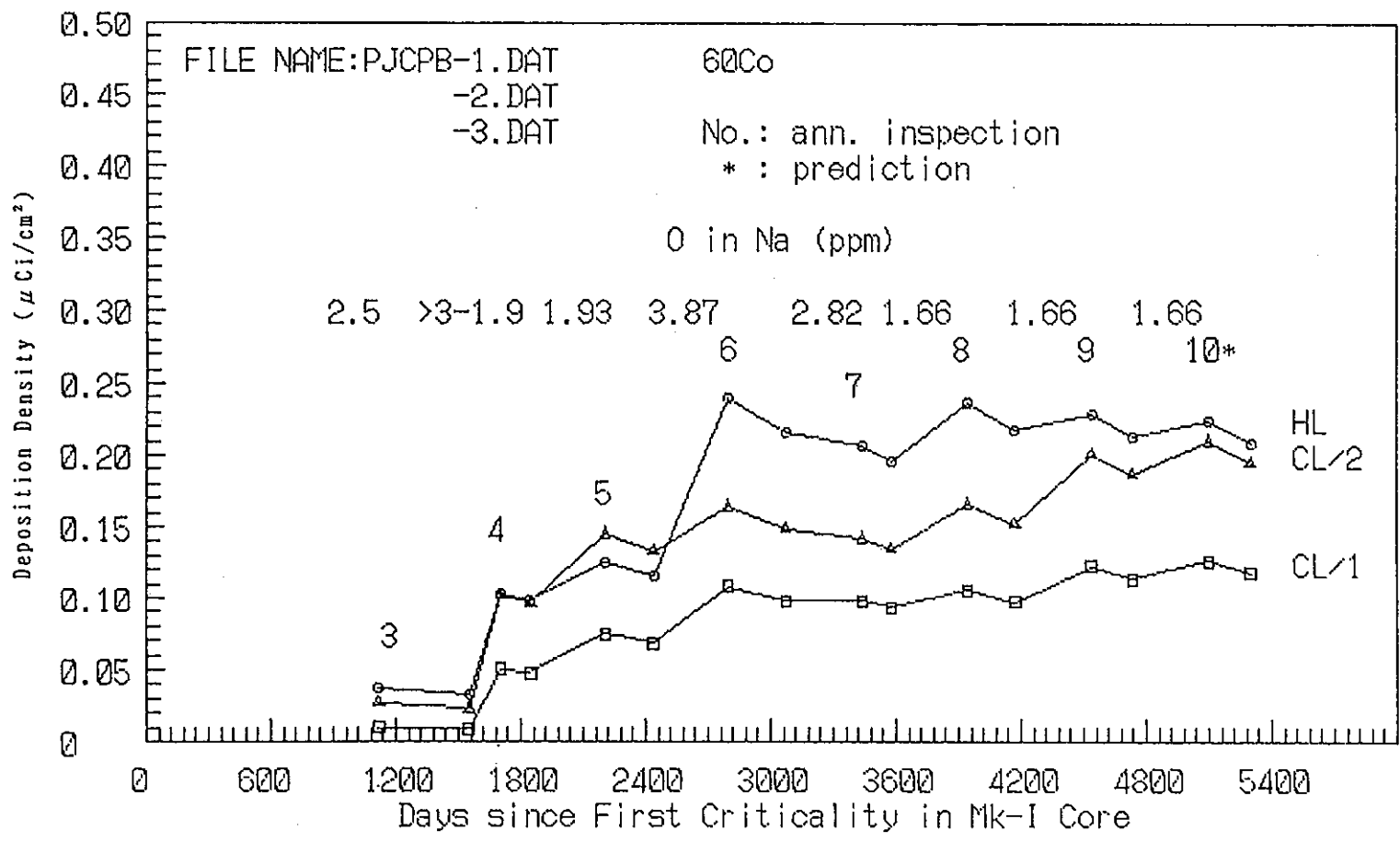
(a) ^{54}Mn の適合式

図 4.3-5 1次ナトリウム冷却系主配管壁CP付着速度適合式 ($y = a + b \text{Ln} x$) (1/2)



(a) ⁵⁴Mn のビルドアップ予測

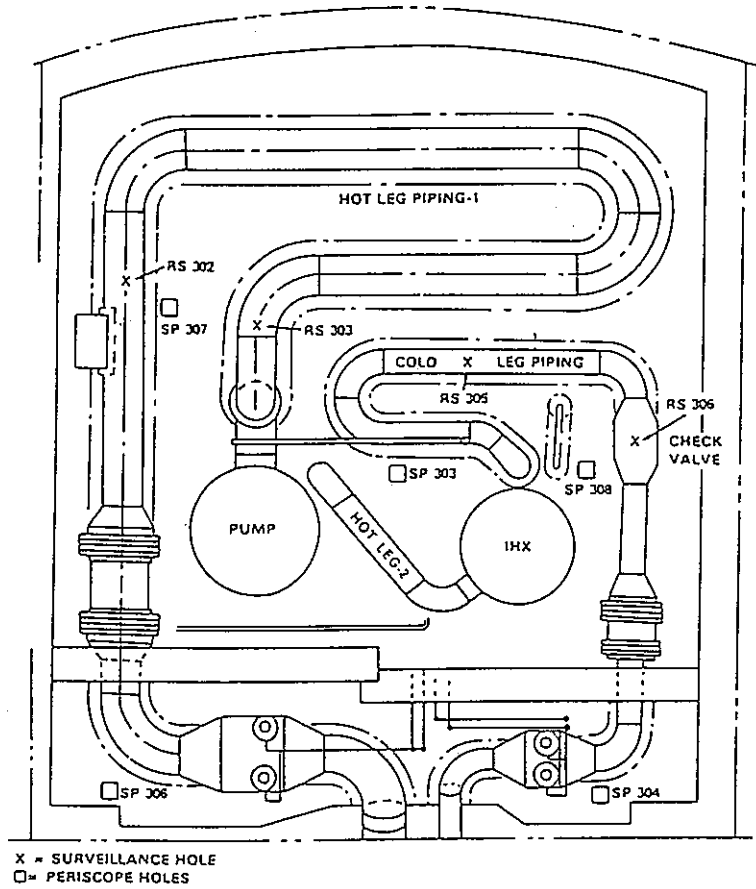
図 4.3-6 1次ナトリウム冷却系主配管壁CPビルドアップの予測 (1/2)



(b) ⁶⁰Co のビルドアップ予測

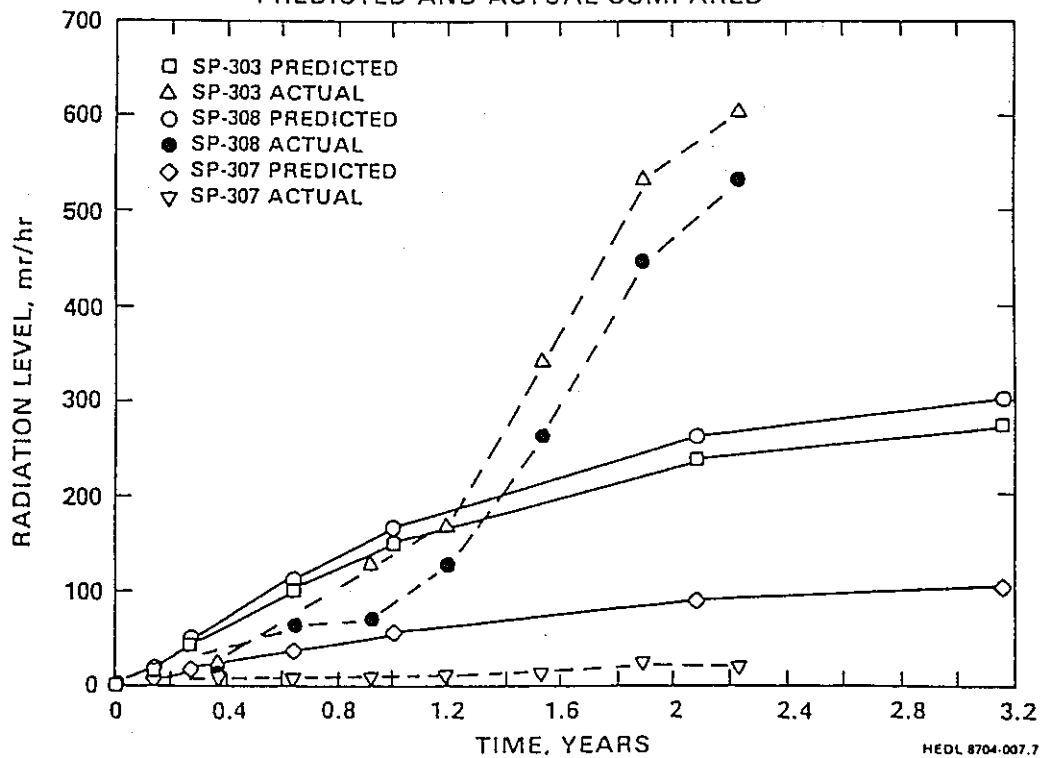
図 4.3-6 1次ナトリウム冷却系主配管壁CPビルドアップの予測 (2/2)

(a) PLAN VIEW OF FFTF-HTS CELL LAYOUT



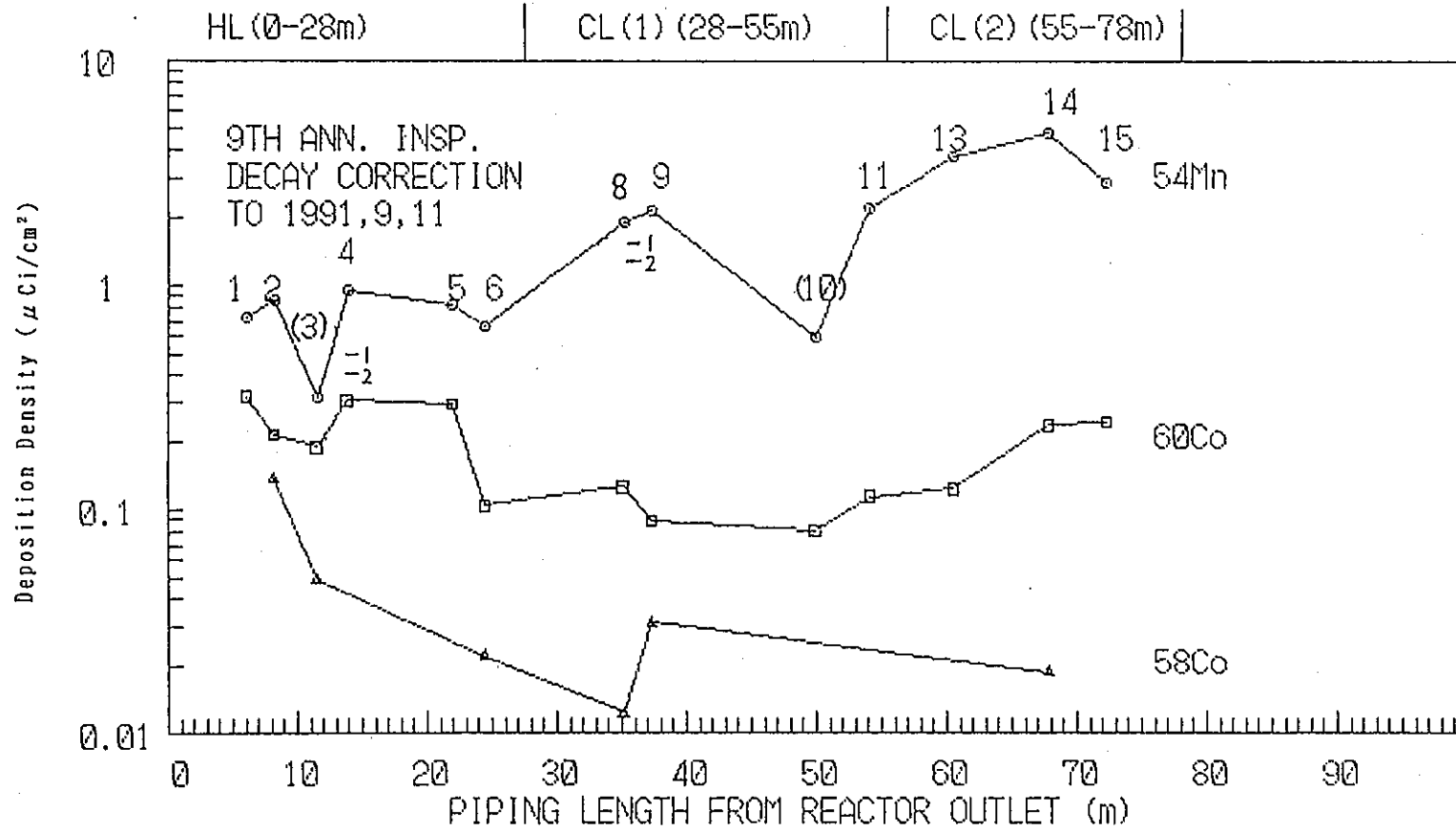
HEDL 8201 170 1a

(b) FFTF RADIATION LEVEL BUILDUP
PREDICTED AND ACTUAL COMPARED



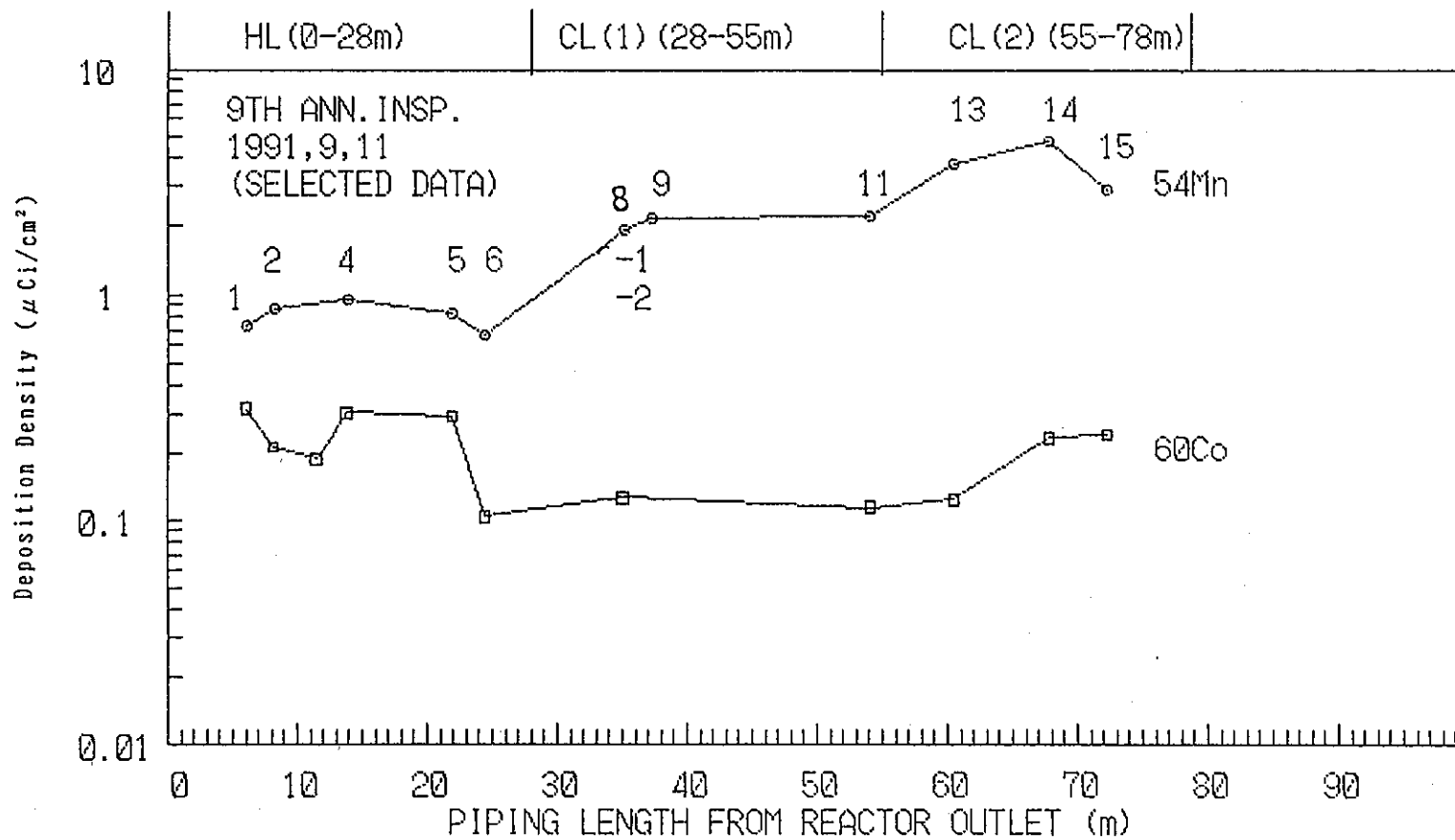
HEDL 8704-007.7

図 4.3-7 FFTF 1次ナトリウム冷却系における線量率ビルドアップの推移



(a) 全測定値を用いた分布図

図 4.4-1 1次ナトリウム冷却系主配管壁CP付着分布(第9回定期検査時)(1/2)



(b) 異常分布値を除いた分布図

図 4.4-1 1次ナトリウム冷却系主配管壁CP付着分布 (第9回定期検査時) (2/2)

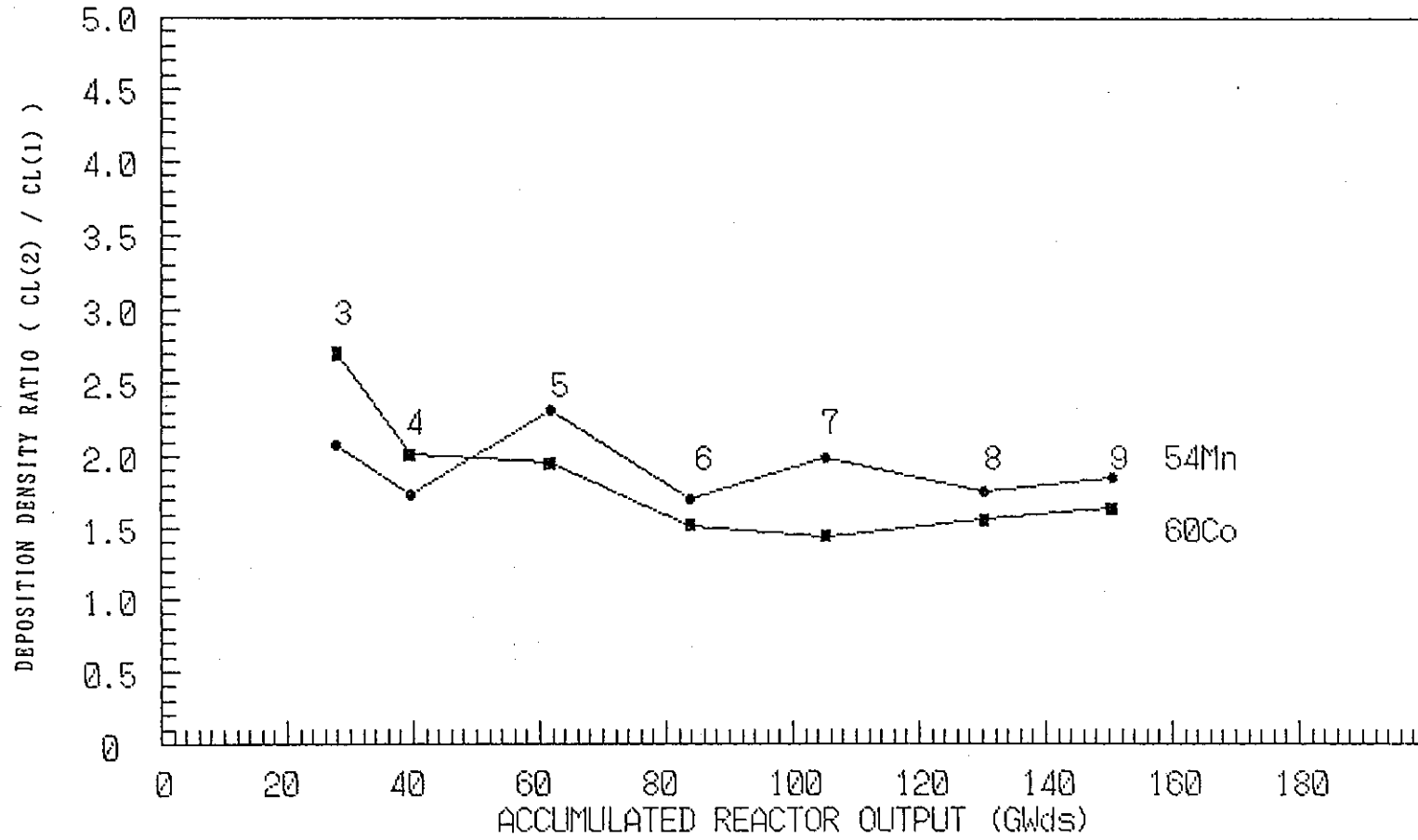
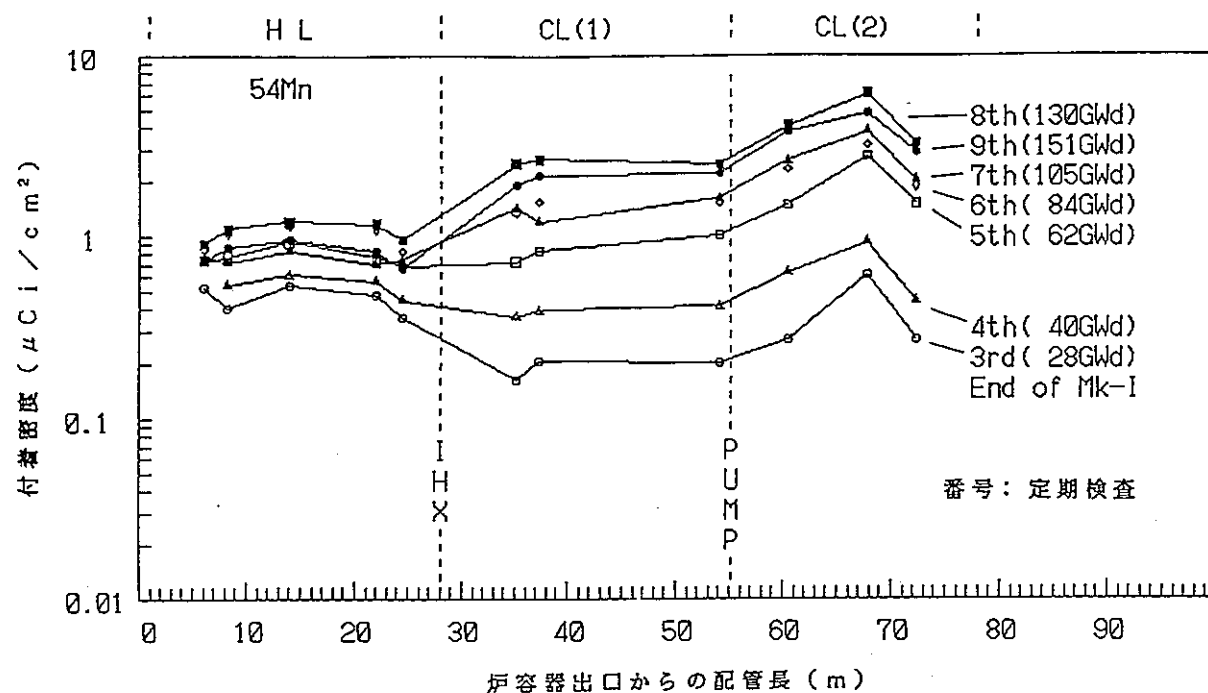
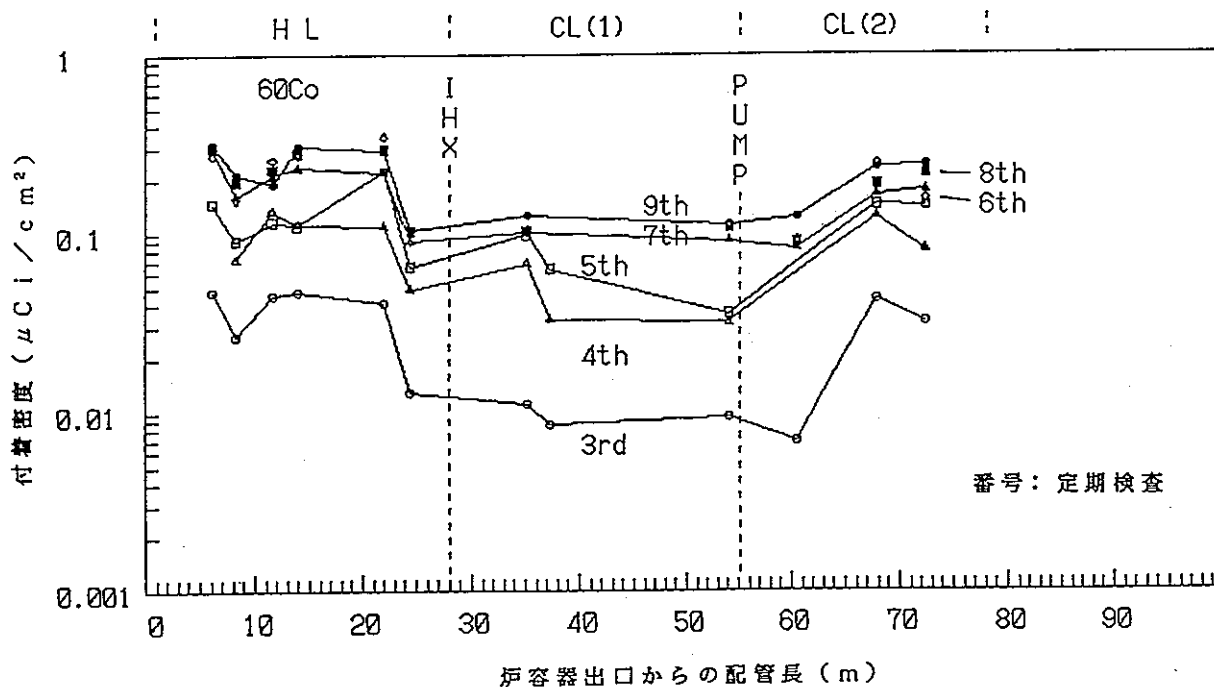


図 4.4-2 CP 付着密度の CL/2 の CL/1 に対する比の推移



(a) ^{54}Mn 付着分布の推移



(b) ^{60}Co 付着分布の推移

図 4.4-3 1次ナトリウム冷却系主配管壁CP付着分布の推移

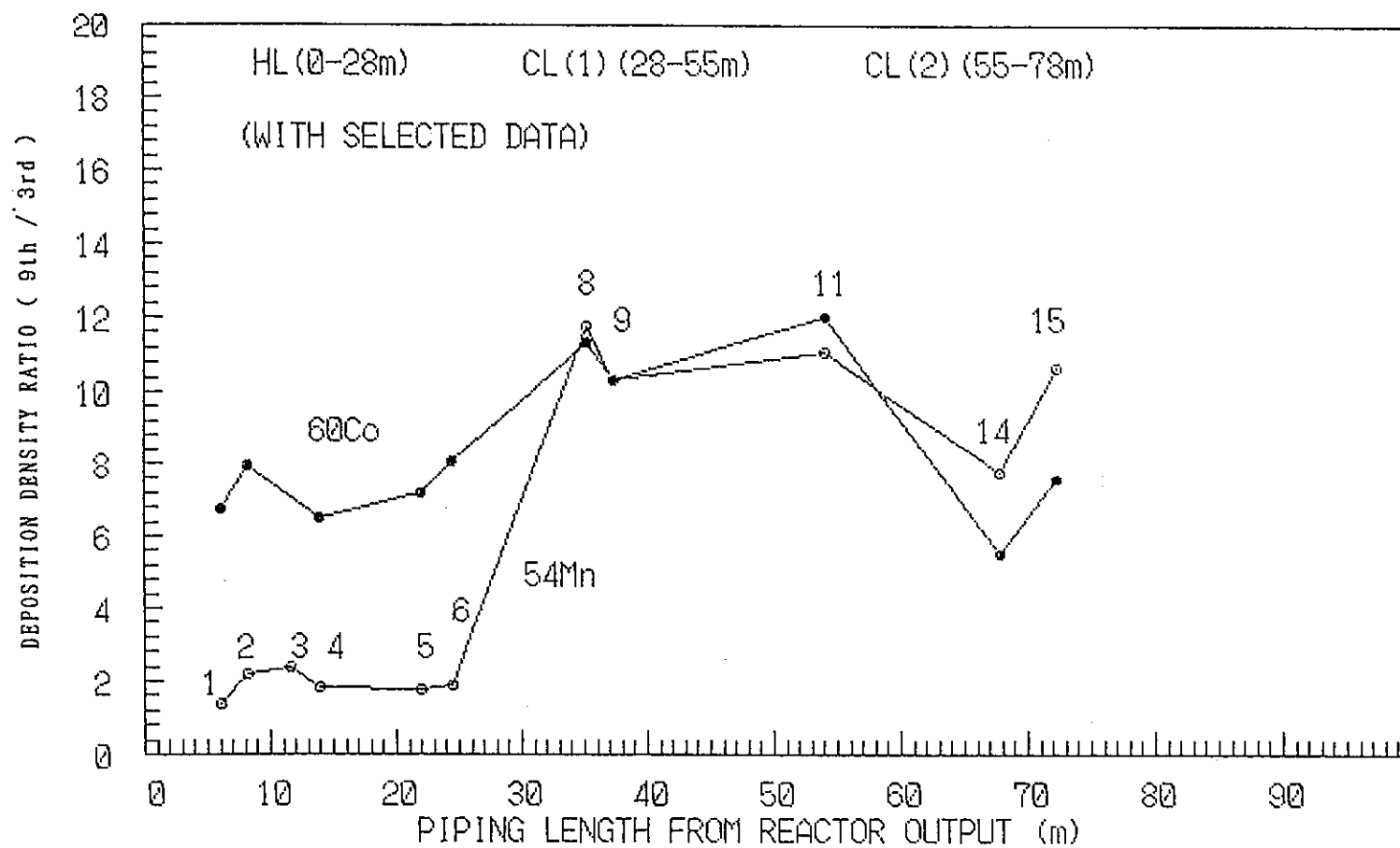


図 4.4-4 CP 付着密度の増加比 (第 9 回 / 第 3 回定期検査時) の比較

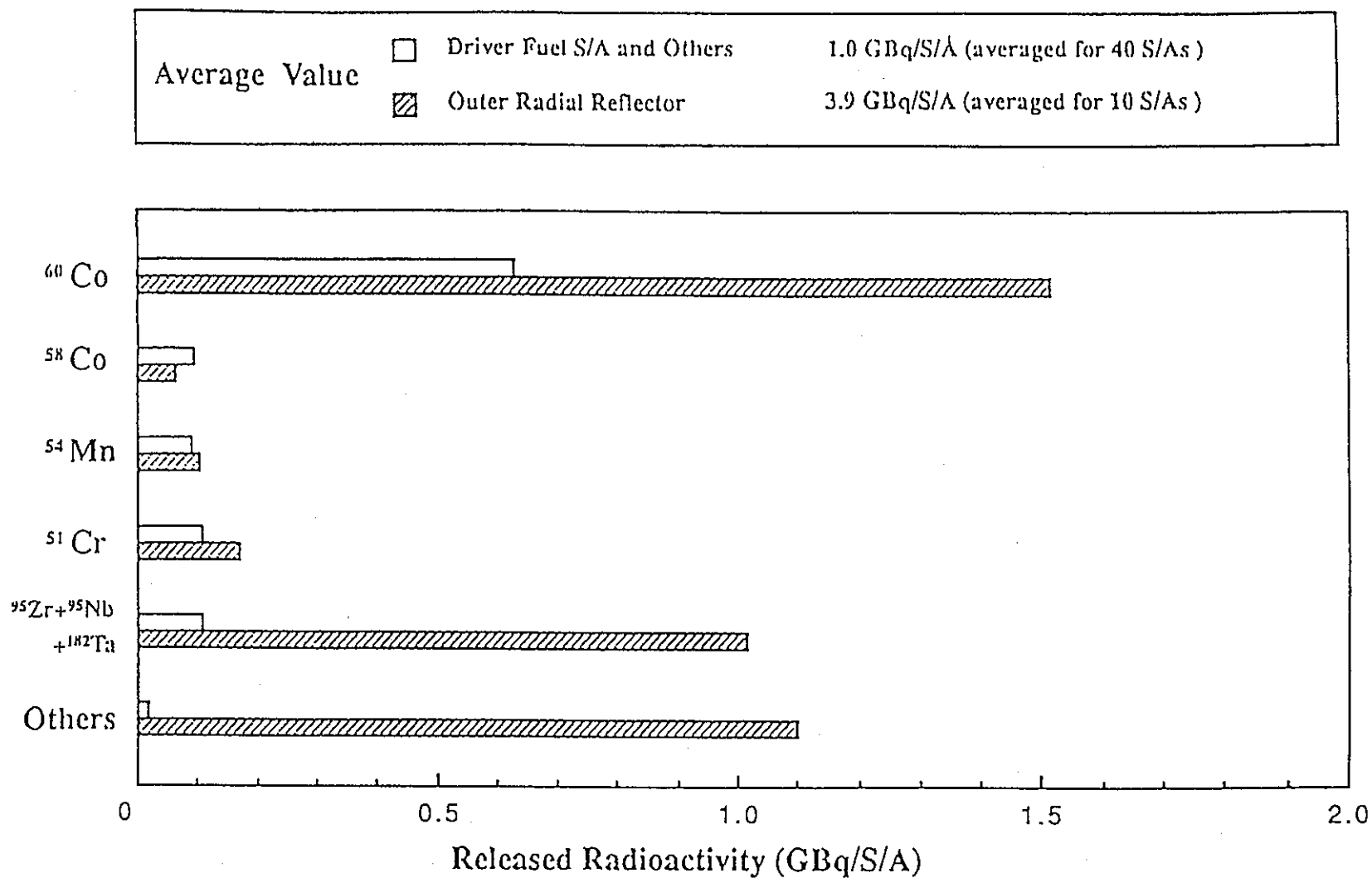


図 4.5-1 炉心構成要素洗浄時CP発生量の推定

5. 高速炉CP挙動解析コードの検証結果と考察

本章では高速炉CP挙動解析コード“PSYCHE”により、第4章で明らかとなった高速炉実プラントにおけるCP挙動の特質を再現するべく、解析モデルパラメータの感度評価と最適化及び解析コードの評価精度について検討する。またこの検討過程で実プラント内のCPインベントリや炉心部におけるCP挙動について推定するとともに、ナトリウム冷却系内のCP挙動機構についても検討を進める。なお今回のコード検証作業に関する計算結果データ集は文献[12]にまとめられている。本報告書ではその計算リスとを付録として表A1に示しておいた。

5.1 解析モデルパラメータの感度評価

5.1.1 調査結果

CP挙動の「溶解・析出モデル」のモデルパラメータの感度調査に当たっては、表5.1-1に示すパラメータセットを基準とする。これは基本的には炉外試験ループを用いたCP挙動試験により設定されたもので、従来からもこれを基準とし、その一部(β' & u_a)について「常陽」CP測定データを用いて最適化をはかると言う方法を取って来た[2]。こゝでの感度調査は管壁中拡散係数 D 、コバルトの化学的分配係数 β' 、界面前進速度 u_a について行い、総括物質移動係数 K 、マンガンの化学的分配係数 β 、界面後退速度 u_c は対象とはしていない。これは次の考えによる。モデルパラメータのうち界面前進速度は物理的描象としては管壁表面の析出物層の成長速度であるが、層の厚みと言う幾何学的側面のみを扱っており、現実のナトリウム溶液からの析出に対する金属学的メカニズムを綿密に取り込んだものではない。従ってこれは仮想的なもので従来からも操作パラメータの位置付けで取り扱って来た。そこで4.4節で論じたような ^{54}Mn のCL部における付着や、 ^{60}Co のHLを含めた冷却系全域における付着の機構について論ずる場合、それ等核種の付着サイト形成を u_a と解釈し適合化をはかることにより、今後更に機構モデルを深めてゆく際の一つの足場を提供することとした。図5.1-1(1)、(2)、(3)～図5.1-3(1)、(2)、(3)は D 、 β' 、 u_a の感度調査結果を、それぞれ第3回と第9回定検時における ^{54}Mn (1)、 ^{60}Co (2)、 ^{58}Co (3)に対して示したものである。比較のためのレファレンスパラメータセットは従来から使用して来たもので、表5.1-1を基に ^{54}Mn に対して D 、 K 、 β 、 u_c 、

u_a or $7/3 u_a$ (領域による)、 ^{60}Co に対して $D, K, 10\beta', u_c, u_a$ or $7/3 u_a$ (領域による)である(付表A1参照)。CP付着分布とインベントリーについて、レファレンス計算結果に対して規格化したものをグラフ化して示している。図中には測定結果についても測定値/計算値(E/C)で示しておいた。これ等の結果から各パラメータ変化の効果の大勢を知ることが出来る。図5.1-4(1), (2), (3) ~ 図5.1-6(1), (2), (3)には、各モデルパラメータ変化に対するCP付着密度あるいはインベントリー計算結果の依存性を示した。図中の値はいずれもレファレンスに対して規格化したもので、それぞれ第3回と第9回定期検査寺における ^{54}Mn (1)、 ^{60}Co (2)、 ^{58}Co (3)に対して示されている。これ等の結果より得られた結論は次のとおりである。

5.1.2 インベントリー計算

(1) マスバランス

解析コードにより直接に計算されるCPインベントリー値は炉心部における放出量(R)、冷却系付着量(DHT)及び炉心部付着量(DC)である。 $R - DC = T$ は炉外冷却系への移行量として出力される。冷却材中に残存するものは極僅かであるから $R = DC + DHT$ となるべきものである。しかし回路内の1循環当たりで見ると、再循環のため必ずしもTとDHTは等しくなるわけではないので、数値計算の精度により、即ち計算時間メッシュを回路内の1循環時間に比べて長く粗くとると、マスバランスは近似的なものとなり一般に $R > DC + DHT$ となり、マスバランスからのずれ量である $MB = R - (DC + DHT)$ が出て来る。特に ^{54}Mn のように冷却系内で再循環性の高いものについては、アンバランスを生じ易く本計算では全溶出量に対して15%程度のずれを生ずるメッシュの切り方となっている。このずれはもちろん計算時間メッシュをより細かくしてゆけばより改善されるものであるが、図5.1-2(1)に示されるように冷却系内の付着を増進するようなパラメータ操作をすると減少する。 ^{60}Co 、 ^{58}Co の場合は再循環性が低いためアンバランスの発生度合いは小さく、本計算でも2%以内に止まりほとんど無視出来る。

