

JAERI-M  
7594

軽水炉格納容器スプレイによるヨウ素  
の除去に関する解析

—MIRA-PB—

1978年3月

西尾 軍治・田村 友彦\*・田中 貢

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

軽水炉格納容器スプレイによるヨウ素の除去に関する解析

—MIRA-PB—

日本原子力研究所東海研究所安全工学部

西尾軍治・田村友彦\*・田中 貢

(1977年6月受理)

軽水型発電炉には、冷却材喪失事故などに備えて工学的安全防護施設として、原子炉格納容器スプレイ系および非常用空気浄化系が設置され、事故時における放射性ヨウ素の環境への放出を極力防止している。原子炉格納容器系のヨウ素除去計算コードとして、Battelleで開発したMIRAP/MIRABコードを基にして、新たにMIRA-PBコードを作成した。

計算コード上の数式モデルは、格納容器壁での自然沈着、液膜による吸収、スプレイ系による水洗除去、フィルタ系による除去、および格納容器からの漏洩を考慮し、ヨウ素の形態としては、無機ヨウ素、有機ヨウ素およびヨウ素エアロゾルを考える。本報では、MIRA-PBの内容を明確にする目的で、気液分配係数、物性値、スプレイ液滴の運動、およびヨウ素の吸収等について記述し、諸文献の数値と比較した。また、軽水型発電炉の格納容器に近い値で、あるいは、Battelleの実験に対してヨウ素除去の計算を実施し、ついで原研モデル格納容器についての予備計算を行なった。

---

\* ) 三井造船K.K

LWR Containment Spray Iodine Removal Calculation Code -MIRA-PB-

Gunji Nishio, Tomohiko Tamura\* and Mitsugu Tanaka

Division of Reactor Safety, Tokai Research Establishment, JAERI

(Received June, 1977)

In the reactor containment vessel of LWR, there are containment sprays and air-cleaning filters to prevent the release of radioiodine from the reactor building to the atmosphere in LOCA. The computer code MIRA-PB for predicting iodine removal by containment spray is made on the basis of MIRAP/MIRAB code developed in Battelle's Columbus Laboratories.

MIRA-PB considers behavior of elemental iodine, organic iodide, and iodic aerosol in natural deposition, liquid-film absorption, spray washout, filtration, and leakage to atmosphere. Information is obtained on the contributions of sprays to iodine removal under LOCA conditions which depends on partition coefficient of elemental iodine and organic iodide, pH, temperature, concentrations in gaseous and liquid phases, physical properties of spray, motion of spray droplets in the containment vessel, and mass-transfer rate from gaseous to liquid phase. Iodine removal by sprays in PWR, BWR, Battelle's CSE and JAERI-model containment is calculated by MIRA-PB under LOCA simulated condition.

Keywords: LWR, Containment, Spray, LOCA, Iodine, Partition coefficient, Washout, Computer code, Air-cleaning, Environmental safety

---

\* Mitsui Eng. and Ship. Co., LTD

## 目 次

1	緒 言	1
2	LWR格納容器および原研モデル格納容器	3
2.1	BWR格納容器スプレイ系	3
2.2	PWR格納容器スプレイ系	3
2.3	原研モデル格納容器	4
2.4	冷却材喪失事故時のヨウ素放出量	4
3	解析モデル	13
3.1	PWR	13
3.2	BWR	17
3.3	記 号	21
4	MIRAコードの説明	24
4.1	プログラムの内容	24
4.2	気液分配係数	26
4.3	物 性 値	30
4.4	スプレイ液滴の衝突合体効果	32
4.5	スプレイ液滴の軌跡	34
4.6	スプレイ液滴のヨウ素吸収効率	36
4.7	ヨウ素の沈着現象	38
4.8	スプレイ散布によるエアロゾルの挙動	39
4.9	記 号	42
5	解析上の問題点	63
6	軽水炉および原研モデル格納容器についての計算	67
7	結 言	87
	参 考 文 献	88
	Appendix-1, Version discription	91
	A 計算データの入力形式	91
	B 入力データ等の変数名について	91
	B-1 PWRに対して	91
	B-2 BWRに対して	94
	Appendix-2, Sample data	96
	C PWR	96
	C-1 INPUT	96
	C-2 OUTPUT	98
	Appendix-3, Sample data	105
	D BWR	105
	D-1 INPUT	105
	D-2 OUTPUT	107

## Contents

1.	Introduction .....	1
2.	LWR containment and JAERI model containment .....	3
2.1	Containment spray systems of BWR .....	3
2.2	Containment spray systems of PWR .....	3
2.3	JAERI model containment .....	4
2.4	Iodine release under the LOCA condition .....	4
3.	Analytical model .....	13
3.1	PWR .....	13
3.2	BWR .....	17
3.3	Notes .....	21
4.	Introduction of MIRA-PB code .....	24
4.1	The program .....	24
4.2	Partition coefficients .....	26
4.3	Physical properties .....	30
4.4	Coalescence among spray droplets .....	32
4.5	Trajectory of spray droplets .....	34
4.6	Absorption efficiency of iodine to spray droplets .....	36
4.7	Deposition of iodine onto wall .....	38
4.8	Aerosol behavior for spraying .....	39
4.9	Notes .....	42
5.	Problems in the modeling .....	63
6.	Conclusion .....	67
Appendix - 1	Version discription .....	91
Appendix - 2	Sample data .....	96

## 1. 緒 言

軽水型発電炉の安全性評価では、現実には起るとは考えにくい原子炉1次冷却系の圧力バウンダリにおける瞬時破断を想定した冷却材喪失事故(LOCA)を考慮している。このような想定事故に対する工学的安全防護施設の一部として、原子炉格納容器スプレイ系および非常用空気浄化系が設置されている。このスプレイ系は、格納容器内の温度、圧力を速やかに低下させることにより、放射性物質の漏洩をおさえ、同時にヨウ素を水洗除去し、環境への放射性ヨウ素の放出を低減させることを目的としている。

従来、スプレイ散布によるヨウ素の水洗除去効果に関する解析は、主としてPWRを対象になされており、<sup>1)</sup> BWRを対象とした解析は少ない。PWRの想定事故を対象とした解析は、Westinghouse社のKemperらによって詳細な報告がなされている。<sup>2)</sup> Pasedag, Somersらは、その解析の延長として、格納容器スプレイ系、アイスコンデンサ、非常用フィルタ系、セミダブルおよびダブル型格納容器、および再循環フィルタ系を考慮した計算コード(TITAN)を開発している。<sup>3)</sup> PWRおよびBWRを対象とした計算コードとしては、1971年に、Battelle's Columbus研究所のRitzmanにより、MIRAP/MIRABコードが報告されている。<sup>4)</sup> 1972年には、アイスコンデンサ型原子炉であるDonald O. Cookについての解析をMilioti, Sherman, Ritzman, Giesekeらが共同研究を行ない、その成果を報告している。<sup>5)</sup>

最近、フィンランド原子力研究所のAroらは、彼らが修正したMIRAコードを用いて、BWRのLOCA後の格納容器スプレイによるヨウ素の除去および環境放出過程の計算を行なった。<sup>6)</sup> さらに、MIRAコードを基盤としてアイスコンデンサ型発電所の計算コード(MIRAI-C)を開発し、その結果も合せて報告している。

MIRAP/MIRABコード(Argonne Code Center Programing Note 76-8, ACC No. 499, 6400B)は、PWRおよびBWRに分けられて作成された2つの計算コードから成り、ヨウ素形態としては、無機ヨウ素、有機ヨウ素、ヨウ素エアロゾル\*を考慮している。そして、LOCA後における格納容器系におけるヨウ素除去過程としては、自然沈着、スプレイによる水洗除去、フィルタによる除去、およびBWRの場合には、上記項目の他、ベント管におけるスクラビング効果等を考慮し、環境へのヨウ素放出過程をプログラミングしたものである。これらのヨウ素除去過程に関係するヨウ素の沈着速度、気液分配係数および各種物性値等の計算には、1971年までに得られた数多くの実験結果が取り入れられている。また、格納容器内の温度、圧力の情報は、CONTEMPT-PSコード<sup>7)</sup>から求め、その値を時間ステップごとに入力値として使用している。

ヨウ素除去過程にかかわる諸現象について、MIRAP/MIRABコードはよく考えられてはいるが、格納容器内の気相および液相の濃度の算出の方法、およびBWRの場合の液相につい

\* ヨウ素エアロゾルとは、ヨウ素が固体微粒子に付着したものと、スプレイ液滴から生成する液体微粒子である。

ての基礎式での扱い方などいくつかの誤りがある。そのため、気液分配係数については、約2倍大きく誤った値を算出し、それだけ、格納容器内気相のヨウ素濃度がすみやかに低下し、かつ、低い濃度にまで下がる結果を算出する。また、プログラミングが完全でないため、実用上問題がある。そこで、MIRAP/MIRABコードを上述の点について修正、さらに、下記の点を改良して、計算コードMIRA-PBを作成したので、それについて報告する。

MIRA-PBコードは、PWRおよびBWR両タイプの原子炉格納容器スプレイ系についてのヨウ素除去過程を計算対象として、MIRAP/MIRABコードのもつ機能に加えて、PWRのセミダブルおよびダブル型格納容器の計算も実施できるようにした。さらに、LOCA直後におけるECOS水および格納容器スプレイ水によるサンプル水の水量変化、スプレイ水が格納容器壁へかかる効果、および格納容器がステンレス材である場合のヨウ素の沈着についても考慮した。また入力データの単位系をメートル法単位系に整理し、常微分方程式の解法が効率的な計算で行なえるよう改良した。

この報告書では、想定事故時に放出されるヨウ素のうち大部分を占める無機ヨウ素の水洗除去効果に焦点を合わせて、有機ヨウ素、ヨウ素エアロゾルについての除去過程も含めた検討結果と、実炉に近い値での想定事故時のヨウ素除去の計算結果について述べる。はじめに、PWR BWRの格納容器スプレイ系の概要と、実証的試験を予定している原研モデル格納容器についてふれる。ついで、MIRA-PBコードの仮定ならびにその解析モデルを、PWRおよびBWRについて述べる。また、ヨウ素除去過程を明確にする目的で、気液分配係数、物性値、スプレイ液滴の衝突合体、液滴の軌跡、液滴へのヨウ素の吸収効率、ヨウ素の壁面沈着、ヨウ素エアロゾルの挙動について記述し、諸文献により公表されている実験データと比較する。

さらに、軽水型発電炉に近い値で想定事故時の格納容器スプレイによるヨウ素除去の計算を行ない、ついで、Battelle Northwest 研究所のCSE実験の計算を実施する。また、原研モデル格納容器の実験予備計算も一例として述べる。最後に、MIRA-PBコードのVersion discriptionとSample dataを付加して、この報告書を、ユーザ レポートとしての性格をもたせる。



## 2. LWR格納容器および原研モデル格納容器

### 2.1 BWR格納容器スプレイ系

図 2.1 に GE 社製 Mark I 型 (784MWe), 図 2.2 に Mark II 型 (1100MWe) の格納容器スプレイ系概略図を示す。

Mark I 型はいわゆる電球型のドライウエルとドーナツ型のサブプレッションチェンバからなり, Mark II 型は円錐台型のドライウエルとその真下のサブプレッションチェンバから構成されている。

1 次系破断によりドライウエル中に放出された蒸気は, ベント管によりサブプレッションチェンバの水中に導入されて凝縮し, 格納容器内の圧力上昇が抑制される。

格納容器スプレイ系は非常用電源を有する完全独立 2 系統からなり, その 1 系統のみでも圧力上昇を抑制することができる。なお, 格納容器スプレイ系は事故後 10 分に低圧注水系より切換え, 作動を開始するよう設計されている。スプレイ液は, サプレッションチェンバの水を残留熱除去系熱交換器により冷却して循環使用する。格納容器スプレイノズルとしては Full cone cluster ノズルが使用され, ドライウエルとサブプレッションチェンバのスプレイ液量比は約 9.5 : 5 である。なお, スプレイ液には純水 ( $1\mu\text{V}/\text{cm}$  at  $25^\circ\text{C}$ ,  $\text{Cl}^-$  イオン  $0.5\text{mm}$  以下 (運転開始後の管理値), pH 6~8 (中性)) あるいはクロレート水 ( $\text{CrO}_4$  イオン  $500\sim 1000\text{ppm}$ , pH 9~9.7) が使用されている。

表 2.1 に BWR と PWR の格納容器気相, 液相体積を示す。BWR は PWR に比し気相体積が小, 液相体積が大であり, BWR の圧力抑制型格納容器と PWR の乾式型格納容器の特徴が示されている。

BWR と PWR の格納容器スプレイ流量を表 2.2 に示す。BWR 格納容器スプレイ系の流量は, PWR に比し約 2 倍である。

### 2.2 PWR 格納容器スプレイ系<sup>9)</sup>

図 2.3 に Westinghouse 社製の代表的な加圧水型炉のスプレイ系フローシートを, 表 2.3 には 4 ループプラントに対する設計値を示す。燃料取替用水タンクより吸入され, 格納容器スプレイポンプを通ったスプレイ水 (ホウ酸水) の一部は, 試薬添加用のエダクタを通り, そこで試薬貯蔵用タンク内の 30 wt. % 苛性ソーダ水溶液を吸引して, 格納容器スプレイノズルより噴霧される。この試薬は, 燃料取替用水タンク内のホウ酸水の水位が低位になるまでエダクタから連続的に吸引される。燃料取替用水タンクからの給水終了後は, 格納容器サンプ内に溜った溶液を内部スプレイクーラで冷却しスプレイ水として 3 ヶ月~1 年間循環使用する。

スプレイノズルとしては Hollow cone ramp bottom 型の SPRACO 1713A ノズルが使用されている。また, スプレイヘッドおよびノズルは, スプレイ水が格納容器気相部全体を

被うように、かつ異なったノズルから噴霧されたスプレイ水の干渉が最小になるように配置されている。更に、格納容器内壁面へのスプレイ水の飛散は最小限に押さえられている。

スプレイ水としては、0.14 wt % ホウ酸水に放射性ヨウ素除去薬品として30 wt. % の苛性ソーダ水溶液をエダクタで吸引混合して pH8.3~10 の溶液が使用される。

### 2.3 原研モデル格納容器

日本原子力研究所東海研究所において、格納容器スプレイ効果に関する実証的試験を実施するに際し、原研モデル格納容器が製作されている。

モデル格納容器は  $7\text{ m}^{\phi} \times 20\text{ m}^{\text{H}}$  の円筒形のステンレスクラッド鋼製である。

図 2.4 には GE 社製 BWR の Mark I 型格納容器と原研モデル格納容器を、図 2.5 には Mark II 型格納容器と原研モデル格納容器を比較して示す。

事故時のスプレイによるヨウ素除去において BWR でもっとも厳しい条件は、格納容器上部配管破断（格納容器上部ヨウ素放出）、下段格納容器スプレイ作動の場合と考えられる。原研モデル格納容器直径  $7\text{ m}^{\phi}$  は、この実炉下段格納容器スプレイヘッド位置での空間部（環状部）の巾（Mark I および Mark II では約  $6\text{ m} \sim 7.5\text{ m}$ ）に対応しており、図 2.4、図 2.5 に図示されるように、Mark I 型に対しては 56 度のセクトルに、Mark II 型に対しては 50 度のセクトルになる。

また、上述のように事故時のヨウ素放出位置と作動スプレイ位置の関係は、ヨウ素除去速度への影響を考慮して、原研モデル格納容器ではヨウ素注入位置を容器上部、下部の 2 個所に設定し、実験条件に応じてヨウ素注入点を選べる形式になっている。それらも図 2.4、図 2.5 にそれぞれ示した。

さらに、原研モデル格納容器には、容量  $80\text{ m}^3$  のスプレイ水タンクおよびサプレッションプールに対応する容量  $80\text{ m}^3$  のドレン水タンクを備えている。また、モデル格納容器本体中にも約  $80\text{ m}^3$  まで水を張ることができ、これは、BWR のドライウエルサンプ水に対応させることができる。

なお、実炉格納容器内には作業用のグレーチングが数段にわたって張られているので、原研モデル格納容器でもグレーチングを張る構造となっている。それらも図中に示した。

### 2.4 冷却材喪失事故時のヨウ素放出量

軽水炉の安全審査においては、重大事故と仮想事故を想定して、その安全評価を行っている。

重大事故では、1 次冷却材循環系配管が破断した際に、非常用炉心冷却系が作動したにもかかわらず、一部の被覆管が破損する場合を想定している。仮想事故では、非常用炉心冷却系の効果を見逃した場合に相当する放射能の放出を想定している。重大事故時に放出される核分裂生成物は、燃料体インベントリに対して希ガス 1~2 %、ヨウ素 0.5~1 %、また仮想事故時には希ガス 100 %、ヨウ素 50 % と仮定されている。放出されたヨウ素のうち 10 % を有機ヨウ素、90 % を無機ヨウ素と仮定し、この無機ヨウ素のうち 50 % が原子炉圧力容器および

格納容器の内壁ならびに機壁の表面に付着するとしている。従って、炉心に内蔵されているヨウ素のうち、重大事故では0.55%が、仮想事故では27.5%が格納容器気相部に放出されることになる。さらに安全審査では、BWRでは気液分配係数100で、PWRでは等価半減期100秒で、無機ヨウ素のみが格納容器スプレイにより水洗除去されるものとしている。そして格納容器気相部の核分裂生成物（希ガス，ヨウ素，エアロゾル）は，原子炉建屋（BWR）やアニュラス（PWR）から非常用ガス処理系を通して排気筒より大気へと設計放出率で放出される。

表2.4に、事故時の格納容器気相部への初期ヨウ素放出量（格納容器スプレイの水洗除去をうける前）の計算値を示す。なお事故発生直前まで原子炉は定格の105%出力で1000日連続運転していたものとした。

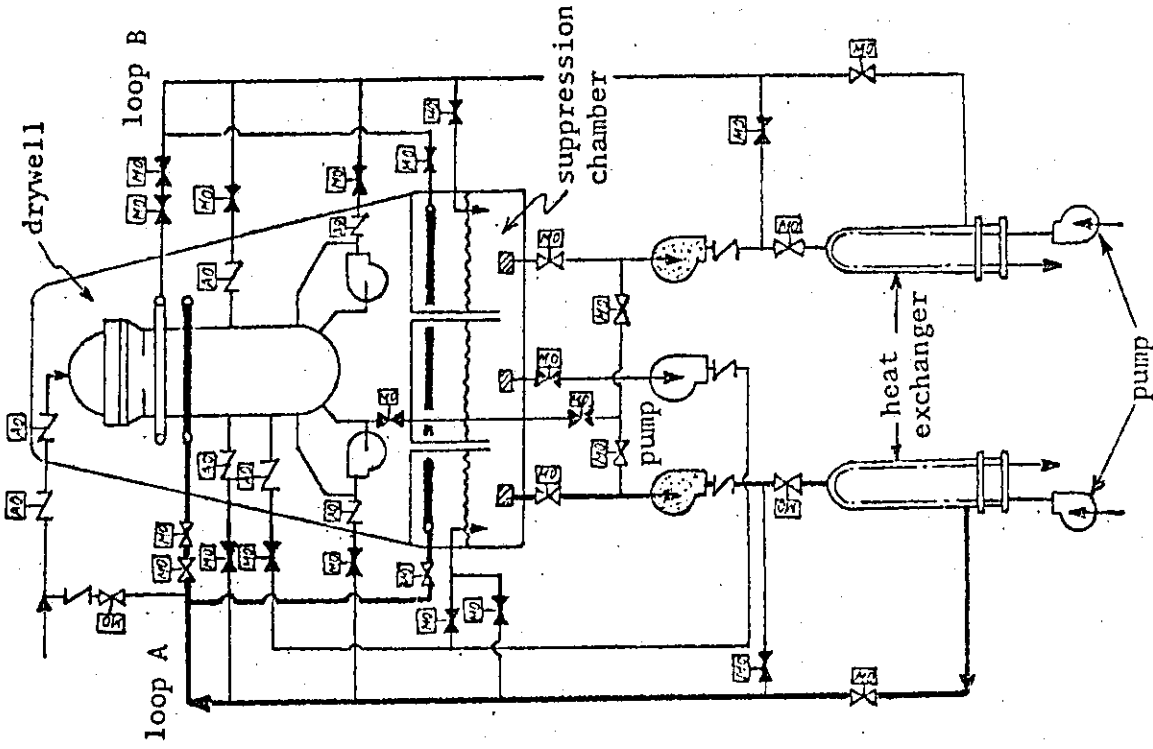


Fig. 2.2 Schematic Diagram of Containment Spray System of Mark II

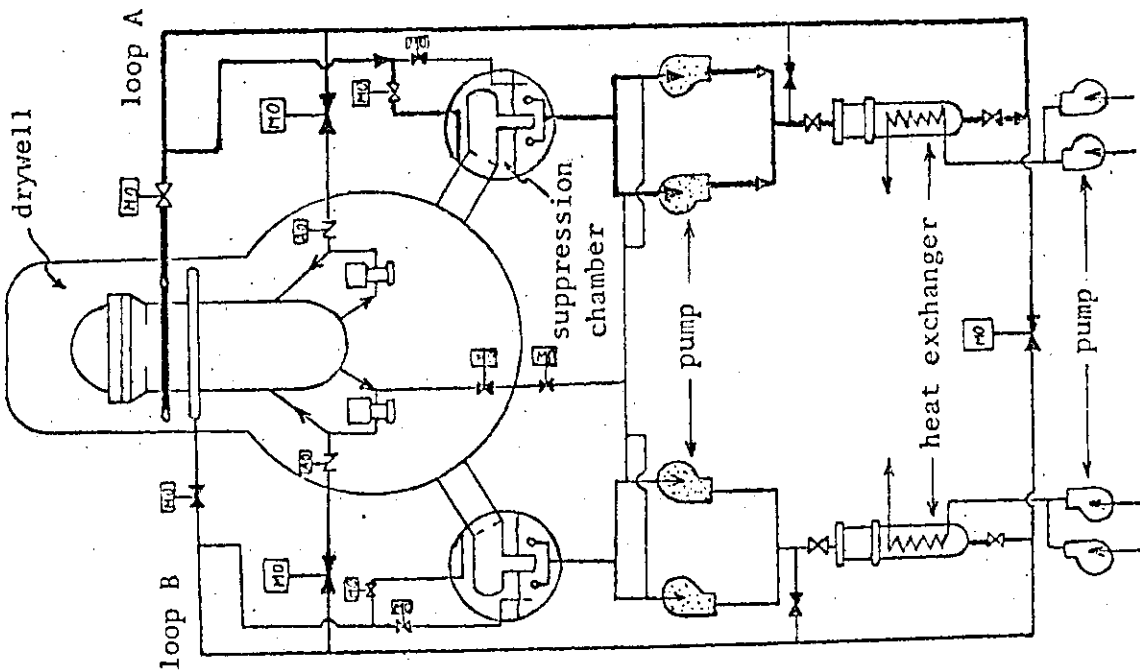


Fig. 2.1 Schematic Diagram of Containment Spray System of Mark I

Table 2.1 Water Volume and Air Volume of LWR

	BWR		PWR (826MW <sub>e</sub> )
	Mark I (784MW <sub>e</sub> )	Mark II (1100MW <sub>e</sub> )	
Air Volume V <sub>g</sub> [m <sup>3</sup> ]	Drywell ... 4240 Wetwell ... 3160	Drywell ... 5700 Wetwell ... 4100	6.95 x 10 <sup>4</sup>
Water Volume V <sub>l</sub> [m <sup>3</sup> ]	3680	4260	2000
$\frac{V_l}{V_g}$	0.497	0.435	0.0288

Table 2.2 Containment-Spray Flow Rate of LWR

Type of Reactor	Type of Containment	Location	Flow Rate [m <sup>3</sup> /hr]
BWR	Mark I ( 784 MW <sub>e</sub> )	Upper Header in Drywell	1660
		Lower Header in Drywell	1660
		Suppression Chamber	2x87.4
	Mark II ( 1100 MW <sub>e</sub> )	Upper Header in Drywell	1810
		Lower Header in Drywell	1810
		Suppression Chamber	2x95.4
PWR	( 826 MW <sub>e</sub> )	Upper Region of Containment	846 (1 loop)
	( 559 MW <sub>e</sub> )	Upper Region of Containment	600 (1 loop)

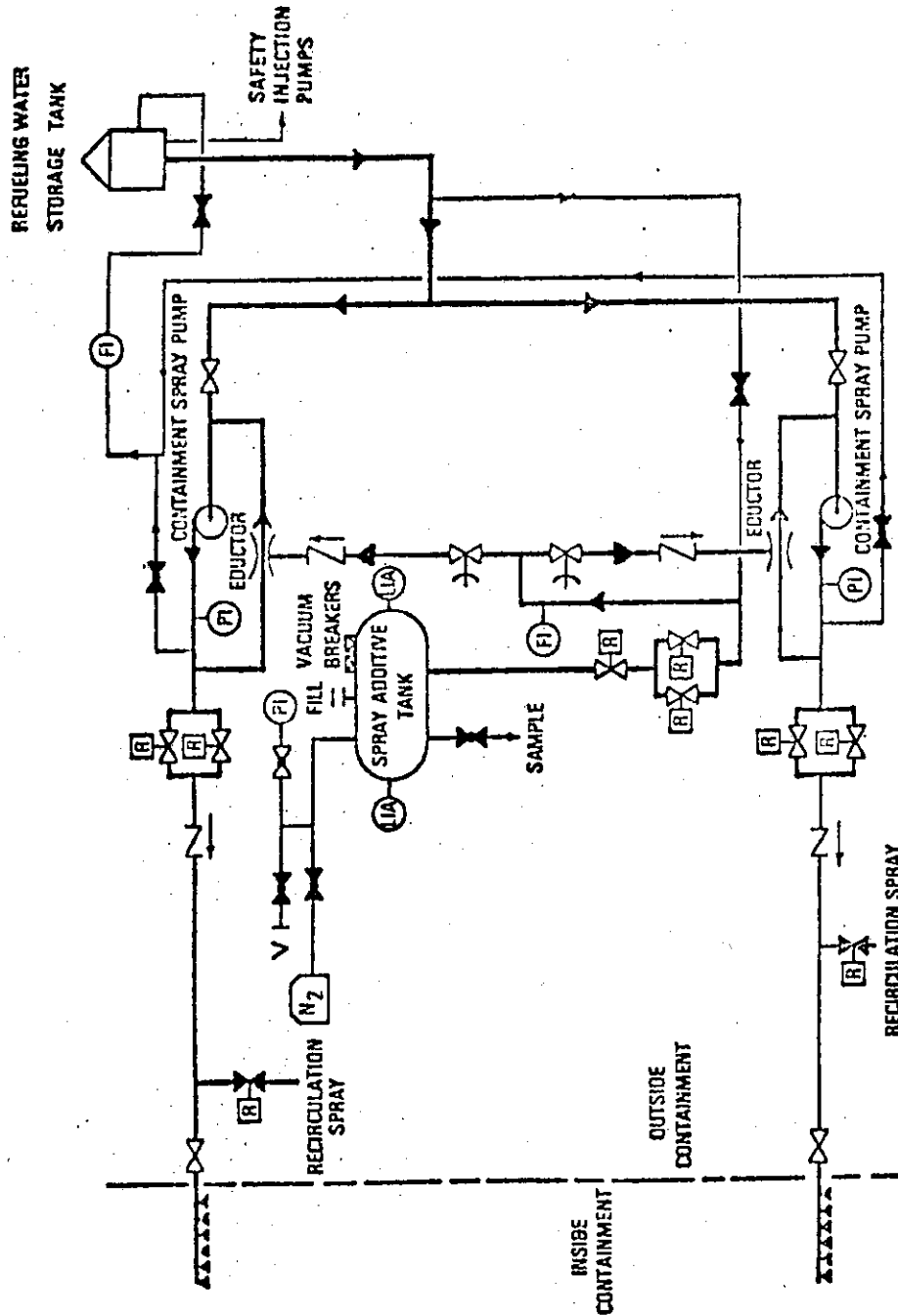


Fig. 2.3 Spray Additive System Flow Diagram of PWR 9)

Table 2.3 Spray Additive System Component  
Design Parameters of PWR<sup>9)</sup>

Spray Additive Tank	
Type	Horizontal
Fluid	30 wt% NaOH solution
Tank Volume	4000 gal
Design pressure	Atmospheric-internal; 2 psi-external
Design temperature	200°F
Material of construction	Austenitic stainless steel
Spray Additive Eductor	
Design pressure	250 psig
Design temperature	150°F
Material of construction	Austenitic stainless steel
Suction Conditions	
Fluid	30 wt% NaOH solution
Flow rate	37.4 gal/min
Pressure	14 psia
Temperature	Ambient
Inlet Conditions	
Fluid	0.6 wt% NaOH and 0.2 wt% boron solution
Flow rate	112 gal/min
Pressure	225 psig
Temperature	Ambient
Discharge Conditions	
Fluid	9.5 wt% NaOH and 0.14 wt% boron solution
Flow rate	145 gal/min
Pressure	33 psig
Temperature	Ambient

Mark I (784MW<sub>e</sub>) JAERI Model  
Containment Vessel

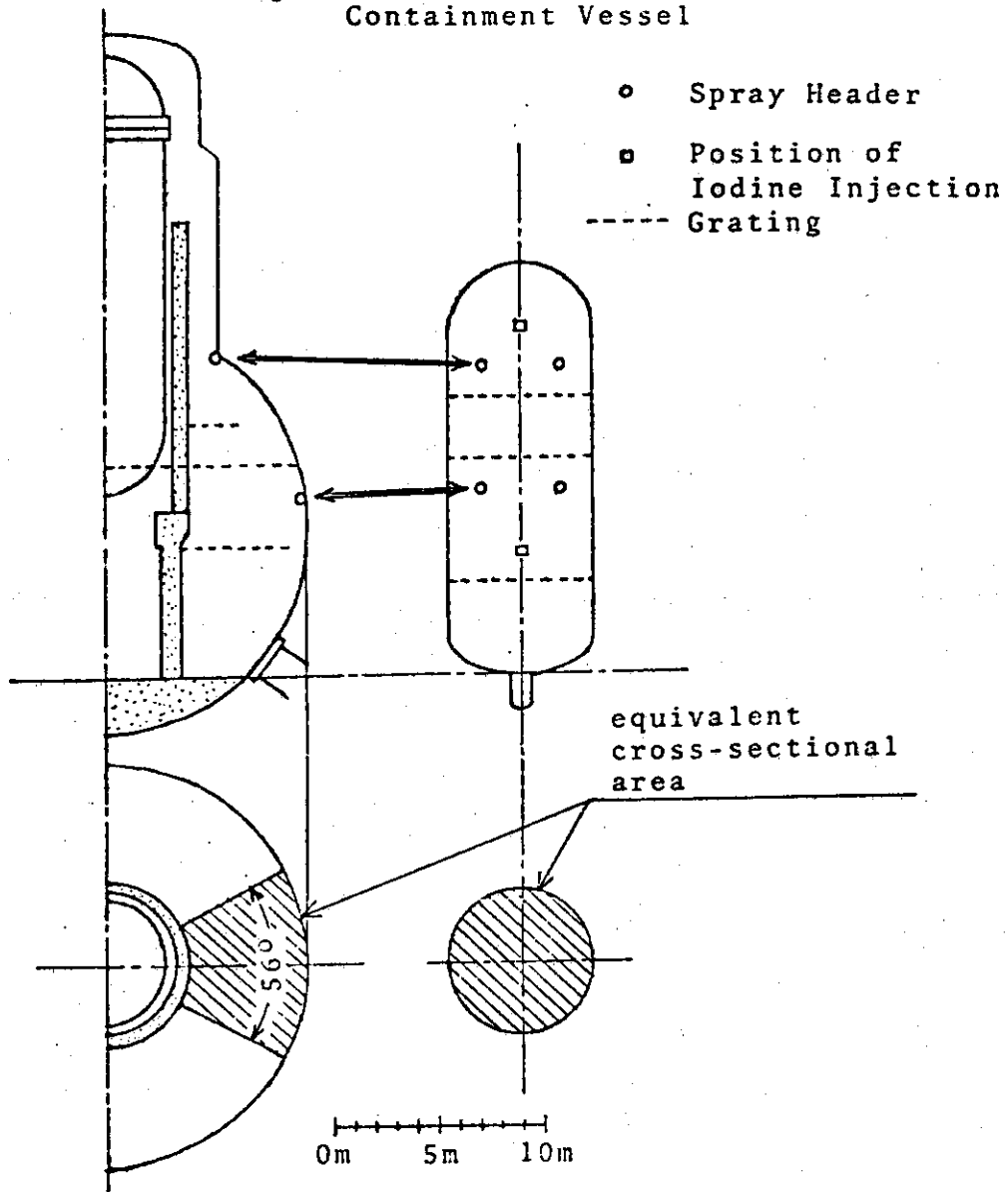


Fig. 2.4 Comparison of JAERI Model Containment Vessel with Mark I Containment Vessel



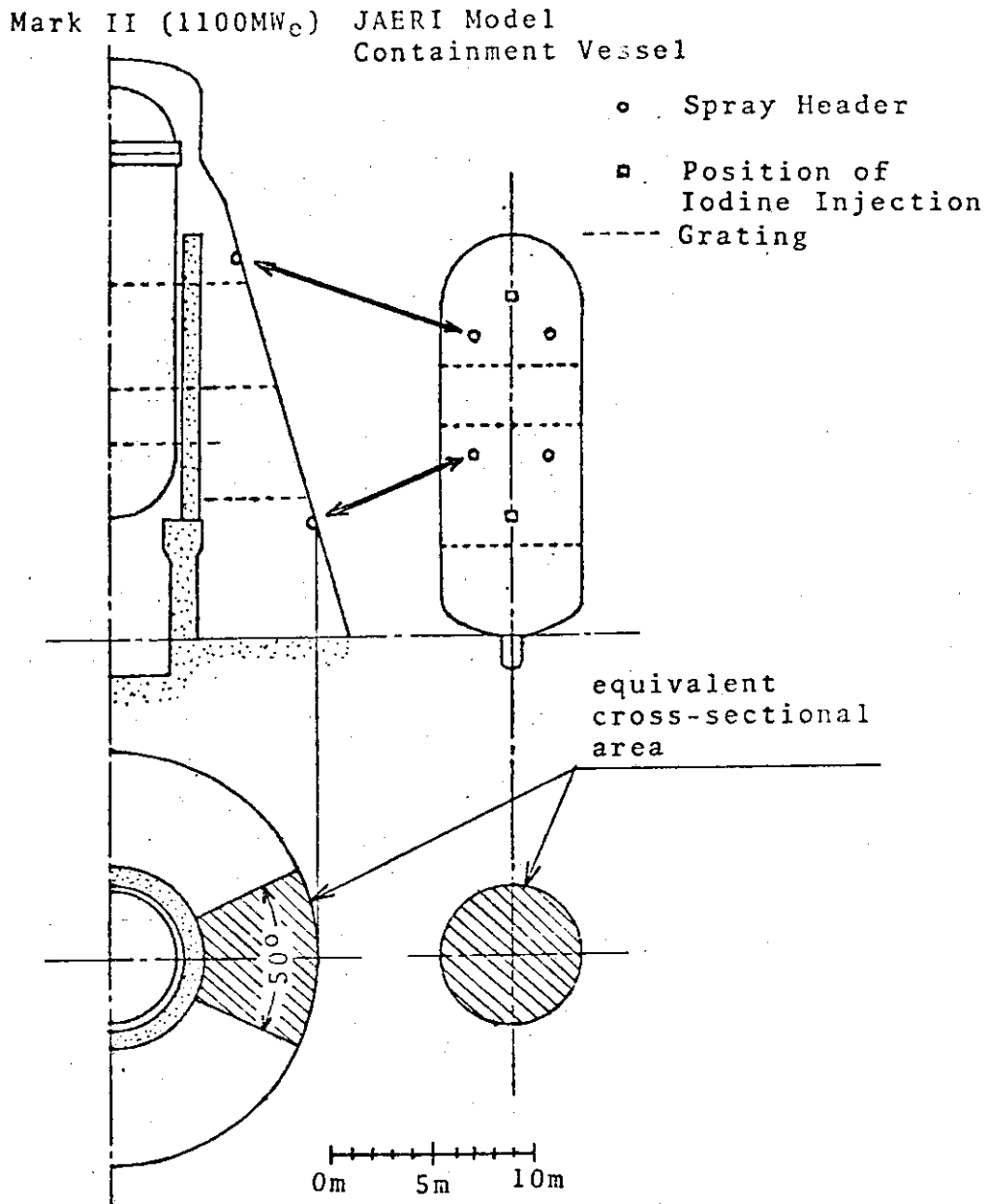


Fig. 2.5 Comparison of JAERI Model Containment Vessel with Mark II Containment Vessel

Table 2.4 Initial Mass and Concentration of Iodine in Containment Vessel  
 ( under the conditions of 105% power level and 1000 days - operation )

Reactor Type Iodine in Accident Containment Vessel	BWR				PWR	
	Mark I (784MWe) (2381MWt)		Mark II (1100MWe) (3293MWt)		(826MWe) (2440MWt)	
	Major	Hypothetical	Major	Hypothetical	Major	Hypothetical
Mass [g]	65.5	3270	90.5	4530	67.1	3350
Concentration [g/m <sup>3</sup> ]	0.00884	0.442	0.00924	0.462	$9.65 \times 10^{-4}$	0.0485

### 3. 解 析 モ デ ル

冷却材喪失事故などの想定事故において、原子炉格納容器内には放射性ヨウ素が放出される。微量の放射性ヨウ素は、格納容器からの漏洩、あるいは非常用フィルタ系を通り大気中に放出される。原子炉格納容器システムによるヨウ素除去過程を詳細に解析することは、原子力プラントの安全評価のため重要なことである。

原子炉格納容器システムでのヨウ素除去機構は、いくつかの現象の組合わさった複合過程であり、それらの効果は格納容器の雰囲気物の物性によって著しく変わってくる。近年、各々の過程について注目した解析モデルや計算コードが種々の研究機関によって作成されている。これらの機関で作成された解析モデルには、ヨウ素の自然除去過程<sup>10)</sup>、スプレーによる除去過程<sup>11)</sup>、フィルタの除去過程<sup>12)</sup>、液相のスクラビング過程<sup>13)</sup>が考慮されており、また、それぞれの過程についての有益な実験データも得られている。

格納容器内のヨウ素除去過程は、容器内の温度や物性値に強く依存する。そのため、ヨウ素除去解析と合せ、格納容器内の温度、圧力挙動解析を行い、容器内の温度条件を把握する必要がある。

MIRA-PBコードでは、実炉の型式に応じ、ドライ格納容器システム(PWR)と減圧プール型格納容器システム(BWR)の計算を行えるようにしてある。その計算においては、熱解析コードにより得た計算結果を温度等の計算データとして使用する。

#### 3.1 PWR

PWRの原子炉格納施設の型式としては、「ドライ型」と「アイスコンデンサ型」に大別されるが、MIRA-PBコードでは、ドライ格納容器システム、すなわち、

- (1) コンクリート製格納容器(シングル型)\*
- (2) セミダブル型格納容器
- (3) ダブル型格納容器

を解析対象とし、その概要について以下に述べる。

格納容器内のヨウ素除去の数式モデルについては、自然沈着、スプレーによる除去、フィルタの吸着および格納容器からの漏洩などを考慮する。図3.1には、PWRについての、数式モデルのブロックダイヤグラムを示す。まず、想定事故により、格納容器内にヨウ素が放出される。このヨウ素は無機ヨウ素、有機ヨウ素、ヨウ素エアロゾルの3形態とし、それぞれある一定割合のもとで、格納容器内に放出される。放出されたヨウ素は、格納容器内の気相中に均一

\* コンクリート製格納容器とは、鉄筋コンクリートあるいはプレストレストコンクリート製外部遮蔽壁の内面に、スチールのライニングを施している。格納容器の強度は、コンクリート自体が受けもち、スチールには耐圧強度をもたしていない。我国では、まだ実用化されていない。

に浮遊し、容器壁へ自然沈着する。この沈着速度は温度の関数であり、ヨウ素濃度に対して1次反応で気相から容器壁へ移動するが、その逆の過程はないものとする。ヨウ素エアロゾルは、ある沈降速度で格納容器サンプ水へ落下して行く。事故後、ある時間たつと格納容器スプレイ系が作動し、格納容器内の除熱およびヨウ素除去のため、格納容器スプレイが始まる。このスプレイは、初め、燃料取替用水を使用し、その後は格納容器サンプに溜った水を再循環し使用する。このときの前者を初期スプレイと呼び、後者を再循環スプレイと呼ぶことにする。スプレイ液の大部分は、格納容器気相に散布され、気相中のヨウ素を吸収し、サンプに流れる。スプレイ液のごく一部は、格納容器壁に降りそそぎ、容器壁で薄い液膜となりサンプへ流れ落ちる。また、気相中の水蒸気も容器壁で凝縮し、液膜を形成する。この液膜と格納容器気相との間および液膜と容器壁との間についても、ヨウ素の移動が起こる。スプレイ液および液膜によるヨウ素の吸収は、気液分配係数の関数である。この気液分配係数は、pH、温度、ヨウ素濃度の関数とし、加水分解反応を考慮してその値を決定する。

格納容器内の気相ヨウ素濃度の低減のために、格納容器再循環フィルタが設置されている。再循環フィルタは、無機ヨウ素、有機ヨウ素、エアロゾルのそれぞれについて一定割合で除去する。格納容器の漏洩率は、容器内圧にかかわらず一定とする。その漏洩の10%程度は、格納容器ドーム部から、直接環境に放出され、他はアニュラスに洩れる。アニュラスは、常に、負圧に保たれ、溶接の継目やノズル貫通部等から、直接外部へ放射性物質が漏洩しないようになっている。アニュラス中の気体は、排気フィルタを通り、大部分は再びアニュラスへ戻る。また、アニュラスを負圧に保つため、一部は排気筒から環境に放出される。なお、コンクリート製格納容器にはアニュラスはなく、格納容器ドーム部からの環境への漏洩もない。ダブル型格納容器の場合も、ドーム部から環境への直接の漏洩はない。

解析における仮定は、次の通りである。

- (1) 格納容器気相は、十分に混合されている。
- (2) 格納容器内の一部の壁面において、水蒸気の凝縮が起こり、均一な厚みの液膜が生じる。
- (3) 格納容器スプレイの一部が、容器壁にスプレイされ、前項の凝縮液と共に、均一な厚みの液膜を形成し、容器壁へのスプレイ量と凝縮液量との和に等しい量が濡れ面を流れる。
- (4) 格納容器に放出されるヨウ素としては、無機ヨウ素、有機ヨウ素、ヨウ素エアロゾルを考慮する。
- (5) 格納容器内壁の乾き面への無機ヨウ素の物質移動は、気相境界層で生じる自然対流に起因した拡散によって起こる。
- (6) 濡れ面への無機ヨウ素の物質移動は、液膜の流れと境界層内の拡散により起こる。
- (7) 格納容器壁での無機ヨウ素の沈着過程は不可逆である。
- (8) 格納容器壁での有機ヨウ素の沈着は無視する。
- (9) ヨウ素エアロゾルについては、重力沈降、液膜への拡散泳動およびスプレイ液による衝突捕集効果を考慮する。
- (10) 液膜による無機ヨウ素の吸収速度は、気液分配係数に依存し、この分配係数は、pH、温度、スプレイ液滴および気相のヨウ素濃度に依存する。
- (11) スプレイ液による無機ヨウ素の吸収速度も、気液分配係数に依存し、pH、温度、スプレ

レイ液滴のヨウ素濃度に依存する。

- (12) 無機ヨウ素の気液分配係数は、ヨウ素の加水分解反応を考慮して求め、この加水分解反応は可逆反応とし、気相と液相の接触面で平衡が成り立つ。
- (13) スプレイ液による有機ヨウ素の吸収速度は、平衡気液分配係数に依存する。この分配係数は温度だけの関数とする。
- (14) スプレイ液によるヨウ素エアロゾルの捕集は、最も効果の大きい慣性衝突・インターセプション、拡散泳動の過程を考慮する。
- (15) スプレイ液滴は、格納容器内に均一にスプレイされ、その液滴径分布は、対数正規に従う。格納容器内を落下する液滴は、液滴同志の衝突により合体する。
- (16) スプレイ液滴の物質移動における液相側の抵抗を計算する場合、スプレイ液滴は剛体球として取り扱う。すなわち、液滴内部の循環はないものとする。
- (17) 再循環フィルタでは、無機ヨウ素、有機ヨウ素、ヨウ素エアロゾルについて、別々にヨウ素が除去され、そのフィルタ効率是一定とする。
- (18) 格納容器サンプには、水蒸気の凝縮液、スプレイ液および重力沈降によるエアロゾルが集まる。
- (19) セミダブル格納容器においては、格納容器ドーム部から大気中への漏洩が起こり、その漏洩率是一定とする。
- (20) 格納容器からアニュラスへの漏洩率も、同様に一定とする。
- (21) 排気フィルタでは、無機ヨウ素、有機ヨウ素、ヨウ素エアロゾルについて、別々にヨウ素除去が行われ、その効率は時間に関して一定とする。

以上のような仮定のもとに、格納容器システムのヨウ素除去過程は、次に示す式により表わされる。格納容器気相の無機ヨウ素濃度、有機ヨウ素濃度、ヨウ素エアロゾル濃度の時間変化は、それぞれ

$$\begin{aligned} \frac{dC_1}{dt} = & \frac{\alpha B_1}{V_1} - \left[ \frac{AD_1}{V_1} \left( \frac{k_{C_1} k_{A_1}}{k_{C_1} + k_{A_1}} \right) + \frac{AW_1}{V_1} (k_{C_1} + k_{S_1}) \right. \\ & \left. + \frac{Q_{F_1} E_{C_1}}{V_1} + \lambda_{SC_1} + \lambda_{SC_1 X} + \frac{Q_{E_1}}{V_1} \right] C_1 \\ & + \left[ \frac{AW_1}{V_1} \left( \frac{k_{C_1}}{H_{C_1}} \right) \right] C_{W_1} + \left[ \frac{\lambda_{SC_1 X}}{H_X} \right] C_{L_1} + \frac{\lambda_{SC_1}}{H} C_{L_0} \quad (3-1) \end{aligned}$$

$$\frac{dM_1}{dt} = \frac{\beta B_1}{V_1} - \left[ \lambda_{SM_1} + \lambda_{SM_1 Y} + \frac{Q_{F_1} E_{M_1}}{V_1} + \frac{Q_{E_1}}{V_1} \right] M_1 + \left[ \frac{\lambda_{SC_1 Y}}{H_Y} \right] M_{L_1}$$

(3-2)

$$\frac{dP_1}{dt} = \frac{\gamma B_1}{V_1} - \left[ \frac{A_{W1}}{V_1} k_{S1} + \frac{A_{L1}}{V_1} V_t + \lambda_{SP1} + \frac{Q_{F1} E_{P1}}{V_1} + \frac{Q_{E1}}{V_1} \right] P_1 \quad (3-3)$$

