

JAERI-M  
7482

BWR格納容器および原研モデル格納  
容器に関するヨウ素の気液分配

1978年1月

田中 貢・三森 武男

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、お申しこしてください。

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.

BWR格納容器および原研モデル格納容器に関するヨウ素の気液分配

日本原子力研究所東海研究所安全工学部

田中 貢 ・ 三森武男

(1977年2月受理)

軽水型発電炉には格納容器スプレイ系が設けられ、冷却材喪失事故時に格納容器内の水蒸気を冷却凝縮させて内圧を減ずるとともに、気相中の放射性物質を水洗除去することによつて、原子炉から大気中への放射性物質の放出を極力防止している。

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、BWR格納容器内気相ヨウ素のスプレイによる水洗除去効果に関する解析、および原研モデル格納容器試験装置に対する予備計算を、計算コードSPRINKLEを作成して行つた。

その結果、(1)格納容器スプレイの格納容器内気相ヨウ素濃度減衰に対する有効性 (2)格納容器からのヨウ素の漏洩に対する平衡域の支配性 (3)格納容器スプレイ開始より平衡状態到達までの時間 (4)格納容器内の平衡気液分配係数について定量的な値が得られた。

Gas-Water Partition of Iodine in BWR Plants  
and JAERI Model Containment Vessel

Mitsugu TANAKA and Takeo MIMORI  
Division of Reactor Safety, Tokai Research  
Establishment, JAERI

(Received February, 1977)

LWR plants have a containment spray system to reduce the escape of radioactive material to the environment in a loss-of-coolant accident (LOCA) by washing out fission products, especially radioiodine, and condensing the steam to lower the pressure.

Removal of radioiodine from BWR plants and JAERI Model Containment Vessel by water spraying was calculated with the computer program SPRINKLE prepared by one of the authors, for carrying out containment spray experiments.

The following could be studied quantitatively : (1) effect of containment spray, (2) equilibrium state domination in iodine leakage from the containment vessel, (3) the time elapsing from containment spray start to equilibrium state, and (4) equilibrium partition coefficient in the containment vessel.

Keywords : Light Water Reactor, Reactor Safety, Loss-of-Coolant Accident, Containment Vessel, Spray, Iodine, Partition Coefficient, Boiling Water Reactor, Reactor Safety Analysis, Washout

## 目 次

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 1. 緒 言 .....                         | 1  |
| 2. BWR格納容器および原研モデル格納容器 .....         | 3  |
| 2.1 BWR格納容器 .....                    | 3  |
| 2.2 原研モデル格納容器 .....                  | 3  |
| 2.3 別形式のBWR格納容器 .....                | 4  |
| 3. 安全審査におけるヨウ素の放出量評価モデル .....        | 12 |
| 4. 解 析 .....                         | 16 |
| 4.1 解析にあたって用いた仮定 .....               | 16 |
| 4.2 計算方法 .....                       | 17 |
| 4.2.1 格納容器スプレイによる格納容器気相ヨウ素濃度変化 ..... | 17 |
| 4.2.2 格納容器液相濃度変化 .....               | 17 |
| 4.2.3 放射能の自然崩解による減衰 .....            | 17 |
| 4.2.4 吸収効率(E) .....                  | 17 |
| 4.2.5 総括物質移動係数(k) .....              | 18 |
| 4.2.6 気液分配係数(H) .....                | 18 |
| 4.2.7 物性値 .....                      | 19 |
| 4.2.8 実炉格納容器諸元 .....                 | 19 |
| 4.2.9 実炉格納容器内ヨウ素量 .....              | 19 |
| 4.2.10 原研モデル格納容器諸元 .....             | 20 |
| 4.2.11 原研モデル格納容器における初期気相ヨウ素濃度 .....  | 20 |
| 5. 計算結果および考察 .....                   | 26 |
| 5.1 実炉に対する計算 .....                   | 26 |
| 5.2 原研モデル格納容器に対する計算 .....            | 27 |
| 5.3 気液分配係数および吸収効率 .....              | 27 |
| 6. 結 言 .....                         | 46 |
| 謝 辞 .....                            | 47 |
| Nomenclature .....                   | 48 |
| Literature cited .....               | 49 |

## Contents

|   |    |
|---|----|
| 1. Introduction.....  | 1  |
| 2. BWR Containment Vessel and JAERI Model Containment Vessel.....           | 3  |
| 2.1 BWR Containment Vessel.....   | 3  |
| 2.2 JAERI Model Containment Vessel .....                                    | 3  |
| 2.3 Another Type Containment Vessel of BWR .....                            | 4  |
| 3. Assumptions Used for BWR Safety Evaluation .....                         | 12 |
| 4. Theoretical Analysis .....   | 16 |
| 4.1 Assumptions .....   | 16 |
| 4.2 Analysis Model .....  | 17 |
| 4.2.1 Concentration Change of Gas Phase Iodine by Spray .....               | 17 |
| 4.2.2 Concentration Change of Liquid Phase Iodine .....                     | 17 |
| 4.2.3 Attenuation by Decay.....   | 17 |
| 4.2.4 Absorption Efficiency (E) .....                                       | 17 |
| 4.2.5 Overall Mass Transfer Coefficient (k) .....                           | 18 |
| 4.2.6 Partition Coefficient (H) .....                                       | 18 |
| 4.2.7 Physical Properties .....   | 19 |
| 4.2.8 Containment Vessel Design Parameters of BWR .....                     | 19 |
| 4.2.9 Initial Mass and Concentration of Iodine in BWR .....                 | 19 |
| 4.2.10 Design Parameters of JAERI Model Containment Vessel .....            | 20 |
| 4.2.11 Initial Iodine Concentration of JAERI Model Containment Vessel ..... | 20 |
| 5. Calculation Results and Discussions .....                                | 26 |
| 5.1 BWR.....  | 26 |
| 5.2 JAERI Model Containment Vessel .....                                    | 27 |
| 5.3 Partition Coefficient and Absorption Efficiency .....                   | 27 |
| 6. Conclusions .....  | 46 |
| Acknowledgements .....  | 47 |
| Nomenclature .....  | 48 |
| Literature cited .....  | 49 |

## 1. 緒 言

軽水型発電炉の冷却材喪失事故 (LOCA) では、燃料および燃料被覆材が破損し、燃料体に内蔵されていた核分裂生成物の格納容器内への放出が想定されている。

高温高圧水による格納容器内の圧力、温度上昇をおさえ、さらに核分裂生成物の格納容器外への放出を防止するため、軽水型発電炉には格納容器スプレイ設備が設けられている。

沸騰水型炉 (BWR) には、この圧力低減装置として、格納容器スプレイ系およびサブプレッジョンチェンバが設置されている。サブプレッジョンチェンバは、事故時に放出された蒸気をその大量の水で急速に凝縮させ、格納容器内の圧力上昇を抑制するものである。さらに、その水が熱交換器を含む格納容器スプレイ系を通して循環され、格納容器内の除熱と核分裂生成物の水洗除去に使用される。そして、核分裂生成物の格納容器外への漏洩を抑制している。

本報告は、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、スプレイによる BWR 格納容器内のヨウ素水洗除去効果について行つた解析結果、および原研モデル格納容器試験装置に対する予備計算結果をまとめたものである。

軽水炉の冷却材喪失事故時における格納容器スプレイによる核分裂生成物の水洗除去効果、あるいはその効果を含む格納容器内核分裂生成物の挙動評価に関して、これまでいくつかの計算方法および計算コードが発表されている。

Griffiths は<sup>10)</sup>、無限空間中を落下するスプレイ液滴による元素状ヨウ素の吸収およびエアロゾル粒子の除去に関する解析を行い、元素状ヨウ素の吸収については、気液両相の物質移動係数を考慮して計算を行つた。

Parsly は、有限空間部における元素状ヨウ素のスプレイによる水洗除去について Single Compartment モデルであるコード SPRAY を発表し<sup>18)</sup>、さらにスプレイ液を循環させた場合のモデルへと発展させている。<sup>20,21)</sup>

Bachofner らは<sup>4,5)</sup>、気液分配係数として Eggleton<sup>6)</sup> による理論値の直線近似式を使用して格納容器気相ヨウ素濃度に対する解析解を得、スプレイ液の pH、スプレイ液流量等の影響を明らかにした。

Ritzman は<sup>24)</sup>、元素状ヨウ素、有機ヨウ素、エアロゾル粒子の格納容器スプレイによる水洗除去、壁面への自然沈着、格納容器壁の付着水による吸収、フィルターによる除去等を考慮した計算コード MIRA-P/MIRA-B (PWR に対しては MIRA-P、BWR に対しては MIRA-B) を発表している。このコードはドライウエル、ウェットウエル、燃料交換室の各気、液相に対する連立方程式を解く 3 Compartments モデルである。(PWR に対する MIRA-P は、ドライウエル 1 室のみ。)

Postma らは<sup>17)</sup>、MIRA コードとほぼ同じ条件ではあるが、任意の数の Compartment を選べる (Multicompartment Model) コード CORRAL を発表している。このコードによれば、PWR あるいは BWR のドライウエル等をいくつかの Compartment に分割することが可能であり、従つて格納容器内の核分裂生成物の濃度分布あるいは対流等を考慮できると考えられる。なお、本コードはラスムツセン報告<sup>28)</sup>において使用された。

その他，USAECにおいて冷却材喪失事故解析に使用されているコードDL-1があり，Postma<sup>22)</sup>によりその内容が詳しく検討されている。このコードは Single Compartment モデルであり，また格納容器内のヨウ素水洗除去に対し完全吸収 (perfect sink) モデルを適用している。従つて，その欠点を補うため打ち切り濃度を設定し，その濃度以下ではスプレイによる核分裂生成物の除去は行われずとして，平衡状態への漸近を考慮しているのが特徴である。

以上のように種々の計算コードが発表されているが，当然のことながら精確に現象を評価しようとするほど計算コードも複雑になり，かつ計算に長時間を要することになる。

そこで本報告では，格納容器スプレイの効果をできるだけ速やかに評価することを主眼とした計算コードSPRINKLE (A Computer Program for Predicting Spray Removal of Iodine in Reactor Containment Vessels) を作成して計算を行った。



## 2. BWR格納容器および原研モデル格納容器

### 2.1 BWR格納容器<sup>25,27)</sup>

Fig. 2.1にGE社製Mark I形(784 MWe), Fig. 2.2にMark II形(1100 MWe)の格納容器概略図を示す。BWR格納容器内には作業用のグレーチングが張られており, それらの位置もあわせて図示した。

Mark I形はいわゆる電球形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形は円錐台形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。

Fig. 2.3にMark I形, Fig. 2.4にMark II形の格納容器スプレイ系概略図を示す。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られて作動を開始するよう設計されている。スプレイ液としては, サプレッションチェンバの水が残留熱除去系熱交換器により冷却されて循環使用される。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へのスプレイ液流量比は約95:5である。スプレイ液としては純水( $1 \mu\Omega/cm$  at  $25^\circ C$ ,  $Cl^-$ イオン0.5 ppm以下(運転開始後の管理値), pH6~8(中性))あるいはクロメート水( $CrO_4$ イオン500~1000 ppm, pH9~9.7)が使用されている。

Table 2.1に, BWRの格納容器気相, 液相体積を示す。表中にはPWR(加圧水型炉)の値もあわせて示した。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。

Table 2.2に, BWR格納容器スプレイ系の主要諸元を示す。

### 2.2 原研モデル格納容器

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中である。Fig. 2.5にはMark I形格納容器と, Fig. 2.6にはMark II形格納容器と原研モデル格納容器を比較して示す。

実炉において, Mark I形は電球形のドライウエルを, Mark II形は円錐台形のドライウエルを有しており, 原研モデル格納容器は直径7m, 高さ20mの円筒形である。実炉事故時のスプレイによるヨウ素除去において最も厳しい条件は, 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ヘッドのみ作動の場合と考えられるが, 下段スプレイヘッド位置での格納容器空間部(格納容器壁とベDESTALで囲まれた環状部)の幅は約6m~7.5mである。これが原研モデル格納容器の直径7mに対応し, Mark I形では56度のセクトルに, Mark II形では50度のセクトルに対応している。

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

に大きな影響を与えるので、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 Figs. 2.5, 2.6 に図示した。

### 2.3 別形式のBWR格納容器<sup>9,30)</sup>

最近発表されたMark III形格納容器の概略図を，Fig. 2.7 に示す。炉心と冷却系を含む円筒形ドライウエルの下部を取り巻いて，格納容器底部にサブプレッションプールが設置されている。従つて，Mark I形，Mark II形の垂直ベント管と異なり，Mark III形では水平ベント孔が採用されている。プール水面は格納容器全容積に開放されており，Mark I形，Mark II形ではサブプレッションチェンバ上部に限られた空間を格納容器全空間に活用できるよう拡大し，最高圧力を低減している。