(2) ^{54}Mn のインベントリー

溶出及び付着インベントリーともD上昇とともに増加し、 ^{54}Mn の挙動全般に対し強

い影響力を示す（図5. 1-4 (1)）。 u_a の上昇は溶出インベントリーに対してほとんど影響しないが、冷却系付着インベントリーに対しては増加をもたらす（図5. 1-5 (1)）。炉内付着インベントリーに対しては $Mk-I$ 期では増加をもたらす局面もあるが、 $Mk-II$ 期ではむしろ減少となる。また u_a の上昇はマスバランスを改善する方向に働く。厳密なマスバランス成立下でも上述の傾向は成立すると考えられ、 ^{54}Mn 溶出インベントリーに対する支配パラメータは D であり、 u_a は小さな影響を与えるだけであろう。 u_a はむしろ1次系内の付着分布に対する支配パラメータであり、従って冷却系内と炉内の付着インベントリーの割り振りも支配している。このため実機で観察される ^{54}Mn の冷却系 CL 領域における付着の加速現象は、 ^{54}Mn の溶出インベントリー増加というよりも、炉内と冷却系 HL 付着インベントリー割合の減少により補償されているものと考えられる。

(3) ^{60}Co のインベントリー

^{60}Co の溶出インベントリーを支配しているのは ^{54}Mn の場合が D であるのに対して β' であり、その減少に沿って、即ち界面反応による溶け出しの傾向が強まるとともに増大し、それに従って付着インベントリーもまた増加する（図5. 1-6 (1)）。それに比べると溶出インベントリーに対する D 及び u_a の影響はそれほど大きくはなく、今回調査したパラメータ走査範囲内ではそれぞれレファレンスに対して10%及び数%程度の変動である（図5. 1-4 (2)及び図5. 1-5 (2)）。付着インベントリーに対する影響は D の場合炉内及び冷却系付着を比べると前者に対して優位に現れ、それぞれ3%と数%程度となり、 u_a の場合は冷却系付着に対する影響が若干勝り、それぞれ3%と7%程度であった。 u_a の溶出インベントリーに対する影響が小さいのは ^{54}Mn の場合と共通であるが、 D の影響もまた小さいのは ^{60}Co は ^{54}Mn と異なり、その溶出機構は管壁内部からの拡散支配ではなく腐食領域での肉減り（界面後退）に伴うもので、鉄の放出とも密接に関連した表面放出であるということが本モデルからの結論であることを意味している。

5. 1. 3 付着分布

(1) ^{54}Mn の付着分布

ナトリウム冷却系における ^{54}Mn の付着分布に対して、 D 、 u_a とも大きな影響を与

える（図 5. 1-1 (1)，図 5. 1-2 (1)，図 5. 1-4 (1)，図 5. 1-5 (1)）。D 上昇に伴い溶出量、管壁付着係数とも増大するため付着レベルは冷却系全域で上昇する。上昇の度合いは高温側ほど大きく分布は HL、IHX 上流側に偏る。また等温域である CL 領域でも僅かに上流側に高い。このような傾向はプラントの初期ほど大きくなる。u_d の場合はその上昇とともに CL、ポンプ、IHX 下流側等低温側ほど付着レベルは上昇するが、高温側では減少する。これは本モデルによれば u_d の溶出インベントリーに対する効果は小さく、⁵⁴Mn の場合再循環性があるので、分布が低温側に偏るとその分高温側では減少するためである。このようにインベントリー支配性の弱いパラメータの場合は、HL と CL での分布あるいは又炉心部と冷却系付着インベントリーの間に相補的な関係が成立する。

(2) ⁶⁰Co の付着分布

ナトリウム冷却系における ⁶⁰Co の付着分布に対する β' の影響は冷却系全域にわたって大きく、その減少とともに溶出量の増大のため付着レベルは上昇する（図 5. 1-3 (1)，図 5. 1-6 (1)）。上昇度合いに見られる特徴の一つは配管部に比べ特異的に IHX で大きく、逆止弁で小さいことである。これ等の領域は前後の配管部に比べると温度よりも流速に特徴のある領域である。即ち、IHX 内は低流速で前後配管部の約 1/5、逆止弁では高流速で前後配管部の約 3 倍である。ところで β' は温度のみの関数で流速の影響はこれ自体からは入り得ないが、付着係数は K/β' の関数である [2] から、 β' の影響はこれを通じて評価されねばならない。K は流速依存のモデルパラメータであるから、全領域で同率の β' の変動であっても流速の異なる領域では K/β' の変動率は異なることになり、上述のような特異性が現れる。このように本モデルにおいて β' の減少は ⁶⁰Co の炉心部からの溶出量を増大させ、冷却系の低流速部では付着を促進させ高流速部では減少させる効果を持つ。これは緩やかなナトリウムの流れを含む機器内や炉心部の反射体で、⁶⁰Co のビルドアップが比較的に高くなるという実機プラントで観察された現象と軌を一にしており、こうした現象に対するモデル化を進める上での手掛かりとして期待出来る。また以上述べて来た β' の効果はプラント運転時間経過とともに、かなり増進していくことにも注目しておかなければならない。 β' の場合とは異なり D の付着分布に対する影響は HL 部である程度見られるとしても、CL 部では僅かであり全般的には支配パラメータとは言えない。D 上昇で HL 部付着はある程度の上昇傾

向を示し、CL部では若干の減少傾向を示す。これはDの溶出インベントリーに対する効果が小さいために現れる相補的關係である。 u_a の上昇は逆止弁、ポンプ、CL配管部付着分布に対してある程度の効果を示すが、HL配管部とIHX内に対しては僅かであり、Dと同様にHLとその他の領域の關係は相補的である。さてこの場合も β' 同様の若干の流速のからみが見られ、この場合は高流速側で影響が強く現れ逆止弁において最大となる。「常陽」のCL/1とCL/2でCPの管壁付着に対する流速効果が観察され、それは境膜拡散モデルによる流速効果の指数($Re^{0.83}$)を若干上回っていたが(^{60}Co : $Re^{1.1}$)、これは u_a の領域による上昇として再現する際 ^{60}Co の場合は高流速側での感度が高いので容易であると考えられる。ところで ^{54}Mn の場合は観察された流速効果指数は ^{60}Co よりは高い($Re^{1.6}$)にもかかわらず、上記のような高流速場での u_a の感度上昇が見られないので、 ^{54}Mn の場合は u_a 適合だけではなくもっと別の要因、即ちK自体あるいは流速場に基づく感度増幅のある既述の K/β (即ち β の増加)としての効果等による改善も考慮するべきかもしれない。

5.2 「常陽」CP挙動評価結果による解析コードの検証

本節では前節の解析モデルパラメータ感度調査結果に基づき、第4章で述べた実機CP挙動に見られる諸特徴を再現するべく、「常陽」における過去7回のCP実測データに基づき解析コードのモデルパラメータ最適化と評価精度について検討する。

(1) モデルパラメータの最適化

これまでのパラメータの最適化においては、表5.1-1の基準セットのうち β' を $10\beta'$ として用い、 u_a を領域的に適合化する他は動かして来なかった。今回の見直しでは範囲を拡大し、パラメータの最適化は以下の指針に従って行うこととした。

- ① DのMn, Coによる相違を許容する。
- ② Dの時期(Mk-IとII期)による変動を許容する。
- ③ u_a の時期による変動を許容し、むしろ積極的意義を与える。
- ④ u_a のMn, Coによる相違を許容するが、必要最小限に止めるべきである。
- ⑤ β' の時期による変動を許容するが、出来るだけ現状を維持する。

この方針の下で最適化はプラント初期のMk-I期と運転経過後のMk-II期に分けて行う。「もんじゅ」性能試験事前評価に適用する場合、前者の結果を適用すべきものと考え

えられる。

まず⁵⁴Mnの場合について述べる。 図5. 1-1 (1)と図5. 1-2 (1)から、Mk-I期ではDを増加し u_d を減少させることにより、またMk-II期ではDを減少させ u_d を増加させれば適合性が改善されることが示唆される。 この方針の下で幾つかの計算を行い最適値を探索し下表に示す結果を得た。 なお本計算に当たりプラントモデルの一部改良として、後節に述べる制御棒及び制御棒上部駆動機構上部案内管(CRD-UGT)モデルを組み込んだ。

⁵⁴Mnの最適モデルパラメータ ('91) [12]

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_d)	0.8 u_d^{*1} 0.8 × 1.8 u_d^{*2}	2.5 u_d^{*1} 2.5 × 1.8 u_d^{*2}
HL 仮想界面移動速度	肉減り u_c	肉減り u_c

*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は下部ブランケット、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。

図5. 2-1 (a)にこれを用いて計算したCP付着分布と測定値の比較、及びCPインベントリ-計算結果を各定期検査ごとに示した。 Mk-I期及びMk-II後期における計算値と測定値の一致度は満足のゆくものである。 Mk-II初期ほどCLにおいて測定値が計算値を下回るのは、CLにおける u_d はMk-I期の値からMk-II期の値に向けて徐々に増加すべきことを示している。 これは4.3節で述べた管壁付着速度の時間経過に伴う増加現象に符合したパラメータの動きと言える。

ところで⁶⁰Coのモデルパラメータの最適化の場合は事情がもう少し込み入ったものとなり、これはHLにおける付着実測値の高いレベルを如何に再現するかに端を発している。 Mk-Iの場合は図5. 1-1 (2)、図5. 1-2 (2)あるいは図5. 1-4 (2)、図5. 1-5 (2)により、最適化が得られる1つの方向はD増加、 u_d 減少と考えられる。 Mk-IIの場合は図5. 1-3 (1)あるいは図5. 1-6 (1)から、

一見して β' 減少が最適化の方向のように思われるが、それでも実測結果におけるHL付着の優勢を再現することは難しい。そこで指針の⑤に従いMk-I期の $10\beta'$ を維持しながら解決をはかるためには、HLでの界面移動速度をコバルトについては u_d から u_a に変更し、更に炉心材料中の不純物コバルト組成についても検討することとした。このようにして得られた最適化の結果を下表に示す。HL界面移動速度を u_a とすることは、4.4節に述べた ^{60}Co の付着機構は全域的に管壁表面での合金粒子の形成であると言う主張とも合致している。図5.2-1(b)にこれを用いて計算したCP付着分布

^{60}Co の最適モデルパラメータ ('91) [12]

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 (β')	$10\beta'$	$10\beta'$
CL仮想界面前進速度 (u_d)	$0.3u_d^{*1}$ $0.3 \times 1.8u_d^{*2}$	$1.8u_d^{*1}$ $1.8 \times 1.8u_d^{*2}$
HL仮想界面移動速度	肉減り u_c	析出 $25u_d$
不純物コバルト組成	100ppm	300ppm

*1, *2は ^{54}Mn に同じ。

と測定値の比較及びCPインベントリー計算結果を、各定期検査ごとに示した。第4回定期検査時の結果以外は、測定値と計算値はMk-I、Mk-IIのいずれにおいても満足のゆく一致を示す。第4回定期検査時の計算が過少評価なのは、0~1サイクル間の高酸素濃度運転を充分考慮していないためと考えられる。HLでの仮想界面移動速度が $25u_d$ とCLに比べてかなり大きいことは、ナトリウム環境下において管壁表面に形成されるコバルトフェライト粒子は、高温安定性を有しそこでの形成が著しく促進されることを強く示唆しているものと考えられる。なお、このように今回の最適化では ^{60}Co のHL付着機構に対してプラント運転初期では拡散機構、時間経過後は表面粒子形成機構と考えたが、全期間を通じて表面粒子形成機構として最適化するのが現実を反映した最も妥当な方法であり、HL及びCLでの u_d の適合と、冷却材中酸素濃度と炉心材料中不純物コバルトレベルの綿密な考慮がより正当と言えるかもしれない。その検討は「もんじゅ」性能試験等における1つの課題である。

(2) CP管壁付着分布の評価精度 (C/E)

表5.2-1と図5.2-2(a), (b)にHL, CL/1, CL/2におけるCP付着密度の測定値と計算値の比較を示した。図5.2-3(a), (b)は ^{54}Mn と ^{60}Co に対するC/Eを各定期検査毎にプロットしたものである。第5回定期検査時点の ^{54}Mn のCL/1と、第4回定期検査時点の ^{60}Co に対するC/Eを除けば、ファクター2以内に収まっており、第7回定期検査時点から第9回定期検査時点までの比較的最近の3回分のC/Eの平均値は、 ^{54}Mn 、 ^{60}Co に対してC/E=1.2となる。これ等の結果は ^{54}Mn のCLにおける u_a の時間変動(運転時間経過とともに増加)と、Mk-II第0~1サイクル運転期間中(第4回定期検査時点)における冷却材中酸素濃度上昇を正確に取り込めば更に改善されるだろう。

(3) 線量率評価

PSYCHE91により計算したCP付着分布を用いて計算した配管・機器まわりの線量率分布の計算結果を、付録として表A2-1~21に文献[12]より再録した。図5.2-4には第9回定期検査時点(原子炉積算出力150.6GWdで評価日時は測定開始日の1991.12.2である)における、1次冷却系Aループ主配管まわりの測定値と計算値を比較して示した。測定された線量率分布の基本的なパターンは計算によりよく再現されており、HL, CL/1, CL/2の各領域におけるC/Eの平均値はそれぞれ1.5, 1.7, 1.5である。計算と測定の双方ともIHX入口あるいは出口、ポンプ出口及び同配管下部のエルボ部(HL配管に近接)で強いピークを示す。前者は機器本体からの影響であり、後者は近傍配管とエルボ配管形状効果である。それほど強くないがその他にもいくつかのピークが存在し、これ等は大体エルボ部に当たり線源物体の空間充填密度を高くするエルボ部の幾何学的形状効果である。また測定値は原子炉出口と入口で極めて強い立ち上がりを示すが、これは原子炉内部からのガンマ線のストリーミングが存在するためである。図5.2-5(a), (b), (c)は1次冷却系各領域の主配管まわりの平均線量率のビルドアップの測定値と計算値の比較結果である。

計算値は測定値を若干上回りながら良く似たパターンで推移しており、これ等は ^{54}Mn のビルドアップの推移に対応したパターンである。このC/Eの推移は図5.2-6に示すとおりで、全期間にわたり約2以内で収まっており平均すると1.6である。

さて次に機器線量率分布について述べる。IHXにおける測定値はいずれも冷却材

出口の下部側にレベルが高くなっている。一方計算値の分布は中央部で若干高くなり膨らむが概ね平坦であり、レベルは出口側で測定値と重なる傾向を示す。IHX上、中、下部における周方向の平均線量率の推移を、測定値と計算値で比較して図5.2-7に示す。最も高い線量率レベルを示す下部での一致度はよい。全期間を通じてのC/Eの平均値は上、中、下部でそれぞれ2.8, 2.6, 1.2である。IHX内のCP付着分布は5領域に分けて計算されているが、上部入口側はHLの継続で u_1 乃至より小さな u_2 で適合化をはかるべきものと考えられる。主ポンプではIHXの場合と様相が異なる。ポンプの評価位置は下部が冷却材出口ノズル、中央部はオーバーフローノズル、上部が熱遮蔽板のある液面近傍である。測定値は初期には比較的平坦でむしろ下部が高めであったが、第6回定期検査時以降は上、中央部で高くなり中央部が最大となった。下部における計算値と測定値は比較的合致しているが、上、中部では第6回定期検査時以降は測定値が計算値を凌駕した。図5.2-8(a), (b), (c)に線量率の測定値と計算値の推移を比較して示す。第6回定期検査時以降の平均線量率のC/Eは上、中、下部でそれぞれ0.7, 0.7, 1.1である。ポンプ中央部と上部はベアリングハウジングにより冷却材主流と隔てられ、ナトリウム静圧軸受け分の流れ込みがあるだけで流れは緩やかである。従って主配管系統で成立している「溶解・析出モデル」のまゝではCP移行はむしろ少ないはずである。にもかかわらず測定値がMk-II第8~12サイクル間(第5回と第6回定期検査間)の運転で急上昇したのは何故か? この運転期は既に繰り返し述べて来たように、旧コールドトラップの温度上昇のため冷却材中酸素濃度が高くなり、主配管部でも ^{60}Co の管壁付着速度がかなり高まった時期と一致する。更に第8回から第9回定期検査にかけて計算値の方は低下するが、測定値の方はほとんど変わらないかむしろ上昇傾向を示し、この変動パターンは ^{54}Mn ではなく ^{60}Co のそれに近い。従ってこの測定レベルの上昇は ^{60}Co 付着の増加による可能性が高い。しかも流れは緩やかであるので管壁での ^{60}Co 含有粒子の形成と言うより、液面近傍での温度降下のため冷却材中に形成されたものや主配管領域から剝離して運ばれて来たものが、内部構造物表面に付着したり液面に浮遊したりしている可能性も考えられるのである。同じような ^{60}Co のホットスポット形成はコールドトラップ下部管板部、炉心部反射体領域でも観察されている。この現象を一般化出来るとすればコバルトフェライト粒子は冷却材により運ばれている間に、流れの緩やかな領域に集積し易いと言う描象を描けるだろう。以上述べて来た様にIHXでのCP付着は主配管系統からの「溶解・析出モデル」の枠内

で概ね再現されるだろうが、ポンプの上部については ^{60}Co の粒子挙動に対応したモデルパラメータ乃至モデル自体の改良を考慮すべきものと考えられる。

(4) 挙動推定と予測評価

本項ではCP挙動に関する幾つかの推定と予測について述べる。まず、第10回定期検査時に対する"PSYCHE"コードを用いた予測結果について述べるが、4.3節で行った実測結果に基づく予測結果を比較すると次表のようになる。"PSYCHE"の推定の方が若干低めで、その差は ^{60}Co の場合は5%以内であるが、 ^{54}Mn の場合は最大約20%程度となる。この差は主として u_a の時間的増加の取り込みの程度に起因しており、PSYCHE91の結果はその点過少評価の傾向を示しているものと考えられる。4.3節の評価結果を完全に取り込んで u_a を定式化すればこの問題は解決されるだろう。

第10回定期検査時点（原子炉運転停止直後）の予測結果

($\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$)

方 法		実測からの予測	PSYCHE91
^{54}Mn	HL	0.850	0.837
	CL/1	2.18	1.750
	CL/2	4.00	3.090
^{60}Co	HL	0.223	0.219
	CL/1	0.126	0.121
	CL/2	0.209	0.211

さて次に1次系内におけるCPインベントリー分布の推定について述べる。図5.2-9に第9回定期検査時点の推定結果を示す。但し、上述したように ^{60}Co の場合は、炉心部反射体やポンプ、コールドトラップ下部管板部におけるホットスポット形成の取り込みが充分に行われていないので、その点過少評価になっていると考えられるので注意しておかなければならない。まず、全発生量であるが ^{54}Mn 37.4 Ci、 ^{60}Co 2.29 Ci、図中には示されていないが ^{58}Co 2.27 Ciで、比率で示すと1 : 0.06 : 0.05であり ^{54}Mn は ^{60}Co の約20倍である。 ^{54}Mn 、 ^{60}Co 、 ^{58}Co の炉心部

におけるビルドアップ割合はそれぞれの総量の27%、57%、83%で、 ^{60}Co 、 ^{58}Co の過半のものが炉心部に蓄積し、 ^{58}Co が特に大きい。これは ^{58}Co は ^{60}Co と同位体であり化学的性質が同一であるにもかかわらず、原子炉外の冷却系に移行し難いと言う実測結果を再現する方向で、一種のシステム効果と言うべきものである。冷却系統配管・機器内でIHXが最大の蓄積場所で、 ^{54}Mn 、 ^{60}Co に対してそれぞれ35%、24%となる。配管系においてはそれぞれ12%と24%である。 ^{54}Mn の場合は冷却系回路内でのある程度の再循環性のため、総量のほぼ10%のものがコールドトラップで捕獲されると言う推定結果になる。付着形態は、 ^{54}Mn の場合は炉心部と冷却系HL配管で管壁中拡散、IHX、CL等その他の場所では管壁表面における析出と言う推定である。 ^{60}Co の場合は炉心部、冷却系とも表面析出、 ^{58}Co の場合は炉心部が拡散、冷却系が表面析出が主体と言う推定である。

5.3 「常陽」CP評価結果による炉心部CP挙動評価手法の検討

前節で述べたように炉心部はCPの発生領域であるのみならず1次系内の有力な付着領域でもあり、高速炉におけるCP挙動解明上重要である。更に「常陽」における運転経験から燃料洗浄時に発生するCPはプラント要員に対する重要な被ばく源となっており（第9回定期検査時の実績では燃料洗浄設備の運転・保守に係わる被ばく量は約150 Man・mSvで、全体の40%にもなっている）、今後Mk-III炉心移行作業時におけるインパクトは大きなものとなると考えられる。従ってこゝでのCP挙動評価手法を整備し、被ばく低減対策の計画的且つ合理的推進をはかることは重要な意味を持っている。これに関連して「常陽」の運転経験から得られている実測データとして幾つかのものがあるが、こゝでは第9回定期検査時に行われた制御棒上部案内管(UGT)の測定、洗浄結果と、3.2節に述べた外側反射体を含む燃料洗浄結果を基に、炉内CP付着挙動について検討する。

5.3.1 制御棒上部案内管壁へのCP付着の推定

(1) 評価手法

第9回定期検査時に行われた制御棒移設作業に伴い取り出された、制御棒上部案内管(UGT)管壁への放射性腐食生成物(CP)付着量の評価をPSYCHE"コードを用いて実施した [22]。炉心部におけるCP付着は、上述のように燃料あるいは反射体等

の炉心集合体洗浄時のCP廃液発生に関連して最近特に注目されている現象であると、もに、既に幾つかの所で触れて来たがナトリウム冷却系内におけるCPの移行に関しする一つの特徴的な現象に関連して興味を持たれる。即ち、 ^{58}Co は ^{60}Co と同一化学種で、しかも炉心部での発生量も同程度でありながら、炉容器外の冷却系ループへは極僅かしか移行しないと言う現象である。この原因として、速中性子反応が生成反応である ^{58}Co は炉心中心部が発生領域となるため、熱中性子あるいは熱外中性子捕獲反応の寄与が重要な ^{60}Co に比べ、発生領域から下流側に相当する炉心上部に向けてより広い付着領域面積を有することが考えられる。そこで、CP挙動に対するシステム効果の評価の観点からも炉心上部機構等におけるCPの付着挙動に興味を持たれ、UGT管壁付着CPの調査はこの現象評価の恰好の機会を提供してくれる。

評価は"PSYCHE"コードを用いたUGT管壁CP付着量の推定計算と測定結果との比較により実施する。測定結果のうちUGT線量率とその長さ方向に沿った分布は、構造材料の放射化量によって支配されCP付着の寄与は殆ど無視出来ることが既に判明しているので、評価手法の検証には洗浄廃液中のCPの測定結果を用いた。評価のためプラントモデルとして従来考慮していなかった制御棒-制御棒駆動機構(CR-CRD)とUGTを解析コードに組み込んだ。UGTのCP評価領域への組み込みに当たっては、UGTのNa接液部のうちナトリウム冷却材流動領域のみを考慮した。6体設置されたUGT下部の制御棒及び燃料集合体(第2, 3, 4, 5列)から吐出された冷却材は、全量(制御棒)あるいはその一部(燃料集合体)がUGT管内を上昇し、下端より約1.7mの位置に開けられた流出窓より炉心上部構造(UCS)内に流出する。更に、関連燃料集合体からの冷却材のその他のものは、整流格子を通過し熱遮蔽板に衝突するまでの間、UGT外側管壁を洗う。その距離は約30cmである。今回の計算モデルではこの流動Naとの接触部でのみCPの質量移行(溶出あるいは付着)があるとし、流出窓より上部、液面までのスタグナント(対流)域でのCP挙動は無視した。今回の計算に用いたUGT部の形状、冷却材温度、流動のモデルを図5.3-1に示す。これは関与する冷却材流れに関して第3列の制御棒、燃料集合体からの冷却材が、全量UGT管内を上昇し他は関与しないものとする簡略モデルである。これはこのような簡易化によっても、UGT管内の冷却材温度、流量は概ね同等となることに根拠を置いている。表5.3-1には簡易モデルにおけるUGT領域パラメータを示す。また、UGTの炉内滞在スケジュールは実際のものがそうであったように、第21~23"サイクル終了時までとした。

計算領域における中性子束スペクトルには、DOT 3.5 による遮蔽計算用の 21 群のものを、UGT の接液面積を重率として平均化したものを適用した。核反応断面積は従来からのものを用いた。構造材料の初期組成は制御棒については、SUS 316 燃料集合体ラッパ管並とし不純物コバルトは 0.01% とした。また、CRD-UGT については、SUS 316 反射体ラッパ管なみとし、不純物コバルトは 0.17% とした（コバルトに関し原子炉材料として特別の規制を受けていない通常の JIS 規格材料）。次に CP の質量移行解析モデルについて述べる。モデルパラメータには前節のものを適用した。計算モデルにおいて UGT 領域は CP の溶出領域である（溶出解析式の適用）が、ホットレグ（HL）配管壁と同等な CP 付着があり得る領域として取り扱う。即ち、 ^{54}Mn に対しては質量移行は、ナトリウム腐食による後退界面（Na/管壁）を介した管壁中の拡散機構により進み、一方 ^{60}Co 、 ^{58}Co の質量移行は管壁面上での合金粒子形成と管壁中の拡散機構によるとする。これは次の質量移行方程式で表される。

管壁表面マスフラックス

$$^{54}\text{Mn} \text{ に対して} \quad J = D \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=0} + u_c C_i \quad (5.3-1)$$

$$^{60}\text{Co}、^{58}\text{Co} \text{ に対して} \quad J = D \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=0} - u_d C_i \quad (5.3-2)$$

但し、J マスフラックス (> 0 で溶出、< 0 で付着)

- D 管壁中拡散係数
- C 管壁中濃度
- C_i 管壁表面濃度
- u_c 肉減り（界面後退）速度
- u_d 析出（界面前進）速度
- x 管壁深さ方向距離

管壁中拡散方程式

$$^{54}\text{Mn} \text{ に対して} \quad D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + u_c \frac{\partial C}{\partial x} - \lambda C + R = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (5.3-3)$$

$$^{60}\text{Co}、^{58}\text{Co} \text{ に対して} \quad D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - u_d \frac{\partial C}{\partial x} - \lambda C + R = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (5.3-4)$$

但し、 λ 崩壊定数

^{58}Co (大きな中性子捕獲反応断面積を有する) に対しては、

$$\lambda \rightarrow \lambda + \int \sigma \phi dE_n$$

R 生成反応率

t 時間

解析モデルパラメータうち UGT 部での ^{60}Co 、 ^{58}Co に対する析出速度 u_d には、HL 配管壁での CP 付着測定値との最適合値を適用する。評価に用いられる計算結果は (5.3-1~5.3-2) 式を基に、次式を積分して得られる ^{54}Mn 、 ^{60}Co 、 ^{58}Co に対する質移行放射能 A と、 ^{60}Co 、 ^{58}Co に対する析出物放射能 B である。

$$\frac{dA}{dt} = SJ - \lambda A \quad (5.3-5)$$

$$\frac{dB}{dt} = u_d C_i - \lambda B \quad (5.3-6)$$

但し、S 表面積

質量移行放射能 (A) は、管壁と外界、即ち Na 中とのやりとりの分で、一般的には溶出量あるいは付着量と表現されるものである。その機構は、溶出の場合は管壁中の拡散と肉減りであり、付着の場合は管壁中の拡散と管壁表面上への析出である。付着の場合で炉外であれば、管壁における全ての放射能の増減はこれに含まれるが、炉内の場合は更に放射化の過程があり、既に存在する構造物のみならず質量移行により管壁に付加される微量物質も放射化されるのでそうはならない。従って、炉内の管壁での CP 付着に関連した放射能増加を論ずる場合は、管壁表面析出物の炉内滞在期間中における放射化を含めなければならない。析出物放射能 (B) は (5.3-6)、(5.3-4) 式からわかるように、C を通じてこの放射化分を含めて計算される。

(2) 評価結果

計算結果を 表 5.3-2 に示す。表には質量移行放射能 (A)、析出物放射能 (B)、管壁母材放射化濃度の各計算値、及び比較のため洗浄廃液中の CP 測定結果を示す。析出物放射能には質量移行分に加え、既に述べたように炉内滞在時における放射化分も含まれる。 ^{60}Co の場合の計算モデルにおいては、管壁における質量移行は拡散と表面析出であるが、(5.3-2) 式第 1 項の拡散項は第 2 項のバルク付着項に比して小さく、J は負であり全体としての質量移行は溶出ではなく付着である。しかも、質量移行放射能は析出

物放射能より少ない。これは ^{60}Co はUGT領域で生成反応率が比較的大きく、母材も含め管壁中の放射化濃度が高いので拡散による付着が進み難く、付着の主要機構は表面析出（分散的に析出したものを平均化すると 1μ 程度の層厚になると言う評価モデルである）となり、しかも析出物の炉内での放射化があるためである。図5.3-2(a)に ^{60}Co の管壁中の濃度プロフィールを示したが、析出物の最表面では僅かに溶け出しが起こっている評価結果となる。更に内部では析出物から母材中へ僅かに拡散が起こっている。計算値と比較される洗浄廃液中の ^{60}Co の値は付着として起こった質量移行放射能ではなく析出物放射能の値に近く、これと比べると $C/E=0.55$ である。これは洗浄廃液中に現れる放射能は、母材中からの溶け出しと言うよりは表面付着物の脱離によると言う推定に沿った結果である。一方、 ^{58}Co の場合はUGT領域では管壁中での生成反応率が小さく濃度が低くなるため母材も含めた管壁中の拡散が起こり易く、(5.3-2)式の拡散項はマイナスで大きくJは負で質量移行は付着となり、母材管壁中の拡散も含めた質量移行放射能は、表面の極浅い領域の析出物放射能より大きな値となる。図5.3-2(b)に ^{58}Co の拡散プロフィールを示す。洗浄廃液実測値と析出物放射能を比較すると、計算値が実測値を上回り $C/E=5.8$ となる。 ^{54}Mn の場合はUGT管壁中での生成反応率は小さく濃度が低くなるため、母材管壁中に拡散し(5.3-1)式の第1項の拡散項はマイナスで大きい。第2項は肉減り放出で第1項を相殺するが、それは小さい。従って、Jは負であり ^{54}Mn のUGTにおける質量移行は付着過程となる。また、 ^{54}Mn の質量移行モデルは拡散機構のみとしているから、表面付着放射能は無視され管壁中への拡散による質量移行放射能（付着）のみが評価され、その値は洗浄廃液実測値を大きく上回っている。UGT管壁付着放射能の評価結果は以上の通りであるが、廃液中の主要放射能である ^{60}Co （廃液中CPに占める割合92%）の測定値と計算値が比較的近くなる結果が得られたことから、より詳細な検討の余地を残すもの、PSYCHE91によるUGT部でのCP挙動評価手法は、概ね妥当な結果を与えることが出来るものと考えられる。しかしながらUGTの付着割合を評価して見ると、20~23'' サイクル間のCP溶出量の計算結果は ^{54}Mn 、 ^{60}Co 、 ^{58}Co に対してそれぞれ24.4Ci, 0.38Ci, 2.01Ciとなるので、前記結果よりUGTへ付着するものゝ割合は0.4%, 0.6%, 0.1%である。従って、この領域のCP移行に与える影響は当初見込に反して微々たるものに過ぎなかった。

5. 3. 2 燃料集合体及び外側反射体CP付着挙動

PSYCHEコードにおける炉心部のCP挙動計算は溶出解析式を適用し行われるが、肉減り下での計算だけでなく表面析出下での計算も行えるように作成されており [2]、燃料集合体の下部反射体及びインシュレータペレット部あるいは反射体領域に対しては表面析出下での解析式が適用され、これ等付着物に対しては質量移行による放射能と炉内滞在中の放射化量も含めた出力 "net deposition on fuel" が得られる。因みに質量移行放射能は "amount of release" ((+) 符合で溶出、(-) 符合で付着) で出力される。ここでは4. 5節で述べた炉心集合体(ドライバー燃料、外側反射体)洗浄時のCP発生量とこれ等に対する計算結果(表面付着物放射能あるいは質量移行放射能と母材放射化濃度)との比較検討を行う。計算値の表面付着放射能には腐食生成物の炉内滞在中における放射化分も含まれる。但し、今回の評価は炉心部付着挙動評価手法の改良に向けた問題点の洗い出しを主たる目的とした予備的なものである。計算は第0及び第1列のドライバー燃料(7体)と外側反射体(A)(142体)に対するもので、外側反射体の炉内滞在期間はMk-II第0~第20'サイクル運転終了時点(第8回定期検査時に取り出し)までとした。また、解析モデルパラメータ u_s はCL/2に適用したのと同じものを用いた。結果を次の2つの表に示す。最初の表は燃料集合体や外側反射体の洗浄時に発生するCPと計算により得れた表面付着物と質量移行放射能の比較を示す。まず、表面付着放射能と質量移行放射能の計算結果を、燃料集合体と外側反射体で比較すると様相が異なる。燃料集合体では ^{60}Co 、 ^{58}Co 、 ^{54}Mn とも表面付着放射能<質量移行放射能となるが、外側反射体では熱中性子捕獲により生成される ^{60}Co に対しては表面付着放射能>質量移行放射能であり、速中性子反応により生成される ^{58}Co 、 ^{54}Mn に対しては両者はほぼ等しい。これは燃料集合体では集合体へのCP付着は管壁中拡散が主体であるのに対し、外側反射体ではもっぱら表面付着であることを意味している。これは燃料集合体領域の方が外側反射体領域に比べると、より高温の付着領域を有していることによる。また、外側反射体での ^{60}Co の表面付着放射能が質量移行放射能より大きくなるのは、前者には腐食生成物としての炉内滞在期間中の放射化分が追加されるためである。測定値と表面付着放射能の計算値を比較すると、測定値では燃料集合体、外側反射体とも ^{60}Co の割合が最大であるが、計算値では ^{54}Mn が最大である。しかし燃料集合体の場合は全体として見れば、表面付着放射能と測定値は比較的近い値を示している。従って、この後外側反射体のところで述べるようなコバルトの粒子挙動の寄与があるとしてもその

炉心集合体洗浄時のCP発生量測定結果と付着量計算結果の比較

(Ci/体)

核種		^{60}Co	^{58}Co	^{54}Mn	
燃料集合体	測定	1.70 E-2	2.56 E-3	2.42 E-3	
	計算	表面付着	5.51 E-3	3.80 E-3	7.77 E-2
		質量移行	2.81 E-2	4.90 E-2	1.73 E-1
	C/E	表面付着	3.24 E-1	1.48 E+0	3.21 E+1
質量移行		1.65 E+0	1.91 E+1	7.15 E+1	
外側反射体	測定	4.08 E-2	1.66 E-3	2.76 E-3	
	計算	表面付着	7.75 E-4	4.30 E-5	5.07 E-3
		質量移行	4.75 E-5	4.70 E-5	5.08 E-3
	C/E	表面付着	1.90 E-2	2.59 E-2	1.84 E+0
質量移行		1.20 E-3	2.83 E-2	1.84 E+0	

炉心集合体洗浄時のCP発生量測定値比率と母材放射化濃度計算値比率の比較

核種		^{60}Co	^{58}Co	^{54}Mn
燃集合体	測定	1	1.51 E-1	1.42 E-1
	計算	1	1.30 E+1	1.07 E+0
外反射体	測定	1	4.07 E-2	6.76 E-2
	計算	1	6.30 E-3	6.02 E-3

場合ほどではなく、この領域のCP付着挙動は u_d 等のモデルパラメータの調整による再現が容易であり、同時に洗浄廃液中に発生するCPは表面付着放射性物質の脱離であることを示唆している。後者の点については2番目のCP廃液と母材放射化濃度の核種バランスの比較表からも支持され、燃料集合体の場合両者は一致せず、廃液中CPは母材の水腐食による発生を主とするものではないと考えられる。一方、外側反射体において ^{54}Mn の場合は、表面付着放射能の計算値はCP廃液測定値と比較的よい一致を示している。にもかかわらず ^{60}Co 、 ^{58}Co の場合は、計算値と測定値の食い違いは大きく計算値の方が1/100程度と極端に小さい。2番目の表に示す核種バランスで見ると、今度は測定結果の方が計算結果に比べ ^{58}Co 、 ^{54}Mn が1桁程度大きくなる。即ち、 ^{60}Co 、

^{58}Co の測定結果は表面付着放射能あるいは母材放射化濃度の計算結果のいずれとも一致しない。これ等の結果から推定出来ることは次のとおりである。 ^{60}Co の移行に対しては、既に主配管部での剝離あるいはコールドトラップ下部管板部や主ポンプ上部の冷却材流れのスタグナント領域への粒子としての集積傾向（一種の吹き溜まり現象）について論じて来たが、流れの緩やかな外側反射体領域でも同様な現象が顕著に進行した可能性が高い。この場合 ^{58}Co も ^{60}Co と同一の化学的性質を有することから、ナトリウム環境下で粒子を形成する場合は ^{60}Co の場合と同等なコバルトフェライト粒子を形成していると考えられる。更に、4.4節で述べた外側反射体洗浄時に多く発生する ^{181}Hf , $^{95}\text{Zr} - ^{95}\text{Nb}$ についても同様に、主として外側反射体領域で発生しナトリウム中で粒子化したものが近傍で付着したものである可能性が高いと考えられる。

以上述べて来たところにより原子炉内でのCP挙動は、高流速部においては溶出、付着とも「溶解・析出モデル」によりよく再現される。一方、反射体のような低流速で且つ中温の領域では、 ^{54}Mn の付着に対しては本モデルによる記述は比較的容易と考えられるが、 ^{60}Co 、 ^{58}Co に対しては—CP廃液においては ^{60}Co が最も重要なのだが—粒状物の形成あるいは流れ込んだものゝの滞留・付着による集積があり、コバルトの u_a あるいは β' （即ち K/β' ）等のモデルパラメータ乃至モデル自体の改良の余地を残していると考えられる。1次ナトリウム冷却系全域に視野を拡大して言っても、 ^{54}Mn の挙動は「溶解・析出モデル」の枠組みの中に比較的自然的な収まり方を示すが、 ^{60}Co の場合にはモデルパラメータにいさゝか極端に思われる振る舞いを生ずる—特に冷却材の低流速乃至スタグナント部位において—ことがある。この背景にはコバルトの粒子移行機構が重要な役割を果たしていると考えられる。