である。水蒸気の凝縮およびスプレイ液により生じる液膜のヨウ素濃度変化は

$$\begin{aligned} \frac{dC_{W1}}{dt} = & \left[ \frac{A_{W1}}{V_{W1}} (k_{C1} + k_{S1}) \right] C_1 + \left[ \frac{A_{W1}}{V_{W1}} k_{S1} \right] P_1 \\ & - \left[ \frac{A_{W1}}{V_{W1}} \left( \frac{k_{C1}}{H_{C1}} + \frac{N_{S1}}{\rho_W} + \frac{k_{J1} \cdot k_{W1}}{k_{J1} + k_{W1}} \right) \right] C_{W1} + \frac{Q_{W2}}{V_{W1}} C_{L1} + \frac{Q_{W1}}{V_{W1}} C_{L0} \end{aligned} \quad (3-4)$$

である。格納容器サンプールの無機ヨウ素の濃度変化，有機ヨウ素の濃度変化は

$$\begin{aligned} \frac{dC_{L1}}{dt} = & \left[ \frac{V_1}{V_{L1}} (\lambda_{SC1} + \lambda_{SC1X}) \right] C_1 + \left[ \frac{A_{L1}}{V_{L1}} V_t + \frac{V_1}{V_{L1}} \lambda_{SP1} \right] P_1 \\ & + \left[ \frac{A_{W1}}{V_{L1}} \left( \frac{N_{S1}}{\rho_W} \right) + \frac{Q_{W1}}{V_{L1}} + \frac{Q_{W2}}{V_{L1}} \right] C_{W1} - \left[ \frac{V_1}{V_{L1}} \left( \frac{\lambda_{SC1X}}{H_X} \right) \right] C_{L1} \\ & + \left[ \frac{Q_{SP} - Q_{W1}}{V_{L1}} - \frac{V_1}{V_{L1}} \frac{\lambda_{SC1}}{H} \right] C_{L0} \end{aligned} \quad (3-5)$$

$$\frac{dM_{L1}}{dt} = \left[ \frac{V_1}{V_{L1}} (\lambda_{SM1} + \lambda_{SM1Y}) \right] M_1 - \left[ \frac{V_1}{V_{L1}} \left( \frac{\lambda_{SM1Y}}{H_Y} \right) \right] M_{L1} \quad (3-6)$$

である。格納容器壁でのヨウ素濃度の変化は

$$\begin{aligned} \frac{dC_{A1}}{dt} = & \left[ \frac{A_{D1}}{A_{D1} + A_{W1}} \left( \frac{k_{C1} k_{A1}}{k_{C1} + k_{A1}} \right) \right] C_1 \\ & + \left[ \frac{A_{W1}}{A_{D1} + A_{W1}} \left( \frac{k_{J1} k_{W1}}{k_{J1} + k_{W1}} \right) \right] C_{W1} \end{aligned} \quad (3-7)$$

となる。アニュラス部の無機ヨウ素，有機ヨウ素，ヨウ素エアロゾルの濃度変化は，それぞれ

$$\frac{dC_3}{dt} = \left[ \frac{Q_{E1} (1-\gamma)}{\theta V_3} \right] C_1 - \left[ \frac{Q_{E2} E_{C1}}{\theta V_3} + \frac{Q_{E3} (1-E_{C1})}{\theta V_3} \right] C_3 \quad (3-8)$$

$$\frac{dM_3}{dt} = \left[ \frac{Q_{E_1} (1-\eta)}{\theta V_3} \right] M_1 - \left[ \frac{Q_{E_2} E_{M_1}}{\theta V_3} + \frac{Q_{E_3} (1-E_{M_1})}{\theta V_3} \right] M_3 \quad (3-9)$$

$$\frac{dP_3}{dt} = \left[ \frac{Q_{E_1} (1-\eta)}{\theta V_3} \right] P_1 - \left[ \frac{Q_{E_2} E_{P_1}}{\theta V_3} + \frac{Q_{E_3} (1-E_{M_1})}{\theta V_3} \right] P_3 \quad (3-10)$$

である。式(3-1)から式(3-10)の連立微分方程式を解くことにより、格納容器内の無機ヨウ素、有機ヨウ素、ヨウ素エアロゾルの各位置における濃度およびその時間変化が得られる。さらに、再循環フィルタにより捕集されるヨウ素量の変化、環境へ放出されるヨウ素量の変化は

$$\frac{dI_F}{dt} = [Q_{F_1} E_{C_1}] C_1 + [Q_{F_1} E_{M_1}] M_1 + [Q_{F_1} E_{P_1}] P_1 \quad (3-11)$$

$$\begin{aligned} \frac{dI_E}{dt} = & [Q_{E_3} (1-\epsilon_C)] C_3 + [Q_{E_3} (1-\epsilon_M)] M_1 \\ & + [Q_{E_3} (1-\epsilon_P)] P_3 + [Q_{E_1} \eta] C_1 + [Q_{E_1} \eta] M_3 \\ & + [Q_{E_1} \eta] P_1 \end{aligned} \quad (3-12)$$

$$\frac{dI_{EF}}{dt} = [Q_{E_2} \epsilon_C] C_3 + [Q_{E_2} \epsilon_M] M_3 + [Q_{E_2} \epsilon_P] P_3 \quad (3-13)$$

であり、式(3-11)から式(3-13)を積分することにより、それぞれ再循環フィルタの累積ヨウ素量、環境へ放出されるヨウ素の累積量、排気フィルタの累積ヨウ素量が得られる。式(3-1)～式(3-13)の解法としては、4次のRunge-Kutta-Gill法を用いる。

### 3.2 BWR

減圧プール型格納容器システムにおけるヨウ素除去過程の解析は、前項で述べたドライ格納容器システムに対する方法と、本質的に異なるものでなく、基本的には格納容器本体に、サプレッションチェンバを加味すればよい。また、減圧プール型格納容器システムについての数式モデルは、わずかの追加変更をすることで、アイスコンデンサ型格納容器システムに対しても適用することができる。

減圧プール型格納容器システムについての数式モデルは、図3.2に示すように、ドライウェル、サプレッションチェンバおよび原子炉建家の3要素から構成される。ドライウェルは、ドライ型格納容器システムにおける格納容器に対応し、原子炉建家はアニュラスに対応する。ドライウェルでのヨウ素除去過程は、再循環フィルタに関する事項を除き前項と同様、自然沈着、

スプレイによるヨウ素除去，容器からの漏洩などから成る。放射性ヨウ素は，ドライウェル気相に均一に放出される。ドライウェル気相濃度は，ヨウ素の自然沈着，スプレイ液による除去，漏洩により低下する。ドライウェルとサブプレッションチェンバは，ベント管により接続されており，ドライウェル気相中の空気および水蒸気，底部に蓄ったスプレイ液は，ベント管を通りサブプレッションチェンバに流入する。その際，気相中のヨウ素は，気相と液相とのスクラビング作用により，その一部が液相に吸収される。サブプレッションプル水は，ポンプにより吸み上げられ，再びドライウェルのスプレイ液として再循環する。ドライウェルの気相およびサブプレッションチェンバの気相から漏洩した気体は，全て原子炉建家内に洩れ，原子炉建家の気体は，非常用排気フィルタを通り排出筒から環境に放出される。非常用フィルタでは，無機ヨウ素，有機ヨウ素，ヨウ素エアロゾルがそれぞれある一定割合で捕集される。

前項での仮定は，再循環フィルタについての項目(7)を除いて，BWRに対しても考慮されている。さらに，次のことを仮定する。

- (1) サプレッションチェンバの気相，液相とも，それぞれ十分に混合されている。
- (2) サプレッションチェンバ内の無機ヨウ素と有機ヨウ素は，ドライウェルから流れ込み，サブプレッションチェンバ液相中のスクラビング時の気液分配係数に従い，気相と液相にそれぞれ分配される。但し，サブプレッションチェンバ内では，スプレイの散布はないものと仮定する。
- (3) ベント管を通ったヨウ素エアロゾルは，ある割合で気液相に分離され，その捕集は瞬間的に起こる。この過程の効率は，ドライウェルからの流入気体中に含まれる水蒸気量に依存する。
- (4) サプレッションチェンバ気相からドライウェルへの気体の戻りの流れは考えない。
- (5) ドライウェルおよびサブプレッションチェンバからの漏洩は，原子炉建家へ入る。
- (6) 原子炉建家内の空気の混合率は一定とする。
- (7) 原子炉建家から環境への漏洩は，非常用排気フィルタ系を経由して放出される。

ドライウェル気相の無機ヨウ素，有機ヨウ素，ヨウ素エアロゾルの濃度変化は，それぞれ

$$\begin{aligned} \frac{dC_1}{dt} = & \frac{\alpha B_1}{V_1} - \left[ \frac{Q_{A2}}{V_1} + \frac{A_{D1}}{V_1} \left( \frac{k_{C1} k_{A1}}{k_{C1} + k_{A1}} \right) + \frac{A_{W1}}{V_1} (k_{C1} + k_{S1}) \right. \\ & \left. + \lambda_{SC1X} + \frac{Q_{E1}}{V_1} \right] C_1 + \left[ \frac{A_{W1}}{V_1} \left( \frac{K_{C1}}{H_{C1}} \right) \right] C_{W1} \\ & + \left[ \frac{\lambda_{SC1X}}{H_X} \right] C_{L2} \end{aligned} \quad (3-14)$$

$$\frac{dM_1}{dt} = \frac{\beta B_1}{V_1} - \left[ \frac{Q_{A2}}{V_1} + \lambda_{SM1Y} + \frac{Q_{E1}}{V_1} \right] M_1 + \left[ \frac{\lambda_{SC1Y}}{H_Y} \right] M_{L2} \quad (3-15)$$



$$\frac{dP_1}{dt} = \frac{rB_1}{V_1} - \left[ \frac{Q_{12}}{V_1} + \frac{A_{W1}}{V_1} k_{S1} + \frac{A_{L1}}{V_1} V_t + \lambda_{SP1} + \frac{Q_{E1}}{V_1} \right] P_1 \quad (3-16)$$

で表わされる。液膜のヨウ素濃度の変化は

$$\begin{aligned} \frac{dC_{W1}}{dt} = & \left[ \frac{A_{W1}}{V_{W1}} (k_{C1} + k_{S1}) \right] C_1 + \left[ \frac{A_{W1}}{V_{W1}} k_{S1} \right] P_1 \\ & - \left[ \frac{A_{W1}}{V_{W1}} \left( \frac{k_{C1}}{H_{C1}} + \frac{N_{S1}}{\rho_W} + \frac{k_{J1} k_{W1}}{k_{I1} + k_{W1}} \right) + \frac{Q_{W1}}{V_{W1}} + \frac{Q_{W2}}{V_{W1}} \right] C_{W1} \\ & + \frac{Q_{W2}}{V_{W1}} C_{L2} \end{aligned} \quad (3-17)$$

である。ドライウエル液相の無機ヨウ素，有機ヨウ素の濃度変化は

$$\begin{aligned} \frac{dC_{L1}}{dt} = & \left[ \frac{V_1}{V_{L1}} \lambda_{SC1X} \right] C_1 + \left[ \frac{A_{L1}}{V_{L1}} V_t + \frac{V_1}{V_{L1}} \lambda_{SP1} \right] P_1 \\ & + \left[ \frac{A_{W1}}{V_{L1}} \left( \frac{N_{S1}}{\rho_W} \right) + \frac{Q_{W1}}{V_{L1}} + \frac{Q_{W2}}{V_{L1}} \right] C_{W1} - \left[ \frac{Q_{L12}}{V_{L1}} \right] C_{L1} \\ & + \left[ \frac{Q_{L12} - Q_{W2}}{V_{L1}} - \frac{V_1}{V_{L1}} \frac{\lambda_{SC1X}}{H_X} \right] C_{L2} \end{aligned} \quad (3-18)$$

$$\frac{dM_{L1}}{dt} = \left[ \frac{V_1}{V_{L1}} \lambda_{SM1Y} \right] M_1 - \left[ \frac{Q_{L12}}{V_{L1}} \right] M_{L1} + \left[ \frac{Q_{L12}}{V_{L1}} - \frac{V_1}{V_{L1}} \frac{\lambda_{SC1Y}}{H_Y} \right] M_{L2} \quad (3-19)$$

である。ドライウエル内壁でのヨウ素濃度の変化は

$$\begin{aligned} \frac{dC_{A1}}{dt} = & \left[ \frac{A_{D1}}{A_{D1} + A_{W1}} \left( \frac{k_{C1} \cdot k_{A1}}{k_{C1} + k_{A1}} \right) \right] C_1 \\ & + \left[ \frac{A_{W1}}{A_{D1} + A_{W1}} \left( \frac{k_{J1} k_{W1}}{k_{I1} + k_{W1}} \right) \right] C_{W1} \end{aligned} \quad (3-20)$$

である。サプレッションチャンバ気相の無機ヨウ素，有機ヨウ素，ヨウ素エアロゾルの濃度変化は，それぞれ

$$\frac{dC_2}{dt} = \left[ \frac{Q_{12}}{V_2 + E_f H_{C2} V_{L2}} \right] C_1 - \left[ \frac{Q_{E2}}{V_2} \right] C_2 \quad (3-21)$$

$$\frac{dM_2}{dt} = \left[ \frac{Q_{12}}{V_2 + E_f H_{M2} V_{L2}} \right] M_1 - \left[ \frac{Q_{E2}}{V_2} \right] M_2 \quad (3-22)$$

$$\frac{dP_2}{dt} = \left[ \frac{Q_{12} (1 - E_f)}{V_2} \right] P_1 - \left[ \frac{Q_{E2}}{V_2} \right] P_2 \quad (3-23)$$

で表わされ、サプレッションチェンバ液相の無機ヨウ素，有機ヨウ素の濃度変化は

$$\begin{aligned} \frac{dC_{L2}}{dt} = & \left[ \frac{Q_{12} E_f H_{C2}}{V_2 + E_f H_{C2} V_{L2}} \right] C_1 + \left[ \frac{Q_{12} E_f}{V_{L2}} \right] P_1 + \left[ \frac{Q_{L12}}{V_{L2}} \right] C_{L1} \\ & - \left[ \frac{Q_{L12}}{V_{L2}} \right] C_{L2} \end{aligned} \quad (3-24)$$

$$\begin{aligned} \frac{dM_{L2}}{dt} = & \left[ \frac{Q_{12} E_f H_{M2}}{V_2 + E_f H_{M2} V_{L2}} \right] M_1 + \left[ \frac{Q_{L12}}{V_{L2}} \right] M_{L1} \\ & - \left[ \frac{Q_{L12}}{V_{L2}} \right] M_{L2} \end{aligned} \quad (3-25)$$

となる。原子炉建家気相中の無機ヨウ素，有機ヨウ素，ヨウ素エアロゾルの濃度変化は，それぞれ

$$\frac{dC_3}{dt} = \left[ \frac{Q_{E1}}{\theta V_3} \right] C_1 + \left[ \frac{Q_{E2}}{\theta V_3} \right] C_2 - \left[ \frac{Q_{E3}}{\theta V_3} \right] C_3 \quad (3-26)$$

$$\frac{dM_3}{dt} = \left[ \frac{Q_{E1}}{\theta V_3} \right] M_1 + \left[ \frac{Q_{E2}}{\theta V_3} \right] M_2 - \left[ \frac{Q_{E3}}{\theta V_3} \right] M_3 \quad (3-27)$$

$$\frac{dP_3}{dt} = \left[ \frac{Q_{E1}}{\theta V_3} \right] P_1 + \left[ \frac{Q_{E2}}{\theta V_3} \right] P_2 - \left[ \frac{Q_{E3}}{\theta V_3} \right] P_3 \quad (3-28)$$

である。さらに，排気筒から環境に放出されるヨウ素量の変化および排気フィルタに捕集されるヨウ素量の変化は，それぞれ

$$\begin{aligned} \frac{dI_E}{dt} = & [Q_{E3} (1 - \epsilon_C)] C_3 + [Q_{E3} (1 - \epsilon_M)] M_3 \\ & + [Q_{E3} (1 - \epsilon_P)] P_3 \end{aligned} \quad (3-29)$$

$$\frac{d I_{EF}}{d t} = [Q_{E_3} \epsilon_C] C_3 + [Q_{E_3} \epsilon_M] M_3 + [Q_{E_3} \epsilon_P] P_3 \quad (3-30)$$

となる。式(3-14)から式(3-30)を4次のRunge-Kutta-Gill法により積分し、格納容器内の無機ヨウ素、有機ヨウ素、ヨウ素エアロゾルの各位置における濃度およびその時間変化、環境に放出されるヨウ素の累積量および排気フィルタに捕集されるヨウ素の累積量が得られる。

### 3.3 記号

- $A_{D1}$  = 格納容器内の乾き表面積,  $cm^2$   
 $A_{W1}$  = 格納容器内の濡れ表面積,  $cm^2$   
 $A_{L1}$  = 格納容器サンプルあるいはドライウェル液相の表面積,  $cm^2$   
 $B_1$  = 格納容器内への単位時間あたりの全放出ヨウ素量,  $g/sec$   
 $C_{A1}$  = 容器壁の無機ヨウ素濃度,  $g/cm^2$   
 $C_{Ln}$  = 容器  $n$  の液相の無機ヨウ素濃度,  $g/cm^3$   
 $C_n$  = 容器  $n$  の気相の無機ヨウ素濃度,  $g/cm^3$   
 $C_{W1}$  = 液膜の無機ヨウ素濃度,  $g/cm^3$   
 $E_{C1}$  = 無機ヨウ素についての再循環フィルタの除去効率  
 $E_f$  = サプレッションプールにおけるヨウ素のスクラビング効率  
 $E_{M1}$  = 有機ヨウ素についての再循環フィルタの除去効率  
 $E_{P1}$  = エアロゾル粒子についての再循環フィルタの捕集効率  
 $H$  = 初期スプレイによる無機ヨウ素の気液分配係数  
 $H_{C1}$  = 液膜についての無機ヨウ素の気液分配係数  
 $H_{C2}$  = サプレッションチェンバにおける無機ヨウ素の気液分配係数  
 $H_{M2}$  = サプレッションチェンバにおける有機ヨウ素の気液分配係数  
 $H_x$  = 再循環スプレイについての無機ヨウ素の気液分配係数  
 $H_Y$  = 再循環スプレイについての有機ヨウ素の気液分配係数  
 $I_E$  = 環境に放出されるヨウ素の累積量,  $g$   
 $I_{EF}$  = 排気フィルタに捕集されるヨウ素の累積量,  $g$   
 $I_F$  = 再循環フィルタに捕集されるヨウ素の累積量,  $g$   
 $k_{A1}$  = 無機ヨウ素についての沈着係数,  $cm/sec$   
 $k_{C1}$  = 無機ヨウ素についての気相側物質移動係数,  $cm/sec$   
 $k_{l1}$  = 液膜での無機ヨウ素の物質移動係数,  $cm/sec$   
 $k_{M1}$  = 有機ヨウ素についての気相側物質移動係数,  $cm/sec$   
 $k_{S1}$  = 凝縮面での水蒸気の物質移動係数,  $cm/sec$   
 (注) 実験結果によれば、格納容器壁での凝縮水蒸気によるヨウ素の移動は少ない。<sup>27)</sup> そこで、MIRA-PBコードでは、 $k_{S1} = 0$ とする。  
 $k_{W1}$  = 液膜から容器壁への無機ヨウ素の沈着係数,  $cm/sec$

- $M_{Ln}$  = 容器  $n$  の液相の有機ヨウ素濃度,  $g/cm^3$   
 $M_n$  = 容器  $n$  の気相の有機ヨウ素濃度,  $g/cm^3$   
 $N_{S1}$  = 壁面へのスチームフラックス,  $g/cm^2 \text{ sec}$   
 $P_n$  = 容器  $n$  の気相のヨウ素エアロゾル濃度,  $g/cm^3$   
 $Q_{12}$  = ドライウエルからウエットウエルへのガス流量  $cm^3/sec$   
 $Q_{En}$  = 容器  $n$  の漏洩率,  $cm^3/sec$   
 $Q_{F1}$  = 格納容器内の再循環フィルタ流量,  $cm^3/sec$   
 $Q_{L12}$  = ドライウエルからサプレッションチェンバへの水の流量,  $cm^3/sec$   
 $Q_{SP}$  = 初期スプレイ流量,  $cm^3/sec$   
 $Q_{W1}$  = 初期スプレイ液の容器壁への流量,  $cm^3/sec$   
 $Q_{W2}$  = 再循環スプレイ液の容器壁への流量,  $cm^3/sec$   
 $t$  = 時間,  $sec$   
 $V_{Ln}$  = 容器  $n$  の液相体積,  $cm^3$   
 $V_n$  = 容器  $n$  の気相体積,  $cm^3$   
 $V_{W1}$  = 液膜の体積,  $cm^3$   
 $V_1$  = ヨウ素エアロゾルの沈降速度,  $cm/sec$   
 $\alpha$  = 格納容器内全放出ヨウ素中に占める無機ヨウ素分率  
 $\beta$  = 格納容器内全放出ヨウ素中に占める有機ヨウ素分率  
 $\gamma$  = 格納容器内全放出ヨウ素中に占めるヨウ素エアロゾル分率  
 $\epsilon_C$  = 無機ヨウ素についての排気フィルタの効率  
 $\epsilon_M$  = 有機ヨウ素についての排気フィルタの効率  
 $\epsilon_P$  = ヨウ素エアロゾルについての排気フィルタの効率  
 $\eta$  = セミダブル格納容器システムにおける格納容器全表面積に占めるドーム部表面積の割合  
 $\theta$  = アニュラスあるいは原子炉建家内の空気混合係数  
 $\lambda_{SC1}$  = 初期スプレイによる無機ヨウ素の除去定数,  $sec^{-1}$   
 $\lambda_{SC1X}$  = 再循環スプレイによる無機ヨウ素の除去定数,  $sec^{-1}$   
 $\lambda_{SM1}$  = 初期スプレイによる有機ヨウ素の除去定数,  $sec^{-1}$   
 $\lambda_{SM1Y}$  = 再循環スプレイによる有機ヨウ素の除去定数,  $sec^{-1}$   
 $\lambda_{SP1}$  = ヨウ素エアロゾルのスプレイ除去係数,  $sec^{-1}$   
 $\rho_W$  = 凝縮水の密度,  $g/cm^3$

## 添 字

- 0 = 燃料取換用水タンク  
1 = 格納容器あるいはドライウエル  
2 = サプレッションチェンバ  
3 = アニュラスあるいは原子炉建家

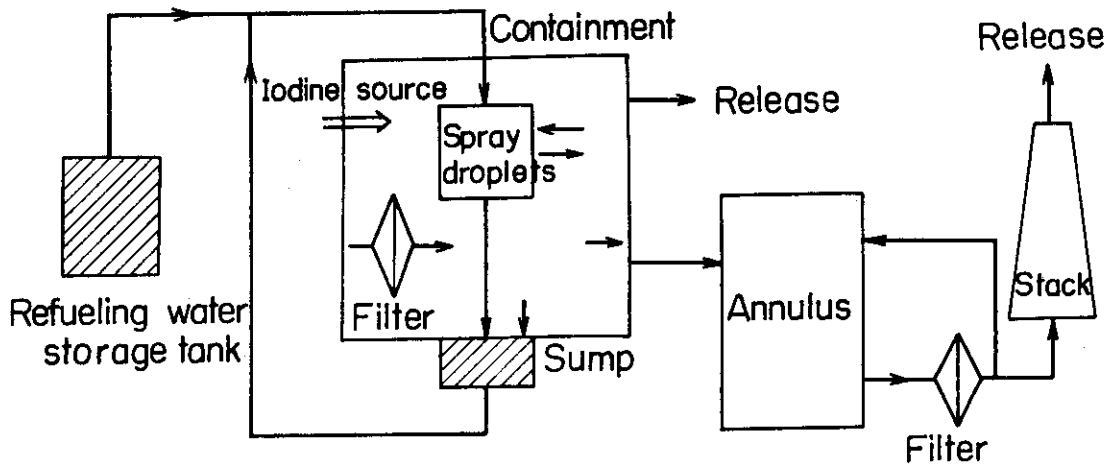


Fig.3.1 Block diagram of PWR plant for calculational model description

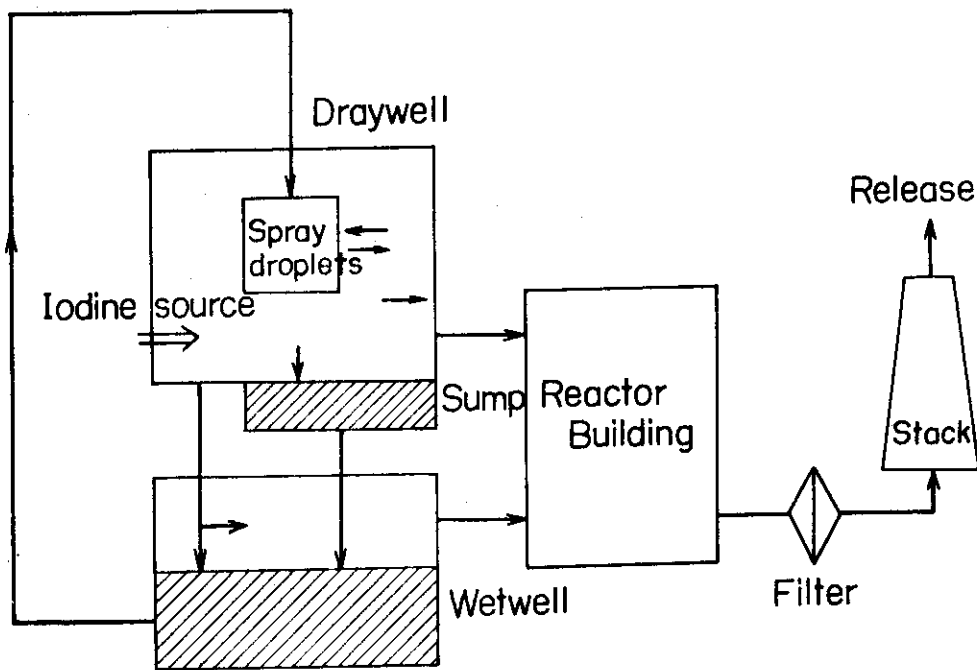


Fig.3.2 Block diagram of BWR plant for calculational model description

## 4. M I R A - P B の 説 明

### 4.1 プログラムの内容

#### M I R A - P B

これは主プログラムであり，LOCA後の格納容器システムのヨウ素除去状態を順次計算するための，各サブプログラムのコントロールを行う。インプットデータを読み込むサブプログラムINPUT，液滴径分布とスプレイ液滴吸収の計算のためのデータサブプログラムDATAT，および時間によって変化するデータを読み込むサブプログラムINPT1の呼び出し，計算のための初期状態の設定，格納容器内へのヨウ素の放出，サンプル水量の変化，スプレイ水量を計算し，Runge-Kutta-Gill積分における時間ステップ，繰返し計算回数，出力の間隔を設定する。そして，ヨウ素除去計算のための各サブプログラムPROP，SPRAY，PACCO，RATES，および積分サブプログラムIRKG，RKGを呼び出す。最後に，結果の出力サブプログラムOUTPTを呼び出す。

#### I N P U T

計算データの読み込みのためのサブプログラムであり，15種のカードを読み，直ちに，その内容を出力する。さらに，MKS単位で読み込んだデータをCGS単位系に換算する。

#### I N P T 1

時間依存データ TB1，TS1，TIM1，TSPIN，TL2，SNS1，SIM1，Q12，ARAS，ARAI，AW1，AD1の読み込み，およびその読み込んだ値を出力する。さらに，各時間ステップ毎に，変数 TB1，TS1，TIM1，TSPIN，TL2，SNS1，SIM1，Q12の値を時間に対して直線補間し算出する。なお，直線補間計算における時間軸は，対数座標軸とする。

#### D A T A T

重量分率であらわしたスプレイ液滴の重量分布をWTで与える。さらに，スプレイ液滴のヨウ素吸収の計算に必要な諸データSN，DMLS，TABLEのそれぞれの数値を与える。

#### P R O P

他のサブプログラムで必要とする格納容器システムの各種物性値およびヨウ素形態による物性値を計算する。

#### S P R A Y

格納容器スプレイの液滴分布，およびサブプログラムSTEPを呼び出してスプレイ液滴の

運動についての各種のパラメータを計算する。その際、スプレイ液滴の合体やヨウ素エアロゾルのスプレイによる捕集効率を計算する。

### STEP

スプレイ液滴の自由落下、その軌跡に関する計算およびヨウ素ガスと液滴との間の気相側物質移動係数を計算する。

### PAC $\bar{O}$

このサブプログラムでは、気液分配係数を計算する。その際、格納容器内の液膜温度、サンプル液温度、サプレッションプール温度におけるそれぞれの液相の pH、加水分解反応の平衡定数を算定する。さらに、ドライウェルとサプレッションチェンバでの有機ヨウ素の気液分配係数を計算し、ドライウェルからサプレッションチェンバへの空気-水蒸気の流れによるスクラビング効率を得る。

### RATES

乾き壁面でのヨウ素の沈着速度、水蒸気の凝縮による物質移動係数、液膜の物質移動係数、濡れ壁面でのヨウ素の沈着速度、エアロゾルの沈降速度の計算をする。

### IRKG

サブプログラム IRKG は、主プログラムにおいて、サブプログラム RKG に先立ち呼び出され RKG で必要とする初期データを与える。サブプログラム DIR を呼び出し、初期値 X0 におけるベクトル YP を計算する。

### RKG

連立微分方程式を解くための積分計算を行う。この計算に入る以前に、Y(1)におけるベクトル Y, YP の値を準備しておく必要がある。RKG は 4 次の Runge-Kutta-Gill 法をプログラム化してある。1 ステップの計算で 4 回サブプログラム DIR を呼び出す。

### DIR

変数 Y の微係数 YP を計算するサブプログラムであり、DIR はさらにサブプログラム COEFF を呼び出す。

### COEFF

このサブプログラムは、ヨウ素除去係数および濃度や温度に依存する他のパラメータを計算する。スプレイ除去係数の計算に際しては、物質移動についての液相側の抵抗を計算するために、サブプログラム BILIN1 を呼び出す。さらに、サブプログラム DIR が、微係数 YP を計算するのに必要とする各係数を計算する。その係数は、RL1 ~ RL22 で表わしてある。

B I L I N 1

このプログラムは、XとYの変数に対する従属変数Zの表から、任意のX、YにおけるZの値を直線補間により算出する。ZにはTABLE、XにはSN、YにはDMLSがそれぞれ対応し、Sherwood数および無次元時間の関数として、スプレイ液滴の(1-E)が得られる。液滴径の種類11種に対して、それぞれ(1-E)が計算され、その都度、BILIN1はサブプログラムCOEFFにより呼び出される。

OUTPUT

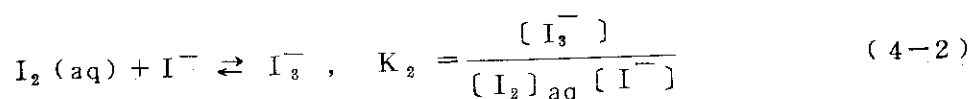
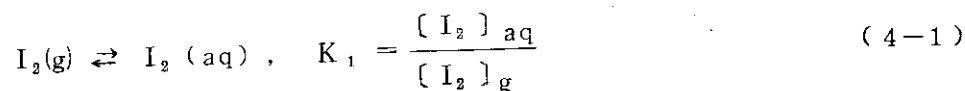
気液濃度比の計算<sup>\*</sup>、格納容器各部における累積ヨウ素量を計算する。任意の時間毎に気相、液相における無機ヨウ素濃度、有機ヨウ素濃度、ヨウ素エアロゾル濃度、累積ヨウ素量、気液分配係数、スプレイ液滴の吸収効率の出力を行う。

## 4.2 気液分配係数

格納容器スプレイ系によるヨウ素の水洗効果に大きな影響を与える因子は、無機ヨウ素の気液分配係数である。この効果は、特に純水のサブプレッションプールをもつBWRプラントにとって重要な因子となる。気液分配係数は、種々のヨウ素化合物を含めた液相中の全ヨウ素化学種の濃度の総和( $C_L = [I_2]_{aq}(T)$ )と気相中の無機ヨウ素濃度( $C_g = [I_2]_{gas}$ )の比として定義されたものである( $H = C_L / C_g$ )。気液分配係数に注目すると、ヨウ素濃度が高い範囲( $C_g = 2\text{mg/l}$ 以上)では、Henryの法則が成立するが、希薄な濃度になるに従ってその法則は成り立たなくなる。即ち、気相あるいは液相ヨウ素濃度が低下すると気液分配係数の値は増大する傾向にある。この原因は、無機ヨウ素が液相中で加水分解を起し、種々のヨウ素化合物になることに起因している。

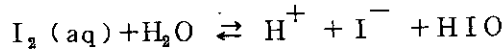
Eggletonは、液相中のヨウ素の加水分解による種々の化学形を考慮した気液分配理論を報告し、その分配係数の値を気液のヨウ素濃度、pH、そして温度の関数としてあらわした。<sup>14)</sup> 1970年、ORNLにおいてParslyは、格納容器スプレイ系の設計開発(Design consideration of reactor containment spray systems)の一環として、Eggletonの理論をプログラム化した。<sup>15)</sup> MIRA-PBコードでは、Parslyの気液分配プログラムをPACOコードと名づけてSubroutineとして使用する。

MIRA-PBで取りあげられたヨウ素の分配係数に関する各反応の平衡式を以下に示す。

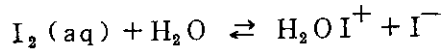


\* 気液濃度比は、式(6-1)で定義された無機ヨウ素の分配値である。





$$K_3 = \frac{[H^+][I^-][HIO]}{[I_2]_{aq}} \quad (4-3)$$



$$K_4 = \frac{[H_2OI^+][I^-]}{[I_2]_{aq}} \quad (4-4)$$

こゝで取りあげられている液相ヨウ素化合物は、 $I_2$ 、 $I^-$ 、 $I_3^-$ 、 $HIO$ 、そして $H_2OI^+$ である。式(4-1)~(4-4)の反応速度は速いという実験事実から、これらの反応系は平衡状態にあるとする。また、液相中のヨウ素化合物は酸化も還元も起らないと仮定する。式(4-1)~(4-4)であらわされた各種ヨウ素化合物の濃度を推算するにあたって、液相中でヨウ素化学種が電氣的に中性を保っているというイオン平衡の概念を取りいれ次式を仮定する。

$$[HIO] + [H_2OI^+] = [I^-] + [I_3^-] \quad (4-5)$$

式(4-1)~(4-4)中の $K_1 \sim K_4$ の値が既知であれば、式(4-1)~(4-5)の連立方程式は各ヨウ素化合物に対して以下のように解ける。

$$[HIO] = \frac{K_3 [I_2]_{aq}}{[H^+][I^-]} \quad (4-6)$$

$$[H_2OI^+] = \frac{K_4 [I_2]_{aq}}{[I^-]} \quad (4-7)$$

$$[I_3^-] = K_2 [I_2]_{aq} [I^-] \quad (4-8)$$

$$[I^-] = \left[ \frac{K_4 [I_2]_{aq}}{1 + K_2 [I_2]_{aq}} + \frac{K_3 [I_2]_{aq}}{[H^+](1 - K_2 [I_2]_{aq})} \right]^{-1} \quad (4-9)$$

したがって、液相中の全ヨウ素濃度は、

$$C_L = [I_2]_{aq(T)} = [I_2]_{aq} + \frac{1}{2} ([HIO] + [H_2OI^+] + [I^-] + 3[I_3^-]) \quad (4-10)$$

となり無機ヨウ素に関する気液分配係数が次式のように導出される。

$$H = \frac{C_L}{C_g} = \frac{[I_2]_{aq(T)}}{[I_2]_g} \quad (4-11)$$

気液分配係数の導出にあたり式(4-1)~(4-4)中の平衡定数の選択には、精度の高い実測値の採用が必要となる。式(4-1)中の $K_1$ の値は、無機ヨウ素ガスを理想気体であると仮定し、無機ヨウ素の水に対する溶解度とその蒸気圧から導出できる。PerryのChem. Eng. Handbook<sup>16)</sup>に記載されているSeidellが測定した無機ヨウ素( $I_2$ )の溶解度および蒸気圧より計算した平衡定数 $K_1$ の値を図4.1に温度の関数として白丸で示した。また、実際にHenryの法則が成立する高濃度の範囲でヨウ素の気液分配係数を測定し、 $K_1$ を導出した江口らの実測値も共に示した。<sup>17)</sup> 図中、両者の一致は極めてよく、MIRA-PBにより計算で求めた $K_1$ の値(実線)もよく合致している。式(4-2)は、ポリヨウ素( $I_3^-$ )の生成反応であり、Davies<sup>18)</sup>および江口ら<sup>17)</sup>によって実測されたデータを図4.1に共に示した。 $K_2$ の実測値も80°Cの温度範囲では、計算値とかなりよく一致している。式(4-3)は、HIOを生成する代表的な加水分解反応であり、 $K_3$ の値は、Allenら<sup>19)</sup>および江口らにより実測されている。式(4-4)も無機ヨウ素の加水分解反応の一種であり、Bellら<sup>20)</sup>、 $H_2OI^+$ イオンの生成を考慮して $K_4$ の値を求めている。平衡定数 $K_4$ の値は、実測値が乏しく、また江口らの研究では考慮されていない反応系である。図4.2に、 $K_3$ および $K_4$ の実測値とMIRA-PBから算出した値(実線)を示した。なお、MIRA-PBに内蔵された平衡定数式を表4.1に示す。

式(4-6)~(4-10)および $K_1 \sim K_4$ の値を用いて、気相中の無機ヨウ素の濃度と平衡している液相中の各ヨウ素化学種の濃度を求めpH=8の場合について図4.3に示した。図中、 $\Sigma(I_2)_{total}$ は、溶液中の各ヨウ素化学種の濃度の総和で液相中に存在する全ヨウ素濃度をあらわしている。したがって、気液分配係数(H)は、 $\Sigma(I_2)_{total}$ の値を横軸であらわした気相無機ヨウ素濃度の値( $C_g$ )で割ったものとして導出される。

図4.4に、純水中で実測された無機ヨウ素の気液分配係数(H)の値を気相無機ヨウ素濃度( $C_g$ )の関数としてあらわした。また、実線は、水溶液のpHが7.0の場合を例として式(4-10)より計算した気液分配係数の値である。図中、2箇所矢印は、BWRプラント(Mark-II)で想定された事故時の初期ヨウ素放出濃度を仮想事故および重大事故について記したものである。気液分配係数の実測値は、Taylor<sup>21)</sup>、Watson<sup>22)</sup>、西沢ら<sup>23)</sup>および足立ら<sup>17)24)</sup>の実験値から純水(イオン交換水あるいは蒸留水)を用いて得た値を集録したもので、かなりのばらつきをもっている。西沢ら<sup>25)</sup>は、無機ヨウ素の純水中の気液分配係数を気相無機ヨウ素濃度と温度をかえて整理し、次の実験式を得ている。

$$H = 70 C_g^{-0.33} \quad (25^\circ\text{C})$$

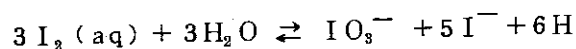
$$H = 53 C_g^{-0.33} \quad (50^\circ\text{C})$$

$$H = 39 C_g^{-0.33} \quad (80^\circ\text{C})$$

この実験式も図4.4と比較的によく一致し、Eggletonの理論より得た値に近いことを確認した。

純水中の気液分配係数の実験値と計算値の一致から、Parslyのプログラムは、酸性領域の無機ヨウ素気液分配係数の推算に適しており、純水のスプレイ作動系をもつBWRプラントに

採用することが良いと考える。一方、足立、江口らの気液分配理論によると、無機ヨウ素は苛性ソーダ添加によって加水分解反応が激しくなり、 $I^-$  および  $IO_3^-$  イオンが増加し、気液分配係数の値が純水の場合のそれに比較して著しく増大する。この主たる原因は、MIRA-PBでは考慮されていない次式の反応によるものと考えられる。



$$K_s = \frac{[IO_3^-][I^-]^5[H^+]^6}{[I_2]_{aq}^3} \quad (4-16)$$

式(4-16)の反応速度は、アルカリ溶液中では速く進行するため無視することはできない。式(4-16)を考慮した江口、足立らの理論は、彼らが実施した苛性ソーダ添加液による気液分配係数の実測値とよく一致している。したがって、ボロンを含む苛性ソーダ添加液をスプレイ水としているPWRプラントの気液分配係数は、江口、足立らの理論を採用することが望ましいと考える。しかしながら、Parslyのプログラミングより導出されるアルカリ側溶液の気液分配係数は、江口、足立らのそれより控え目な結果(気液分配係数が低い)を与えることも事実である。

BWRプラントを対象としてMIRAコードより計算した気液分配係数を気相中の無機ヨウ素濃度を横軸として、温度、pHを関数にして求め、図4.5から図4.8までに示した。PWRプラントは、BWRプラントより格納容器内の温度変化が激しいと考えられるので、気液分配係数は温度を軸として、無機ヨウ素の気相濃度とpHを変化させ図4.9から図4.11までに示した。図4.9から図4.11で特徴的なことは、分配係数の値が気相無機ヨウ素濃度の変化に対して最小値をもつことである。この現象は、温度の低い範囲では無機ヨウ素の液中への溶解現象が支配的であり、温度が上昇するに従って無機ヨウ素の加水分解が進行し種々のヨウ素化学種が生成することを示唆している。

Eggletonの分配理論式より導出される次亜ヨウ素酸(HIO)の生成は液相中でかなり大きく、特に、気相中の無機ヨウ素の濃度が低下すると他のヨウ素化学種の濃度に比較してHIOのそれは大きくなる(図4.3参照)。この現象は、格納容器内の無機ヨウ素がスプレイにより水洗され希薄になると、液相中のHIOが揮発する可能性をもっている。Styrihovichらは気相中のヨウ素濃度を、無機ヨウ素( $I_2$ )に加えて次亜ヨウ素酸(HIO)も考慮して気液分配係数を実測している。<sup>26)</sup>しかしながら、現在の時点では、気相中のヨウ素化合物ガス( $CH_3I$ 等の有機ヨウ素ガスを除く)の存在は未だHIOであるとは決定されていない。

これまで実測されてきた多くの無機ヨウ素の気液分配に対する実験は、Eggletonの理論より得た気液分配係数の値に比較して一般的に大きい。事実、不純物が若干混入していると考えられる水溶液(例えば水道水など)で得た無機ヨウ素の気液分配係数は、純水のそれに比較してかなり増大している。<sup>22)</sup>これらの現象は、気液分配係数に与える不純物イオン効果として注目されている。

最後に、スプレイによる水洗効果が極めて悪いヨウ化メチル( $CH_3I$ )の気液分配係数についてふれる。MIRA-PBでは、ヨウ化メチルの気液分配係数の経験式を次式で与えた。

$$H_{\text{CH}_3\text{I}} = 1.7 \times 10^{-5} \exp\left(-\frac{7200}{RT}\right) \quad (4-17)$$

図 4.1 2 に、Postoma ら<sup>27)</sup> と西沢、木越ら<sup>23)</sup> によって得られたヨウ化メチルの気液分配係数の実測値と式(4-17)から求めた計算値を示した。両研究者らの分配係数は共に MIRA-PB から求めた値より大きく、また足立ら<sup>28)</sup> の最近の実験結果も、前記研究者らの値とよく一致している。したがって、MIRA-PB では、ヨウ化メチルの気液分配係数は、かなり控え目な結果(分配係数が小さい)を得るプログラムになっている。ヨウ化メチルは、活性炭による捕集が困難な化合物であり、将来ヨウ素の環境への放出低減化を進めるにあたってスプレイ液の  $\text{CH}_3\text{I}$  に対する吸収薬材の研究が重要になるものと考えられる。

### 4.3 物 性 値

軽水炉の冷却材喪失事故は、格納容器内に高温の冷却水が流出し、大量のエネルギーが投入される。その結果、格納容器内の水蒸気を含む雰囲気ガスの温度、圧力は急激に上昇する。またスプレイ散布あるいは、減圧プールにより格納容器内の温度や圧力の上昇は抑制されるが、放出された核分裂生成物の崩壊熱によって格納容器内の温度、圧力は時間の経過と共に複雑に変化する。このような条件下で、水蒸気を含む雰囲気ガス(空気あるいは窒素ガス)の物性値はかなり変動し、それらの値の変化がヨウ素の水洗除去効果に影響を与える。軽水炉の想定事故時には、水-ジルコニウム反応、放射線による水分分解等により水素が発生する。しかしながらその濃度が爆発限界以下であると考えれば物性値への影響は無視できる。このような LOCA 時に使用する格納容器内の空気-水蒸気混合系の諸物性値は、すでに Knudsen によって詳細に報告されている。<sup>29)</sup> MIRA-PB では、これらの諸物性値の推算を Keenan, Keyes の "Thermodynamic properties of steam" (1936) および Perry の Chem. Eng. Handbook (1950-1963) から求め、PROP と名づけて Subroutine 化した。

PROP では、初めに水溶液の蒸気圧、水溶液の密度、空気の密度、水蒸気の密度等を温度圧力の関数として求め、その結果を用いて空気-水蒸気混合気体の密度を推算している。同様に、水蒸気の粘性係数、空気の粘性係数も温度、圧力の関数として個々に推算し、空気-水蒸気混合体の粘性係数を以下の式から求めている。

$$\mu_m = \frac{\left(\frac{P_{\text{air}}}{P_0}\right) \mu_{\text{air}} (M_{\text{air}})^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{P_s}{P_0}\right) \mu_s (M_s)^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{P_{\text{air}}}{P_0}\right) (M_{\text{air}})^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{P_s}{P_0}\right) (M_s)^{\frac{1}{2}}} \quad (4-18)$$

図 4.1 3 に、空気-水蒸気混合気体の密度と粘性係数を温度の関数として示した。格納容器スプレイ系の計算では、空気の分圧は一気圧と固定されているので、図中、混合気体の密度は 100°C 以上で急激に増加している。

無機ヨウ素とヨウ化メチルの気相および液相中の拡散係数は、スプレイによる水洗効果の解析に極めて重要な物性値である。Wilke と Lee<sup>30)</sup> は、Hirshfelder<sup>31)</sup> の気相相互拡散

係数の推算式を基にして以下の式を導出している。

$$D_G = \frac{BT^{1.5} \sqrt{(1/M_1) + (1/M_2)}}{P_0 r_{1,2} I_D} \quad (4-19)$$

ここで、 $I_D$  は、衝突積分といふ  $k_B T / \epsilon_{1,2}$  の関数である。 $k_B$  は、Boltzmann 定数 ( $\text{erg}/^\circ\text{K}$ )、 $\epsilon_{1,2}$  は、モル積分エネルギーあるいは、Lennard-Jones potential  $\epsilon_{1,2} = \sqrt{(\epsilon_1/k_B)(\epsilon_2/k_B)}$  と呼ばれている。定数  $B$  は、1 および 2 の気体の分子量の関数として

$$B = \{ 10.7 - 2.46 \sqrt{(1/M_1) + (1/M_2)} \} \times 10^{-4} \quad (4-20)$$

で与えられる。MIRA-PB では、Perry の Handbook (14-20) 中の衝突直径、衝突積分の Table を数式化して拡散係数を導出している。参考のため、表 4.2 に考慮している気体について衝突直径 ( $r_*$ ) と衝突積分 ( $I_{D*}$ ) の値を Perry の Handbook から取得したものと Svehla (1962) の報告<sup>32)</sup>にあるものについて示す。