Table 2.3 にMark III形格納容器主要諸元<sup>9)</sup>を示す。

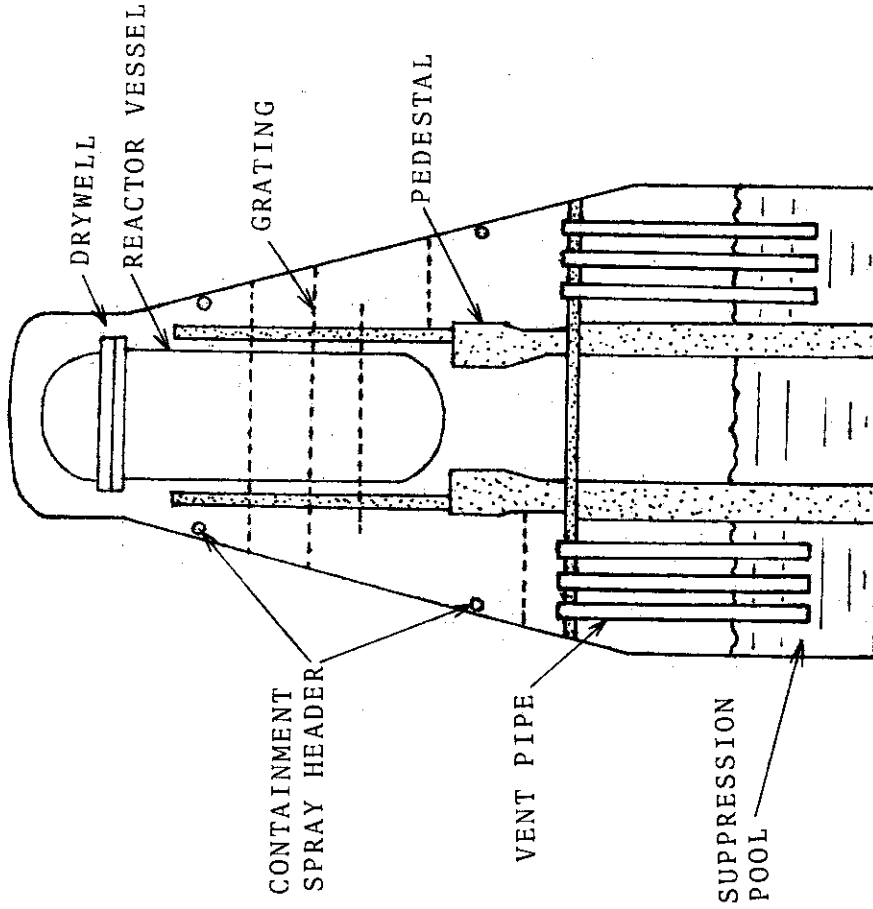


Fig. 2.2 Schematic Diagram of the Reactor Containment Vessel of Mark II

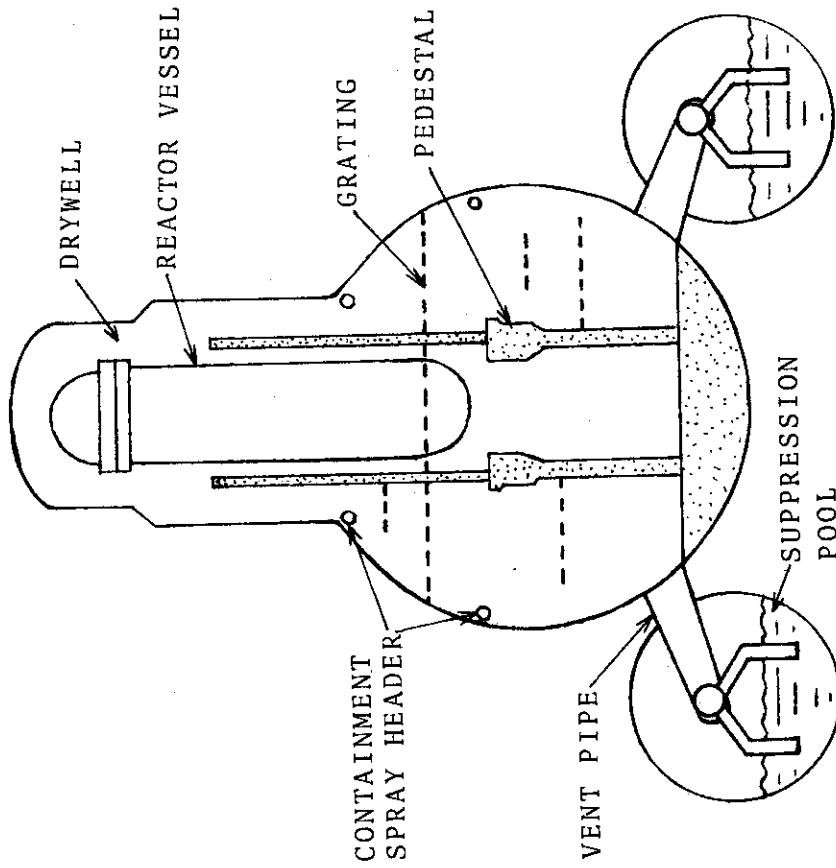


Fig. 2.1 Schematic Diagram of the Reactor Containment Vessel of Mark I

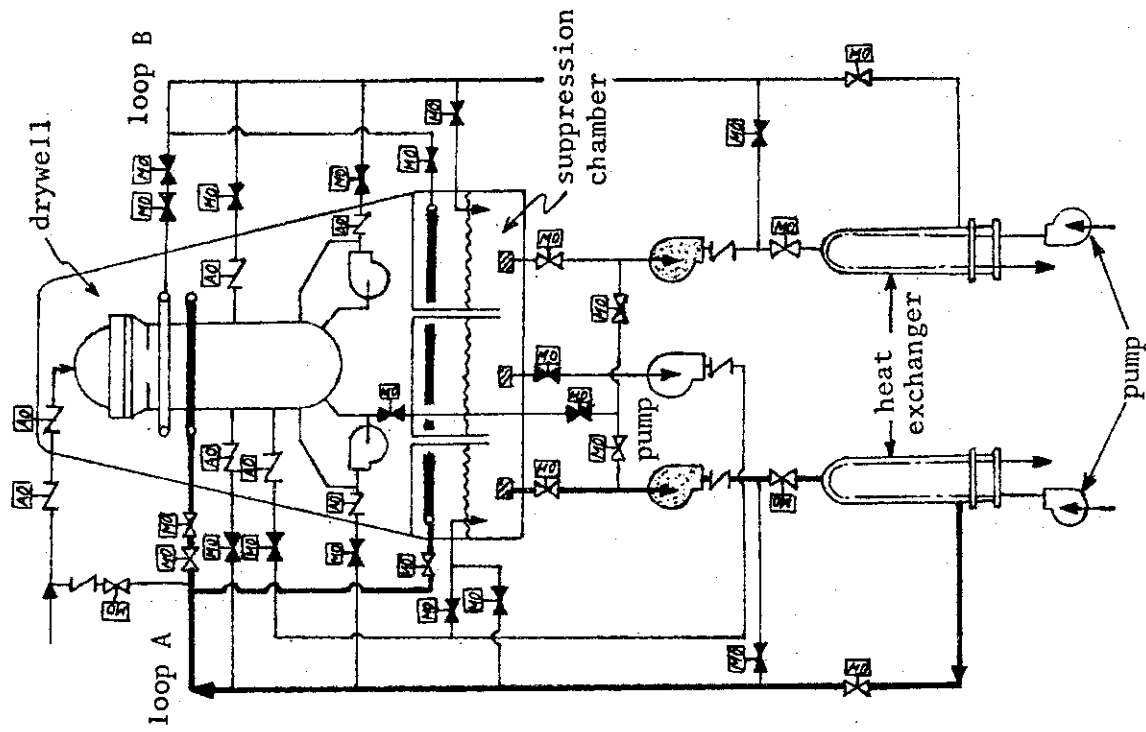


Fig. 2.4 Schematic Diagram of Containment Spray System of Mark II

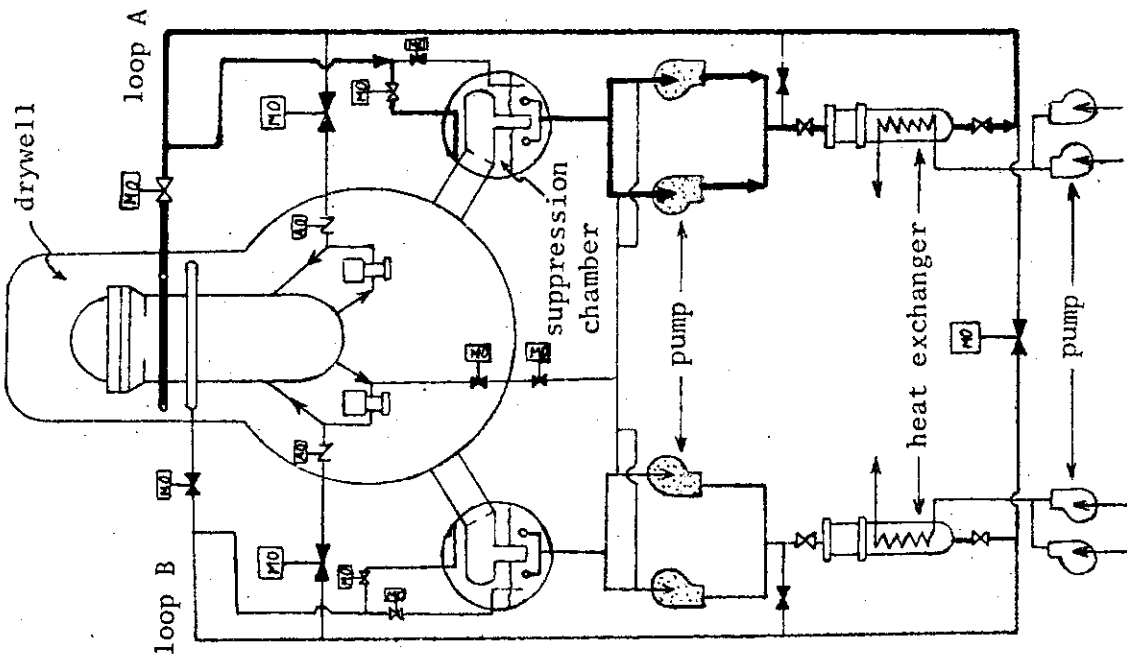


Fig. 2.3 Schematic Diagram of Containment Spray System of Mark I

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<br>V <sub>g</sub> [m <sup>3</sup> ]   | 7400 *                       | 9800 *                         | 5.66x10 <sup>4</sup>      |
| Water Volume<br>V <sub>l</sub> [m <sup>3</sup> ] | 3680                         | 4260                           | 1800                      |
| $\frac{V_l}{V_g}$                                | 0.497                        | 0.435                          | 0.0318                    |

\* drywell + wetwell

Table 2.2 Containment-Spray-System Design Parameters of BWR

| Type of Containment                 | Location                | Flow Rate [m <sup>3</sup> /hr] |
|-------------------------------------|-------------------------|--------------------------------|
| Mark I<br>( 784 MW <sub>e</sub> )   | Upper Header in Drywell | 1660                           |
|                                     | Lower Header in Drywell | 1660                           |
|                                     | Suppression Chamber     | 2 x 87.4                       |
| Mark II<br>( 1100 MW <sub>e</sub> ) | Upper Header in Drywell | 1810                           |
|                                     | Lower Header in Drywell | 1810                           |
|                                     | Suppression Chamber     | 2 x 95.4                       |

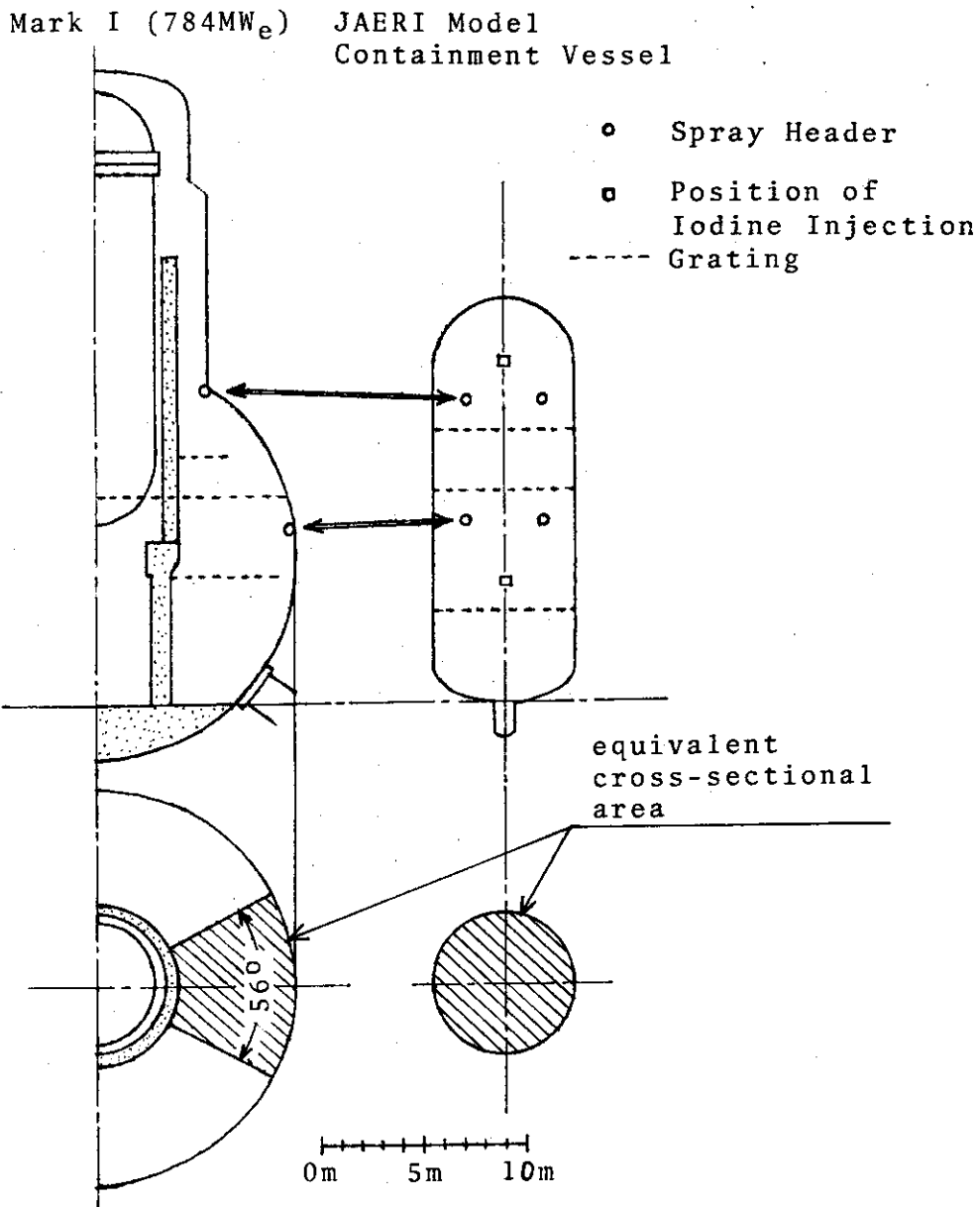


Fig. 2.5 Comparison of JAERI Model Containment Vessel with Mark I Containment Vessel

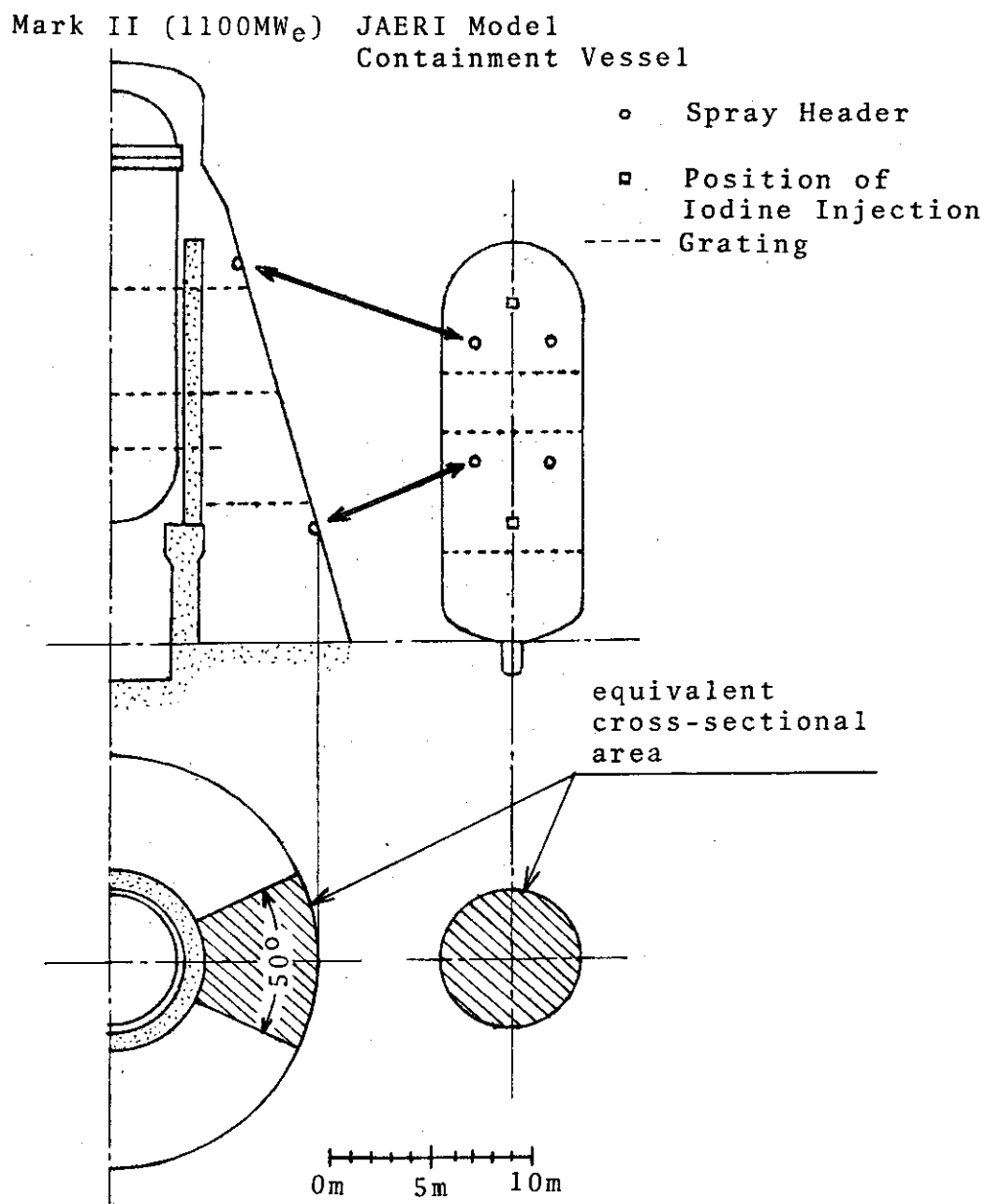


Fig. 2.6 Comparison of JAERI Model Containment Vessel with Mark II Containment Vessel

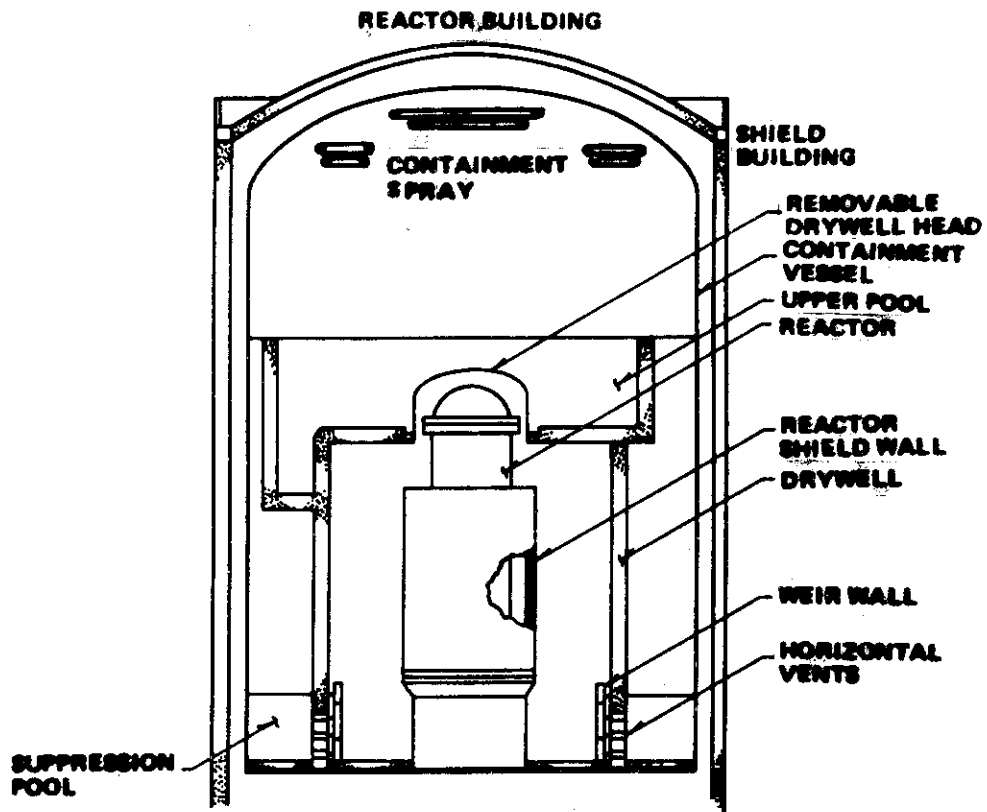


Fig. 2.7 Mark III Containment and Shield Building 9)



Table 2.3 Design Parameters of Mark III ( 3579 MW<sub>t</sub>, 1220 MW<sub>e</sub> )<sup>9)</sup>

|                         | $V_g$<br>[m <sup>3</sup> ] | $V_w$<br>[m <sup>3</sup> ] | F<br>[m <sup>3</sup> /hr] | h<br>[m]                                     |
|-------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|--|
| Drywell                 | 7770                       | —                          |                           |  |
| Suppression Chamber     | 33080                      | 4640                       | 1)<br>1190                | 48.6 <sup>2)</sup><br>and 45.5 <sup>3)</sup> |
| Primary Coolant         | —                          | 345                        |                           |  |
| Condensate Storage Tank | —                          | 500 <sup>4)</sup>          |                           |  |
| Total                   | 40850                      | 5485                       | —                         | —  |

$V_g$  ..... Air Volume

$V_w$  ..... Water Volume

F ..... Flow Rate of Containment Spray ( 1 loop )

h ..... Spray Water Fall Height

1) ..... A 50% plugging of strainer screen surface is assumed.