表 5.1-1 CP挙動解析モデルパラメータ（「溶解・析出モデル」）

Symbol (unit)	Nomenclature	Expression
D (cm ² /s)	Effective Diffusion Coefficient in Steel	$D = 1.32 \times 10^{-4} \exp\left(-\frac{42.1}{RT}\right)$
u (cm/s)	Interfacial Velocity for Bulk Corrosion (u _c) or Deposition (u _d)	$u_c = 3.17 \times 10^{-12} \cdot X^{0.003}$ $X \exp\left(12.63 - \frac{22.0}{RT} - 0.00591 \frac{L}{d}\right)$ $u_{d(mod.1)} = 3.17 \times 10^{-14} \times 4.02 \exp\left(\frac{2.29}{RT}\right)$
β or β' = β/θ'	Chemical Partition Parameter	for Manganese Type $\beta = 1.58 \times 10^0 \exp(2.13/RT)$ for Cobalt Type $\beta'_{(mod.1)} \theta' = 9.93 \times 10^8 \exp(1.69/RT), \theta' = X'/12$
K' (cm/s)	Overall Mass Transfer Coefficient	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 $K' \approx k' = 0.023 Re^{0.03} Sc^{\frac{1}{3}} D'/d$ $D' = 5.1 \times 10^{-4} \exp(-0.032/K_B T)$

where, $R = 1.987 \times 10^{-3}$ Kcals/deg·mol and $K_B = 8.617 \times 10^{-5}$ eV/deg

表 5.2-1 C P管壁付着密度の計算値と測定値の比較

(単位: $\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$)

核種	領域	第3回定検時 (MK-I) (1981 12/23 0:00)			第4回定検時 (MK-II) (1983 12/3 0:00)			第5回定検時 (MK-II) (1985 5/1 0:00)			第6回定検時 (MK-II) (1986 12/6 0:00)			第7回定検時 (MK-II) (1988 9/7 0:00)			第8回定検時 (MK-II) (1990 1/23 0:00)			第9回定検時 (MK-II) (1991 9/11 0:00)			第10回定検時 (MK-II) (1993 3/26 0:00)			
		計算値	測定値	C/E	計算値	測定値	C/E	計算値	測定値	C/E	計算値	測定値	C/E	計算値	測定値	C/E	計算値	測定値	C/E	計算値	測定値	C/E	計算値	測定値	C/E	
^{54}Mn	HL	0.474	0.459	1.03	0.457	0.542	0.84	1.02	0.775	1.32	0.979	0.987	0.99	0.966	0.748	1.29	1.34	1.064	1.26	1.02	0.809	1.26	0.837			
	CL(1)	0.189	0.183	1.03	0.712	0.379	1.88	2.04	0.818	2.49	2.32	1.428	1.62	2.15	1.409	1.53	2.84	2.546	1.11	2.13	2.039	1.04	1.750			
	CL(2)	0.326	0.380	0.86	1.26	0.657	1.92	3.60	1.895	1.90	4.10	2.44	1.68	3.79	2.786	1.36	5.01	4.458	1.12	3.77	3.77	1.00	3.090			
^{60}Co	HL	0.0432	0.0380	1.14	0.0491	0.103	0.48	0.139	0.125	1.11	0.222	0.239	0.93	0.229	0.206	1.11	0.246	0.236	1.04	0.232	0.231	1.00	0.219			
	CL(1)	0.0153	0.0101	1.51	0.0205	0.0507	0.40	0.0731	0.0745	0.98	0.115	0.108	1.06	0.121	0.0983	1.23	0.133	0.106	1.25	0.128	0.122	1.05	0.121			
	CL(2)	0.0249	0.0273	0.91	0.0342	0.102	0.34	0.126	0.145	0.87	0.201	0.164	1.23	0.212	0.142	1.49	0.232	0.165	1.41	0.222	0.200	1.11	0.211			
^{58}Co	HL	0.0007	—		0.294	—		0.0239	—		0.297	—		0.134	0.0507	2.64	0.148	0.0820	1.80	0.0866	—		0.0726	—		
	CL(1)	0.0003	—		0.168	—		0.0136	—		0.149	—		0.0753	—		0.0858	0.064	1.34	0.0504	—		0.0422	—		
	CL(2)	0.0004	—		0.291	—		0.0237	—		0.260	—		0.131	0.0347	3.78	0.149	—		0.0874	—		0.0732	—		
積算出力 (GWd) MK-I+MK-II		27.90			39.50			61.67			83.85			105.3			130.4			150.6			169.2			

注) 第10回定検時の値は予測値である。

表 5.3-1 CR及びCRD-UGT追加領域パラメータ

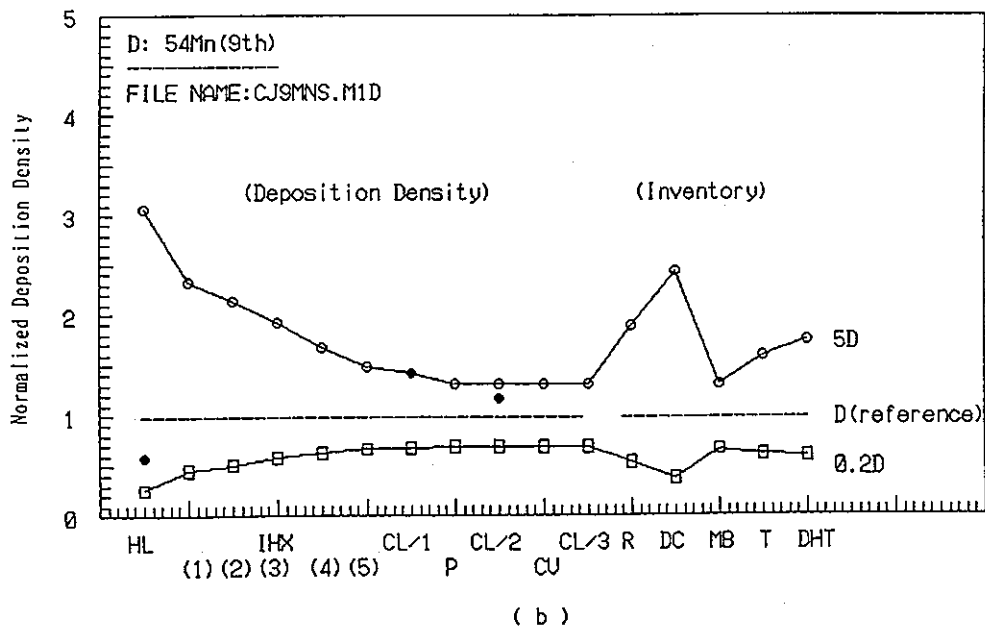
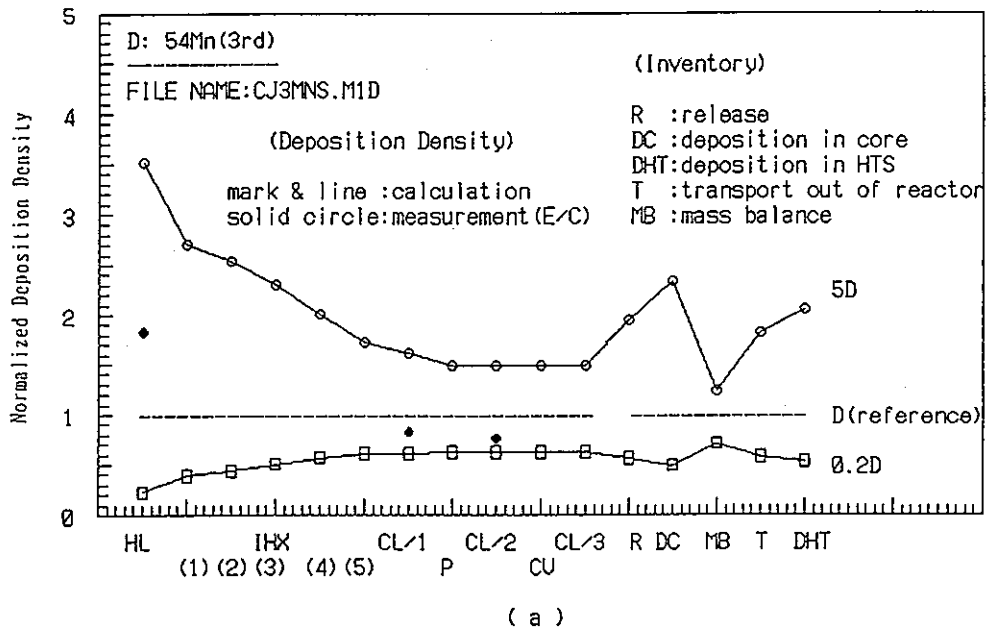
領域No (追加)	領域内容	領域集合体数	領域冷却材流量 (kg/s)	冷却材温度 (℃)	冷却材流速 (cm/s)	等価直径 (cm)	領域接液面積 計算用直径 (cm)	代表長さ (cm)
③⑨ ~ ④②	CR下部	6CR	16.2	380	157	0.935	294	58.7
④③ ~ ④⑥	CR上部	6CR	16.2	390	157	0.935	294	58.7
④⑦	UGT内側	6UGT	108.6	509	184	6.9	131	171

表 5.3-2 UGT管壁CP付着量の推定

核種	付着機構 (計算モデル) 拡散 ／ 析出	質量移行 放射能 (計算) (Bq/体)	析出物放射能 (計算) (質量移行+放射化) (Bq/体)	母材放射化濃度 (計算) (Bq/cm ³)	洗浄廃液実測値 (Bq/体)
⁵⁴ Mn	拡散	5.42 E8	—	5.14 E6	1.00 E7 (5.6%)
⁶⁰ Co	析出 拡散	1.31 E7	9.19 E7	9.79 E7	1.66 E8 (92.2%)
⁵⁸ Co	析出 拡散	1.51 E7	2.39 E6	1.55 E4	4.14 E5 (0.2%)

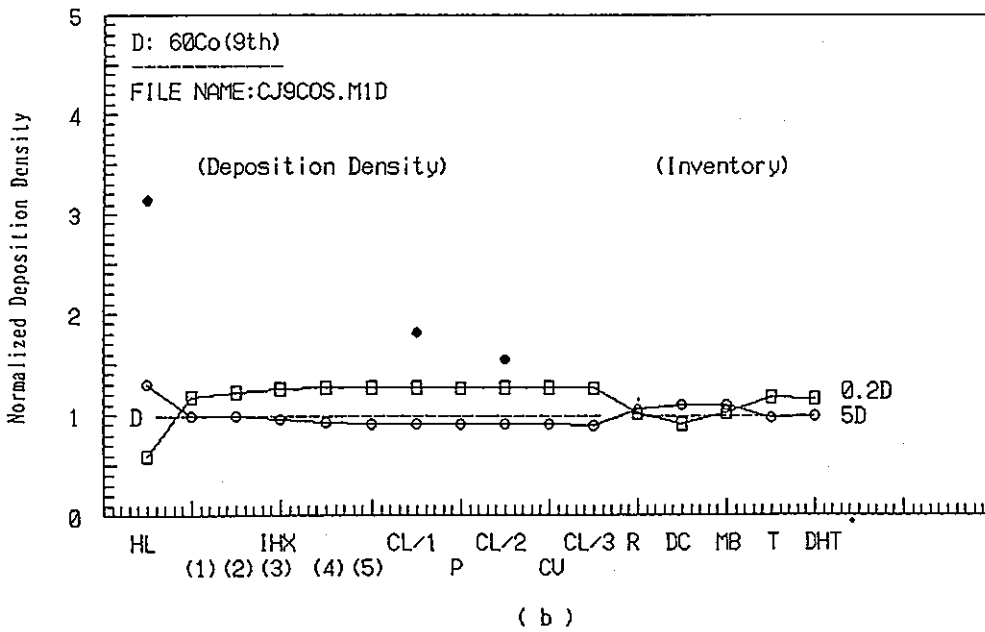
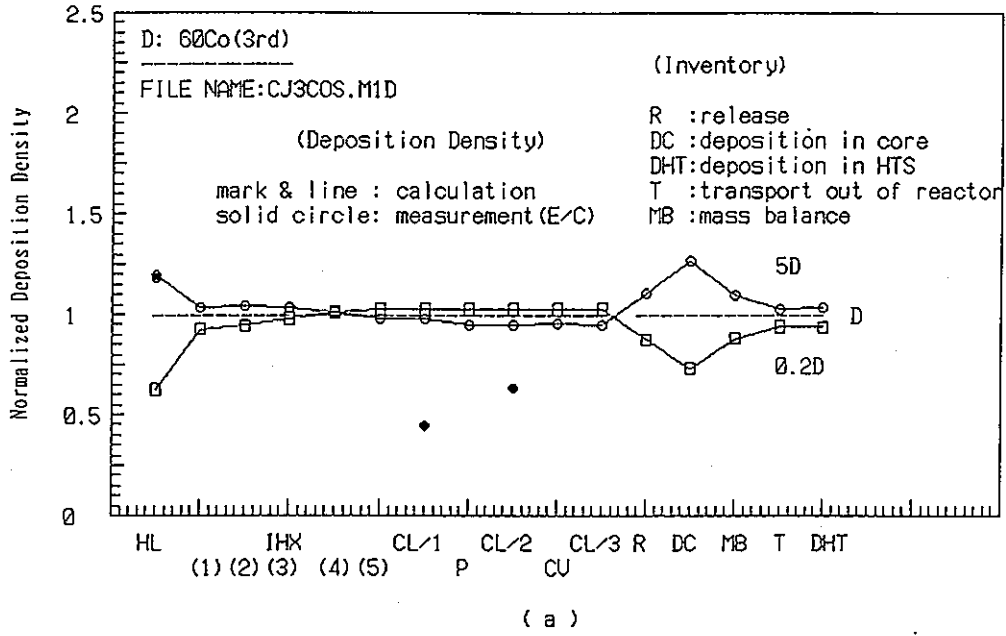
注 : 21~23サイクル照射(特殊試験サイクル含む), 評価時点 1992.1.17

()内の百分率は洗浄廃液中全放射能に占める割合



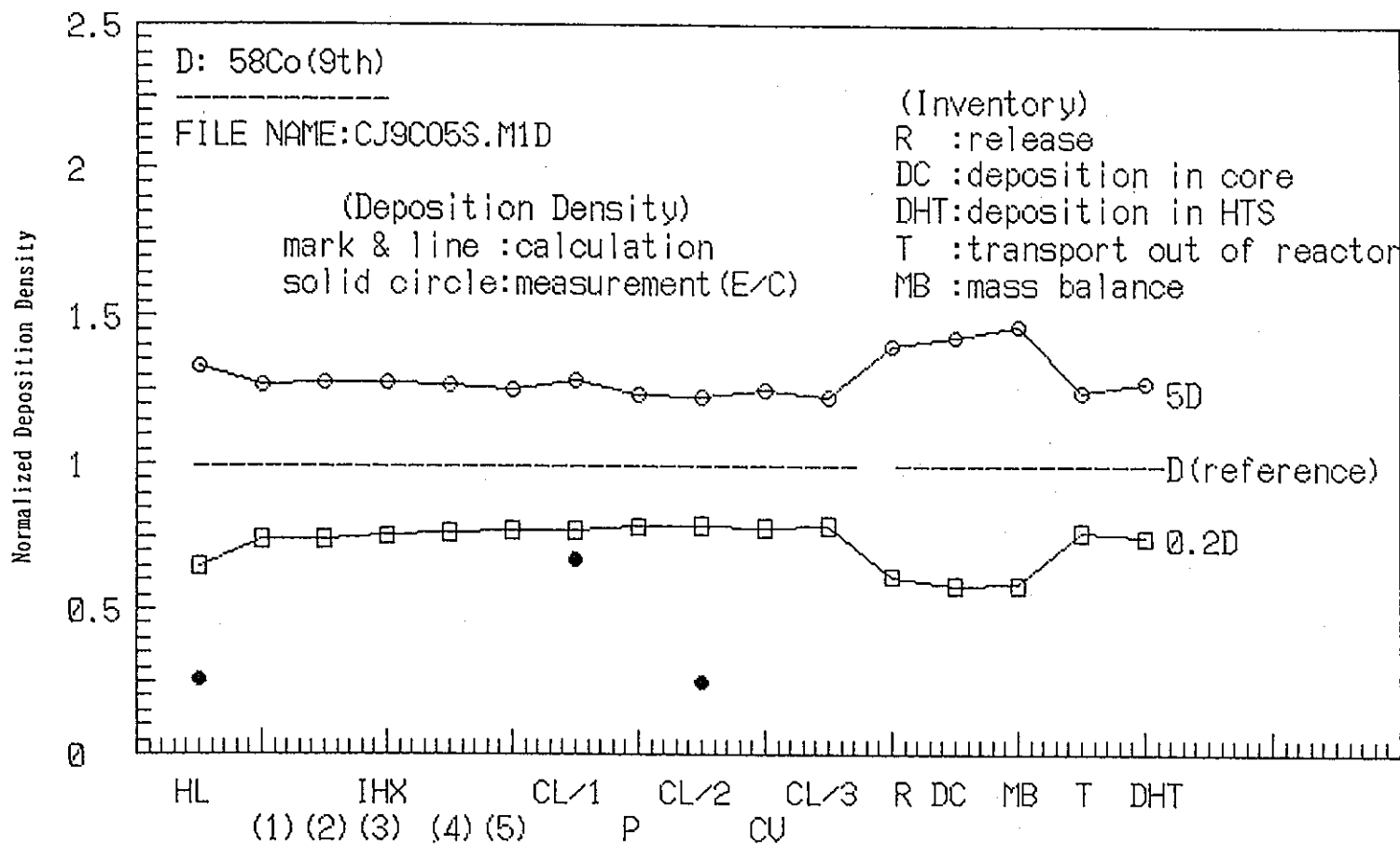
(1) ^{54}Mn

图 5.1-1 扩散系数 (D) 感度 (1 / 3)



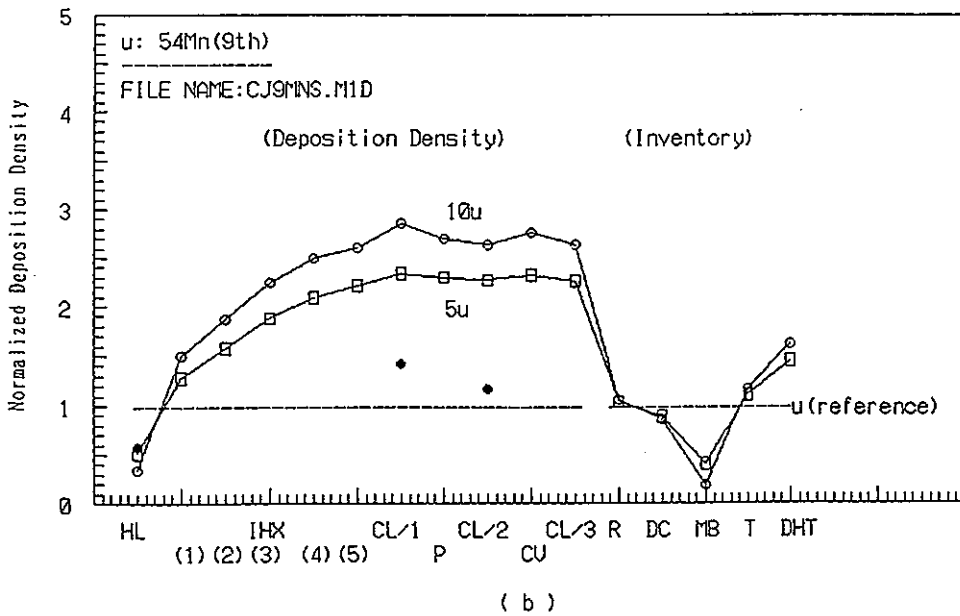
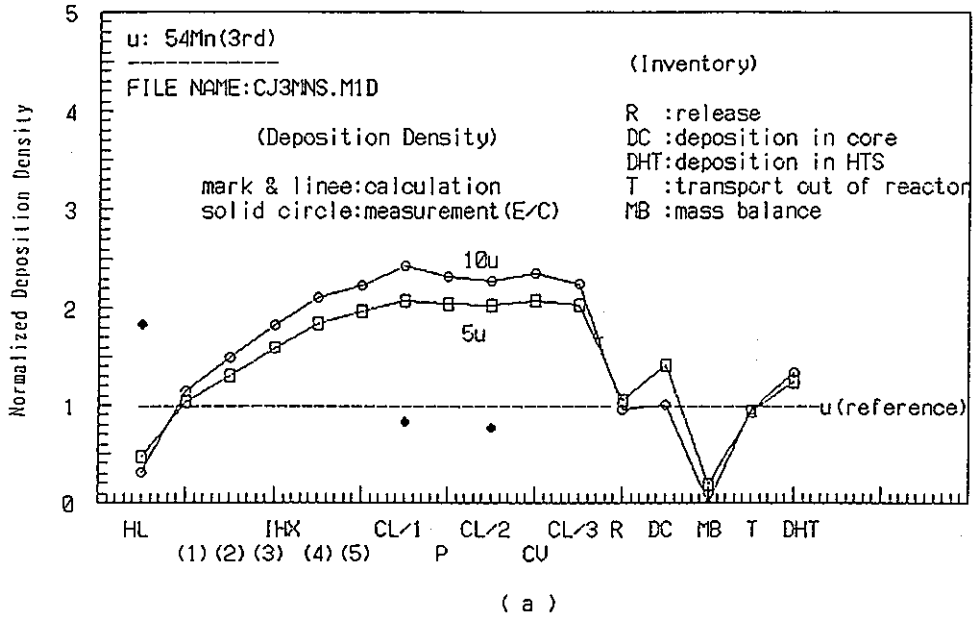
(2) ^{60}Co

図 5.1-1 拡散係数 (D) 感度 (2 / 3)



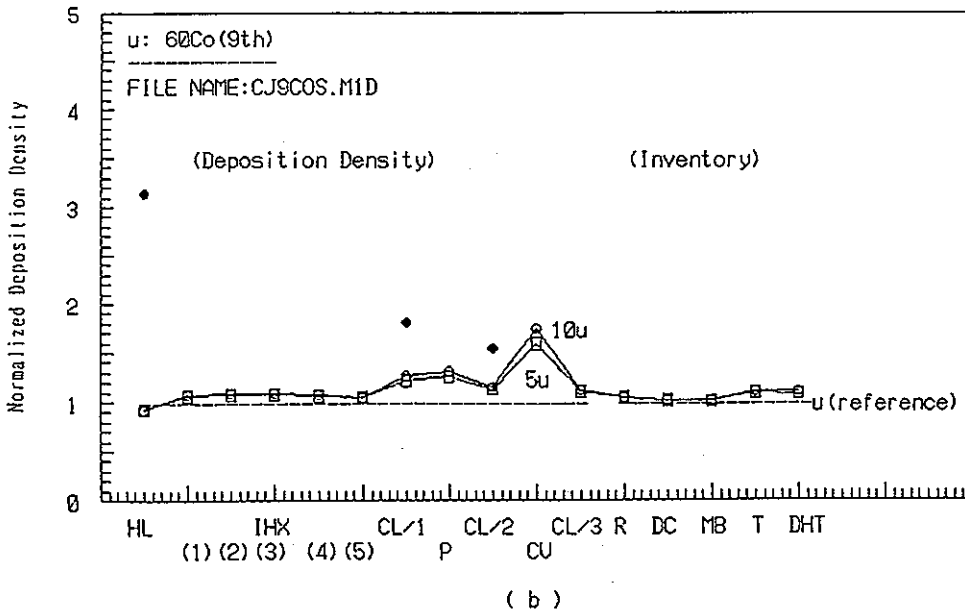
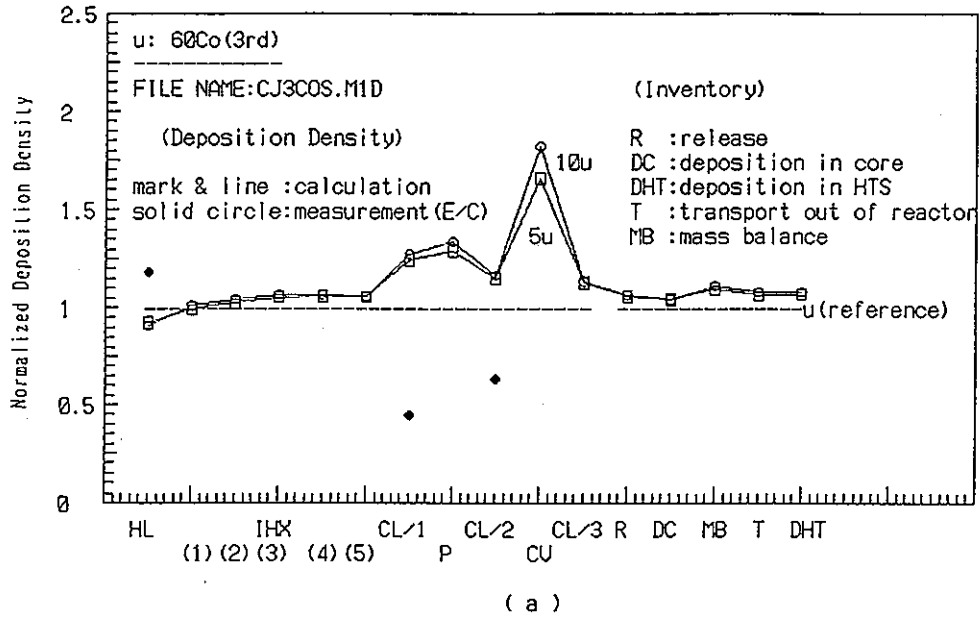
(3) ⁵⁸Co

图 5.1-1 扩散系数 (D) 感度 (3 / 3)



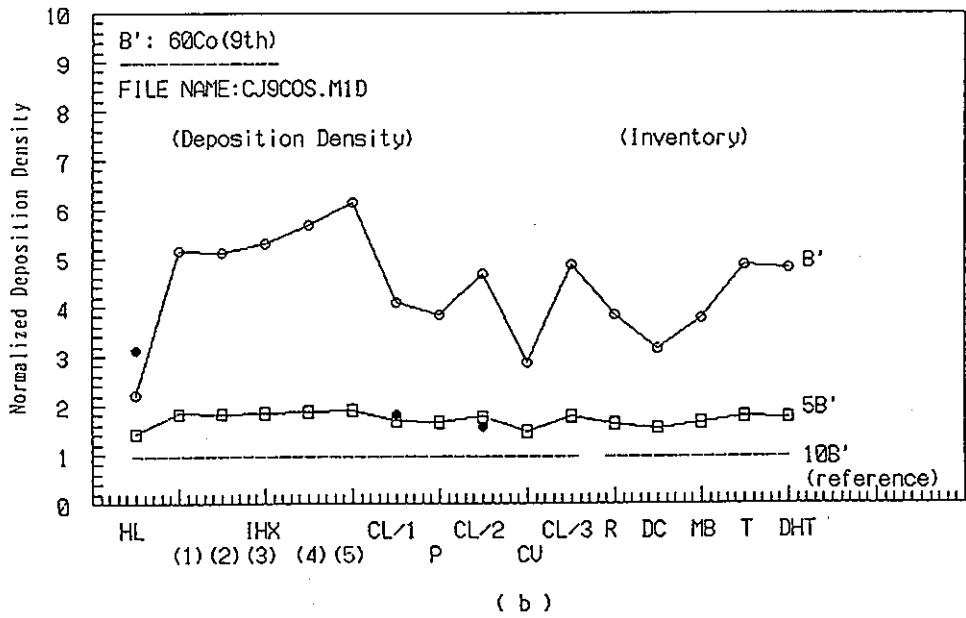
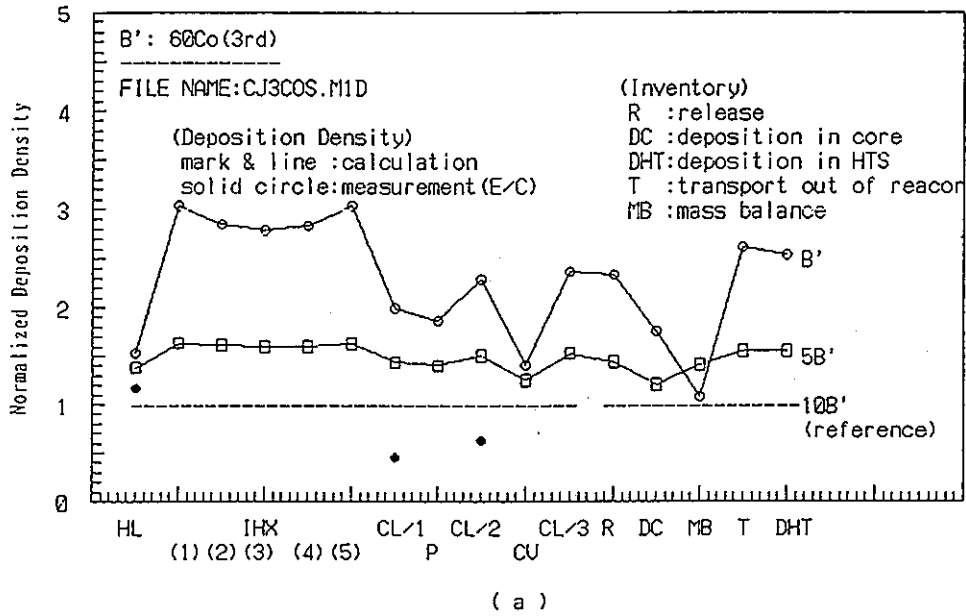
(1) ^{54}Mn

图 5.1-2 界面前进速度 (u_d) 感度 (1 / 2)



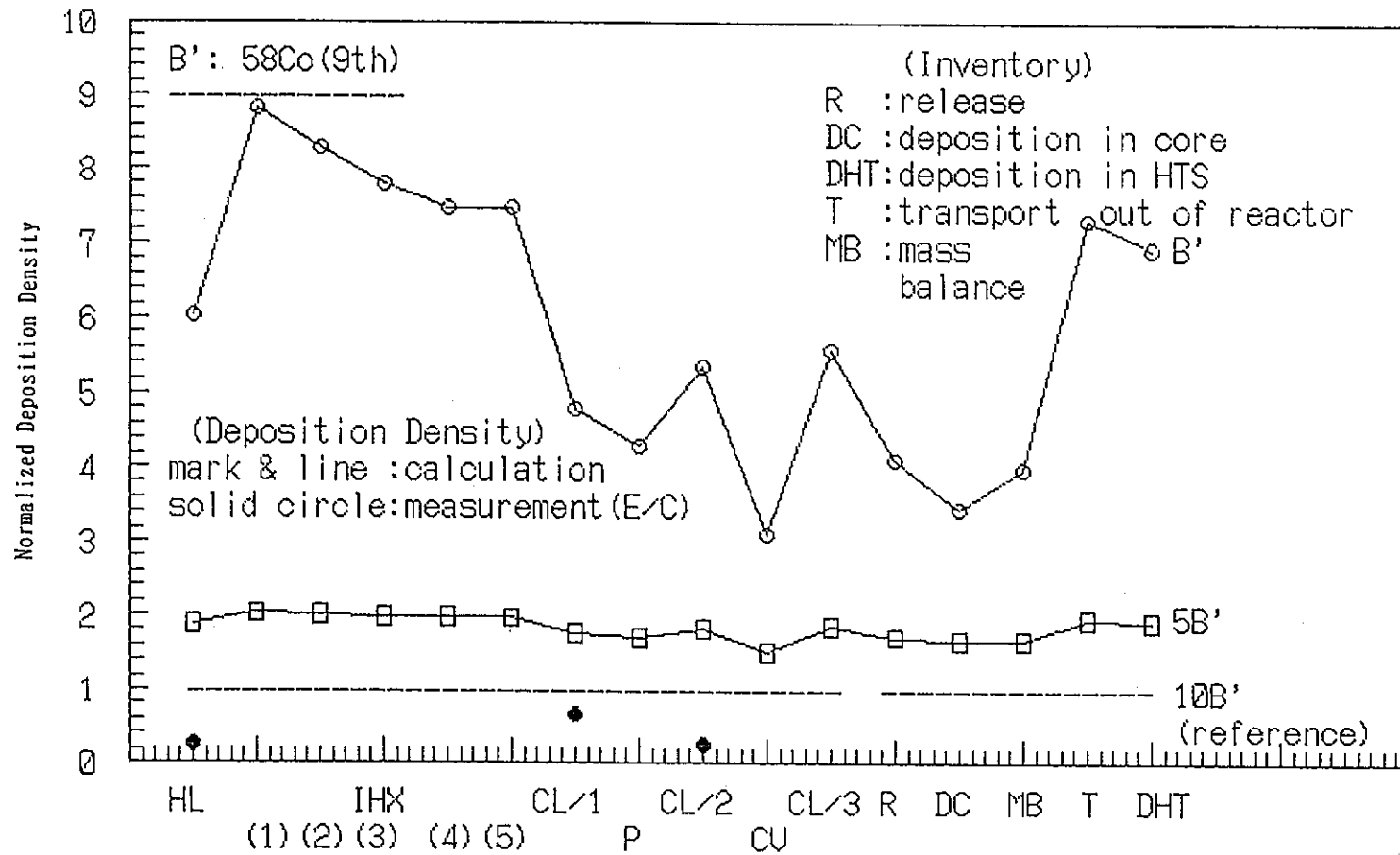
(2) ^{60}Co

图 5.1-2 界面前進速度 (u_d) 感度 (2 / 2)



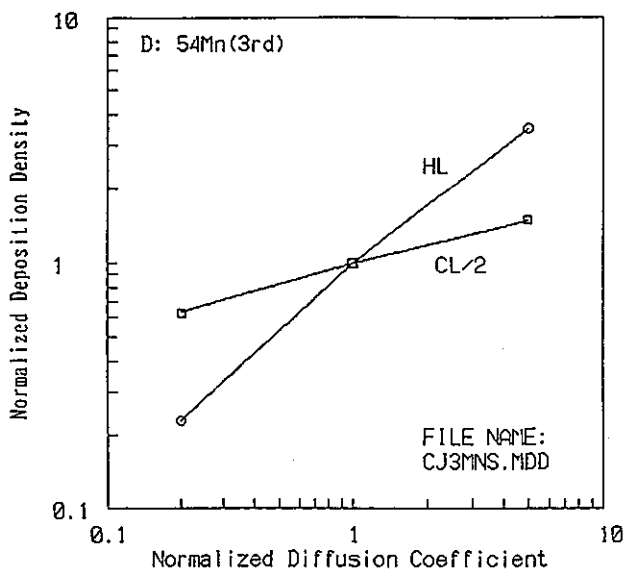
(1) ⁶⁰Co

图 5.1-3 化学的分配系数 (β') 感度 (1/2)

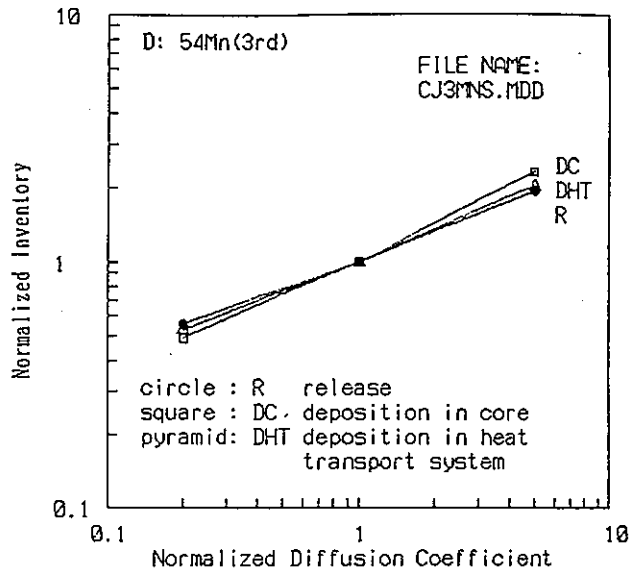


(2) ⁵⁸Co

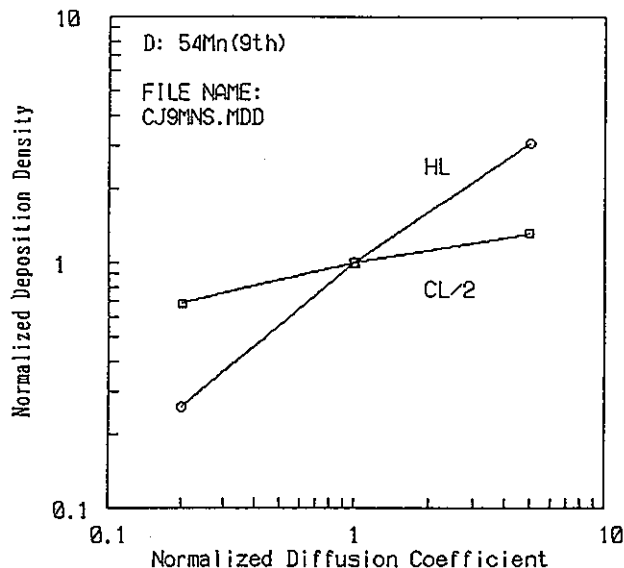
图 5.1-3 化学的分配系数 (β') 感度 (2 / 2)



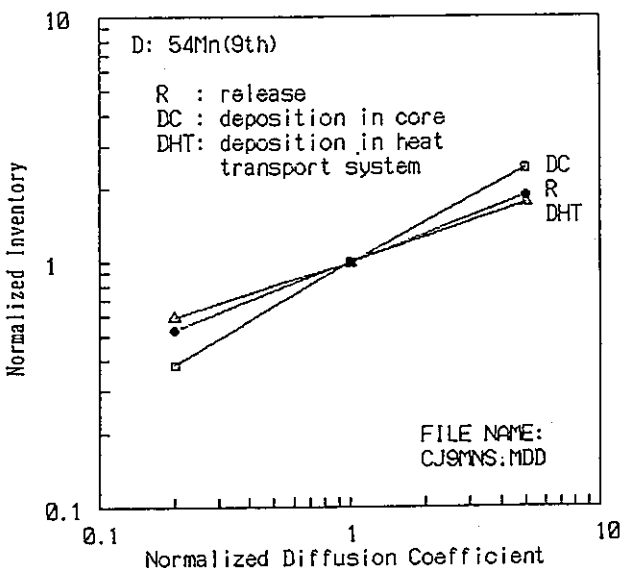
(a)