PROB では、式 (4-19)、(4-20) を使用して空気中、ならびに水蒸気中のヨウ素の拡散係数を温度、圧力の関数として導出している。空気-水蒸気混合ガス中の無機ヨウ素の拡散係数は次の Wilke の式<sup>33)</sup>によって計算できる。

$$D_M = \frac{1 - (P_{I_2}/P_0)}{\left(\frac{P_{\text{air}}}{P_0}\right)/D_{I_2-\text{air}} + \left(\frac{P_S}{P_0}\right)/D_{I_2-S}} \quad (4-21)$$

ここで、 $(P_{I_2}/P_0)$  は、ヨウ素の分圧比であり、希薄なヨウ素濃度の領域では無視できる。同様に、ヨウ化メチルの拡散係数も式 (4-21) を用いて計算できる。図 4.14 に式 (4-21) より得た空気-水蒸気混合ガス中の無機ヨウ素およびヨウ化メチルの拡散係数を温度の関数として示した。両拡散係数とも、30~40°C で最大値をもち、高温領域でその値は減少する。混合ガス中の拡散係数は、低温領域では温度の増加と共に大きくなるが、高温になるに従って水蒸気の圧力上昇に起因して急激に減少する。

水溶液中の無機ヨウ素およびヨウ化メチルの拡散係数は、Perry の Handbook 中に記載されている Wilke と Chang の式を採用している。<sup>34)</sup>

$$D_L = 7.4 \times 10^{-10} \frac{T^{0.5} (XM)}{\mu_W V_0^{0.6}} \quad (4-22)$$

ここで、 $X$  は、会合パラメータであり水溶液の場合には、2.6 の値をとる。 $\mu_W$  は、水溶液の粘性係数で温度 ( $T^\circ\text{C}$ ) の関数として次式であらわされ Poise の単位をとる。<sup>16)</sup>

$$1/\mu_W = 2.1482 \left\{ (T-8.435) + \sqrt{8078.4 + (T-8.435)^2} \right\} - 120$$

(4-23)

図 4.15 に、水溶液中の無機ヨウ素およびヨウ化メチルの拡散係数を温度の関数として示す。

以上述べてきた諸物性値は，ヨウ素の液滴への物質移動現象，スプレー液滴やエアロゾルの自由落下挙動，無機ヨウ素の沈着現象等多くのヨウ素除去効果に関連して使用される。

#### 4.4 スプレー液滴の衝突合体効果

スプレー液噴霧時には，多分散系スプレー液滴相互間で衝突合体が起り，液滴の落下距離が増加するに従ってスプレー液滴の直径が増加し，その数は減少する。このような衝突合体効果を計算コード上で考慮することは，ヨウ素の吸収速度を遅く見積ることになり，実際に近い結果を導くと考えられる。

MIRA-PBでは，スプレー液滴の衝突合体効果の解析をSubroutine化し，SPRAYと名づけている。SPRAYでは，スプレー液滴は対数正規分布でノズルから噴出すると仮定されており，初期スプレー液滴分布の対数平均直径( $D_g$ )と幾何標準偏差( $\sigma_g$ )を入力値とするようになっている。また，スプレー液滴は，全て球形で落下し，格納容器内で均一に散布されると仮定している。

スプレーノズルから散布される液滴径を対数正規分布とするためには，まず液滴分布を $n$ ヶの区間に切り，それぞれの区間における液滴の重量分率( $W_{Tj}$ )を区間 $n$ に対して入力する。区間 $n$ の液滴分布を対数正規分布に変換するためには，入力値である $D_g$ および $\sigma_g$ を用いて対数軸上で平均直径の値 $D_g$ から何倍の偏差 $\sigma_g$ の液滴分布をもっているかという次式を使用する。

$$\ln D_i = \ln D_g + \left( \frac{i-1}{2} - \frac{n-1}{4} \right) \ln \sigma_g \quad (4-24)$$

$$(i = 1, 2, 3, \dots, n)$$

ここで， $n$ は区切られた区間の数， $i$ は，液滴の分割区間の $i$ 番目の直径の番号，そして $D_i$ は，その直径をあらわす。式(4-24)は，変換されて

$$D_i = D_g \exp \left\{ \left( \frac{i-1}{2} - \frac{n-1}{4} \right) \ln \sigma_g \right\} \quad (4-25)$$

したがって，対数正規分布をもつ $D_i$ 液滴の直径は， $D_g$ ， $\sigma_g$ の値を与えれば式(4-25)から導出できる。

衝突合体効果は，スプレー液滴の初期の分布とスプレー流量でかなり影響をうける。今，格納容器の半径( $R$ )内で散布されているスプレー液の全流量を $F$ ( $\text{cm}^3/\text{sec}$ )， $j$ 液滴の重量分率を $W_{Tj}$ ，その液滴の単一球体積を $V_j$ とすれば，ノズル出口( $H_T=0$ )で噴出する $j$ 液滴の個数フラックス( $\text{ヶ}/\text{cm}^3 \text{sec}$ )は，

$$F_{0j} = \frac{F W_{Tj}}{\pi R^2 V_j} \quad (4-26)$$

また，格納容器内を落下する $j$ 液滴の $H_T$ 位置までの滞留時間を $t_j$ とすれば， $j$ 液滴の平均落下速度は $v_j = H_T/t_j$ であらわされる。SPRAYでは， $j$ 液滴に関する無次元数 $W_j$ を，

$H_T = 0$  位置の  $j$  液滴の平均速度と  $H_T$  位置の  $v_j$  との比をとって定義した。

$$W_j = \frac{F W_{Tj}}{\pi R^2 v_j} = \frac{F W_{Tj} t_j}{\pi R^2 H_T} \quad (4-27)$$

Subroutine SP RAYでは、落下している  $j$  液滴より大きな直径をもつ  $i$  液滴が  $j$  液滴に追付き衝突合体する現象 (Gravitational Coalescence) だけを考慮した。衝突合体の結果、 $j$  液滴の直径は増大し、その数は減少する。したがって、 $i$  液滴と衝突合体して  $j$  液滴からはなれる単位時間あたりの  $j$  液滴の数 (ヶ/sec) は次式であらわされる。

$$N_{0j} = \frac{\pi}{4} (D_i + D_j)^2 W_j (v_i - v_j) / V_j \quad (4-28)$$

また  $H_T$  位置の単位断面面積あたりの  $j$  液滴の数 (ヶ/cm<sup>2</sup>) は、 $N_A = W_j H_T / V_j$  であるから、 $j$  液滴と他の液滴が衝突合体して消滅する  $j$  液滴のフラックス (ヶ/cm<sup>2</sup> sec) は、次式であらわされる。

$$F_{Dj} = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\pi}{4} (D_i + D_j)^2 \frac{W_j}{V_j} (v_i - v_j) N_A \quad (4-29)$$

したがって、あらゆる液滴の衝突合体の組合せによる全液滴消滅のフラックスは、次式で与えられる。

$$F_S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=2}^n \frac{\pi}{4} (D_i + D_j)^2 \frac{W_j}{V_j} (v_i - v_j) N_A \quad (4-30)$$

ここで、 $F_S$  (ヶ/cm<sup>2</sup> sec) は、衝突合体により消滅した全液滴のフラックスである。スプレイノズル噴出口から  $H_T$  位置に残存している  $j$  液滴のフラックスは、

$$F_{Nj} = F_{0j} - F_{Dj} \quad (4-31)$$

で与えられる。ここで  $F_{0j}$  は、式 (4-26) で与えられるスプレイ液噴出位置 ( $H_T = 0$ ) の  $j$  液滴のフラックスである。式 (4-31) から、 $H_T$  位置における  $j$  液滴の重量フラックス、 $F_{Wj}$  (g/cm<sup>2</sup> sec)、 $j$  液滴の重量分率、 $W_{Tj}$ 、そして  $j$  液滴の流量、 $F_j$  (cm<sup>3</sup>/sec) が次式のように導出できる。

$$F_{Wj} = F_{Nj} V_j, \quad (\rho_L = 1.0 \text{ g/cm}^3 \text{ と仮定}) \quad (4-32)$$

$$W_{Tj} = \frac{F_{Wj}}{\sum_{j=1}^n F_{Wj}} \quad (4-33)$$

$$F_j = F W_{Tj} = \frac{F F_{Wj}}{\sum_{j=1}^n F_{Wj}} \quad (4-34)$$

図 4.1 6 に、式 (4-31) より得たスプレイ液滴の個数フラックス分布をノズル噴出口からの距離 ( $H_T$ ) の関数として示した。使用した入力値は、『モデル格納容器スプレイ実証試験』で実施する予定になっている BWR 用模擬スプレイ散布の実験条件を用いている (Table 6.1 参照)。BWR プラントの模擬実験におけるスプレイ流量 ( $130\text{m}^3/\text{hr}$ ) は、PWR プラントの模擬実験のそれと比較して約 4 倍程度大きいので、衝突合体の効果は著しい。図 4.1 7 は、式 (4-33) から計算したもので、液滴間の衝突合体効果により、各液滴の重量分率が落下距離の増加と共に大液滴の方向に移動してゆくことを示している。図 4.1 8 に、式 (4-32) から得たスプレイ液滴径に対する重量フラックス ( $\text{g}/\text{cm}^2 \text{ sec}$ ) の変化を示す。また、図 4.1 9 は、同じ条件下の各液滴の流量 ( $\text{cm}^3/\text{sec}$ ) 変化を示している (式 (4-34) 参照)。

スプレイ液滴の衝突合体効果は、後に述べるスプレイ液滴に対するヨウ素の吸収効率 $\text{E}$ の値に影響を与える。即ち、合体効果の増大と共にヨウ素の吸収速度は減少し、結果的にヨウ素の水洗除去速度が遅くなる。したがって、衝突合体効果を考慮した計算コードは、ヨウ素の環境放出量の評価を安全側に見積った結果を得ることになる。

#### 4.5 スプレイ液滴の軌跡

スプレイ散布時の多分散系液滴の軌跡を推算することは、格納容器内を落下する液滴の滞留時間、ヨウ素の液滴球表面のガス境膜物質移動係数を求めるために必要である。MIRA-PB では、液滴の軌跡を求めるため、STEP と名づけた Subroutine がおかれている。STEP では、液滴は、多分散系で完全に球形であり、スプレイノズルの一個所から噴出角度  $\theta$  で格納容器内に散布されるとしている。また、多分散系液滴は、液滴径に無関係に同じ初速度をもってノズル噴出口から格納容器内に散布されると仮定している。

液滴噴出時の初速度は、PWR プラント用ノズル (Hollow cone type) と BWR プラント用ノズル (Full cone type) で著しく異なる。Hollow cone 型ノズルは、渦巻噴射型ノズルであり、ノズル内の液体の施回流のためノズル噴出口の中心に空隙部ができる。したがって、液流噴出の断面積は、ノズル噴出口の断面積に定数  $\eta$  をかけ、 $A_F = \pi \eta D_n^2 / 4$  (ここで、 $D_n$  はノズル噴出口の直径、 $\eta = 0.36$ ) としている。Full cone 型ノズルは、ノズル内部の液体の施回流は弱く、噴出口に空隙はできないと仮定されている ( $\eta = 1.0$ )。したがって、単一ノズル 1 個の噴出口位置の流量を  $Q_0$  とすれば、スプレイ液滴の初速度 ( $\text{cm}/\text{sec}$ ) は、液滴の径に無関係に  $v_0 = Q_0 / A_F$  で与えられる。

重力場における  $i$  液滴球の運動方程式は、

$$\rho_L \left( \frac{\pi D_i^3}{6} \right) \frac{du_y}{dt} = \rho_L \left( \frac{\pi D_i^3}{6} \right) g - C_D \left( \frac{\pi D_i^2}{4} \right) \left( \frac{\rho_m u^2}{2} \right) \cos \theta \quad (4-35)$$

$$\rho_L \left( \frac{\pi D_i^3}{6} \right) \frac{du_x}{dt} = -C_D \left( \frac{\pi D_i^2}{4} \right) \left( \frac{\rho_m u^2}{2} \right) \sin \theta \quad (4-36)$$



ただし、

$$\left. \begin{aligned} u_x &= u \sin \theta \\ u_y &= u \cos \theta \\ u^2 &= u_x^2 + u_y^2 \end{aligned} \right\} \quad (4-37)$$

ここで、 $u_x$ 、 $u_y$  は、 $x$  軸および  $y$  軸方向の液滴の速度 ( $u_x = dx/dt$ ,  $u_y = dy/dt$ ) をあらわす。 $C_D$  は、液滴の抵抗係数 (Drag coefficient) で便宜上三つの  $Re$  数 ( $Re = \rho_m u D_i / \mu_m$ ) 領域に分けられ以下のように与えられる。

$$\left. \begin{aligned} Re < 2 & \quad C_D = \frac{24}{Re} \\ 2 < Re \leq 500 & \quad C_D = \frac{18.5}{(Re)^{0.6}} \\ 500 < Re \leq 10^5 & \quad C_D = 0.44 \end{aligned} \right\} \quad (4-38)$$

式 (4-35)、(4-36) を解析的に解くことは困難であるため、以下の式に変形して逐次近似法によって数値計算している。

$$\Delta u_y = \left\{ \left( g - \frac{3\rho_m}{4\rho_L D_i} \right) C_D u_y \right\} \Delta t \quad (4-39)$$

$$\Delta u_x = - \left( \frac{3\rho_m}{4\rho_L D_i} \right) C_D u_x \Delta t \quad (4-40)$$

STEPでは、式 (4-39)、(4-40) の逐次計算により得られた速度成分  $u_x$ 、 $u_y$  の値から時間  $t$  の液滴の位置  $x$  および  $y$  を求め軌跡を導出している。最終的には、 $u_x = 0$  となり  $u_y$  は、液滴の終末速度に近づく。図 4.20 に、散布角度  $120^\circ$  の Full cone type のスプレイノズルについて、 $80^\circ\text{C}$  の雰囲気ガス中の液滴の軌跡を液滴径を変化させて示した。液滴の軌跡は、格納容器内の温度、圧力で若干変化するが、液滴が終末速度に達する時間およびその距離は比較的短いことがわかる。

格納容器内を自由落下するスプレイ液滴の滞留時間は、近似的には液滴の落下高さを液滴径の関数である終末速度の値で割ったもの ( $t_j = H_T / v_j$ ) として導出できる。STEPでは、液滴の軌跡の計算から滞留時間を求めている。ノズル噴出口から散布された液滴の初速度は終末速度より速いため、軌跡を考慮して得られる滞留時間の値は、終末速度より得られた値と比較して若干小さい結果を得る。滞留時間の短縮は、ヨウ素吸収に及す水洗除去効果の影響を控え目に見積った結果となる。

## 4.6 スプレイ液滴のヨウ素吸収効率

スプレイ液滴の物質移動現象については、

- (1) 剛体球モデル (Rigid drop model)
- (2) 完全混合モデル (Well-mixed drop model)
- (3) 二重境膜モデル (Two film model)

などのモデルが考えられる。これらの中で剛体球モデルは、液滴内での物質移動が分子拡散によるとするものであり、吸収速度に関して控え目な結果を与える。また、完全混合モデルでは、液滴内での物質移動は、液滴の振動、液滴内部の流体の循環により、液滴内流体の混合は十分に行われ、液滴内部の濃度は均一であると仮定する。

この2つのモデルは、実際の物質移動現象の上限および下限を与える。MIRA-PBでは、保守的な立場をとり、スプレイ液滴の物質移動現象は、剛体球モデルに従うとする。

液滴が球形であること、液滴内部の物質移動が半径方向のみの拡散によること、拡散係数が一定であること、ヨウ素が格納容器気相中に瞬間的に放出され、均一に分布することを仮定すれば、 $i$  液滴のヨウ素濃度分布は、球座標による拡散方程式

$$\frac{\partial C_L}{\partial t} = D_L \left( \frac{\partial^2 C_L}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial C_L}{\partial r} \right) \quad (4-41)$$

で表わされる。式(4-41)を解くための境界条件は、気相側の境界層内の物質移動から得られる。

スプレイ液滴球と気相ヨウ素の物質移動現象は、液滴径とその噴出速度で大きく変化する。単一液滴球のガス境膜領域の物質移動係数は、Rang-Marshallの次式で与えられる。

$$Sh' = \frac{k_{gi} D_i}{D_M} = 2.0 + 0.6 Re^{\frac{1}{2}} Sc^{\frac{1}{3}} \quad (4-42)$$

散布された液滴は、液滴径と軌跡に従って  $Re$  数が変化するので、定められた径をもつ液滴の各落下位置における物質移動係数  $k_g$  の平均値を計算しなければならない。直径  $D_i$  の液滴の任意位置におけるガス境膜物質移動係数は、 $k_{gi} = (Sh' D_M) / D_i$  で与えられるので、平均ガス境膜物質移動係数  $\bar{k}_{gi}$  は、滞留時間  $t_i$  を用いて次式であらわされる。

$$\bar{k}_{gi} = \frac{\sum k_{gi} t_i}{t_i} \quad (4-43)$$

図4.21に、無機ヨウ素の平均ガス境膜物質移動係数  $\bar{k}_{gi}$  をスプレイ液滴の直径 ( $D_i$ ) に対して示した。 $\bar{k}_{gi}$  の値は、スプレイ液滴が小さいほど、また初速度が大きいほど増大する。 $i$  液滴表面でのヨウ素の吸収量は、気相側境膜を通しての物質移動量に等しいから、 $r = a$  の境界条件は

$$\frac{\partial C_L}{\partial r} = \frac{\bar{k}_g}{D_L} (C_g - C_L / H) \quad (4-44)$$

であり、さらに、初期条件は、

$$C_L = C_{L1} \quad , \quad t = 0 \quad (4-45)$$

である。2次の微分方程式(4-41)は、上述の境界条件と初期条件から解くことが出来る。解を求める都合上「吸収効率」Eを次のように定義する。

$$E = \frac{C_L - C_{L1}}{C_L^* - C_{L1}} \quad (4-46)$$

吸収効率Eは、拡散方程式の解から

$$E = 1 - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{6 Sh^2 \exp(-\alpha_n^2 \theta_f)}{\alpha_n^2 [\alpha_n^2 + Sh(Sh-1)]} \quad (4-47)$$

となる。<sup>2)</sup>ここで、 $\alpha_n$ は

$$\alpha_n \cot(\alpha_n) + (Sh-1) = 0 \quad (4-48)$$

から求められる解の固有値である。式(4-47)の解を図4.2.2に無次元数  $Sh [a \bar{k}_g / D_L H]$  をパラメータとして示す。吸収効率は液滴径に大きく依存し、小さな液滴径では1.0に近ずき、液滴径が大きくなるほど急激に小さくなる。このように吸収効率が、液滴径の影響を著しく受けるため、実際のスプレイ系に適應するにあたっては、スプレイ液滴径分布を十分注意深く決定しなければならない。

格納容器内のスプレイ液滴についての平均吸収効率 $\bar{E}$ は、 $i$ 液滴径についての液滴の吸収効率 $E_i$ と全流量に対するその液滴径の流量、 $F_i$ 、の比の積で表わされる。すなわち、

$$\bar{E} = \frac{1}{F} \sum_{i=1}^n E_i F_i \quad (4-49)$$

である。また、スプレイ液による格納容器内気相のヨウ素除去係数 $\lambda_s$ は

$$\lambda_s = \frac{\bar{E} F H}{V_1} \quad (4-50)$$

で表わされる。

格納容器スプレイについての吸収効率の計算例として、スプレイ断面積  $38.5 \text{ m}^2$ 、スプレイ流量  $130 \text{ m}^3/\text{hr}$ 、スプレイ液滴の平均液滴径、 $D_g = 700 \mu\text{m}$ 、液滴径分布の標準偏差、 $\sigma_g = 1.5$ 、気相温度  $80^\circ\text{C}$ 、スプレイ液温度  $80^\circ\text{C}$ 、スプレイ液の pH 7.0 の場合の計算結果を図4.2.3～4.2.5に示す。

図4.2.3は気相ヨウ素濃度が  $10^{-6} \text{ g/cm}^3$  の場合、スプレイ液落下距離をパラメータとして、液滴径に対する吸収効率の分布を示す。吸収効率Eは液滴径に大きく依存し、その傾向は落下距離が短いほど顕著である。

図4.2.4は気相ヨウ素濃度が  $10^{-9} \text{ g/cm}^3$  の場合の液滴径に対する吸収効率の変化を示

す。気相ヨウ素濃度が  $10^{-6} \text{ g/cm}^3$  の場合に比べ、液滴径に対する吸収効率の変化のパターンは同一であるが、全体的に吸収効率が低下することがわかる。

図 4.25 は気相ヨウ素濃度をパラメータとして、平均吸収効率とスプレイ落下距離との関係を示す。平均吸収効率は落下距離の増加に従い大きくなり、スプレイ液落下距離 5 m 付近で平均吸収効率の増加率は、急減し落下距離 15 m 付近から再び増加し始める。吸収効率は、一般には、スプレイ落下距離が長いほど良くなるが、反面、液滴同志の合体により液滴径が大きくなることに起因して、その吸収効率は低下する。落下距離が 5 ~ 15 m では、液滴の合体による影響が落下距離の増加に対する影響より大きくなり、吸収効率はほぼ一定になる。

配管やグレーチングなどの格納容器内部構造物に、スプレイ液滴が衝突した場合、スプレイ液滴分布は対数正規からはなれる。図 4.26 に示すような 2 つのピークを持つ液滴分布を仮定した場合の平均吸収効率とスプレイ落下距離の関係を図 4.27 に示す。両図には、液滴分布が平均液滴径  $D_g = 700 \mu\text{m}$ 、偏差  $\sigma_g = 1.5$  の対数正規分布をもつ場合も合わせて示してある。図 4.27 中の 2 つのピークをもつ液滴分布の平均吸収効率は、対数正規分布のそれと比較して、その平均吸収効率は約  $\frac{1}{2}$  に低下する。

#### 4.7 ヨウ素の沈着現象

LOCA 時に格納容器内へ放出された無機ヨウ素は、格納容器の壁面に沈着 (Deposition) する。MIRA-PB では、この沈着現象の解析を RATES と名づけて Subroutine 化した。無機ヨウ素の壁への沈着は、気相から直接壁面へあるいは、気相から濡れ壁液膜を介して壁面に物質移動する。格納容器壁への無機ヨウ素の移動を考える前提として、格納容器中の雰囲気ガスは、スプレイの散布、熱対流、蒸気流の凝縮などの混合現象でよく攪拌されていると仮定する。したがって、ヨウ素の壁面沈着速度は、ガス境膜抵抗、液膜抵抗、そして壁面に塗布されているペイントの吸収抵抗で支配される。

RATES では、格納容器壁面のガス境膜物質移動係数、 $k_0$  (cm/sec) の導出を自然対流下の境界層の熱伝達現象と同じ類似性が成立つと仮定して、以下の式を採用している。

$$k_0 = 0.59 \frac{D_M}{H_T} (\text{Gr} \cdot \text{Sc})^{1/4} \quad (\text{層流}) \quad (4-51)$$

$$k_0 = 0.13 \frac{D_M}{H_T} (\text{Gr} \cdot \text{Sc})^{1/3} \quad (\text{乱流}) \quad (4-52)$$

ここで Gr は、グラスホフ数  $[\text{Gr} = H_T^3 \rho_m g \beta \Delta T / \mu_m^2]$ 、Sc は、シュミット数  $[\text{Sc} = \mu_m / \rho_m D_M]$  をあらわす。なお、 $\beta$  は、体膨張係数であり、 $\Delta T$  は、格納容器壁と雰囲気間の温度差をあらわす。

LOCA 時には、空気-水蒸気混合気体から格納容器壁面へ熱伝達が起こり、水蒸気は壁面で凝縮する。一方、スプレイの散布が始まると格納容器内の水蒸気分圧が低下し、格納容器壁面の一部は乾燥すると考えられる。したがって、ヨウ素の壁面沈着量は、乾き面および濡れ面

でかなり変化すると予想される。MIRA-PBは、格納容器壁の乾き面および濡れ壁面の面積の値は、時間で変化するようにプログラム化した。今、凝縮する水蒸気の熱量を  $Q_{vap}$  (cal/g)、液膜面と壁面の温度差を  $(T_S - T_W)$  として、ガス境膜を介して濡れ壁面への無機ヨウ素の物質移動を考慮する。凝縮によって形成された濡れ壁面への無機ヨウ素の物質移動係数  $k_j$  (cm/sec) は、Nusselt によって導出された凝縮膜の層流熱伝達の解析と相似であると仮定した次式であらわされる。<sup>35)</sup>

$$k_j = \frac{4 D_L}{3} \left\{ \frac{Q_{vap} g \rho_L^2}{4 \mu_W k_T (T_S - T_W) H_T} \right\}^{1/4} \quad (4-53)$$

ここで、凝縮液膜間の温度差は、次式で計算できるとした。

$$(T_S - T_W) = \left( \frac{3 Q_{vap} N_S}{4 k_T} \right) \left( \frac{3 \mu_W H_T N_S}{g \rho_L^2} \right)^{1/3} \quad (4-54)$$

図 4.28 に、濡れ壁への無機ヨウ素の物質移動係数、 $k_j$  (cm/sec) を格納容器の高さを変化させて、スチームフラックス、 $N_S$  (g/cm<sup>2</sup> sec) の関数として示した。

無機ヨウ素は、格納容器壁に塗布されているペイント上に沈着し、ペイント膜内に浸透する。一般に、軽水炉の格納容器内壁は、耐放射線に強い合成樹脂系塗料が採用されている。即ち、下塗ペイントとして鉛丹入シリコン樹脂系塗料を、上塗ペイントとしてエポキシ系塗料をそれぞれ 25 ~ 40  $\mu$ m の厚さで塗布している。ヨウ素の沈着速度は、塗布されたペイントの種類によってかなり変化する。MIRA-PB では、Rosenberg の実験値<sup>35)</sup> から得た無機ヨウ素の沈着係数を各ペイントの種類ごとに整理し次の実験式で表わした。

$$k_d = k_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (4-55)$$

MIRAP/MIRAB では、エポキシ系塗料上の無機ヨウ素の沈着データおよび気相、液相中におけるオーステナイト系ステンレス鋼上の沈着データが欠けている。したがって、ヨウ素の沈着速度をエポキシ系塗料については Postma の論文<sup>27)</sup> から、ステンレス鋼については、Parker<sup>36)</sup> および西沢ら<sup>25)</sup> の論文から取得し、修正したコード MIRA-PB にコーディングした。表 4.3 に、MIRA-PB コード中に内蔵した式 (4-55) 中の  $k_0$  および  $Q$  の値を示す。図 4.29 に、各種ペイント上の無機ヨウ素の沈着速度、 $k_d$  (cm/sec) の実測値と計算値を比較して温度の関数として示した。一般に、無機ヨウ素の壁面沈着速度は、液相中(濡れ壁)より気相中(乾き壁)のほうが速い。

#### 4.8 スプレー散布によるエアロゾルの水洗除去

軽水炉の想定事故時に発生するエアロゾルの問題は、工学的安全施設、特に非常用炉心冷却系 (ECOS) の一部あるいは、全てが作動しない場合に重要な課題となる。<sup>27)</sup> エアロゾルの発生量は、想定事故をどの程度の規模で考えるかでの評価法が大きく変わる。現在、軽水炉

(特にPWRプラント)で採用されているTID-14844<sup>37)</sup>モデルでは, 仮想事故時に燃料体から格納容器内に次の物質が放出されると仮定されている。

希ガス	100%
ハロゲン	50%
固形物	1%

固形物1%の放出は, 1000MWe級の原子炉では約24kgの質量に相当することになる。この値は, エアロゾルの環境放出に対し, かなり安全側に見積った仮定となっている。固形物24kgの内訳は明らかにはされていないが, 熱力学的考察から, 核分裂生成物のCs, Ru, Te, Se, SbそしてMo等の比較的揮発性の高い核種が考えられる。ヨウ素エアロゾルに注目すると, いわゆる固体粒子にヨウ素が付着した固体エアロゾルと格納容器スプレイ液滴から発生するヨウ素を吸収した液体微粒子(10 $\mu$ m以下)が存在すると考えられる。この両形態のエアロゾルは, 共に格納容器から環境への漏洩の対象となる。

軽水炉の想定事故の規模を炉心溶融まで拡大して考えるとエアロゾルの問題は, 極めて重要になってくる。この場合, 格納容器内に放出される放射性核種は多岐にわたり, その内訳は, 超ウラン元素, 五種類に分けられた核分裂生成物のグループ, そして炉心構造物が考えられる。即ち, 問題となる超ウラン元素は, 主としてプルトニウム(<sup>241</sup>Pu, <sup>240</sup>Pu, <sup>239</sup>Pu), 核分裂生成物では, アルカリ金属類(<sup>137</sup>Cs, Rb), 揮発性の高いテルルグループ(Te, Se, Sb)アルカリ土金属類(<sup>90</sup>Sr, <sup>89</sup>Sr, <sup>137</sup>Ba), 希土類(<sup>144</sup>Ce, <sup>144</sup>Pr, <sup>9</sup>Y), その他(<sup>95</sup>Zu <sup>106</sup>Ru), そしてNi-60(n,p)Co-60の反応で生成した炉心構造物からの<sup>60</sup>Coが考えられる。Karlsruhe研究所のHosemann, Schikarskiら<sup>38)</sup>は, 軽水炉のLOCAに起因した炉心溶融を想定し, 放射性ヨウ素を含めた約360種類の核分裂生成物を取りあげ, 格納容器スプレイによる減衰挙動を計算した。彼らのモデルによると, 格納容器への放射性物質の放出割合は, 希ガスおよびヨウ素は燃料インベントリに対して100%, 燃料体, 核分裂生成物および構造物を含む固形物は1%と仮定している。格納容器スプレイ系が作動した場合(ECCSは作動しないと仮定する), 無機ヨウ素はスプレイ散布によって速やかに低減化され, その結果, 環境へ与える放出核種の線量は, <sup>241</sup>Puエアロゾルが<sup>131</sup>I<sub>2</sub>ガスのそれを上回ると報告している。<sup>131</sup>Iの線量に次いで, <sup>90</sup>Sr, <sup>240</sup>Pu, <sup>239</sup>Pu, <sup>89</sup>Sr, <sup>91</sup>Y, <sup>95</sup>Zr, <sup>137</sup>Cs, <sup>105</sup>Ru, <sup>60</sup>Co等のエアロゾルが逐次重要になるとの結果を得ている。<sup>241</sup>Puは, その半減期が14年であり, 事故時の環境への影響は極めて大きいと示唆している。

ここで, エアロゾル粒子のスプレイによる除去効果について述べる。一般に, スプレイ液滴によるエアロゾルの除去挙動は, エアロゾルの粒子径で変化する。極めて微細な粒子(0.01 $\mu$ m以下)は, ブラウン運動(Brownian diffusion)により, 液滴の表面, 壁面等に付着捕集されやすい傾向をもつ。また, 0.01~1 $\mu$ mの範囲のエアロゾルは, 拡散泳動(Diffusiophoresis)により液滴に捕集される。拡散泳動とは, 液滴表面と雰囲気ガス間に水蒸気等の凝縮流があると, その領域に存在するエアロゾル粒子は凝縮流によって液滴表面に移動する現象をいう。大粒子エアロゾル(1~10 $\mu$ m)に対するスプレイ液滴の捕集機構は, インタセプション(Interception)と慣性衝突(Internal impaction)に分けて説明できる。格納容器内の雰囲気ガスは, 自由落下している液滴球のまわりで流線となると考える。上記二つ

の現象は、液滴球の落下に起因する雰囲気ガスの流線に関係している。インタセプションとは、エアロゾル粒子が落下している液滴の流線にのり、液滴の直径であらわされる領域を通過した時に捕集される現象である。慣性衝突とは、大粒子エアロゾルが、その慣性力のため流線からはずれ、液滴球に衝突捕集される現象をいう。これらのスプレイ液滴によるエアロゾル捕集に加えて、格納容器内のエアロゾルは、沈降によって減衰する。エアロゾル粒子の沈降速度は、次の Stokes の式であらわされる。

$$v_t = \frac{2g\rho_p r_p^2}{9\mu_m} \quad (4-56)$$

MIRA-PBでは、エアロゾル粒子は単分散であると仮定され、格納容器内の減衰挙動を沈降、拡散泳動、インタセプション、および慣性衝突にわけて考慮した。

スプレイ液滴に対するエアロゾル粒子の水洗除去係数、 $\lambda_{SP}$  (1/sec) は、次式のように定義する。

$$\lambda_{SP} = \sum_{i=1}^n \frac{3H_T E_{Pi} F_i}{2D_i V_i} \quad (4-57)$$

ここで、 $E_{Pi}$  は、 $i$  液滴によるエアロゾルの捕集効率であり、エアロゾル粒子径によって変化し、拡散泳動、インタセプションおよび慣性衝突の諸現象でその値が決定される。

MIRA-PBで採用されている拡散泳動理論は、Schmitt-Waldmann の著書から得たものであり<sup>39)</sup>、エアロゾルに対する拡散泳動速度、 $v_d$  (cm/sec) は、Slip flow 領域 ( $\lambda/r_p < 0.1$ ) では、次式であらわされる ( $\lambda$  は、雰囲気ガスの自由走行距離を表す。)

$$v_d = (1 + \sigma_{12} r_2) \frac{D_W}{r_2} \Delta r_{1\infty} \quad (4-58)$$

ここで、 $\sigma_{12}$  は、Slip factor と呼ばれ、MIRA-PBでは近似的に、

$$\sigma_{12} = 0.061 \quad (4-59)$$

で与えられる。 $r_2$  および  $r_{1\infty}$  は、それぞれ格納容器内の空気の分圧および液滴から充分はなれた位置の水蒸気分圧をあらわす。 $D_W$  は空気中への水蒸気の拡散係数、 $\Delta r_{1\infty}$  は、液滴表面における水蒸気分圧勾配である。Postmaらは、エアロゾル粒子の拡散泳動による捕集効率を式(4-58)から導き次式のように決定した。<sup>40)</sup>

$$E_{DFi} = \frac{2(1 + \sigma_{12} r_2) \rho_L D_i C_{PL} \Delta T_1}{3H_T C \lambda_C} \quad (4-60)$$

ここで、 $\Delta T_1$  は、格納容器内に入った液滴の温度上昇、 $C$  は、格納容器内の全ガス濃度 ( $g/cm^3$ ) をあらわす。

エアロゾルに対するスプレイ液滴のインタセプションに起因する捕集効率  $E_{IN}$  は、Ranz と

Wong<sup>41)</sup>により次式のように導出されている。

$$E_{INi} = 6 \frac{r_p}{D_i} \quad (4-61)$$

慣性衝突捕集効率,  $E_{IP}$  は, Stokes 数 ( $S_{tk}$ ) と呼ばれる無次元数 (流線から外れたエアロゾル粒子が  $i$  液滴に衝突して停止する距離と液滴径の比) を使用して求められる。

$$E_{IPi} = \frac{(S_{tk})^2}{(S_{tk} + 0.25)^2} \quad (4-62)$$

なお, Stokes 数は, 次式で定義できる。

$$S_{tk} = \frac{4 v_i r_p^2 \rho_p}{9 \mu_m D_i} = \frac{4 H_T r_p^2 \rho_p}{9 \mu_m D_i t_i} \quad (4-63)$$

図 4.30 に, エアロゾルの粒子径に対する各スプレイ捕集効率,  $E_P$  の変化を Postoma の論文より転載する。<sup>27)</sup>

式 (4-60) ~ (4-62) の捕集効率を式 (4-57) の  $E_{Pi}$  に代入して  $\lambda_{SP}$  を導出する。MIRA-PB では, 格納容器内のエアロゾル減衰は, エアロゾルの沈降, 前記したスプレイ液滴による捕集機構のみを考慮している。したがって, 他のエアロゾル減衰現象 (例えばエアロゾルの凝集に起因する沈降, 拡散による沈着, 熱泳動沈着) は, 無視されており, エアロゾル減衰に関しても控え目な結果を得るプログラムになっている。

#### 4.9 記号

$A_F$	= スプレイノズル液噴出の断面積, $cm^2$
$a$	= 液滴の半径, $cm$
$C$	= 格納容器内の全ガス濃度, $g/cm^3$
$C_D$	= 液滴の抵抗係数
$C_g$	= 気相濃度, $g/cm^3$
$C_L$	= 液相濃度, $g/cm^3$
$C_{Li}$	= スプレイ液入口濃度, $g/cm^3$
$C_{PL}$	= エアロゾル粒子の比熱, $cal/g$
$D$	= 液滴の直径, $cm$
$D_G$	= 気相中の拡散係数, $cm^2/sec$
$D_g$	= 液滴の幾何平均直径, $cm$
$D_L$	= 液相中の拡散係数, $cm^2/sec$
$D_M$	= 空気-水蒸気混合雰囲気中の拡散係数, $cm^2/sec$
$D_n$	= スプレイノズル口の直径, $cm$
$D_w$	= 空気中の水蒸気の拡散係数, $cm^2/sec$



$E$	= ヨウ素の吸収効率
$\bar{E}$	= ヨウ素の平均吸収効率
$E_{DF}$	= エアロゾルの拡散泳動捕集効率
$E_{IN}$	= エアロゾルのインタセプション捕集効率
$E_{IP}$	= エアロゾルの慣性衝突捕集効率
$E_P$	= エアロゾルのスプレー液滴による捕集効率
$F$	= スプレー液流量, $\text{cm}^3/\text{sec}$
$F_N$	= 液滴の個数フラックス, $\text{ヶ}/\text{cm}^2 \text{ sec}$
$F_O$	= 初期液滴の個数フラックス, $\text{ヶ}/\text{cm}^2 \text{ sec}$
$F_S$	= 合体により消滅した液滴の個数フラックス, $\text{ヶ}/\text{cm}^2 \text{ sec}$
$F_W$	= 液滴の重量フラックス, $\text{g}/\text{cm}^2 \text{ sec}$
$g$	= 重力加速度, $\text{cm}/\text{sec}^2$
$H$	= 気液分配係数
$H_T$	= スプレーノズル有効高さ, $\text{cm}$
$I_D$	= 衝突積分, (表 4.2 参照)
$\bar{k}_g$	= 平均気相境膜物質移動係数, $\text{cm}/\text{sec}$
$k_g$	= 気相境膜物質移動係数, $\text{cm}/\text{sec}$
$k_C$	= 壁面の自然対流ガス境膜物質移動係数, $\text{cm}/\text{sec}$
$k_d$	= 無機ヨウ素の壁面沈着係数, $\text{cm}/\text{sec}$
$k_l$	= 凝縮膜面への無機ヨウ素の物質移動係数, $\text{cm}/\text{sec}$
$k_T$	= 液膜の熱伝導度, $\text{cal}/\text{cm sec } ^\circ\text{C}$
$M$	= 分子量, $\text{g}/\text{mol}$
$N_A$	= 単位断面に存在する液滴の数, $\text{ヶ}/\text{cm}^2$
$N_C$	= 単位時間あたりの衝突合体数, $\text{ヶ}/\text{sec}$
$N_S$	= 壁面へのスチームフラックス, $\text{g}/\text{cm}^2 \text{ sec}$
$P$	= 分圧, $\text{atm}$
$P_o$	= 全圧, $\text{atm}$
$Q_o$	= スプレーノズル1個の噴出口流量, $\text{cm}^3/\text{sec}$
$Q_{\text{vap}}$	= 水蒸気の凝縮熱量, $\text{cal}/\text{g}$
$R$	= 格納容器の半径, $\text{cm}$
$Re$	= Reynolds 数
$r$	= 半径方向の座標, $\text{cm}$
$r_P$	= エアロゾルの半径, $\text{cm}$
$r_{1,2}$	= 気体 1, 2 の衝突直径
$S_c$	= Schmidt 数
$S_h$	= 無次元数, $[a \bar{k}_g / D_L H]$
$S_h'$	= Sherwood 数
$T$	= 絶対温度, $^\circ\text{K}$

$t$	= 時間, sec
$t_j$	= 液滴の滞留時間, sec
$\Delta T$	= 気相と壁間の温度差, °C
$T_s$	= 凝縮液膜表面の温度, °C
$T_w$	= 壁面の温度, °C
$\Delta T_j$	= 液滴の上昇温度, °C
$u$	= 液滴の速度ベクトル, cm/sec
$V$	= 単一液滴の体積, cm <sup>3</sup>
$V_1$	= 気相体積, cm <sup>3</sup>
$\bar{V}_0$	= 溶質のモル体積, cm <sup>3</sup> /mol
$v$	= 液滴の落下速度, cm/sec
$v_t$	= エアロゾルの沈降速度, cm/sec
$v_d$	= エアロゾルの拡散泳動速度, cm/sec
$W$	= 液滴の衝突合体に関する無次元数
$W_T$	= 液滴分布に関する重量分率
$\alpha_n$	= 式(4-48)の第n次の根
$\beta$	= 絶対温度の逆数, °K <sup>-1</sup>
$r_1$	= 水蒸気の分圧, atm
$\sigma_{12}$	= 拡散泳動のSlip factor
$\sigma_g$	= 液滴の幾何標準偏差
$\theta_f$	= 液滴落下時間についての無次元数, $D_L t/a^2$
$\lambda_s$	= ヨウ素の除去係数, sec <sup>-1</sup>
$\lambda_{SP}$	= エアロゾルの除去係数, sec <sup>-1</sup>
$\lambda_C$	= 水蒸気の凝縮潜熱, cal/g
$\rho_m$	= 空気-水蒸気混合雰囲気気体の密度, g/cm <sup>3</sup>
$\rho_p$	= エアロゾル粒子の密度, g/cm <sup>3</sup>
$\rho_L$	= 液相の密度, g/cm <sup>3</sup>
$\mu_m$	= 混合雰囲気気の粘性係数, poise
$\mu_w$	= 液相の粘性係数, poise
$\eta$	= スプレインノズル噴出口の空隙率

## 添 字

$i$	= $i$ 液滴径の集合
$j$	= $j$ 液滴径の集合
*	= 平衡状態
s	= 水蒸気の記号
air	= 空気の記号

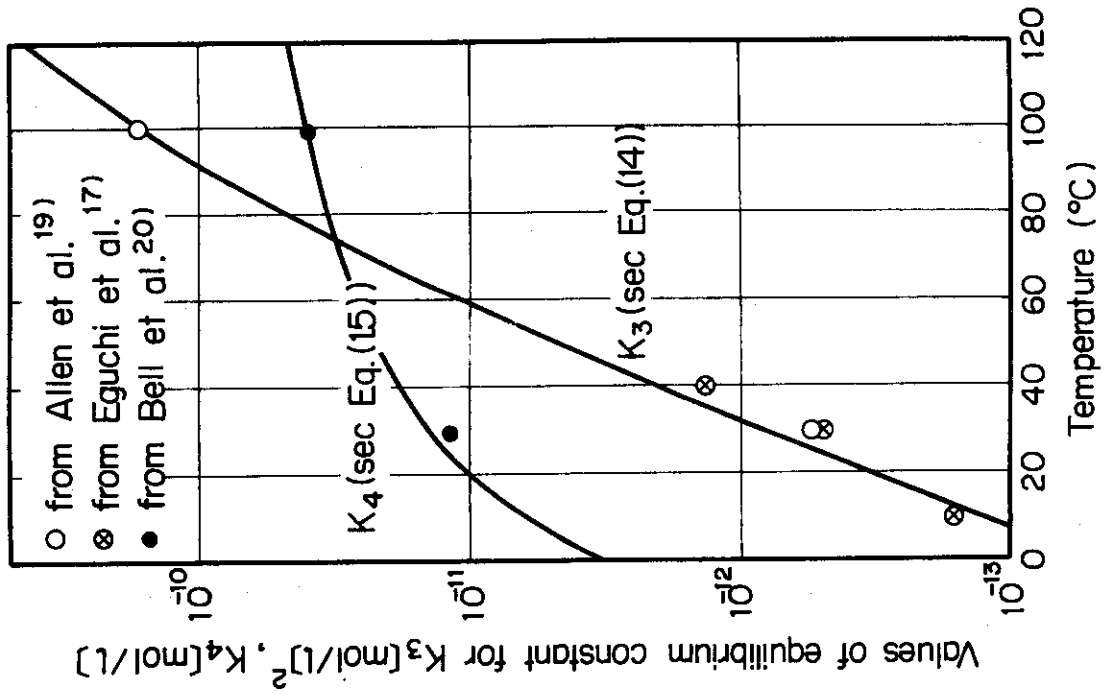


Fig.4.2 Temperature dependence of equilibrium constant for  $K_3$  and  $K_4$

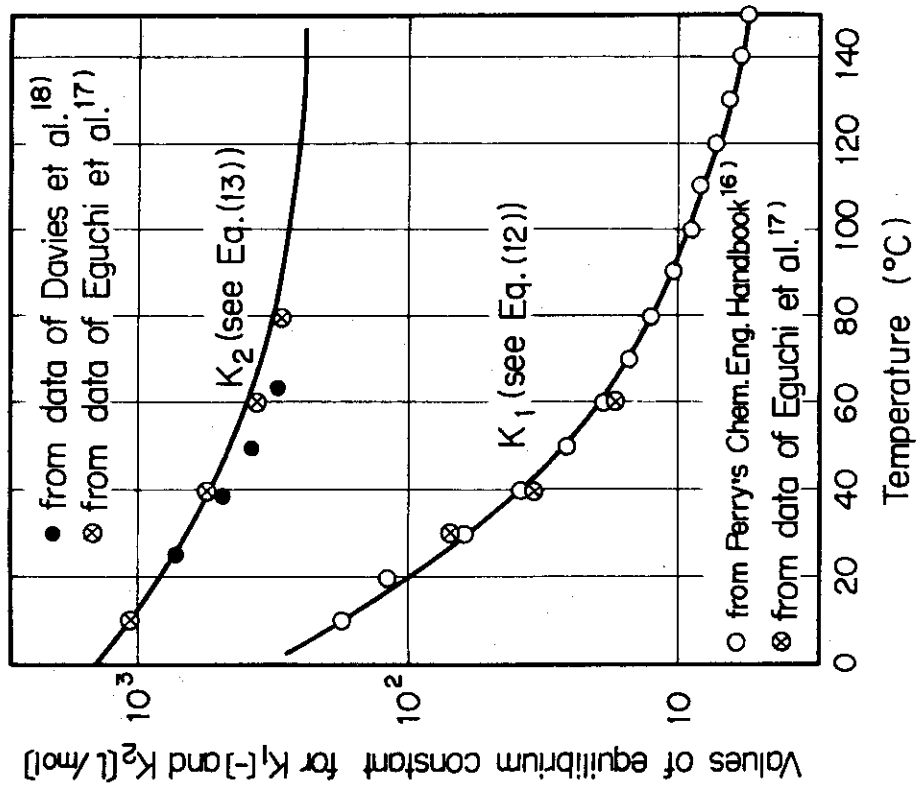


Fig.4.1 Temperature dependence of equilibrium constant for  $K_1$  and  $K_2$

Table 4.1 Equation of equilibrium constants for iodine-water reaction

1.	$I_2(g) \rightleftharpoons I_2(aq)$	..... Eq.(12)	
	$K_1 = \exp(-249.603 + 35.7310 \ln T + 15008.8/T)$		for $\leq 385.5$ °K
	$K_1 = \exp(-349.957 + 49.6573 \ln T + 21729.5/T)$		for $> 385.5$ °K
2.	$I_2(aq) + I^- \rightleftharpoons I_3^-$	..... Eq.(13)	
	$K_2 = \exp(-111.98 + 16.725 \ln T + 6952.3/T)$		
3.	$I_2(aq) + H_2O \rightleftharpoons H^+ + I^- + HIO$	..... Eq.(14)	
	$K_3 = \exp(-0.0696525 - 840.141/T)$		
4.	$I_2(aq) + H_2O \rightleftharpoons H_2OI^+ + I^-$	..... Eq(15)	
	$K_4 = 1.2 \times 10^{-11} + 3.6 \times 10^{-13} (T - 298.16)$		