2) ..... Upper Spray Header

3) ..... Lower Spray Header

4) ..... Water Volume Used for ECCS

### 3. 安全審査におけるヨウ素の放出量評価モデル<sup>11,26,29)</sup>

BWR格納容器内気相ヨウ素のスプレイによる水洗除去に関する計算を行うにあたって、まず我国における現行のBWR冷却材喪失事故時の放射性ヨウ素放出量評価モデルを紹介する。

Table 3.1に、安全審査において用いられているBWR冷却材喪失事故時の放出放射能評価に関する仮定を示す。<sup>26)</sup>

重大事故では、冷却材喪失事故時に非常用炉心冷却系のうち炉心スプレイ系1系統のみが作動する場合を想定し、その際に燃料棒の100%パーフォレーション(全燃料被覆管にパーフォレーションが生じる)に相当するプレナム中の核分裂生成物が燃料棒から放出されるものと仮定されている。

仮想事故では、冷却材喪失事故時に非常用炉心冷却系の効果を見捨て、全燃料棒が溶融したと仮定した場合に相当する燃料中の核分裂生成物が放出されるものと仮定されている。

Table 3.1の第2項の値がこれらの事故において仮定される核分裂生成物の放出量である。その放出量を基に、更に同表中の諸仮定が考慮され、最後に敷地周辺の被曝線量が原子炉設置場所の立地、気象、拡散条件等を考慮して計算されている。

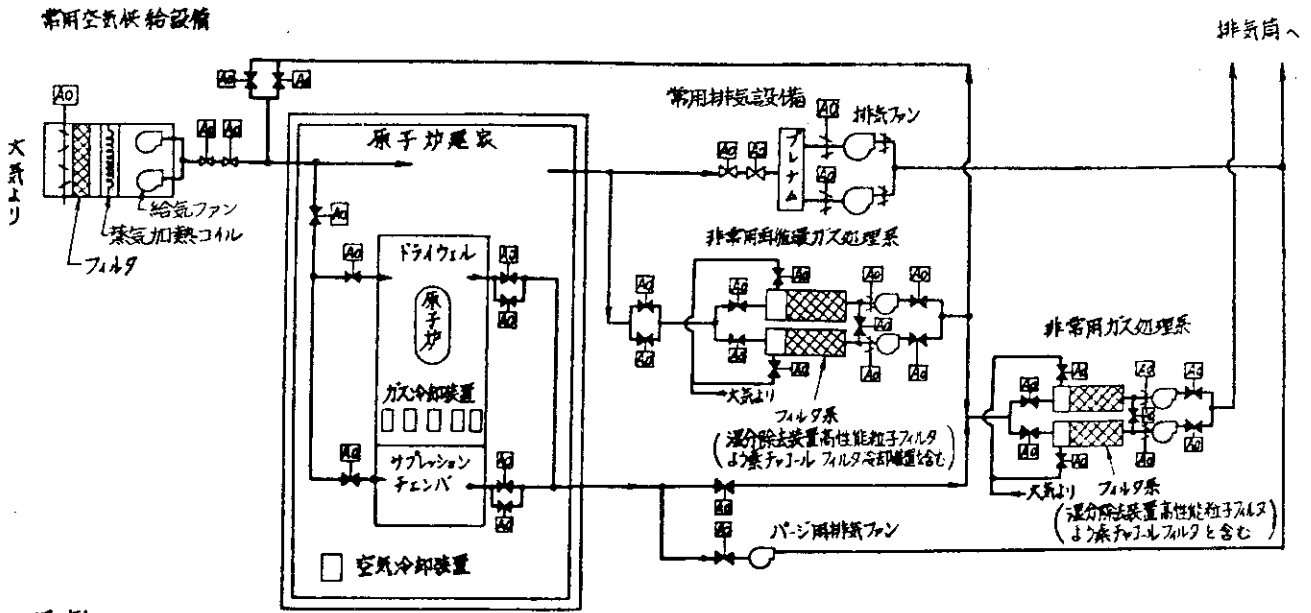
ここで、同表第9項では非常用空気浄化系の除去効率が90%と仮定されているが、最近のBWRではさらに非常用再循環ガス処理系を備えているものがある。その場合には、非常用再循環ガス処理系の除去効率は90%、非常用再循環ガス処理系と非常用ガス処理系の2系統を直列に通り大気中に放出されるヨウ素の除去効率は95%と仮定されている。

上述の冷却材喪失事故時における核分裂生成物の移行過程をFig. 3.1に示す。

上述の安全審査における放出放射能の評価法において、本報告の計算対象であるヨウ素のみに着目すれば、その評価法はFig. 3.2<sup>29)</sup>で表わされる。重大事故では炉心内蔵量の1%、仮想事故では50%という仮定された割合で格納容器中に放出されたヨウ素は、格納容器内水中への吸収前に、即ち実際には格納容器スプレイ作動開始前に、無機ヨウ素のプレートアウト、フールアウト効果により、重大事故では炉心内蔵量の0.55%(=0.1%(有機ヨウ素)+0.5×0.9%(無機ヨウ素))が、仮想事故では27.5%(=5%(有機ヨウ素)+0.5×45%(無機ヨウ素))が格納容器気相部に存在することになる。このうち無機ヨウ素のみが常に気液分配係数100でサブレッションプール等の水に吸収されていると仮定して気相濃度を評価し、この気相ヨウ素に対し、漏洩率0.5%/dayでの原子炉建屋への放出、さらに非常用ガス処理系による除去等が評価されている。最後に、排気筒より大気へ放出された放射性ヨウ素に対し原子炉設置場所の立地、気象、拡散条件等を考慮して、敷地周辺の被曝線量が計算されている。

Table 3.1 Assumptions Used for BWR Safety Evaluation <sup>26)</sup>  
 ( Loss of Coolant Accident )

| Assumptions   | Major Accident   | Hypothetical Accident   |
|---|--|---|
| 1. Percent of core damaged                                  | 100% perforation   | 100% core melt equivalent assumed in evaluating FP release  |
| 2. Fraction of FP released from damaged fuel rods           | noble gas 1~2%<br>halogen 0.5~1%   | noble gas 100%<br>halogen 50%   |
| 3. Percent of metal-water reaction                          | less than 1%   | 27.5% (for evaluation of containment integrity)   |
| 4. Percent of organic iodine in containment                 | 10%  | 10%   |
| 5. Plateout and fallout of inorganic halogen in containment | 50%  | 50%   |
| 6. Partition factor, water to air, for inorganic iodine     | 100  | 100   |
| 7. Leakage rate of containment                              | 0.5%/day (depending on the design)   | 0.5%/day (depending on the design)  |
| 8. Duration of leakage                                      | 30 days (depending on the design)  | infinite time   |
| 9. Halogen removal efficiency of EGTS                       | 90% for all halogen  | 90% for all halogen   |
| 10. Height of release                                       | stack release  | stack release   |
| 11. Meteorological condition                                | humigation for the first one day, the worst Pasquill type for the following days<br>wind speed 1.5 m/s<br>wind direction....<br>.. constant<br>(depending on the site condition) | humigation for the first one day, the worst Pasquill type for the following days, wind speed 1.5 m/s, wind direction ....., constant<br>(depending on the site condition) |



- 凡例
- ┆ ダンパ
  - ↔ バックアップバルブ
  - A0 空気作動

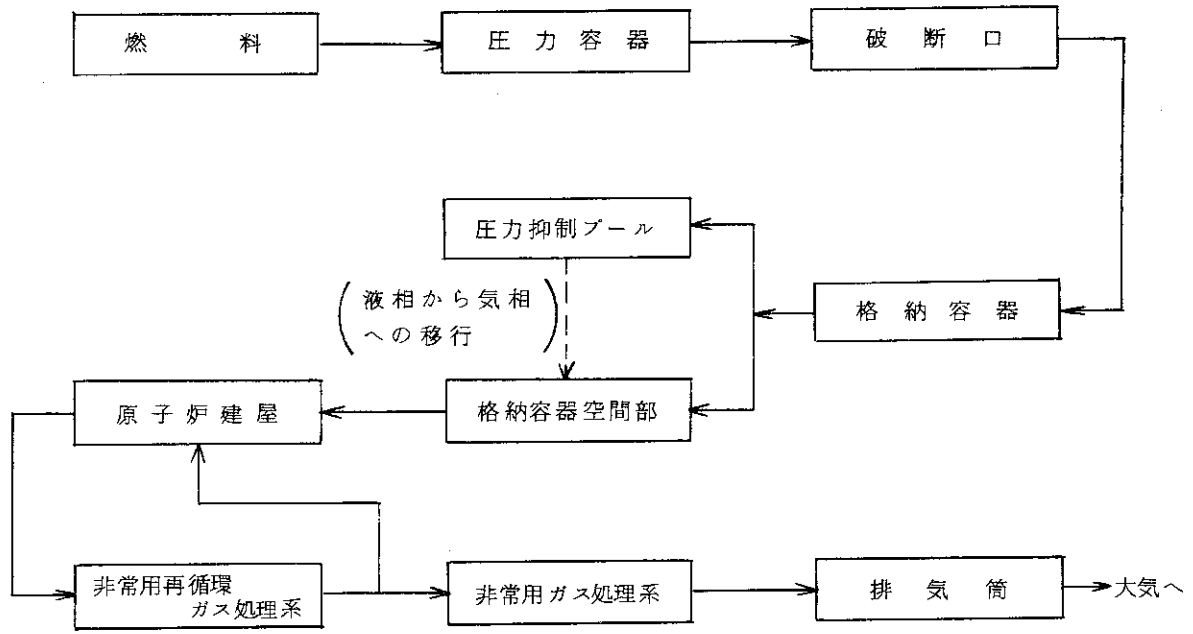


Fig. 3.1 Radioactive Effluent Process from BWR under the LOCA

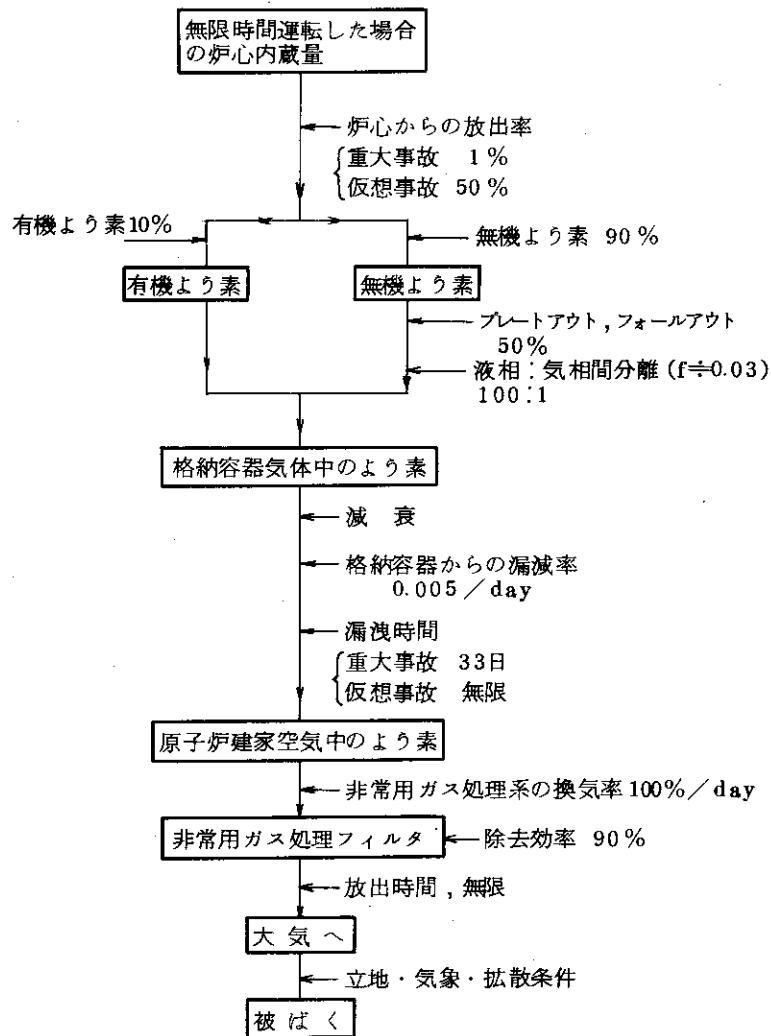


Fig. 3.2 Assumptions Used for Iodine Effluence Evaluation of BWR under the LOCA 29)

## 4. 解 析

本報告では、格納容器スプレイの効果をできるだけ速やかに評価することを主眼とした計算コード SPRINKLE (A Computer Program for Predicting Spray Removal of Iodine in Reactor Containment Vessels) を作成して計算を行った。

なお、本報告では、安全審査において無機ヨウ素の気液分配係数を100と仮定する場合についても計算を行い、スプレイ効果を考慮した場合の計算結果と比較検討した。

### 4.1 解析にあたって用いた仮定

解析に際して下記の仮定がなされた。

i) 冷却材喪失事故時の燃料からのヨウ素放出量は、重大事故ではその内蔵量の1%、仮想事故では50%とする。

ii) 燃料体から放出されるヨウ素はすべて無機ヨウ素とする。

前章で述べたように、安全審査においては有機ヨウ素の生成割合を生成ヨウ素の10%と仮定している。本計算では生成されたヨウ素はすべて無機ヨウ素であると仮定する。

iii) 格納容器スプレイは、冷却材喪失事故発生後10分に作動を開始する。

iv) 格納容器スプレイ開始までの10分間とスプレイ中にヨウ素はプレートアウト、フオールアウトしない。

燃料体からの放出量のうち50%が、冷却材喪失事故発生時(0秒)にプレートアウト、フオールアウトすると仮定して、その量を考慮したものとする。

v) 漏洩による格納容器内ヨウ素量の減衰は考慮しない。

本計算では、放射能の自然崩壊とスプレイの効果を考慮して計算を行った。

vi) 実炉の計算において、作動するスプレイヘッダーは下段スプレイヘッダーのみ(100%作動)とする。

v) スプレイされた液は、格納容器内部構造物の影響をうけず、スプレイ液滴として終端速度で垂直に落下する。

vi) 格納容器気相部、液相部は各々完全に混合されており、それぞれの内部に濃度分布が存在しないとする。

実際には、格納容器気相部、液相部に相当の濃度分布が存在することも考えられるが、現在のところそれらの現象を定量的に解明するまでには致っていない。

vii) スプレイ開始時(冷却材喪失事故発生後10分)のスプレイ液中のヨウ素濃度は零とする。

実際の冷却材喪失事故では、ドライウエル中の核分裂生成物を含む蒸気がベント管を通過してサブプレッジョンプールに導入されるため、スプレイ開始時にすでに放出ヨウ素の一部がスプレイ液中に含まれていると考えられる。しかしながら、現在のところその量を評価することは困難である。本計算では、スプレイ開始時のスプレイ液中のヨウ素濃度は零とする。

viii) 格納容器内は175°F(79.4°C)、22 psia(1.5 ata)一定とする。

BWR冷却材喪失事故時の解析より，格納容器スプレイ作動時の温度，圧力変化は小さいことが予測されているので，一定値とした。

IX) 炉心に注入されたECCSの水は，破断口から格納容器内に流出するが，その水によるヨウ素の吸収は考慮しない。

## 4.2 計算方法

### 4.2.1 格納容器スプレイによる格納容器気相ヨウ素濃度変化

本計算の解析系をFig. 4.1に示す。

物質収支より

$$\frac{dC_g}{dt} = -\frac{F}{V_g} (C_{l2} - C_{l1}) \quad (4-1)$$

ここで，吸収効率  $E = (C_{l2} - C_{l1}) / (HC_g - C_{l1})$  を用いて上式を表わせば

$$\frac{dC_g}{dt} = -\frac{FE}{V_g} (HC_g - C_{l1}) \quad (4-2)$$

### 4.2.2 格納容器液相濃度変化

物質収支より

$$\frac{dC_l}{dt} = -\frac{V_g}{V_l} \cdot \frac{dC_g}{dt} \quad (4-3)$$

### 4.2.3 放射能の自然崩解による減衰

気相部

$$\frac{C_{gi2}}{C_{gi1}} = \exp(-\lambda_i t) \quad (4-4)$$

液相部

$$\frac{C_{li2}}{C_{li1}} = \exp(-\lambda_i t) \quad (4-5)$$

ここで

$$\lambda_i = 0.693 / t_{1/2i} \quad (4-6)$$

### 4.2.4 吸収効率 (E)

本計算では，スプレイ液への吸収速度に対し最も遅い吸収速度を与える滞留境膜モデル (stagnant film model)<sup>22)</sup> を使用する。