(b)



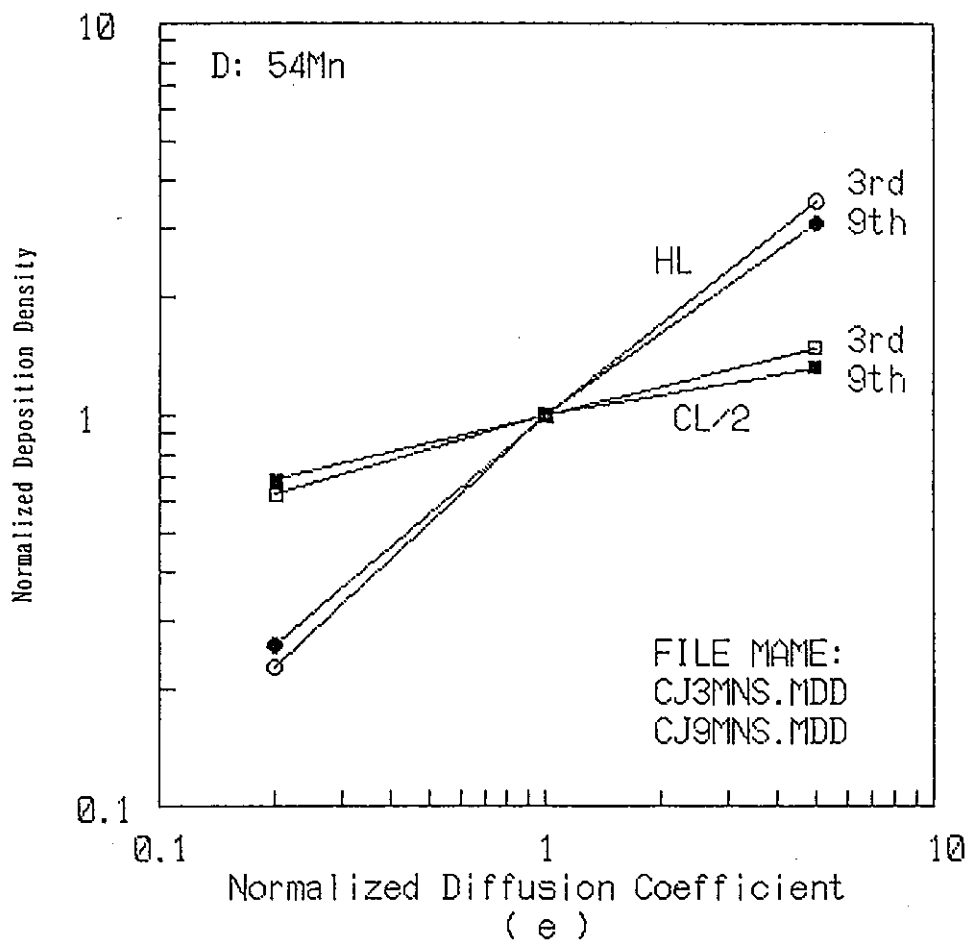
(c)



(d)

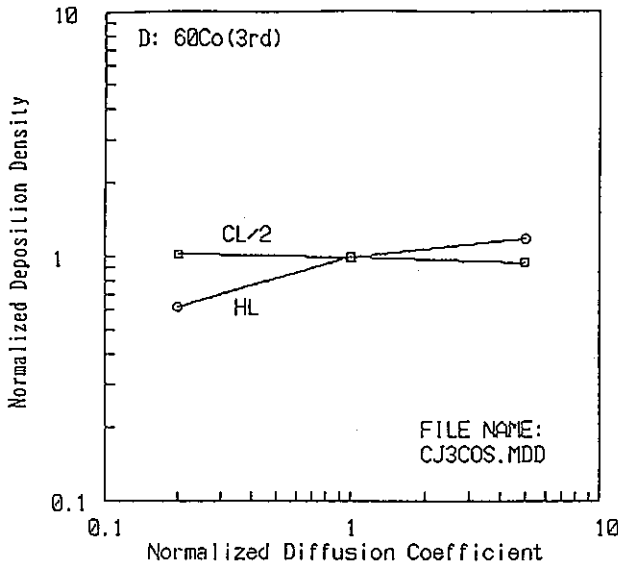
(1) ^{54}Mn (1 / 2)

图 5.1-4 扩散系数 (D) 依存性 (1 / 5)

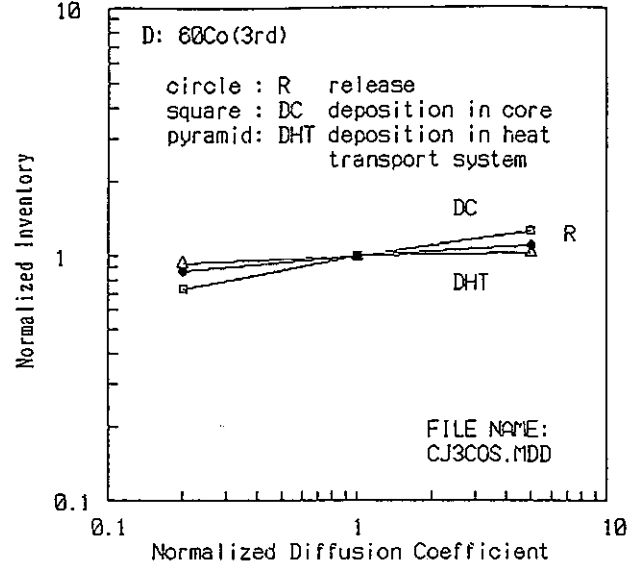


(1) ^{54}Mn (2 / 2)

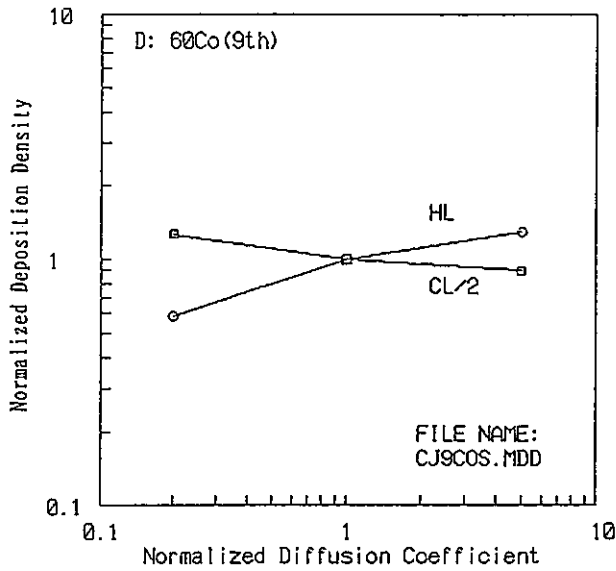
图 5.1-4 扩散系数 (D) 依存性 (2 / 5)



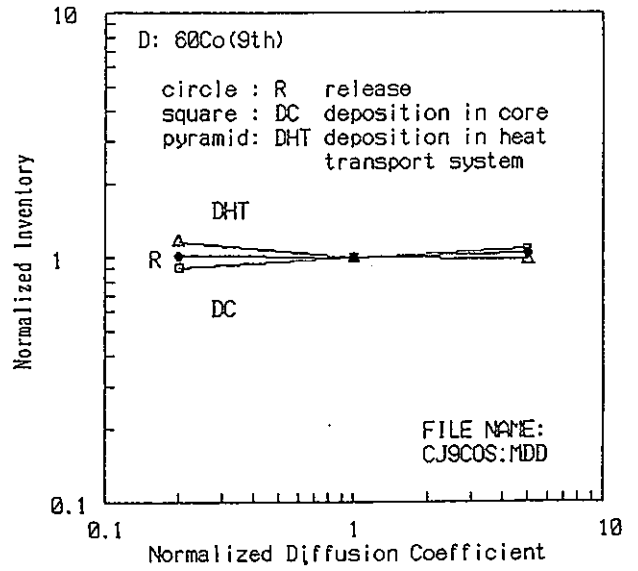
(a)



(b)



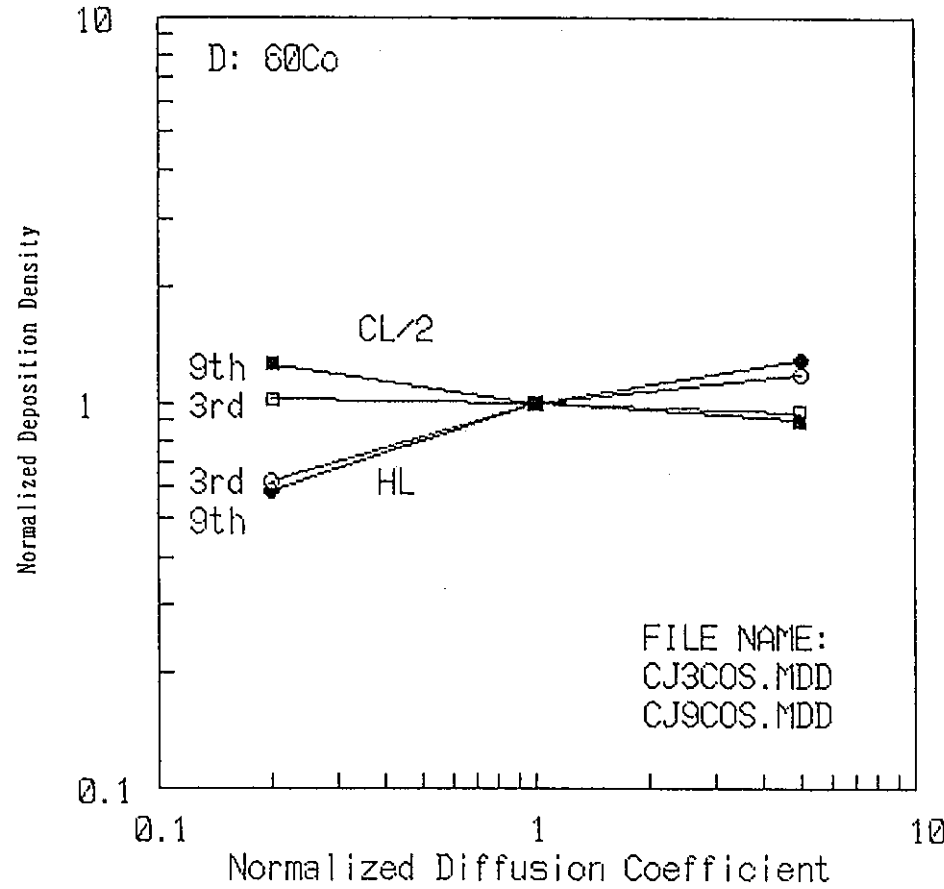
(c)



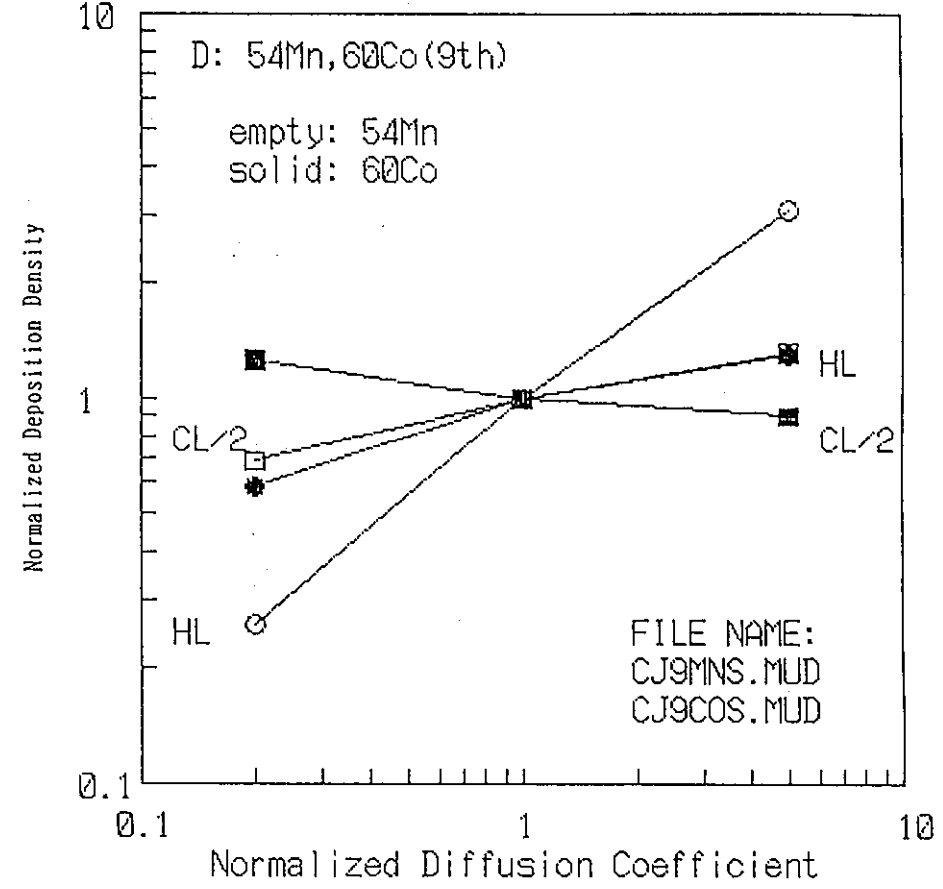
(d)

(2) ^{60}Co (1 / 2)

图 5.1-4 扩散系数 (D) 依存性 (3 / 5)



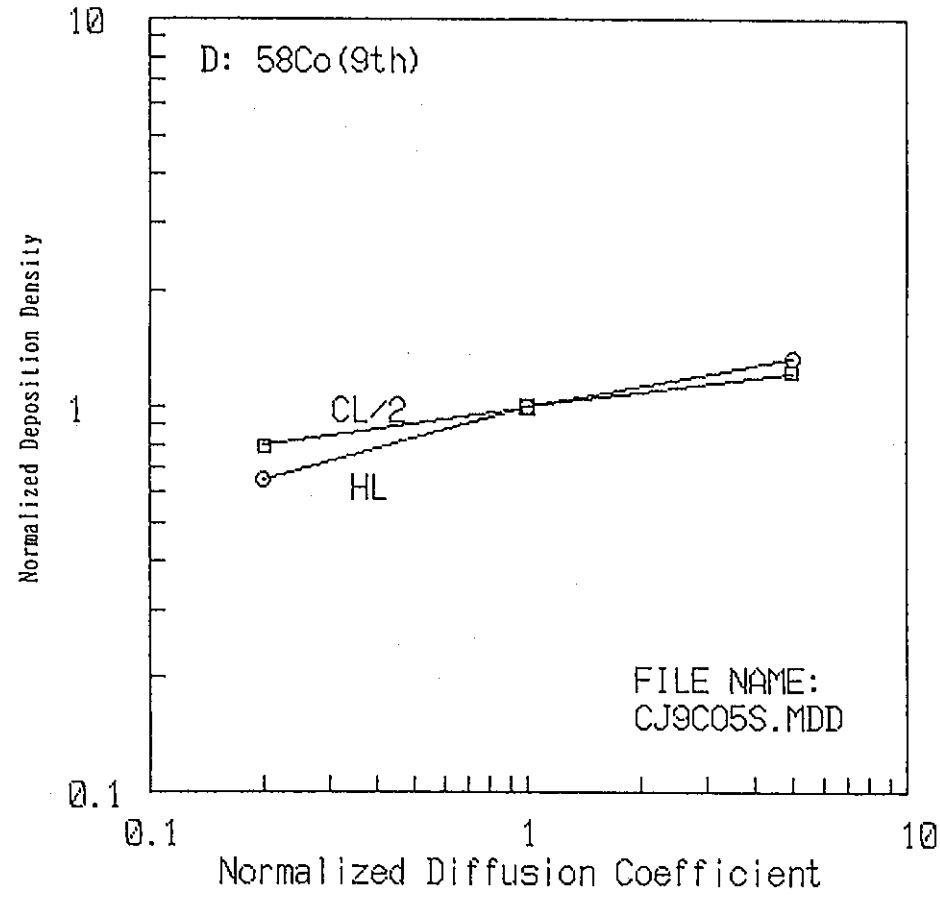
(e)



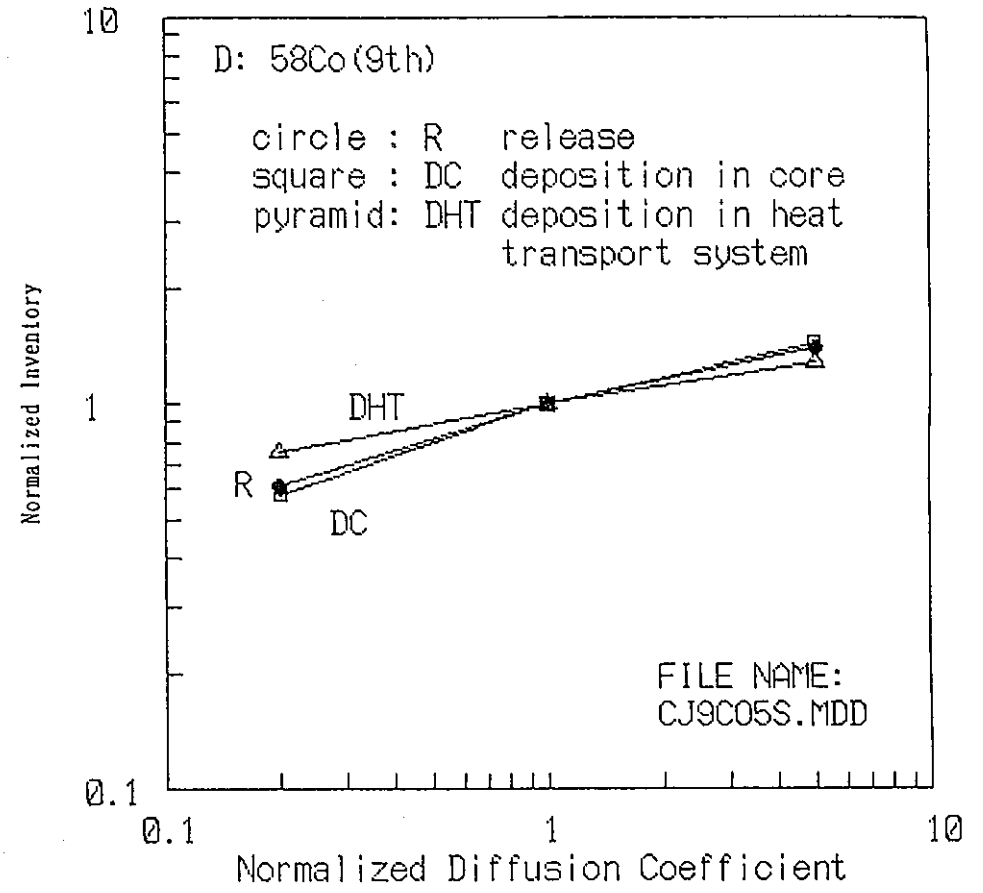
(f)

(2) ^{60}Co (2 / 2)

☒ 5.1-4 拡散係数 (D) 依存性 (4 / 5)



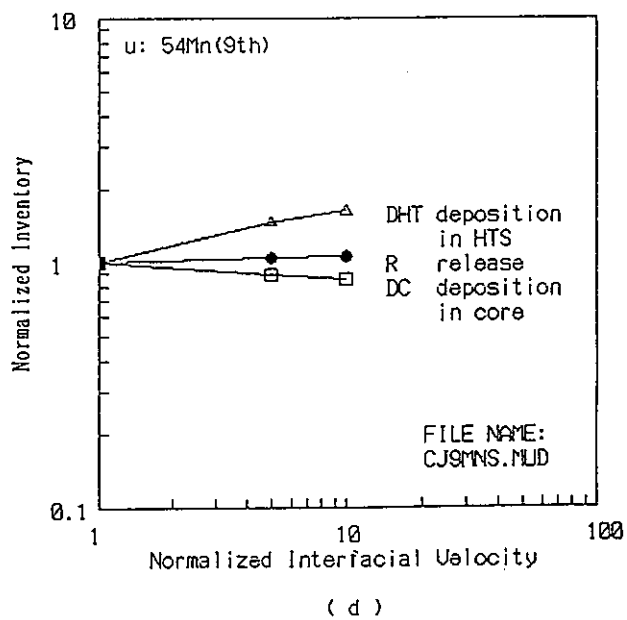
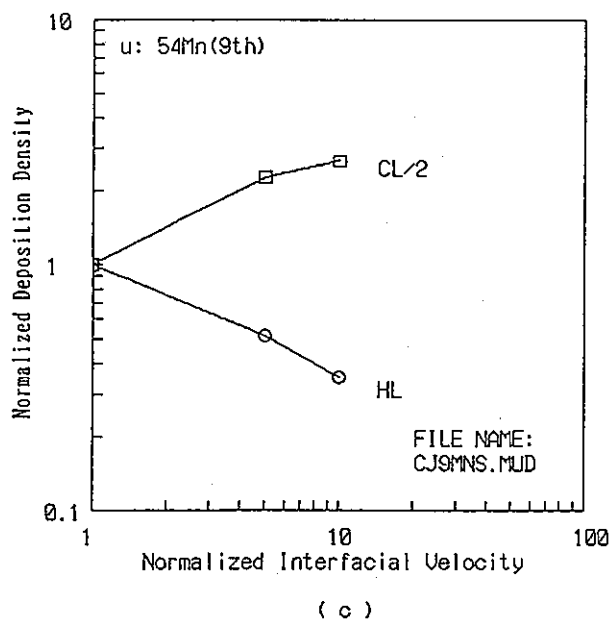
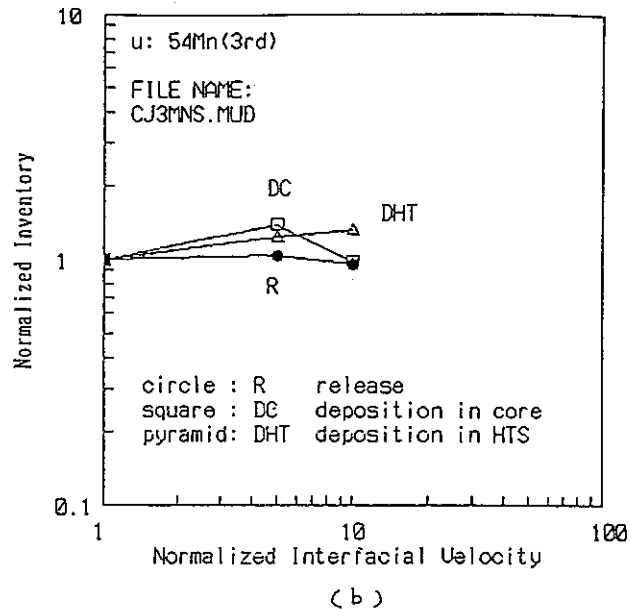
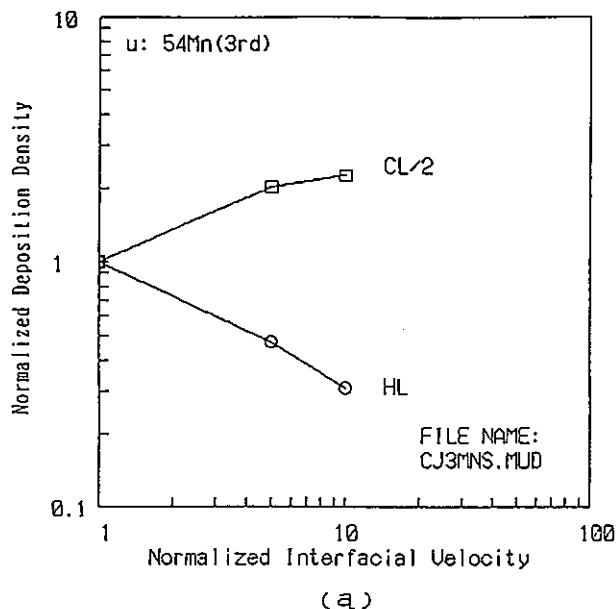
(a)



(b)

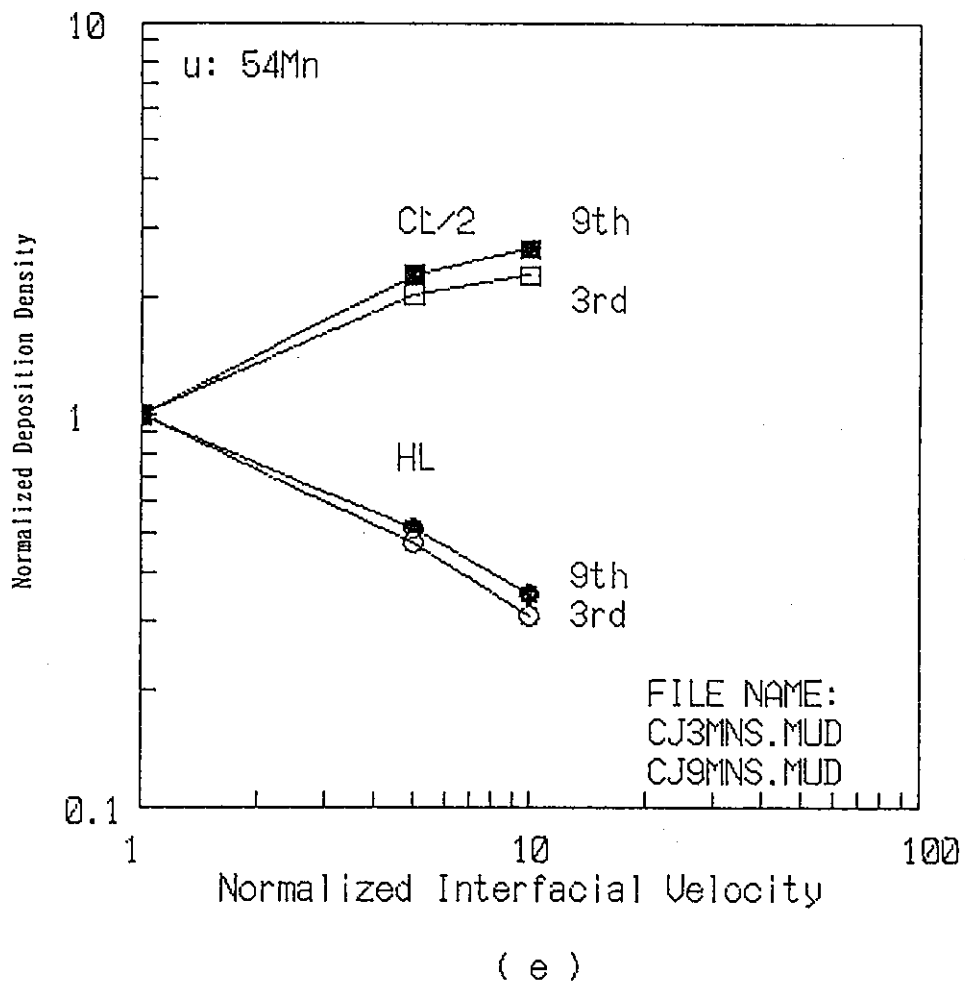
(3) ⁵⁸Co

图 5.1-4 扩散系数 (D) 依存性 (5 / 5)



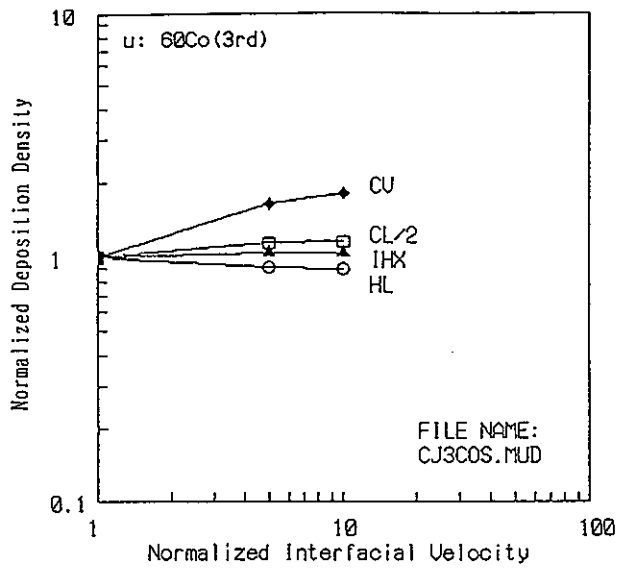
(1) $^{54}\text{Mn} (1/2)$

图 5.1-5 界面前进速度 (u_d) 依存性 (1/4)

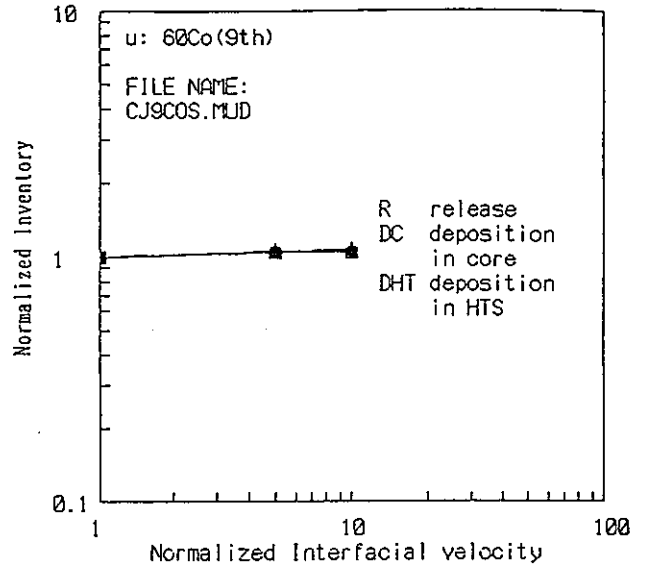


(1) ^{54}Mn (2 / 2)

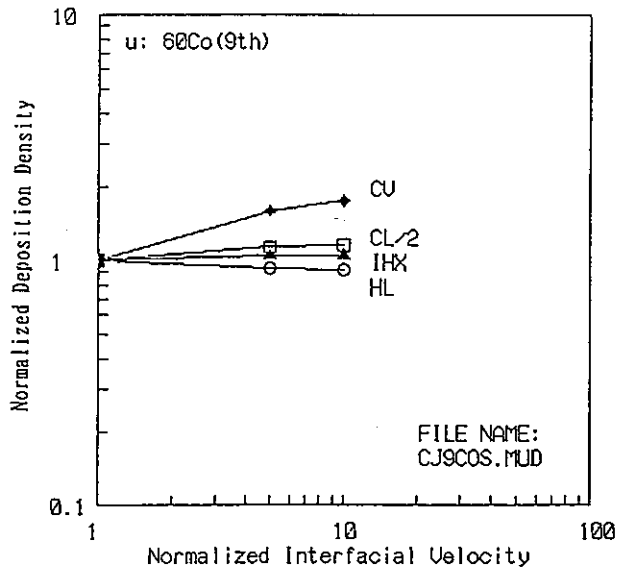
图 5.1-5 界面前进速度 (u_d) 依存性 (2 / 4)



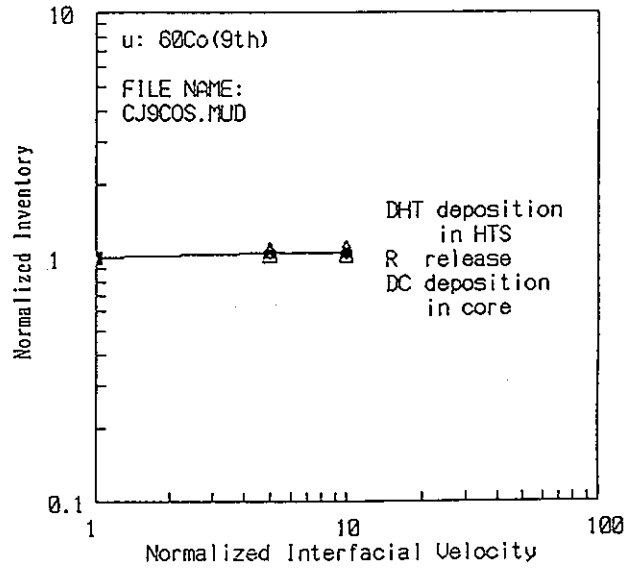
(a)



(b)



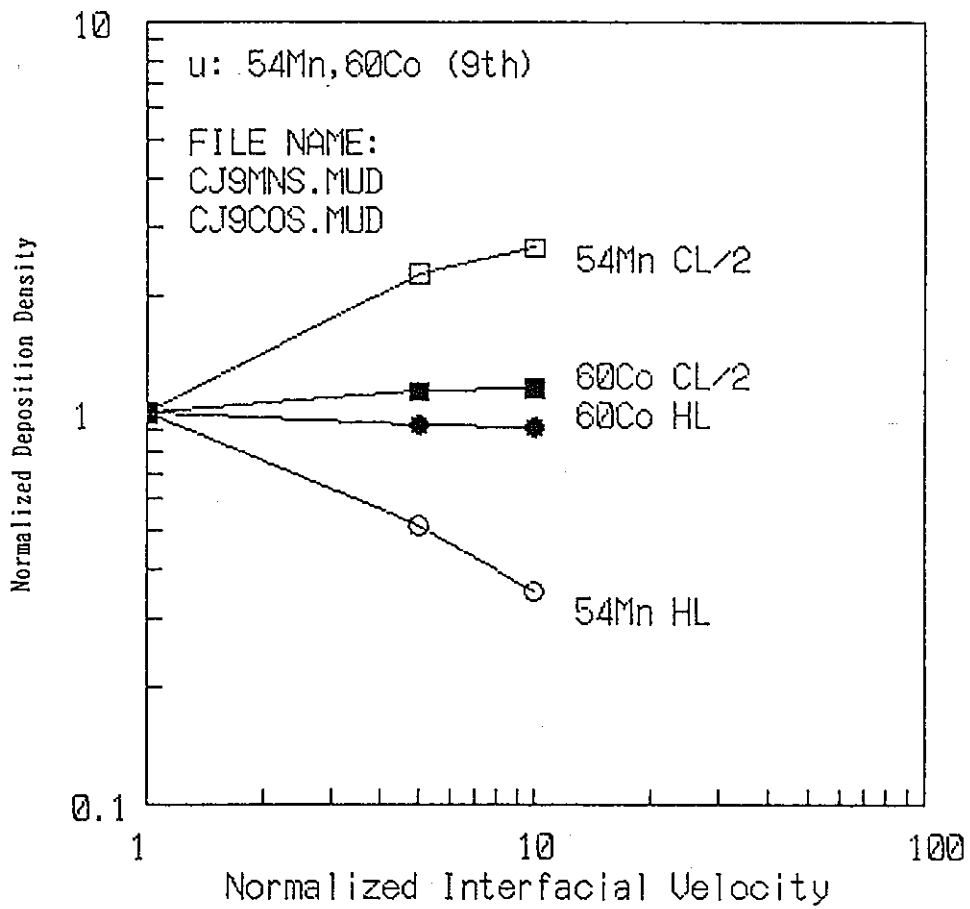
(c)



(d)

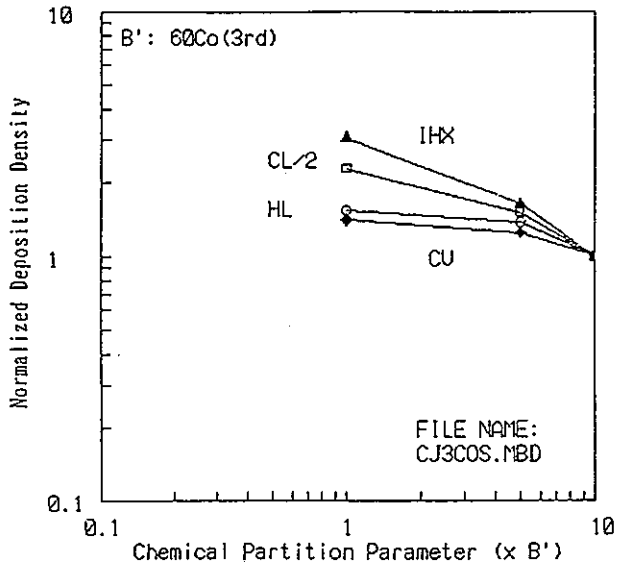
(2) ^{60}Co (1 / 2)

图 5.1-5 界面前进速度 (u_d) 依存性 (3 / 4)

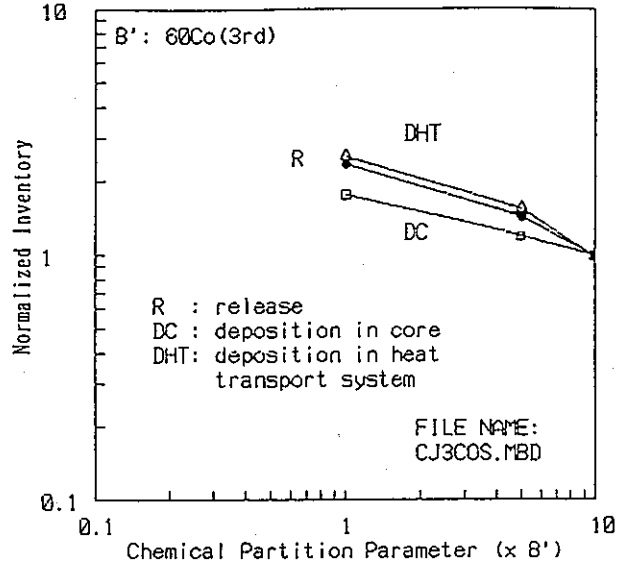


(2) ⁶⁰Co (2 / 2)

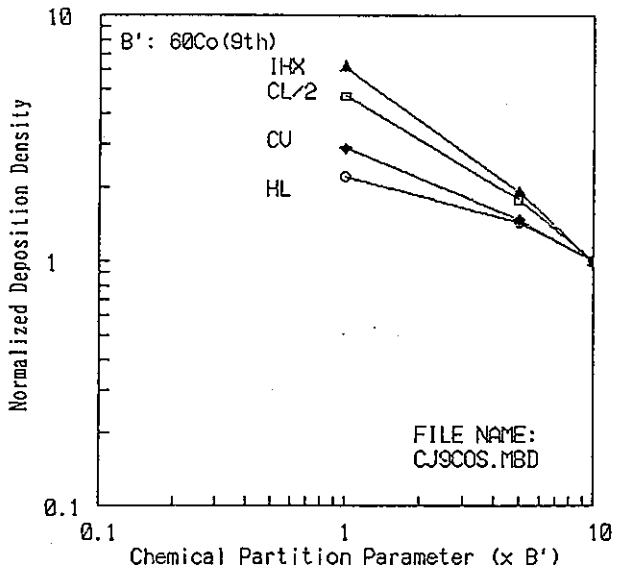
图 5.1-5 界面前进速度 (u_d) 依存性 (4 / 4)