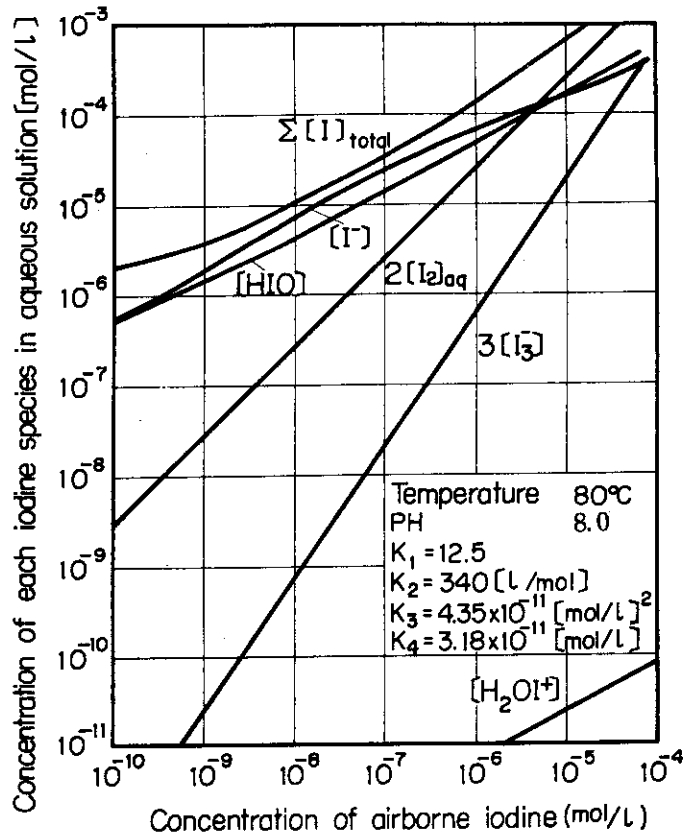


Fig.4.3 Concentration profiles of iodine chemical species in aqueous solution equilibrated with concentration of iodine in gaseous atmosphere at 80°C

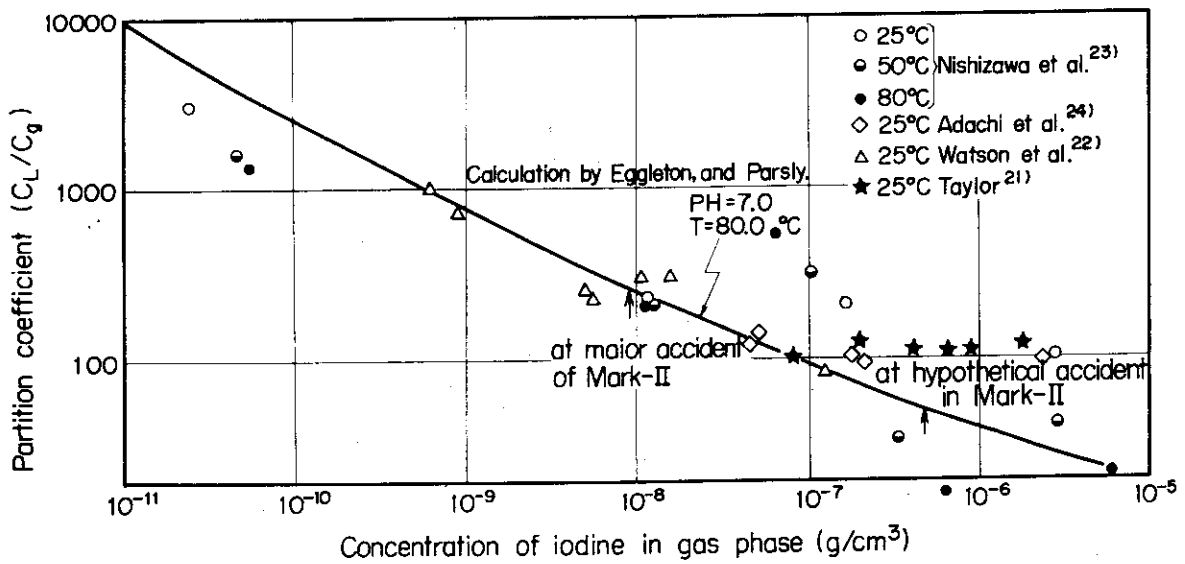


Fig.4.4 Partition coefficients of inorganic iodine vs. gas phase concentration, in pure water at pH=4.9~7.0

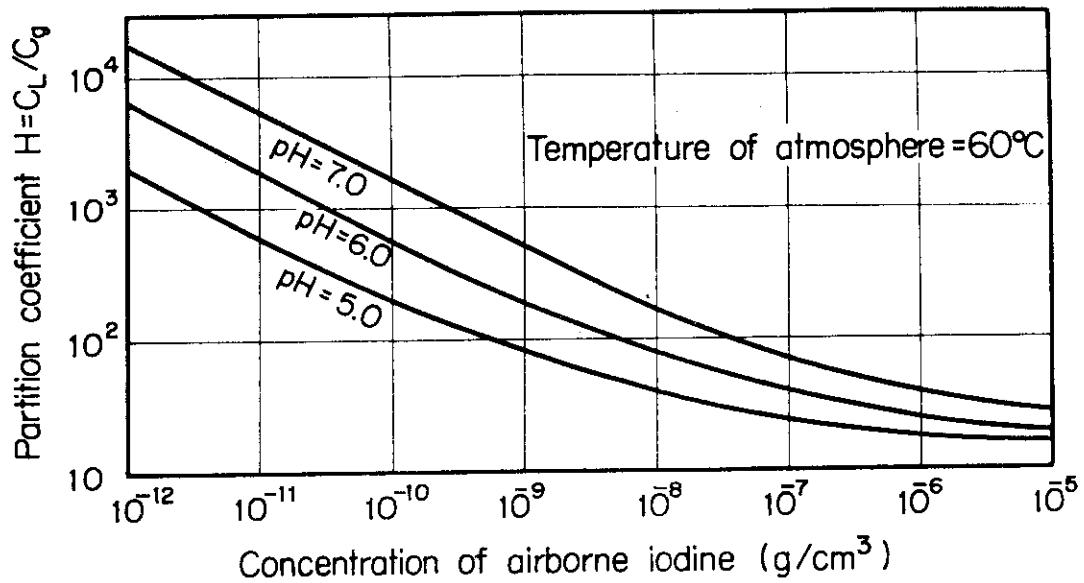


Fig.4.5 Partition coefficients varied with pH vs. concentration of airborne iodine at the temperature of 60°C, calculated by Parsly's program

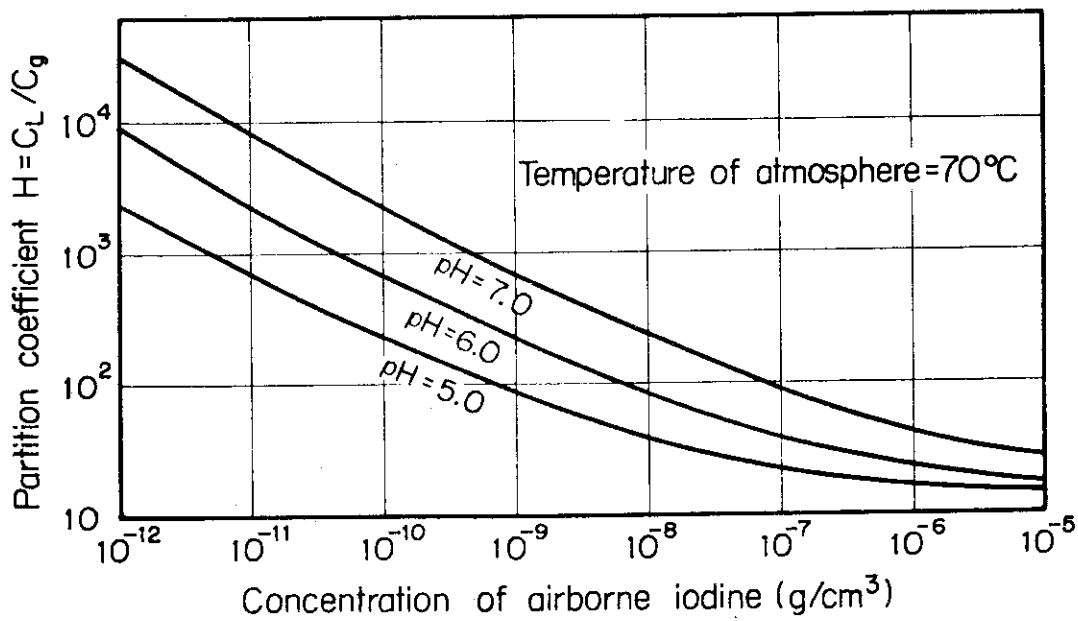


Fig.4.6 Partition coefficients varied with pH vs. concentration of airborne iodine at the temperature of 70°C, calculated by Parsly's program

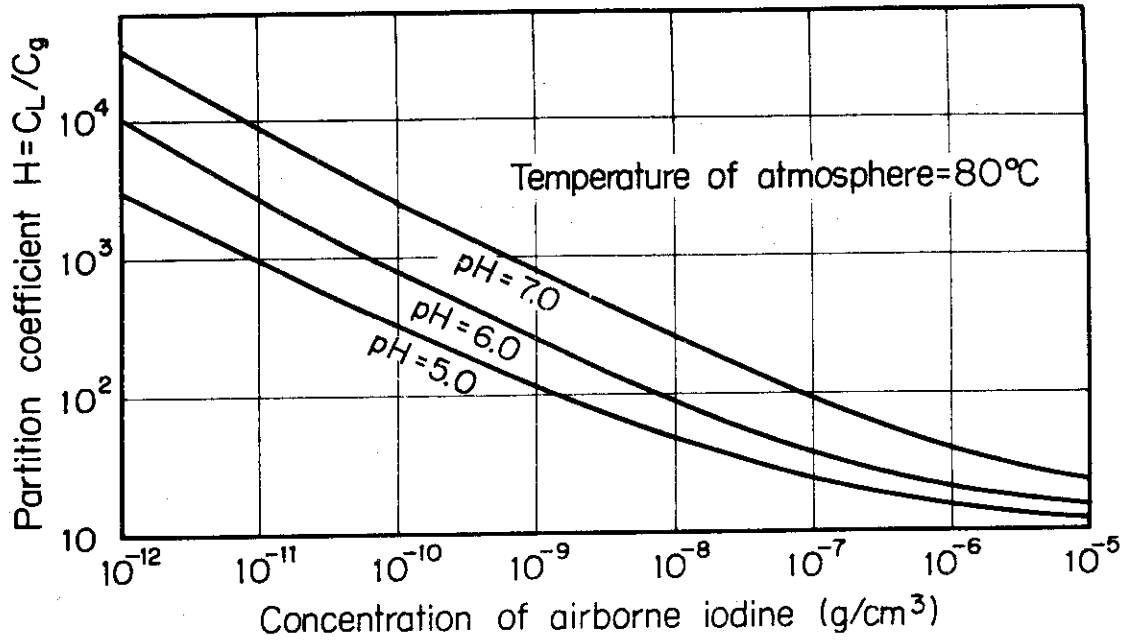


Fig.4.7 Partition coefficients varied with pH vs. concentration of airborne iodine at the temperature of 80°C, calculated by Parsly's program

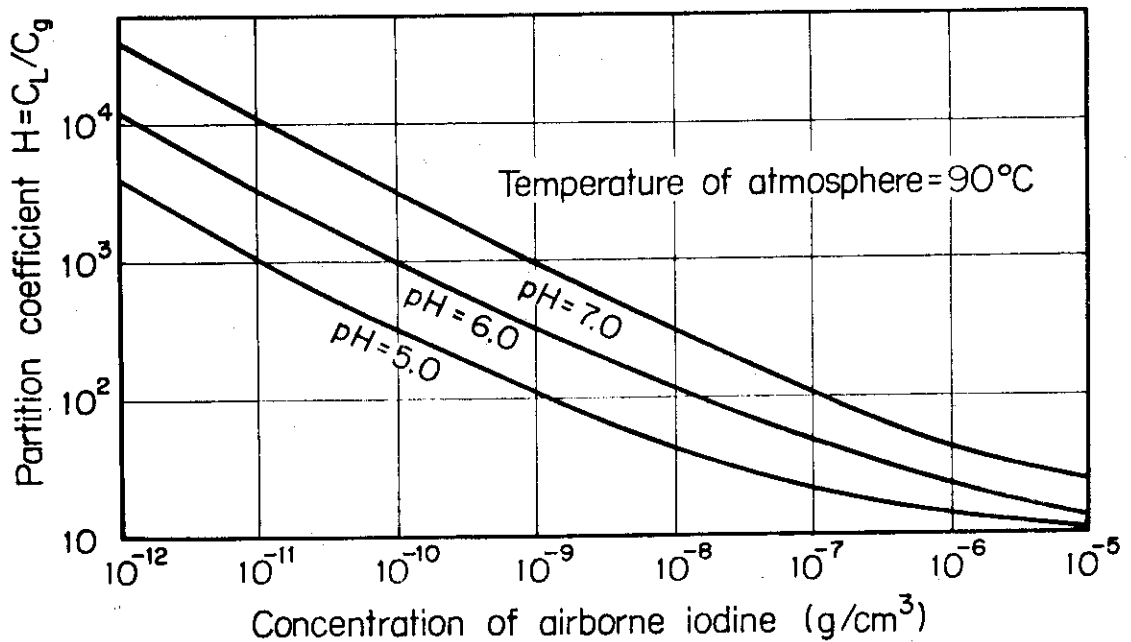


Fig.4.8 Partition coefficients varied with pH vs. concentration of airborne iodine at the temperature of 90°C, calculated by Parsly's program

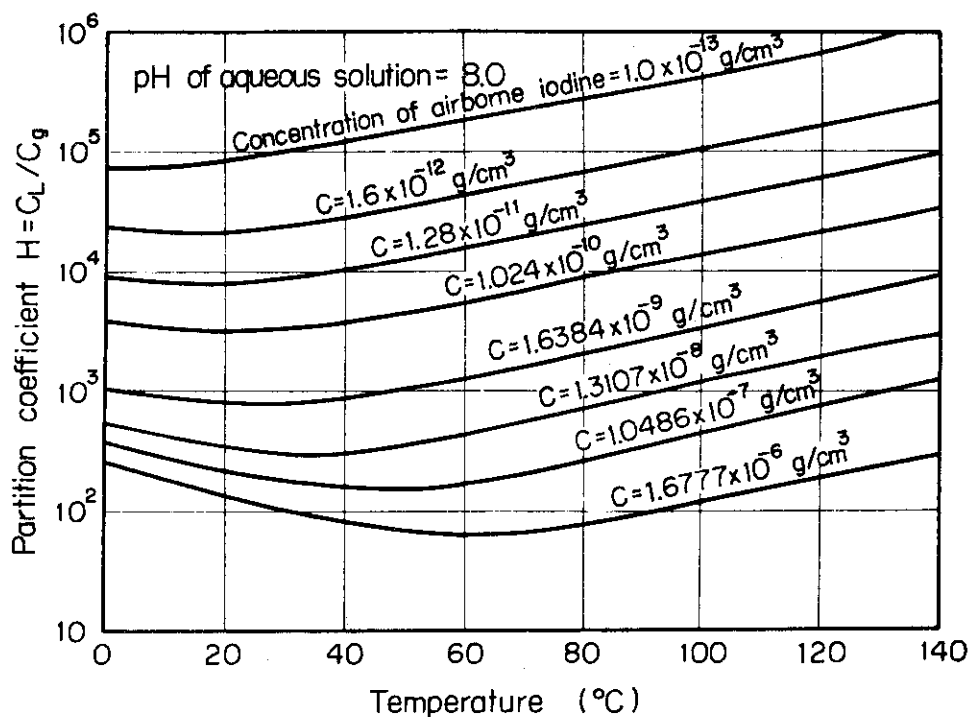


Fig.4.9 Partition coefficients varied with gaseous iodine concentration vs. temperature of atmosphere at pH=8.0, calculated by Parsly's program

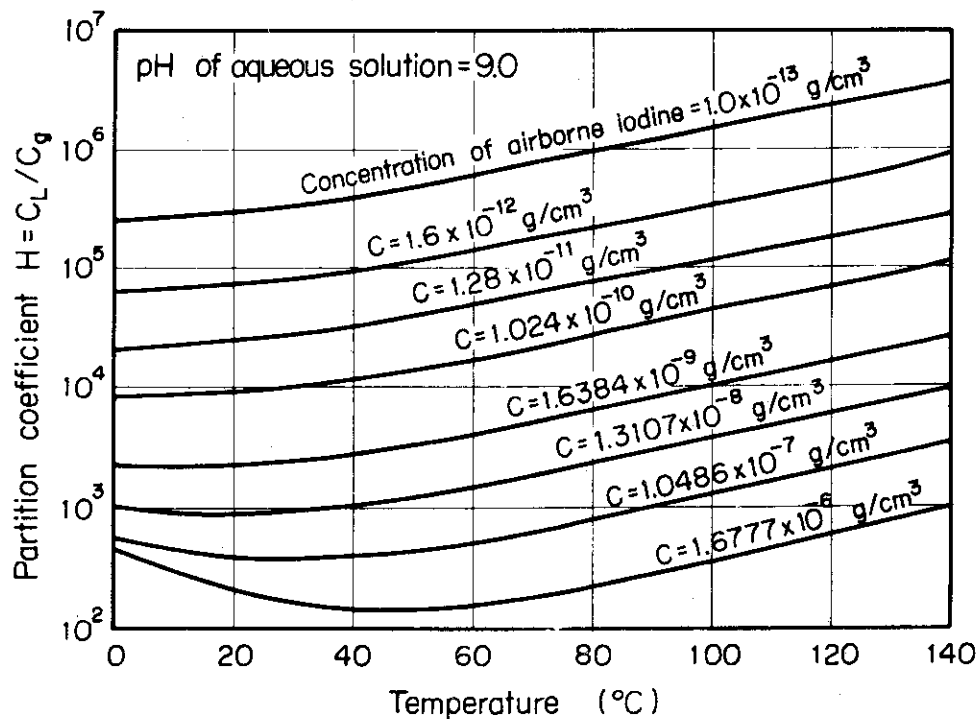


Fig.4.10 Partition coefficients varied with gaseous iodine concentration vs. temperature of atmosphere at pH=9.0, calculated by Parsly's program



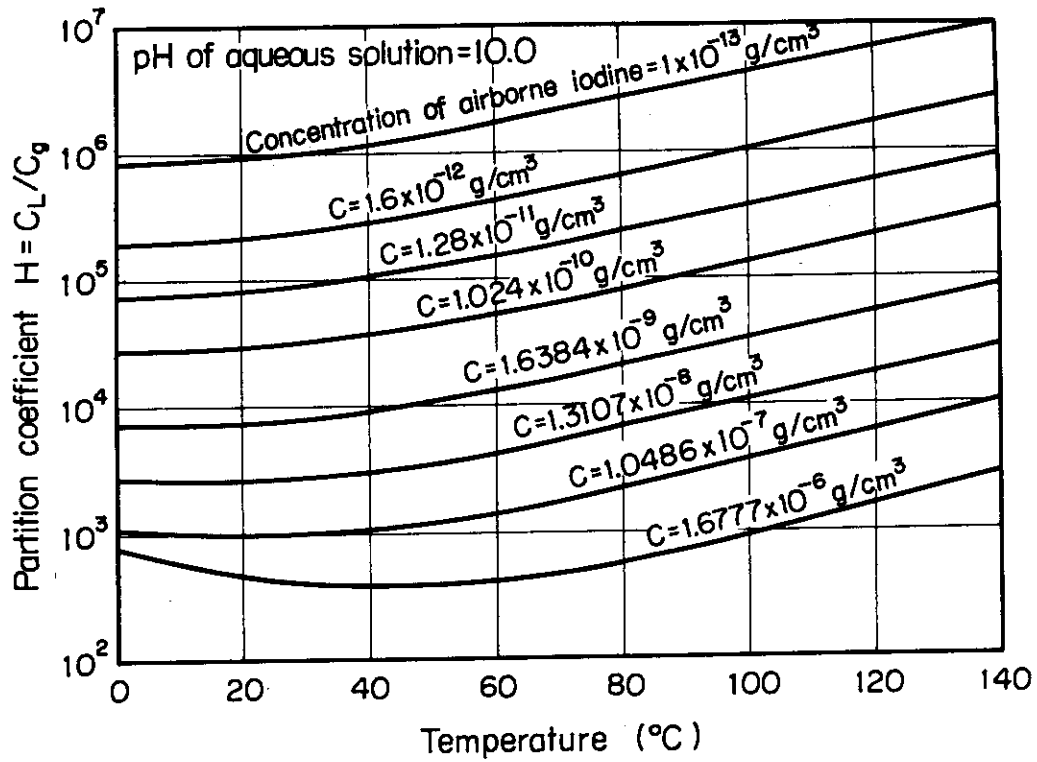


Fig.4.11 Partition coefficients varied with gaseous iodine concentration vs. temperature of atmosphere at pH=10.0, calculated by Parsly's program

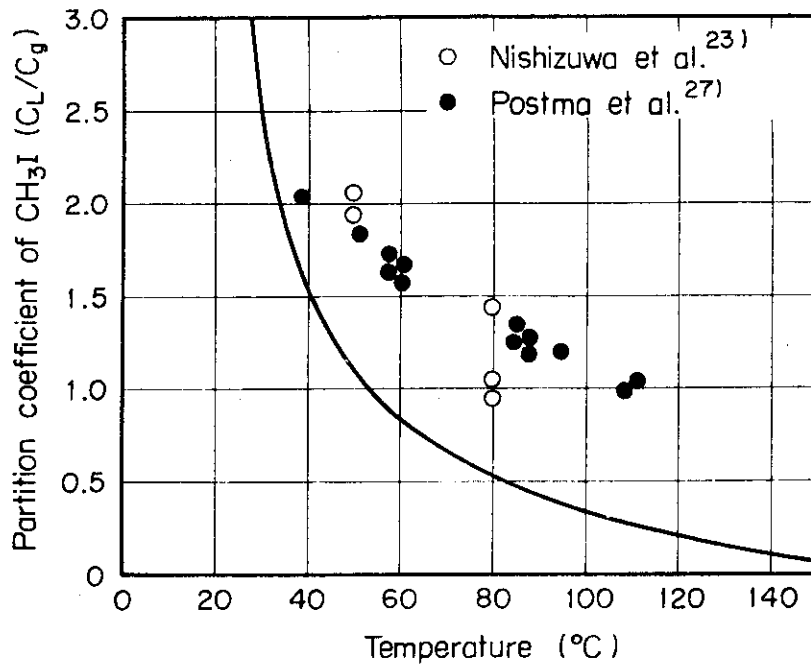


Fig.4.12 The relation between calculational and experimental partition coefficients of CH<sub>3</sub>I against temperature of atmosphere

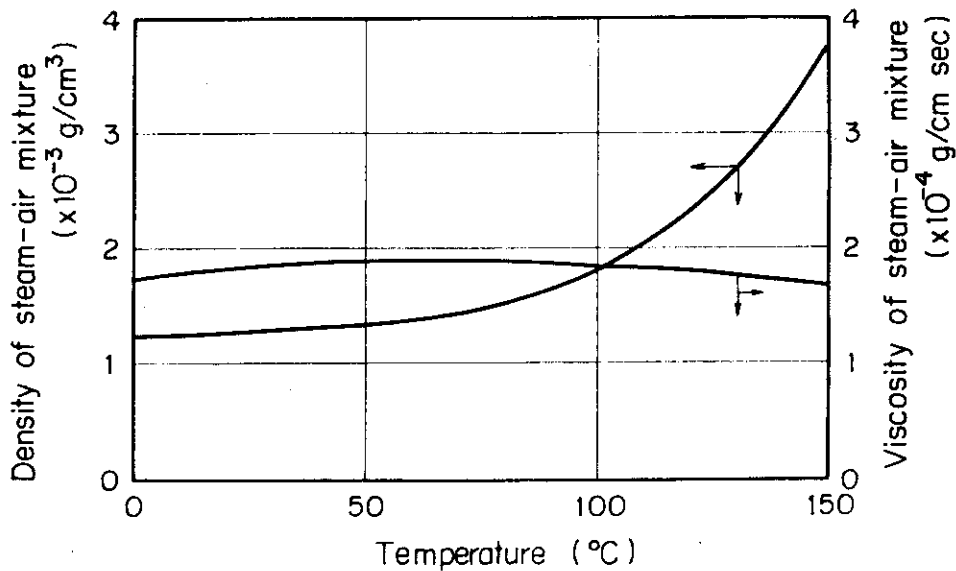


Fig.4.13 Variation of density and viscosity for air-steam mixture against temperature of atmosphere

Table 42 Values of collision diameters ( $r_*$ ) and collision integrals  
for gaseous components in the containment vessel

Component	Molecular weight M	From Perry (1963)		From Svehla	
		$r_*$	$\epsilon_*/k_B$	$r_*$	$\epsilon_*/k_B$
Air	28.97	3.617	97	5.711	78.6
Steam	18.02	2.655	363	2.641	809.1
Molecular iodine	253.82	4.982	550	5.160	474.2
Methyl iodine	141.94	4.680	400	4.230	519.0

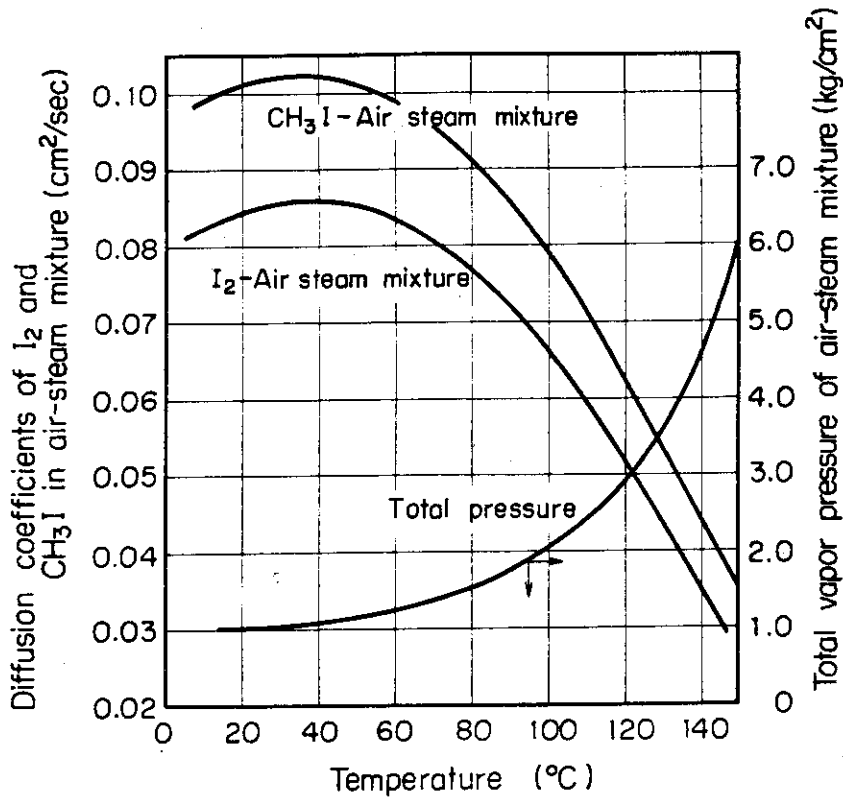


Fig.4.14 Diffusion coefficients of I<sub>2</sub> and CH<sub>3</sub>I gaseous in air-steam mixture against temperature of atmosphere

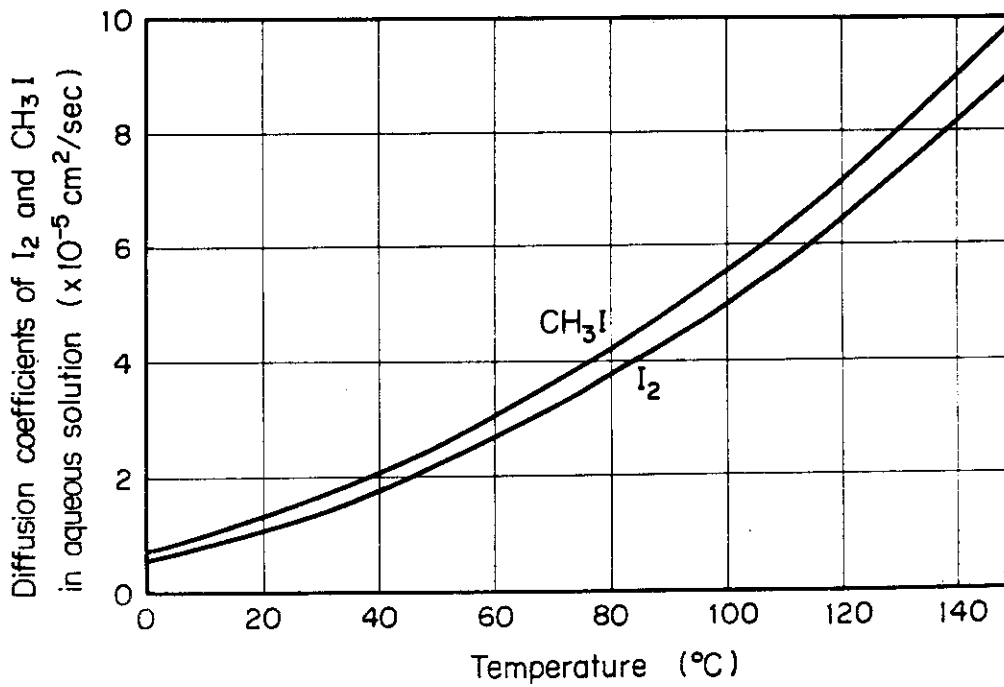


Fig.4.15 Diffusion coefficients of I<sub>2</sub> and CH<sub>3</sub>I in aqueous solution against temperature of atmosphere

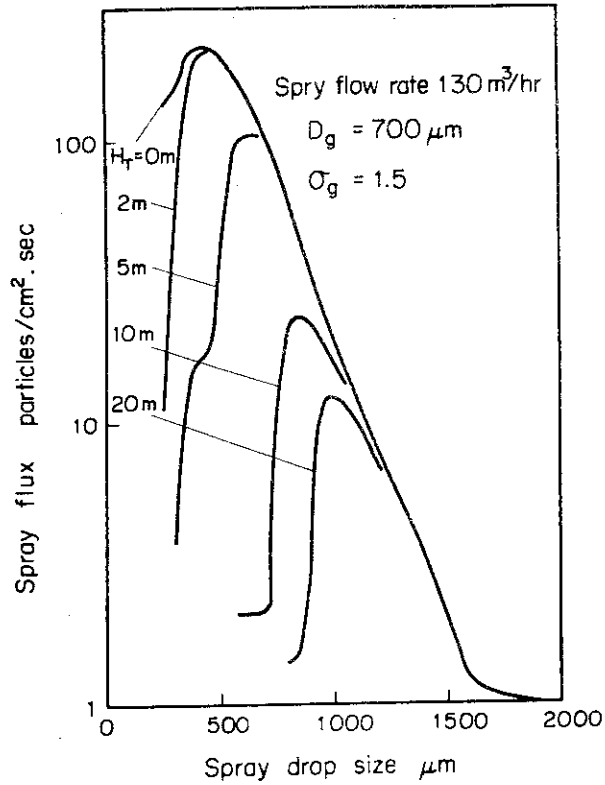


Fig.4.16 Spray flux distributions altered by gravitational coalescence with spray falling height

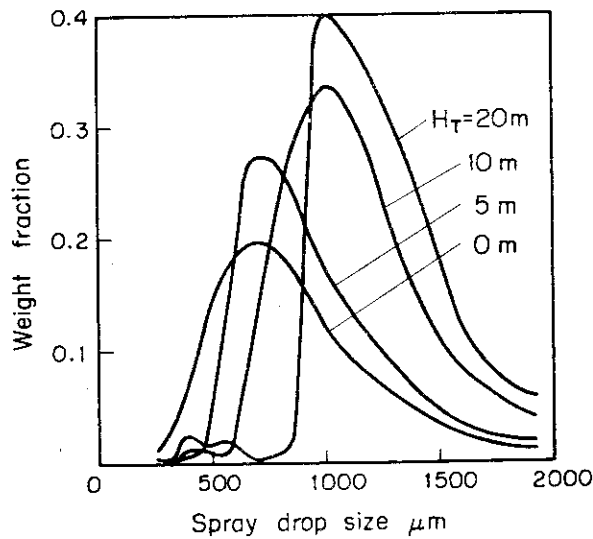


Fig.4.17 Variation of weight fractional distributions with spray falling height, under the condition of spray flow rate = 130 m<sup>3</sup>/hr, nozzle orifice dia. = 0.55 cm, nozzle included angle = 60°, number of nozzles = 105, radius of vessel = 3.5, spray droplet mean dia. = 700 μm and standard deviation = 1.5

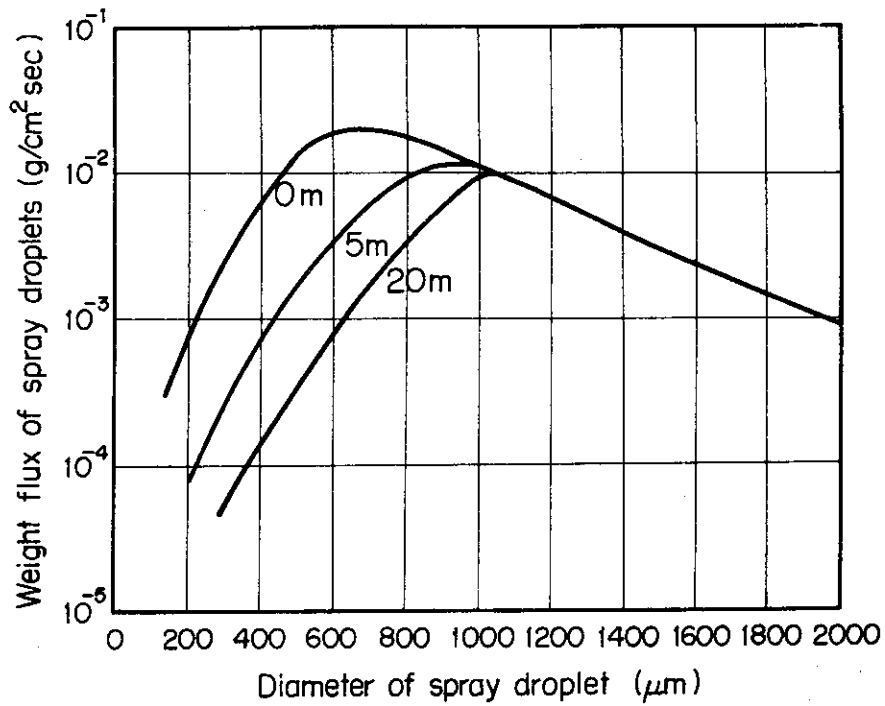


Fig.4.18 The distributions for weight flux of spray droplets with spray falling height, under the condition of figure 4.17

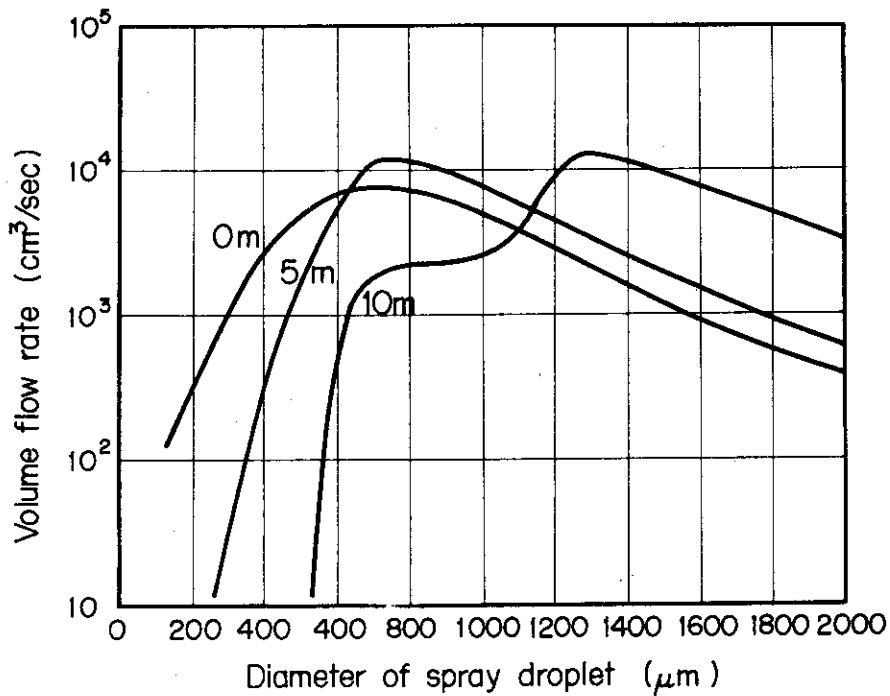


Fig.4.19 The profiles of liquid volume flow rate at the spray falling height with spray droplet diameter, under the condition of figure 4.17

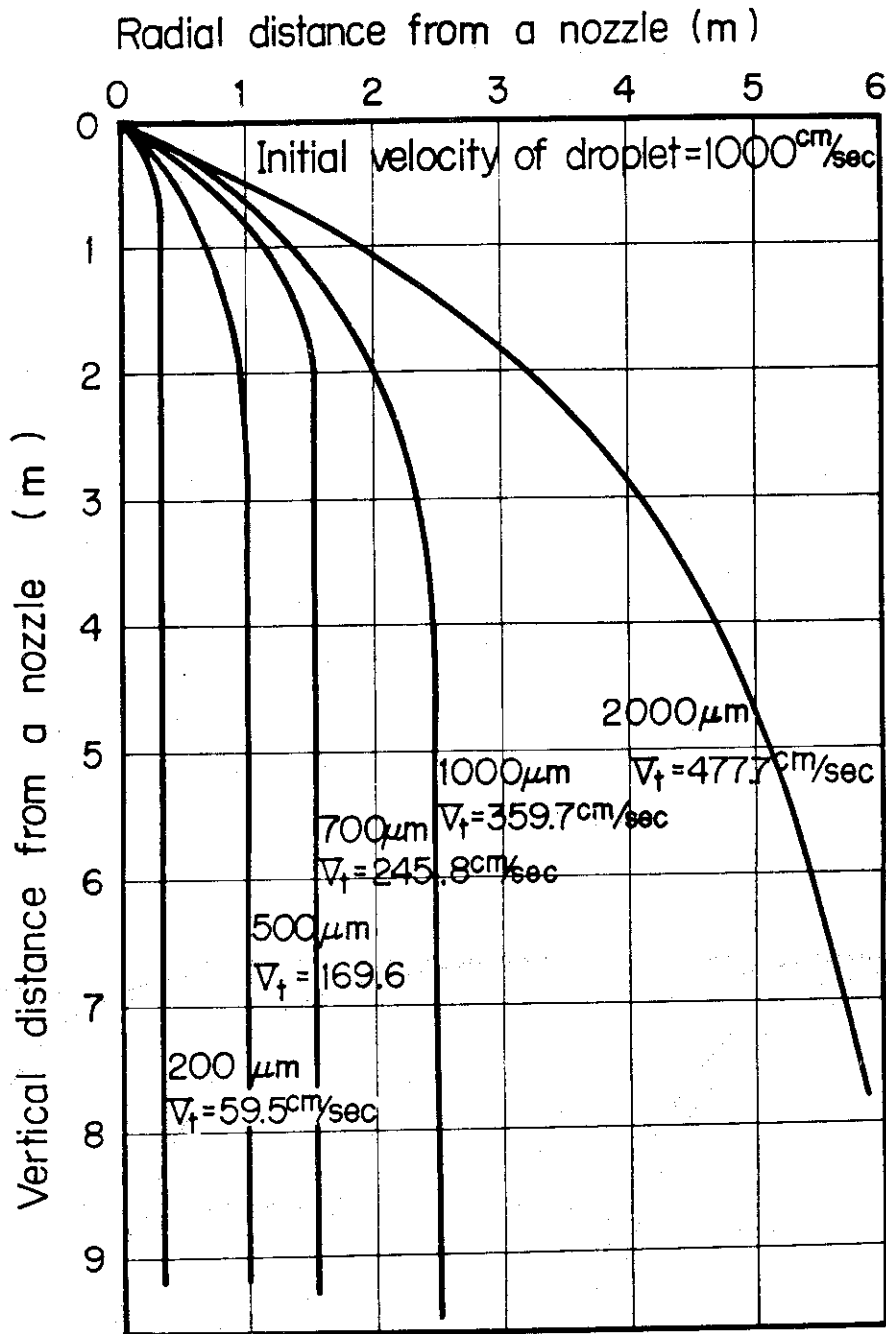


Fig.4.20 Trajectories of spray droplets from BWR full-cone type nozzle, ejected at a  $120^\circ$  included angle with initial velocity of droplet of 1000cm/sec

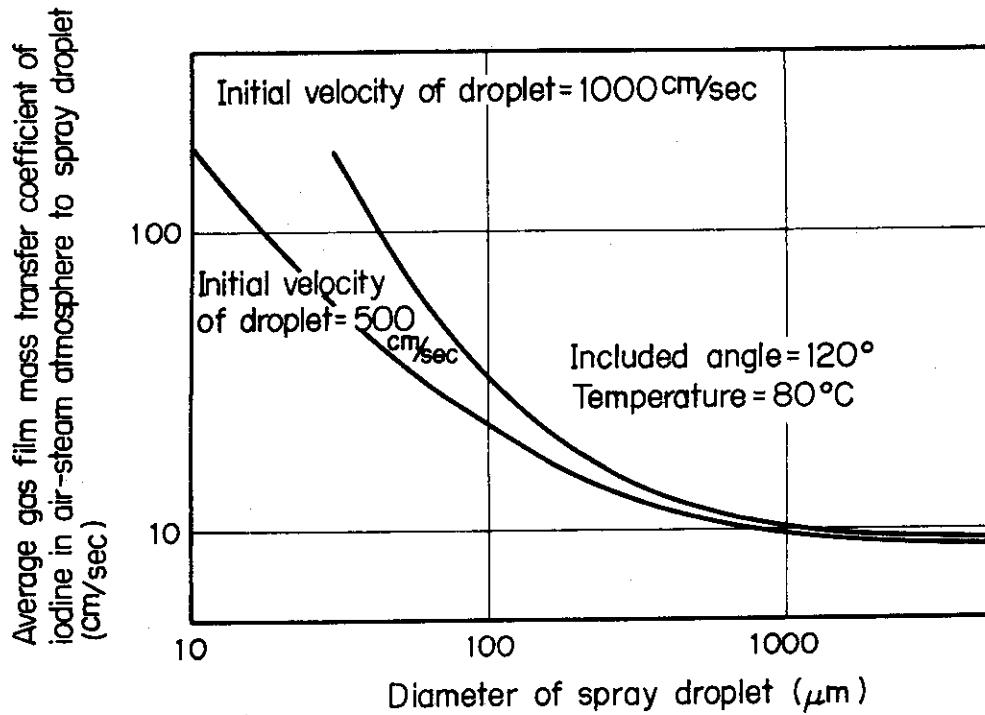


Fig.4.21 Average gas film mass transfer coefficients  $\bar{k}_g$  of iodine in air-steam atmosphere to spray droplets with its droplet diameter

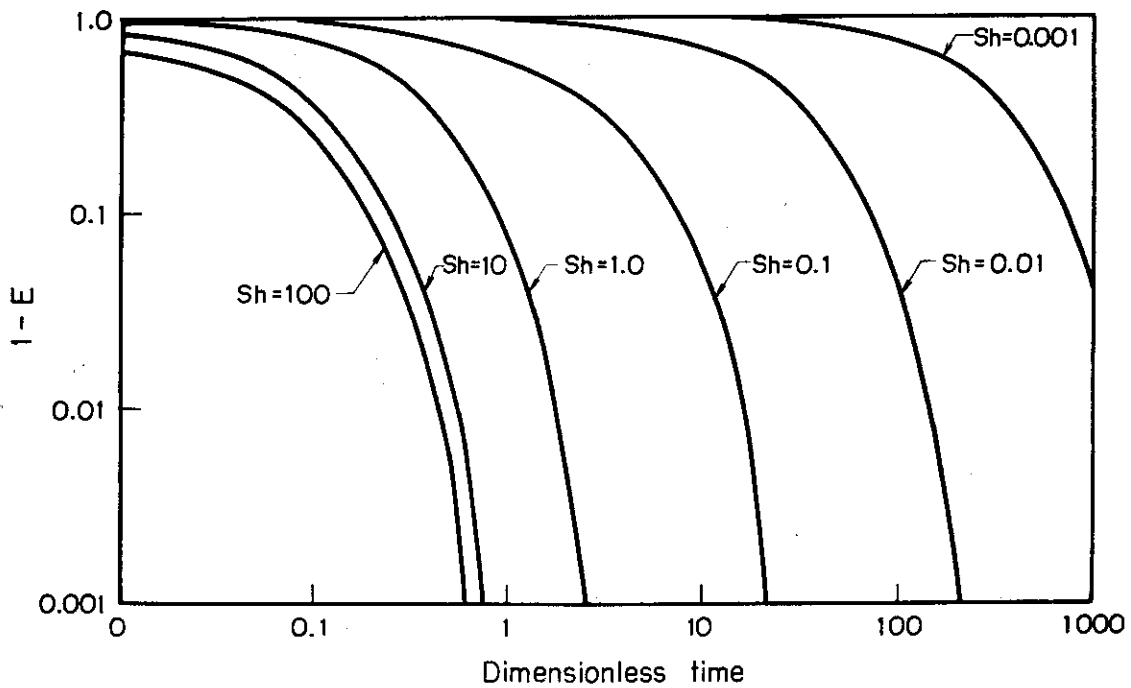


Fig.4.22 Fraction of unsaturation ( $1-E$ ) calculated with the rigid drop model



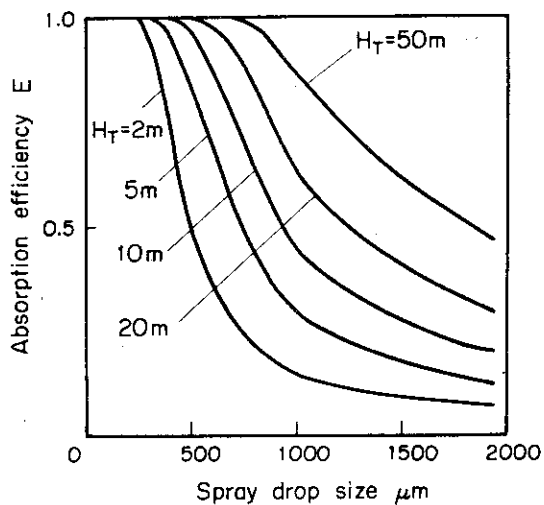


Fig.4.23 The absorption efficiency with spray falling height against spray droplet diameter, under the condition of gaseous iodine concentration of  $C_g=1 \times 10^{-6}(\text{g}/\text{cm}^3)$

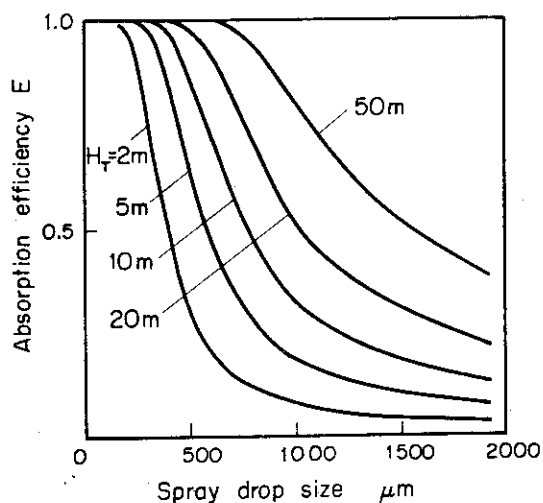


Fig.4.24 The absorption efficiency with spray falling height against spray droplet diameter, under the condition of gaseous iodine concentration of  $C_g=1 \times 10^{-9}(\text{g}/\text{cm}^3)$

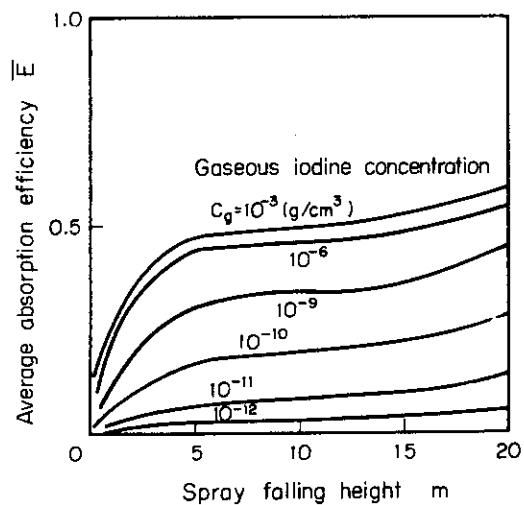


Fig.4.25 The average absorption efficiency changed by gaseous iodine concentration vs. spray falling height

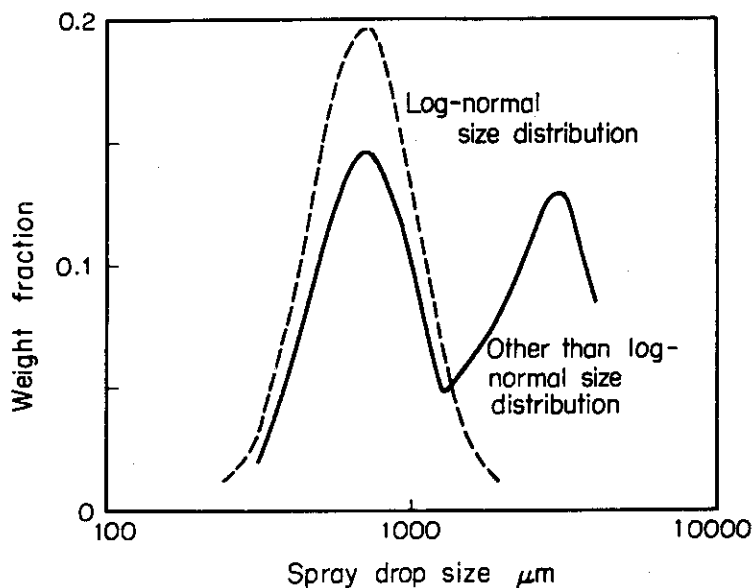


Fig.4.26 Size distributions of spray droplets for log-normal and other than log-normal.