その場合、吸収効率は次式で与えられる。

$$E = 1 - \exp\left(-\frac{6kt_e}{Hd}\right) \quad (4-7)$$

ここで、 $t_e$ は滞留時間であり、スプレイ液の落下距離 $h$ と液滴の終端速度 $u_t$ により、次式で与える。

$$t_e = \frac{h}{u_t} \quad (4-8)$$

#### 4.2.5 総括物質移動係数( $k$ )

総括物質移動係数は次式により与えられる。

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_g} + \frac{1}{Hk_l} \quad (4-9)$$

ここで、気相側の物質移動係数 $k_g$ は、次式のRanz & Marshallの式<sup>23)</sup>により評価する。

$$k_g = \frac{D_v}{d} (2 + 0.6 Re^{1/2} \cdot Sc^{1/3}) \quad (4-10)$$

また、液相側の物質移動係数 $k_l$ は、剛体球モデルを基にしてGriffiths<sup>10)</sup>により求められた次式を用いる。

$$k_l = \frac{2\pi^2}{3d} D_l \quad (4-11)$$

#### 4.2.6 気液分配係数( $H$ )

ヨウ素の気液分配係数については、これまでかなりの理論解析および実測値が得られている。しかし、ヨウ素は水中で複雑な一連の加水分解を行うので、気液分配係数は温度、pH、濃度の複雑な関数となり、従って得られた結果にも相当のばらつきがある。

理論解析の面から見れば、一連の加水分解の式としてどのような式を使用するか、また揮発性成分として何を考慮するかが気液分配係数の計算結果に大きく影響を与えるものと思われる。

Eggleton<sup>6)</sup>は、 $I_2$ のみを揮発性成分として理論解析を行っており、pH等の気液分配係数への影響を明らかにした。

Parsly<sup>19)</sup>は、Eggletonの解析法<sup>6)</sup>を基にして、 $I_2$ のみならずHIOも揮発性成分として計算を行った。

足立<sup>1,2,3,7,8)</sup>らは、 $I_2$ のみを揮発性成分として、より一般的な場合について計算を行い、スプレイ液へのNaOH添加の影響、 $CO_2$ ガスの影響を明らかにした。また、短時間接触におけるヨウ素溶解の擬平衡状態について初めて定量的な評価<sup>1)</sup>を行った。

以上のように、理論解析結果はその解析法により、かなり流動的な面をもっている。

故に本計算では、西沢<sup>15,16)</sup>らによつて得られた純水に対する気液分配係数の実測値が、上述の諸



理論値のうち、小さな値の部分をつぶすような形で得られていること、さらに測定が冷却材喪失事故時のヨウ素濃度範囲にわたって行われていることから、西沢らによる実測値を本計算に使用した。

西沢らの得た気液分配係数を Fig. 4.2 に示す。

#### 4.2.7 物性値

ヨウ素を含む空気-水蒸気系の物性値は Knudsen<sup>12)</sup> によりまとめられており、第1章緒言において紹介した種々の計算コードにおいてもそれらの値が使用されている。

本計算においてもそれらの値を使用する。但し、第4.1節第viii)項で述べたように、格納容器内は 175°F, 22 psia 一定として、その場合の物性値を使用する。

- i) 気相(空気-水蒸気混合系)におけるヨウ素の拡散係数 ( $D_v$ )

Wilke の式による。<sup>31,33)</sup>

$$D_v = 0.0779 \text{ cm}^2 / \text{sec} \quad (4-12)$$

- ii) 液相におけるヨウ素の拡散係数 ( $D_l$ )

Wilke らの式による。<sup>34)</sup>

$$D_l = 3.88 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 / \text{sec} \quad (4-13)$$

- iii) 気相の密度 ( $\rho_v$ )

$$\rho_v = 1.33 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3 \quad (4-14)$$

- iv) 気相の粘度 ( $\mu_v$ )

Wilke の式による。<sup>32)</sup>

$$\mu_v = 1.81 \times 10^{-4} \text{ g/cm} \cdot \text{sec} \quad (4-15)$$

- v) スプレイ液滴径 ( $d$ )

BWR格納容器用スプレイノズルの液滴径分布は現在のところ未知であるので、本計算では直径 500  $\mu$  の単分散と仮定した。

なお、500  $\mu$  の球形液滴の終端速度は 196 cm/sec である。

#### 4.2.8 実炉格納容器諸元

本計算に使用した実炉の諸元を Table 4.1 に示す。

#### 4.2.9 実炉格納容器内ヨウ素量

事故時の格納容器気相部初期ヨウ素量の計算値を Table 4.2 に示す。なお、事故発生直前まで原子炉は定格の 105%出力(105%定格出力)で1000日連続運転していたものとした。

Table 4.3 に計算に使用した基礎データ等を示す。

気液分配係数を 100 とした場合の実炉の初期気相ヨウ素濃度は、次の物質収支式および気液分配係数の定義式より求められる。

$$V_g C_g + V_l C_l = \text{ヨウ素放出量} \quad (4-16)$$

$$\frac{C_l}{C_g} = 100 \quad (4-17)$$

計算結果を Table 4.4 に示す。

#### 4.2.10 原研モデル格納容器諸元

BWR格納容器におけるヨウ素の気液分配に対しては、気相、液相の体積比およびスプレイ液の落下距離が重要である。本計算においては、原研モデル格納容器諸元として、Case 1とCase 2を設定した。それらの値を Table 4.5 に示す。

#### 4.2.11 原研モデル格納容器における初期気相ヨウ素濃度

後述の第5.1節の実炉に対する計算結果に示されるように、実炉におけるヨウ素の格納容器外への漏洩量は、格納容器気相ヨウ素濃度の減少過渡時よりも濃度平衡時（気相部および液相部の質量濃度変化が、放射能の自然崩壊と格納容器外への漏洩の影響のみとなり、ほぼ一定値と考えられる状態。第5.1節参照。）が支配的である。そこで、本計算では、平衡時に実炉平衡時の格納容器内ヨウ素濃度を模擬するような原研モデル格納容器の初期気相ヨウ素濃度を用いて、計算を行った。

Table 4.6 に Case 1 および Case 2 に対する初期気相濃度を示す。なお、実炉の計算において放射能の自然崩壊による質量変化を考慮しているため、試験装置の濃度決定に際しても放射能の自然崩壊を考慮した。

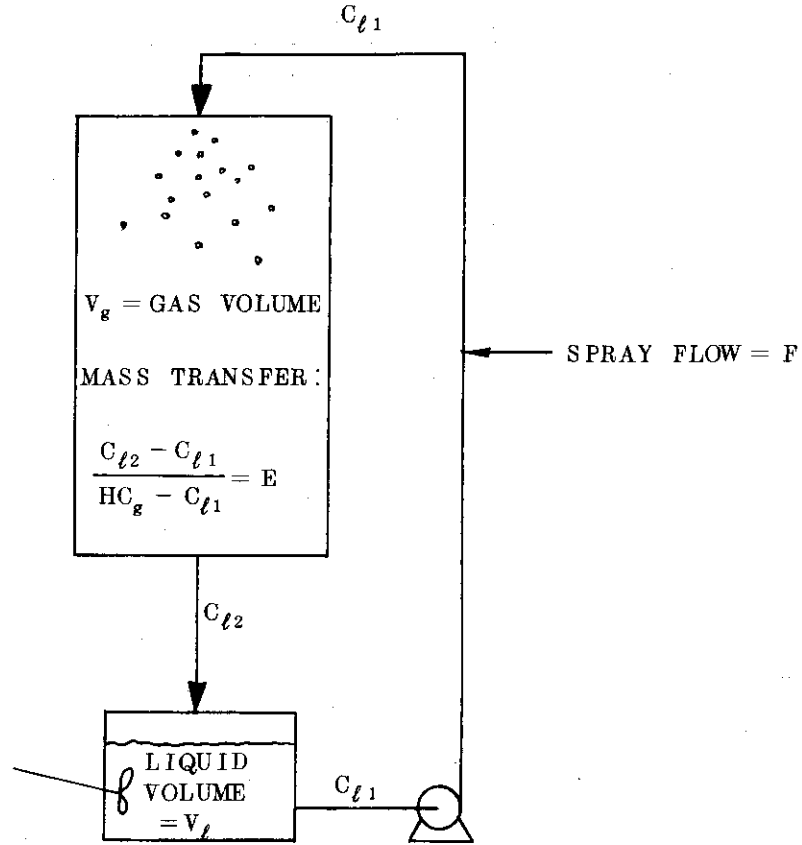


Fig. 4.1 Schematic Diagram of Recirculating Spray Washout

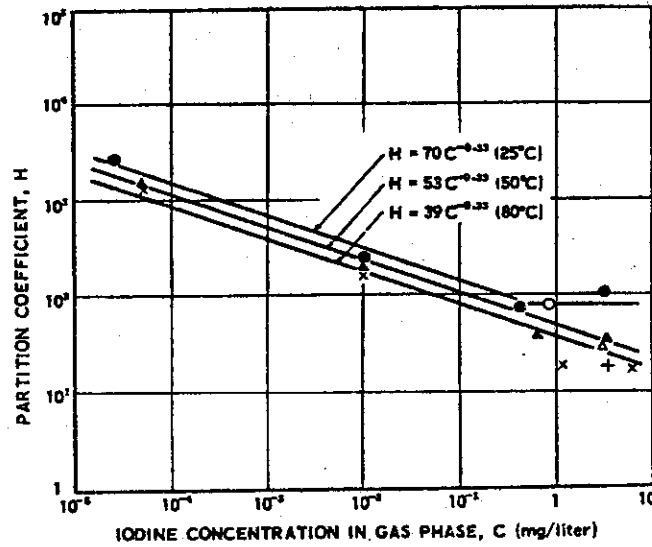


Fig. 4.2 Partition Coefficient vs. Iodine Concentration in Gas Phase

Table 4.1 Containment Design Parameters of BWR

|                         | Mark I<br>(784MWe)<br>(2381MW <sub>t</sub> ) |                                     |                           | Mark II<br>(1100MWe)<br>(3293MW <sub>t</sub> ) |                                     |                           | Mark III<br>(1220MWe)<br>(3579MW <sub>t</sub> ) |                                     |                           |          |
|-------------------------|--|-------------------------------------|---------------------------|--|-------------------------------------|---------------------------|---|-------------------------------------|---------------------------|----------|
|                         | V <sub>g</sub><br>[m <sup>3</sup> ]          | V <sub>w</sub><br>[m <sup>3</sup> ] | F<br>[m <sup>3</sup> /hr] | V <sub>g</sub><br>[m <sup>3</sup> ]            | V <sub>w</sub><br>[m <sup>3</sup> ] | F<br>[m <sup>3</sup> /hr] | V <sub>g</sub><br>[m <sup>3</sup> ]             | V <sub>w</sub><br>[m <sup>3</sup> ] | F<br>[m <sup>3</sup> /hr] | h<br>[m] |
| Drywell                 | 4240   | —                                   | —                         | 5700   | —                                   | —                         | 7770  | —                                   | —                         | —        |
| Suppression Chamber     | 3160   | 2980                                | 1660                      | 4100   | 3400                                | 1810                      | 33080   | 4640                                | 1190 <sup>1)</sup>        | 47.1     |
| Primary Coolant         | —  | 300                                 | —                         | —  | 360                                 | —                         | —   | 345                                 | —                         | —        |
| Condensate Storage Tank | —  | 400 <sup>2)</sup>                   | —                         | —  | 500 <sup>2)</sup>                   | —                         | —   | 500                                 | —                         | —        |
| <b>Total</b>            | <b>7400</b>                                  | <b>3680</b>                         | <b>—</b>                  | <b>9800</b>                                    | <b>4260</b>                         | <b>—</b>                  | <b>40850</b>                                    | <b>5485</b>                         | <b>—</b>                  | <b>—</b> |

V<sub>g</sub> ..... Air Volume

V<sub>w</sub> ..... Water Volume

F ..... Flow Rate of Containment Spray ( 1 loop )

h ..... Spray Water Fall Height from Lower Spray Header

1) ..... A 50% plugging of strainer screen surface is assumed.

2) ..... Water Volume Used for ECCS

Table 4.2 Initial Mass and Concentration of Iodine in Containment Vessel  
( under the conditions of 105 % power level and 1000 days - operation )

| Reactor Type<br>Iodine in Containment Vessel | Mark I (784MWe)<br>(2381MWt) |              | Mark II (1100MWe)<br>(3293MWt) |              | Mark III (1220MWe)<br>(3579MWt) |              |
|--|------------------------------|--------------|--------------------------------|--------------|---------------------------------|--------------|
|  | Major                        | Hypothetical | Major                          | Hypothetical | Major                           | Hypothetical |
| Mass [g]                                     | 59.4                         | 2970         | 81.8                           | 4090         | 89.4                            | 4470         |
| Concentration [g/m <sup>3</sup> ]            | 0.00803                      | 0.402        | 0.00835                        | 0.417        | 0.00219                         | 0.109        |

Table 4.3 Table of Iodine Isotopes

| Nuclei | Fission Yield <sup>(14)</sup><br>[%] | Half Life <sup>(14)</sup> | Decay Constant<br>(sec <sup>-1</sup> ) | Absorption Cross Section <sup>(13)</sup><br>(barns) | Specific Activity<br>(C/g) | Core Inventory<br>(1000 days-operation)<br>(g/MWt) | Core Inventory<br>(%) |
|--------|--------------------------------------|---------------------------|--|---|----------------------------|--|-----------------------|
| I-127  | 0.129                                | Stable                    | Stable                                 | 6.4   | Stable                     | 0.743  | 15.63                 |
| I-129  | 0.665                                | 1.57 × 10 <sup>7</sup> y  | 1.40 × 10 <sup>-15</sup>               | 28  | 1.63 × 10 <sup>-4</sup>    | 3.74   | 78.65                 |
| I-131  | 2.84                                 | 8.06 d                    | 9.95 × 10 <sup>-7</sup>                | 0.7   | 1.24 × 10 <sup>5</sup>     | 0.199  | 4.18                  |
| I-132  | 4.21                                 | 2.28 h                    | 8.44 × 10 <sup>-5</sup>                | 0   | 1.03 × 10 <sup>7</sup>     | 0.00350  | 0.07                  |
| I-133  | 6.77                                 | 20.8 h                    | 9.25 × 10 <sup>-6</sup>                | 0   | 1.13 × 10 <sup>6</sup>     | 0.0517   | 1.09                  |
| I-134  | 7.61                                 | 52.6 m                    | 2.20 × 10 <sup>-4</sup>                | 0   | 2.70 × 10 <sup>7</sup>     | 0.00246  | 0.05                  |
| I-135  | 6.41                                 | 6.61 h                    | 2.91 × 10 <sup>-5</sup>                | 0   | 3.47 × 10 <sup>6</sup>     | 0.0158   | 0.33                  |
| Total  | —                                    | —                         | —                                      | —   | —                          | 4.76   | 100                   |

Table 4.4 Distribution of Iodine in Containment Vessels under a Condition of Partition Coefficient H = 100 ( for 105% Power Level )

| Iodine in Containment Vessel | Reactor Type<br>Accident          | Mark I (784MWe)<br>(2381MWt) |                       | Mark II (1100MWe)<br>(3293MWt) |                       | Mark III (1220MWe)<br>(3579MWt) |                       |
|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|---------------------------------|-----------------------|
|                              |                                   | Major                        | Hypothetical          | Major                          | Hypothetical          | Major                           | Hypothetical          |
|                              |                                   | Gas Phase                    | Mass [g]              | 1.18                           | 58.5                  | 1.86                            | 92.0                  |
|                              | Concentration [g/m <sup>3</sup> ] | 1.60x10 <sup>-4</sup>        | 7.91x10 <sup>-3</sup> | 1.90x10 <sup>-4</sup>          | 9.39x10 <sup>-3</sup> | 1.50x10 <sup>-4</sup>           | 7.58x10 <sup>-3</sup> |
| Liquid Phase                 | Mass [g]                          | 58.9                         | 2910                  | 80.9                           | 4000                  | 82.3                            | 4160                  |
|                              | Concentration [g/m <sup>3</sup> ] | 1.60x10 <sup>-2</sup>        | 7.91x10 <sup>-1</sup> | 1.90x10 <sup>-2</sup>          | 9.39x10 <sup>-1</sup> | 1.50x10 <sup>-2</sup>           | 7.58x10 <sup>-1</sup> |