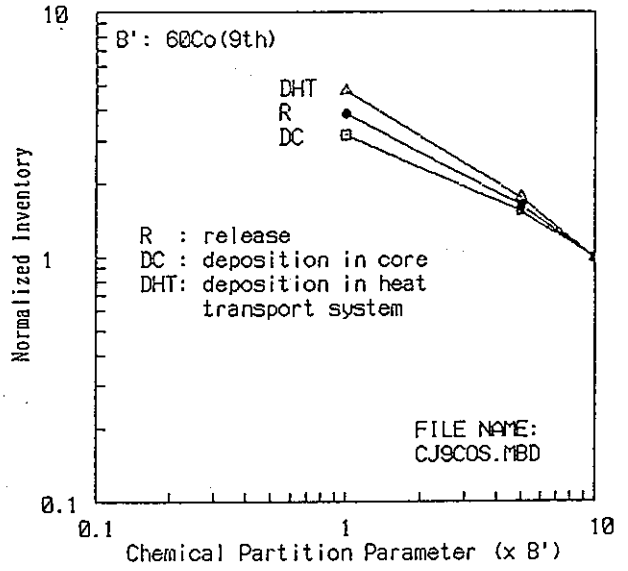
(a)



(b)



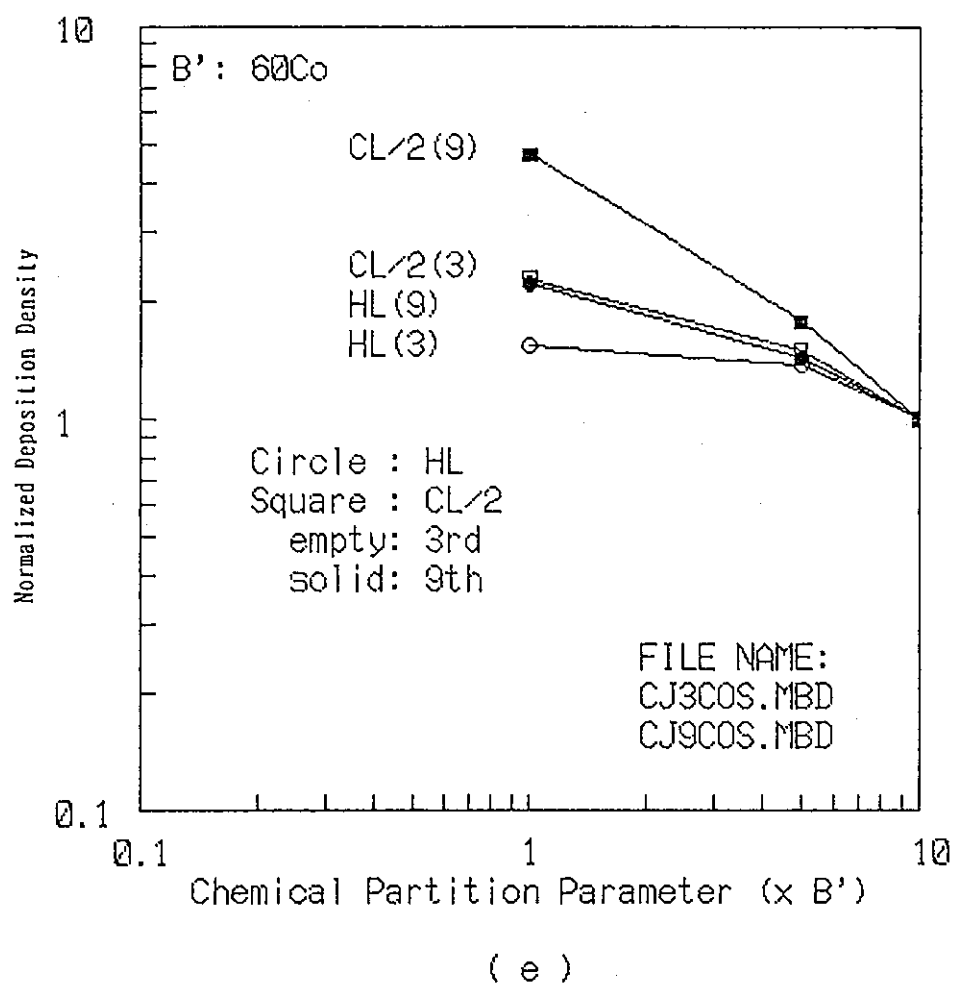
(c)



(d)

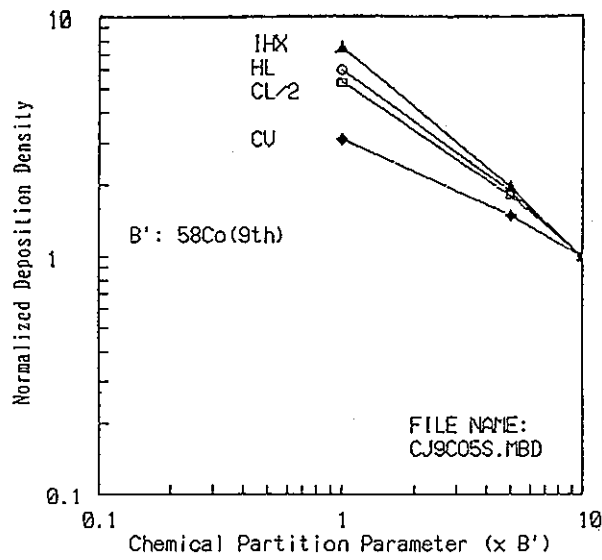
(1) ^{60}Co (1/2)

图 5.1-6 化学的分配系数 (β') 依存性 (1/3)

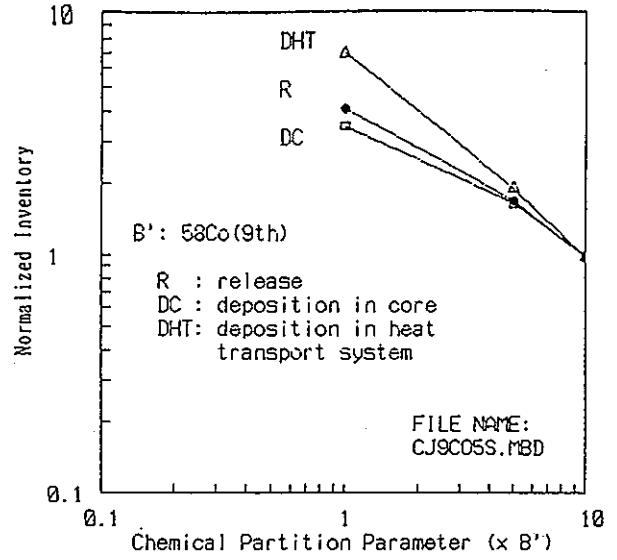


(1) ^{60}Co (2 / 2)

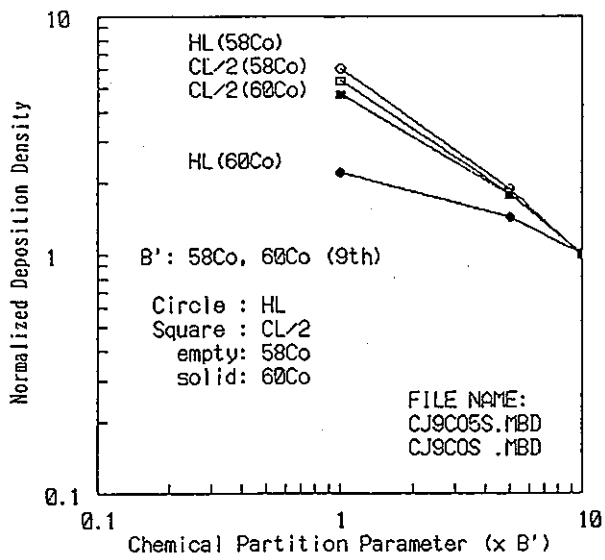
图 5.1-6 化学的分配系数 (β') 依存性 (2 / 3)



(a)



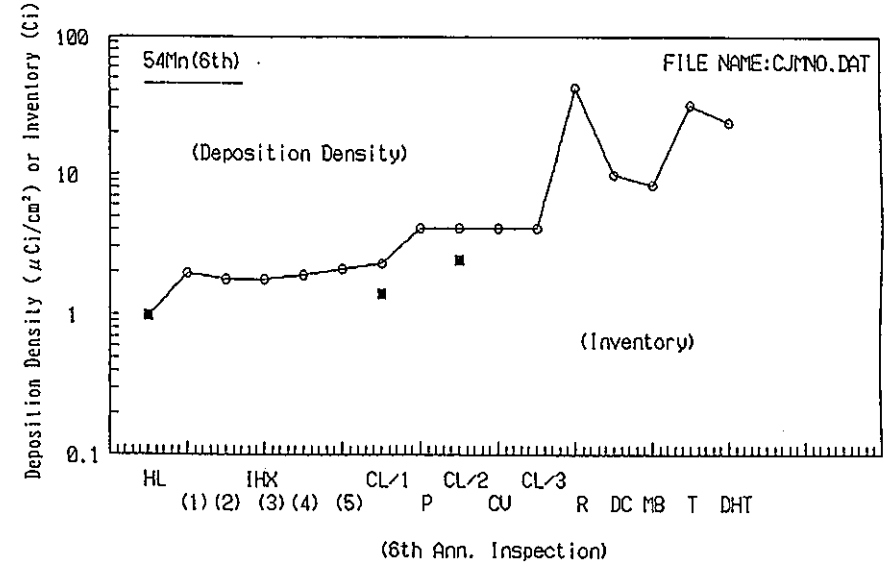
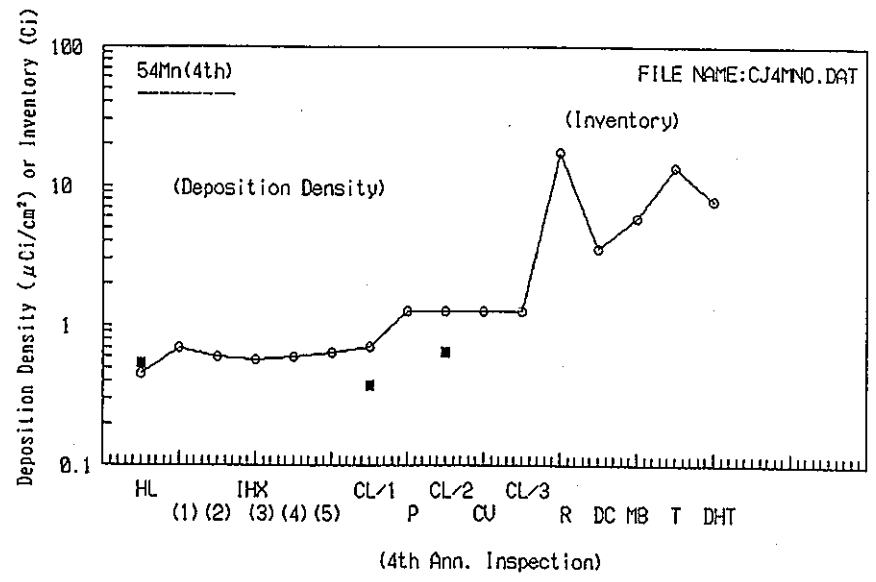
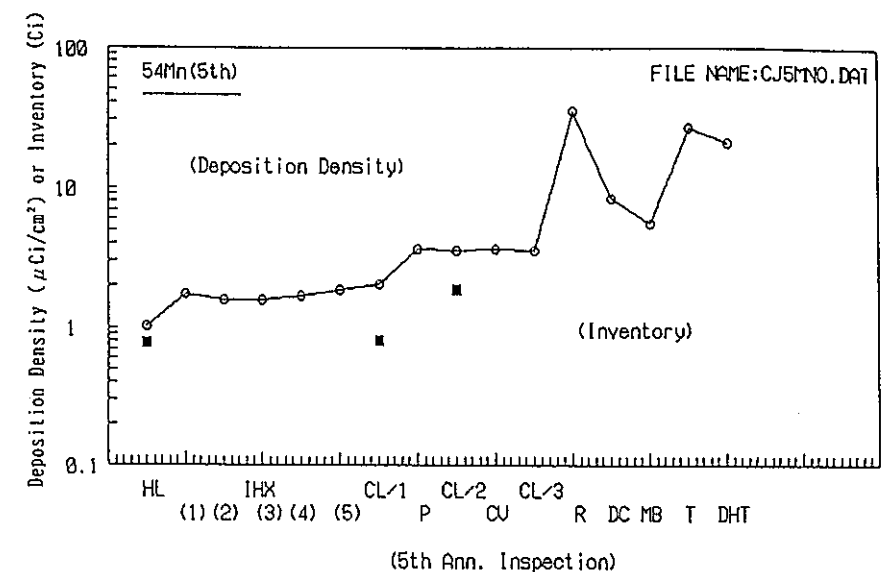
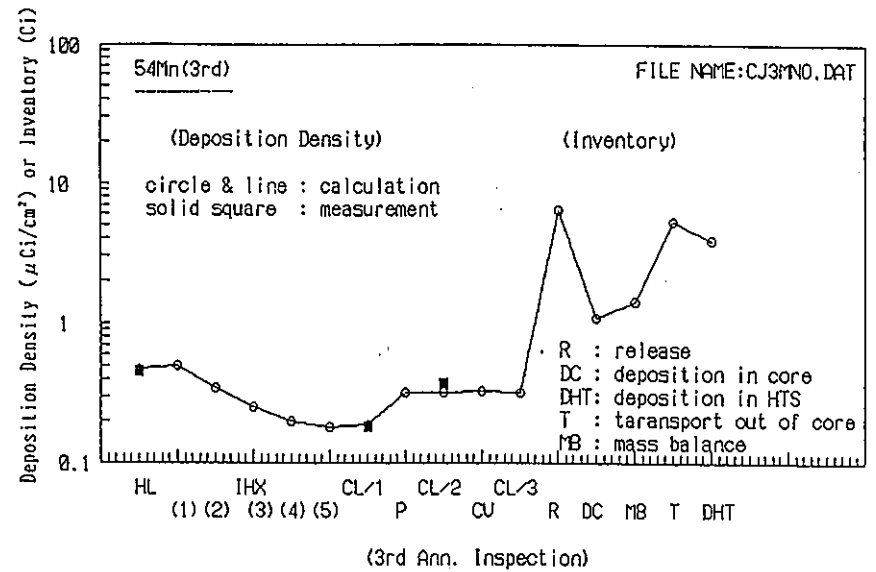
(b)



(c)

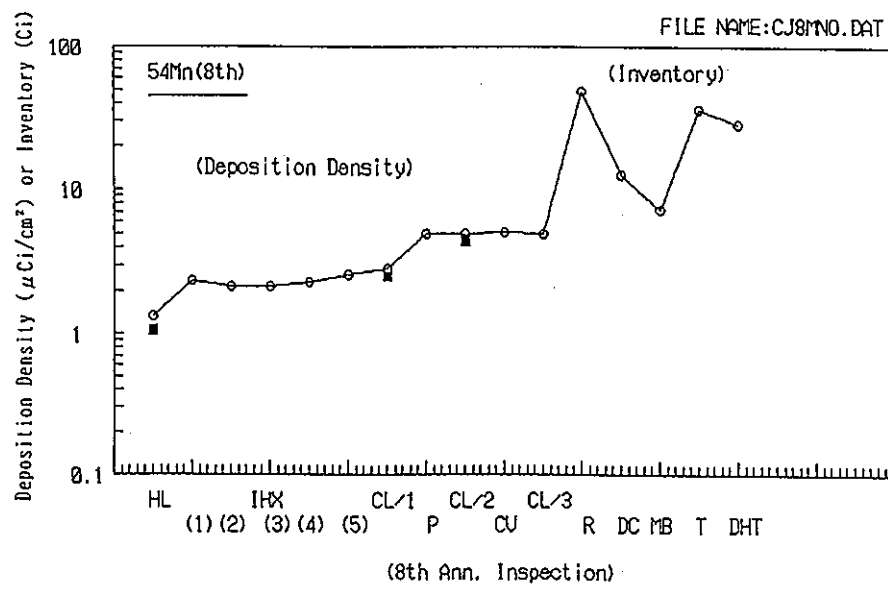
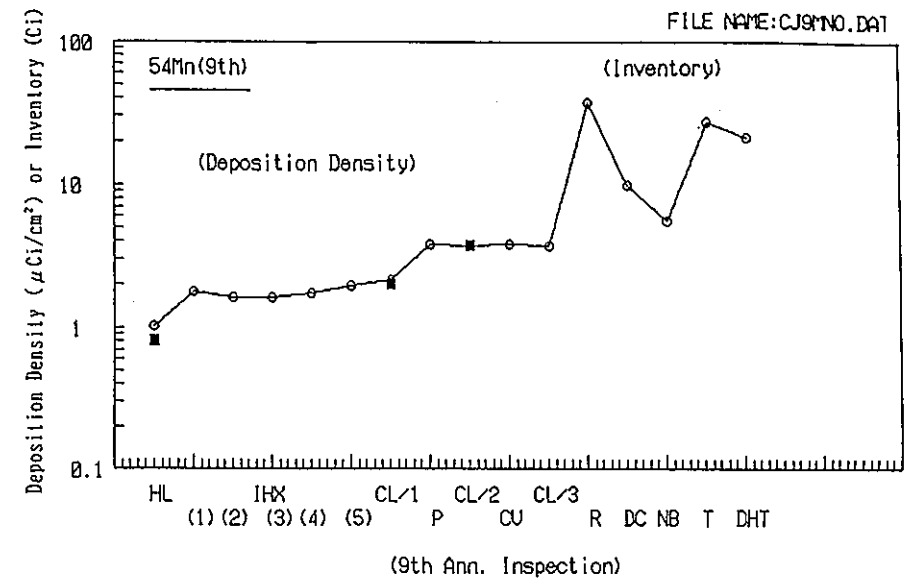
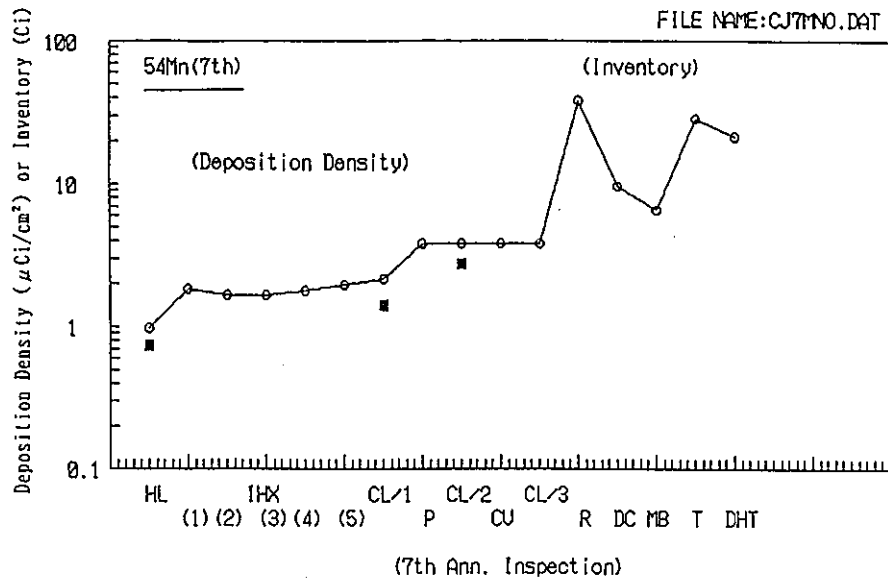
(2) ^{58}Co

图 5.1-6 化学的分配系数 (β') 依存性 (3 / 3)



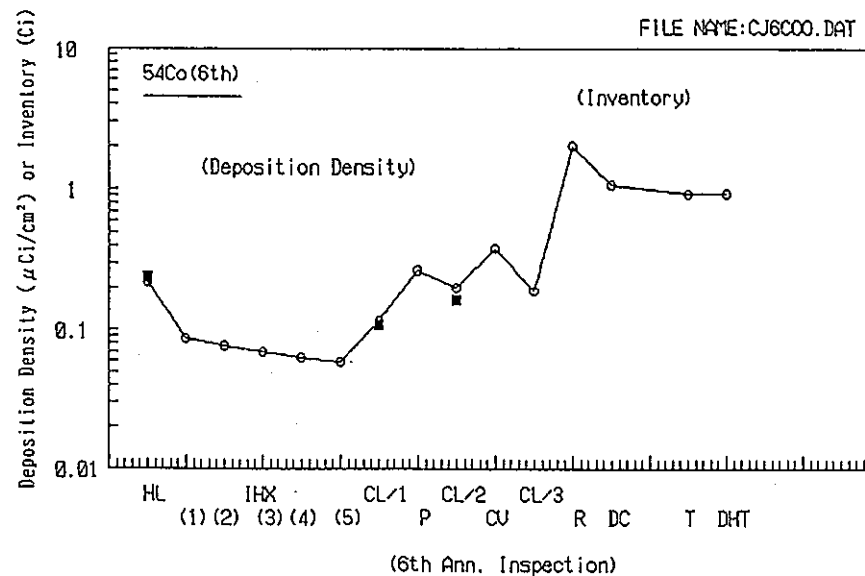
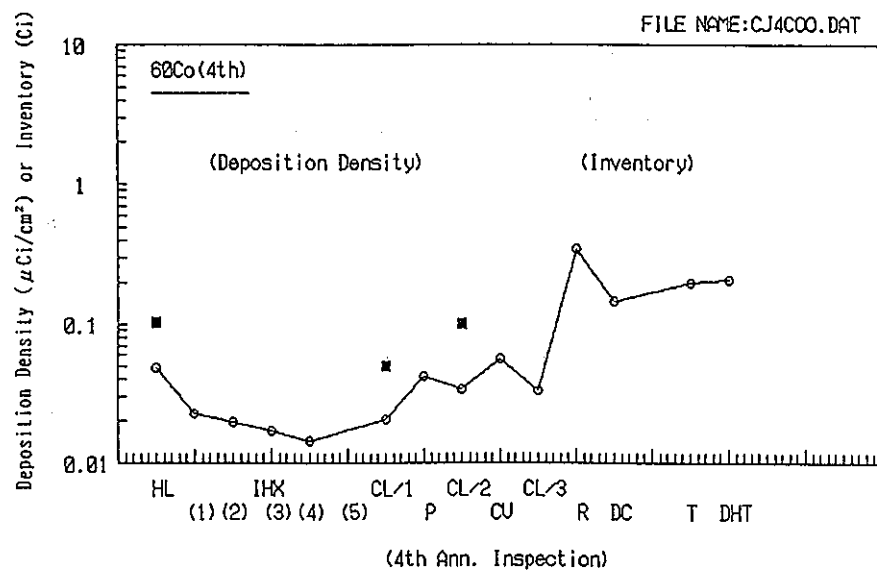
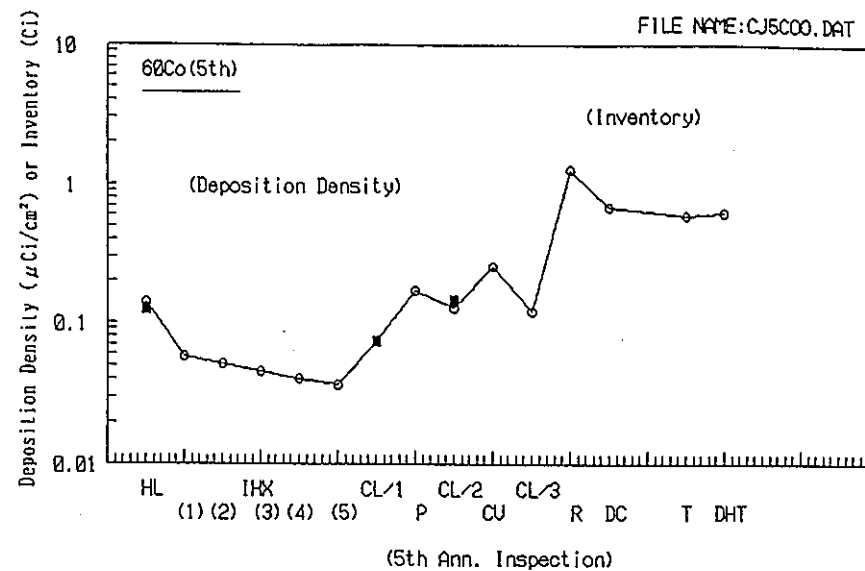
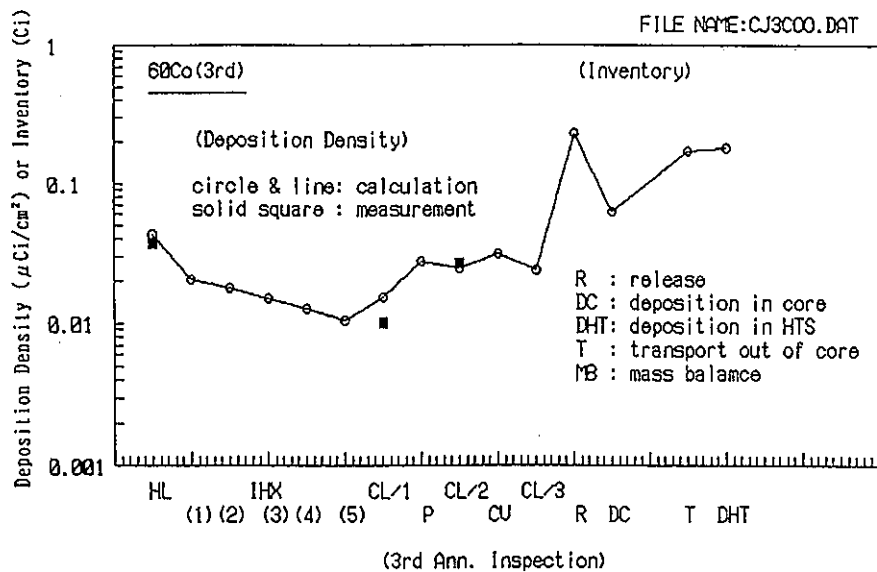
(a) ⁵⁴Mn (1 / 2)

図 5.2-1 CP付着分布の計算と測定結果の比較 (1 / 4)



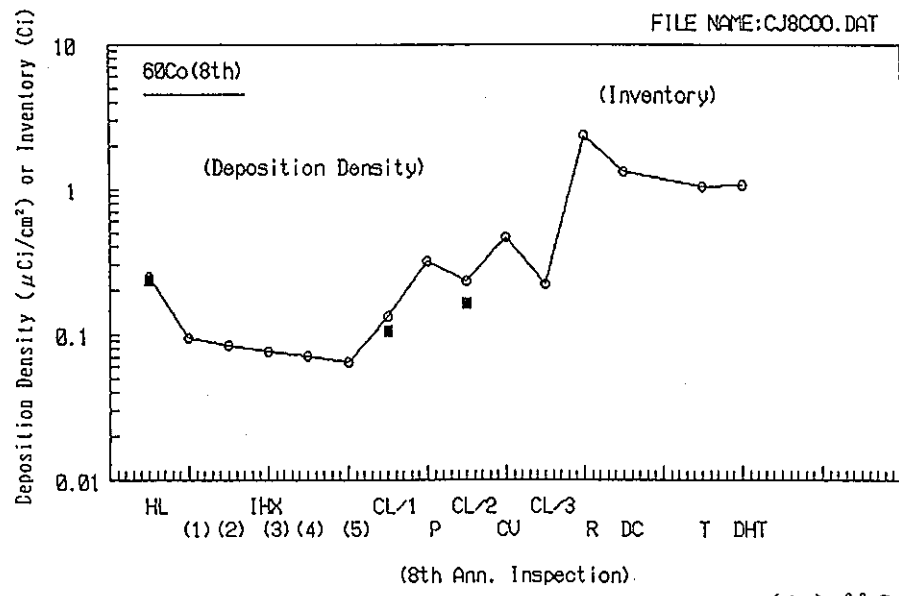
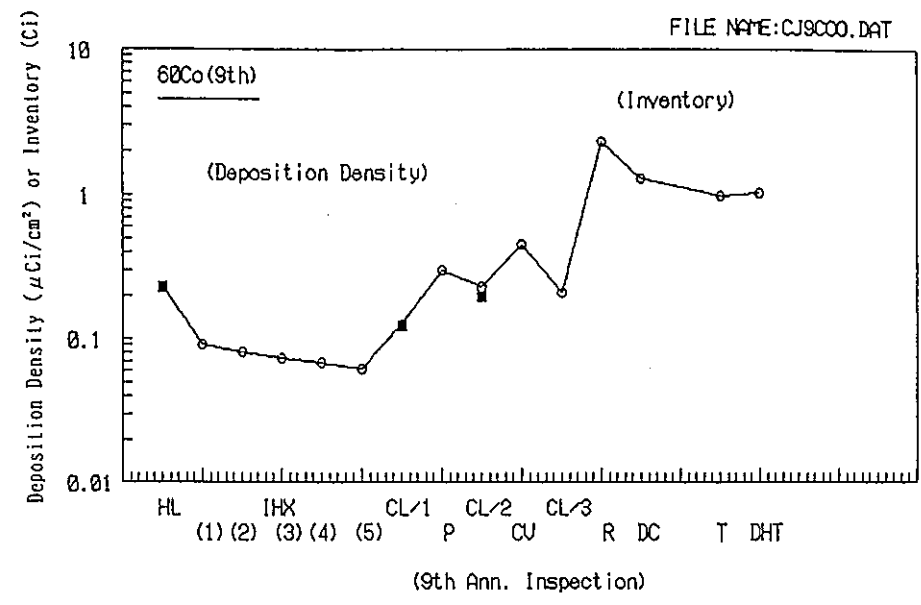
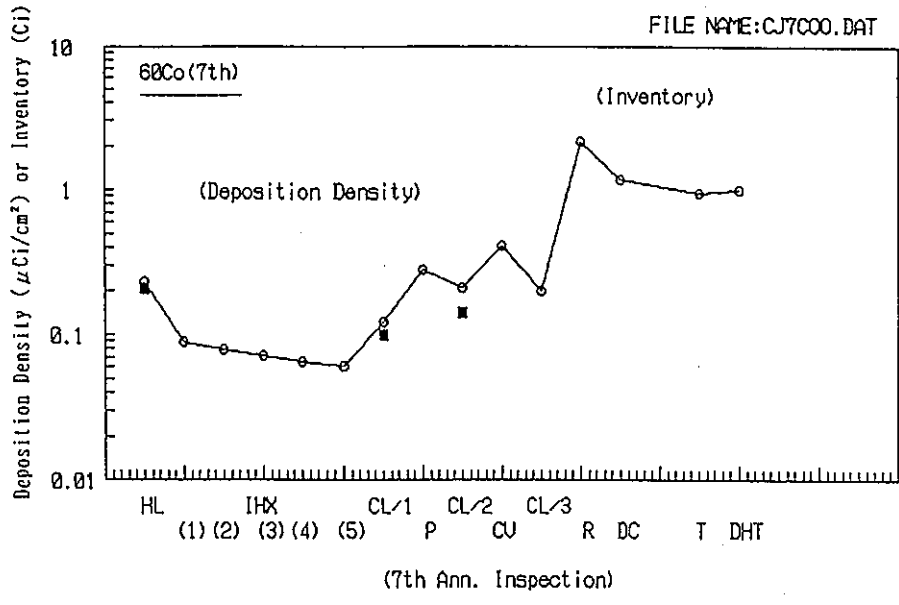
(a) ^{54}Mn (2/2)

図 5.2-1 CP付着分布の計算と測定結果の比較 (2/4)



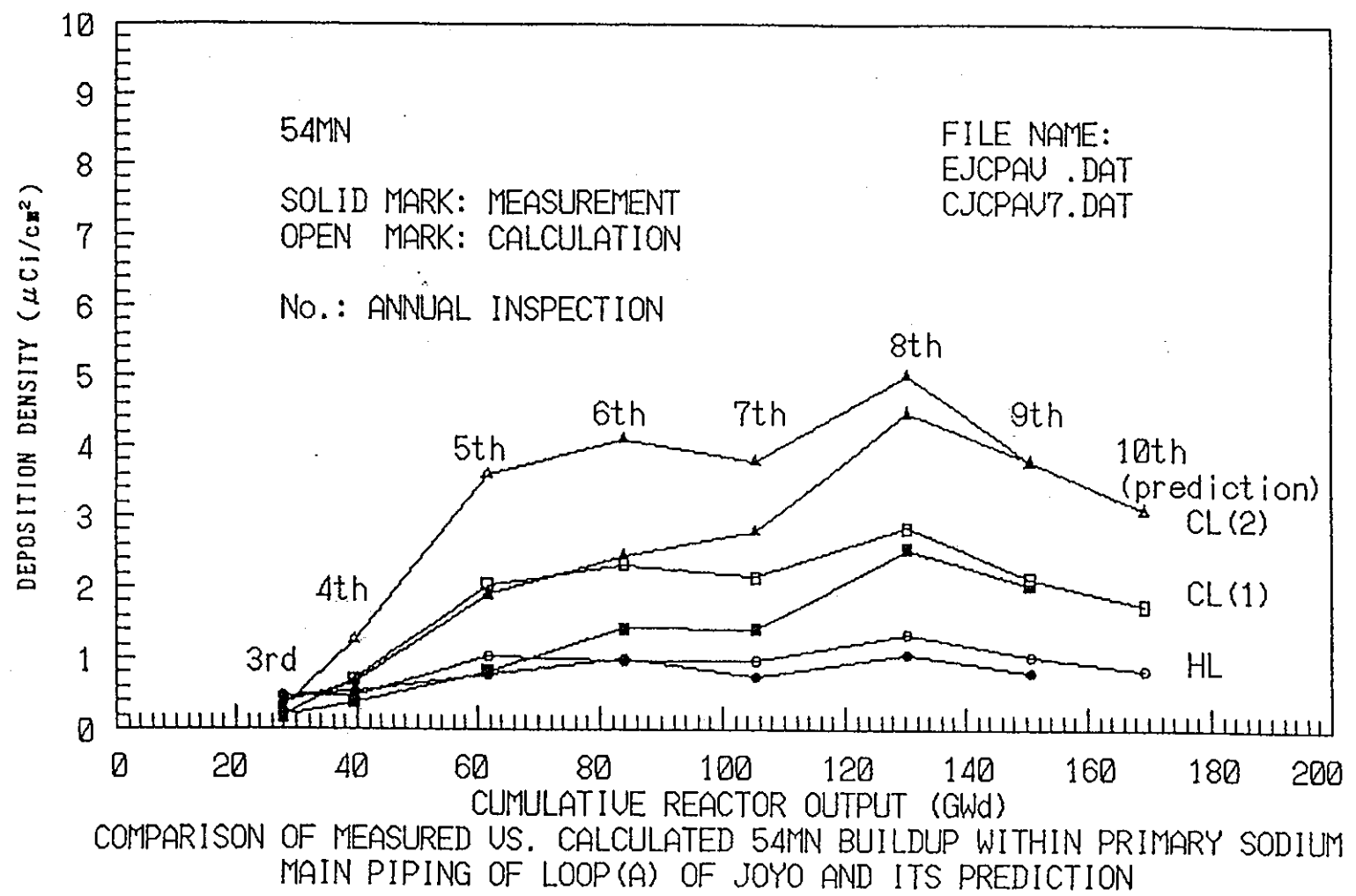
(b) ^{60}Co (1/2)

図 5.2-1 CP付着分布の計算と測定結果の比較 (3/4)

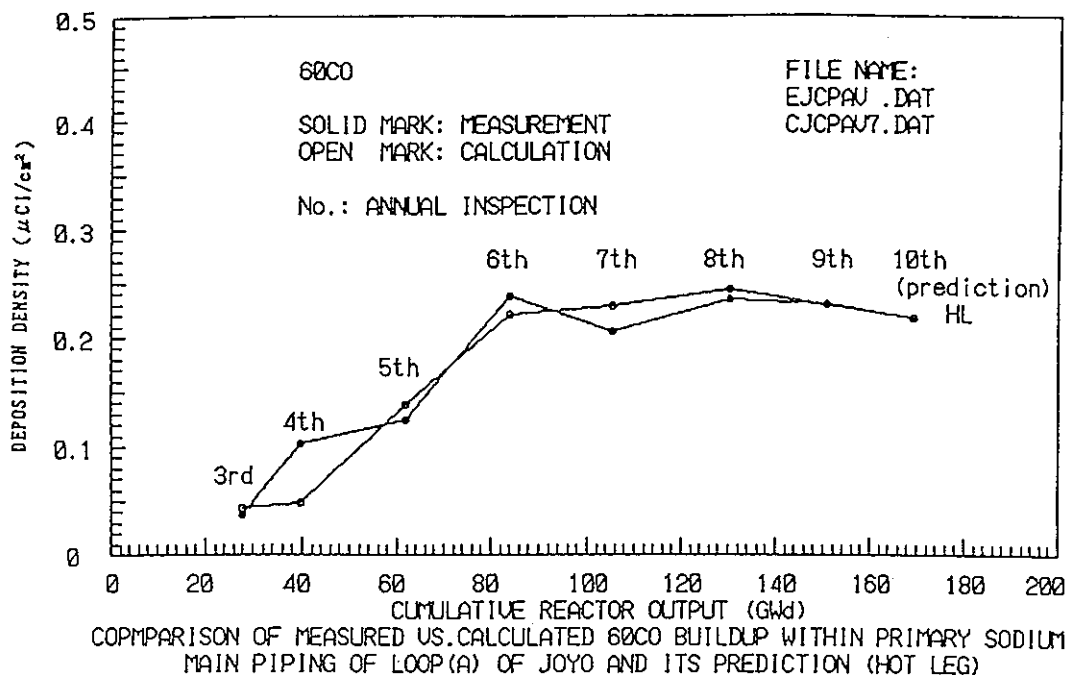


(b) ⁶⁰Co (2 / 2)