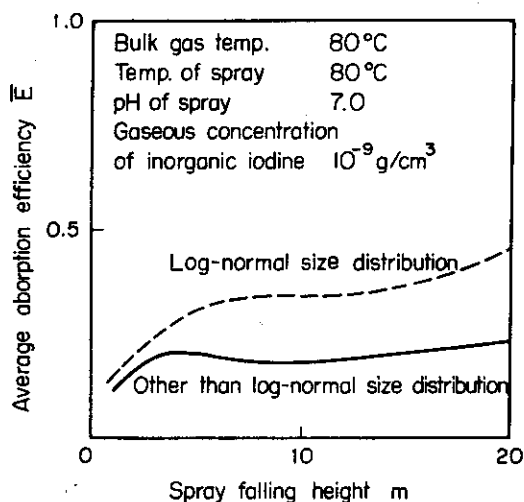


Fig.4.27 Average absorption efficiency vs. spray falling height in the case of log-normal and other than log-normal size distributions

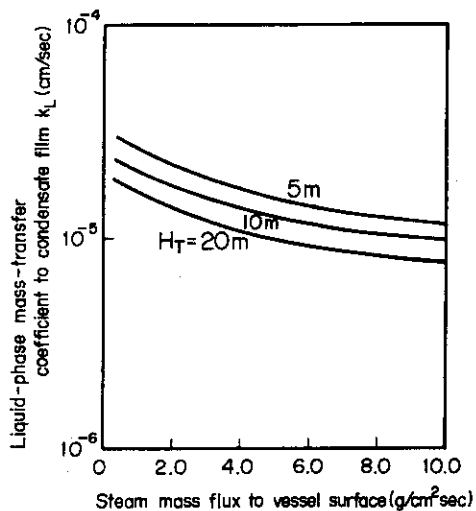


Fig.4.28 Liquid phase mass-transfer coefficient ( $k_L$ ) of inorganic iodine to condense film on vessel wall surface vs. steam mass flux ( $N_S$ ) to the wall surface

Table 4.3 Parameters of iodine deposition to containment wall

Paint class	Gas phase		Liquid phase	
	$k_o$ (cm/sec)	Q (cal/mol)	$k_o$ (cm/sec)	Q (cal/mol)
Acrylic	5.9	950	27	6800
Phenolic	1900	7600	$1.5 \times 10^6$	14000
Vinyl	0.096	4700	$1.0 \times 10^9$	20000
Epoxy	0.35	0	0.44	3200
Stainless steel (AISI 304)	0.08	0	0.00155	0

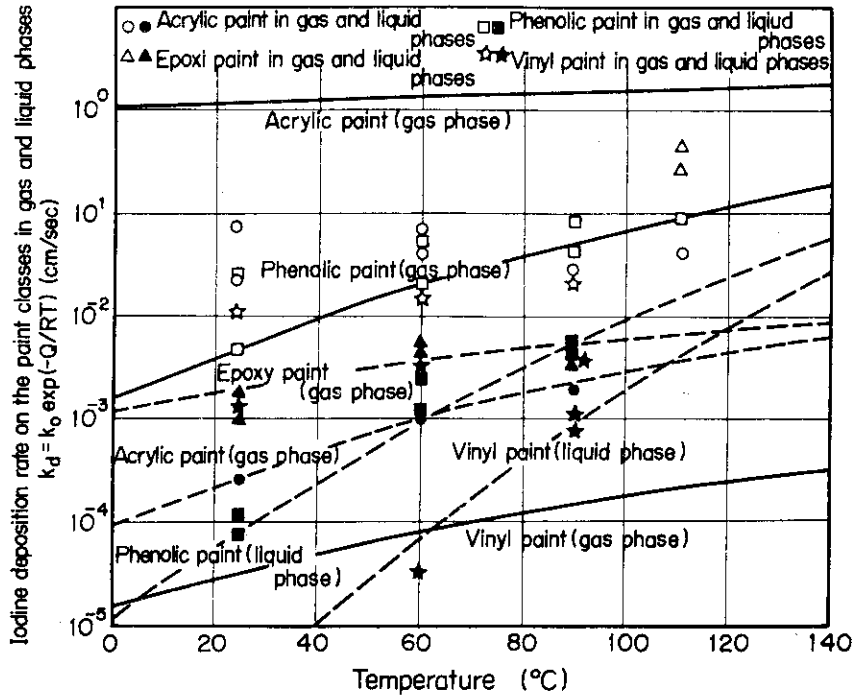


Fig.4.29 The deposition rate ( $k_d$ ) of inorganic iodine onto various painted walls in temperatures of air-steam and liquid phases

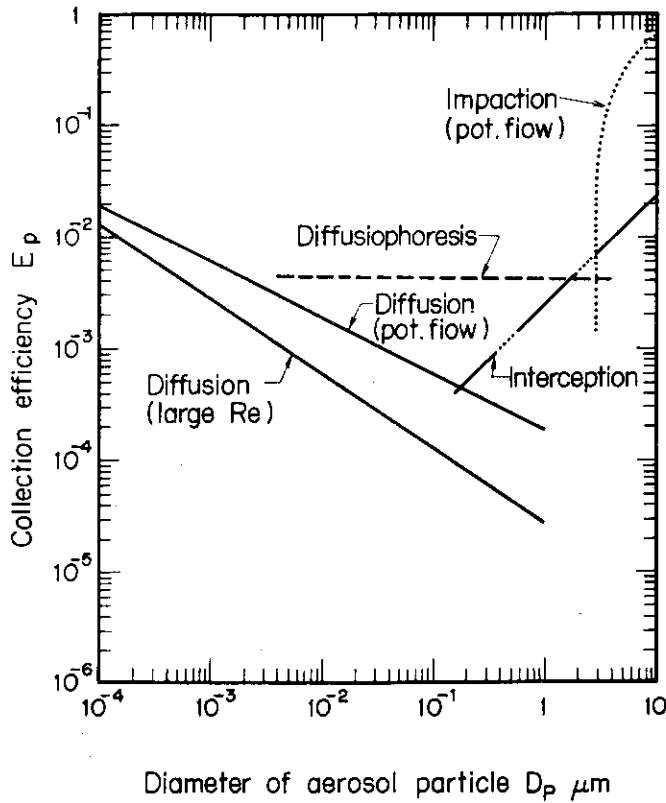


Fig.4.30 Collection efficiency ( $E_p$ ) of aerosol particles determined by  $1210\mu\text{m}$  spray droplets<sup>27)</sup>

## 5. 解析上の問題点

MIRA-PBコード作成時の前提となった仮定を備考と共にTable 5.1に示す。これらの仮定のうち、ヨウ素の水洗除去に影響を与える因子の一つは、格納容器内の気相および液相が事故の瞬間から完全に混合されているという前提がある。特に、格納容器内の気体の完全混合モデルの仮定は、ヨウ素の水洗除去効果を過大に見積る結果になる。即ち、PWRでは、スプレー空間である格納容器上部セグメント中のヨウ素は速く水洗されるが、非スプレー空間の下部セグメントに滞留しているヨウ素の減衰速度は極めて遅いと考えられる。また、BWRにおいても、格納容器内の上段配管の破断、下段スプレー系の単位作動の場合には、格納容器上部の非スプレー空間に存在するヨウ素の滞留が問題となる。したがって、いずれの型式の原子炉でも、格納容器内の気相ヨウ素の完全混合の仮定は、ヨウ素の除去速度を速く見積ることになり、環境への漏洩ヨウ素量の推算に対して過少評価を導いている。格納容器内の気体の混合の問題は、原研で実施する実証的試験を通して明らかになってくると思うが、MIRA-PBコードの作成にあたっては、参考にできるガス混合過程の実証的データが乏しく、補正あるいは改良できない因子の一つとなっている。

MIRA-PBでは、無機ヨウ素の気液分配係数の導出に対して、Parslyの分配係数プログラムをそのまま使用している。このプログラムは、Eggletonの理論から作られたもので、液相中の無機ヨウ素の加水分解を考慮している。先に述べたように、多くの純水系の無機ヨウ素の気液分配実験より得た分配係数の値は、この理論値と比較的よく一致している。なお、気液分配係数の導出にあたって、MIRA-PBでは遅い反応速度で生成する $\text{IO}_3^-$ イオンを無視している。そのため、得られた気液分配係数の値は、全体的に低い値となり控え目な結果を導いている。Eggletonの理論は、無機ヨウ素吸収薬液（例えば、アルカリ溶液）の効果を含めた気液分配の説明をしているとは考えられない。最近、江口、足立らは、アルカリ溶液中の無機ヨウ素の気液分配係数を実測し、その理論を報告している。<sup>17)24)</sup>

MIRAP/MIRABコードでは、無機ヨウ素が過飽和水蒸気の凝縮流と共に格納容器壁面に移動し沈着すると仮定されていた。この解析法は、水蒸気蒸溜の考え方に近い。しかし、1975年、Postomaらによって報告されたこの分野の最終論文では、水蒸気の移動に伴って動く無機ヨウ素の沈着は無視できるとされている。<sup>27)</sup>したがって、今回のMIRA-PBの作成では、水蒸気凝縮に伴う無機ヨウ素の沈着現象は無視することにした。MIRA-PBでは、各種の塗料およびステンレス鋼上の無機ヨウ素の沈着速度を温度の関数として記述した。この沈着データの多くは、Rosenbergの実験値を整理して得たものであり、その沈着速度は、無機ヨウ素濃度に関して非可逆一次反応としてあらわしている。<sup>35)</sup>したがって、スプレーの散布により気相中の無機ヨウ素が希薄になった場合、塗料面からの沈着ヨウ素の脱着あるいは、再揮発等の現象は考慮されていない。MIRAコードを使用したAroらの計算では、無機ヨウ素の壁面への沈着量が大きくなると指摘している。<sup>7)</sup>第2章で述べたように、安全評価では、燃料体から放出された無機ヨウ素は、その初期過程で50%が圧力容器内、格納容器

内壁、機壁等に付着すると仮定されている。この報告書の計算では、その沈着率の仮定をそのまま採用し、さらに、スプレイ散布時にも格納容器壁面に無機ヨウ素が沈着するとして計算した。したがって、前記のAroらの指摘は、計算に採用した無機ヨウ素放出過程のモデルの取り扱い方に起因しているものと考えられる。

軽水炉の格納容器内部は、その構造によりスプレイ空間が制限されている。PWRにおいては、主蒸気管の破断は、格納容器の非スプレイ空間（格納容器下部セグメント）で起ると考えられる。この場合、破断口から放出される放射性ヨウ素は、下部の各セグメント内の圧力差による対流によって上部格納容器のスプレイ空間まで移動すると考えられる。この場合、スプレイ液滴は、非スプレイ空間では濡れ壁流となって格納容器下部のサンプル室まで流れる。一方、BWRのドライウェルには、原子炉圧力容器、その遮蔽壁、配管群等の構造物に加えて2~7m間隔にグレーチングが張りめぐらされている。その結果、かなりのスプレイ液量がこれらの内部構造物に妨害されて濡れ壁液流となる。したがって、スプレイ散布領域の有効な高さは、かなり限定されると考えられる。MIRA-PBでは、これらの濡れ壁液流を考慮したモデルを付加し、濡れ壁上の液流に相当した液量だけスプレイ散布液量が減少するよう改良されている。このような考え方は、スプレイ流量を少なく見積ったことになり、安全評価に対して控え目な結果を得るモデルになっている。但し、格納容器内に散布されるスプレイ液滴の高さ方向の阻害あるいは破壊の効果は、前記のガス混合の問題と合せて将来改良されなければならない計算モデル上の問題点となっている。

第2章で述べたように、BWRのサプレッションチャンバ内にはスプレイ系が設置されており、その流量は、格納容器全体の流量の約5%である。MIRA-PBでは、同チャンバ内のスプレイ散布は考慮されておらず（式(3-21)~(3-23)参照）、気相ヨウ素の減衰は、スクラビング効果と漏洩にだけ起因しているとしたモデルである。したがって、同チャンバ内の気相ヨウ素濃度の減衰は比較的小さく、その濃度は短時間で一定となる。したがって、第6章で述べるヨウ素の気液濃度比は、平衡時の気液分配係数に比較して小さい値をとる（式(6-1)参照）。この部分についても、計算コード上の改良点となっている。

一般に、スプレイ散布時の液滴の分布は、対数正規であるといわれている。SPRACO社では、PWRプラントのHollow cone型スプレイノズルを用いて対数平均液滴直径 $D_g = 700 \mu\text{m}$ 、幾何標準偏差 $\sigma_g = 1.5$ の値を得ている。しかし、BWRプラントのFull cone型スプレイノズルの液滴分布の実測値は、未だ入手できない現状にあり、この値を実測する予定になっている。スプレイ液滴の衝突合体効果は、液滴へのヨウ素の吸収速度を減少させる。スプレイ液滴の衝突合体効果の解析は、Pasedagらによってすでに詳細に報告されている。<sup>42)</sup> 合体効果には、大小2個の液滴の自由落下速度差による追付き衝突合体と2個の異なった位置にある液滴の落下軌跡上の交点衝突合体(Interceptional coalescence)がある。MIRA-PBの中では、前者の追付き衝突合体のみをとりあげ、複雑な計算である交点衝突合体の効果は無視している。衝突合体効果がヨウ素の吸収除去に及ぶ影響は、先に述べた配管、グレーチング等による液滴破壊の効果ほど大きな因子になるとは考えられない。

ヨウ素の液滴吸収に及ぶ物質移動速度の推算は、多分散系液滴径分布を考慮し、個々の液滴内部の液混合は無視するといういわゆる剛体球吸収モデルを採用している。剛体球吸収モデ

ルから導出されるヨウ素の吸収速度は、液滴球内の完全混合モデルから導出される吸収速度より遅く、控え目なモデルである。MIRA-PBでは、剛体球吸収モデルから得られた解析解をTable化し、サブプログラムとして使用した。

最後に、放射性ヨウ素の環境放出量の推算に関しては、MIRA-PBでは、放射能の単位として記述してはならず、ヨウ素の累積重量による放出量で与えられている。環境被曝量の決定には、排気筒から放出される核分裂ヨウ素同位体の個々の生成分率とそれらの放出重量および放射能崩壊の情報が必要である。将来の計算コードの改良点としては、排気筒より放出される各ヨウ素同位体の放射線量を考慮して求め、環境被曝量が推算できるものにすることが必要である。

Table 5.1 計算上の問題となる仮定

M I R A - P B の 仮 定	問 題 点
(1) 格納容器中の放出ヨウ素は、気相、液相ともよく混合されている(完全混合モデル)。	内部構造物によるスプレイ散布の妨害、ガス混合の阻害を考慮すると格納容器の高さ方向のヨウ素濃度を求めることが必要である。
(2) Parslyの無機ヨウ素気液分配係数の計算コードを利用して、ヨウ素濃度、pH、温度の関数として、気相ヨウ素と液滴、あるいは、濡れ壁膜面間の分配係数を推算している。	ヨウ素の加水分解は考慮されているが、このモデルは、純水系の気液分配理論である。苛性ソーダ-ポロン液の場合には、江口、足立らの解法と比較する必要がある。
(3) ヨウ素の壁面沈着速度は、乾き壁、濡れ壁面で共に非可逆一次反応で進行すると仮定している。したがって、無機ヨウ素は壁面から脱着せず、蓄積するのみである。	現在の安全評価では、放出無機ヨウ素の50%が格納容器内に沈着すると仮定されている。M I R A - P Bの計算においては、初期放出の無機ヨウ素濃度の設定が重要である。
(4) 衝突合体したスプレイ液滴は、対数正規分布で妨害なしで格納容器内を自由落下する。	グレーチング、配管等の妨害効果で、液滴の流量およびその分布が大きく変化する可能性がある。
(5) M I R A P / M I R A Bに内蔵されている再循環スプレイ液と無機ヨウ素の気液分配係数の導出法に意味不明のところがある。	M I R A - P Bでは、再循環スプレイの分配係数は修正せずそのまま使用している。将来、修正の必要があるかもしれない。
(6) 格納容器から原子炉建家あるいはアニラスへの漏洩率は、M I R A - P Bでは一定としている。	将来、漏洩率を時間の関数とするよう改良する必要がある。
(7) M I R A - P Bでは、サブプレッションチャンバ内のスプレイ散布は考慮されていない。	サブプレッションチャンバ内のスプレイ流量は、ドライウェル95%に対して5%散布されている。



## 6. 軽水炉およびモデル格納容器についての計算

MIRA-PBコードによる計算の実例として、BWRのMark I型(780MWe級)およびMark II型(1100MWe級)の格納容器に近い値で、PWRのドライ型格納容器(826MWe級)に近い値で、またヨウ素除去実験結果との比較の一例として、BattelleのCSE実験Run 10<sup>11)</sup>、原研モデル格納容器によるBWRおよびPWR試験についての予備計算を実施した。

軽水炉の計算においては、次のような仮定を置く。

- 1) 事故時に燃料棒から放出されるヨウ素量は、全蓄積量の50%とする。
- 2) 燃料棒から放出されるヨウ素の95%は無機ヨウ素であり、残り5%は有機ヨウ素とする。(無機ヨウ素と有機ヨウ素の放出割合は、安全審査に使用される数値よりも、実際の状態に近いと思われる数値を使用する)。<sup>43)</sup> 無機ヨウ素が格納容器へ放出される間に、原子炉圧力容器および配管の壁面などに50%がプレートアウトする。従って、格納容器気相中に放出されるヨウ素量は、炉心の蓄積量の26.25%となり、放出ヨウ素の90%が無機ヨウ素であり、10%が有機ヨウ素となる。
- 3) 格納容器気相中の無機ヨウ素濃度は、格納容器壁へのヨウ素沈着、格納容器壁に生じる液膜のヨウ素吸収、スプレー液滴のヨウ素吸収および漏洩により低減される。
- 4) 格納容器気相へのヨウ素の放出は、LOCA直後から100秒間、一定割合で起こり、0~300秒間は、格納容器壁への水蒸気の凝縮が続く。BWRの場合は、0~200秒間、ベント管内にドライウェルとサブプレッションチェンバの圧力差に起因する気体の流れが起こる。
- 5) 格納容器から原子炉建家あるいはアニュラスへの漏洩率は、BWRの場合0.5%/日、PWRの場合0.3%/日とする。
- 6) 非常用ガス処理系による原子炉建家あるいはアニュラスの換気率は100%/日とし、非常用フィルタ系による無機ヨウ素および有機ヨウ素の除去効率は90%とする。PWRの場合は、さらに、アニュラス内空気の再循環によるヨウ素除去を考慮する。この空気循環流量は10200m<sup>3</sup>/hrとする。

ここで記述した計算上の仮定では、無機ヨウ素は、格納容器に放出される以前に放出量の50%が圧力容器や配管に沈着し、さらに格納容器壁に一次反応で付着するとしている。現在のところ、ヨウ素の放出量に関する実証的データは乏しく、また、格納容器の壁面に無機ヨウ素がある速度で付着してゆくことも事実なので、この計算では上記の仮定を採用した。したがって、この章で実施する計算結果は、無機ヨウ素の沈着量が現行の安全審査指針のそれに比較して過大に評価されている。

Table 6.1には、計算に用いたインプットデータの概要を示す。図6.1~図6.6には、Mark Iについて、図6.7~6.12には、Mark IIについて、図6.13~図6.18にはPWR、図6.19にはCSE実験、図6.20~図6.27には原研モデル格納容器についての計算結果を

示す。

図 6.1 は、Mark I の仮想事故におけるドライウエル気相、サプレッションチェンバ気相、ドライウエルプールおよびサプレッションプール中の無機ヨウ素の濃度の変化を LOCA 後から 7200 秒後まで示す。ドライウエル気相濃度は 0~100 秒の間、ヨウ素がドライウエル中に放出されることにより上昇する。100~600 秒間には、ドライウエル気相濃度は容器壁への自然沈着によりわずかに低下し、600 秒から格納容器スプレーが開始され、急激に下がる。約 1600 秒後には、スプレー液滴により気相中から水洗されるヨウ素量と、スプレー液滴から気相中に再放出するヨウ素量とが平衡し一定となる。

0~200 秒間、ドライウエルからサプレッションチェンバ内に、水蒸気および空気と共にヨウ素が流入する。そのため、サプレッションチェンバの気相濃度は上昇し、その後、一定となる。ドライウエルプール濃度は、0~300 秒の間は一定となり、600~900 秒の間、格納容器スプレーの開始に伴ない一時的に濃度が上がるが、その後、濃度は下がり、約 2000 秒以後はほぼ一定濃度になる。サプレッションプール液相濃度は、0~600 秒間では、ドライウエルプールと同様な濃度経過をたどり、スプレー開始後上昇し、約 2000 秒以後は、ほぼ一定濃度になる。

図 6.2 は、Mark I の仮想事故における気液ヨウ素濃度比の変化を示す。気液濃度比は格納容器液相と気相中への無機ヨウ素の分配を示し、次式により定義される。<sup>\*1</sup>

$$\text{気液濃度比} = \frac{(C_{L1} V_{L1} + C_{L2} V_{L2}) / (V_{L1} + V_{L2})}{(C_{g1} V_1 + C_{g2} V_2) / (V_1 + V_2)} \quad (6-1)$$

ここで、 $g_1$ 、 $g_2$ 、 $C_{L1}$  および  $C_{L2}$  はそれぞれドライウエル気相、サプレッションチェンバ気相、ドライウエルプールおよびサプレッションプール中の無機ヨウ素濃度を、 $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_{L1}$  および  $V_{L2}$  はそれぞれドライウエル気相、サプレッションチェンバ気相、ドライウエルプールおよびサプレッションプールの体積を表わす。気液濃度比はスプレー開始後急激に大きくなり、LOCA 後 1800 秒で一定値 480 になる。<sup>\*2</sup>

図 6.3 は、Mark I の仮想事故における格納容器システム各部に分布するヨウ素量（無機ヨウ素量 + 有機ヨウ素量）の全放出ヨウ素量に対する割合を、LOCA 後 33 日まで示す。サプレッションチェンバ気相中のヨウ素量、原子炉建家中のヨウ素量、ドライウエル液膜のヨウ素量、排気フィルタ中のヨウ素量、環境への放出ヨウ素量は 1% 以下であり、同図中には示されていない。スプレー開始により気相中のヨウ素が激減し、逆に、サプレッションプール中のヨウ素が急増する。この計算では、ドライウエル壁に沈着する無機ヨウ素は全ヨウ素量の 16.5% である。

図 6.4 は、Mark I の仮想事故において格納容器システムから環境に放出されたヨウ素量を

\*1 ここでいう気液濃度比とは、過渡的な値で気液分配係数ではない。しかし、時間の経過と共に  $C_{g1} = C_{g2}$ 、 $C_{L1} = C_{L2}$  となれば、その値は気液分配係数の値に近づく。

\*2 MIRA-PB では、サプレッションチェンバ内のスプレー散布は考慮されておらず  $C_{g1} \approx C_{g2}$  である。したがって、この値は、気液分配係数と比較して小さな値を導いている。

示す。33日後における放出ヨウ素量は2.7 gとなる。

図6.5は、Mark Iの重大事故におけるドライウエル気相、ドライウエルプール、サプレッションチェンバ気相およびサプレッションプール中の無機ヨウ素の濃度変化を示す。それぞれの濃度変化の傾向は、仮想事故と同様であるが、仮想事故の場合に比較し、スプレイにより格納容器内の無機ヨウ素が急激に水洗されている。図6.6は、Mark Iの重大事故における気液濃度比を示す。気液濃度比は、スプレイが始まると急激に大きくなり、約800秒以後はほぼ一定値2140になる。<sup>\*2</sup>

図6.7は、Mark IIの仮想事故におけるドライウエル気相、サプレッションチェンバ気相、ドライウエルプールおよびサプレッションプール中の無機ヨウ素の濃度変化を示す。それぞれの濃度変化は、Mark Iの仮想事故における濃度変化と同様な傾向を示すが、スプレイ開始後の変化は、Mark Iの場合に比べMark IIの方が緩慢である。2700秒以降、各部の濃度はほぼ一定となっている。図6.8は、Mark IIの仮想事故における気液濃度比の変化を示す。気液濃度比は、2700秒以降一定値294になる。<sup>\*2</sup>

図6.9は、Mark IIの仮想事故におけるヨウ素量分布率を示す。Mark Iの仮想事故の場合と同様に、サプレッションチェンバ気相、原子炉建家、ドライウエル液膜および排気フィルタ中のヨウ素量、環境への放出ヨウ素量は、1%以下である。ドライウエル壁に沈着する無機ヨウ素量は、全ヨウ素量の37%に達する。図6.10は、Mark IIの仮想事故における環境への放出ヨウ素量を示す。33日後の放出ヨウ素量は3.9 gになる。

図6.11および図6.12は、それぞれMark IIの重大事故における無機ヨウ素の濃度変化および気液濃度比を示す。ドライウエル気相、サプレッションチェンバ気相、ドライウエルプールおよびサプレッションプール中の無機ヨウ素濃度は、Mark Iの重大事故と同様な変化をする。気液濃度比はLOCA後1000秒で一定値1530になる。<sup>\*2</sup>

図6.13は、PWR、826MWe級プラントの仮想事故における格納容器気相およびサンプル水の濃度変化を示す。35～2400秒の間は、初期スプレイ領域であり、気相濃度は、スプレイ開始と同時に急激に低下し、その濃度は $10^{-12} \text{ g/cm}^3$ 以下になる。2400秒以降は、再循環スプレイ領域になり、スプレイ液滴からのヨウ素の再放出により気相濃度は再び上昇し、約3200秒で一定値 $1.7 \times 10^{-11} \text{ g/cm}^3$ になる。

図6.14は、PWR・826MWe級プラントの仮想事故における気液濃度比の変化を示す。気液濃度比は、BWRの場合と同様に、液相と気相との無機ヨウ素濃度比を表わし、次式で定義する。

$$\text{気液濃度比} = \frac{C_{L1}}{C_{G1}} \quad (6-2)$$

ここで、 $C_{L1}$  はサンプル水中の無機ヨウ素濃度、 $C_{G1}$  は格納容器気相中の無機ヨウ素濃度を表わす。

初期スプレイ領域(35～2400秒)では、気液濃度比は急激に大きくなり $10^6$ 以上になる。2400秒以降、再循環スプレイ領域に入ると、気液濃度比は降下し、3200秒以降一定値 $1.5 \times 10^5$ となる。

図6.15は、PWR・826MWe級プラントの仮想事故におけるヨウ素量分布率を示す。

サンプル水中のヨウ素量は，LOCA後約600秒でほぼ一定になり，そのヨウ素量の全放出ヨウ素量に対する割合は約86%である。BWRのサプレッションチェンバ中のヨウ素量の割合は，最大でMark Iの場合に76%，Mark IIの場合に54%であり，PWRプラントのサンプル水中のヨウ素量の割合は，それらに比較して大きな値となる。PWRの格納容器壁への無機ヨウ素沈着量の割合は，Mark I，Mark IIの場合のヨウ素沈着割合に比較して著しく低い。これは，スプレイ開始時期の違いによるものである。PWRの場合，スプレイ開始はLOCA後35秒であり，容器壁へのヨウ素の沈着量が増大しないうちにスプレイが始まる。その結果気相濃度が下がり，容器壁へのヨウ素沈着速度は減少する。一方，BWRの場合，スプレイ開始は600秒後であり，スプレイが始まる以前に相当量の無機ヨウ素がドライウエル壁に沈着する。

図6.16は，PWRの仮想事故における環境へのヨウ素放出量を示す。33日後におけるヨウ素放出量は0.3gである。

図6.17は，PWR・826MWe級プラントの重大事故における格納容器気相およびサンプル水の濃度変化を示す。仮想事故の場合と比べ，濃度の絶対値は2ケタ低いが，その傾向は同様である。図6.18は，PWR・826MWe級プラントの重大事故における気液濃度比を示す。仮想事故の場合と同様，初期スプレイ領域では，気液濃度比は急激に大きくなり，その値は $10^8$ 以上になる。再循環スプレイ領域の濃度比は， $7.6 \times 10^6$ でほぼ一定となる。

図6.19は，BattelleのCSE実験，Run A-10における実験結果と，計算コード(MIRA-PB)における計算結果を，無機ヨウ素および有機ヨウ素の濃度変化について比較した。無機ヨウ素濃度は，初期スプレイ領域および再循環スプレイ領域とも，実験結果と計算結果とはかなり違っており，この問題は，今後十分検討すべき課題である。有機ヨウ素濃度の低減率は，計算結果の方が小さく，有機ヨウ素の除去に関して，MIRA-PBコードは控え目な結果を与える。

図6.20に，計画している原研モデル格納容器のBWR模擬実験の仮想事故条件におけるドライウエル気相，ドライウエルプールおよびサプレッションプール中の無機ヨウ素濃度の変化を示す。なお，原研モデル格納容器には，サプレッションチェンバ気相部はない。Mark IIの場合(図6.7)に比べ，スプレイ開始までの0～1200秒(Mark IIでは0～600秒)間気相および液相とも，その濃度変化の傾向は異なる。これは，原研モデル格納容器では，水蒸気の凝縮およびサプレッションチェンバ気相がないことに起因する。スプレイ開始直後のドライウエルプールの濃度変化は，Mark IIの場合にはピーク値が出来るが，原研モデル格納容器では濃度変化にピークはでない。これは，原研モデル格納容器のドライウエルプールの体積が相対的に大きいためである。スプレイ開始後の気相および液相の濃度変化は，比較的Mark IIの場合とよく似ている。

図6.21は，原研モデル格納容器のBWR模擬実験の仮想事故条件における気液濃度比を示す。7200秒以後には，気液濃度比は460でほぼ一定値となる。<sup>\*3</sup>

\*3 原研モデル格納容器には，サプレッションチェンバは設置されていない。したがって，一定値となった気液濃度比は，平衡時の気液分配係数に一致する。

図 6.2.2 および図 6.2.3 は、それぞれ原研モデル格納容器の BWR 模擬実験の重大事故条件における無機ヨウ素濃度および気液濃度比を示す。<sup>\*3</sup> ドライウェル気相濃度はスプレイ開始後急激に低下し、LOCA 模擬後 1600 秒に最低濃度  $1.0 \times 10^{-13} \text{ g/cm}^3$  となる。その後、濃度は再び上がり、約  $1.5 \times 10^{-12} \text{ g/cm}^3$  で一定となる。この最低濃度値の落ち込みは、Mark II の場合（図 6.1.1）にわずかであるのに比べ極めて特徴的である。

図 6.2.4 は、原研モデル格納容器の PWR 模擬実験の仮想事故について、格納容器気相およびサンプル水の無機ヨウ素濃度変化を示す。1200~3600 秒の間は初期スプレイ領域であり、PWR プラントの場合と同様、格納容器気相の濃度は急激に低下し、 $1.0 \times 10^{-12}$  以下になる。その後、再循環スプレイ領域になると、再び気相濃度は上昇し、7200 秒後では  $1.3 \times 10^{-11} \text{ g/cm}^3$  になる。原研モデル格納容器では、スプレイ開始後気相濃度が  $1.0 \times 10^{-12} \text{ g/cm}^3$  になるまでに要する時間は約 600 秒であり、それに対して、PWR（図 6.1.3）では約 1000 秒である。原研モデル格納容器における PWR 模擬実験では、スプレイ流量と気相体積の比は  $0.04 \text{ m}^3/\text{hr}/\text{m}^3$  であり、PWR のその値は  $0.012 \text{ m}^3/\text{hr}/\text{m}^3$  と小さい。そのため、相対的に原研モデル格納容器の方が、スプレイによる水洗効果が大きくなる。

図 6.2.5 は、原研モデル格納容器の PWR 模擬実験の仮想事故についての気液濃度比の変化を示す。PWR の場合と同様、気液濃度比は、初期スプレイが始まると急激に増加し、再循環スプレイが始まると低下し、LOCA 模擬後、7200 秒で  $6.9 \times 10^4$  になる。図 6.2.6 および 6.2.7 は、それぞれ原研モデル格納容器における PWR 模擬実験の重大事故についての、無機ヨウ素濃度変化および気液濃度比の変化を示す。

Table 6.1 Input Data

Items	Mark I (784MWe)	Mark II (1100MWe)	PWR (826MWe)	Battelle CSE A-10	原研モデル C/V	
					BWR	PWR
ドライウエルあるいは格納容器気相体積・m <sup>3</sup>	4240	5700	69500	750	622	702
サブプレッションチャンバ気相体積・m <sup>3</sup>	3160	4100	—	—	0	—
原子炉建家あるいはアニュラスの体積・m <sup>3</sup>	29600	25600	21740	—	2880	2880
ドライウエル液相体積あるいは格納容器サブ体積m <sup>3</sup>	58.5	108	560~1060	0~7.8	80	6.2~18.6
サブプレッションプール体積・m <sup>3</sup>	3680	4260	—	—	80	—
液相の pH	7.0	7.0	9.5	9.4	7.0	9.5
容器の Leak Rate v/o day	0.5	0.5	0.3	0.3	0.1	0.1
原子炉建家あるいはアニュラスの換気率 v/o day	100	100	100	—	100	100
Filter 効率 %	90	90	90	—	90	90
ヨウ素放出量 g	3120*1	4320*1	3200*1	108	286*1	34*1
ヨウ素放出 Time, sec	0~100	0~100	0~25	0~600	0~600*2	0~600*2
無機ヨウ素の放出割合	0.9	0.9	0.9	0.906	0.99	0.99
有機 "	0.1	0.1	0.1	0.011	0.01	0.01
エアロゾル "	0	0	0	0.083	0	0
Spray 液の Flow Rate m <sup>3</sup> /hr	1660	1810	846	1.1	130	28
格納容器壁への流量, "	0	0	0	0	1.3	0
Spray Starting Time, sec	600	600	35	10	1200	1200
Fresh Spray Time, min	—	—	0~40	0~40	—	0~40
気相温度, 容器壁温度および液相温度 °C	変化	変化	変化	変化	80	変化
水蒸気の凝縮	0~300sec間あり	0~300sec間あり	0~300sec間あり	0~300sec間あり	なし	なし
ドライウエルからサブプレッションチャンバへの気体の流れ	0~200sec間あり	0~200sec間あり	—	—	なし	—

\*1 仮想事故時に対する値, 重大事故は仮想事故の1/50。

\*2 重大事故時は0~200 sec

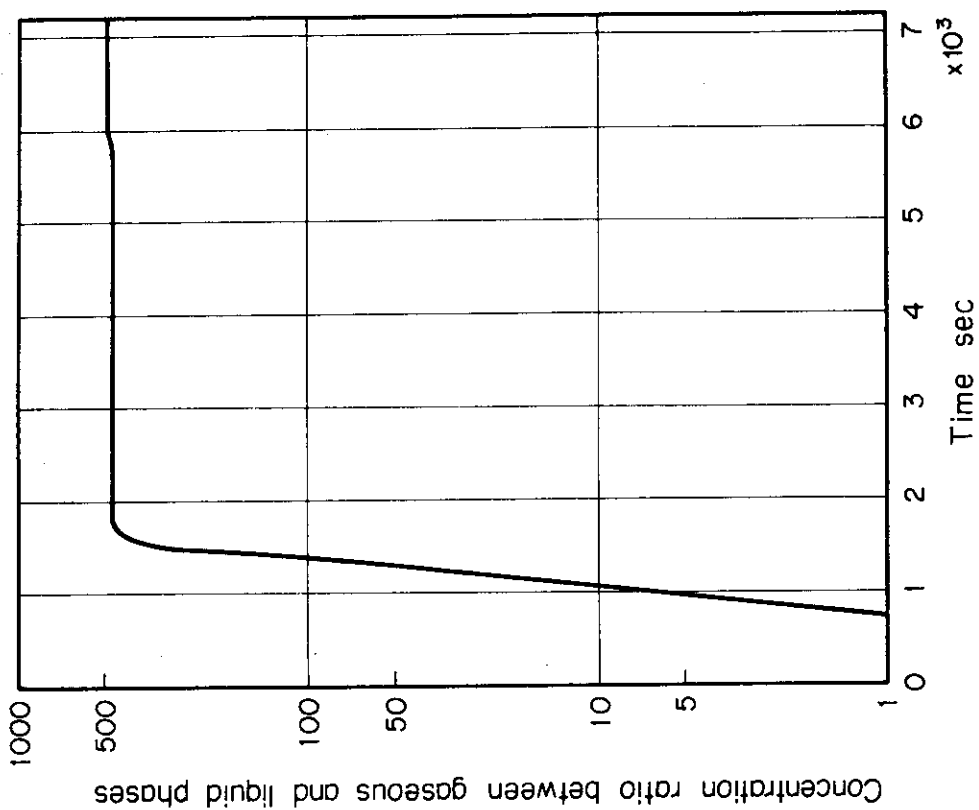


Fig. 6.2 Time dependence of inorganic-iodine concentration ratio between liquid and gaseous phases, calculated from concentration profiles in Fig. 6.1

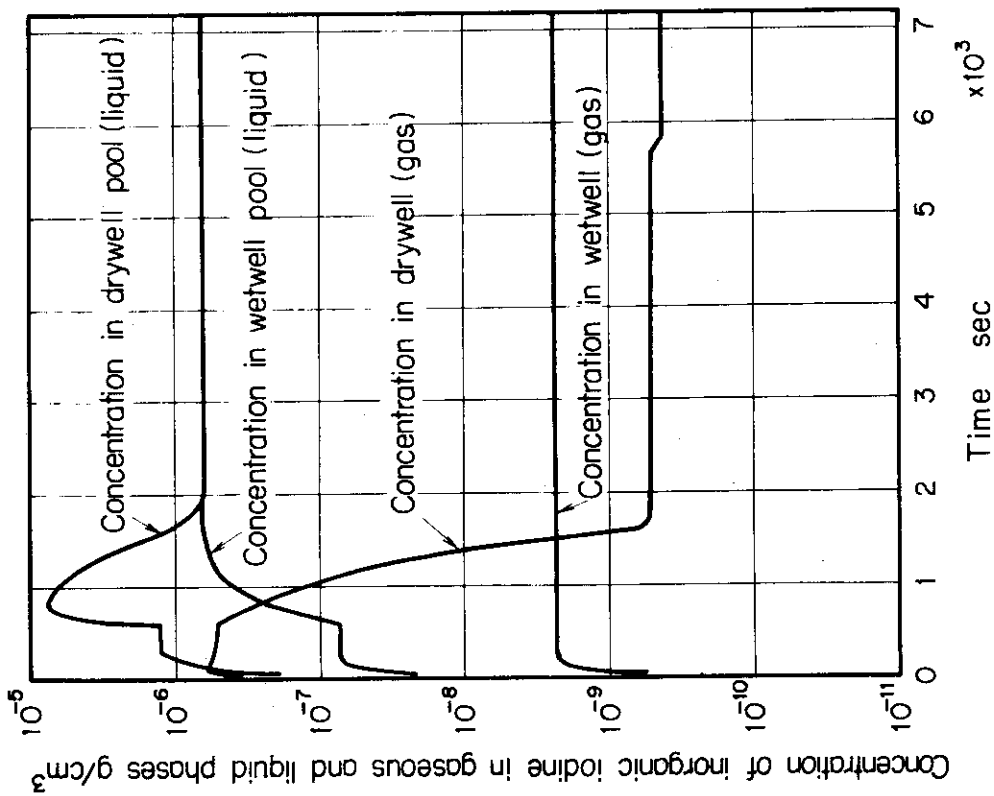


Fig. 6.1 Concentration profiles of inorganic iodine with time in drywell, drywell pool, wetwell, and wetwell pool, simulated to the hypothetical accident of BWR (Mark I)

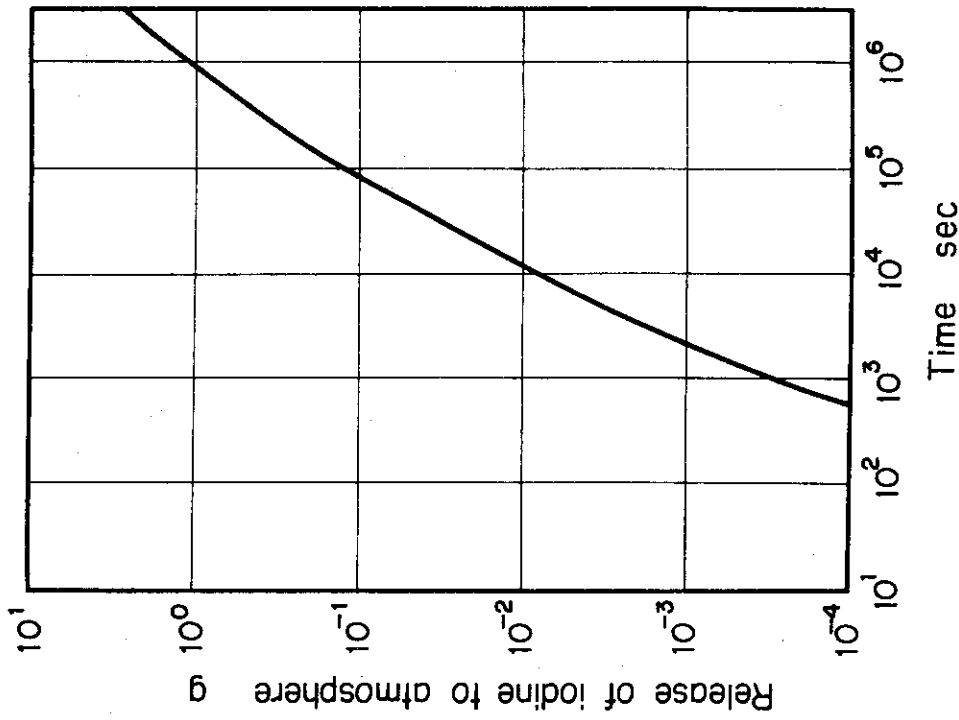


Fig.6.4 Amount of total iodine release from the reactor building to atmosphere in the event of hypothetical accident of BWR (Mark I)