Table 4.5 Specifications of The JAERI Model Containment Vessel

|        | Air Volume [m <sup>3</sup> ] | Water Volume [m <sup>3</sup> ] | Spray Flow Rate [m <sup>3</sup> /hr] | Spray Water Fall Height [m] |
|--------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|
| Case 1 | 702                          | 80                             | 130                                  | 9                           |
| Case 2 | 622                          | 160                            | 130                                  | 6.35                        |

Table 4.6 Initial Gas Phase Iodine Concentration in The JAERI Model Containment Vessel

| Simulated Reactor Type      | Simulation of Mark I (784MWe) (2381Mwt) |                       | Simulation of Mark II (1100MWe) (3293Mwt) |                       | Simulation of Mark III (1220MWe) (3579Mwt) |                       |
|-----------------------------|---|-----------------------|---|-----------------------|--|-----------------------|
|                             | Major                                   | Hypothetical          | Major                                     | Hypothetical          | Major                                      | Hypothetical          |
| Case 1 [g/cm <sup>3</sup> ] | 1.84x10 <sup>-9</sup>                   | 9.41x10 <sup>-6</sup> | 2.19x10 <sup>-9</sup>                     | 1.12x10 <sup>-7</sup> | 1.85x10 <sup>-9</sup>                      | 9.26x10 <sup>-6</sup> |
| Case 2 [g/cm <sup>3</sup> ] | 4.15x10 <sup>-9</sup>                   | 2.09x10 <sup>-7</sup> | 4.93x10 <sup>-9</sup>                     | 2.48x10 <sup>-7</sup> | 4.17x10 <sup>-9</sup>                      | 2.06x10 <sup>-7</sup> |

Case 1 ----- Air Volume = 702 m<sup>3</sup>, Water Volume = 80 m<sup>3</sup>  
 Case 2 ----- Air Volume = 622 m<sup>3</sup>, Water volume = 160 m<sup>3</sup>

## 5. 計算結果および考察

### 5.1 実炉に対する計算

Mark I, Mark II, Mark IIIの重大事故時, 仮想事故時において, 気液分配係数 $H$ を気相濃度の関数とした場合と $H = 100$ 一定とした場合の気相, 液相ヨウ素の質量濃度変化および放射能濃度変化を Figs. 5.1 ~ 5.3 に示す。

この場合の初期気相ヨウ素濃度は, Tables 4.2, 4.4 の値である。

時間0分に冷却材喪失事故が発生し, 10分後に格納容器スプレイ系が作動を開始する。その間気相ヨウ素は液相へ移行せず, 自然崩壊による減衰のみとしている。格納容器スプレイ系が作動を開始すると, 気相ヨウ素はスプレイ液に吸収されて液相へ移行するため, 気相濃度は急激に減少する。スプレイによるヨウ素の移行が終了した後も自然崩壊によるヨウ素の減衰が継続し, 長時間後には安定核種(1-127)と長寿命核種(1-129)のみとなる。

なお, 気液分配係数を100とした場合の濃度変化は, 自然崩壊の効果のみである。

Fig. 5.4 に示す方法で計算結果をまとめた。

- i) 実炉の初期気相濃度を100ユニット, 時間を day 単位にとる。
- ii) スプレイ開始(10分)までの気相濃度の積分値を(A)とする。  
(積分値の単位は“unit·day”である。以下に述べる積分値(B), (C)も同じ。)
- iii) 遷移域の気相濃度積分値を(B), 平衡域の気相濃度積分値を(C)とする。

遷移域の定義は, 第5.3節で詳述されるように, スプレイ開始の10分より気液分配係数 $H$ と液相, 気相濃度比 $C_l/C_g$ が一致するまで(その時点でスプレイ液によるヨウ素の吸収はほぼ終了すると考えられる。)と定義した。

iv) ヨウ素放出直後から気液分配係数 $H$ を100と仮定した場合と, 格納容器スプレイによる水洗除去速度を考慮した場合の比較は, 両者の濃度変化の積分値の比(Fig. 5.4における(破線の積分値)/(実線の積分値))で表わす。これは, 漏洩量の面から見れば, 漏洩率を一定と仮定した場合には, 漏洩量が濃度の積分値に比例することによる。

v) 漏洩量における遷移域の寄与率を,  $(B)/(B + (C))$  で表わす。

Table 5.1 にスプレイの効果を示す。ここで, 積分範囲は, 重大事故では33日, 仮想事故では1年(365日)とした。(Table 3.1 に示されるように, 仮想事故では格納容器漏洩期間を無限時間としている。従つて, 積分範囲としては無限時間をとるべきであるが, 約120日以降では気相放射能の積分値が有効数字5桁で一定値に達するので, 積分範囲を1年(365日)としてその値を使用した。)

Table 5.1 によれば, 本計算の範囲内では, 安全審査における気液分配係数を100とする評価法は, 実際のスプレイ効果を考慮した場合に比し, 大きな漏洩量を仮定している事になる。

Table 5.2 に質量濃度における遷移域の寄与を, Table 5.3 には放射能濃度における遷移域の寄与を示す。(B)に比して(C)の方がヨウ素漏洩量に対する寄与が大なることがわかる。従つて, 格納容器外へのヨウ素の漏洩量は, 平衡到達後の気相濃度によつて支配されることがわかる。ただし, 原子炉敷き地の風向が被曝線量には重要な意味をもつので, (B)領域における漏



洩量は重要となる。また、スプレイ開始より平衡状態到達までに、Mark I, Mark IIでは重大事故で約10分、仮想事故で約40分を要し、Mark IIIではそれぞれ約35分、110分を要している。Mark IIIにおいて長時間を要するのは、気相、液相体積比が大であるためである。但し、本計算ではヨウ素の加水分解が十分行われたと考えられる気液分配係数<sup>15,16)</sup>(西沢らは、気液分配係数の値として、気液接触後24時間以上経過後の値を測定している。)を用いたにもかかわらず、遷移期間として1時間前後の値が得られたことにより、遷移期間を実際より小さめに評価している可能性がある。

## 5.2 原研モデル格納容器に対する計算

BWR実炉の重大事故および仮想事故に対する原研モデル格納容器による試験の予備計算結果をFigs. 5.5 ~ 5.7に示す。

本計算でも、実炉の場合と同じく事故発生後(ヨウ素放出後)10分でスプレイが作動を開始するとして、計算を行った。

濃度変化の様子は、第5.1節の実炉に対する計算結果と同じである。

Tables 5.4, 5.5に、気相質量濃度および放射能濃度における遷移域の寄与を示す。第5.1節の実炉の場合と同じく、遷移域の寄与率は平衡域に比して小である。なお、遷移域の期間は実炉の場合に一致させた。

## 5.3 気液分配係数および吸収効率

Figs. 5.8 ~ 5.10に、実炉および原研モデル格納容器における気相濃度に対する気液分配係数 $H$ および液相、気相濃度比 $C_l/C_g$ を示す。

時間の経過、即ち気相ヨウ素濃度の減少につれ気液分配係数がFig. 4.2に従って増加することが示されている。また、気相濃度の減少、液相濃度の増加につれて液相、気相濃度比も増加し、終には気液分配係数と一致することになる。液相、気相濃度比が気液分配係数に一致する点で気相ヨウ素のスプレイ液への吸収が停止すると考えられるので、第5.1節でも述べたようにこの点までを遷移域、この点以降を平衡域と定義した。更に、本計算によれば、平衡時の気液分配係数として、重大事故では1000以上が、仮想事故では約200が得られ、安全審査における気液分配係数100よりも大きな値が得られている。

Figs. 5.11 ~ 5.13に吸収効率 $E$ (Eq. (4.7))の変化を示す。遷移域においては格納容器および事故モデルによつて初期気相濃度に差があるのでその影響も加わっているが、平衡域における吸収効率の差違はTables 4.1, 4.5に示したスプレイ液の落下距離の差によるものである。

なお、Mark IIIの実炉では、スプレイ液の落下距離が十分大きいので、スプレイされた液は気相ヨウ素濃度と平衡に達した後格納容器底部に到達する。即ち、吸収効率 $E$ として、1.0の値が得られた。

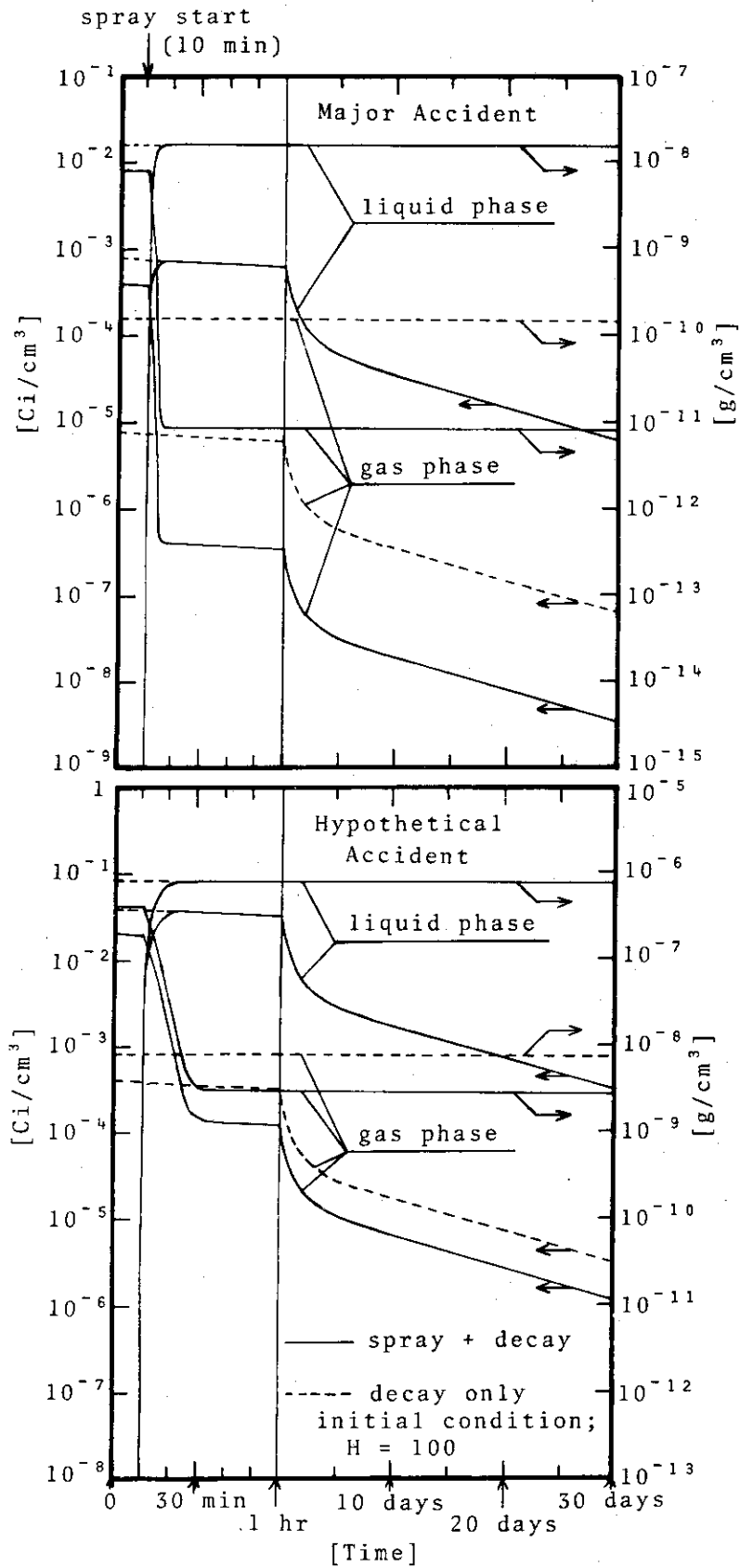


Fig. 5.1 Calculated Values of Mass and Activity Concentrations for the LOCA of Mark I

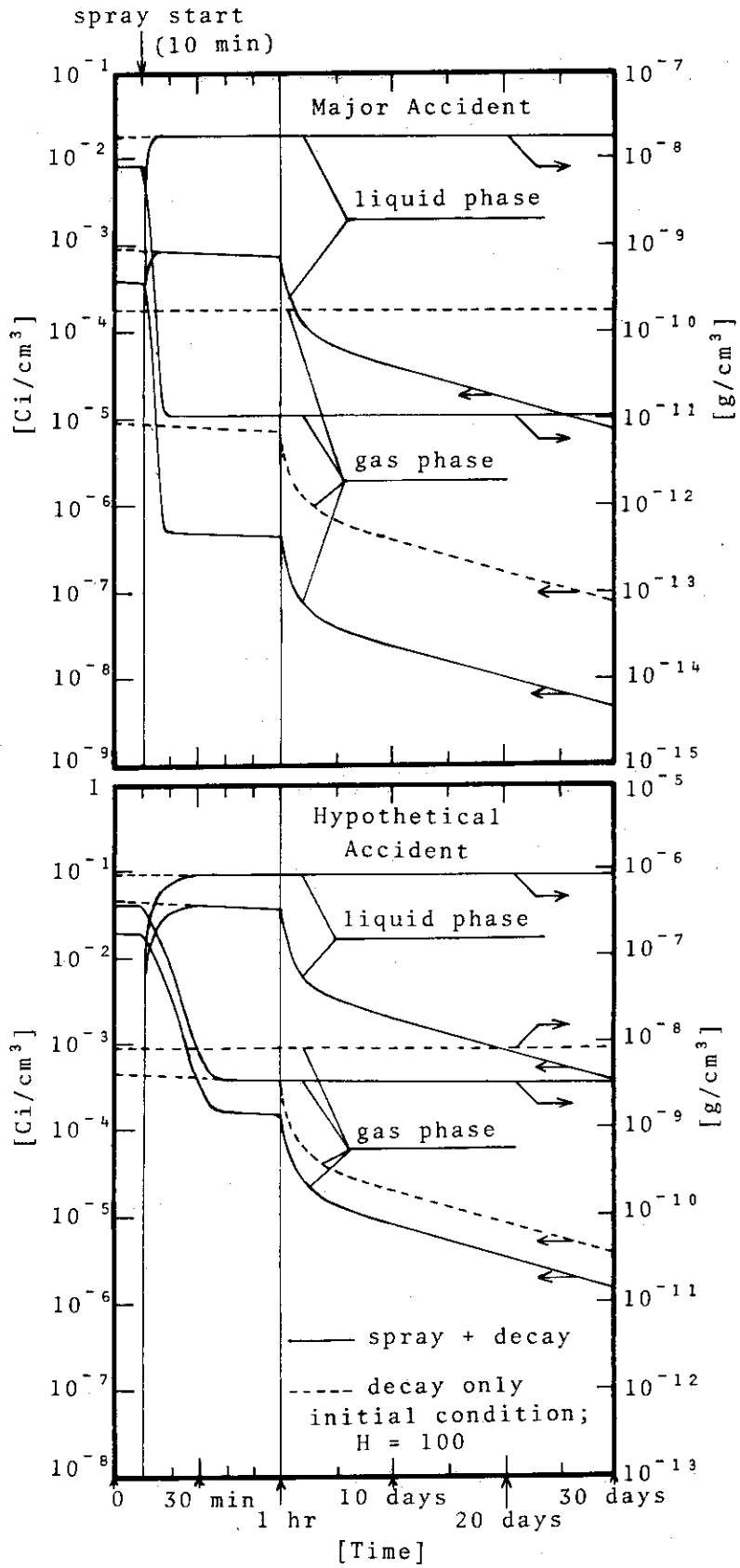


Fig. 5.2 Calculated Values of Mass and Activity Concentrations for the LOCA of Mark II