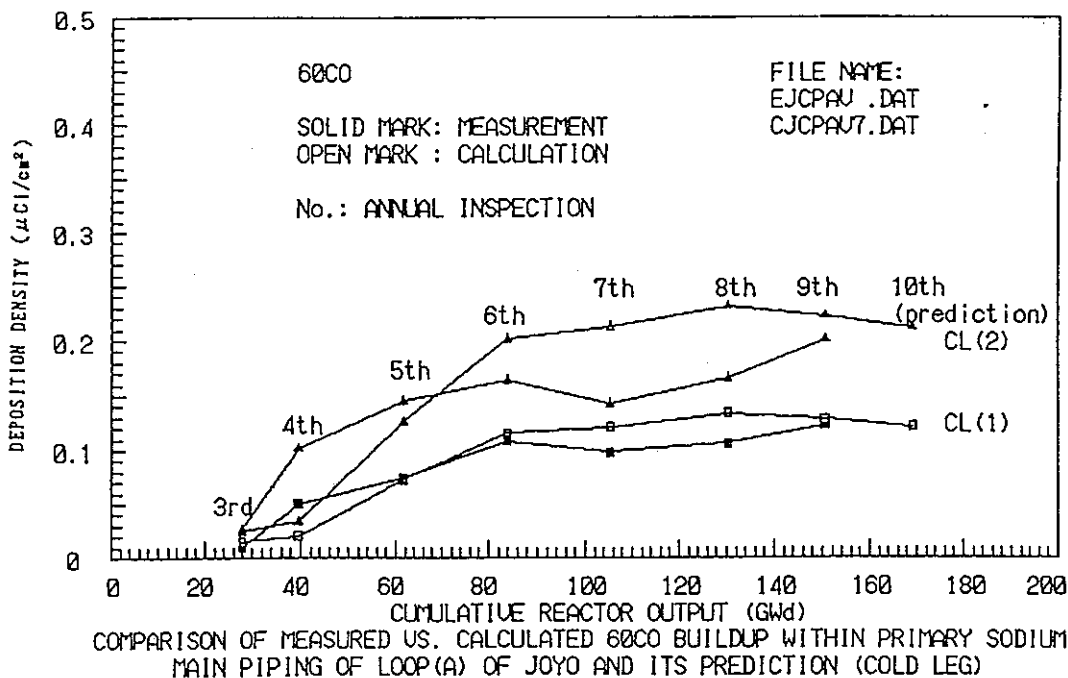
図 5.2-1 CP 付着分布の計算と測定結果の比較 (4 / 4)



(a) ^{54}Mn
 図 5.2-2 CPビルドアップ推移の計算と測定結果の比較 (1/2)



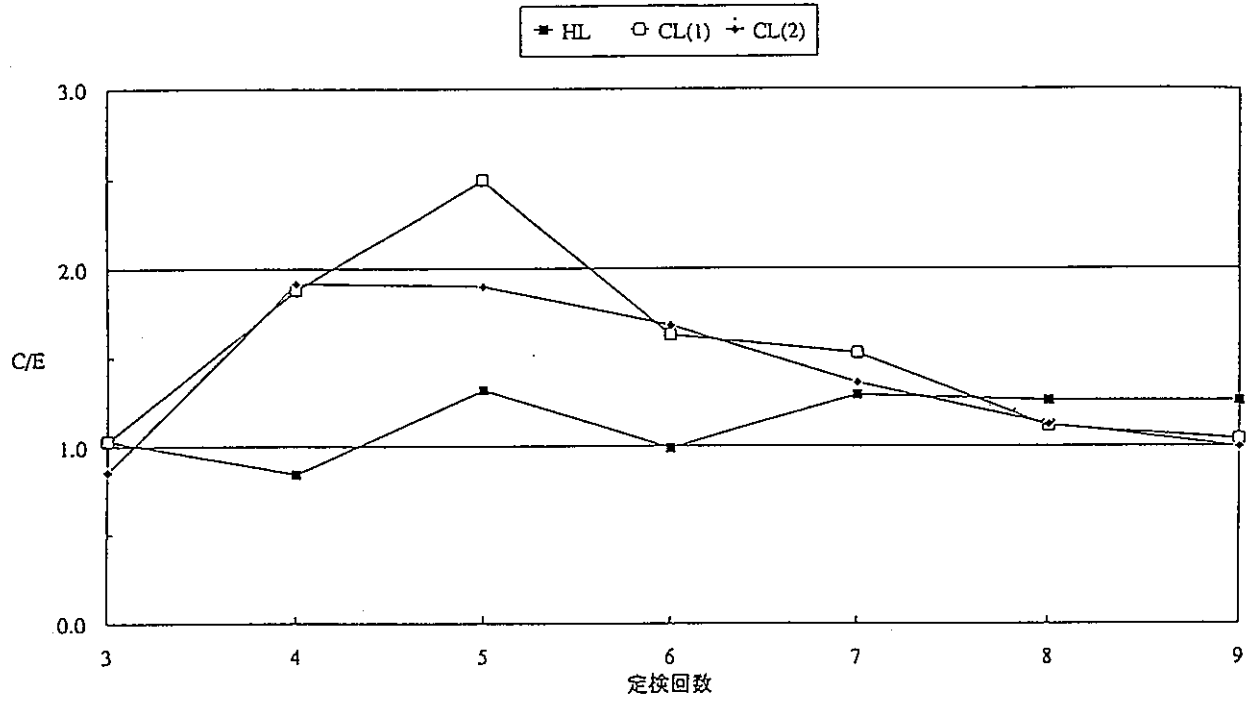
(H L)



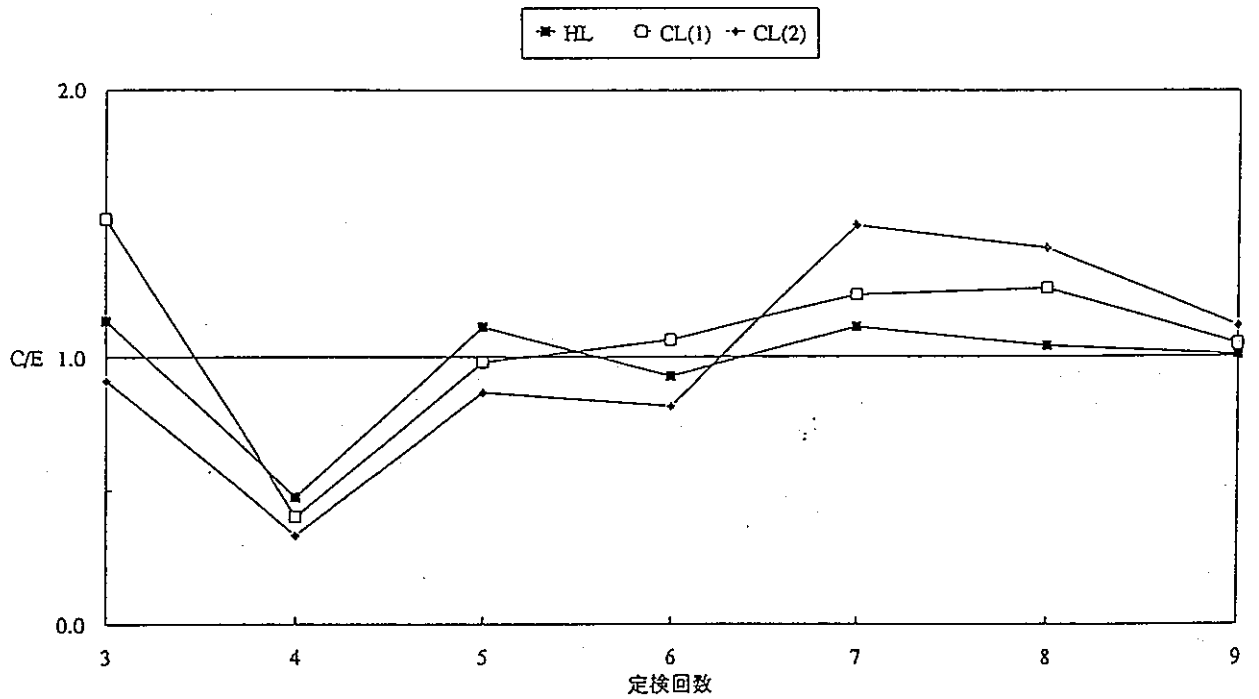
(CL/1 & CL/2)

(b) ^{60}Co

図 5.2-2 CPビルドアップ推移の計算と測定結果の比較 (2 / 2)



(a) ^{54}Mn



(b) ^{60}Co

図 5.2-3 CPビルドアップに対するC/Eの推移

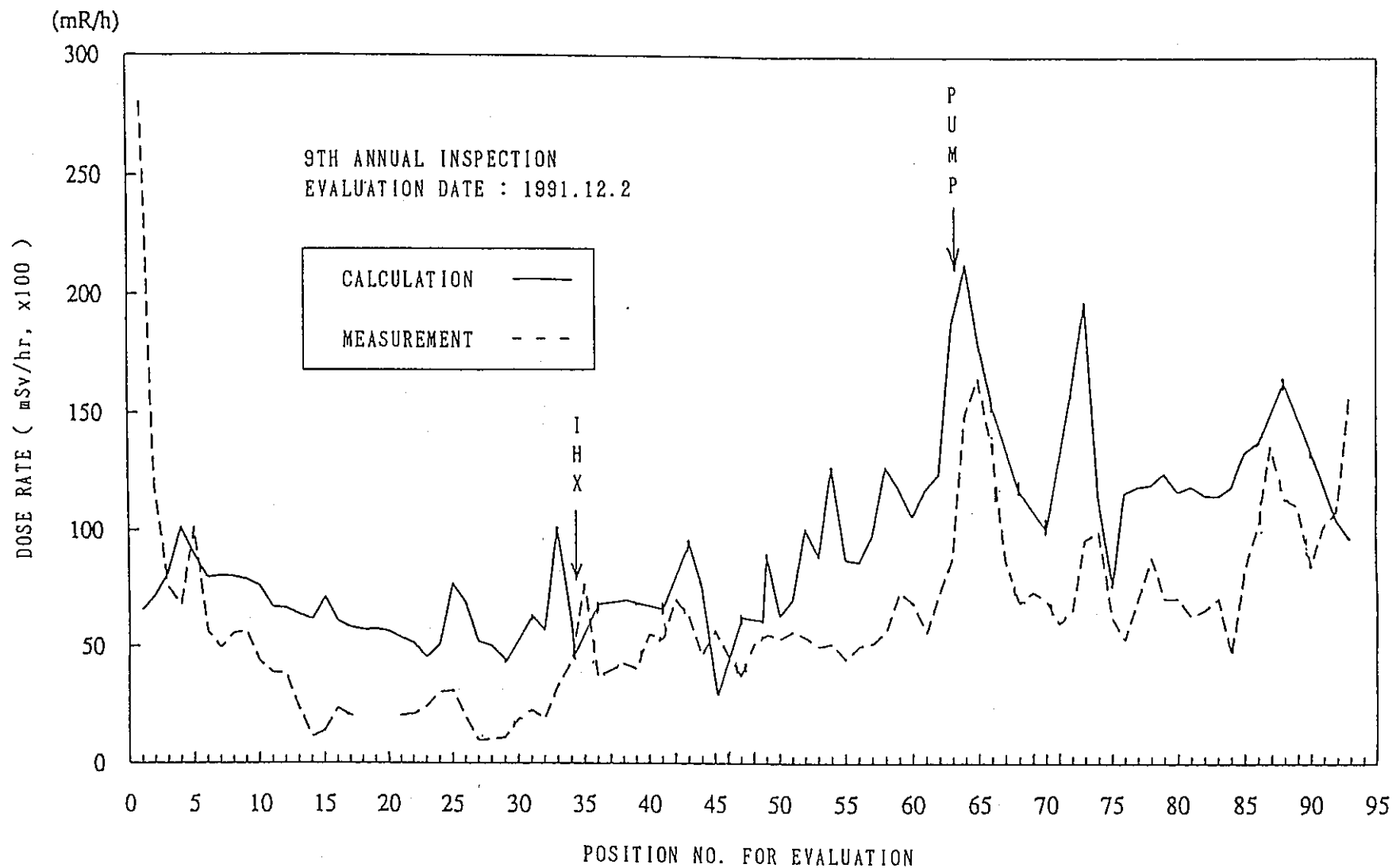
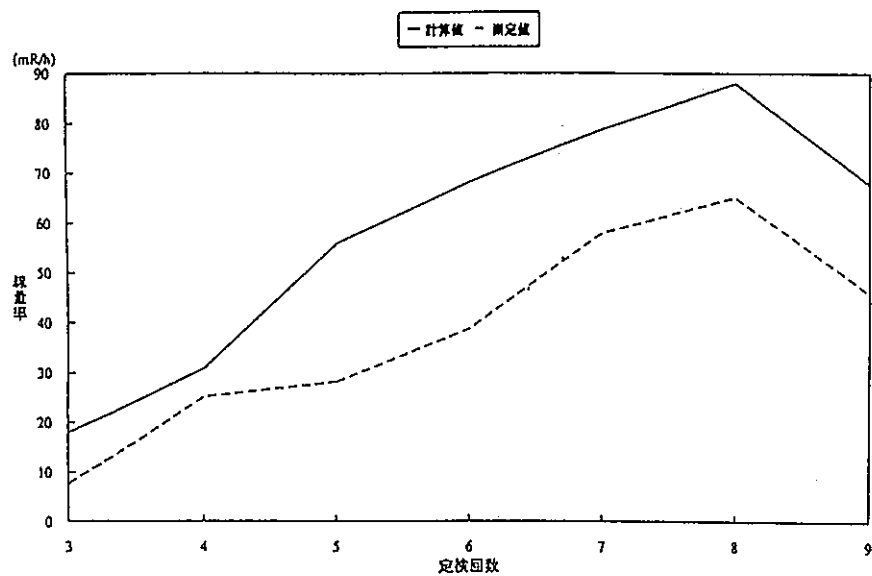
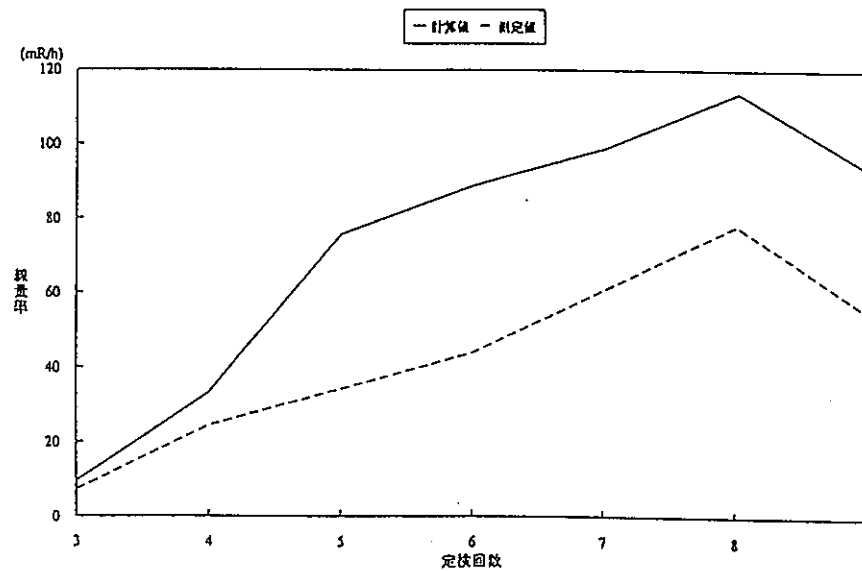


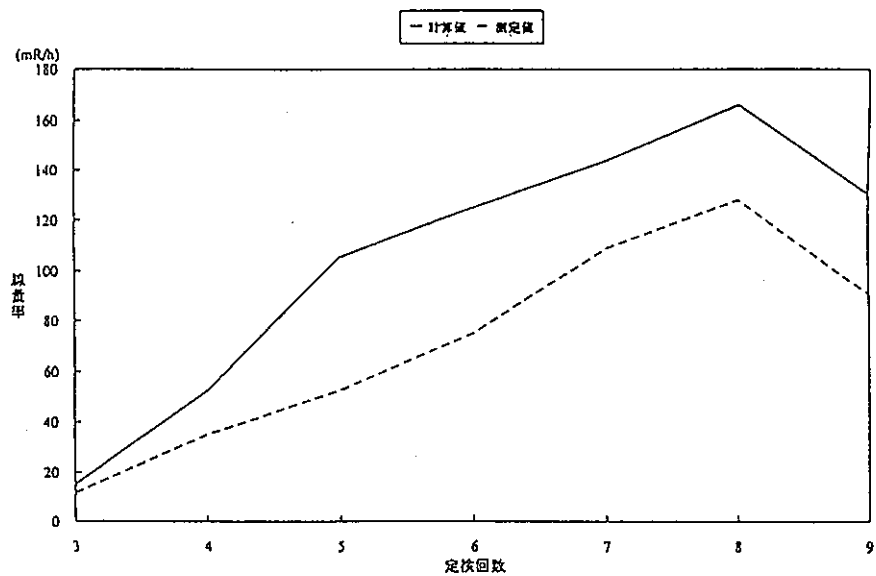
図 5.2-4 1次冷却系主配管線量率分布の計算値と測定値の比較 (第9回定期検査時)



(a) HL



(b) CL/1



(c) CL/2

図 5.2-5 1次冷却系主配管線量率（領域平均）の推移

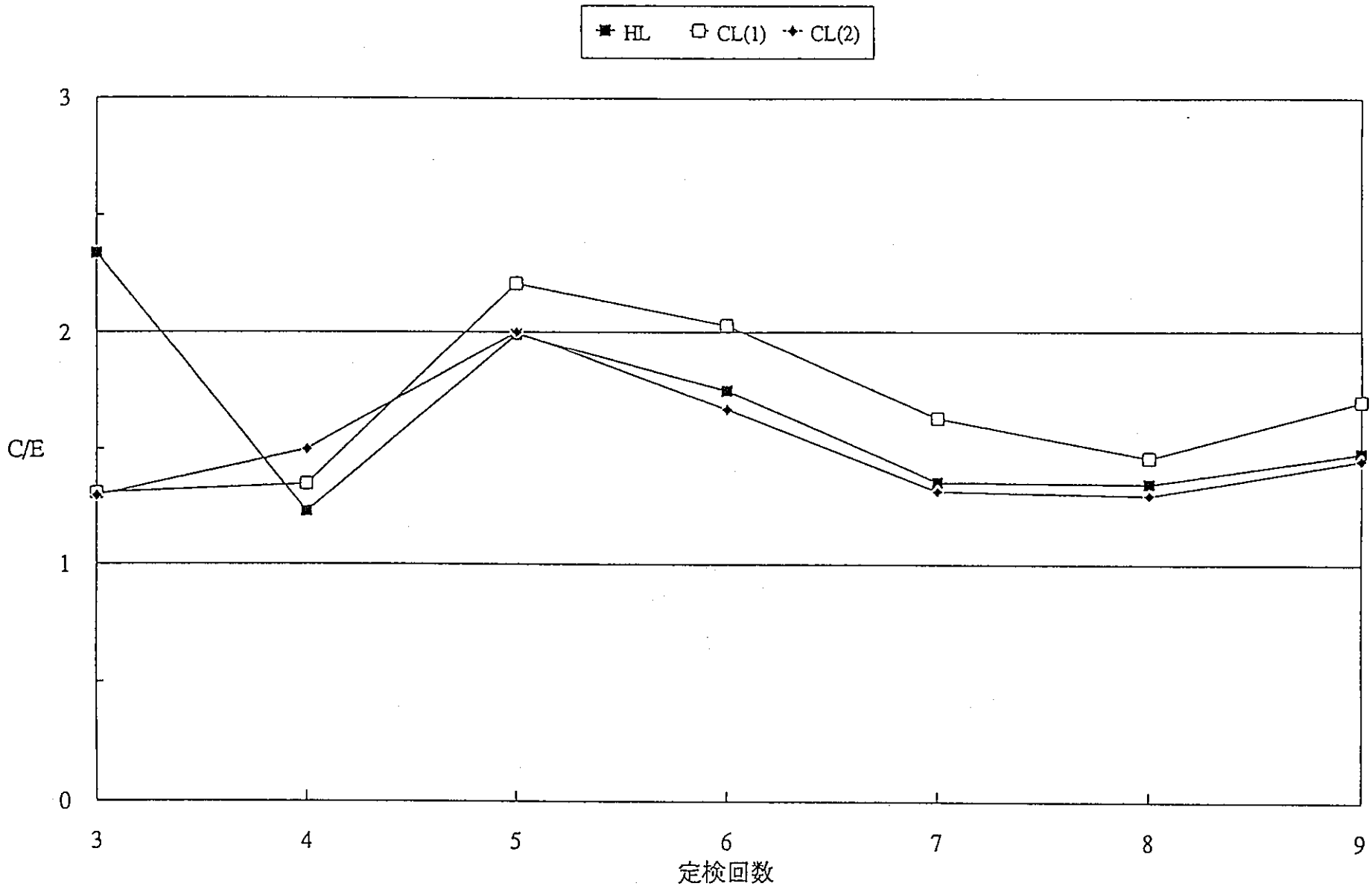
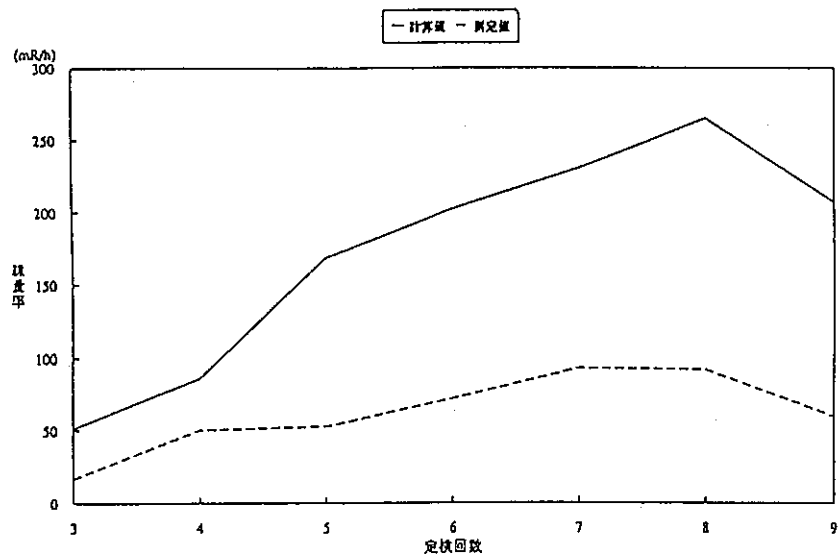
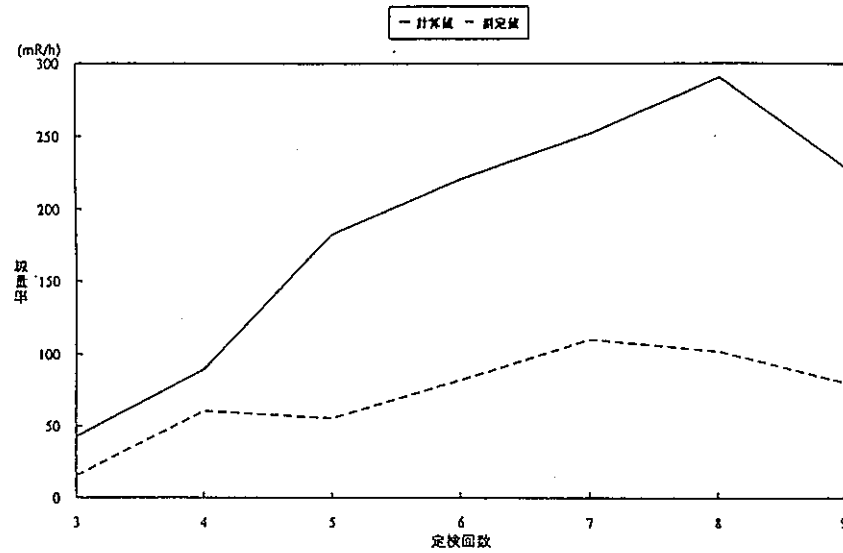


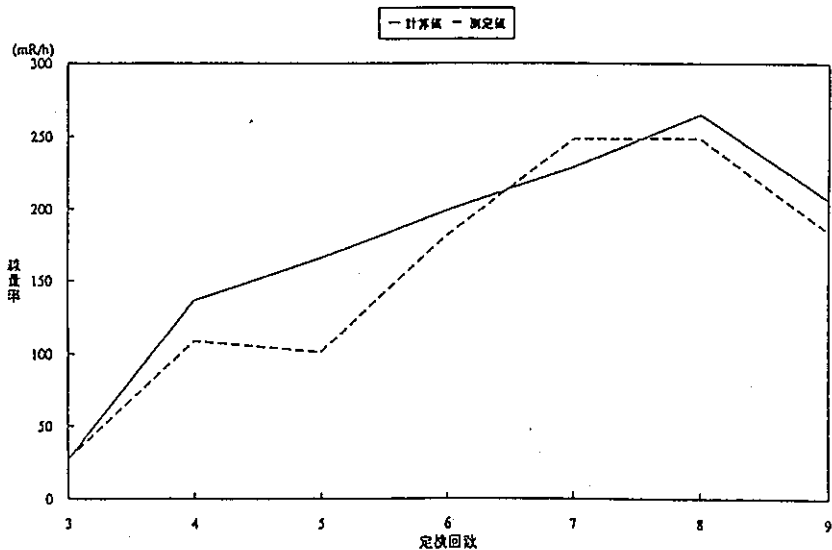
図 5.2-6 1次冷却系主配管線量率（領域平均）のC/Eの推移



(a) 上部 (GL-7000)

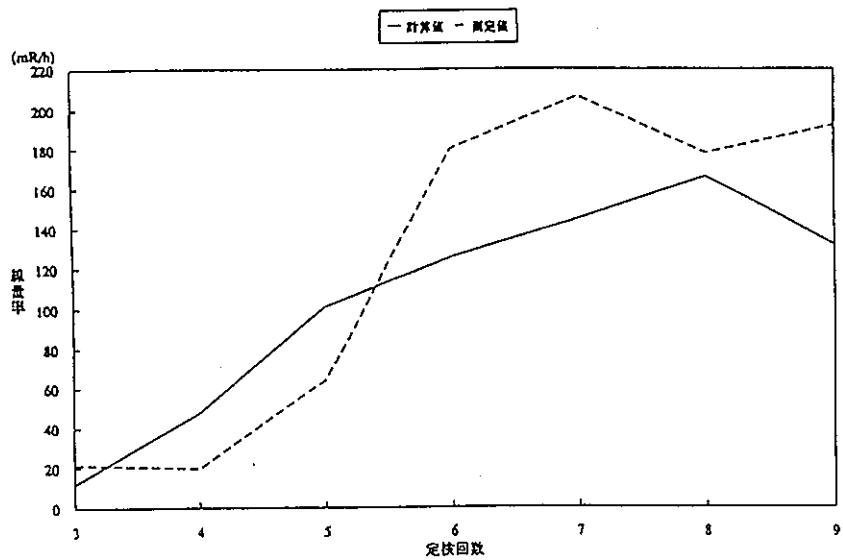


(b) 中央部 (GL-8000)

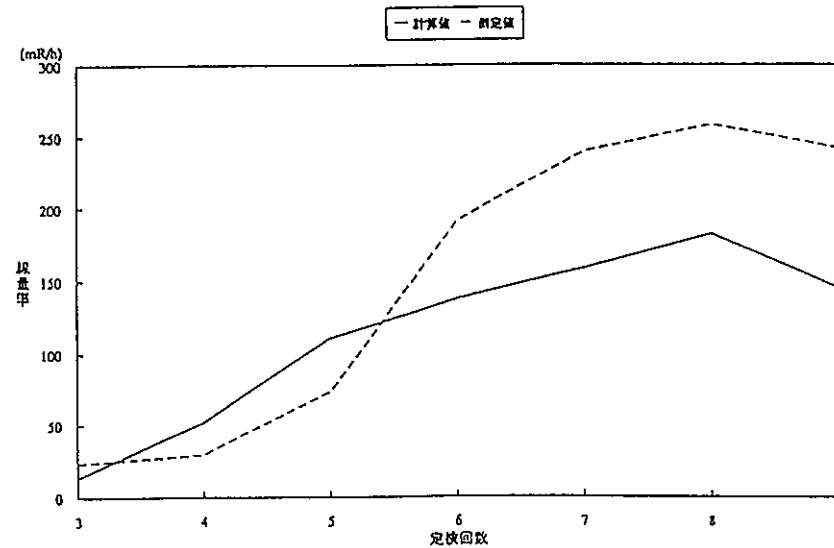


(c) 下部 (GL-9400)

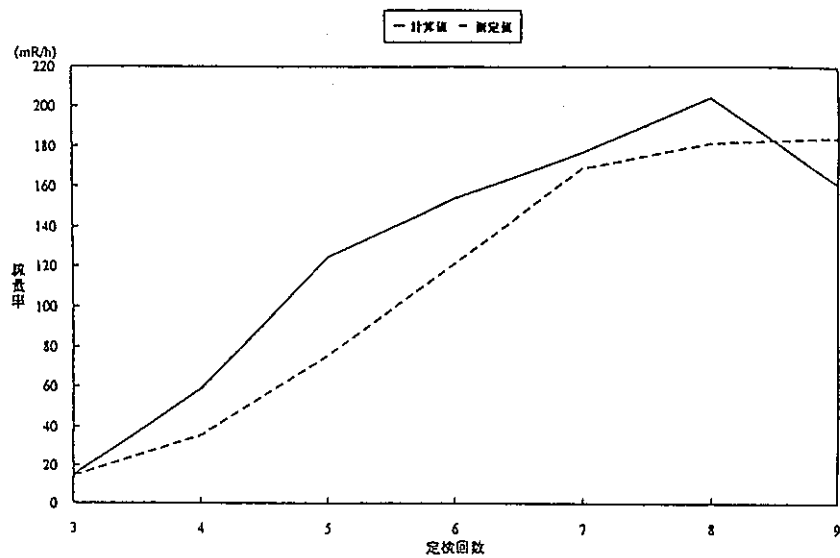
図 5.2-7 I H X線量率 (周方向平均) の推移



(a) 上部 (GL-6463)

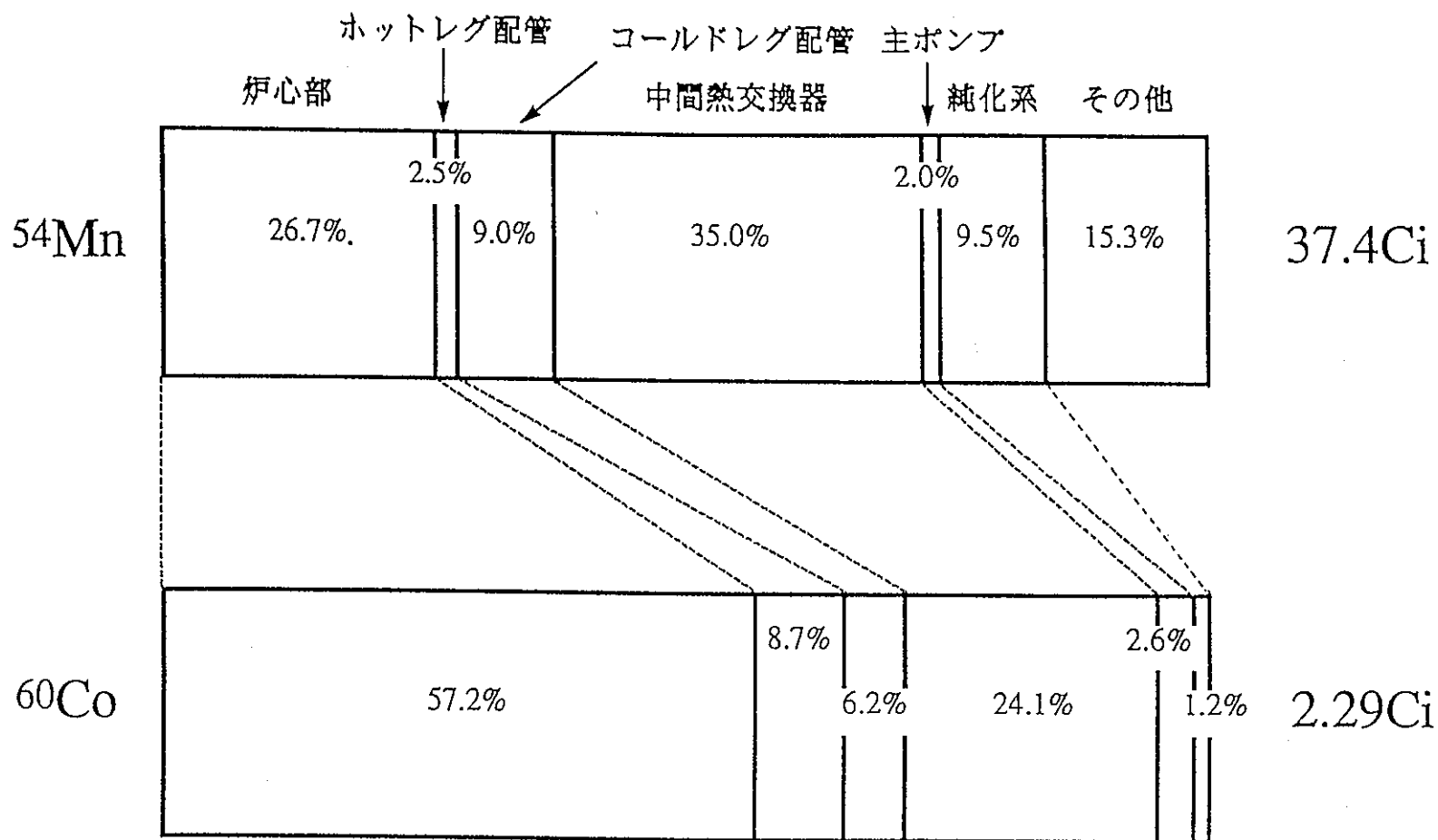


(b) 中央部 (GL-6863)



(c) 下部 (GL-7463)

図 5.2-8 主ポンプ線量率 (周方向平均) の推移



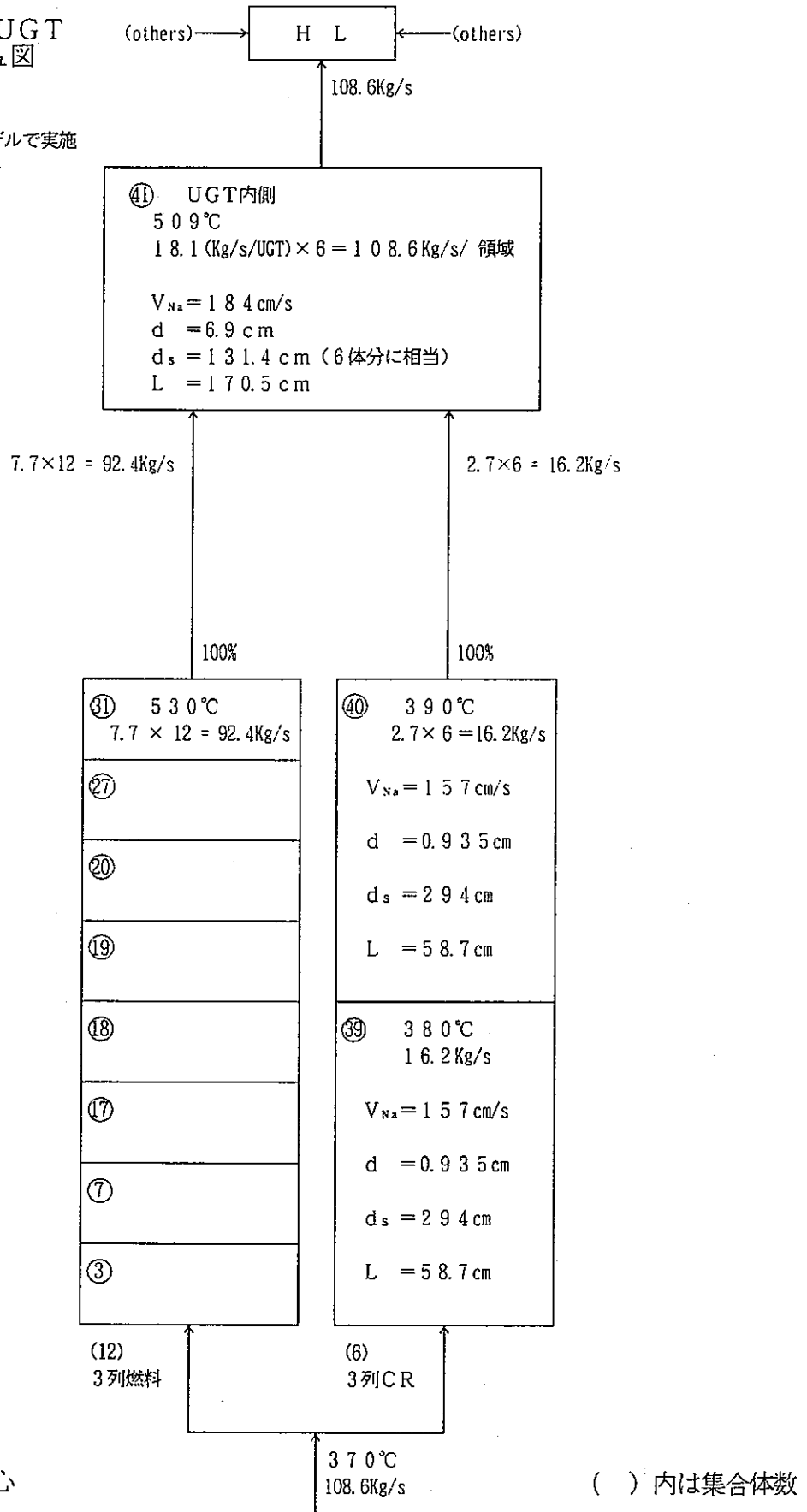
(積算出力 15.1万MWd、実効出力年 4.5efpy)

図 5.2-9 CP蓄積分布の推定 (第9回定期検査時)

(簡易モデル)

CR, CRD-UGT
組込みメッシュ図
(関連部分図)