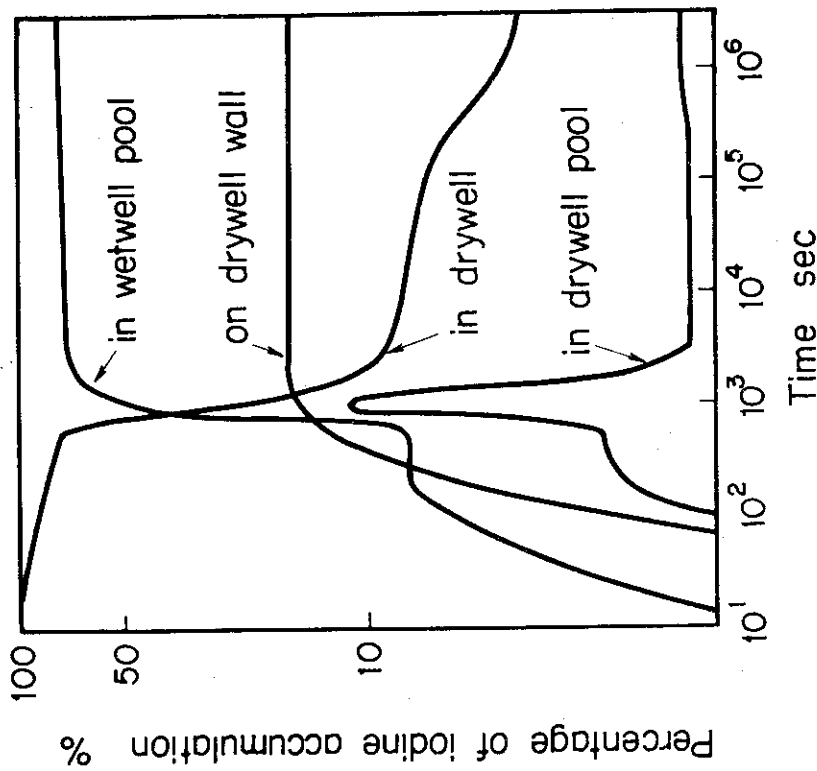


Fig. 6.3 Percentage of iodine distributed vs. lapse of time, accumulated in drywell, drywell pool, drywell wall, and wetwell pool in the event of hypothetical accident of BWR (Mark I)



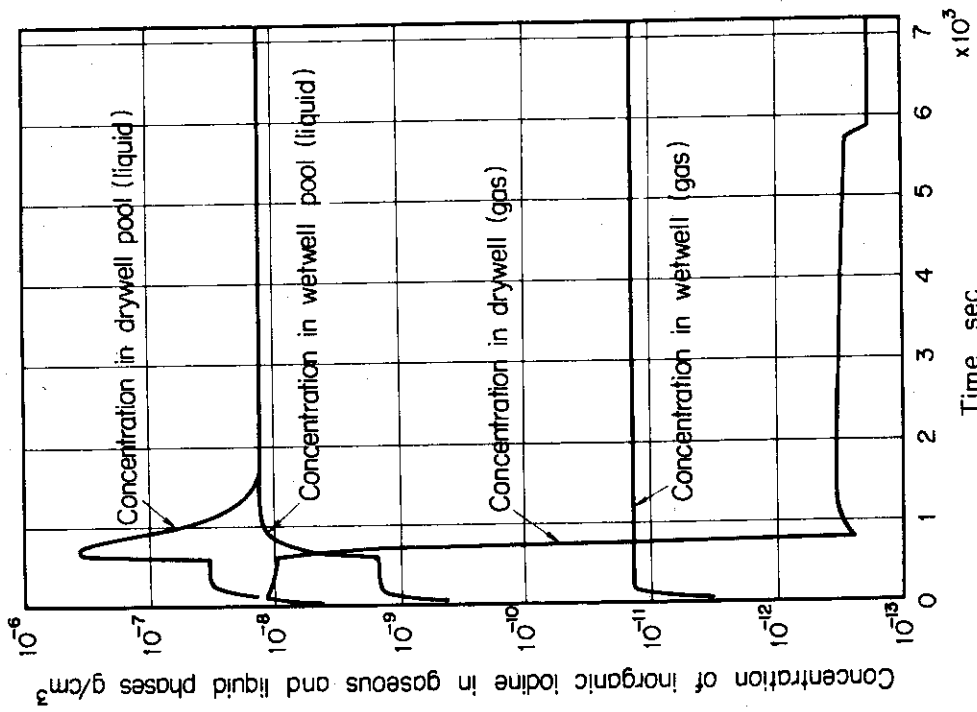


Fig. 6.5 Concentration profiles of inorganic iodine with time in drywell, drywell pool, wetwell, and wetwell pool, simulated to the major accident of BWR (Mark I)

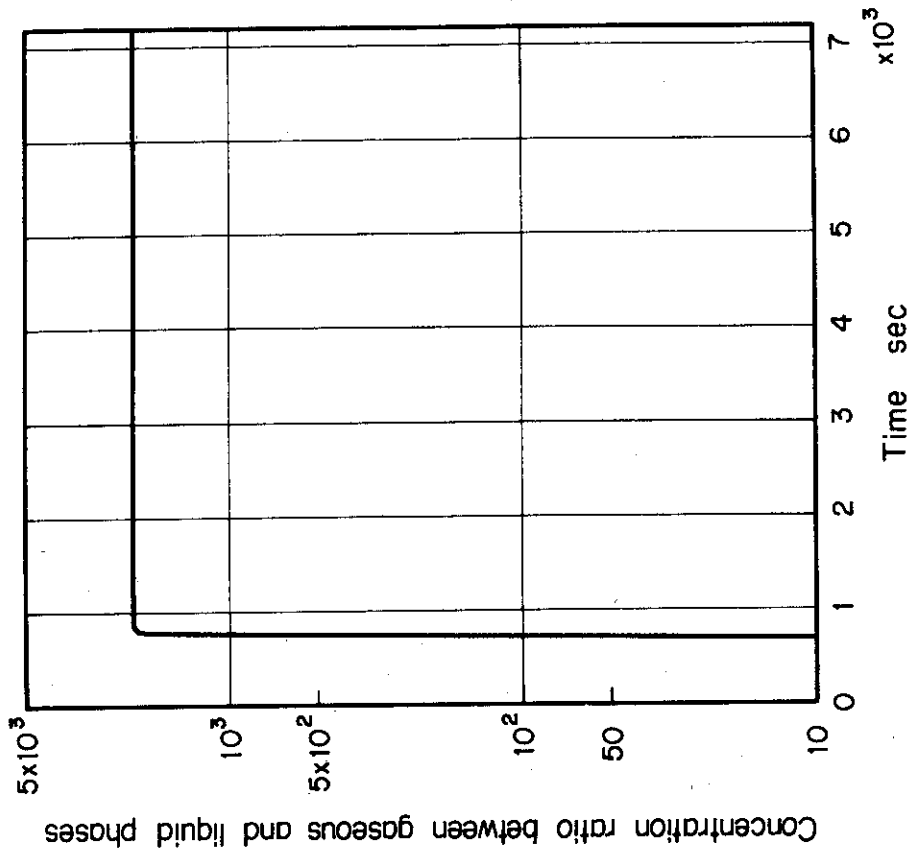


Fig. 6.6 Time dependence of inorganic-iodine concentration ratio between liquid and gaseous phases, calculated from concentration profiles in Fig. 6.5

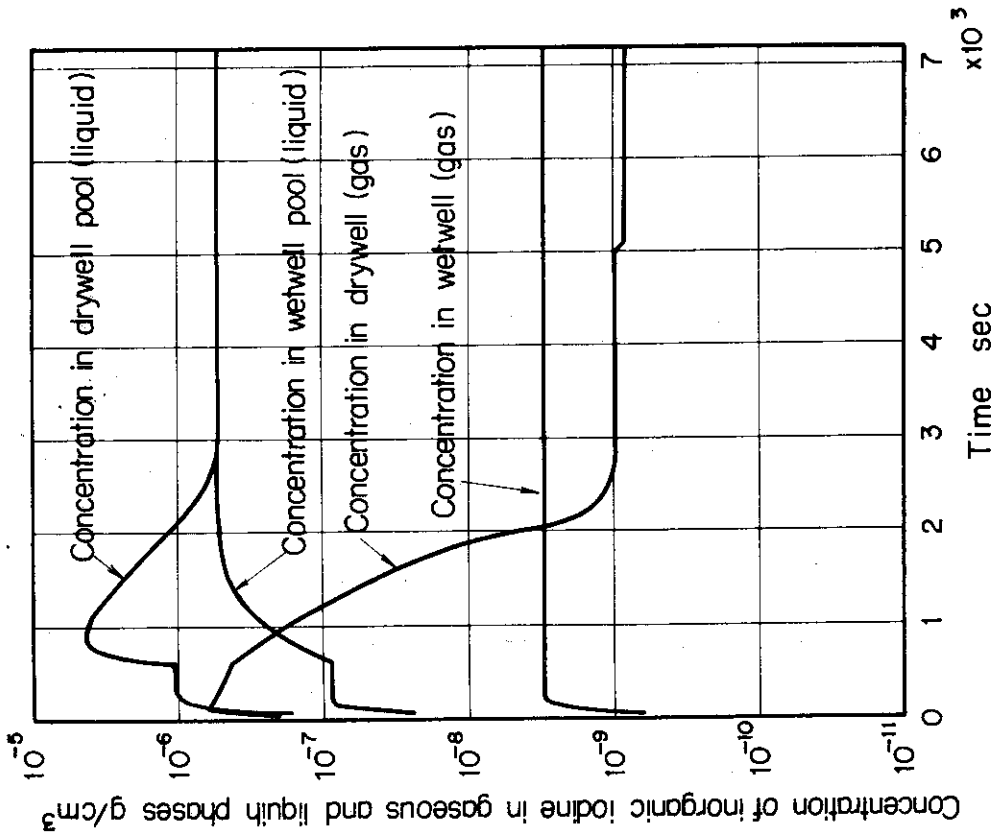


Fig. 6.7 Concentration profiles of inorganic iodine with time in drywell, drywell pool, wetwell, and wetwell pool, simulated to the hypothetical accident of BWR (Mark II)

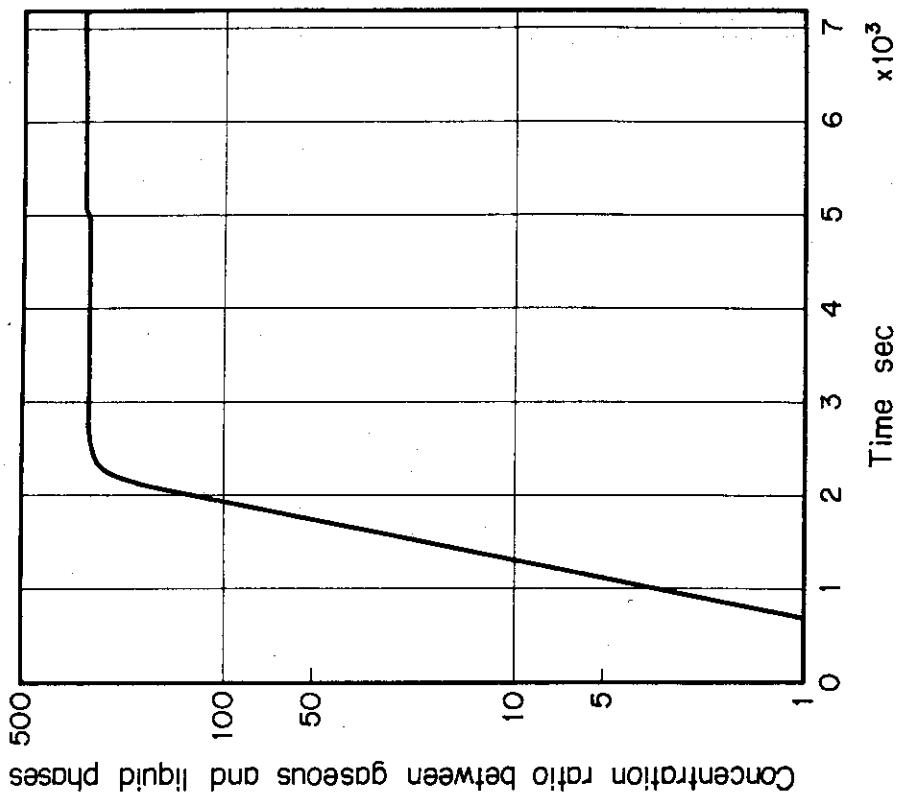


Fig. 6.8 Time dependence of inorganic-iodine concentration ratio between liquid and gaseous phases, calculated from concentration profiles in Fig. 6.7

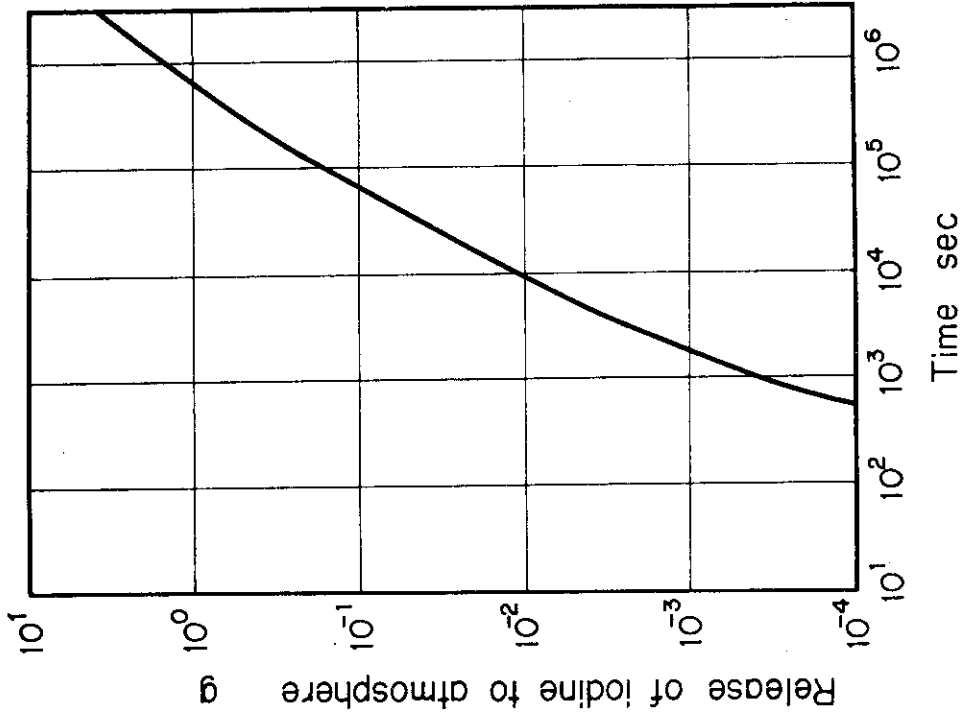


Fig. 6.10 Amount of total iodine release from the reactor building to atmosphere in the event of hypothetical accident of BWR (Mark II)

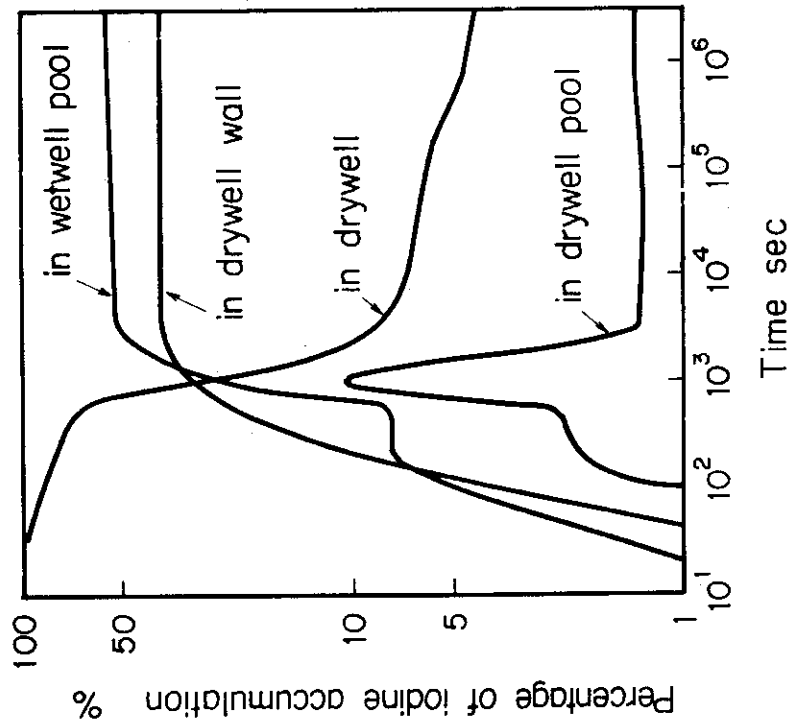


Fig. 6.9 Percentage of iodine distributed vs. lapse of time, accumulated in drywell, drywell pool, drywell wall and wetwell pool in the event of hypothetical accident of BWR (Mark II)

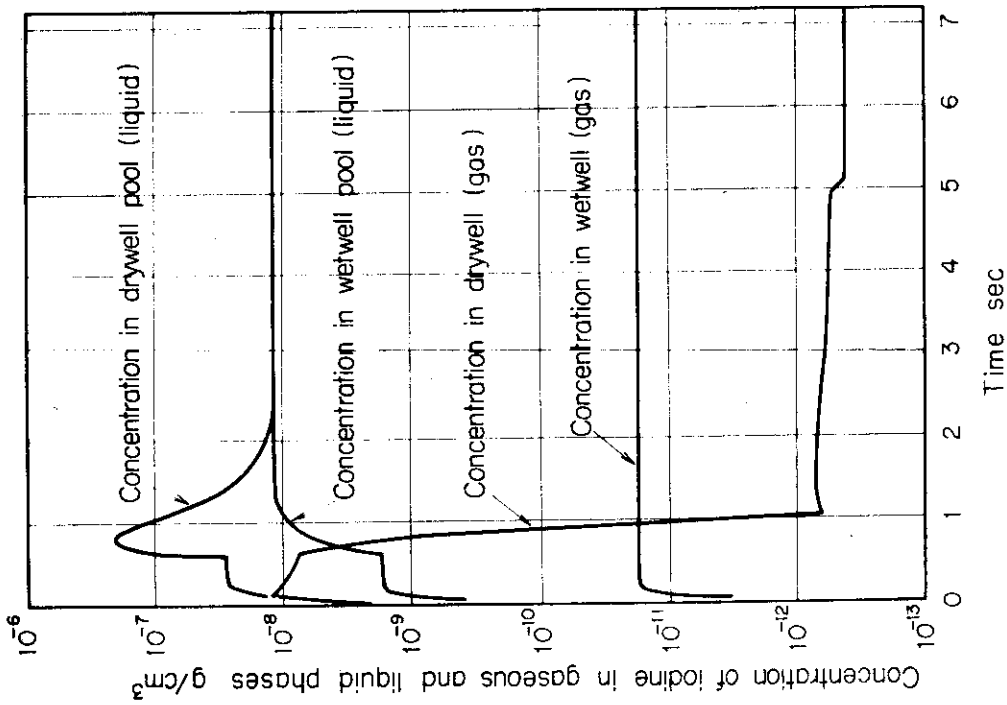


Fig. 6.11 Concentration profiles of inorganic iodine with time in drywell, drywell pool, wetwell, and wetwell pool, simulated to the major accident of BWR (Mark II)

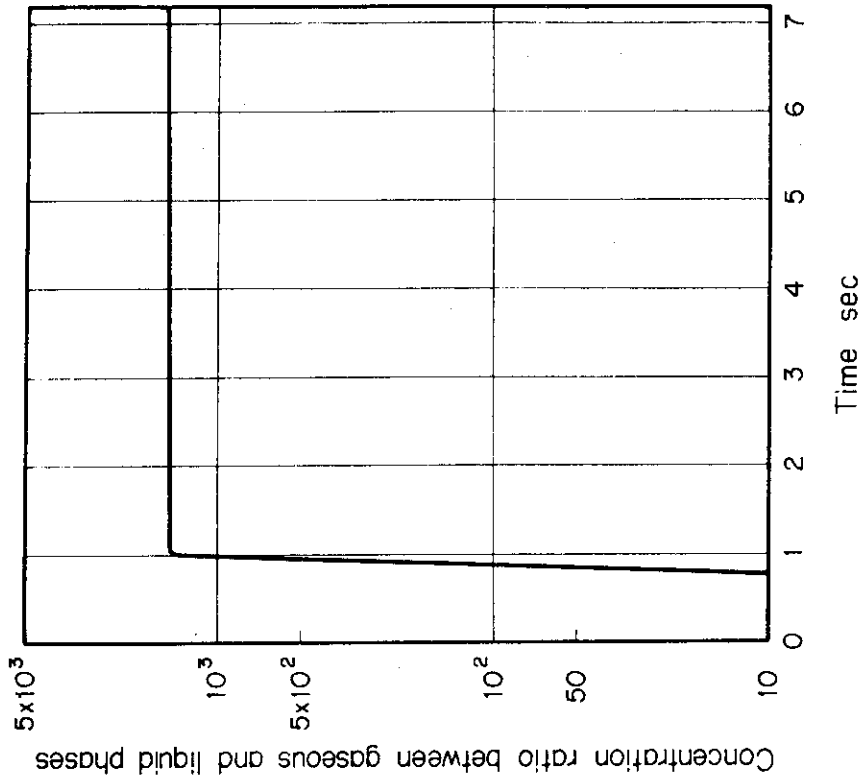


Fig. 6.12 Time dependence of inorganic-iodine concentration ratio between liquid and gaseous phases, calculated from concentration profiles in Fig. 6.11

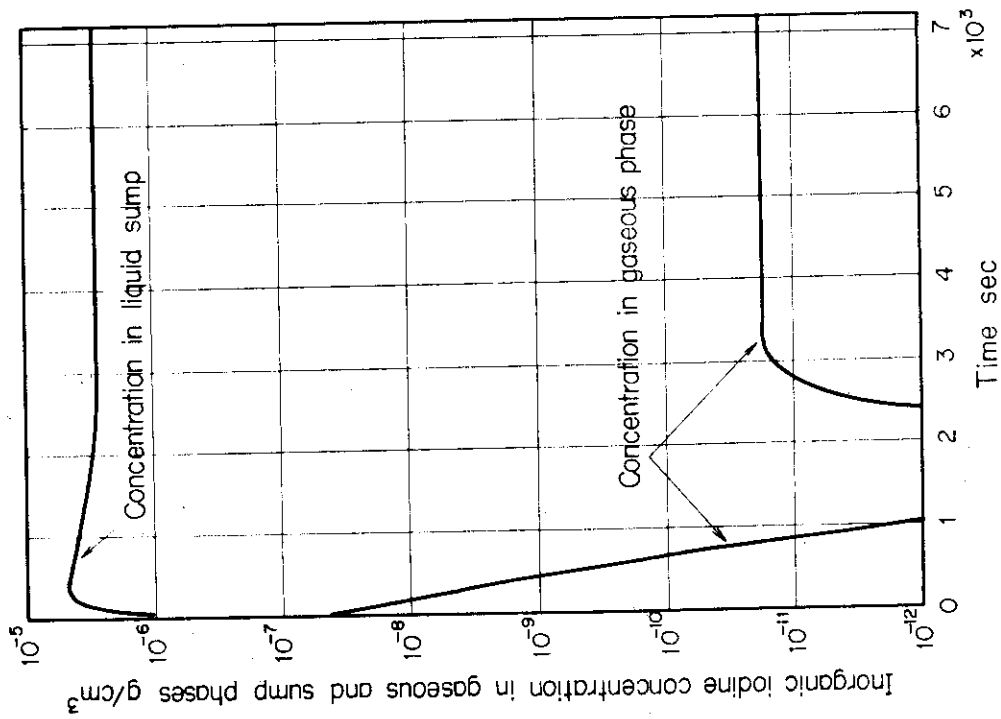


Fig. 6.13 Concentration profiles of inorganic iodine with time, simulated to the hypothetical accident of PWR

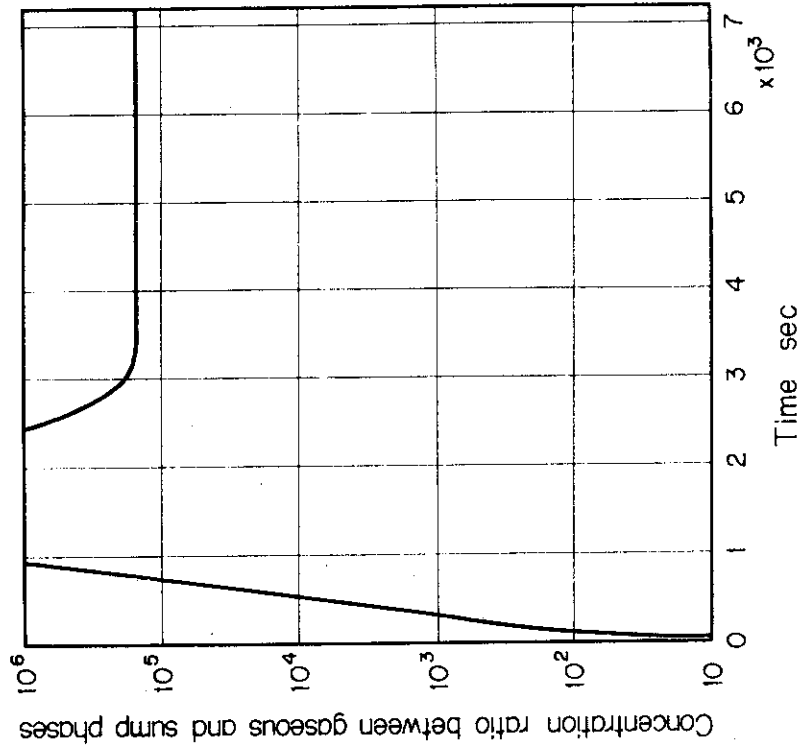


Fig. 6.14 Time dependence of inorganic iodine concentration ratio between liquid sump and gaseous phases in PWR containment calculated from concentration profiles in Fig. 6.13

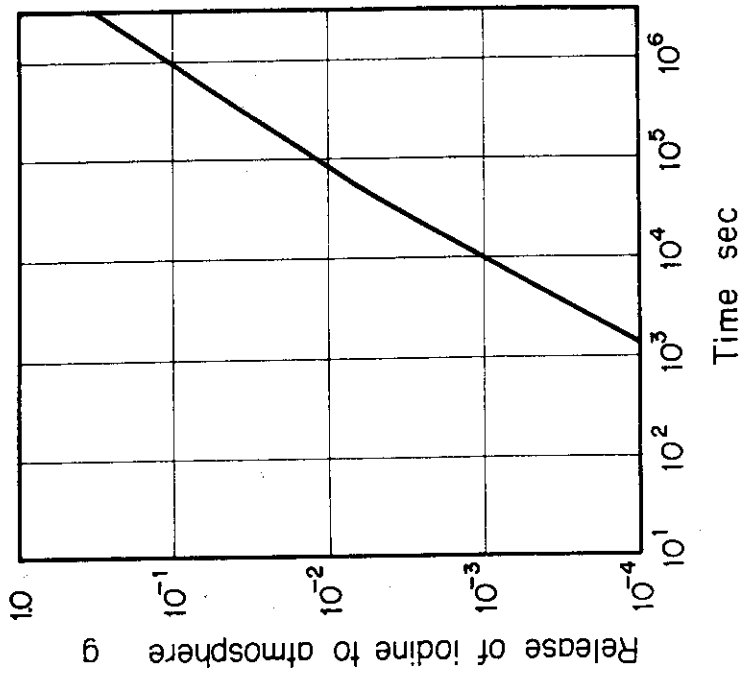


Fig.6.16 Amount of total iodine release to atmosphere in the event of hypothetical accident of PWR

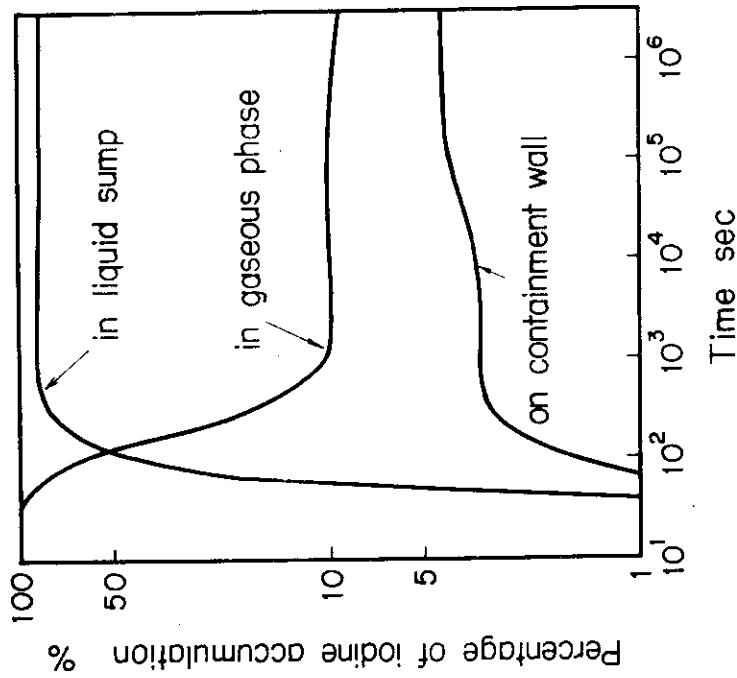


Fig.6.15 Percentage of iodine distributions vs. lapse of time in the event of hypothetical accident of PWR

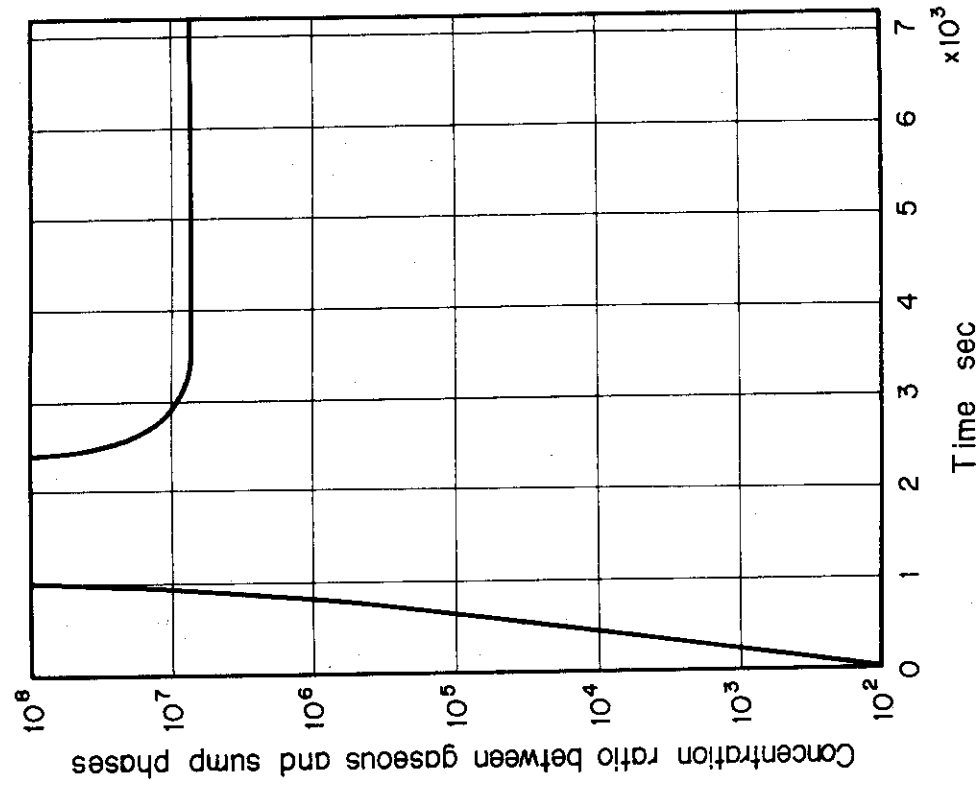


Fig. 6.18 Time dependence of inorganic iodine concentration ratio between liquid sump and gaseous phases in PWR containment, calculated from concentration profiles in Fig. 6.17

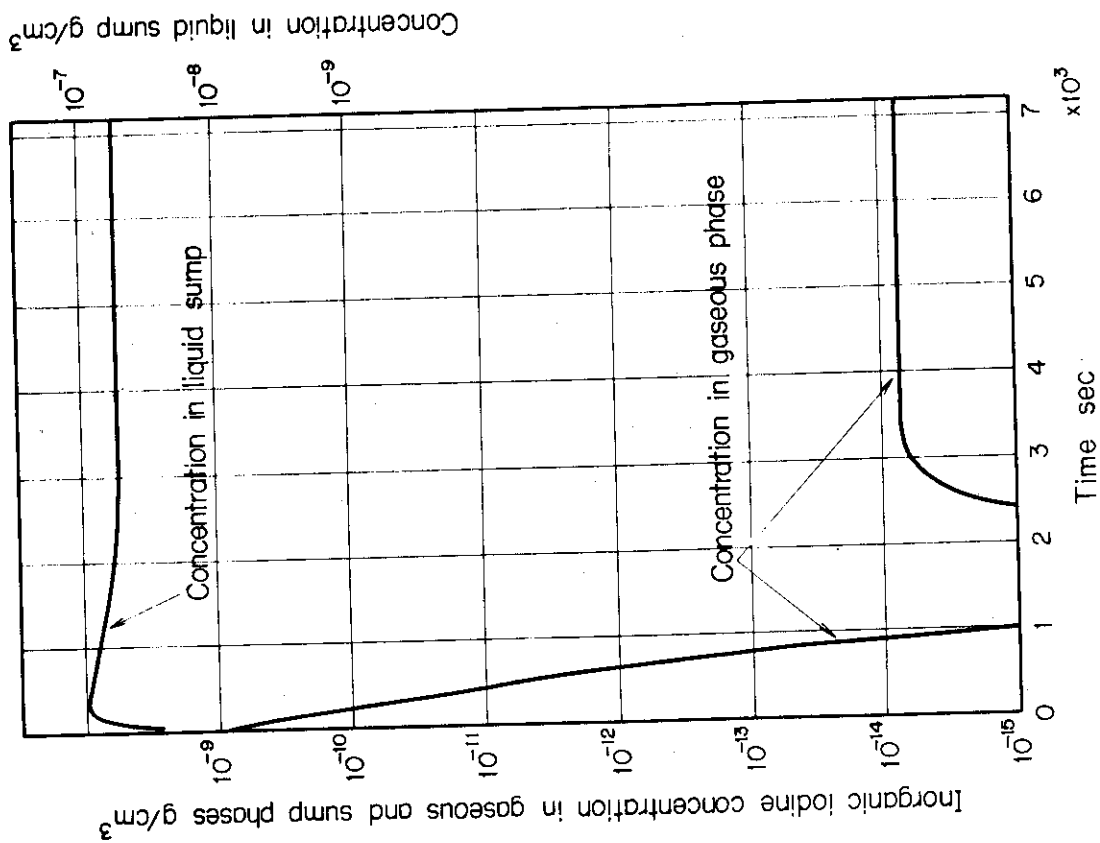


Fig. 6.17 Concentration profiles of inorganic iodine with time, simulated to the major accident of PWR

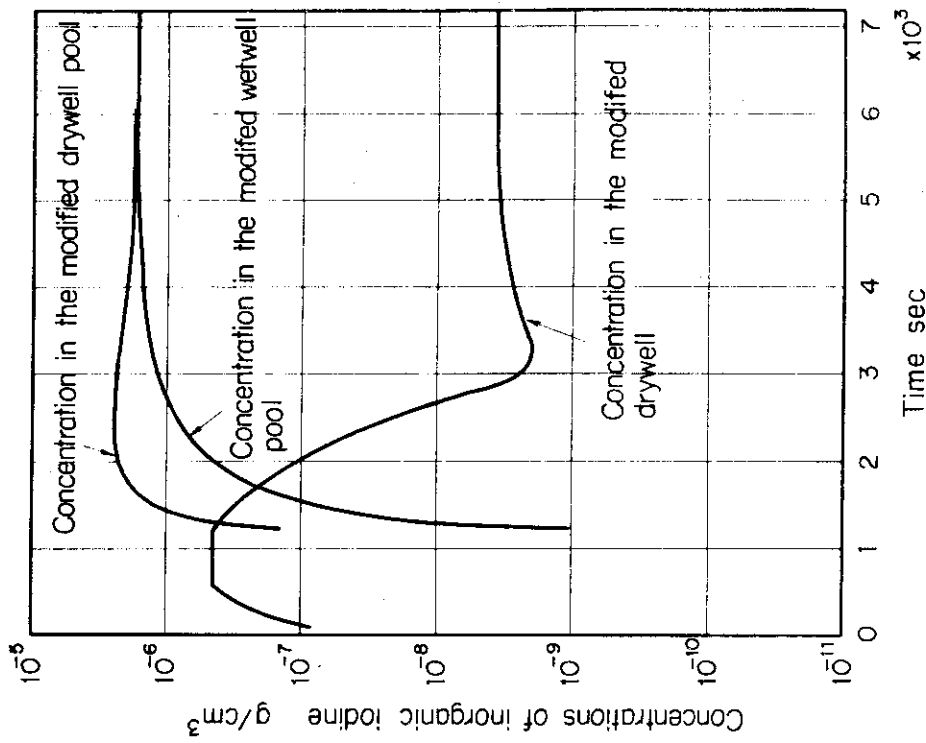


Fig.6.20 Concentration changes of inorganic iodine during spray, surmulated to BWR hypothetical accident in JAERI model containment

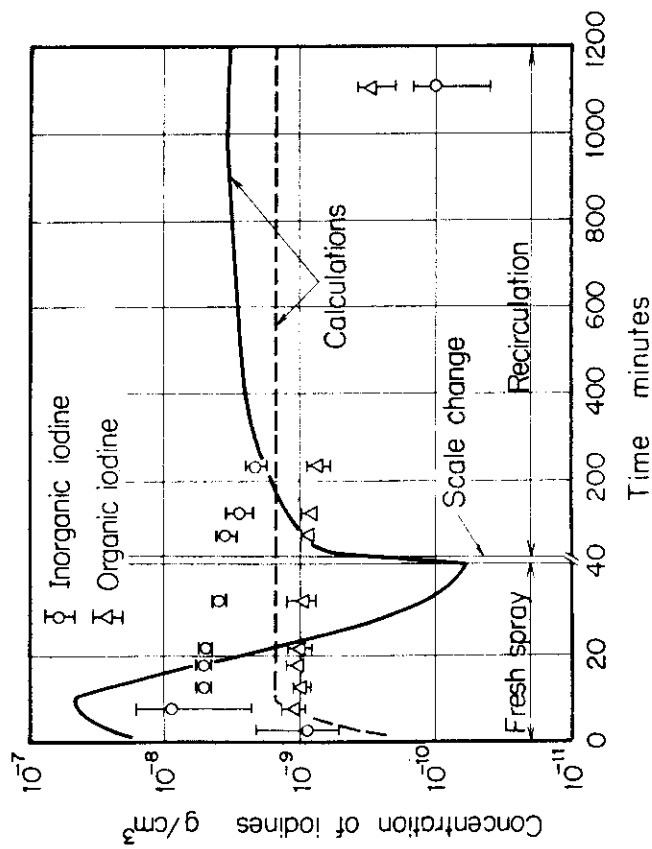


Fig.6.19 Concentration changes of inorganic and organic iodines during sprays in Run A-10, performed by CSE program in Battelle Memorial Institute



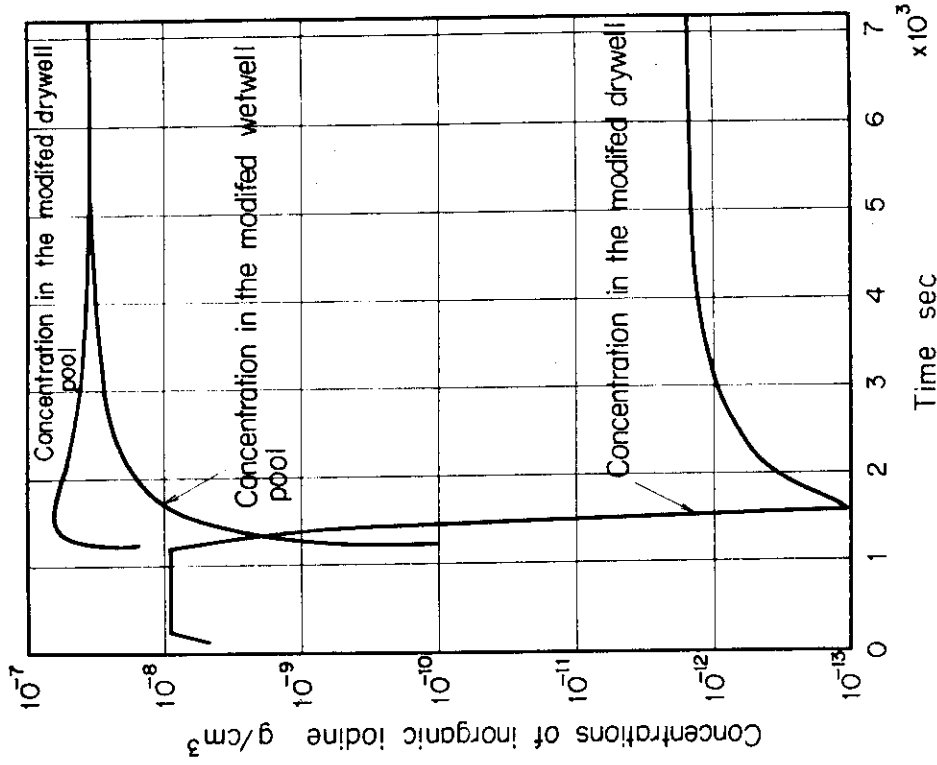


Fig.6.22 Concentration changes of inorganic iodine during spray, simulated to BWR major accident in JAERI model containment

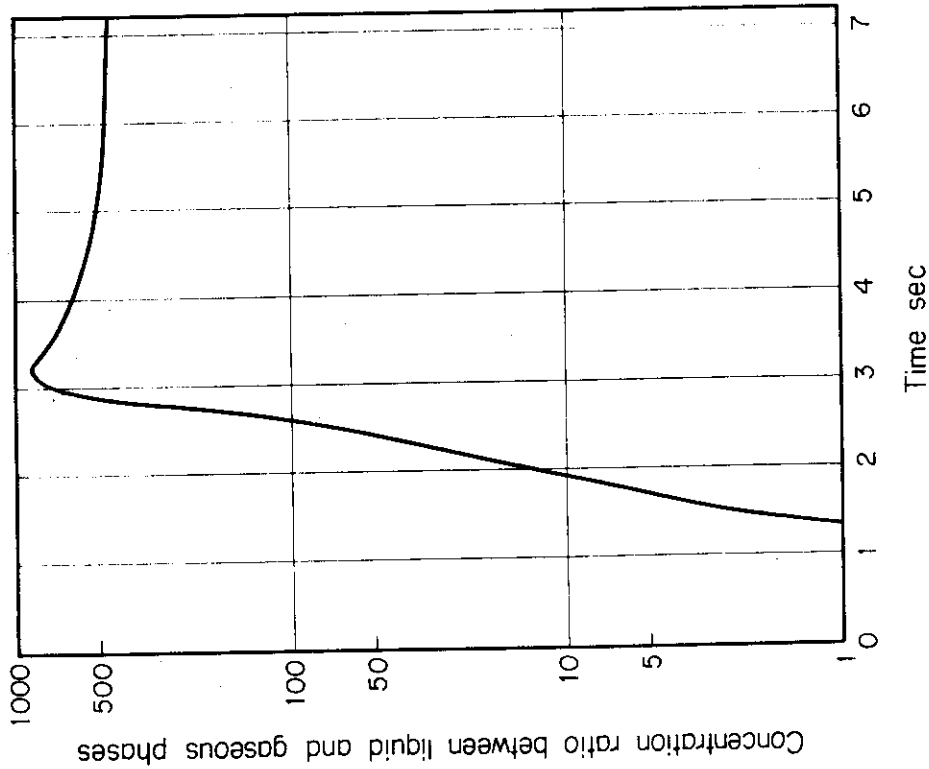


Fig.6.21 Time dependence of inorganic-iodine concentration ratio between liquid and gaseous phases, calculated from the concentration profiles in Fig.6.20

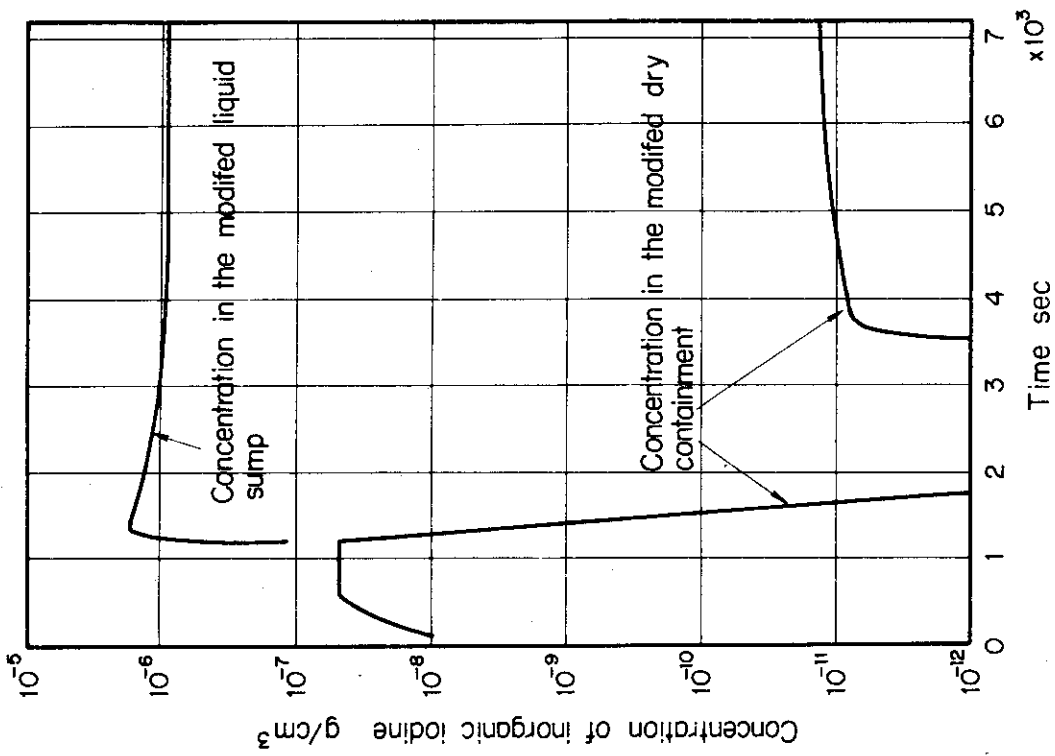


Fig.6.24 Concentration changes of inorganic iodine during spray, simulated to PWR hypothetical accident in JAERI model containment

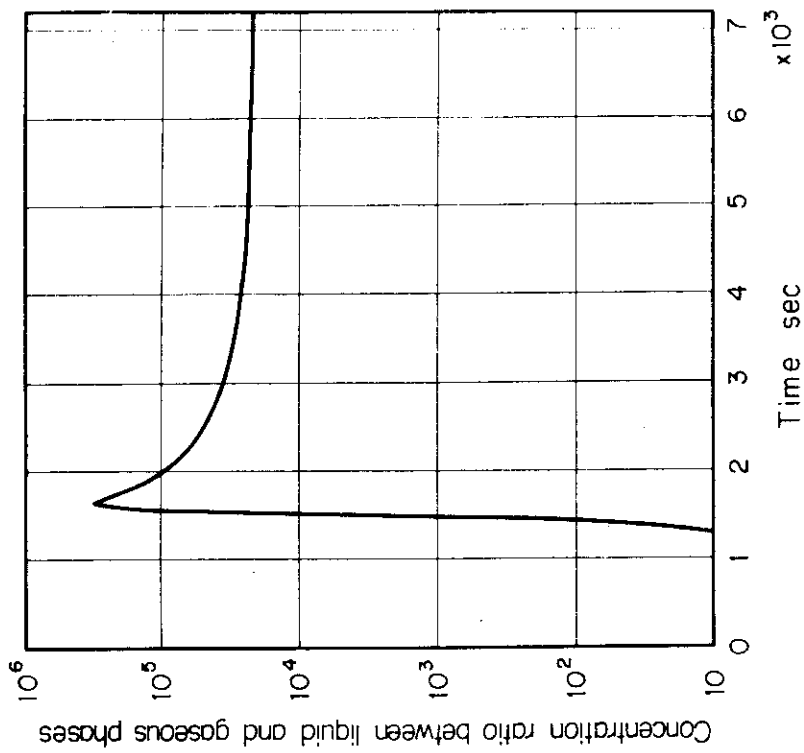


Fig.6.23 Time dependence of inorganic-iodine concentration ratio between liquid and gaseous phases, calculated from the concentration profiles in Fig.6.22