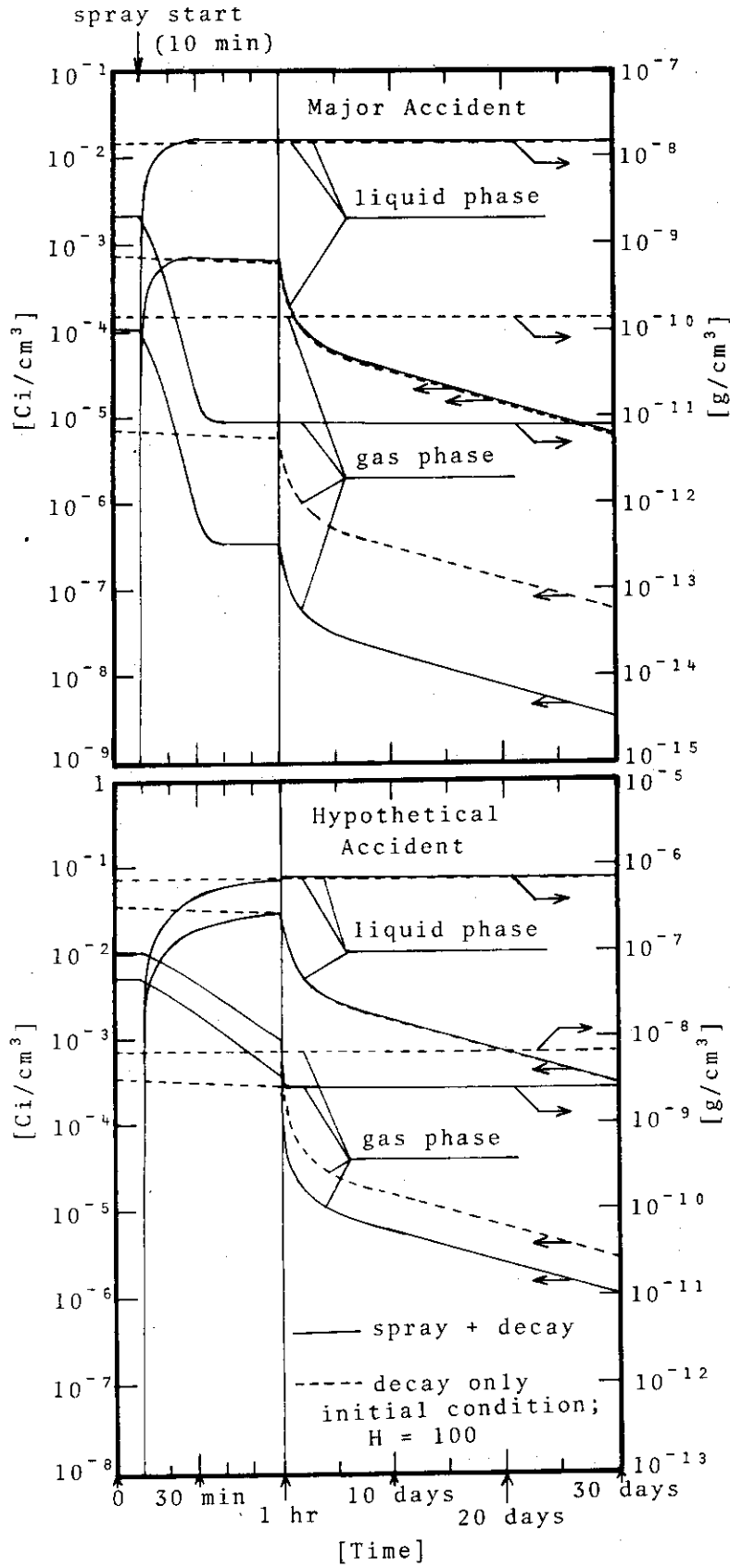


Fig. 5.3 Calculated Values of Mass and Activity Concentrations for the LOCA of Mark III

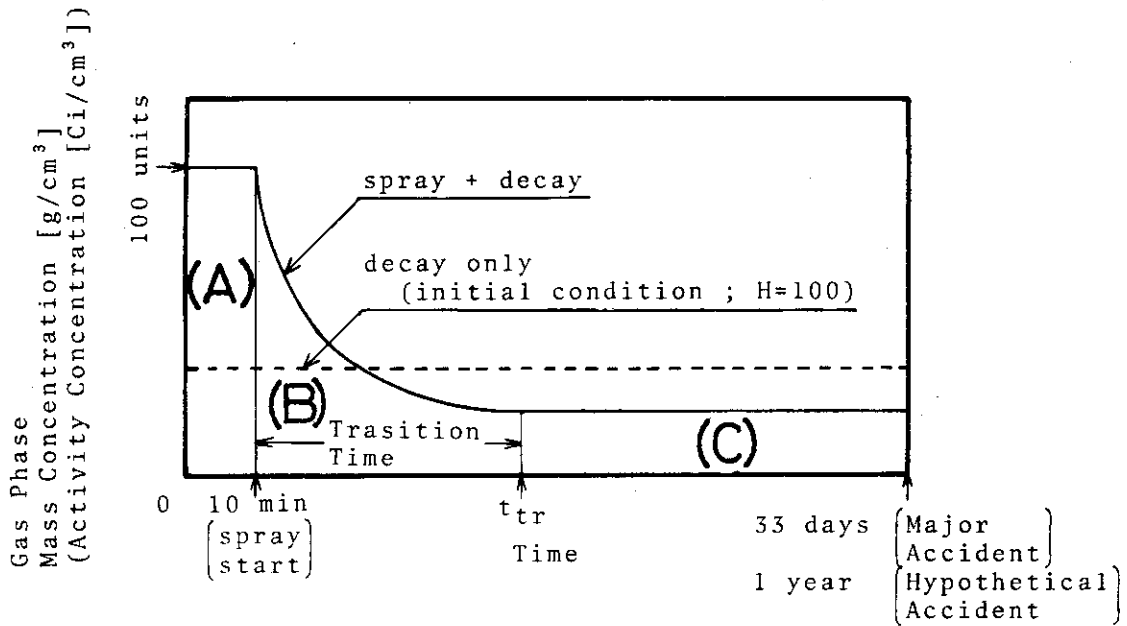


Fig. 5.4 Explanation Figure of Rearranging the Calculated Results

- (A) Integration of Concentration from Iodine Release to Spray Start
- (B) Integration of Concentration from Spray Start to  $t_{tr}$
- (C) Integration of Concentration over the Equilibrium State

Table 5.1 Effect of Spray

Integration of Gas Phase Iodine Concentration.

Major Accident ; 33 days  
Hypothetical Accident ; 1 year  
unit ; unit·day

|  |                       | (1) the case considered<br>the spray effect<br>( solid lines in<br>Figs. 5-1,2,3 ) | (2) the case of H = 100<br>( dotted lines in<br>Figs. 5-1,2,3 ) | $\frac{(2)}{(1)}$ |      |
|--|-----------------------|--|---|-------------------|------|
| for mass<br>concentration<br>[g/cm <sup>3</sup> ]      | Mark I<br>(784MWe)    | Major<br>Accident  | 4.21  | 62.9              | 14.9 |
|  |                       | Hypothetical<br>Accident   | 254   | 678               | 2.67 |
|  | Mark II<br>(1100MWe)  | Major<br>Accident  | 5.09  | 71.9              | 14.1 |
|  |                       | Hypothetical<br>Accident   | 315   | 776               | 2.46 |
|  | Mark III<br>(1220MWe) | Major<br>Accident  | 13.8  | 216               | 15.7 |
|  |                       | Hypothetical<br>Accident   | 915   | 2400              | 2.62 |
| for activity<br>concentration<br>[Ci/cm <sup>3</sup> ] | Mark I<br>(784MWe)    | Major<br>Accident  | 0.929   | 3.17              | 3.41 |
|  |                       | Hypothetical<br>Accident   | 2.19  | 3.27              | 1.50 |
|  | Mark II<br>(1100MWe)  | Major<br>Accident  | 1.00  | 3.62              | 3.61 |
|  |                       | Hypothetical<br>Accident   | 2.58  | 3.74              | 1.45 |
|  | Mark III<br>(1220MWe) | Major<br>Accident  | 1.67  | 10.9              | 6.52 |
|  |                       | Hypothetical<br>Accident   | 6.28  | 11.6              | 1.84 |

Table 5.2 Contribution of Transient Region to Integrated Value for Actual Reactors  
 for gas phase iodine mass concentration.  
 Major Accident ; 33 days  
 Hypothetical Accident ; 1 year  
 unit ; unit·day

|                       | Transition*<br>Time<br>[min] | (A)<br>(before spray) | (B)<br>{ transient<br>region } | (C)<br>(steady state) | $\frac{(B)}{(B)+(C)}$ |
|-----------------------|------------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Mark I<br>(784MWe)    | Major<br>Accident            | 0.694                 | 0.0820                         | 3.43                  | 0.0233                |
|                       | Hypothetical<br>Accident     | 0.694                 | 0.309                          | 253                   | 0.00122               |
| Mark II<br>(1100MWe)  | Major<br>Accident            | 0.694                 | 0.114                          | 4.28                  | 0.0261                |
|                       | Hypothetical<br>Accident     | 0.694                 | 0.433                          | 314                   | 0.00137               |
| Mark III<br>(1220MWe) | Major<br>Accident            | 0.694                 | 0.384                          | 12.7                  | 0.0293                |
|                       | Hypothetical<br>Accident     | 0.694                 | 1.67                           | 913                   | 0.00182               |

\* Transition Time ; Spray Start (10 min) → End of Transient Region (ttr in Fig. 5.4)

Table 5.3 Contribution of Transient Region to Integrated Value for Actual Reactors  
 for gas phase iodine activity concentration.  
 Major Accident ; 33 days  
 Hypothetical Accident ; 1 year  
 unit ; unit·day

|                       |                          | Transition *<br>Time<br>[min] | (A)<br>(before spray) | (B)<br>(transient<br>region) | (C)<br>(steady state) | $\frac{(B)}{(B)+(C)}$ |
|-----------------------|--------------------------|-------------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Mark I<br>(784MWe)    | Major<br>Accident        | 10 → 17.2                     | 0.678                 | 0.0779                       | 0.173                 | 0.311                 |
|                       | Hypothetical<br>Accident | 10 → 41.0                     | 0.678                 | 0.290                        | 1.22                  | 0.192                 |
| Mark II<br>(1100MWe)  | Major<br>Accident        | 10 → 20.2                     | 0.678                 | 0.109                        | 0.215                 | 0.335                 |
|                       | Hypothetical<br>Accident | 10 → 53.0                     | 0.678                 | 0.402                        | 1.50                  | 0.211                 |
| Mark III<br>(1220MWe) | Major<br>Accident        | 10 → 45.0                     | 0.678                 | 0.358                        | 0.633                 | 0.361                 |
|                       | Hypothetical<br>Accident | 10 → 120                      | 0.678                 | 1.44                         | 4.17                  | 0.256                 |

\* Transition Time ; Spray Start (10 min) → End of Transient Region (t<sub>tr</sub> in Fig. 5.4)



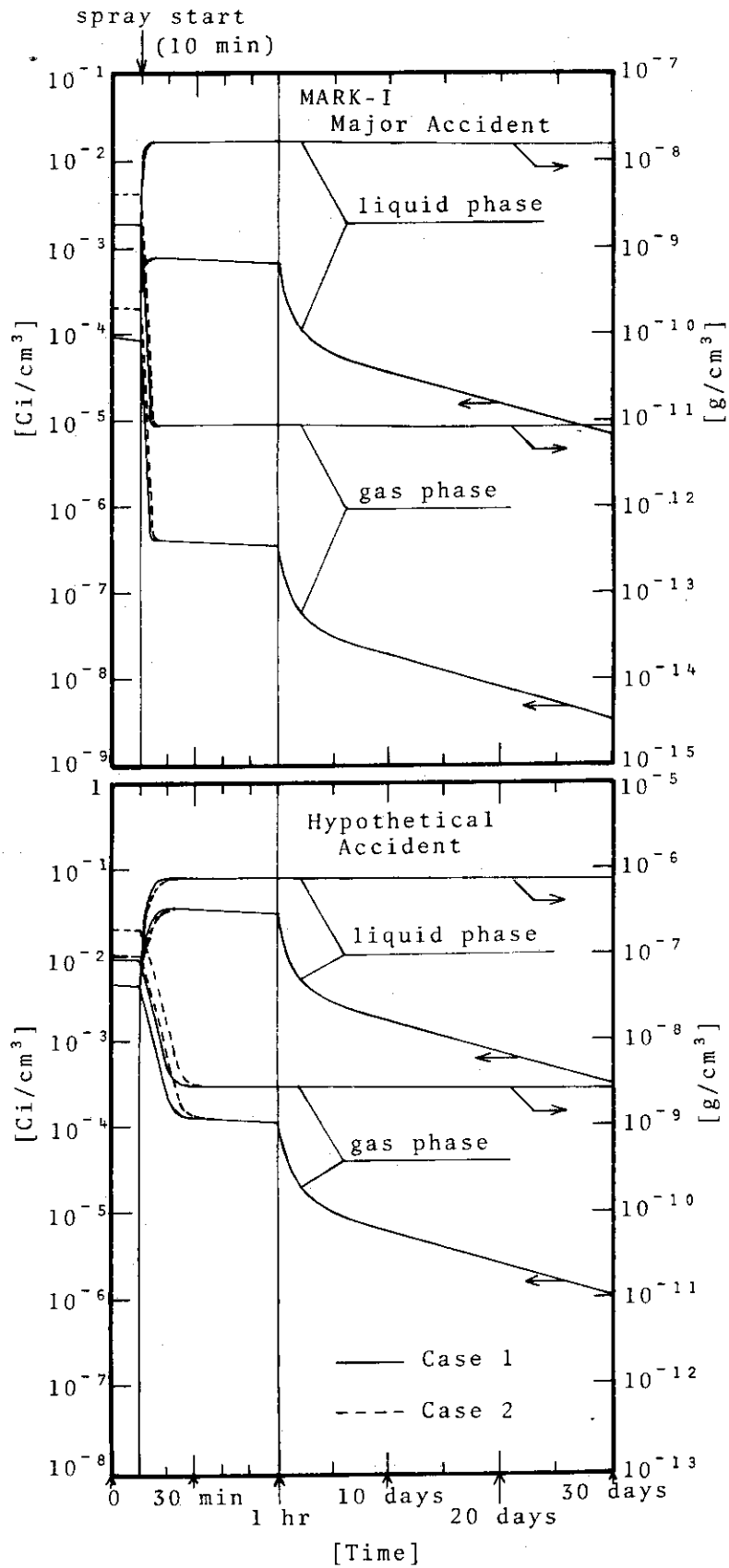


Fig. 5.5 Calculated Values of Mass and Activity Concentrations for the Simulated Experiments of Mark I with The JAERI Model Containment Vessel

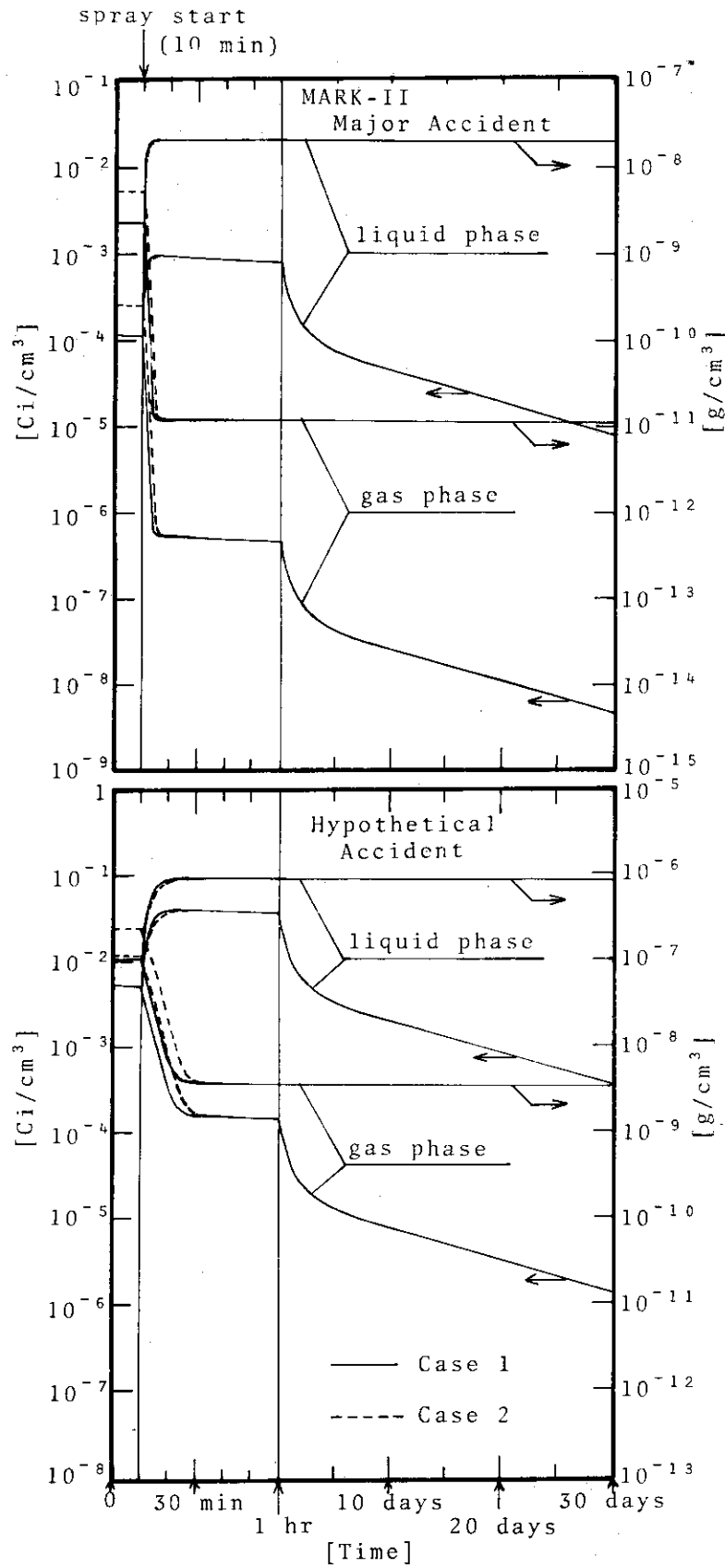


Fig. 5.6 Calculated Values of Mass and Activity Concentrations for the Simulated Experiments of Mark II with The JAERI Model Containment Vessel