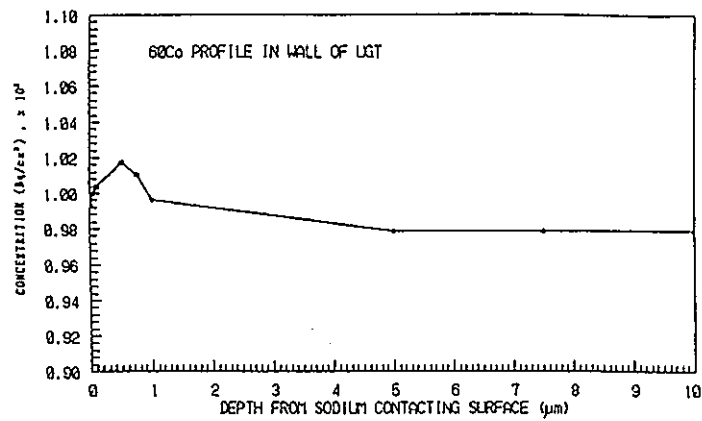
今回の計算は本モデルで実施



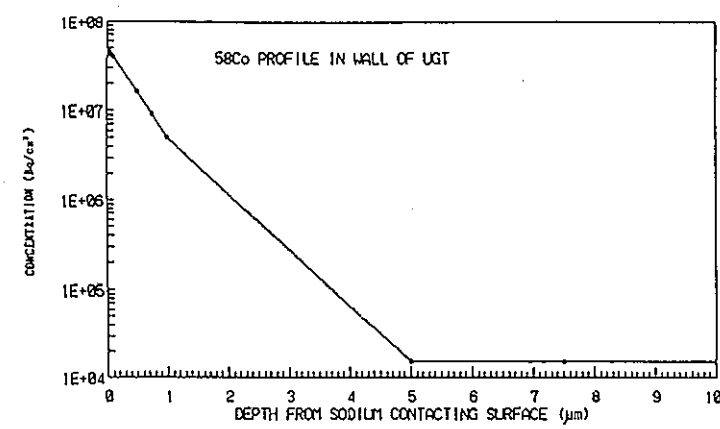
* 標準炉心

() 内は集合体数

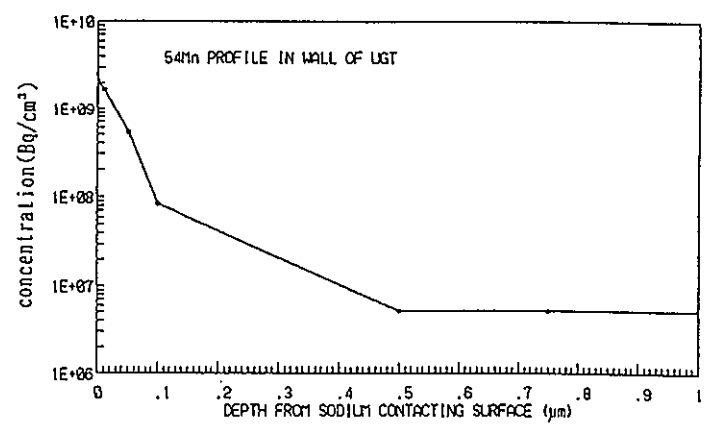
図 5.3-1 UGT 簡易モデル



(a) ⁶⁰Co



(b) ⁵⁸Co



(c) ⁵⁴Mn

图 5.3-2 UGT管壁中CP浓度分布

6. 今後の課題

炉外試験ループにおけるCP挙動試験及び高速炉実プラント「常陽」におけるCP挙動測定により、長年にわたって続けられた高速炉におけるCP挙動解明とその評価手法の開発は、本研究により一つの結論と区切りを得たと考えられる。 今後は主として高速増殖原型炉「もんじゅ」におけるCP測定とその結果による解析コードの検証事例の拡張と実証炉や大型炉あるいは「常陽」Mk-Ⅲ等の設計評価のフェーズとして展開をはかるべきものと考えられる。 そのためにも解決しておくことが望ましく、またこれまでの研究にもかかわらず未だ未解決のまま残されている基礎的諸問題あるいは調整的事項に関する課題は、以下のとおりである。

- ① ナトリウム中における鉄、コバルト放出の酸素濃度依存機構に関する金属学的研究とその確定。
- ② ナトリウムループ管壁CP付着挙動に関して、CL領域におけるマンガン付着機構及びループ全域におけるコバルトの付着機構に関する金属学的研究とその確定。
- ③ ^{54}Mn 溶出抑制を目的とするインヒビショニング法の研究開発。 その一環として被覆管材料中のマンガン濃度と同位体自己拡散溶出の相関性に関する研究。
- ④ 主ポンプオーバーフロー系や炉心部反射体領域等において顕著に認められる、 ^{60}Co の粒子移行現象を取り込んだモデルパラメータの最適化。

7. 結 論

本研究により得られた結論は以下のとおりである。

- ① 原子炉外のナトリウムループに移行するCP核種は、主として ^{54}Mn 、 ^{60}Co でありその他 ^{58}Co が極僅か見いだされる。核種割合は ^{54}Mn が優勢であるが、ホットレグ(HL)では時間経過とともに ^{60}Co の割合が増加する。コールドレグ(CL)では核種割合はほとんど変化せず、「常陽」1次冷却系では ^{54}Mn が ^{60}Co の約20倍となる。これに対して炉心部CP付着に関連する燃料洗浄廃液中では ^{60}Co が最大核種となる。外側反射体洗浄時の発生量が特に多く、総量でドライバ燃料洗浄時の4倍、 ^{60}Co は2.5倍となり、核種割合では ^{54}Mn の1.5倍となる。これはコバルトを含む放射性腐食生成物粒子が炉内滞在中に放射化されたものと考えられる。
- ② 冷却系内の ^{54}Mn ビルドアップ傾向はHLとCLで相違し、HLでは比較的早期に飽和性を示すが、CLではビルドアップ持続の長期化が観察された。 ^{60}Co のそれは全域的に相似し上昇は緩やかであるが、しばしば燃料交換、冷却材中酸素濃度、炉心材料中の不純物コバルト濃度等プラント条件による変動が現れ易い。
- ③ ^{54}Mn のビルドアップ測定結果から推定した管壁付着速度は、HLでは比較的早期には一定となり、これは炉心材料中の放射化生成の飽和挙動によく対応している。一方、CLでは付着速度は炉心材料中の放射化生成の飽和挙動を越えて時間経過とともに上昇し続け、ビルドアップの長期化がもたらされた。 ^{60}Co のビルドアップ測定結果から推定した管壁付着速度には、上述のプラント条件による顕著な変動と剥離等による管壁付着物の再放出過程を示唆する変動が現れるが、これを除けば全域的に炉心材料中の放射化生成の推移に対応した緩やかな上昇を示す。
- ④ 燃料交換は炉心材料の放射化生成、従って管壁付着速度のレベルを低下させるとともに、その上昇を緩やかなものとする。その効果は半減期の長い ^{60}Co で特に顕著であり、「常陽」の場合60～70%程度の削減をもたらしている。これは今後燃料の高燃焼度化を進める場合 ^{60}Co のビルドアップも進行することを意味している。また、冷却材中酸素濃度の ^{60}Co の放出、従って付着速度に与える影響は鋭く、その抑制は ^{60}Co 低減化のための極めて重要な因子である。
- ⑤ ^{54}Mn の配管壁付着分布は初期にはHLが優勢であるが、付着速度のふるまいの相違を反映して時間経過とともにCLが優勢となり、分布パターンはCLがHLを圧倒す

る。 ^{60}Co の分布はHLで優勢であるが、上昇率は全域的に同等で時間経過にともなう分布パターンの変化はない。その上昇具合はHLでの ^{54}Mn と同様に緩やかである。また、CLで観察された管壁付着速度に対する流速効果は、 ^{54}Mn に対して(レイノルズ数) $^{1.0}$ 、 ^{60}Co に対して(レイノルズ数) $^{1.1}$ となった。

- ⑥ これ等の結果からCPの管壁付着機構につき次の結論を得た。即ち、 ^{54}Mn のHLでの付着機構は管壁中拡散であり、CLでは管壁面上での合金粒子形成が主である。CLでの付着速度の上昇は、ナトリウム中で管壁表面に ^{54}Mn を取り込むニッケル、鉄分に富んだ微視的組織の形成の進行によりもたらされていると考えられる。

^{60}Co の付着機構はHLを含め全域的に管壁面上での合金粒子形成が主で、鉄分に富んだ微視的表面組織がサイトとなっていると考えられる。HLでの付着機構に相違があるのは、マンガンのナトリウム中溶解度は比較的高くコバルトは極めて低いこと、更に付着サイト形成の温度依存性によりもたらされていると考えられる。

- ⑦ ナトリウム系内のCP挙動に関する「溶解・析出モデル」のモデルパラメータについて、感度調査と前述の評価結果に基づき最適化を図り、 ^{54}Mn と ^{60}Co のビルドアップに対し全期間を通じてそれぞれ $C/E = 0.9 \sim 2.5$ と $0.4 \sim 1.5$ 、及び線量率分布に対して $1.2 \sim 2.2$ を得た。これ等の評価精度は、 ^{54}Mn 付着速度のCL領域における加速現象に対応した界面前進速度パラメータの時間変動、及び冷却材中酸素濃度変動のより詳細な考慮により改善されるものである。

- ⑧ 高速炉CP挙動に対する「溶解・析出モデル」は、冷却材の高流速部に対しては現状で ^{54}Mn 、 ^{60}Co 挙動の双方に対して満足のゆく再現性を示すが、主ポンプオーバーフロー系や炉心外側反射体等の低流速部では ^{60}Co に対して過少評価傾向を示す。これは冷却系内のコバルト挙動には粒子として移行するもの(コバルト-フェライト粒子を推定)が存在し、これ等は冷却材滞留部に集積する傾向(一種の吹き溜まり現象)を有するためと推定される。特に外側反射体等の炉心部では、これ等腐食生成物が更に放射化される結果、強い ^{60}Co を含むCP付着物を形成するものと考えられる。

謝 辞

本研究の実施にあたり検査開発（株） 佐井川拓也氏、同 栴井智彦氏、及び日立エンジニアリング（株） 照山英彦氏、同 竹内純氏には、測定データの取得と整理、あるいは計算作業等において協力戴きお世話になったことをこゝに記し謝意を表します。

参 考 文 献

- [1] 田村政昭, 吉田英一, 前田幸基, 加納茂機, 砂押 博, 二瓶 勲, 「FBRにおけるCP問題と対策 (ALPHABET計画) - 得られた成果と今後の展望 (総合報告)」, PNC SN 9410 88-047, 1988年4月
- [2] 飯沢克幸, 木村重人, 二瓶 勲, 大戸敏弘, 高橋和雄, 前田幸基, 「高速炉1次ナトリウム冷却系における放射性腐食生成物挙動解析コード (PSYCHE) の改良と整備 (アルファベット計画 CP挙動解析・抑制技術開発)」, PNC SN 9410 89-072, 1989年4月
- [3] 高橋和雄, 大戸敏弘, 前田幸基, 飯沢克幸, 升井智彦, 佐久間和彦, 溝尾宣辰, 山下芳興, 「『常陽』におけるCP沈着分布の測定と評価」, PNC SN 9410 90-016, 1989年12月
- [4] Md. Ali Zulquarnain, K. Takahashi, S. Suzuki, T. Masui, K. Iizawa, T. Funada, K. Kinjo, 「Measurement and Evaluation of Radioactive Corrosion Product Behaviour in Primary Sodium Circuits of JOYO」, PNC SN9410 90-114, July 1990
- [5] 飯沢克幸, 茶谷恵治, 伊藤和寛, 佐井川拓也, 升井智彦, 鈴木惣十, 金城勝哉, 「『常陽』におけるCP沈着分布の測定と評価 (II)」, PNC ZN 9410 92-224, 1992年7月
- [6] 住野公造, 野口浩二, 安 哲徳, 伊藤芳雄, 郡司泰明, 照沼誠一, 「高速実験炉『常陽』1次ナトリウム純化系コールドトラップ線量当量率測定試験報告書 (第8回定期検査時測定結果)」, PNC PN 9430 91-004, 1991年2月
- [7] 飯沢克幸, 「ナトリウム冷却材の不純物抑制と被ばく低減」, 原子力工業, 第33巻 第11号 (1988) p 62
- [8] W.F. Brehm, 「Effect of Oxygen in Sodium upon Radionuclide Release from Austenitic Stainless Steel」, Proc. Specialists' Meeting on Fission and Corrosion Product Behaviour in Primary Circuits of LMFBRs, Dimitrovgrad (1975) p186
- [9] 横田憲克等, 「液体ナトリウム中におけるステンレス鋼の腐食生成物の沈着」, 日本金属学会誌, 第52巻 第3号 (1988) p 320 ;

- 本金属学会誌, 第52巻 第3号(1988) p320 ;
- 横田憲克等, 「ナトリウム中に溶出したステンレス鋼成分の析出挙動におよぼす表面材質の影響」, 同上, 第52巻 第10号(1988) p981 ;
- 横田憲克等, 「液体ナトリウム中におけるMn及びCoの溶出とSUS304鋼表面への沈着挙動」, 同上, 第53巻 第2号(1989) p175
- [10] M.V. Polley et al, 「An Analysis of Radioactive Corrosion Product Transfer in Sodium Loop Systems」, J. Nucl. Mater., 75 (1978) p226
- [11] K. Iizawa et al, 「Calculational Model and Code for Corrosion Product Transfer in Sodium System」, Proc. Specialists' Meeting on Fission and Corrosion Product Behaviour in Primary Circuits of LMFBRs, Karlsruhe, (1987) p191
- [12] 石倉 明, 中山忠和, 竹内 純, 照山英彦, 「高速炉CP線源評価システムに係わるプログラム整備作業」, PNC PJ9124 92-006, 1992年2月
- [13] 石倉 明, 中山忠和, 竹内 純, 照山英彦, 「放射性腐食生成物挙動解析コードシステム - PSYCHE91 (マニュアル)」, PNC PJ9124 92-006 別冊, 1992年2月
- [14] 大森宏之, 一関 強, 会川英昭, 清宮勇二, 「大洗工学センターにおける放射性廃棄物管理の実績と現状」, 動燃技報, No. 82 (1992) pp74-78
- [15] 小林孝典, 井上設生, 鹿志村洋一, 今井勝友, 砂押 博, 仲村 喬, 「ナトリウム洗浄廃液中の放射性腐食生成物(CP)の除去技術開発(アルファベット計画 Phase II)」, PNC ZN9410 91-255, 1991年7月
- [16] 鈴木寿章, 伊東秀明, 江幡亨三, 久野修一, 「高速実験炉『常陽』燃料洗浄設備の運転経験報告書」, PNC PN9410 91-155, 1991年4月
- [17] W.F. Brehm et al, 「Measurement and Control of Radioactive Material Transport in the FFTF」, Proc. the Third International Conference of Liquid Metal Engineering and Technology for Energy Production, Oxford, (1984) p493
- [18] 実験炉部 第8Bワーキンググループ(取りまとめ担当 高橋和雄), 「『常陽』1次ナトリウム純化系コールドトラップの圧力損失増加原因の究明と対策-第8Bワーキンググループの検討結果」, PNC SN9410 90-023,

1990年1月

- [19] W.F. Brehm et al, 「Corrosion Product Radionuclide Buildup in Fast Flux Test Facility Heat Transport System Cells」, Nucl. Tech., vol 95 (1991) pp148-155
- [20] A.W. Thorley, private communication (横田憲克氏の好意による)
- [21] 飯沢克幸, 菊地隆雄, 川上幸雄, 内藤袈裟博, 高井敏雄, 吉利 醇, 高荷 智,
「放射性腐食生成物挙動試験(第8報) - 放射性腐食生成物の移動解析と抑制法の検討」、PNC SN941 82-163, 1982年7月

付録1 「常陽」CP挙動評価計算リスト

表A1 「常陽」CP挙動評価計算リスト(1/2)

ケースNo.	プラント	パラメータ					不純物Co 濃度 (ppm)	HL冷却材 濃度 (℃)	HL領域 沈着/腐食 オプション	評価期間	対象核種	計算日	備考
		拡散係数(D)		化学的分配 係数(β')	仮想界面移動速度								
		Mn54	Co60		炉心	冷却系							
91-01	MK-I	D	D	$10\beta'$	*1	*2	100	466	Uc	第3定	Mn54,Co58,Co60	1992/1	reference
91-02	MK-I	5D	5D	$10\beta'$	*1	*2	100	466	Uc	第3定	Mn54,Co58,Co60	1992/1	拡散係数の感度評価
91-03	MK-I	0.2D	0.2D	$10\beta'$	*1	*2	100	466	Uc	第3定	Mn54,Co58,Co60	1992/1	
91-04	MK-I	D	D	$5\beta'$	*1	*2	100	466	Uc	第3定	Co58,Co60	1992/1	化学的分配係数の感度評価
91-05	MK-I	D	D	β'	*1	*2	100	466	Uc	第3定	Co58,Co60	1992/1	
91-06	MK-I	D	D	$10\beta'$	5倍	5倍	100	466	Uc	第3定	Mn54,Co58,Co60	1992/1	付着速度の感度評価
91-07	MK-I	D	D	$10\beta'$	10倍	10倍	100	466	Uc	第3定	Mn54,Co58,Co60	1992/1	
91-08	MK-II	D	D	$10\beta'$	*1	*2	100	466	Uc	第4～9定	Mn54,Co58,Co60	1992/1	reference
91-09	MK-II	5D	5D	$10\beta'$	*1	*2	100	466	Uc	第4～9定	Mn54,Co58,Co60	1992/1	拡散係数の感度評価
91-10	MK-II	0.2D	0.2D	$10\beta'$	*1	*2	100	466	Uc	第4～9定	Mn54,Co58,Co60	1992/1	
91-11	MK-II	D	D	$5\beta'$	*1	*2	100	466	Uc	第4～9定	Co58,Co60	1992/1	化学的分配係数の感度評価
91-12	MK-II	D	D	β'	*1	*2	100	466	Uc	第4～9定	Co58,Co60	1992/1	
91-13	MK-II	D	D	$10\beta'$	5倍(*1)	5倍(*2)	100	466	Uc	第4～9定	Mn54,Co58,Co60	1992/1	付着速度の感度評価
91-14	MK-II	D	D	$10\beta'$	10倍(*1)	10倍(*2)	100	466	Uc	第4～9定	Mn54,Co58,Co60	1992/1	

*1: ①7βUd領域

- ・炉心下部 (MK-Iは下部ブランケット、MK-IIは下部反射体及び下部プレナム)
- ・外側反射体(A)

②Uc領域 (パラメータ操作の対象としない)

- ・上記以外の炉心領域

*2: ①Uc領域 (パラメータ操作の対象としない)

- ・HL配管
- ・炉容器からOF/T入口までの配管 (往路)

②Ud領域

- ・OF/T出口から炉容器入口までの配管 (復路)
- ・IHX及びCL(1)配管

③7βUd領域

- ・ポンプ及びCL(2)&(3)

表A1 「常陸」CP挙動評価計算リスト(2/2)

ケースNo.	プラント	パラメータ					不純物Co 濃度 (ppm)	HIL冷却材 濃度 (℃)	HIL領域 比着/腐食 オプション	評価期間	対象核種	計算日	備考
		拡散係数(D)		化学的分配 係数(β')	仮想界面移動速度								
		Mn54	Co60		炉心	冷却系							
91-15(1)	MK-I	3D	5D	15 β'	*1	*2	100	466	Uc	第3定	Mn54,Co58,Co60	1992/2	最適評価
91-15(2)	MK-I	D	5D	15 β'	0.5倍(*1)	0.5倍(*2)	100	466	Uc	第3定	Mn54,Co58,Co60	1992/2	
91-15(3)	MK-I	1.1D	10D	10 β'	0.5倍(新*1)	0.5倍(新*2)	100	466	Uc	第3定	Mn54,Co58,Co60	1992/2	
91-15(4)	MK-I	1.1D	10D	10 β'	0.5倍(新*1)	0.5倍(新*2)	100	500	Uc	第3定	Mn54,Co58,Co60	1992/2	
91-15(5)	MK-I	1.1D	-	-	0.8倍(新*1)	0.8倍(新*2)	-	500	Uc	第3定	Mn54	1992/2	
91-15(6)	MK-I	-	10D	10 β'	0.3倍(新*1)	0.3倍(新*2)	100	500	Uc	第3定	Co58,Co60	1992/2	
91-16(1)	MK-II	0.5D	5D	5 β'	5倍	5倍	100	466	Uc	第4~9定	Mn54,Co58,Co60	1992/2	最適評価
91-16(2)	MK-II	0.8D	5D	5 β'	2倍	2倍	100	466	Uc	第4~9定	Mn54,Co58,Co60	1992/2	
91-16(3)	MK-II	0.8D	10D	10 β'	1.8倍(新*1)	1.8倍(新*2)	200	466	Uc	第4~9定	Mn54,Co58,Co60	1992/2	
91-16(4)	MK-II	0.8D	10D	10 β'	1.8倍(新*1)	1.8倍(新*2)	200	500	Uc	第4~9定	Mn54,Co58,Co60	1992/2	
91-16(5)	MK-II	0.8D	10D	5 β'	1.8倍(新*1)	1.8倍(新*2)	100	500	Uc	第4~9定	Mn54,Co58,Co60	1992/2	
91-16(6)	MK-II	0.6D	-	-	1.8倍(新*1)	1.8倍(新*2)	-	500	Uc	第4~9定	Mn54	1992/2	
91-16(7)	MK-II	-	10D	10 β'	1.8倍(新*1)	1.8倍(新*2)	200	500	Ud	第4~9定	Co58,Co60	1992/2	
91-16(8)	MK-II	-	10D	10 β'	1.8倍(新*1)	1.8倍(新*2)	200	500	Uc	第4~5定	Co58,Co60	1992/2	
91-16(9)	MK-II	0.6D	-	-	3倍(新*1)	3倍(新*2)	-	500	Uc	第4~9定	Mn54	1992/2	
91-16(10)	MK-II	-	10D	10 β'	1.8倍(新*1)	1.8倍(新*2)	200	500	18Ud	第4~9定	Co58,Co60	1992/2	
91-16(11)	MK-II	0.5D	-	-	2.5倍(新*1)	2.5倍(新*2)	-	500	Uc	第4~9定	Mn54	1992/2	
91-16(12)	MK-II	-	10D	10 β'	1.8倍(新*1)	1.8倍(新*2)	350	500	25Ud	第4~9定	Co58,Co60	1992/2	UGTはUd領域に変更
91-16(13)	MK-II	-	10D	10 β'	1.5倍(新*1)	1.5倍(新*2)	350	500	25Ud	第4~9定	Co58,Co60	1992/2	UGTはUd領域に変更
91-16(14)	MK-II	-	10D	10 β'	1.8倍(新*1)	1.8倍(新*2)	300	500	25Ud	第4~9定	Co58,Co60	1992/2	UGTはUd領域に変更
91-17	MK-II	0.8D	10D	10 β'	1.8倍(*3)	1.8倍(新*2)	200	466	Uc	第4~9定	Mn54,Co58,Co60	1992/2	反射体等付着量評価
91-18(1)	MK-II	-	10D	10 β'	1.8倍(新*1)	1.8倍(新*2)	300	500	25Ud	第4~9定	Co58,Co60	1992/2	第8定まで燃交無し
91-18(2)	MK-II	0.5D	-	-	2.5倍(新*1)	2.5倍(新*2)	-	500	Uc	第4~9定	Mn54	1992/2	(反射体)

*3: 36、37、38領域のみ7/3Udから10Udに変更、その他の領域は新*1

新*1: ①1.8Ud領域

- ・炉心下部 (MK-IIは下部ブランケット、MK-IIは下部反射体及び下部プレナム)
- ・外周反射体(A)

②Uc領域 (パラメータ操作の対象としない)

- ・上記以外の炉心領域

新*2: ①Uc領域 (パラメータ操作の対象としない)

- ・HIL配管
- ・炉容器からOFFT入口までの配管 (往路)
- ②Ud領域
- ・OFFT出口から炉容器入口までの配管 (復路)
- ・IHX及びCL(1)配管

③1.8Ud領域

- ・ポンプ及びCL(2)&(3)

このケースは最適評価結果及び反射体等付着量評価結果に使用したケース

付録2 「常陽」 1次主冷却系配管及び機器周りの線量評価結果

表A2-1 「常陽」 1次主冷却系配管周りの線量率 (第3回定検)
(単位: mR/h)

No.	計算値	測定値	C/E
1	1.623E+01	2.310E+01	0.70
2	1.756E+01	1.600E+01	1.10
3	1.979E+01	1.480E+01	1.34
4	2.575E+01	1.440E+01	1.79
5	2.223E+01	1.470E+01	1.51
6	1.979E+01	9.400E+00	2.11
7	1.886E+01	8.300E+00	2.27
8	1.774E+01	6.400E+00	2.77
9	1.748E+01	6.200E+00	2.82
10	1.766E+01	7.300E+00	2.42
11	1.670E+01	7.300E+00	2.29
12	1.626E+01	4.700E+00	3.46
13	1.526E+01	2.900E+00	5.26
14	1.513E+01	3.300E+00	4.58
15	1.906E+01	3.000E+00	6.35
16	1.719E+01	6.200E+00	2.77
17	1.543E+01	4.600E+00	3.35
18	1.429E+01	4.200E+00	3.40
19	1.402E+01	4.100E+00	3.42
20	1.370E+01	4.500E+00	3.05
21	1.328E+01	3.900E+00	3.40
22	1.298E+01	4.700E+00	2.76
23	1.140E+01	5.200E+00	2.19
24	1.367E+01	9.100E+00	1.50
25	2.119E+01	1.090E+01	1.94
26	1.940E+01	6.300E+00	2.98
27	1.406E+01	2.200E+00	6.39
28	1.336E+01	2.400E+00	5.57
29	1.237E+01	2.500E+00	5.03
30	0.000E+00	4.900E+00	0.00
31	1.725E+01	6.300E+00	2.74
32	1.559E+01	6.600E+00	2.36
33	2.599E+01	1.190E+01	2.18
34	5.251E+01	1.640E+01	3.20
35	0.000E+00	1.070E+01	0.00
36	9.207E+00	3.800E+00	2.42
37	0.000E+00	4.100E+00	0.00
38	7.760E+00	4.400E+00	1.76
39	7.283E+00	4.000E+00	1.82
40	0.000E+00	5.200E+00	0.00
41	7.510E+00	5.000E+00	1.50
42	0.000E+00	5.900E+00	0.00
43	9.846E+00	5.600E+00	1.76
44	8.251E+00	3.900E+00	2.12
45	5.458E+00	5.000E+00	1.09
46	0.000E+00	4.500E+00	0.00
47	6.707E+00	2.800E+00	2.40
48	0.000E+00	3.900E+00	0.00
49	8.624E+00	5.200E+00	1.66
50	6.240E+00	6.600E+00	0.95

No.	計算値	測定値	C/E
51	6.541E+00	6.600E+00	0.99
52	9.442E+00	7.500E+00	1.26
53	8.345E+00	5.400E+00	1.55
54	5.330E+00	5.900E+00	0.90
55	9.640E+00	5.800E+00	1.66
56	9.705E+00	9.600E+00	1.01
57	1.111E+01	8.200E+00	1.36
58	1.387E+01	1.630E+01	0.85
59	1.213E+01	1.440E+01	0.84
60	1.173E+01	8.800E+00	1.33
61	1.311E+01	9.700E+00	1.35
62	1.375E+01	1.040E+01	1.32
63	1.917E+01	1.420E+01	1.35
64	2.025E+01	2.080E+01	0.97
65	1.739E+01	1.590E+01	1.09
66	1.517E+01	1.320E+01	1.15
67	0.000E+00	8.300E+00	0.00
68	1.207E+01	9.300E+00	1.30
69	0.000E+00	7.200E+00	0.00
70	1.070E+01	7.200E+00	1.49
71	0.000E+00	8.900E+00	0.00
72	1.499E+01	1.040E+01	1.44
73	1.808E+01	1.020E+01	1.77
74	1.138E+01	1.090E+01	1.04
75	9.715E+00	6.500E+00	1.49
76	1.398E+01	6.500E+00	2.15
77	1.457E+01	8.500E+00	1.71
78	1.500E+01	9.400E+00	1.60
79	1.585E+01	1.230E+01	1.29
80	1.561E+01	8.300E+00	1.88
81	1.501E+01	9.500E+00	1.58
82	1.444E+01	1.200E+01	1.20
83	1.453E+01	1.050E+01	1.38
84	1.537E+01	7.300E+00	2.17
85	1.966E+01	1.270E+01	1.55
86	1.929E+01	1.470E+01	1.31
87	0.000E+00	1.480E+01	0.00
88	1.879E+01	1.400E+01	1.34
89	0.000E+00	1.530E+01	0.00
90	1.642E+01	9.400E+00	1.75
91	1.527E+01	9.100E+00	1.68
92	1.278E+01	1.120E+01	1.14
93	1.111E+01	3.130E+01	0.36

領域	平均計算値	平均測定値	平均C/E
HL	1.798E+01	7.697E+00	2.34
CL(1)	9.598E+00	7.352E+00	1.31
CL(2)	1.512E+01	1.164E+01	1.30

表A2-2 「常陽」 1次主冷却系配管周りの線量率 (第4回定検)
(単位: mR/h)

No.	計算値	測定値	C/E
1	2.862E+01	6.820E+01	0.42
2	3.127E+01	4.710E+01	0.66
3	3.524E+01	3.900E+01	0.90
4	4.438E+01	4.920E+01	0.90
5	3.898E+01	5.090E+01	0.77
6	3.471E+01	3.000E+01	1.16
7	3.456E+01	3.370E+01	1.03
8	3.395E+01	2.500E+01	1.36
9	3.338E+01	2.970E+01	1.12
10	3.256E+01	2.970E+01	1.10
11	2.928E+01	2.510E+01	1.17
12	2.898E+01	1.480E+01	1.96
13	2.758E+01	1.080E+01	2.55
14	2.683E+01	1.500E+01	2.06
15	3.173E+01	1.110E+01	2.86
16	2.757E+01	2.590E+01	1.06
17	2.582E+01	2.250E+01	1.15
18	2.495E+01	1.450E+01	1.72
19	2.499E+01	1.430E+01	1.75
20	2.446E+01	1.800E+01	1.36
21	2.336E+01	1.460E+01	1.60
22	2.251E+01	1.720E+01	1.31
23	1.979E+01	1.500E+01	1.32
24	2.256E+01	2.860E+01	0.79
25	3.452E+01	3.210E+01	1.08
26	3.118E+01	1.340E+01	2.33
27	2.316E+01	7.100E+00	3.26
28	2.216E+01	7.100E+00	3.12
29	2.001E+01	7.200E+00	2.78
30	0.000E+00	1.430E+01	0.00
31	2.795E+01	1.700E+01	1.64
32	2.517E+01	1.850E+01	1.36
33	4.330E+01	3.430E+01	1.26
34	8.590E+01	4.760E+01	1.80
35	0.000E+00	5.700E+01	0.00
36	2.635E+01	1.860E+01	1.42
37	0.000E+00	1.670E+01	0.00
38	2.628E+01	1.660E+01	1.58
39	2.565E+01	1.580E+01	1.62
40	0.000E+00	2.150E+01	0.00
41	2.568E+01	2.360E+01	1.09
42	0.000E+00	2.560E+01	0.00
43	3.558E+01	2.200E+01	1.62
44	2.815E+01	1.730E+01	1.63
45	1.430E+01	2.060E+01	0.69
46	0.000E+00	1.950E+01	0.00
47	2.377E+01	1.270E+01	1.87
48	0.000E+00	1.690E+01	0.00
49	3.299E+01	2.140E+01	1.54
50	2.536E+01	2.010E+01	1.16

No.	計算値	測定値	C/E
51	2.579E+01	2.250E+01	1.15
52	3.699E+01	2.030E+01	1.82
53	3.237E+01	1.630E+01	1.93
54	1.690E+01	1.760E+01	0.96
55	3.262E+01	1.720E+01	1.90
56	3.233E+01	2.120E+01	1.53
57	3.677E+01	2.330E+01	1.58
58	4.742E+01	3.590E+01	0.85
59	4.374E+01	4.180E+01	1.05
60	3.961E+01	3.070E+01	1.29
61	4.400E+01	2.870E+01	1.53
62	4.636E+01	3.600E+01	1.29
63	6.940E+01	4.540E+01	1.53
64	7.802E+01	5.360E+01	1.33
65	6.609E+01	4.620E+01	1.43
66	5.723E+01	3.610E+01	1.59
67	0.000E+00	2.480E+01	0.00
68	4.455E+01	2.580E+01	1.73
69	0.000E+00	2.420E+01	0.00
70	3.333E+01	2.140E+01	1.81
71	0.000E+00	2.570E+01	0.00
72	5.852E+01	2.920E+01	2.00
73	7.211E+01	3.110E+01	2.32
74	4.226E+01	3.330E+01	1.27
75	2.887E+01	2.030E+01	1.41
76	4.385E+01	1.910E+01	2.30
77	4.492E+01	2.510E+01	1.79
78	4.541E+01	3.120E+01	1.46
79	4.741E+01	3.830E+01	1.24
80	4.473E+01	2.760E+01	1.62
81	4.523E+01	2.800E+01	1.62
82	4.375E+01	3.380E+01	1.29
83	4.360E+01	3.000E+01	1.45
84	4.545E+01	4.380E+01	1.04
85	1.333E+02	3.650E+01	3.65
86	5.318E+01	4.100E+01	1.30
87	0.000E+00	4.000E+01	0.00
88	6.198E+01	3.900E+01	1.59
89	0.000E+00	4.170E+01	0.00
90	5.075E+01	3.210E+01	1.58
91	4.551E+01	3.610E+01	1.26
92	3.940E+01	3.340E+01	1.03
93	3.600E+01	7.410E+01	0.49

領域	平均計算値	平均測定値	平均C/E
HL	3.095E+01	2.522E+01	1.23
CL(1)	3.333E+01	2.461E+01	1.35
CL(2)	5.244E+01	3.505E+01	1.50

表A2-3 「常陽」1次主冷却系配管周りの線量率(第5回定検)

(単位: mR/h)

No.	計算値	測定値	C/E
1	4.958E+01	6.970E+01	0.71
2	5.439E+01	6.290E+01	0.86
3	9.100E+01	5.910E+01	1.54
4	7.602E+01	5.630E+01	1.35
5	6.733E+01	5.750E+01	1.17
6	5.990E+01	3.820E+01	1.57
7	6.089E+01	3.610E+01	1.69
8	6.083E+01	3.020E+01	2.02
9	5.983E+01	2.790E+01	2.14
10	5.751E+01	2.980E+01	1.93
11	5.053E+01	2.680E+01	1.89
12	5.042E+01	1.600E+01	3.15
13	4.827E+01	9.800E+00	4.93
14	4.662E+01	9.900E+00	4.71
15	5.343E+01	9.900E+00	5.40
16	4.534E+01	2.350E+01	1.94
17	4.368E+01	1.570E+01	2.78
18	4.307E+01	0.060E+00	3.32
19	4.351E+01	0.000E+00	3.86
20	4.265E+01	0.000E+00	4.40
21	4.048E+01	8.200E+00	4.94
22	3.874E+01	1.380E+01	2.81
23	3.419E+01	1.180E+01	2.90
24	3.823E+01	2.870E+01	1.33
25	5.773E+01	2.820E+01	2.05
26	5.191E+01	1.710E+01	3.04
27	3.925E+01	6.500E+00	6.04
28	3.793E+01	7.200E+00	5.27
29	3.350E+01	7.400E+00	4.53
30	0.000E+00	1.040E+01	0.00
31	4.889E+01	1.410E+01	3.47
32	4.386E+01	2.150E+01	2.04
33	7.924E+01	4.120E+01	1.92
34	1.625E+02	6.230E+01	2.61
35	0.000E+00	4.650E+01	0.00
36	5.456E+01	2.040E+01	2.67
37	0.000E+00	2.360E+01	0.00
38	1.204E+02	2.540E+01	4.74
39	1.169E+02	3.180E+01	3.68
40	0.000E+00	7.870E+01	0.00
41	5.424E+01	4.470E+01	1.21
42	0.000E+00	4.910E+01	0.00
43	7.570E+01	3.980E+01	1.90
44	5.936E+01	2.880E+01	2.06
45	2.851E+01	3.610E+01	0.79
46	0.000E+00	4.480E+01	0.00
47	5.043E+01	2.510E+01	2.01
48	0.000E+00	2.420E+01	0.00
49	7.081E+01	3.000E+01	2.36
50	5.001E+01	3.220E+01	1.55

No.	計算値	測定値	C/E
51	5.559E+01	3.110E+01	1.79
52	7.958E+01	3.240E+01	2.46
53	6.956E+01	2.640E+01	2.63
54	3.503E+01	2.710E+01	1.29
55	6.841E+01	2.580E+01	2.65
56	6.758E+01	2.960E+01	2.28
57	7.675E+01	2.480E+01	3.09
58	9.956E+01	4.800E+01	2.07
59	9.279E+01	3.560E+01	2.61
60	8.289E+01	3.430E+01	2.42
61	9.172E+01	4.030E+01	2.28
62	9.665E+01	4.970E+01	1.94
63	1.458E+02	6.880E+01	2.12
64	1.655E+02	1.120E+02	1.48
65	1.402E+02	8.280E+01	1.69
66	1.217E+02	6.700E+01	1.82
67	0.000E+00	5.350E+01	0.00
68	9.463E+01	4.760E+01	1.99
69	0.000E+00	4.080E+01	0.00
70	8.239E+01	3.750E+01	2.20
71	0.000E+00	4.200E+01	0.00
72	1.257E+02	4.760E+01	2.64
73	1.555E+02	5.270E+01	2.95
74	9.006E+01	5.220E+01	1.73
75	1.417E+02	3.750E+01	3.78
76	9.057E+01	3.210E+01	2.82
77	9.243E+01	3.960E+01	2.33
78	9.307E+01	3.810E+01	2.44
79	9.687E+01	4.550E+01	2.13
80	9.051E+01	3.640E+01	2.49
81	9.257E+01	3.210E+01	2.88
82	8.963E+01	4.020E+01	2.23
83	8.917E+01	3.700E+01	2.41
84	9.197E+01	2.670E+01	3.44
85	1.029E+02	4.880E+01	2.11
86	1.066E+02	5.770E+01	1.85
87	0.000E+00	5.720E+01	0.00
88	1.292E+02	5.930E+01	2.18
89	0.000E+00	6.970E+01	0.00
90	1.045E+02	5.100E+01	2.05
91	9.305E+01	5.940E+01	1.57
92	8.119E+01	5.680E+01	1.43
93	7.501E+01	1.220E+02	0.61

領域	平均計算値	平均測定値	平均C/E
HL	5.608E+01	2.824E+01	1.99
CL(1)	7.578E+01	3.427E+01	2.21
CL(2)	1.055E+02	5.278E+01	2.00

表A2-4 「常陽」1次主冷却系配管周りの線量率(第6回定検)

(単位: mR/h)