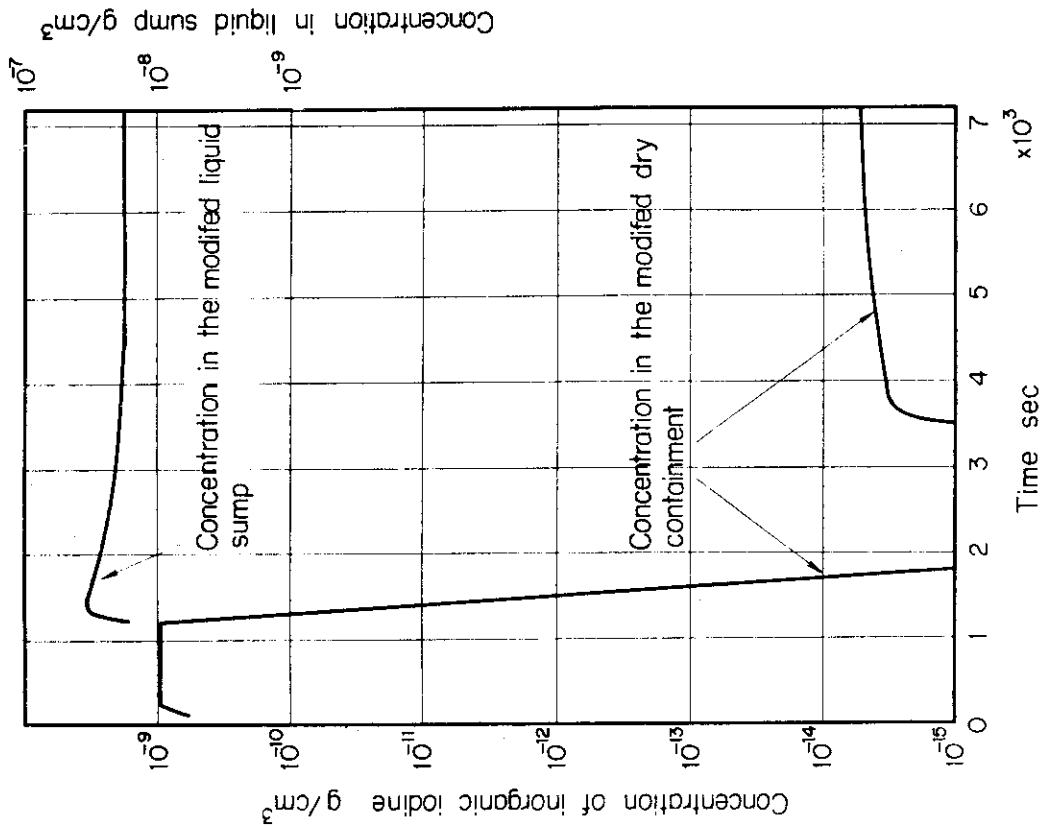


Fig.6.26 Concentration changes of inorganic iodine during spray, simulated to PWR major accident in JAERI model containment

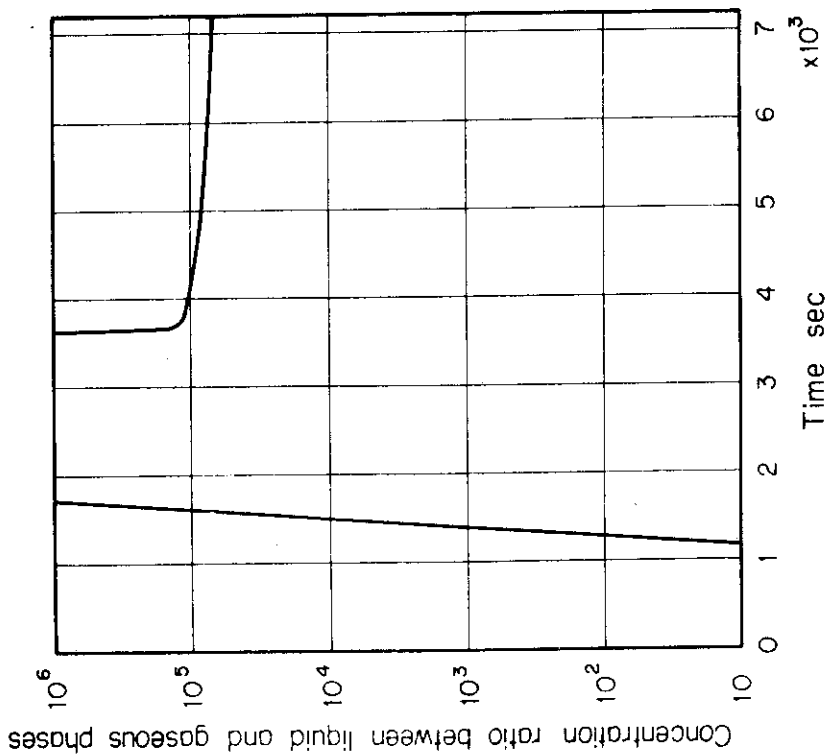


Fig.6.25 Time dependence of inorganic-iodine concentration ratio between liquid and gaseous phases, calculated from the concentration profiles in fig.6.24

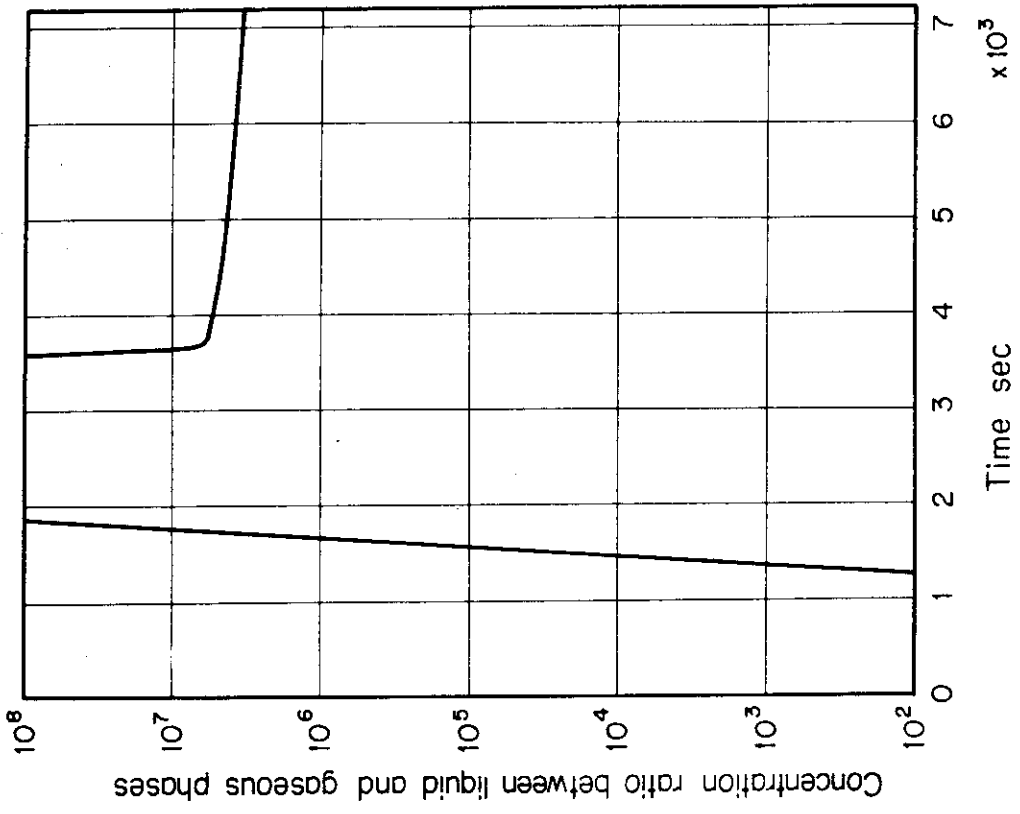


Fig.6.27 Time dependence of inorganic-iodine concentration ratio between liquid and gaseous phases, calculated from the concentration profiles in Fig.6.26

## 7. 結 言

この報告書は、格納容器スプレイ系によるヨウ素除去効果の解析を含めて、MIRA-PBコードをユーザレポートとしても利用できるよう意図して作成した。この報告書の構成を列記すると以下のようなになる。

- (1) 軽水炉の冷却材喪失事故時における格納容器スプレイ系の概要をPWR, BWRについて調べ、原研モデル格納容器スプレイ効果試験との関連をもたせた。
- (2) PWR, BWRについて、格納容器スプレイ系によるヨウ素除去機構をいくつかの現象を組合せた複合過程としてとらえ、それらの数式モデルを明らかにした。
- (3) MIRA-PBプログラムの概要を解説し、各サブプログラムの内容について、気液分配係数、物性値、液滴の衝突合体とその軌跡、液滴へのヨウ素の吸収効率、無機ヨウ素の壁面沈着、そしてエアロゾルの挙動などの諸現象を明らかにした。
- (4) 将来の改良型計算コードの作成に備えて、MIRA-PBコードの解析モデル上の問題点を摘出した。
- (5) 軽水炉格納容器スプレイ系の設計値に近い値を使用して、格納容器スプレイ系によるヨウ素除去の計算を実施し、また、原研モデル格納容器の予備計算も行なった。
- (6) MIRA-PBコードを使用するうえで必要な入力形式と、PWR, BWRに対する計算のサンプルデータをAppendixに付加した。

全体的にみて、MIRAコードは、スプレイによるヨウ素の除去に対してかなり詳細に解析したモデルであり、随所に安全評価に対して控え目(Consevative)な配慮がなされている。しかし、第5章に記述したように、その解析の前提、仮定には、いくつかの問題を含んでいることも事実である。この問題のいくつかは、原研で実施する『モデル格納容器スプレイ効果実証的試験』の結果を通して検討し、新しい計算コードを開発する必要がある。

## 参 考 文 献

- 1) A. K. Postma and W. F. Pasedag, "A review of mathematical model for predicting spray removal of fission products in reactor containment vessels", WASH-1329 (1974).
- 2) R. M. Kemper, "Iodine removal by spray in the Salem Station containment", WCAP-7952 (1972).
- 3) W. F. Pasedag and E. V. Somers, "Time-dependent, multi-volume fission product transport and removal analysis", Trans. ANS, VOL. 14, 770 (1971).
- 4) R. L. Ritzman, "MIRA-Method for iodine-removal analysis in reactor containment systems", BMI-1915 (1971).
- 5) S. J. Milioti, A. Sherman, R. L. Ritzman and J. A. Gieseke, "Analytical studies of elemental iodine removal by sprays in the Donald C. Cook Nuclear Plant", Nucl. Techno., VOL. 16, 477-508 (1972).
- 6) I. Aro and L. Mattila, "Fission product behaviour in LWR containments under LOCA conditions", Nucl. Energy Maturity, Proc. European Nucl. Conf., Paris, VOL. 5, 21-25 (1975).
- 7) C. F. Charmichael and S. A. Marko, "CONTEMPT-PS, a digital computer code for predicting the pressure-temperature history within a pressure-suppression containment vessel in response to a loss-of-coolant accident", IDO-17252 (1969).
- 8) A. K. Postma, L. F. Coleman and E. K. Hilliard, "Iodine removal from containment atmospheres by boric acid spray", BNP-100 (1970).
- 9) J. L. Gallagher, L. D. Green and R. T. Marches, "Design of spray additive systems", Nucl. Techno., VOL. 10(4), 406-411 (1971).
- 10) J. G. Knudsen and R. K. Hilliard, "Fission product transport by natural processes in containment vessel", BNWL-943 (1969).
- 11) L. F. Parsly, "Spray program at the nuclear safety pilot plant", Nucl. Techno., VOL. 10(6), 472-485 (1971).  
R. K. Hilliard, A. K. Postma et al., "Removal of iodine and particles by sprays in the containment systems experiment", Nucl. Techno., VOL. 10(4), 499-519 (1971).
- 12) R. K. Hilliard, J. D. McCormack and L. F. Coleman, "Fission product transport studies in nuclear safety quarterly report", BNWL-1315-2 (1970).
- 13) C. P. Ashworth, "Fission Product transport in pressure suppression containment", CONF-650407, VOL.2, 753 (1965).

- 14) A. E. J. Eggleton, "A theoretical examination of iodine-water partition coefficients", AERE-R 4887 (1967).
- 15) L. F. Parsly, "Design consideration of reactor containment spray systems-part IV Calculation of iodine - Water partition coefficients", ORNL-TM-2412 (1970).
- 16) J. H. Perry, C. H. Chilton and S. D. Kirkpatrick, "Chemical Engineer's Handbook", 4th ed., McGraw-Hill, New York, (1963).
- 17) W. Eguchi, M. Adachi and M. Yoneda, "Dependency of partition equilibrium of iodine between air and aqueous solution containing sodium hydroxide upon temperature and concentration", J. Chem. Eng. Japan, VOL. 6, 389-396 (1973).
- 18) M. Davies and E. Gwynne, "The iodine-iodide interaction", J. Am. Chem. Soc., VOL. 74, 2748-51 (1952).
- 19) T. L. Allen and R. M. Keefer, "The formation of hypoiodous acid and hydrated iodine cation by the hydrolysis of iodine", J. Am. Chem. Soc., VOL. 77, 2957 (1955).
- 20) R. P. Bell and E. Gelles, "The halogen cations in aqueous solution", J. Chem. Soc., 2734-40 (1951).
- 21) R. F. Taylor, "Absorption of iodine vapor by aqueous solution" Chem. Eng. Science, VOL. 10, 68-79, (1958).
- 22) L. C. Watson, A. R. Bancroft and C. W. Hoelke, "Iodine containment by dousing in NPD-II", CRCE-978 (1960).
- 23) 西沢, 木越, 大島, 大沢, 前川, 『ヨウ素と有機ヨウ素化合物の気液分配係数』  
日本原子力学会誌, VOL. 11, 9-14 (1969)。
- 24) 足立, 江口, 加藤, 藤堂, 『空気-カセイソーダ水溶液系におけるヨウ素の分配平衡』  
化学工学, VOL. 35, 877-883 (1971)。
- 25) Y. Nishizawa, S. Oshima and T. Maekawa, "Removal of iodine from atmosphere by sprays", Nucl. Techno., VOL. 10(4), 486-498 (1971).
- 26) M. A. Styrikovich, O. I. Martynova, et al., "Transfer of iodine from aqueous solution", Atomnaya Énergiya, VOL. 17, 45-49 (1964),  
Translation (UDC 621.039.526.5).
- 27) A. K. Postma, R. L. Ritzman, J. A. Gieseke and E. W. Schmidt, "Models for predicting the removal of airborne contaminants by reactor containment sprays", BNWL-B-417 (1975).
- 28) 足立基齊, 『ヨウ素の水洗除去に関する基礎的研究』  
京都大学, 学位論文 (昭和51年1月)。
- 29) J. G. Knudsen, "Properties of air-steam mixtures containing small amount of iodine", BNWL-1326 (1970).

- 30) C. R. Wilke and C. V. Lee, "Estimation of diffusion coefficient for Gas and vapor", Ind. Eng. Chem., VOL. 47, 1253-57 (1955).
- 31) J. O. Hirschfelder, et al., "Viscosity and other physical properties of gas mixtures", Trans. ASME, VOL. 71, 921-37 (1949).
- 32) R. A. Svehla, "Viscosities and thermoconductivities of gases at high temperature suitable for heat transfer calculation", NASA-TR-R-132 (1962).
- 33) C. R. Wilke, "Diffusional properties of multicomponent gases", Chem. Eng. Prog., VOL. 46, 95-104 (1950).
- 34) C. R. Wilke and P. Chang, "Correlation of diffusion coefficients in dilute solutions", Am. Inst. Chem. Eng. J., VOL. 1, 264-70 (1955).
- 35) H. S. Rosenberg, J. M. Genco and D. L. Morrison, "Fission-product deposition and its enhancement under reactor accident conditions: deposition on containment-system surfaces", BMI-1856 (1969).  
R. B. Bird, W. E. Stewart and E. N. Lightfoot, "Transport phenomena", John Wiley & Sons, Inc., P.415-418 (1960).
- 36) G. W. Parker, G. E. Creek and W. J. Marten, "Fission product transport and behavior in the stainless steel lined containment research installation (CRI)", ORNL-4502 (1971).
- 37) J. J. DiNunno, et al., "Calculation of distance factors for power and test reactor sites", TID-14844 (1962).
- 38) J. P. Hosemann, W. Schikarski and H. Wild, "Radioactive pollutants released in accidents of LWR power plants", IAEA/SM-181/18, Acts du VII<sup>e</sup> Congres Inter. Soci. Francaise de Radioprotection (1974).
- 39) L. Weldman and K. H. Schmitt, "Thermophoresis and diffusiophoresis of aerosol", Aerosol Science (Edited by C. N. Davies), 137-162, Academic Press (1966).
- 40) A. K. Postma and L. F. Coleman, "Effect of continuous spray operation on the removal of aerosol and gases in the containment systems experiment", BNWL-1485 (1970).
- 41) W. E. Ranz and J. B. Wong, "Impaction of dust and smoke particles on surface and body collectors", Ind. Eng. Chem., VOL. 44, 1371-81 (1952).
- 42) W. F. Pasedag and J. L. Gallagher, "Drop size distribution and spray effectiveness", Nucl. Techno., VOL.10(4), 412-419 (1971).
- 43) A. K. Postma and Zavadoski, "Review of organic iodide formation under accident conditions in water-cooled reactors", WASH-1233 (1972).



## Appendix - 1 Version discription

## A 計算データの入力形式

## MIRA-PBのガード形式

- 1 'MIRA', TITLE(A4, 1X, 12A4)
- 2 V1, AL1, VL1X, VL1F, PHS(5X, 5E10.0)
- 3 DXFILM, PHF(5X, 2E10.0)
- 4 QF1, EC1, EM1, EP1(5X, 4E10.0)
- 5 V2, VL2, PHL, V3(5X, 4E10.0)
- 6 QE1, QE2, QE3, EMIX, QE1D(5X, 5E10.0)
- 7 EPSC, EPSM, EPSP(5X, 3E10.0)
- 8 B1, RETZ, RETL, ALP, BET, GAM(5X, 6E10.0)
- 9 QS, QW, TSP(5X, 3E10.0)
- 10 VSP, PH, CLO, QCORE(5X, 4E10.0)
- 11 HTSU, RAD, HT, PARAD, ICORAT(5X, 4E10.0, I10)
- 12 DMEAN, SIGMAG, ANGLE, DORIF, ITYPE, NONOZ  
(5X, 4E10.0, 2I10)
- 13 DTT(I), I=1~12(5X, 12F5.0)
- 14 ND(I), I=1~12(5X, 12I5.0)
- 15 NPT(I), I=1~12(5X, 12I5.0)
- 16 TOTI, TB1, TS1, TIM1, TSPIN, SNS1, SIM1, ARAS  
ARAI(5X, E10.0, 4F5.0, 4E10.0) ただし, PWR プラントの  
み。
- 17 TOTI, TB1, TS1, TL2, SNS1, Q12, AW1, AD1(5X,  
E10.0, 3F5.0, 5X, 4E10.0) ただし, BWR プラントのみ。

## B 入力データ等の変数名について

## B.1 PWRに対して

V1	= 格納容器気相体積, m <sup>3</sup>
AL1	= サンププール表面積, m <sup>2</sup>
VL1X	= サンプ液の初期体積, m <sup>3</sup>
VL1F	= サンプ液の最大体積, m <sup>3</sup>
PHS	= サンプ液のpH(室温での)
DIXFILM	= 液膜厚さ, cm

PHF	= 液膜の pH (室温での)
QF1	= 格納容器内再循環フィルタ流量, $m^3/hr$
EC1	= 無機ヨウ素についての再循環フィルタの吸着効率
EM1	= 有機ヨウ素についての再循環フィルタの吸着効率
EP1	= ヨウ素エアロゾルについて再循環フィルタの捕集効率
V3	= アニュラスの体積, $m^3$
QE1	= 格納容器の漏洩率, $v/o \text{ day}$
QE2	= アニュラス換気率, $v/o \text{ day}$
QE3	= アニュラスからの排気率, $v/o \text{ day}$
EMIX	= アニュラス内の混合率
QE1D	= セミダブル格納容器におけるドーム部表面積と格納容器壁面積の比
EPSC	= 無機ヨウ素についての排出フィルタ吸着効率
EPSM	= 有機ヨウ素についての排出フィルタ吸着効率
EPSP	= ヨウ素エアロゾルについての排出フィルタ捕集効率
B1	= 容器内へのヨウ素放出率, $g/sec$
RETZ	= ヨウ素放出開始時刻, $sec$
RETL	= ヨウ素放出終了時刻, $sec$
ALP	= 無機ヨウ素の放出割合
BET	= 有機ヨウ素の放出割合
GAM	= ヨウ素エアロゾルの放出割合
QS	= 格納容器スプレイ流量, $m^3/hr$
QW	= スプレイによる容器壁への流量, $m^3/hr$
TSP	= スプレイ開始時刻, $sec$
VSP	= 初期スプレイ液量, $m^3$
PH	= 初期スプレイ液の pH (室温での)
CLO	= 燃料取換用水タンク内の天然ヨウ素濃度, $g/cm^3$
QCORE	= 初期スプレイによる炉心流量, $m^3/hr$
HTSU	= 格納容器側壁の高さ, $m$
RAD	= 格納容器半径, $m$
HT	= スプレイ高さ, $m$
PARAD	= エアロゾル粒子の平均半径, $\mu m$
ICOAT	= 格納容器壁の塗料タイプ; 1 = アクリル系塗料, 2 = フェノール系塗料, 3 = ビニール系塗料, 4 = エポキシ系塗料, 5 = ステンレス鋼無塗装
DMEAN	= スプレイ液滴の平均径, $\mu m$
SIGMAG	= スプレイ液滴径分布の標準偏差
ANGLE	= スプレイ液滴の拡がり角, 度
DORIF	= スプレイノズル径, $cm$

ITYPE	=ノズルタイプの指定; 0=ホローコーン, 1=フルコーン
NONONZ	=格納容器スプレイノズル個数
DTT	=Runge-Gutta-Gill積分における時間ステップ, $\text{sec}^{-1}$ 。次の変数 ND, NPTと共にひとつの計算条件を示す 全部で12通り指定できる。
ND	=DTT時間ステップにおける繰返し計算回数
NPT	=ND回の計算中での計算結果の出力間隔の回数
TOTI	=事故発生時点からの経過時間, sec
TBI	=格納容器内の気相温度, $^{\circ}\text{C}$
TSI	=格納容器内の壁温度, $^{\circ}\text{C}$
TIMI	=格納容器内部構築物の表面温度, $^{\circ}\text{C}$
TSPIN	=格納容器スプレイ液の入口温度, $^{\circ}\text{C}$
SNSI	=格納容器壁への水蒸気フラックス, $\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$
SIMI	=内部構築物表面への水蒸気フラックス, $\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$
ARAS	=格納容器壁の面積, $\text{m}^2$
ARAI	=内部構築物表面積, $\text{m}^2$
AWI	=格納容器の濡れ面積, $\text{cm}^2$
ADI	=格納容器の乾き面積, $\text{cm}^2$
WT	=対数正規分布に対する各スプレイ液滴径の重量分率
SN	=スプレイ液滴の吸収効率の計算に使用される Sherwood 数
DMLS	=スプレイ液滴の吸収効率の計算に使用される無次元数
TABLE	=スプレイ液滴の吸収効率に関する数表
QL12	=再循環スプレイ流量, $\text{cm}^3/\text{sec}$
QSP	=初期スプレイ流量, $\text{cm}^3/\text{sec}$
RHOLIQ	=水の密度, $\text{g}/\text{cm}^3$
RHOAIR	=空気の密度, $\text{g}/\text{cm}^3$
RHOSTM	=水蒸気の密度, $\text{g}/\text{cm}^3$
RHOATM	=水蒸気-空気混合物の密度, $\text{g}/\text{cm}^3$
P	=水蒸気分圧, atm
PAIR	=空気の分圧, atm
PTOTAL	=全圧, atm
ETA	=水蒸気の粘性係数, poise
ETAIR	=空気の粘性係数, poise
ETAMIX	=水蒸気-空気混合物の粘性係数, poise
DIAIR	=空気中の無機ヨウ素拡散係数, $\text{cm}^2/\text{sec}$
DIWTR	=水蒸気中の無機ヨウ素拡散係数, $\text{cm}^2/\text{sec}$
DIMIX	=水蒸気-空気混合物の無機ヨウ素拡散係数, $\text{cm}^2/\text{sec}$
SMITNO	=水蒸気-空気混合物の無機ヨウ素についての Schmitt 数

FRAIR	= 空気のモル分率
DMAIR	= 空気中のメチルヨウ素拡散係数, $\text{cm}^2/\text{sec}$
DMWTR	= 水蒸気中のメチルヨウ素拡散係数, $\text{cm}^2/\text{sec}$
DMMIX	= 水蒸気-空気混合物のメチルヨウ素拡散係数, $\text{cm}^2/\text{sec}$
SNOMI	= 水蒸気-空気混合物中のメチルヨウ素についての Schmit 数
ETASOL	= 水の粘性係数, poise
DLI2	= 水中の無機ヨウ素拡散係数, $\text{cm}^2/\text{sec}$
DLCH3I	= 水中のメチルヨウ素拡散係数, $\text{cm}^2/\text{sec}$
VGAV	= スプレイ液滴についての無機ヨウ素の気相側物質移動係数, $\text{cm}/\text{sec}$
VGAVM	= スプレイ液滴についての有機ヨウ素の気相側物質移動係数, $\text{cm}/\text{sec}$
VTER	= スプレイ液滴の終末速度, $\text{cm}/\text{sec}$
TI	= 格納容器内スプレイ液滴の落下時間, sec
D	= スプレイ液滴径, cm
QL	= スプレイ平均流量, $\text{cm}^3/\text{sec}$
TRISE	= 格納容器内を通過する際のスプレイ液の温度上昇, $^{\circ}\text{C}$
EFPS	= スプレイ液滴のエアロゾル捕集効率
PHT	= 格納容器温度におけるスプレイ液滴の pH
PHFT	= 格納容器温度における液膜の pH
AK1, AK2	
AK3, AK4	= ヨウ素の加水分解反応の平衡定数
HM1	= 有機ヨウ素の気液分配係数
AKC1	= 格納容器壁での無機ヨウ素の気相側物質移動係数, $\text{cm}/\text{sec}$
AKM1	= 格納容器壁での有機ヨウ素の気相側物質移動係数, $\text{cm}/\text{sec}$
AKA1	= 乾き壁面についての無機ヨウ素の沈着速度, $\text{cm}/\text{sec}$
AKS1	= 壁面への水蒸気流速, $\text{cm}/\text{sec}$
AKL1	= 液膜についての無機ヨウ素の物質移動係数, $\text{cm}/\text{sec}$
AKW1	= 濡れ壁面についての無機ヨウ素の沈着速度, $\text{cm}/\text{sec}$
PTERV	= エアロゾル粒子の沈降速度, $\text{cm}/\text{sec}$

Runge-Kutta-Gill 積分では変数 Y を使用するが、変数 Y の意味は

$$\begin{aligned}
 Y(1) &= t & , & & Y(2) &= C_1 & , & & Y(3) &= M_1 \\
 Y(4) &= P_1 & , & & Y(5) &= C_{W1} & , & & Y(6) &= C_{L1} \\
 Y(7) &= M_{L1} & , & & Y(8) &= C_{A1} & , & & Y(9) &= I_F \\
 Y(10) &= I_E & , & & Y(11) &= I_{EF} & , & & Y(12) &= C_s \\
 Y(13) &= M_s & , & & Y(14) &= P_s & , & & & 
 \end{aligned}$$

である。

## B.2 BWR に対して

BWR について使用する変数の意味は、PWR に用いた変数と大部分は同じであるが、一部

異なる変数についてのみ，以下に改めて定義する。

V 1	= ドライウエルの気相体積， $m^3$
V L 1 X	= ドライウエル液相プールの初期体積， $m^3$
V L 1 F	= ドライウエル液相プールの最大体積， $m^3$
V 2	= サプレッションチェンバの気相体積， $m^3$
V L 2	= サプレッションチェンバの液相体積， $m^3$
P H L	= サプレッションチェンバの pH (室温での)
V 3	= 原子炉建家の体積， $m^3$
Q E 1	= ドライウエルの漏洩率， $v/o \text{ day}$
Q E 2	= サプレッションチェンバ気相の漏洩率， $v/o \text{ day}$
Q E 3	= 原子炉建家からの排出率， $v/o \text{ day}$
E M I X	= 原子炉建家内の混合率
T B 1	= ドライウエルの気相の平均温度， $^{\circ}C$
T S 1	= ドライウエル内壁温度， $^{\circ}C$
T L 2	= サプレッションプール温度， $^{\circ}C$
S N S 1	= 水蒸気の凝縮面における水蒸気フラックス， $g/cm^2 \cdot sec$
Q 1 2	= ドライウエルからサプレッションチェンバへの気体流量， $cm^3/sec$
A W 1	= ドライウエルにおける濡れ面積， $m^2$
A D 1	= ドライウエルにおける乾き面積， $m^2$
P H S T	= ドライウエルでの pH
A K 1 S , A K 2 S	
A K 3 S , A K 4 S	= サプレッションチェンバでのヨウ素の加水分解反応の平衡定数
A K 1 , A K 2	
A K 3 , A K 4	= ドライウエルでのヨウ素の加水分解反応の平衡定数
H M 1	= ドライウエル気相温度での有機ヨウ素の気液分配係数
H M 2	= サプレッションチェンバ温度での有機ヨウ素の気液分配係数
P H L T	= サプレッションプール温度での pH
E F E	= サプレッションチェンバにおける流入気体のスクラビング効率

Runge-Kutta-Gill 積分のためのサブプログラムで使用する変数 Y の意味は，次に示す通りである。

$$\begin{aligned}
 Y(1) &= t & , & & Y(2) &= C_1 & , & & Y(3) &= M_1 \\
 Y(4) &= P_1 & , & & Y(5) &= C_{W1} & , & & Y(6) &= C_{L1} \\
 Y(7) &= M_{L1} & , & & Y(8) &= C_{A1} & , & & Y(9) &= C_2 \\
 Y(10) &= M_2 & , & & Y(11) &= P_2 & , & & Y(12) &= C_{L2} \\
 Y(13) &= M_{L2} & , & & Y(14) &= C_3 & , & & Y(15) &= M_3 \\
 Y(16) &= P_3 & , & & Y(17) &= I_E & , & & Y(18) &= I_{EF}
 \end{aligned}$$

Appendix - 2 Sample data (PWR)

C.1 PWR plant INPUT

MIRA	PWR ( 826 MW )									
1010	69500.	1020.	500.	1060.	9.5					
1020	0.02	9.5								
1030	0.									
2010	0.			21740.						
3010	0.3	1100.	100.	0.25						
3020	0.9	0.9	0.9							
5010	134.	0.	25.	0.90	0.10	0.				
5020	846.	0.	55.							
5030	560.	0.	9.5	0.	0.					
5040	52.	19.	19.6	0.5				4		
5050	700.	1.5	60.	1.				0	232	
6010	1.	5.	20.	60.	90.	120.	180.	240.	300.	
6020	1200	1200	720	1080	2880	2880	2880	2880	2880	
6030	30	24	30	30	120	180	180	180	180	
7010	1.	73.	50.	50.	50.	0.	0.	8610.	8610.	
	10.	117.	68.	68.	50.	3.4	E-4 0.	8610.	8610.	
	20.	120.	76.	76.	50.	8.	E-4 0.	8610.	8610.	
	35.	119.	76.	76.	50.	7.	E-4 0.	8610.	8610.	
	100.	122.	80.	80.	50.	5.7	E-4 0.	8610.	8610.	
	300.	123.	96.	96.	50.	0.	0.	8610.	8610.	
	1.	E3 115.	112.	112.	50.	0.	0.	8610.	8610.	
	2.3	E3 111.	111.	111.	50.	0.	0.	8610.	8610.	
	2.4	E3 110.	110.	110.	81.	0.	0.	8610.	8610.	

JAERI-M 7594

7.	E3	103.	105.	105.	88.	0.	0.	8610.	8610.
1.	E4	102.	103.	103.	86.	0.	0.	8610.	8610.
5.	E4	80.	78.	78.	67.	0.	0.	8610.	8610.
1.	E5	69.	67.	67.	59.	0.	0.	8610.	8610.
5.	E5	55.	55.	55.	45.	0.	0.	8610.	8610.
3.	E6	50.	50.	50.	42.	0.	0.	8610.	8610.

\*\*\*\*\*  
 \*\*\* PWR ( 325 MW ) \*\*\*  
 \*\*\*\*\*

C.2 OUTPUT

\*\*\* PROGRAM MIRA-F5 PRINT OUT OF INITIAL DATA \*\*\*

DATA NO.	NAME	UNIT	COMMENT	(TIME STEP)
1010	V1	M**3	(VESSEL VOLUME)	0.
	A11	M**2	(SURFACE AREA OF SUMP POOL)	0.
	VLI1	M**3	(INITIAL VOLUME OF SUMP)	0.
	VLI2	M**3	(VOLUME LIMIT OF SUMP)	0.
	PHS	M**3	(PH OF SUMP LIQUID)	0.
1020	DAFILM	CM	(THICKNESS OF LIQUID FILM)	0.
	PHF	CM	(PH OF LIQUID FILM)	0.
1030	QF1	M**3/HOUR	(RECIRC. FILTER FLOW)	0.
	ECL	0.0	(RECIRC. FILTER 12 EFFICIENCY)	0.
	EMI	0.0	(RECIRC. FILTER CH31 EFF.)	0.
	EPI	0.0	(RECIRC. FILTER PART. EFF.)	0.
2010	V3	M**3	(FREE VOLUME OF ANNULUS)	0.
3010	GL1	M**3/DAY	(VESSEL LEAK RATE)	0.
	GE2	M**3/DAY	(RECIRC. RATE OF ANNULUS)	0.
	GF3	M**3/DAY	(EXHAUST RATE OF ANNULUS)	0.
	EMIX	0.0	(MIXING EFFIC. IN ANNULUS)	0.
	RE10	0.0	(FRACTION OF DUFF SURFACE AREA)	0.
3020	EFSC	0.0	(EXHAUST FILTER EFF. FOR I2)	0.
	EP31	0.0	(EXHAUST FILTER EFF. FOR CH31)	0.
	EP32	0.0	(EXHAUST FILTER EFF. FOR PART.2)	0.
5010	RI	M**3/SEC	(TOTAL IODINE MASS RELEASE RATE)	0.
	REI2	SEC	(STARTING TIME FOR RELEASE)	0.
	REI1	SEC	(ENDING TIME FOR RELEASE)	0.
	ALP	0.0	(FRACTION AS I2)	0.
	RET	0.0	(FRACTION AS CH31)	0.
	RAM	0.0	(FRACTION AS PART.)	0.
5020	RS	M**3/HOUR	(SPRAY FLOW RATE ON VESSEL WALL)	0.
	RW	M**3/HOUR	(SPRAY FLOW RATE)	0.
	TSP	SEC	(SPRAY STARTING TIME)	0.
5030	VSF	M**3	(VOLUME OF FRESH SPRAY LIQ.)	0.
	PH	0.0	(PH OF FRESH SPRAY LIQ.)	0.
	CL0	G/GM**3	(CONCENTRATION OF FRESH SPRAY LIQ.)	0.
	CCORE	0.0	(FRESH LIQ. FLOW TO CORE)	0.
5040	HTSU	M	(HEIGHT OF VESSEL WALL)	0.
	RA0	M	(RADIUS OF VESSEL)	0.
	HT	M	(SPRAY FALL HEIGHT)	0.
	PARAD	MICRONS	(SPRAY DROP MEAN SIZE)	0.
5050	ICDAT	MICRONS	(VESSEL PAINT I.D.)	0.
	DMEAN	MICRONS	(SPRAY DROP MEAN SIZE)	0.
	SIGMAG	0.0	(STANDARD DEVIATION)	0.
	ANGLE	DEG	(NOZZLE INCL. ANGLE)	0.
	DOKIF	CM	(NOZZLE ORIFICE DIA.)	0.
	ITYPE	0	(NOZZLE TYPE)	0.
	MONDZ	232	(NUMBER OF NOZZLES)	0.
6010	DTT	5.	(TIME STEP)	0.
6020	ND	160	(ITERATION NUM25R)	0.
6030	NPT	80	(PRINT INTERVAL)	0.



```

*** PROGRAM MIRAPB PWR = IODINE REMOVAL ANALYSIS ***
*** FINAL DATA...IODINE CONCNS. AND ACCUMLS. VERSUS TIME ***
RELEASE = 1.0
*****
**** TOTAL TIME = 0.0 SECONDS 0.0 MINUTES 0.0 HOURS 0.0 DAYS*****
          0.0 GAS TEMPERATURE = 0.0 DEG C
IODINE CONCENTRATION IN GRAMS-1/CC OR SQ CM
FORM      GAS PHASE  SUMP LIQ  SURFACE  ANNULUS
12        0.0        0.0        0.0        0.0
CH31     0.0        0.0        0.0        0.0
PART      0.0        0.0        0.0        0.0

IODINE ACCUMULATIONS IN GRAMS
AIRBORNE = 0.0      SUMP = 0.0      WALL = 0.0      TOTAL IODINE = 0.0
RECIRC FILTER = 0.0 EXHAUST FILTER = 0.0 LEAKAGE = 0.0
ELEMENTAL IODINE PARTITION COEFFICIENT SYSTEM = 0.0 FRESH SPRAY = 0.0 RECYCLE SPRAY = 0.0 LIQID FILM = 0.0
ELEMENTAL IODINE AVERAGE ABSORPTION EFFICIENCY FRESH SPRAY = 0.0 RECYCLE SPRAY = 0.0

*** PROGRAM MIRAPB PRINT OUT OF TIME DEPENDENT DATA ***
T01 = 1.000E+00 T81 = 7.500E+01 T51 = 5.000E+01 TSPIN = 5.000E+01 SNS1 = 0.0
SIM1 = 0.0 ARAS = 8.610E+03 AKAI = 8.610E+03

*** PROGRAM MIRAPB PRINT OUT OF TIME DEPENDENT DATA ***
T01 = 1.000E+01 T81 = 1.190E+02 T51 = 9.900E+01 TSPIN = 5.000E+01 SNS1 = 3.400E-04
SIM1 = 0.0 ARAS = 8.610E+03 AKAI = 8.610E+03

*** PROGRAM MIRAPB PRINT OUT OF TIME DEPENDENT DATA ***
T01 = 2.000E+01 T81 = 1.260E+02 T51 = 1.060E+02 TSPIN = 5.000E+01 SNS1 = 8.000E-04
SIM1 = 0.0 ARAS = 8.610E+03 AKAI = 8.610E+03

*** PROGRAM MIRAPB PRINT OUT OF TIME DEPENDENT DATA ***
T01 = 3.500E+01 T81 = 1.540E+02 T51 = 1.300E+02 TSPIN = 5.000E+01 SNS1 = 7.000E-04
SIM1 = 0.0 ARAS = 8.610E+03 AKAI = 8.610E+03

**** TOTAL TIME = 3.500E+01 SECONDS 5.833E-01 MINUTES 9.722E-03 HOURS 4.051E-04 DAYS*****
          0.0 GAS TEMPERATURE = 1.419E+02 DEG C
IODINE CONCENTRATION IN GRAMS-1/CC OR SQ CM
FORM      GAS PHASE  SUMP LIQ  SURFACE  ANNULUS
12        4.300E-08  1.853E-06  4.599E-09  4.292E-13
CH31     4.820E-09  0.0        8.775E-08  4.788E-14
PART      0.0        0.0        0.0        0.0

IODINE ACCUMULATIONS IN GRAMS
AIRBORNE = 3.329E+03 SUMP = 3.192E+00 SUMP = 2.299E+00 WALL = 1.511E+01 TOTAL IODINE = 3.350E+03
RECIRC FILTER = 0.0 EXHAUST FILTER = 1.478E-05 LEAKAGE = 1.493E-07
ELEMENTAL IODINE PARTITION COEFFICIENT SYSTEM = 1.07E-01 FRESH SPRAY = 0.0 RECYCLE SPRAY = 0.0 LIQID FILM = 8.65E+03
ELEMENTAL IODINE AVERAGE ABSORPTION EFFICIENCY FRESH SPRAY = 0.0 RECYCLE SPRAY = 0.0

*** PROGRAM MIRAPB PRINT OUT OF TIME DEPENDENT DATA ***
T01 = 1.000E+02 T81 = 1.300E+02 T51 = 1.100E+02 TSPIN = 5.000E+01 SNS1 = 5.700E-04
SIM1 = 0.0 ARAS = 8.610E+03 AKAI = 8.610E+03

*** PROGRAM MIRAPB PRINT OUT OF TIME DEPENDENT DATA ***
T01 = 3.000E+02 T81 = 1.340E+02 T51 = 1.140E+02 TSPIN = 5.000E+01 SNS1 = 0.0
SIM1 = 0.0 ARAS = 8.610E+03 AKAI = 8.610E+03

*** PROGRAM MIRAPB PRINT OUT OF TIME DEPENDENT DATA ***
T01 = 5.000E+02 T81 = 1.300E+02 T51 = 1.140E+02 TSPIN = 5.000E+01 SNS1 = 0.0
SIM1 = 0.0 ARAS = 8.610E+03 AKAI = 8.610E+03

```

\*\*\* PROGRAM MIRAB PWR - IODINE REMOVAL ANALYSIS \*\*\*  
 \*\*\* FINAL DATA, IODINE CONCS. AND ACCUMLS. VERSUS TIME \*\*\*  
 RELEASE = 1.0

\*\*\*\*\* TOTAL TIME = 1.260E+03 SECONDS 2.1100E+01 MINUTES 3.500E-01 HOURS 1.458E+02 DAYS\*\*\*\*\*  
 IODINE CONCENTRATION IN GRAMS-I/CC OR SW CM GAS TEMPERATURE = 1.195E+02 DEG C  
 FORM: GAS PHASE LIQ. FILM SURFACE ANNULUS  
 I2 6.481E-15 1.637E-08 6.236E-07 1.521E-12  
 CH3I 4.818E-09 1.908E-10 2.028E-12 2.028E-12  
 PART 0.0 0.0  
 IODINE ACCUMULATIONS IN GRAMS SUMP = 2.908E+03 WALL = 1.074E+02  
 AIRBORNE = 3.348E+02 EXHAUST FILTER = 9.136E-03 LEAKAGE = 9.228E-05 TOTAL IODINE = 3.350E+03  
 RECIRC FILTER = 0.0  
 ELEMENTAL IODINE PARTITION COEFFICIENT SYSTEM = 5.69E+08 FRESH SPRAY = 1.40E+07 RECYCLE SPRAY = 0.0 LIQID FILM = 1.40E+07  
 ELEMENTAL IODINE AVERAGE ABSORPTION EFFICIENCY FRESH SPRAY = 5.35E-04 RECYCLE SPRAY = 0.0

\*\*\*\*\* TOTAL TIME = 1.500E+03 SECONDS 2.500E+01 MINUTES 4.167E-01 HOURS 1.736E+02 DAYS\*\*\*\*\*  
 IODINE CONCENTRATION IN GRAMS-I/CC OR SW CM GAS TEMPERATURE = 1.191E+02 DEG C  
 FORM: GAS PHASE LIQ. FILM SURFACE ANNULUS  
 I2 1.432E-12 -1.929E-07 6.237E-07 3.444E-06  
 CH3I 4.817E-09 2.138E-10 2.300E-12 2.300E-12  
 PART 0.0 0.0  
 IODINE ACCUMULATIONS IN GRAMS SUMP = 2.908E+03 WALL = 1.074E+02  
 AIRBORNE = 3.349E+02 EXHAUST FILTER = 1.129E-02 LEAKAGE = 1.141E-04 TOTAL IODINE = 3.350E+03  
 RECIRC FILTER = 0.0  
 ELEMENTAL IODINE PARTITION COEFFICIENT SYSTEM = 2.41E+06 FRESH SPRAY = 9.42E+05 RECYCLE SPRAY = 0.0 LIQID FILM = 9.42E+05  
 ELEMENTAL IODINE AVERAGE ABSORPTION EFFICIENCY FRESH SPRAY = 4.15E-03 RECYCLE SPRAY = 0.0