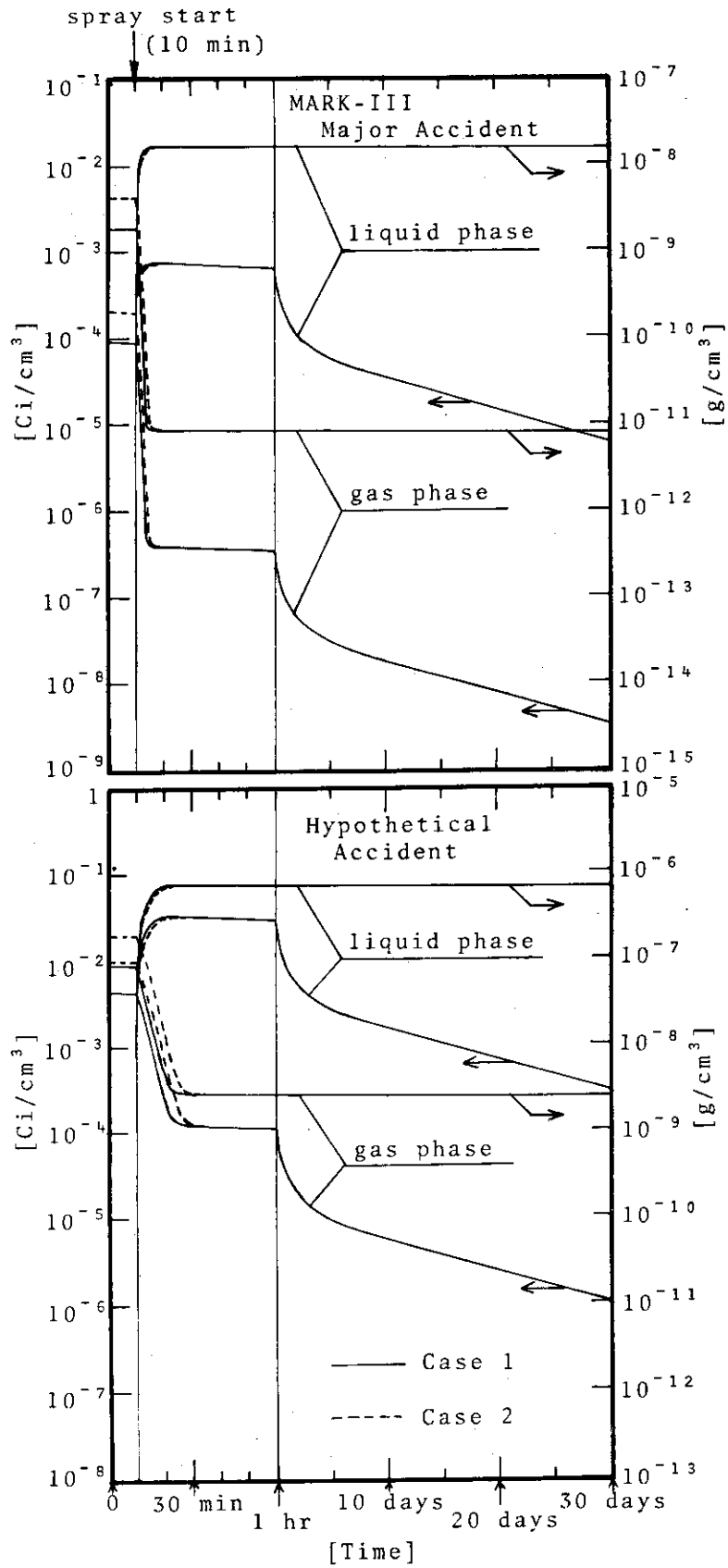


Fig. 5.7 Calculated Values of Mass and Activity Concentrations for the Simulated Experiments of Mark III with The JAERI Model Containment Vessel

Table 5.4 Contribution of Transient Region to Integrated Value for The JAERI Model Containment Vessel for gas phase iodine mass concentration.  
 Major Accident ; 33 days  
 Hypothetical Accident ; 1 year  
 unit ; unit·day

|                          | Transition*<br>Time<br>[min] | (A)<br>(before spray) | (B)<br>{transient<br>region} | (C)<br>(steady state) | $\frac{(B)}{(B)+(C)}$ |
|--------------------------|------------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|-----------------------|
|                          |                              |                       |                              |                       |                       |
| Mark I<br>(784MWe)       | 10 → 17.2                    | 0.159                 | 0.0147                       | 3.42                  | 0.00427               |
|                          |                              | 0.358                 | 0.0408                       | 3.42                  | 0.0118                |
| Hypothetical<br>Accident | 10 → 41.0                    | 0.163                 | 0.0673                       | 252                   | 0.000267              |
|                          |                              | 0.360                 | 0.160                        | 252                   | 0.000634              |
| Mark II<br>(1100MWe)     | 10 → 20.2                    | 0.182                 | 0.0181                       | 4.26                  | 0.00422               |
|                          |                              | 0.410                 | 0.0496                       | 4.26                  | 0.0115                |
| Hypothetical<br>Accident | 10 → 53.0                    | 0.186                 | 0.0896                       | 313                   | 0.000286              |
|                          |                              | 0.412                 | 0.201                        | 313                   | 0.000644              |
| Mark III<br>(1220MWe)    | 10 → 45.0                    | 0.588                 | 0.0622                       | 12.7                  | 0.00489               |
|                          |                              | 1.32                  | 0.159                        | 12.7                  | 0.0124                |
| Hypothetical<br>Accident | 10 → 120                     | 0.590                 | 0.391                        | 908                   | 0.000431              |
|                          |                              | 1.31                  | 0.726                        | 908                   | 0.000798              |

\* Transition Time ; Spray Start (10 min) → End of Transient Region (t<sub>tr</sub> in Fig. 5.4)

Table 5.5 Contribution of Transient Region to Integrated Value for The JAERI Model Containment Vessel for gas phase iodine activity concentration.  
 Major Accident ; 33 days  
 Hypothetical Accident ; 1 year  
 unit ; unit·day

| Mark                  | Accident Type         | Case   | Transition Time [min] | (A)<br>(before spray) | (B)<br>(transient region) | (C)<br>(steady state) | (B)<br>(B)+(C) |
|-----------------------|-----------------------|--------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------|----------------|
|                       |                       |        |                       |                       |                           |                       |                |
| Mark I<br>(784MWe)    | Major Accident        | Case 1 | 10 → 17.2             | 0.156                 | 0.0139                    | 0.172                 | 0.0749         |
|                       |                       | Case 2 |                       | 0.350                 | 0.0387                    | 0.172                 | 0.184          |
|                       | Hypothetical Accident | Case 1 | 10 → 41.0             | 0.159                 | 0.0626                    | 1.21                  | 0.0491         |
|                       |                       | Case 2 |                       | 0.352                 | 0.149                     | 1.21                  | 0.110          |
| Mark II<br>(1100MWe)  | Major Accident        | Case 1 | 10 → 20.2             | 0.178                 | 0.0172                    | 0.214                 | 0.0742         |
|                       |                       | Case 2 |                       | 0.401                 | 0.0471                    | 0.214                 | 0.180          |
|                       | Hypothetical Accident | Case 1 | 10 → 53.0             | 0.182                 | 0.0824                    | 1.50                  | 0.0522         |
|                       |                       | Case 2 |                       | 0.403                 | 0.187                     | 1.50                  | 0.111          |
| Mark III<br>(1220MWe) | Major Accident        | Case 1 | 10 → 45.0             | 0.574                 | 0.0585                    | 0.631                 | 0.0849         |
|                       |                       | Case 2 |                       | 1.29                  | 0.150                     | 0.631                 | 0.192          |
|                       | Hypothetical Accident | Case 1 | 10 → 120              | 0.576                 | 0.336                     | 4.26                  | 0.0732         |
|                       |                       | Case 2 |                       | 1.28                  | 0.650                     | 4.26                  | 0.132          |

\* Transition Time ; Spray Start (10 min) → End of Transient Region (t<sub>tr</sub> in Fig. 5.4)

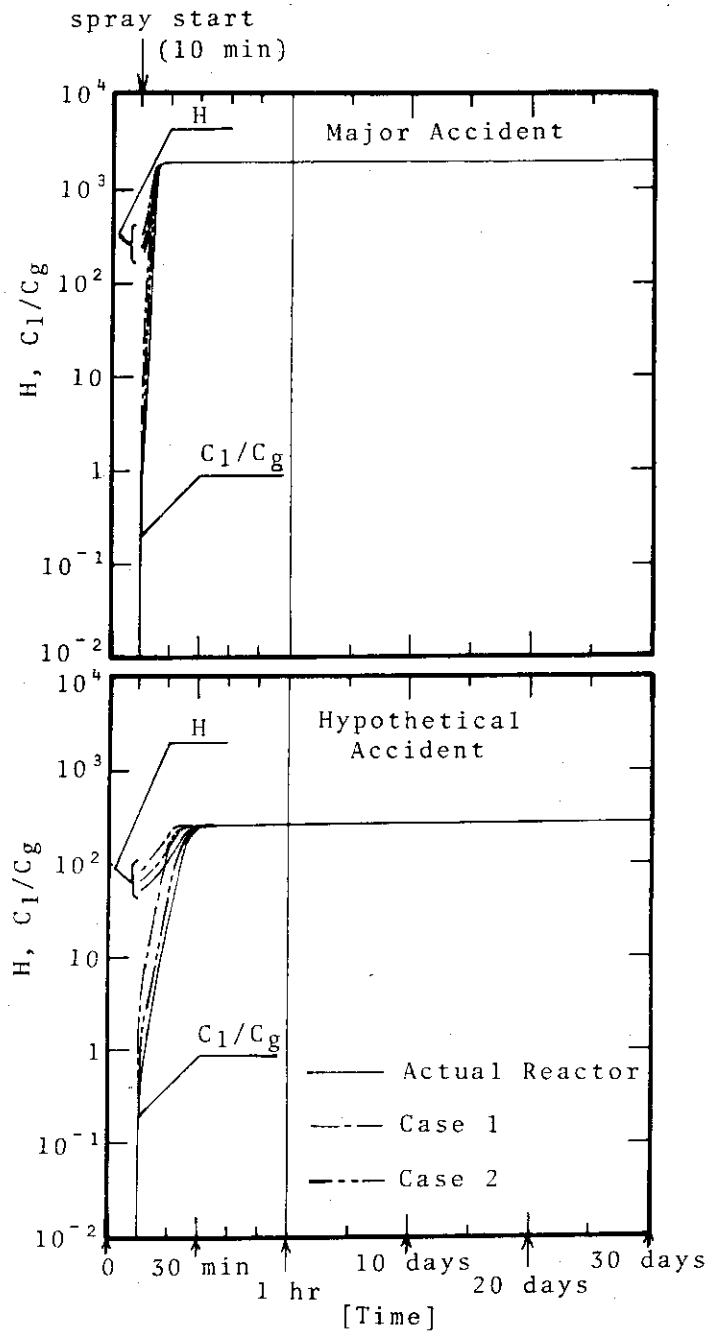


Fig. 5.8 Calculated Values of Partition Coefficient H and Mass Concentration Ratio C<sub>1</sub>/C<sub>g</sub> for Mark I (H is based on C<sub>g</sub>.)

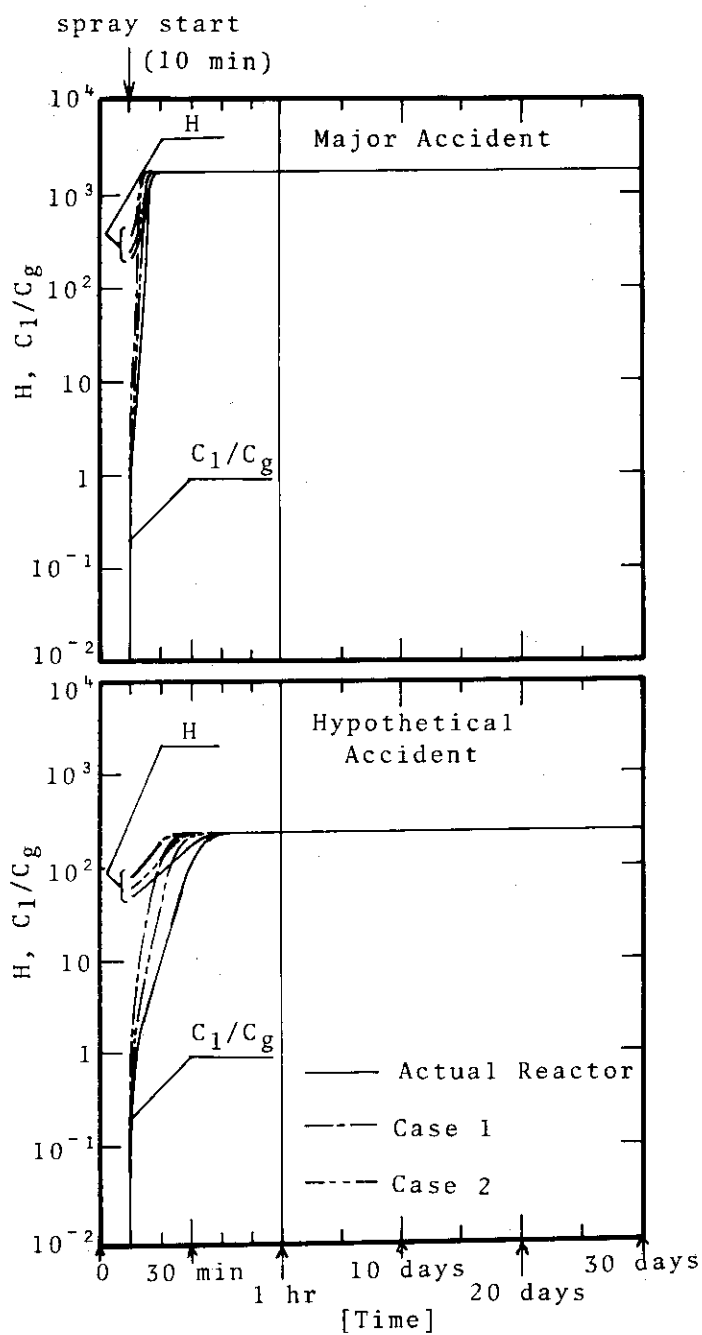


Fig. 5.9 Calculated Values of Partition Coefficient  $H$  and Mass Concentration Ratio  $C_1/C_g$  for Mark II (  $H$  is based on  $C_g$ . )

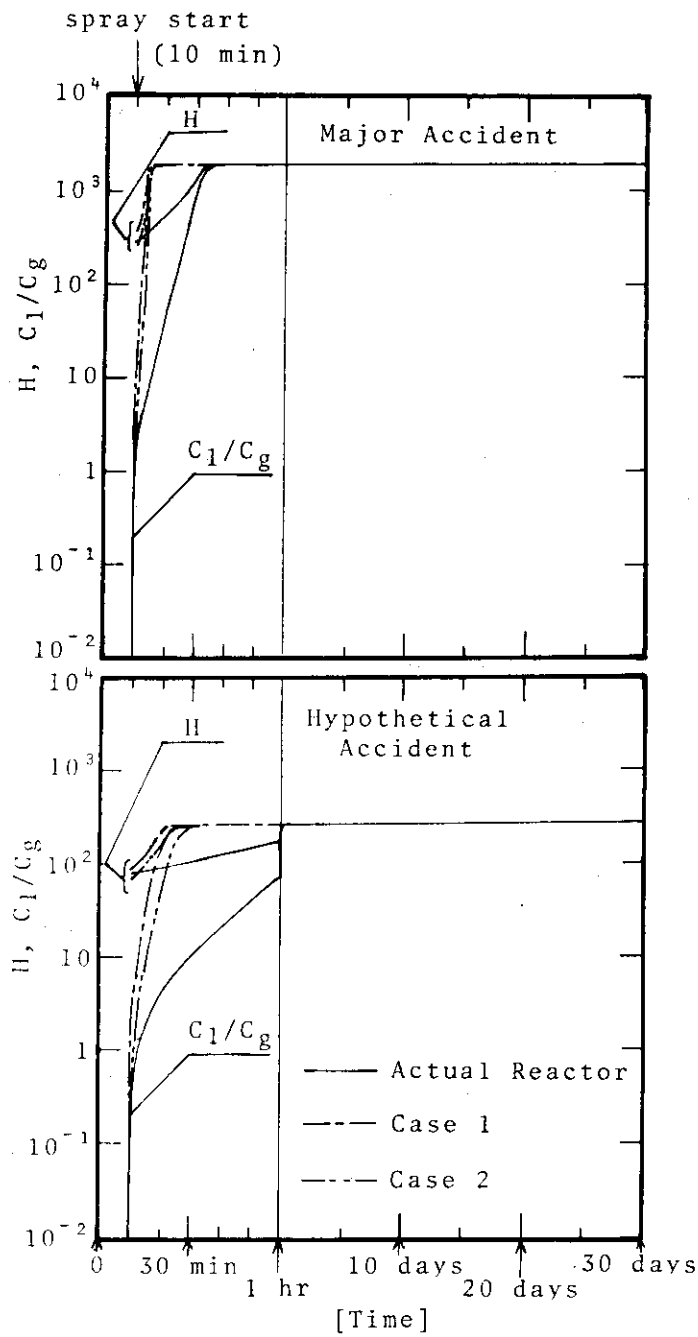


Fig. 5.10 Calculated Values of Partition Coefficient H and Mass Concentration Ratio  $C_1/C_g$  for Mark III ( H is based on  $C_g$  . )