No.	計算値	測定値	C/E
1	6.170E+01	1.110E+02	0.56
2	6.767E+01	8.980E+01	0.75
3	7.627E+01	7.860E+01	0.97
4	9.474E+01	7.130E+01	1.33
5	8.385E+01	6.660E+01	1.26
6	7.455E+01	4.710E+01	1.58
7	7.567E+01	4.290E+01	1.76
8	7.552E+01	3.660E+01	2.06
9	7.421E+01	3.470E+01	2.14
10	7.143E+01	3.910E+01	1.83
11	6.288E+01	3.630E+01	1.73
12	6.270E+01	2.050E+01	3.06
13	6.002E+01	1.610E+01	3.73
14	5.801E+01	2.010E+01	2.89
15	6.664E+01	1.820E+01	3.66
16	5.691E+01	3.530E+01	1.61
17	5.450E+01	2.410E+01	2.26
18	5.364E+01	0.000E+00	0.00
19	5.415E+01	0.000E+00	0.00
20	5.306E+01	0.000E+00	0.00
21	5.040E+01	7.700E+01	0.65
22	4.827E+01	1.230E+01	3.92
23	4.262E+01	1.260E+01	3.38
24	4.767E+01	2.710E+01	1.76
25	7.200E+01	3.650E+01	1.97
26	6.471E+01	1.990E+01	3.25
27	4.883E+01	8.700E+00	5.61
28	4.707E+01	9.500E+00	4.95
29	4.168E+01	9.200E+00	4.53
30	0.000E+00	1.680E+01	0.00
31	6.020E+01	2.370E+01	2.54
32	5.401E+01	3.430E+01	1.57
33	9.659E+01	4.800E+01	2.01
34	1.959E+02	6.140E+01	3.19
35	0.000E+00	7.990E+01	0.00
36	6.635E+01	2.790E+01	2.38
37	0.000E+00	3.150E+01	0.00
38	6.765E+01	3.300E+01	2.05
39	6.634E+01	2.540E+01	2.61
40	0.000E+00	3.810E+01	0.00
41	6.616E+01	3.560E+01	1.86
42	0.000E+00	4.470E+01	0.00
43	9.230E+01	3.800E+01	2.43
44	7.243E+01	2.710E+01	2.67
45	1.045E+02	3.480E+01	3.00
46	0.000E+00	3.200E+01	0.00
47	6.151E+01	2.030E+01	3.03
48	0.000E+00	2.470E+01	0.00
49	8.629E+01	3.540E+01	2.44
50	6.096E+01	4.050E+01	1.51

No.	計算値	測定値	C/E
51	6.777E+01	3.740E+01	1.81
52	9.703E+01	4.030E+01	2.41
53	8.483E+01	3.080E+01	2.75
54	4.287E+01	3.770E+01	1.14
55	8.361E+01	3.210E+01	2.60
56	8.260E+01	3.770E+01	2.19
57	9.382E+01	3.660E+01	2.56
58	1.217E+02	9.210E+01	1.32
59	1.133E+02	8.560E+01	1.32
60	1.014E+02	6.020E+01	1.68
61	1.124E+02	5.510E+01	2.04
62	1.185E+02	5.900E+01	2.01
63	1.796E+02	8.620E+01	2.08
64	2.037E+02	1.640E+02	1.24
65	1.721E+02	1.410E+02	1.22
66	1.491E+02	1.010E+02	1.48
67	0.000E+00	7.310E+01	0.00
68	1.158E+02	6.730E+01	1.72
69	0.000E+00	5.680E+01	0.00
70	1.007E+02	5.180E+01	1.94
71	0.000E+00	5.650E+01	0.00
72	1.533E+02	6.500E+01	2.36
73	1.897E+02	7.460E+01	2.54
74	1.099E+02	7.660E+01	1.44
75	7.227E+01	4.110E+01	1.76
76	1.109E+02	3.910E+01	2.84
77	1.132E+02	5.450E+01	2.08
78	1.140E+02	5.600E+01	2.04
79	1.187E+02	7.100E+01	1.67
80	1.110E+02	1.370E+02	0.81
81	1.134E+02	5.350E+01	2.12
82	1.098E+02	6.700E+01	1.64
83	1.092E+02	5.970E+01	1.83
84	1.128E+02	3.160E+01	3.57
85	1.265E+02	6.190E+01	2.04
86	1.309E+02	7.690E+01	1.70
87	0.000E+00	7.950E+01	0.00
88	1.581E+02	8.500E+01	1.86
89	0.000E+00	7.670E+01	0.00
90	1.280E+02	8.550E+01	1.50
91	1.140E+02	6.460E+01	1.76
92	9.933E+01	7.520E+01	1.32
93	9.167E+01	7.720E+01	1.19

領域	平均計算値	平均測定値	平均C/E
HL	6.824E+01	3.395E+01	1.75
CL(1)	8.886E+01	4.386E+01	2.03
CL(2)	1.251E+02	7.512E+01	1.67

表A2-5 「常陽」1次主冷却系配管周りの線量率 (第7回定検)

(単位: mR/h)

No.	計算値	測定値	C/E
1	7.143E+01	1.507E+02	0.47
2	7.834E+01	9.561E+01	0.82
3	8.831E+01	8.991E+01	0.98
4	1.097E+02	1.381E+02	0.79
5	9.709E+01	9.053E+01	1.07
6	8.633E+01	7.654E+01	1.13
7	8.756E+01	6.459E+01	1.36
8	8.736E+01	7.243E+01	1.21
9	8.584E+01	6.589E+01	1.30
10	8.265E+01	6.430E+01	1.29
11	7.282E+01	5.305E+01	1.37
12	7.259E+01	4.350E+01	1.67
13	6.947E+01	3.871E+01	1.79
14	6.715E+01	3.462E+01	1.94
15	7.722E+01	3.431E+01	2.25
16	6.598E+01	5.151E+01	1.28
17	6.312E+01	5.537E+01	1.14
18	6.210E+01	0.000E+00	0.00
19	6.267E+01	0.000E+00	0.00
20	6.140E+01	0.000E+00	0.00
21	5.834E+01	2.975E+01	1.96
22	5.589E+01	3.465E+01	1.61
23	4.933E+01	2.522E+01	1.96
24	5.519E+01	3.931E+01	1.40
25	8.340E+01	5.336E+01	1.56
26	7.498E+01	3.094E+01	2.42
27	5.653E+01	2.035E+01	2.78
28	5.445E+01	2.841E+01	1.92
29	4.824E+01	3.939E+01	1.22
30	0.000E+00	2.995E+01	0.00
31	6.940E+01	4.088E+01	1.70
32	6.228E+01	5.439E+01	1.15
33	1.109E+02	5.357E+01	2.07
34	2.239E+02	7.234E+01	3.10
35	0.000E+00	1.186E+02	0.00
36	7.634E+01	4.438E+01	1.72
37	0.000E+00	5.301E+01	0.00
38	7.791E+01	5.013E+01	1.55
39	7.641E+01	4.317E+01	1.77
40	0.000E+00	5.697E+01	0.00
41	7.619E+01	5.151E+01	1.48
42	0.000E+00	6.133E+01	0.00
43	1.063E+02	6.609E+01	1.61
44	8.344E+01	4.016E+01	2.08
45	4.032E+01	5.320E+01	0.76
46	0.000E+00	5.672E+01	0.00
47	7.086E+01	3.470E+01	2.04
48	0.000E+00	4.563E+01	0.00
49	9.938E+01	6.495E+01	1.53
50	7.021E+01	6.299E+01	1.11

No.	計算値	測定値	C/E
51	7.805E+01	5.882E+01	1.33
52	1.117E+02	6.537E+01	1.71
53	9.770E+01	5.055E+01	1.93
54	4.942E+01	5.195E+01	0.95
55	9.634E+01	3.580E+01	2.69
56	9.519E+01	5.479E+01	1.74
57	1.081E+02	5.770E+01	1.87
58	1.402E+02	6.008E+01	2.33
59	1.306E+02	1.031E+02	1.27
60	1.169E+02	8.114E+01	1.44
61	1.296E+02	7.802E+01	1.66
62	1.367E+02	8.642E+01	1.58
63	2.070E+02	1.027E+02	2.02
64	2.349E+02	2.432E+02	0.97
65	1.984E+02	1.997E+02	0.99
66	1.719E+02	1.571E+02	1.09
67	0.000E+00	9.776E+01	0.00
68	1.334E+02	7.169E+01	1.86
69	0.000E+00	8.256E+01	0.00
70	1.160E+02	7.987E+01	1.45
71	0.000E+00	7.403E+01	0.00
72	1.767E+02	9.652E+01	1.83
73	2.135E+02	1.117E+02	1.96
74	1.267E+02	1.159E+02	1.09
75	8.335E+01	6.377E+01	1.31
76	1.278E+02	5.888E+01	2.17
77	1.305E+02	9.808E+01	1.33
78	1.315E+02	7.774E+01	1.69
79	1.368E+02	6.950E+01	1.97
80	1.280E+02	6.820E+01	1.88
81	1.307E+02	8.340E+01	1.57
82	1.266E+02	8.111E+01	1.56
83	1.260E+02	6.158E+01	2.05
84	1.302E+02	5.294E+01	2.46
85	1.359E+02	1.085E+02	1.25
86	1.510E+02	1.176E+02	1.28
87	0.000E+00	1.135E+02	0.00
88	1.823E+02	1.317E+02	1.38
89	0.000E+00	1.348E+02	0.00
90	1.476E+02	1.050E+02	1.41
91	1.315E+02	1.314E+02	1.00
92	1.145E+02	1.310E+02	0.87
93	1.057E+02	2.095E+02	0.50

領域	平均計算値	平均測定値	平均C/E
HL	7.886E+01	5.807E+01	1.36
CL(1)	9.891E+01	6.077E+01	1.63
CL(2)	1.439E+02	1.090E+02	1.32

表A2-6 「常陽」1次主冷却系配管周りの線量率 (第8回定検)

(単位: mR/h)

No.	計算値	測定値	C/E
1	8.131E+01	5.777E+02	0.14
2	8.918E+01	2.033E+02	0.44
3	1.005E+02	1.278E+02	0.79
4	1.248E+02	8.535E+01	1.46
5	1.105E+02	1.022E+02	1.08
6	9.825E+01	8.189E+01	1.20
7	9.977E+01	6.702E+01	1.49
8	9.966E+01	4.649E+01	2.14
9	9.793E+01	5.866E+01	1.67
10	9.419E+01	4.394E+01	2.14
11	8.286E+01	4.523E+01	1.83
12	8.264E+01	2.766E+01	2.99
13	7.912E+01	2.352E+01	3.36
14	7.643E+01	2.236E+01	3.42
15	8.772E+01	3.406E+01	2.58
16	7.484E+01	4.753E+01	1.57
17	7.171E+01	2.986E+01	2.40
18	7.064E+01	2.196E+01	3.22
19	7.134E+01	4.159E+01	1.72
20	6.991E+01	2.288E+01	3.06
21	6.639E+01	2.649E+01	2.51
22	6.355E+01	3.886E+01	1.77
23	5.610E+01	3.763E+01	1.49
24	6.270E+01	4.515E+01	1.39
25	9.471E+01	4.834E+01	1.96
26	8.512E+01	4.365E+01	1.95
27	6.425E+01	1.549E+01	4.15
28	6.196E+01	1.589E+01	3.90
29	5.481E+01	1.577E+01	3.48
30	0.000E+00	8.231E+01	0.00
31	7.910E+01	6.346E+01	1.25
32	7.099E+01	3.437E+01	2.07
33	1.269E+02	3.514E+01	3.61
34	2.570E+02	3.007E+01	8.55
35	0.000E+00	1.395E+02	0.00
36	8.802E+01	5.240E+01	1.68
37	0.000E+00	6.409E+01	0.00
38	8.989E+01	6.756E+01	1.33
39	8.819E+01	5.150E+01	1.72
40	0.000E+00	7.723E+01	0.00
41	8.789E+01	6.839E+01	1.29
42	0.000E+00	7.305E+01	0.00
43	1.227E+02	8.578E+01	1.43
44	9.623E+01	5.672E+01	1.70
45	4.634E+01	6.974E+01	0.66
46	0.000E+00	6.107E+01	0.00
47	8.175E+01	4.365E+01	1.87
48	0.000E+00	5.866E+01	0.00
49	1.147E+02	8.317E+01	1.38
50	8.106E+01	7.695E+01	1.05

No.	計算値	測定値	C/E
51	9.013E+01	7.297E+01	1.24
52	1.290E+02	7.776E+01	1.66
53	1.128E+02	6.549E+01	1.72
54	5.692E+01	6.202E+01	0.92
55	1.111E+02	4.935E+01	2.25
56	1.097E+02	6.578E+01	1.67
57	1.247E+02	5.471E+01	2.28
58	1.617E+02	1.259E+02	1.28
59	1.506E+02	1.241E+02	1.21
60	1.347E+02	1.148E+02	1.17
61	1.493E+02	9.594E+01	1.56
62	1.574E+02	1.143E+02	1.38
63	2.382E+02	1.197E+02	1.99
64	2.705E+02	3.193E+02	0.85
65	2.286E+02	2.933E+02	0.78
66	1.982E+02	1.934E+02	1.02
67	0.000E+00	1.381E+02	0.00
68	1.539E+02	7.987E+01	1.93
69	0.000E+00	1.164E+02	0.00
70	1.338E+02	1.067E+02	1.25
71	0.000E+00	1.058E+02	0.00
72	2.040E+02	1.173E+02	1.74
73	2.524E+02	1.217E+02	2.07
74	1.462E+02	1.228E+02	1.19
75	9.591E+01	7.136E+01	1.34
76	1.473E+02	7.490E+01	1.97
77	1.502E+02	8.838E+01	1.70
78	1.513E+02	9.078E+01	1.67
79	1.576E+02	1.284E+02	1.23
80	1.472E+02	9.095E+01	1.62
81	1.506E+02	7.279E+01	2.07
82	1.458E+02	1.587E+02	0.92
83	1.450E+02	1.216E+02	1.19
84	1.497E+02	5.148E+01	2.91
85	1.677E+02	1.125E+02	1.49
86	1.736E+02	1.292E+02	1.34
87	0.000E+00	1.354E+02	0.00
88	2.100E+02	1.267E+02	1.66
89	0.000E+00	1.133E+02	0.00
90	1.700E+02	1.293E+02	1.31
91	1.513E+02	7.783E+01	1.94
92	1.320E+02	1.360E+02	0.97
93	1.218E+02	1.867E+02	0.65

領域	平均計算値	平均測定値	平均C/E
HL	8.809E+01	6.540E+01	1.35
CL(1)	1.140E+02	7.319E+01	1.46
CL(2)	1.662E+02	1.281E+02	1.30

表A 2-7 「常陽」 1次主冷却系配管周りの線量率（第9回定検）

（単位：mR/h）

No.	計算値	測定値	C/E
1	6.586E+01	2.803E+02	0.23
2	7.219E+01	1.193E+02	0.61
3	8.139E+01	7.582E+01	1.07
4	1.013E+02	6.807E+01	1.49
5	8.955E+01	1.012E+02	0.88
6	7.961E+01	5.656E+01	1.41
7	8.061E+01	4.946E+01	1.63
8	8.026E+01	5.602E+01	1.43
9	7.886E+01	5.690E+01	1.39
10	7.605E+01	4.378E+01	1.74
11	6.713E+01	3.858E+01	1.74
12	6.688E+01	3.870E+01	1.73
13	6.397E+01	2.388E+01	2.68
14	6.188E+01	1.165E+01	5.31
15	7.137E+01	1.402E+01	5.09
16	6.109E+01	2.376E+01	2.57
17	5.834E+01	2.054E+01	2.84
18	5.728E+01	0.000E+00	0.00
19	5.775E+01	0.000E+00	0.00
20	5.658E+01	0.000E+00	0.00
21	5.380E+01	2.119E+01	2.54
22	5.156E+01	2.118E+01	2.43
23	4.554E+01	2.444E+01	1.86
24	5.097E+01	3.053E+01	1.67
25	7.706E+01	3.129E+01	2.46
26	6.934E+01	1.994E+01	3.48
27	5.219E+01	9.839E+00	5.30
28	5.021E+01	1.033E+01	4.86
29	4.460E+01	1.114E+01	4.00
30	0.000E+00	1.902E+01	0.00
31	6.366E+01	2.286E+01	2.78
32	5.715E+01	1.893E+01	3.02
33	1.010E+02	3.339E+01	3.03
34	6.136E+01	4.325E+01	1.42
35	0.000E+00	7.682E+01	0.00
36	6.889E+01	3.721E+01	1.85
37	0.000E+00	3.991E+01	0.00
38	7.031E+01	4.271E+01	1.65
39	6.893E+01	4.037E+01	1.71
40	0.000E+00	5.557E+01	0.00
41	6.879E+01	5.299E+01	1.30
42	0.000E+00	7.047E+01	0.00
43	9.594E+01	6.323E+01	1.52
44	7.537E+01	4.618E+01	1.63
45	3.663E+01	5.719E+01	0.64
46	0.000E+00	4.624E+01	0.00
47	6.397E+01	3.744E+01	1.71
48	0.000E+00	5.096E+01	0.00
49	8.962E+01	5.532E+01	1.62
50	6.334E+01	5.356E+01	1.18

No.	計算値	測定値	C/E
51	7.040E+01	5.644E+01	1.25
52	1.008E+02	5.381E+01	1.87
53	8.813E+01	4.985E+01	1.77
54	1.269E+02	5.117E+01	2.48
55	8.710E+01	4.439E+01	1.96
56	8.609E+01	5.000E+01	1.72
57	9.781E+01	5.135E+01	1.90
58	1.267E+02	5.706E+01	2.22
59	1.179E+02	7.326E+01	1.61
60	1.057E+02	6.864E+01	1.54
61	1.174E+02	5.606E+01	2.09
62	1.238E+02	7.319E+01	1.69
63	1.879E+02	8.807E+01	2.13
64	2.130E+02	1.494E+02	1.43
65	1.797E+02	1.647E+02	1.09
66	1.555E+02	1.365E+02	1.14
67	0.000E+00	8.674E+01	0.00
68	1.206E+02	6.870E+01	1.76
69	0.000E+00	7.326E+01	0.00
70	1.048E+02	6.972E+01	1.50
71	0.000E+00	5.990E+01	0.00
72	1.594E+02	6.574E+01	2.42
73	1.970E+02	9.575E+01	2.06
74	1.143E+02	9.893E+01	1.16
75	7.556E+01	6.229E+01	1.21
76	1.157E+02	5.286E+01	2.19
77	1.182E+02	7.072E+01	1.67
78	1.191E+02	8.774E+01	1.36
79	1.240E+02	7.045E+01	1.76
80	1.161E+02	7.065E+01	1.64
81	1.185E+02	6.298E+01	1.88
82	1.147E+02	6.596E+01	1.74
83	1.142E+02	7.072E+01	1.61
84	1.181E+02	4.632E+01	2.55
85	1.327E+02	8.352E+01	1.59
86	1.372E+02	1.012E+02	1.36
87	0.000E+00	1.352E+02	0.00
88	1.649E+02	1.132E+02	1.46
89	0.000E+00	1.099E+02	0.00
90	1.337E+02	8.368E+01	1.60
91	1.192E+02	1.007E+02	1.18
92	1.037E+02	1.078E+02	0.96
93	9.559E+01	1.594E+02	0.60

領域	平均計算値	平均測定値	平均C/E
HL	6.783E+01	4.589E+01	1.48
CL(1)	9.297E+01	5.476E+01	1.70
CL(2)	1.306E+02	9.039E+01	1.45

表A2-8 「常陽」 IHX周りの線量率 (第3回定検)
(単位 mR/h)

計算点No	計算値	測定値	C/E	計算点高さ	計算点方向
94	5.19E+01	1.66E+01	3.12	GL-7000	B
95	5.19E+01	1.43E+01	3.63		D
96	5.12E+01	1.65E+01	3.10		F
97	5.12E+01	2.19E+01	2.34	GL-8000	H
98	3.72E+01	1.36E+01	2.73		B
99	3.72E+01	1.22E+01	3.05		D
100	5.03E+01	2.26E+01	2.23	GL-9400	F
101	4.64E+01	1.45E+01	3.20		H
102	2.57E+01	2.34E+01	1.10		B
103	2.92E+01	2.48E+01	1.18	D	
104	2.64E+01	3.44E+01	0.77	F	
105	2.70E+01	2.79E+01	0.97	H	
平均値	5.15E+01	1.73E+01	2.97	GL-7000	-
	4.28E+01	1.57E+01	2.72	GL-8000	
	2.71E+01	2.76E+01	0.98	GL-9400	

表A2-9 「常陽」 IHX周りの線量率 (第4回定検)
(単位 mR/h)

計算点No	計算値	測定値	C/E	計算点高さ	計算点方向
94	8.70E+01	5.08E+01	1.71	GL-7000	B
95	8.80E+01	5.56E+01	1.58		D
96	8.50E+01	4.27E+01	1.99		F
97	8.50E+01	5.17E+01	1.64	GL-8000	H
98	7.91E+01	6.72E+01	1.18		B
99	7.91E+01	6.30E+01	1.26		D
100	1.03E+02	6.44E+01	1.59	GL-9400	F
101	9.77E+01	4.78E+01	2.04		H
102	1.29E+02	1.09E+02	1.19		B
103	1.43E+02	1.25E+02	1.15	D	
104	1.33E+02	9.62E+01	1.40	F	
105	1.38E+02	1.05E+02	1.31	H	
平均値	8.63E+01	5.02E+01	1.72	GL-7000	-
	8.97E+01	6.06E+01	1.48	GL-8000	
	1.36E+02	1.09E+02	1.26	GL-9400	

表A2-12 「常陽」 IHX周りの線量率 (第7回定検)
(単位 mR/h)

計算点No	計算値	測定値	C/E	計算点高さ	計算点方向
94	2.32E+02	9.18E+01	2.53	GL-7000	B
95	2.36E+02	9.33E+01	2.53		D
96	2.27E+02	9.33E+01	2.43		F
97	2.27E+02	9.33E+01	2.43	GL-8000	H
98	2.25E+02	1.17E+02	1.92		B
99	2.25E+02	9.82E+01	2.29		D
100	2.84E+02	1.40E+02	2.03	GL-9400	F
101	2.73E+02	8.62E+01	3.17		H
102	2.19E+02	2.53E+02	0.87		B
103	2.31E+02	2.48E+02	0.93	D	
104	2.31E+02	2.46E+02	0.94	F	
105	2.34E+02	2.45E+02	0.96	H	
平均値	2.30E+02	9.29E+01	2.48	GL-7000	-
	2.52E+02	1.10E+02	2.28	GL-8000	
	2.29E+02	2.48E+02	0.92	GL-9400	

表A2-13 「常陽」 IIX周りの線量率 (第8回定検)
(単位 mR/h)

計算点No	計算値	測定値	C/E	計算点高さ	計算点方向
94	2.67E+02	8.31E+01	3.22	GL-7000	B
95	2.72E+02	8.78E+01	3.09		D
96	2.61E+02	9.80E+01	2.66		F
97	2.61E+02	9.94E+01	2.63	GL-8000	H
98	2.60E+02	9.71E+01	2.67		B
99	2.60E+02	1.07E+02	2.42		D
100	3.27E+02	1.15E+02	2.85	GL-9400	F
101	3.15E+02	8.91E+01	3.53		H
102	2.54E+02	2.56E+02	0.99		B
103	2.67E+02	2.33E+02	1.15	D	
104	2.68E+02	2.91E+02	0.92	F	
105	2.71E+02	2.13E+02	1.27	H	
平均値	2.65E+02	9.21E+01	2.88	GL-7000	-
	2.90E+02	1.02E+02	2.84	GL-8000	
	2.65E+02	2.48E+02	1.07	GL-9400	

表A2-10 「常陽」 IHX周りの線量率 (第5回定検)
(単位 mR/h)

計算点No	計算値	測定値	C/E	計算点高さ	計算点方向
94	1.70E+02	5.65E+01	3.01	GL-7000	B
95	1.73E+02	5.05E+01	3.42		D
96	1.66E+02	4.63E+01	3.59		F
97	1.66E+02	5.76E+01	2.89	GL-8000	H
98	1.64E+02	5.39E+01	3.04		B
99	1.64E+02	5.70E+01	2.87		D
100	2.05E+02	6.38E+01	3.21	GL-9400	F
101	1.97E+02	4.83E+01	4.09		H
102	1.59E+02	1.04E+02	1.53		B
103	1.67E+02	1.08E+02	1.55	D	
104	1.67E+02	1.02E+02	1.64	F	
105	1.70E+02	9.00E+01	1.88	H	
平均値	1.69E+02	5.27E+01	3.20	GL-7000	-
	1.82E+02	5.58E+01	3.27	GL-8000	
	1.66E+02	1.01E+02	1.64	GL-9400	

表A2-11 「常陽」 IHX周りの線量率 (第6回定検)
(単位 mR/h)

計算点No	計算値	測定値	C/E	計算点高さ	計算点方向
94	2.04E+02	6.95E+01	2.93	GL-7000	B
95	2.07E+02	7.00E+01	2.96		D
96	1.99E+02	7.37E+01	2.70		F
97	1.99E+02	7.45E+01	2.67	GL-8000	H
98	1.97E+02	7.46E+01	2.64		B
99	1.97E+02	8.07E+01	2.44		D
100	2.48E+02	1.04E+02	2.38	GL-9400	F
101	2.39E+02	6.95E+01	3.43		H
102	1.90E+02	2.05E+02	0.93		B
103	2.01E+02	1.77E+02	1.13	D	
104	2.01E+02	1.65E+02	1.22	F	
105	2.04E+02	1.80E+02	1.13	H	
平均値	2.02E+02	7.19E+01	2.81	GL-7000	-
	2.20E+02	8.22E+01	2.68	GL-8000	
	1.99E+02	1.82E+02	1.09	GL-9400	

表A2-14 「常陽」 IHX周りの線量率 (第9回定検)
(単位 mR/h)

計算点No	計算値	測定値	C/E	計算点高さ	計算点方向
94	2.09E+02	6.59E+01	3.17	GL-7000	B
95	2.12E+02	5.84E+01	3.63		D
96	2.03E+02	5.58E+01	3.65		F
97	2.04E+02	5.80E+01	3.51	GL-8000	H
98	2.02E+02	7.32E+01	2.76		B
99	2.02E+02	6.53E+01	3.10		D
100	2.57E+02	1.19E+02	2.16	GL-9400	F
101	2.47E+02	6.33E+01	3.90		H
102	1.97E+02	1.84E+02	1.07		B
103	2.08E+02	1.44E+02	1.44	D	
104	2.08E+02	2.38E+02	0.87	F	
105	2.11E+02	1.69E+02	1.25	H	
平均値	2.07E+02	5.95E+01	3.48	GL-7000	-
	2.27E+02	8.01E+01	2.83	GL-8000	
	2.06E+02	1.84E+02	1.12	GL-9400	

表A 2-15 「常陽」主循環ポンプ周りの線量率 (第3回定検)
(単位 mR/h)

計算点No	計算値	測定値	C/E	計算点高さ	計算点方向
106	1.05E+01	3.15E+01	0.33	GL-6463	F
107	1.11E+01	2.34E+01	0.48		H
108	1.37E+01	1.40E+01	0.98		B
109	1.30E+01	1.73E+01	0.75		D
110	1.22E+01	4.47E+01	0.27	GL-6863	F
111	1.25E+01	2.39E+01	0.52		H
112	1.55E+01	1.36E+01	1.14		B
113	1.43E+01	1.10E+01	1.30	GL-7463	D
114	1.20E+01	1.89E+01	0.64		F
115	1.44E+01	1.12E+01	1.02		H
116	1.80E+01	9.50E+00	1.90		B
117	1.60E+01	1.55E+01	1.03	D	
平均値	1.21E+01	2.16E+01	0.56	GL-6463	-
	1.36E+01	2.33E+01	0.58	GL-6863	
	1.51E+01	1.35E+01	1.04	GL-7463	

表A 2-16 「常陽」主循環ポンプ周りの線量率 (第4回定検)
(単位 mR/h)

計算点No	計算値	測定値	C/E	計算点高さ	計算点方向
106	4.34E+01	2.96E+01	1.47	GL-6463	F
107	4.71E+01	1.56E+01	3.02		H
108	5.15E+01	1.26E+01	4.09		B
109	4.79E+01	2.14E+01	2.24		D
110	4.60E+01	3.64E+01	1.26	GL-6863	F
111	5.26E+01	2.73E+01	1.93		H
112	5.77E+01	2.25E+01	2.57		B
113	5.17E+01	3.26E+01	1.59	GL-7463	D
114	4.96E+01	4.39E+01	1.13		F
115	6.10E+01	3.44E+01	1.77		H
116	6.71E+01	2.87E+01	2.34		B
117	5.71E+01	3.55E+01	1.61	D	
平均値	4.75E+01	1.98E+01	2.40	GL-6463	-
	5.20E+01	2.97E+01	1.75	GL-6863	
	5.87E+01	3.56E+01	1.65	GL-7463	

表A 2-19 「常陽」主循環ポンプ周りの線量率 (第7回定検)
(単位 mR/h)

計算点No	計算値	測定値	C/E	計算点高さ	計算点方向
106	1.33E+02	2.19E+02	0.61	GL-6463	F
107	1.45E+02	2.66E+02	0.54		H
108	1.56E+02	1.71E+02	0.91		B
109	1.45E+02	1.71E+02	0.85		D
110	1.41E+02	2.29E+02	0.62	GL-6863	F
111	1.62E+02	2.62E+02	0.62		H
112	1.75E+02	2.77E+02	0.63		B
113	1.56E+02	1.90E+02	0.82	GL-7463	D
114	1.51E+02	1.75E+02	0.86		F
115	1.86E+02	1.91E+02	0.98		H
116	2.01E+02	1.53E+02	1.32		B
117	1.70E+02	1.58E+02	1.08	D	
平均値	1.45E+02	2.07E+02	0.70	GL-6463	-
	1.58E+02	2.39E+02	0.66	GL-6863	
	1.77E+02	1.69E+02	1.05	GL-7463	

表A 2-20 「常陽」主循環ポンプ周りの線量率 (第8回定検)
(単位 mR/h)

計算点No	計算値	測定値	C/E	計算点高さ	計算点方向
106	1.53E+02	1.10E+02	1.40	GL-6463	F
107	1.67E+02	2.43E+02	0.69		H
108	1.79E+02	1.92E+02	0.94		B
109	1.66E+02	1.67E+02	1.00		D
110	1.62E+02	2.34E+02	0.69	GL-6863	F
111	1.86E+02	3.02E+02	0.62		H
112	2.01E+02	3.05E+02	0.66		B
113	1.79E+02	1.94E+02	0.92	GL-7463	D
114	1.74E+02	2.06E+02	0.84		F
115	2.15E+02	2.40E+02	0.89		H
116	2.32E+02	1.01E+02	2.30		B
117	1.96E+02	1.79E+02	1.09	D	
平均値	1.66E+02	1.78E+02	0.94	GL-6463	-
	1.82E+02	2.59E+02	0.70	GL-6863	
	2.04E+02	1.82E+02	1.12	GL-7463	

表A 2-17 「常陽」主循環ポンプ周りの線量率 (第5回定検)
(単位 mR/h)

計算点No	計算値	測定値	C/E	計算点高さ	計算点方向
106	9.34E+01	7.70E+01	1.21	GL-6463	F
107	1.02E+02	5.27E+01	1.93		H
108	1.09E+02	4.56E+01	2.40		B
109	1.01E+02	8.16E+01	1.24		D
110	9.89E+01	7.89E+01	1.25	GL-6863	F
111	1.14E+02	7.00E+01	1.62		H
112	1.22E+02	6.61E+01	1.85		B
113	1.09E+02	7.75E+01	1.41	GL-7463	D
114	1.06E+02	7.81E+01	1.36		F
115	1.31E+02	8.58E+01	1.53		H
116	1.42E+02	7.36E+01	1.95		B
117	1.19E+02	6.60E+01	1.81	D	
平均値	1.01E+02	6.42E+01	1.58	GL-6463	-
	1.11E+02	7.31E+01	1.52	GL-6863	
	1.24E+02	7.56E+01	1.65	GL-7463	

表A 2-18 「常陽」主循環ポンプ周りの線量率 (第6回定検)
(単位 mR/h)

計算点No	計算値	測定値	C/E	計算点高さ	計算点方向
106	1.16E+02	1.76E+02	0.66	GL-6463	F
107	1.26E+02	2.38E+02	0.53		H
108	1.35E+02	1.52E+02	0.89		B
109	1.26E+02	1.56E+02	0.81		D
110	1.23E+02	1.79E+02	0.69	GL-6863	F
111	1.41E+02	2.30E+02	0.61		H
112	1.52E+02	2.00E+02	0.76		B
113	1.35E+02	1.56E+02	0.87	GL-7463	D
114	1.31E+02	1.26E+02	1.04		F
115	1.62E+02	1.28E+02	1.26		H
116	1.75E+02	1.10E+02	1.59		B
117	1.47E+02	1.22E+02	1.21	D	
平均値	1.26E+02	1.81E+02	0.70	GL-6463	-
	1.37E+02	1.91E+02	0.72	GL-6863	
	1.54E+02	1.22E+02	1.27	GL-7463	

表A 2-21 「常陽」主循環ポンプ周りの線量率 (第9回定検)
(単位 mR/h)

計算点No	計算値	測定値	C/E	計算点高さ	計算点方向
106	1.21E+02	2.20E+02	0.55	GL-6463	F
107	1.32E+02	1.73E+02	0.76		H
108	1.42E+02	2.27E+02	0.63		B
109	1.32E+02	1.49E+02	0.89		D
110	1.29E+02	2.64E+02	0.49	GL-6863	F
111	1.47E+02	1.79E+02	0.82		H
112	1.59E+02	2.19E+02	0.73		B
113	1.42E+02	3.03E+02	0.47	GL-7463	D
114	1.37E+02	1.53E+02	0.90		F
115	1.69E+02	1.64E+02	1.03		H
116	1.83E+02	1.35E+02	0.99		B
117	1.55E+02	2.35E+02	0.66	D	
平均値	1.32E+02	1.92E+02	0.69	GL-6463	-
	1.44E+02	2.41E+02	0.60	GL-6863	
	1.61E+02	1.84E+02	0.87	GL-7463	

付録3 「常陽」1次ナトリウム冷却材中酸素濃度評価について

1. Na分析データ評価結果の要点

分析Gr曾根氏から戴いたNa分析データ集を用いて、「常陽」1次Na冷却材中の酸素濃度について評価した結果をまとめて述べる。尚、本作業はCP挙動計算入力データ作成の一環として実施したものである。

- 「常陽」のNa冷却材中酸素濃度関連実験情報としては、CT温度、PL温度、分析値がある。以下にこれまでのデータから得られた相関式を、評価基準となる溶解度式とあわせ記す。

温度と酸素濃度の相関

溶解度	$\text{Log } S = 6.239 - 2447/T(K)$ (ppm)		評価基準	(1)
CT-分析	$\text{Log } O_x = 4.021 - 1502/T_{CT}(K)$ //	$R^2=0.558$	新CT期	(2)
PL-分析	$\text{Log } O_x = 5.604 - 2127/T_{PL}(K)$ //	$R^2=0.648$	新CT期から得られた が旧CT期にも使える 筈のもの	(3)

PL温度とCT温度の相関

$$\text{PL-CT } T_{PL}(K) = 103 + 0.742T_{CT}(K) \quad R^2=0.875 \quad \text{旧CT} \quad (4A)$$

$$T_{PL}(K) = 44.8 + 0.889T_{CT}(K) \quad R^2=0.746 \quad \text{新CT} \quad (4B)$$

- * 測定されたプラグ温度範囲を広く取った場合(128~130℃のデータ数が多いため、選別により14から5に減じている)の適合式で、暫定的に提案するものである。この調整をしない場合の適合式は、

$$T_{PL}(K) = 154 + 0.614T_{CT}(K) \quad R^2=0.841 \quad \text{新CT} \quad (4B')$$

- 旧CT(MK-I~MK-II 12サイクル)期と新CT(MK-II 13サイクル~)期では、これ等データの相関性をめぐる状況には大きな違いがある。旧CT時代のCT温度、PL温度と分析値の間には、相関性(アレニウス型)が殆ど認められない(各々 $R^2=4.7(-3), 3.8(-4)$)一方新型CT期には比較的相関性が認められる(各々 $R^2=0.558, 0.648$)。CTとPL温度には、いずれの時期も比較的良好的な相関性(線型)が認められた。
- この事象が冷却材のヒストリーあるいはサンプリング・分析法からのものであるか、旧CTの酸素濃度制御性からのものであるかは判然とはしないが、PL-CTの相関性により前者であった可能性が大きいと考えられる。
- 新CT時代になって、PL-分析、CT-分析において両者共比較的相関性が認められるようになったことは、3つの実験情報が概ね妥当性を持つに到ったことを示している。
- (1)と(3)式は120~200℃程度(CT運転温度として想定される)の範囲内で、比較的一致はあるものの、(1)<(3)という一般的傾向を示している。この解釈はPL計オリフィス部での不純物の析出、溶解挙動、PL計の機器信頼性、あるいはサンプリング・分析法の信頼性に関連している。「常陽」1次冷却系プラグ計は自動連続測定式のもので、オリフィス部は半プラグ状態で運転されており、プラグとアンプラグ過程のバランスが重要である。Na₂Oの析出、溶解速度は異なるから、飽和温度とPL温度の関係に機器の特有性が入り込む事は十分に考えられる。
- 新CT期において(2)と(3)式は(4A)、(4B)式の与える温度相関を考慮すると比較的良い一致を示す。
- (1)と(2)式の関係で言うならば、高温(約150℃)では(2)<(1)であり、これはNa溶解性の酸素インベントリーの状況(高温時にもCT以外の場所でNa₂Oの蓄積がないものとするれば総量数Kg程度であり、高温側で欠乏している)を示すものと考えられる。
- 従って定常運転時のNa冷却材中酸素濃度は(3)式の手法と値で評価するのが妥当である。

2. 計算用酸素濃度

MK-Iは従来通りとする(2.5ppm)。

MK-IIは次の表3の通りとする。

表 3

運 転 サイクル	PL温度 (℃)	CT温度 (℃)	酸素濃度 (ppm)	備 考
1～7	127	127	1.93	旧CT
8～12	151	160	3.87	〃
13～15	133	140	2.32	新CT
16～23	122	119	1.66	〃