\*\*\*\*\* TOTAL TIME = 2.000E+03 SECONDS 3.333E+01 MINUTES 5.556E-01 HOURS 2.315E+02 DAYS\*\*\*\*\*  
 IODINE CONCENTRATION IN GRAMS-I/CC OR SW CM GAS TEMPERATURE = 1.185E+02 DEG C  
 FORM: GAS PHASE LIQ. FILM SURFACE ANNULUS  
 I2 1.973E-11 -1.809E-06 6.238E-07 1.081E-12  
 CH3I 4.816E-09 2.498E-10 2.780E-12 2.780E-12  
 PART 0.0 0.0  
 IODINE ACCUMULATIONS IN GRAMS SUMP = 2.911E+03 WALL = 1.074E+02  
 AIRBORNE = 3.361E+02 EXHAUST FILTER = 1.598E-02 LEAKAGE = 1.514E-04 TOTAL IODINE = 3.351E+03  
 RECIRC FILTER = 0.0  
 ELEMENTAL IODINE PARTITION COEFFICIENT SYSTEM = 1.59E+05 FRESH SPRAY = 2.54E+05 RECYCLE SPRAY = 0.0 LIQID FILM = 2.54E+05  
 ELEMENTAL IODINE AVERAGE ABSORPTION EFFICIENCY FRESH SPRAY = 1.42E-02 RECYCLE SPRAY = 0.0

```

*** PROGRAM MIRAPB PWR = IODINE REMOVAL ANALYSIS *** RELEASE = 1.0
*** FINAL DATA... IODINE CONCNS, AND ACCUMLS, VERSUS TIME ***

***** TOTAL TIME = 2.400E+03 SECONDS 4.000E+01 MINUTES 6.667E-01 HOURS 2.778E-02 DAYS*****
IODINE CONCENTRATION IN GRAMS-1/CC OR SQ CM GAS TEMPERATURE = 1.181E+02 DEG C
FORM GAS PHASE LIQ. FILM SURFACE ANNULUS
I2 7.206E-14 -1.779E-06 2.758E-06 8.988E-13
CH3I 4.815E-09 2.707E-10 2.238E-07 3.090E-12
PART 0.0 0.0 0.0 0.0

IODINE ACCUMULATIONS IN GRAMS FILM = -3.095E+00 SUMP = 2.912E+03 WALL = 1.074E+02
AIRBORNE = 3.347E+02 EXHAUST FILTER = 1.989E-02 LEAKAGE = 2.100E-04 TOTAL IODINE = 3.351E+03
RECIRC FILTER = 0.0

ELEMENTAL IODINE PARTITION COEFFICIENT SYSTEM = 3.83E+07 FRESH SPRAY = 4.20E+06 RECYCLE SPRAY = 0.0 LIQID FILM = 4.20E+06
ELEMENTAL IODINE AVERAGE ABSORPTION EFFICIENCY FRESH SPRAY = 1.20E-03 RECYCLE SPRAY = 0.0

*** PROGRAM MIRA-PB PRINT OUT OF TIME DEPENDENT DATA ***
TOTI = 2.510E+03 TSI = 1.170E+02 TSI = 1.070E+02 TSPIN = 9.700E+01 SNSI = 0.0
SJM1 = 0.0 ARAS = 8.610E+03 AHAI = 8.610E+03

*** PROGRAM MIRA-PB PRINT OUT OF TIME DEPENDENT DATA ***
TOTI = 3.000E+03 TSI = 9.400E+01 TSI = 9.000E+01 TSPIN = 9.400E+01 SNSI = 0.0
SJM1 = 0.0 ARAS = 8.610E+03 AHAI = 8.610E+03

***** TOTAL TIME = 2.800E+03 SECONDS 4.667E+01 MINUTES 7.778E-01 HOURS 3.241E-02 DAYS*****
IODINE CONCENTRATION IN GRAMS-1/CC OR SQ CM GAS TEMPERATURE = 1.029E+02 DEG C
FORM GAS PHASE LIQ. FILM SURFACE ANNULUS
I2 9.686E-12 -1.776E-06 2.746E-06 7.478E-13
CH3I 4.815E-09 3.190E-10 6.239E-07 3.349E-12
PART 0.0 0.0 0.0 0.0

IODINE ACCUMULATIONS IN GRAMS FILM = -3.095E+00 SUMP = 2.911E+03 WALL = 1.074E+02
AIRBORNE = 3.353E+02 EXHAUST FILTER = 2.392E-02 LEAKAGE = 2.416E-04 TOTAL IODINE = 3.351E+03
RECIRC FILTER = 0.0

ELEMENTAL IODINE PARTITION COEFFICIENT SYSTEM = 2.94E+05 FRESH SPRAY = 2.57E+05 RECYCLE SPRAY = 2.34E+05 LIQID FILM = 2.57E+05
ELEMENTAL IODINE AVERAGE ABSORPTION EFFICIENCY FRESH SPRAY = 1.09E-03 RECYCLE SPRAY = 1.62E-02

*** PROGRAM MIRA-PB PRINT OUT OF TIME DEPENDENT DATA ***
TOTI = 6.000E+03 TSI = 1.000E+02 TSI = 9.500E+01 TSPIN = 9.400E+01 SNSI = 0.0
SJM1 = 0.0 ARAS = 8.610E+03 AHAI = 8.610E+03

***** TOTAL TIME = 3.400E+03 SECONDS 5.667E+01 MINUTES 9.444E-01 HOURS 3.935E-02 DAYS*****
IODINE CONCENTRATION IN GRAMS-1/CC OR SQ CM GAS TEMPERATURE = 9.504E+01 DEG C
FORM GAS PHASE LIQ. FILM SURFACE ANNULUS
I2 1.842E-11 -1.696E-06 2.742E-06 5.702E-13
CH3I 4.815E-09 4.350E-10 6.249E-07 3.056E-12
PART 0.0 0.0 0.0 0.0

IODINE ACCUMULATIONS IN GRAMS FILM = -2.920E+00 SUMP = 2.911E+03 WALL = 1.075E+02
AIRBORNE = 3.358E+02 EXHAUST FILTER = 3.015E-02 LEAKAGE = 3.045E-04 TOTAL IODINE = 3.351E+03
RECIRC FILTER = 0.0

ELEMENTAL IODINE PARTITION COEFFICIENT SYSTEM = 1.49E+05 FRESH SPRAY = 1.47E+05 RECYCLE SPRAY = 1.46E+05 LIQID FILM = 1.47E+05
ELEMENTAL IODINE AVERAGE ABSORPTION EFFICIENCY FRESH SPRAY = 1.09E-03 RECYCLE SPRAY = 2.78E-02
    
```

RELEASE = 1.0

\*\*\* PROGRAM MIRAPB P/R = IODINE REMOVAL ANALYSIS \*\*\*  
 \*\*\* FINAL DATA... IODINE CONCNS. AND ACCUMLS. VERSUS TIME \*\*\*

\*\*\*\* TOTAL TIME = 5.400E+02 SECONDS 9.000E+00 MINUTES 1.500E+01 HOURS 6.250E-03 DAYS \*\*\*\*\*  
 IODINE CONCENTRATION IN GRAMS-1/CC OR SQ CM GAS TEMPERATURE = 1.289E+02 DEG C  
 FORM LIQ. FILM SURFACE ANNULUS  
 12 2.420E-10 1.660E-08 4.673E-06 6.273E-07 2.113E-12  
 CH31 4.819E-09 9.972E-11 0.0  
 PART 0.0  
 IODINE ACCUMULATIONS IN GRAMS FILM = 2.894E-02 SUMP = 2.891E+03 WALL = 1.070E+02  
 AIRBORNE = 3.517E+02 EXHAUST FILTER = 3.133E-03 LEAKAGE = 3.164E-05 TOTAL IODINE = 3.350E+03  
 RECIRC FILTER = 0.0  
 ELEMENTAL IODINE PARTITION COEFFICIENT SYSTEM = 1.93E+04 FRESH SPRAY = 9.02E+04 RECYCLE SPRAY = 0.0 LIQID FILM = 9.02E+04  
 ELEMENTAL IODINE AVERAGE ABSORPTION EFFICIENCY FRESH SPRAY = 3.87E-02 RECYCLE SPRAY = 0.0

\*\*\*\* TOTAL TIME = 7.850E+02 SECONDS 1.300E+01 MINUTES 2.167E-01 HOURS 9.028E-03 DAYS \*\*\*\*\*  
 IODINE CONCENTRATION IN GRAMS-1/CC OR SQ CM GAS TEMPERATURE = 1.236E+02 DEG C  
 FORM LIQ. FILM SURFACE ANNULUS  
 12 1.231E-11 4.095E-08 4.306E-06 6.236E-07 1.899E-12  
 CH31 4.819E-09 1.331E-10 0.0  
 PART 0.0  
 IODINE ACCUMULATIONS IN GRAMS FILM = 1.883E-02 SUMP = 2.907E+03 WALL = 1.074E+02  
 AIRBORNE = 3.356E+02 EXHAUST FILTER = 3.097E-03 LEAKAGE = 3.098E-05 TOTAL IODINE = 3.350E+03  
 RECIRC FILTER = 0.0  
 ELEMENTAL IODINE PARTITION COEFFICIENT SYSTEM = 3.50E+05 FRESH SPRAY = 3.58E+05 RECYCLE SPRAY = 0.0 LIQID FILM = 3.58E+05  
 ELEMENTAL IODINE AVERAGE ABSORPTION EFFICIENCY FRESH SPRAY = 1.02E-02 RECYCLE SPRAY = 0.0

\*\*\* PROGRAM MIRAPB PRINT OUT OF TIME DEPENDENT DATA \*\*\*  
 TOTL = 2.500E+03 TSI = 1.180E+02 ISI = 1.060E+02 TSPIN = 5.000E+01 SNSI = 0.0  
 SMI = 0.0 ARAS = 8.610E+03 ARAI = 8.610E+03

\*\*\*\* TOTAL TIME = 1.020E+03 SECONDS 1.700E+01 MINUTES 2.833E-01 HOURS 1.181E-02 DAYS \*\*\*\*\*  
 IODINE CONCENTRATION IN GRAMS-1/CC OR SQ CM GAS TEMPERATURE = 1.200E+02 DEG C  
 FORM LIQ. FILM SURFACE ANNULUS  
 12 5.052E-13 1.645E-08 3.975E-06 6.236E-07 1.699E-12  
 CH31 4.819E-09 1.627E-10 1.723E-12  
 PART 0.0  
 IODINE ACCUMULATIONS IN GRAMS FILM = 2.794E-02 SUMP = 2.908E+03 WALL = 1.074E+02  
 AIRBORNE = 3.349E+02 EXHAUST FILTER = 7.051E-03 LEAKAGE = 7.122E-05 TOTAL IODINE = 3.350E+03  
 RECIRC FILTER = 0.0  
 ELEMENTAL IODINE PARTITION COEFFICIENT SYSTEM = 7.87E+06 FRESH SPRAY = 1.59E+06 RECYCLE SPRAY = 0.0 LIQID FILM = 1.59E+06  
 ELEMENTAL IODINE AVERAGE ABSORPTION EFFICIENCY FRESH SPRAY = 2.62E-03 RECYCLE SPRAY = 0.0

```

*** PROGRAM MIRAPB PWR = IODINE REMOVAL ANALYSIS *** RELEASE = 1.0
*** FINAL DATA... IODINE CONCNS, AND ACCUMLS. VERSUS TIME ***

**** TOTAL TIME = 3.800E+03 SECONDS 6.333E+01 MINUTES 1.056E+00 HOURS 4.398E-02 DAYS*****
IODINE CONCENTRATION IN GRAMS-1/CC OR S@ CM GAS TEMPERATURE = 9.600E+01 DEG C
FORM LIQ. FILM SURFACE ANNULUS
I2 1.843E-11 -1.637E-06 SUMP LIQ 2.745E-06 4.768E-13
CH3I 4.812E-09 5.1103E-10 6.246E-07 3.818E-12
PART 0.0 0.0

IODINE ACCUMULATIONS IN GRAMS FILM = -2.819E+00 SUMP = 2.911E+03 WALL = 1.076E+02
AIRBORNE = 3.357E+02 EXHAUST FILTER = 3.439E-02 LEAKAGE = 3.474E-04 TOTAL IODINE = 3.351E+03
RECIRC FILTER = 0.0

ELEMENTAL IODINE PARTITION COEFFICIENT SYSTEM = 1.49E+05 FRESH SPRAY = 1.47E+05 RECYCLE SPRAY = 1.46E+05 LIQID FILM = 1.47E+05
ELEMENTAL IODINE AVERAGE ABSORPTION EFFICIENCY FRESH SPRAY = 1.09E-03 RECYCLE SPRAY = 2.78E-02

**** TOTAL TIME = 5.400E+03 SECONDS 9.000E+01 MINUTES 1.500E+00 HOURS 6.250E-02 DAYS*****
IODINE CONCENTRATION IN GRAMS-1/CC OR S@ CM GAS TEMPERATURE = 9.900E+01 DEG C
FORM LIQ. FILM SURFACE ANNULUS
I2 1.844E-11 -1.409E-06 SUMP LIQ 2.745E-06 2.366E-13
CH3I 4.800E-09 7.655E-10 6.257E-07 4.234E-12
PART 0.0 0.0

IODINE ACCUMULATIONS IN GRAMS FILM = -2.426E+00 SUMP = 2.910E+03 WALL = 1.077E+02
AIRBORNE = 3.354E+02 EXHAUST FILTER = 3.191E-02 LEAKAGE = 3.243E-04 TOTAL IODINE = 3.351E+03
RECIRC FILTER = 0.0

ELEMENTAL IODINE PARTITION COEFFICIENT SYSTEM = 1.49E+05 FRESH SPRAY = 1.47E+05 RECYCLE SPRAY = 1.46E+05 LIQID FILM = 1.47E+05
ELEMENTAL IODINE AVERAGE ABSORPTION EFFICIENCY FRESH SPRAY = 1.09E-03 RECYCLE SPRAY = 2.78E-02

*** PROGRAM MIRA-PB PRINT OUT OF TIME DEPENDENT DATA ***
T0T1 = 1.000E+04 TSI = 9.700E+01 TIM1 = 9.200E+01 TSPIN = 9.300E+01 SNS1 = 0.0
SIM1 = 0.0 ARA5 = 6.610E+03 ARA1 = 6.610E+03

**** TOTAL TIME = 7.000E+03 SECONDS 1.167E+02 MINUTES 1.944E+00 HOURS 8.102E-02 DAYS*****
IODINE CONCENTRATION IN GRAMS-1/CC OR S@ CM GAS TEMPERATURE = 9.900E+01 DEG C
FORM LIQ. FILM SURFACE ANNULUS
I2 1.459E-11 -1.217E-06 SUMP LIQ 2.745E-06 1.206E-13
CH3I 4.805E-09 9.251E-10 6.267E-07 4.430E-12
PART 0.0 0.0

IODINE ACCUMULATIONS IN GRAMS FILM = -2.096E+00 SUMP = 2.910E+03 WALL = 1.079E+02
AIRBORNE = 3.350E+02 EXHAUST FILTER = 6.991E-02 LEAKAGE = 7.061E-04 TOTAL IODINE = 3.351E+03
RECIRC FILTER = 0.0

ELEMENTAL IODINE PARTITION COEFFICIENT SYSTEM = 1.88E+05 FRESH SPRAY = 1.86E+05 RECYCLE SPRAY = 1.84E+05 LIQID FILM = 1.86E+05
ELEMENTAL IODINE AVERAGE ABSORPTION EFFICIENCY FRESH SPRAY = 1.09E-03 RECYCLE SPRAY = 2.09E-02

```

```

***** TOTAL TIME = 3.000E+02 SECONDS          5.000E+00 MINUTES          8.333E+02 HOURS          3.472E+03 DAYS*****
IODINE CONCENTRATION IN GRAMS-1/CC JS 50 CM
FORM      GAS PHASE      LIQ. FILM      SURF. FILM
I2        3.759E-09        2.540E-07        4.720E-06        5.606E-07
CH3I     4.820E-09        5.824E-11        5.824E-11        3.761E-13
PART      0.0
GAS TEMPERATURE = 1.340E+02 DEG C

IODINE ACCUMULATIONS IN GRAMS
AIRBORNE = 5.958E+02      FILM = 4.374E+01      SUMP = 2.654E+03      WALL = 1.000E+02
RECIRC FILTER = 0.0      EXHAUST FILTER = 1.548E-03      LEAKAGE = 1.362E-05

ELEMENTAL IODINE PARTITION COEFFICIENT SYSTEM = 1.28E+03      FRESH SPRAY = 2.29E+04      RECYCLE SPRAY = 0.0      TOTAL IODINE = 3.350E+03
ELEMENTAL IODINE AVERAGE ABSORPTION EFFICIENCY      FRESH SPRAY = 1.92E-01      RECYCLE SPRAY = 0.0      LIQID FILM = 2.29E+04

*** PROGRAM MIRA-P6 PRINT OUT OF TIME DEPENDENT DATA ***
TOTI = 1.000E+03      TFI = 1.200E+02      TSI = 1.150E+02      TIMI = 1.150E+02      TSPIN = 5.000E+01      SNSI = 0.0
SIMI = 0.0      AKAS = 8.610E+03      APAI = 3.610E+03      RECYCLE SPRAY = 0.0
    
```



JAERI-M 7594

600.		82.	84.	64.	0.	0.	2580.	2580.
610.		52.	82.	64.	0.	0.	2580.	2580.
1.	E3	53.	70.	66.	0.	0.	2580.	2580.
5.	E3	60.	60.	78.	0.	0.	2580.	2580.
1.	E4	65.	65.	83.	0.	0.	2580.	2580.
3.	E4	68.	68.	88.	0.	0.	2580.	2580.
5.	E4	67.	67.	85.	0.	0.	2580.	2580.
1.	E5	61.	61.	76.	0.	0.	2580.	2580.
5.	E5	46.	46.	54.	0.	0.	2580.	2580.
1.	E6	42.	42.	50.	0.	0.	2580.	2580.
3.	E6	40.	40.	47.	0.	0.	2580.	2580.





PROGRAM MIRAPB BWR - IODINE REMOVAL ANALYSIS \*\*\* RELEASE = 1.0  
 \*\*\* FINAL DATA... IODINE CONCNS, AND ACCUMLS, VERSUS TIME \*\*\*

\*\*\*\*\* TOTAL TIME = 0.0 SECONDS 0.0 MINUTES 0.0 HOURS 0.0 DAYS\*\*\*\*\*  
 GAS PHASE CONCENTRATIONS: LIQUID AND SURFACE CONCENTRATIONS IN GRAMS-T/CC OR S/G CM  
 FORM DRYWELL WETWELL REFUEL,BLDG, DRYWELL FILM DRYWELL POOL DRYWELL WALLS WETWELL POOL  
 I2 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0  
 CH31 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0  
 PART 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

IODINE ACCUMULATIONS IN GRAMS  
 AIRBORNE IN DRYWELL = 0.0 AIRBORNE IN WETWELL = 0.0 AIRBORNE IN REFUEL,BLDG. = 0.0  
 DRYWELL POOL = 0.0 WETWELL POOL = 0.0 DRYWELL WALLS = 0.0  
 DRYWELL COND.FILM = 0.0 BLDG.EXHAUST FILTER = 0.0 FILTERED LEAKAGE = 0.0 TOTAL IODINE = 0.0

ELEMENTAL IODINE PARTITION COEFFICIENT SYSTEM = 0.0 RECYCLE SPRAY = 0.0 LIQUID FILM = 0.0 WETWELL = 0.0

ELEMENTAL IODINE AVERAGE ABSORPTION EFFICIENCY RECYCLE SPRAY = 0.0

\*\*\* PROGRAM MIRA-PB PRINT OUT OF TIME DEPENDENT DATA \*\*\*  
 TOTL = 1.000E+00 TB1 = 1.070E+02 TS1 = 6.500E+01 TL2 = 3.100E+01 SNS1 = 0.0 Q12 = 3.600E+04  
 AW1 = 2.580E+03 AD1 = 2.580E+03

\*\*\* PROGRAM MIRA-PB PRINT OUT OF TIME DEPENDENT DATA \*\*\*  
 TOTL = 1.000E+01 TB1 = 1.370E+02 TS1 = 8.500E+01 TL2 = 4.100E+01 SNS1 = 9.000E-04 Q12 = 3.600E+04  
 AW1 = 2.580E+03 AD1 = 2.580E+03

\*\*\* PROGRAM MIRA-PB PRINT OUT OF TIME DEPENDENT DATA \*\*\*  
 TOTL = 2.000E+01 TB1 = 1.370E+02 TS1 = 9.500E+01 TL2 = 5.000E+01 SNS1 = 2.000E-03 Q12 = 3.600E+04  
 AW1 = 2.580E+03 AD1 = 2.580E+03

\*\*\* PROGRAM MIRA-PB PRINT OUT OF TIME DEPENDENT DATA \*\*\*  
 TOTL = 5.000E+01 TB1 = 1.370E+02 TS1 = 1.000E+02 TL2 = 5.800E+01 SNS1 = 1.800E-03 Q12 = 3.000E+04  
 AW1 = 2.580E+03 AD1 = 2.580E+03

\*\*\* PROGRAM MIRA-PB PRINT OUT OF TIME DEPENDENT DATA \*\*\*  
 TOTL = 1.000E+02 TB1 = 1.370E+02 TS1 = 1.020E+02 TL2 = 5.900E+01 SNS1 = 1.450E-03 Q12 = 2.000E+04  
 AW1 = 2.580E+03 AD1 = 2.580E+03

\*\*\* PROGRAM MIRA-PB PRINT OUT OF TIME DEPENDENT DATA \*\*\*  
 TOTL = 2.000E+02 TB1 = 8.700E+01 TS1 = 9.400E+01 TL2 = 6.000E+01 SNS1 = 7.000E-04 Q12 = 0.0  
 AW1 = 2.580E+03 AD1 = 2.580E+03

\*\*\* PROGRAM MIRA-PB PRINT OUT OF TIME DEPENDENT DATA \*\*\*  
 TOTL = 3.000E+02 TB1 = 8.300E+01 TS1 = 9.200E+01 TL2 = 6.100E+01 SNS1 = 0.0 Q12 = 0.0  
 AW1 = 2.580E+03 AD1 = 2.580E+03

\*\*\*\*\* TOTAL TIME = 2.000E+02 SECONDS 3.333E+00 MINUTES 3.556E-02 HOURS 2.315E-03 DAYS\*\*\*\*\*

GAS PHASE CONCENTRATIONS: LIQUID AND SURFACE CONCENTRATIONS IN GRAMS-T/CC OR S/G CM  
 FORM DRYWELL WETWELL REFUEL,BLDG, DRYWELL FILM DRYWELL POOL DRYWELL WALLS WETWELL POOL  
 I2 5.576E-07 3.015E-09 4.687E-12 1.408E-05 9.419E-07 7.422E-06 8.617E-08  
 CH31 7.111E-08 5.982E-09 5.866E-13 0.0 0.0 0.0 4.722E-09  
 PART 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

IODINE ACCUMULATIONS IN GRAMS  
 AIRBORNE IN DRYWELL = 3.584E+03 AIRBORNE IN WETWELL = 3.689E+01 AIRBORNE IN REFUEL,BLDG. = 1.350E-01  
 DRYWELL POOL = 1.017E+02 WETWELL POOL = 3.872E+02 DRYWELL WALLS = 3.830E+02  
 DRYWELL COND.FILM = 7.264E+00 BLDG.EXHAUST FILTER = 1.131E-04 FILTERED LEAKAGE = 1.257E-05 TOTAL IODINE = 4.500E+03

ELEMENTAL IODINE PARTITION COEFFICIENT SYSTEM = 3.30E-01 RECYCLE SPRAY = 0.0 LIQUID FILM = 5.64E+01 WETWELL = 4.56E+01

ELEMENTAL IODINE AVERAGE ABSORPTION EFFICIENCY RECYCLE SPRAY = 0.0

\*\*\* PROGRAM MJRA-PB PRINT OUT OF TIME DEPENDENT DATA \*\*\*  
 TOTI = 6.000E+02 TSI = 8.200E+01 TL2 = 6.400E+01 SNS1 = 0.0 @12 = 0.0  
 AW1 = 2.580E+03 AD1 = 2.580E+03

\*\*\*\* TOTAL TIME = 4.000E+02 SECONDS 6.667E+00 MINUTES 1.111E-01 HOURS 4.630E-03 DAYS\*\*\*\*\*

GAS PHASE CONCENTRATIONS, LIQUID AND SURFACE CONCENTRATIONS IN GRAMS-1/CC OR SW CM

FORM	WETWELL	REFUEL,BLDG.	DRYWELL FILM	DRYWELL POOL	DRYWELL WALLS	WETWELL POOL
I2	4.945E-07	3.015E-09	2.716E-05	1.068E-06	1.400E-05	8.617E-08
CH3I	7.111E-08	5.982E-09	1.355E-12	0.0	0.0	4.722E-09
PART	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

IODINE ACCUMULATIONS IN GRAMS

AIRBORNE IN DRYWELL	3.224E+03	AIRBORNE IN WETWELL	3.689E+01	AIRBORNE IN REFUEL,BLDG.	2.917E-01
WETWELL POOL	1.153E+02	WETWELL POOL	3.872E+02	DRYWELL WALLS	7.226E+02
DRYWELL COND,FILM	1.402E+01	BLDG,EXHAUST FILTER	5.608E-04	FILTERED LEAKAGE	6.231E-05
TOTAL IODINE	3.369E+03	TOTAL IODINE	4.500E+03	TOTAL IODINE	4.500E+03

ELEMENTAL IODINE PARTITION COEFFICIENT SYSTEM = 3.82E-01 RECYCLE SPRAY = 0.0 LIQUID FILM = 5.51E+01 WETWELL = 4.71E+01

ELEMENTAL IODINE AVERAGE ABSORPTION EFFICIENCY RECYCLE SPRAY = 0.0

\*\*\* PROGRAM MJRA-PB PRINT OUT OF TIME DEPENDENT DATA \*\*\*  
 TOTI = 6.110E+02 TSI = 5.200E+01 TL2 = 6.400E+01 SNS1 = 0.0 @12 = 0.0  
 AW1 = 2.580E+03 AD1 = 2.580E+03

RELEASE = 1.0

\*\*\* PROGRAM MIRAP BWR - IODINE REMOVAL ANALYSIS \*\*\*  
 \*\*\* FINAL DATA... IODINE CONCNS, AND ACCUMLS. VERSUS TIME \*\*\*

\*\*\*\* TOTAL TIME = 6.000E+02 SECONDS 1.000E+01 MINUTES 1.667E-01 HOURS 6.944E-03 DAYS \*\*\*\*\*  
 GAS PHASE CONCENTRATIONS, LIQUID AND SURFACE CONCENTRATIONS IN GRAMS-1/CC OR SW CM  
 FORM DRYWELL WETWELL REFUEL,BLDG. DRYWELL FILM DRYWELL POOL DRYWELL WALLS WETWELL POOL  
 12 4.555E-07 3.015E-09 1.484E-11 2.597E-05 1.068E-06 1.832E-05 8.617E-08  
 CH3I 7.111E-08 5.982E-09 2.116E-12 0.0 0.0 0.0 4.722E-09  
 PART 0.0 0.0  
 IODINE ACCUMULATIONS IN GRAMS AIRBORNE IN WETWELL = 3.689E+01 AIRBORNE IN REFUEL,BLDG. = 4.341E-01  
 AIRBORNE IN DRYWELL = 3.002E+03 WETWELL POOL = 3.872E+02 DRYWELL WALLS = 9.422E+02  
 DRYWELL COND.FILM = 1.340E+01 BLDG.EXHAUST FILTER = 1.319E-03 FILTERED LEAKAGE = 1.469E-04 TOTAL IODINE = 4.500E+03  
 ELEMENTAL IODINE PARTITION COEFFICIENT SYSTEM = 4.12E+01 RECYCLE SPRAY = 0.0 LIQUID FILM = 5.69E+01 WETWELL = 4.82E+01  
 ELEMENTAL IODINE AVERAGE ABSORPTION EFFICIENCY RECYCLE SPRAY = 0.0

\*\*\* PROGRAM MIRAP-PB PRINT OUT OF TIME DEPENDENT DATA \*\*\*  
 TOT1 = 1.000E+03 T01 = 5.300E+01 T02 = 7.000E+01 TL2 = 6.600E+01 SNS1 = 0.0 Q12 = 0.0  
 AW1 = 2.580E+03 AD1 = 2.580E+03

\*\*\*\* TOTAL TIME = 8.000E+02 SECONDS 1.333E+01 MINUTES 2.222E-01 HOURS 9.259E-03 DAYS \*\*\*\*\*  
 GAS PHASE CONCENTRATIONS, LIQUID AND SURFACE CONCENTRATIONS IN GRAMS-1/CC OR SW CM  
 FORM DRYWELL WETWELL REFUEL,BLDG. DRYWELL FILM DRYWELL POOL DRYWELL WALLS WETWELL POOL  
 12 2.862E-07 3.015E-09 1.847E-11 1.612E-05 4.724E-06 2.311E-05 1.632E-07  
 CH3I 7.052E-08 5.982E-09 2.868E-12 0.0 2.323E-08 4.921E-09  
 PART 0.0 0.0  
 IODINE ACCUMULATIONS IN GRAMS AIRBORNE IN WETWELL = 3.689E+01 AIRBORNE IN REFUEL,BLDG. = 5.463E-01  
 AIRBORNE IN DRYWELL = 2.033E+03 WETWELL POOL = 7.162E+02 DRYWELL WALLS = 1.192E+03  
 DRYWELL COND.FILM = 8.317E+00 BLDG.EXHAUST FILTER = 2.348E-03 FILTERED LEAKAGE = 2.609E-04 TOTAL IODINE = 4.500E+03  
 ELEMENTAL IODINE PARTITION COEFFICIENT SYSTEM = 1.65E+00 RECYCLE SPRAY = 5.58E+01 LIQUID FILM = 5.58E+01 WETWELL = 5.61E+01  
 ELEMENTAL IODINE AVERAGE ABSORPTION EFFICIENCY RECYCLE SPRAY = 3.74E-01

\*\*\* PROGRAM MIRAP-PB PRINT OUT OF TIME DEPENDENT DATA \*\*\*  
 TOT1 = 5.000E+03 T01 = 6.000E+01 T02 = 6.000E+01 TL2 = 7.800E+01 SNS1 = 0.0 Q12 = 0.0  
 AW1 = 2.580E+03 AD1 = 2.580E+03

\*\*\*\* TOTAL TIME = 1.000E+03 SECONDS 1.667E+01 MINUTES 2.776E-01 HOURS 1.157E-02 DAYS \*\*\*\*\*  
 GAS PHASE CONCENTRATIONS, LIQUID AND SURFACE CONCENTRATIONS IN GRAMS-1/CC OR SW CM  
 FORM DRYWELL WETWELL REFUEL,BLDG. DRYWELL FILM DRYWELL POOL DRYWELL WALLS WETWELL POOL  
 12 1.729E-07 3.015E-09 2.064E-11 1.123E-05 4.888E-06 2.609E-05 2.751E-07  
 CH3I 6.993E-08 5.982E-09 3.606E-12 0.0 3.252E-08 5.474E-09  
 PART 0.0 0.0  
 IODINE ACCUMULATIONS IN GRAMS AIRBORNE IN WETWELL = 1.384E+03 AIRBORNE IN REFUEL,BLDG. = 6.207E-01  
 AIRBORNE IN DRYWELL = 5.314E+02 WETWELL POOL = 1.195E+03 DRYWELL WALLS = 1.346E+03  
 DRYWELL COND.FILM = 5.793E+00 BLDG.EXHAUST FILTER = 3.569E-03 FILTERED LEAKAGE = 3.966E-04 TOTAL IODINE = 4.500E+03  
 ELEMENTAL IODINE PARTITION COEFFICIENT SYSTEM = 3.82E+00 RECYCLE SPRAY = 6.42E+01 LIQUID FILM = 6.42E+01 WETWELL = 6.68E+01  
 ELEMENTAL IODINE AVERAGE ABSORPTION EFFICIENCY RECYCLE SPRAY = 3.70E-01

PROGRAM MIRAPB B+R - IODINE REMOVAL ANALYSIS \*\*\*  
 \*\*\* FINAL DATA... IODINE CONCNS. AND ACCUMLS. VERSUS TIME \*\*\*  
 RELEASE = 1.0

\*\*\*\*\* TOTAL TIME = 1.200E+03 SECONDS 2.000E+01 MINUTES 3.333E-01 HOURS 1.389E-02 DAYS\*\*\*\*\*  
 GAS PHASE CONCENTRATIONS, LIQUID AND SURFACE CONCENTRATIONS IN GRAMS-I/CC OR SW CM  
 FORM DRYWELL WETWELL REFUEL,BLDG. DRYWELL FILM DRYWELL POOL DRYWELL WALLS WETWELL POOL  
 12 9.926E-08 3.015E-09 2.184E-11 7.686E-06 4.036E-06 2.785E-05 2.739E-07  
 CH31 6.933E-08 5.982E-09 4.331E-12 0.0 3.623E-08 6.158E-09  
 PART 0.0

IODINE ACCUMULATIONS IN GRAMS AIRBORNE IN WETWELL = 3.689E+01 AIRBORNE IN REFUEL,BLDG. = 6.700E-01  
 AIRBORNE IN DRYWELL = 4.420E+02 WETWELL POOL = 1.619E+03 DRYWELL WALLS = 1.437E+03 TOTAL IODINE = 4.500E+03  
 DRYWELL POOL = 3.966E+00 BLDG,EXHAUST FILTER = 4.917E-03 FILTERED LEAKAGE = 5.463E-04  
 DRYWELL COND,FILM = 3.966E+00 SYSTEM = 7.88E+00 RECYCLE SPRAY = 7.63E+01 LIQUID FILM = 7.63E+01 WETWELL = 8.22E+01  
 ELEMENTAL IODINE PARTITION COEFFICIENT SYSTEM = 7.88E+00 RECYCLE SPRAY = 7.63E+01 LIQUID FILM = 7.63E+01 WETWELL = 8.22E+01  
 ELEMENTAL IODINE AVERAGE ABSORPTION EFFICIENCY RECYCLE SPRAY = 3.66E-01

\*\*\*\*\* TOTAL TIME = 1.400E+03 SECONDS 2.333E+01 MINUTES 3.889E-01 HOURS 1.620E-02 DAYS\*\*\*\*\*  
 GAS PHASE CONCENTRATIONS, LIQUID AND SURFACE CONCENTRATIONS IN GRAMS-I/CC OR SW CM  
 FORM DRYWELL WETWELL REFUEL,BLDG. DRYWELL FILM DRYWELL POOL DRYWELL WALLS WETWELL POOL  
 12 5.313E-08 3.015E-09 2.242E-11 5.134E-06 3.093E-06 2.883E-05 4.844E-07  
 CH31 6.878E-08 5.982E-09 5.044E-12 0.0 3.776E-08 6.879E-09  
 PART 0.0

IODINE ACCUMULATIONS IN GRAMS AIRBORNE IN WETWELL = 3.689E+01 AIRBORNE IN REFUEL,BLDG. = 7.032E-01  
 AIRBORNE IN DRYWELL = 6.949E+02 WETWELL POOL = 1.940E+03 DRYWELL WALLS = 1.498E+03 TOTAL IODINE = 4.501E+03  
 DRYWELL POOL = 3.361E+02 WETWELL COND,FILM = 2.649E+00 BLDG,EXHAUST FILTER = 6.349E-03 FILTERED LEAKAGE = 7.055E-04  
 DRYWELL COND,FILM = 2.649E+00 SYSTEM = 1.60E+01 RECYCLE SPRAY = 9.48E+01 LIQUID FILM = 9.48E+01 WETWELL = 1.06E+02  
 ELEMENTAL IODINE PARTITION COEFFICIENT SYSTEM = 1.60E+01 RECYCLE SPRAY = 9.48E+01 LIQUID FILM = 9.48E+01 WETWELL = 1.06E+02  
 ELEMENTAL IODINE AVERAGE ABSORPTION EFFICIENCY RECYCLE SPRAY = 3.62E-01

\*\*\*\*\* TOTAL TIME = 1.600E+03 SECONDS 2.667E+01 MINUTES 4.444E-01 HOURS 1.852E-02 DAYS\*\*\*\*\*  
 GAS PHASE CONCENTRATIONS, LIQUID AND SURFACE CONCENTRATIONS IN GRAMS-I/CC OR SW CM  
 FORM DRYWELL WETWELL REFUEL,BLDG. DRYWELL FILM DRYWELL POOL DRYWELL WALLS WETWELL POOL  
 12 2.582E-08 3.015E-09 2.263E-11 3.312E-06 2.263E-06 2.933E-05 5.001E-07  
 CH31 6.822E-08 5.982E-09 5.745E-12 0.0 3.844E-08 7.609E-09  
 PART 0.0

IODINE ACCUMULATIONS IN GRAMS AIRBORNE IN WETWELL = 3.689E+01 AIRBORNE IN REFUEL,BLDG. = 7.264E-01  
 AIRBORNE IN DRYWELL = 5.361E+02 WETWELL POOL = 2.163E+03 DRYWELL WALLS = 1.514E+03 TOTAL IODINE = 4.501E+03  
 DRYWELL POOL = 2.486E+02 WETWELL COND,FILM = 1.709E+00 BLDG,EXHAUST FILTER = 7.840E-03 FILTERED LEAKAGE = 8.713E-04  
 DRYWELL COND,FILM = 1.709E+00 SYSTEM = 3.34E+01 RECYCLE SPRAY = 1.25E+02 LIQUID FILM = 1.25E+02 WETWELL = 1.44E+02  
 ELEMENTAL IODINE PARTITION COEFFICIENT SYSTEM = 3.34E+01 RECYCLE SPRAY = 1.25E+02 LIQUID FILM = 1.25E+02 WETWELL = 1.44E+02  
 ELEMENTAL IODINE AVERAGE ABSORPTION EFFICIENCY RECYCLE SPRAY = 3.58E-01

RELEASE = 1.0

\*\*\* PROGRAM MIRAPB BAK - IODINE REMOVAL ANALYSIS \*\*\*  
 \*\*\* FINAL DATA... IODINE CONCNS. AND ACCUMLS. VERSUS TIME \*\*\*

\*\*\*\* TOTAL TIME = 1.800E+03 SECONDS 3.000E+01 MINUTES 5.000E-01 HOURS 2.083E-02 DAYS\*\*\*\*\*  
 GAS PHASE CONCENTRATIONS, LIQUID AND SURFACE CONCENTRATIONS IN GRAMS-1/CC OR SW CM  
 FORM DRYWELL WETWELL REFUEL,BLDG. DRYWELL FILM DRYWELL POOL DRYWELL WALLS WETWELL POOL  
 I2 1.106E-08 3.015E-09 2.262E-11 2.043E-06 1.624E-06 2.957E-05 5.334E-07  
 CH31 6.767E-08 5.982E-09 6.433E-12 0.0 3.879E-08 8.333E-09  
 PART 0.0 0.0

IODINE ACCUMULATIONS IN GRAMS  
 AIRBORNE IN DRYWELL = 4.488E+02 AIRBORNE IN WETWELL = 3.689E+01 AIRBORNE IN REFUEL,BLDG. = 7.439E-01  
 DRYWELL POOL = 1.795E+02 WETWELL POOL = 2.308E+03 DRYWELL WALLS = 1.526E+03  
 DRYWELL COND.FILM = 1.055E+00 BLDG.EXHAUST FILTER = 9.372E-03 FILTERED LEAKAGE = 1.041E-03 TOTAL IODINE = 4.501E+03  
 ELEMENTAL IODINE PARTITION COEFFICIENT SYSTEM = 7.28E+01 RECYCLE SPRAY = 1.77E+02 LIQUID FILM = 1.77E+02 WETWELL = 2.10E+02  
 ELEMENTAL IODINE AVERAGE ABSORPTION EFFICIENCY RECYCLE SPRAY = 3.54E-01

\*\*\*\* TOTAL TIME = 2.200E+03 SECONDS 3.667E+01 MINUTES 6.111E-01 HOURS 2.546E-02 DAYS\*\*\*\*\*  
 GAS PHASE CONCENTRATIONS, LIQUID AND SURFACE CONCENTRATIONS IN GRAMS-1/CC OR SW CM  
 FORM DRYWELL WETWELL REFUEL,BLDG. DRYWELL FILM DRYWELL POOL DRYWELL WALLS WETWELL POOL  
 I2 1.807E-09 3.015E-09 2.235E-11 7.778E-07 6.640E-07 2.970E-05 5.636E-07  
 CH31 6.601E-08 5.982E-09 7.774E-12 0.0 3.919E-08 9.749E-09  
 PART 0.0 0.0

IODINE ACCUMULATIONS IN GRAMS  
 AIRBORNE IN DRYWELL = 3.900E+02 AIRBORNE IN WETWELL = 3.689E+01 AIRBORNE IN REFUEL,BLDG. = 7.713E-01  
 DRYWELL POOL = 9.754E+01 WETWELL POOL = 2.443E+03 DRYWELL WALLS = 1.532E+03  
 DRYWELL COND.FILM = 4.013E-01 BLDG.EXHAUST FILTER = 1.253E-02 FILTERED LEAKAGE = 1.392E-03 TOTAL IODINE = 4.501E+03  
 ELEMENTAL IODINE PARTITION COEFFICIENT SYSTEM = 2.47E+02 RECYCLE SPRAY = 4.01E+02 LIQUID FILM = 4.01E+02 WETWELL = 4.92E+02  
 ELEMENTAL IODINE AVERAGE ABSORPTION EFFICIENCY RECYCLE SPRAY = 3.49E-01

\*\*\*\* TOTAL TIME = 2.600E+03 SECONDS 4.333E+01 MINUTES 7.222E-01 HOURS 3.009E-02 DAYS\*\*\*\*\*  
 GAS PHASE CONCENTRATIONS, LIQUID AND SURFACE CONCENTRATIONS IN GRAMS-1/CC OR SW CM  
 FORM DRYWELL WETWELL REFUEL,BLDG. DRYWELL FILM DRYWELL POOL DRYWELL WALLS WETWELL POOL  
 I2 1.072E-09 3.015E-09 2.202E-11 6.057E-07 6.219E-07 2.973E-05 5.704E-07  
 CH31 6.561E-08 5.982E-09 9.070E-12 0.0 3.602E-08 1.111E-08  
 PART 0.0 0.0

IODINE ACCUMULATIONS IN GRAMS  
 AIRBORNE IN DRYWELL = 3.901E+02 AIRBORNE IN WETWELL = 3.689E+01 AIRBORNE IN REFUEL,BLDG. = 7.958E-01  
 DRYWELL POOL = 7.128E+01 WETWELL POOL = 2.477E+03 DRYWELL WALLS = 1.534E+03  
 DRYWELL COND.FILM = 3.126E-01 BLDG.EXHAUST FILTER = 1.580E-02 FILTERED LEAKAGE = 1.755E-03 TOTAL IODINE = 4.501E+03  
 ELEMENTAL IODINE PARTITION COEFFICIENT SYSTEM = 3.03E+02 RECYCLE SPRAY = 5.40E+02 LIQUID FILM = 5.58E+02 WETWELL = 7.55E+02  
 ELEMENTAL IODINE AVERAGE ABSORPTION EFFICIENCY RECYCLE SPRAY = 3.64E-01

\*\*\* PROGRAM MIRAPB BWR - IODINE REMOVAL ANALYSIS \*\*\*  
 \*\*\* FINAL DATA... IODINE CONCNS. AND ACCUMLS. VERSUS TIME \*\*\*  
 RELEASE = 1.0

\*\*\*\*\* TOTAL TIME = 3.000E+03 SECONDS 5.000E+01 MINUTES 8.333E-01 HOURS 3.472E-02 DAYS\*\*\*\*\*  
 GAS PHASE CONCENTRATIONS, LIQUID AND SURFACE CONCENTRATIONS IN GRAMS-I/CC OR SW CM  
 FORM DRYWELL WETWELL REFUEL.BLDG. DRYWELL FILM DRYWELL POOL DRYWELL WALLS WETWELL POOL  
 I2 1.035E-09 3.035E-09 2.168E-11 5.872E-07 5.752E-07 2.975E-05 5.714E-07  
 CH3I 6.477E-08 5.981E-09 1.032E-11 0.0 3.600E-08 1.229E-08  
 PART 0.0 0.0  
 IODINE ACCUMULATIONS IN GRAMS  
 AIRBORNE IN DRYWELL = 3.751E+02 AIRBORNE IN WETWELL = 3.689E+01 AIRBORNE IN REFUEL.BLDG. = 8.192E-01  
 DRYWELL POOL = 6.601E+01 WETWELL POOL = 2.486E+03 DRYWELL WALLS = 1.535E+03 TOTAL IODINE = 4.501E+03  
 DRYWELL COND.FILM = 3.030E-01 BLDG.EXHAUST FILTER = 1.916E-02 FILTERED LEAKAGE = 2.129E-03  
 ELEMENTAL IODINE PARTITION COEFFICIENT SYSTEM = 3.07E+02 RECYCLE SPRAY = 5.39E+02 LIQID FILM = 5.67E+02 WETWELL = 7.68E+02  
 ELEMENTAL IODINE AVERAGE ABSORPTION EFFICIENCY RECYCLE SPRAY = 3.64E-01

\*\*\*\*\* TOTAL TIME = 3.400E+03 SECONDS 5.667E+01 MINUTES 9.444E-01 HOURS 3.935E-02 DAYS\*\*\*\*\*  
 GAS PHASE CONCENTRATIONS, LIQUID AND SURFACE CONCENTRATIONS IN GRAMS-I/CC OR SW CM  
 FORM DRYWELL WETWELL REFUEL.BLDG. DRYWELL FILM DRYWELL POOL DRYWELL WALLS WETWELL POOL  
 I2 1.035E-09 3.035E-09 2.134E-11 5.869E-07 5.677E-07 2.977E-05 5.713E-07  
 CH3I 6.375E-08 5.931E-09 1.154E-11 0.0 3.591E-08 1.338E-08  
 PART 0.0 0.0  
 IODINE ACCUMULATIONS IN GRAMS  
 AIRBORNE IN DRYWELL = 3.704E+02 AIRBORNE IN WETWELL = 3.688E+01 AIRBORNE IN REFUEL.BLDG. = 8.417E-01  
 DRYWELL POOL = 6.519E+01 WETWELL POOL = 2.491E+03 DRYWELL WALLS = 1.536E+03 TOTAL IODINE = 4.501E+03  
 DRYWELL COND.FILM = 3.027E-01 BLDG.EXHAUST FILTER = 2.262E-02 FILTERED LEAKAGE = 2.513E-03  
 ELEMENTAL IODINE PARTITION COEFFICIENT SYSTEM = 3.07E+02 RECYCLE SPRAY = 5.39E+02 LIQID FILM = 5.67E+02 WETWELL = 7.68E+02  
 ELEMENTAL IODINE AVERAGE ABSORPTION EFFICIENCY RECYCLE SPRAY = 3.64E-01

\*\*\*\*\* TOTAL TIME = 3.800E+03 SECONDS 6.333E+01 MINUTES 1.056E+00 HOURS 4.398E-02 DAYS\*\*\*\*\*  
 GAS PHASE CONCENTRATIONS, LIQUID AND SURFACE CONCENTRATIONS IN GRAMS-I/CC OR SW CM  
 FORM DRYWELL WETWELL REFUEL.BLDG. DRYWELL FILM DRYWELL POOL DRYWELL WALLS WETWELL POOL  
 I2 1.034E-09 3.034E-09 2.102E-11 5.867E-07 5.664E-07 2.975E-05 5.711E-07  
 CH3I 6.317E-08 5.981E-09 1.271E-11 0.0 3.609E-08 1.442E-08  
 PART 0.0 0.0  
 IODINE ACCUMULATIONS IN GRAMS  
 AIRBORNE IN DRYWELL = 3.657E+02 AIRBORNE IN WETWELL = 3.688E+01 AIRBORNE IN REFUEL.BLDG. = 8.632E-01  
 DRYWELL POOL = 6.507E+01 WETWELL POOL = 2.498E+03 DRYWELL WALLS = 1.537E+03 TOTAL IODINE = 4.501E+03  
 DRYWELL COND.FILM = 3.028E-01 BLDG.EXHAUST FILTER = 2.617E-02 FILTERED LEAKAGE = 2.908E-03  
 ELEMENTAL IODINE PARTITION COEFFICIENT SYSTEM = 3.07E+02 RECYCLE SPRAY = 5.39E+02 LIQID FILM = 5.67E+02 WETWELL = 7.68E+02  
 ELEMENTAL IODINE AVERAGE ABSORPTION EFFICIENCY RECYCLE SPRAY = 3.64E-01

\*\*\* PROGRAM MIRAPB PRINT OUT OF TIME DEPENDENT DATA \*\*\*  
 T01 = 1.000E+04 I01 = 6.500E+01 T51 = 6.500E+01 I12 = 8.300E+01 SWS1 = 0.0 W12 = 0.0  
 AW1 = 2.580E+03 AD1 = 2.580E+03