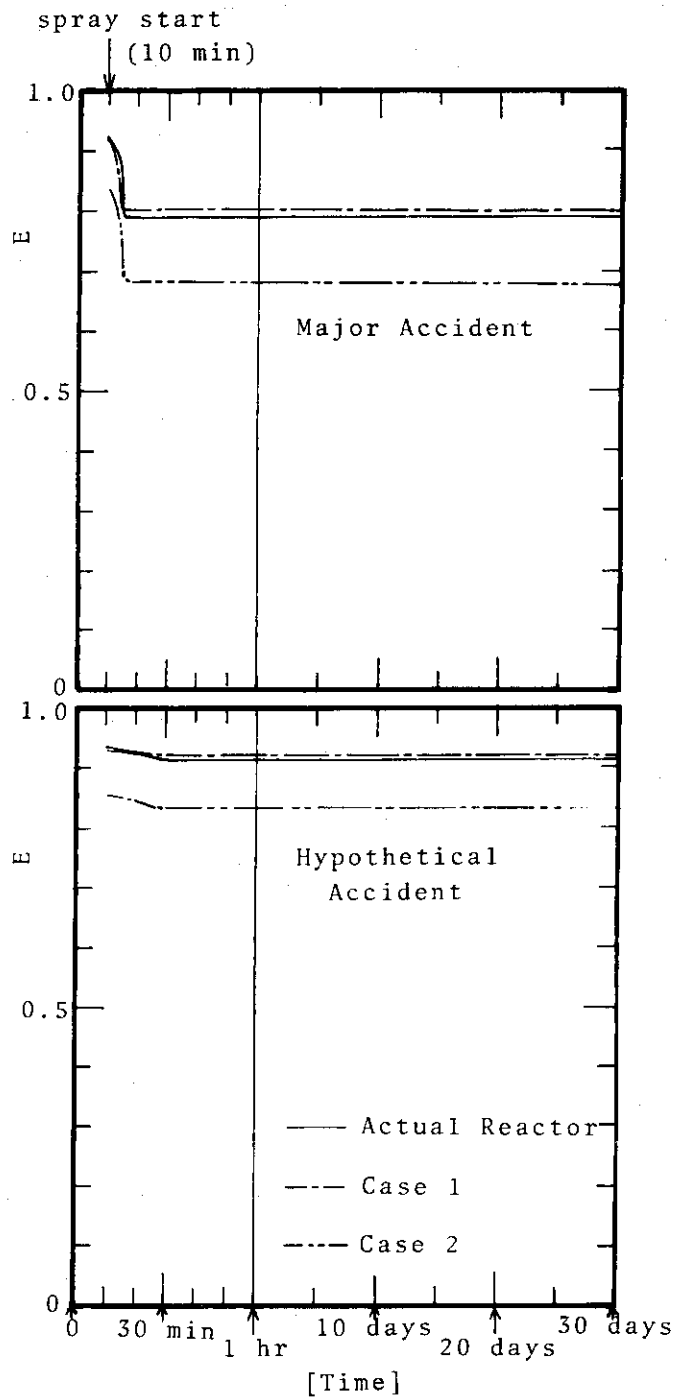


Fig. 5.11 Calculated Values of Absorption Efficiency for Mark I

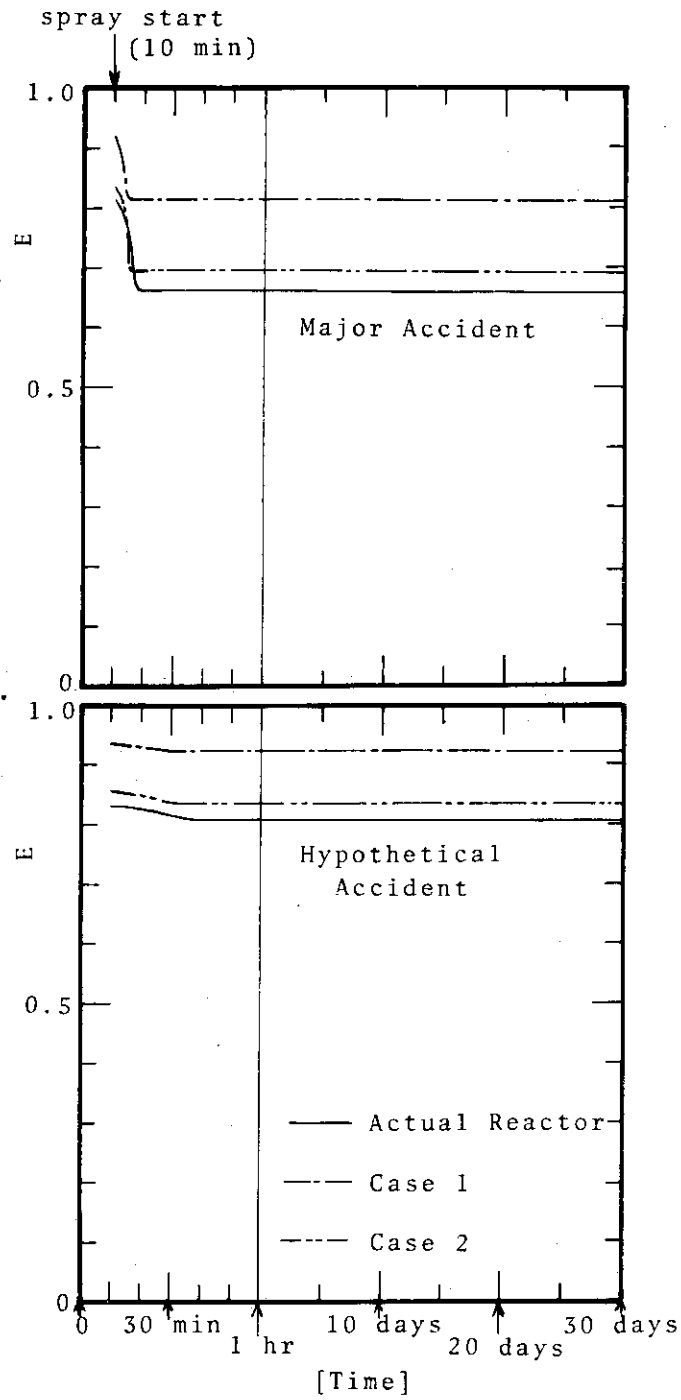


Fig. 5.12 Calculated Values of Absorption Efficiency for Mark II

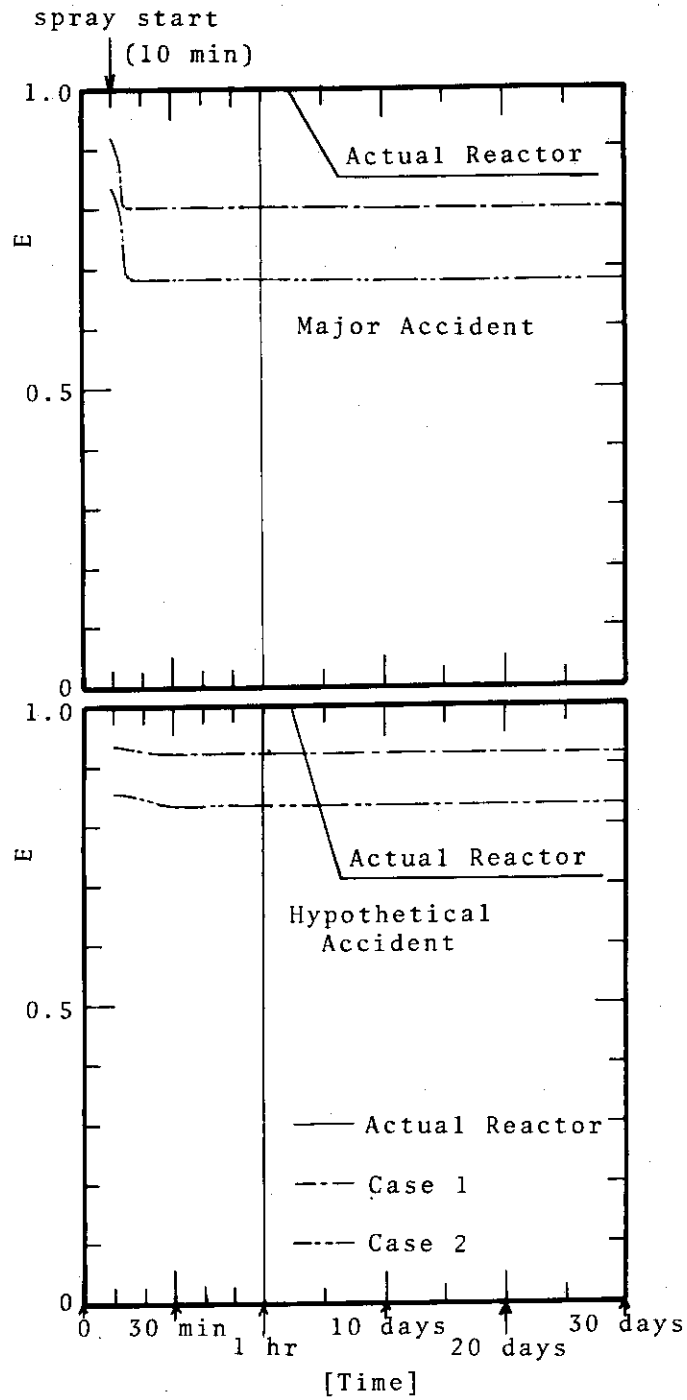


Fig. 5.13 Calculated Values of Absorption Efficiency for Mark III

## 6. 結 言

(1) 軽水型発電炉の冷却材喪失事故 (LOCA) 時に作動する格納容器スプレイの効果に関する実証的試験を実施するに際し、BWRにおける格納容器スプレイのヨウ素水洗除去効果に関する計算、および試験装置である原研モデル格納容器の予備計算を行った。

(2) 実炉格納容器および格納容器スプレイ系の主要諸元を紹介するとともに、原研モデル格納容器との比較を行った。

(3) 現行の安全審査における放出放射能評価モデルの概略を紹介した。

(4) 簡単なモデルを基に作成した計算コードSPRINKLE (A Computer Program for Predicting Spray Removal of Iodine in Reactor Containment Vessels) を用いて、実炉および原研モデル格納容器の計算を行い、その結果を示した。

(5) 実炉についてはMark I, Mark II, Mark IIIの重大事故、仮想事故について計算し、気相、液相の質量濃度変化および放射能濃度変化を示した。原研モデル格納容器に対しては、上述の実炉の平衡濃度を模擬した場合の計算を行い、その結果を気相、液相の質量濃度変化および放射能濃度変化として示した。

(6) 実炉および原研モデル格納容器の気液分配係数ならびに吸収効率についても、その経時変化を図示した。

(7) これらの計算より、次の結果が得られた。

(i) ヨウ素放出直後から気液分配係数を100とする評価法は、実際のスプレイの効果を考慮した場合に比し、大きな漏洩量を仮定している。

(ii) 格納容器からのヨウ素の漏洩量に対しては、平衡域における気相ヨウ素濃度は低い<sup>\*</sup>が、時間的因子から平衡域が支配的となる。

(iii) スプレイ開始より平衡状態到達までの時間は、Mark I, Mark IIでは重大事故で約10分、仮想事故で約50分、Mark IIIではそれぞれ約35分、110分である。(本計算ではヨウ素の加水分解が十分行われたと考えられる気液分配係数を用いた。この結果を参考にすると、遷移時間を正確に算出するためには短時間気液接触時の気液分配係数を求める必要がある。)

(iv) 平衡時の気液分配係数は、重大事故で1000以上、仮想事故で約200である。

<sup>\*</sup>ただし、原子炉敷き地の風向が被曝線量には重要な意味をもつので、遷移域における漏洩量は重要となる。

## 謝 辞

格納容器内ヨウ素挙動の計算上，東京電力株式会社原子力建設部梅津哲氏並びに日本原子力発電株式会社建設部奥野耕三氏に種々の教示を受けた。ここに記して厚くお礼申し上げます。

また，本報告をまとめるに際し適切なる御指導をいただきました安全工学部長村主進氏に，並びに終始懇切なる御助言をいただきました安全工学第3研究室長木谷進氏に深く感謝の意を表します。

## Nomenclature

|             |   |                        |
|-------------|---|------------------------|
| $C_g$       | = gas phase iodine concentration                                      | [g/cm <sup>3</sup> ]   |
| $C_{g0}$    | = gas phase iodine concentration at $t = 0$                           | [g/cm <sup>3</sup> ]   |
| $C_{gi1}$   | = initial gas phase concentration of nuclei $i$                       | [g/cm <sup>3</sup> ]   |
| $C_{gi2}$   | = gas phase concentration of nuclei $i$ after a time interval, $t$    | [g/cm <sup>3</sup> ]   |
| $C_l$       | = liquid phase iodine concentration                                   | [g/cm <sup>3</sup> ]   |
| $C_{l1}$    | = iodine concentration in spray drops entering vessel                 | [g/cm <sup>3</sup> ]   |
| $C_{l2}$    | = iodine concentration in spray drops at end of fall                  | [g/cm <sup>3</sup> ]   |
| $C_{li1}$   | = initial liquid phase concentration of nuclei $i$                    | [g/cm <sup>3</sup> ]   |
| $C_{li2}$   | = liquid phase concentration of nuclei $i$ after a time interval, $t$ | [g/cm <sup>3</sup> ]   |
| $D_l$       | = diffusion coefficient in liquid                                     | [cm <sup>2</sup> /sec] |
| $D_v$       | = diffusion coefficient in gas  | [cm <sup>2</sup> /sec] |
| $d$         | = drop diameter   | [cm]                   |
| $E$         | = drop absorption efficiency, defined by Eq. (4-2)                    | [-]                    |
| $F$         | = volumetric spray flow rate  | [cm <sup>3</sup> /sec] |
| $H$         | = partition coefficient   | [-]                    |
| $h$         | = drop fall height  | [cm]                   |
| $k$         | = overall mass transfer coefficient                                   | [cm/sec]               |
| $k_g$       | = gas phase mass transfer coefficient                                 | [cm/sec]               |
| $k_l$       | = liquid phase mass transfer coefficient                              | [cm/sec]               |
| $Re$        | = Reynolds number = $du_t\rho_v/\mu_v$                                | [-]                    |
| $Sc$        | = Schmidt number = $\mu_v/\rho_v D_v$                                 | [-]                    |
| $t$         | = time  | [sec]                  |
| $t_{1/2i}$  | = half life of nuclei $i$   | [sec]                  |
| $t_e$       | = drop fall time  | [sec]                  |
| $u_t$       | = drop terminal velocity  | [cm/sec]               |
| $V_g$       | = gas phase volume  | [cm <sup>3</sup> ]     |
| $V_l$       | = liquid phase volume   | [cm <sup>3</sup> ]     |
| $\lambda_i$ | = decay constant of nuclei $i$  | [sec <sup>-1</sup> ]   |
| $\mu_v$     | = viscosity of gas  | [g/cm·sec]             |
| $\rho_v$    | = density of gas  | [g/cm <sup>3</sup> ]   |

## Literature cited

- 1) Adachi, M. : Dr. Eng. Thesis, Kyoto Univ. (1976)
- 2) Adachi, M., W. Eguchi, F. Tohdo and M. Yoneda : Journal of Chemical Engineering of Japan, 7, 360 (1974)
- 3) Adachi, M., W. Eguchi, K. Katoh and F. Tohdo : Kagaku Kogaku, 35, 877 (1971)
- 4) Bachofner, E. and R. Hesböl : AE-408 (1970)
- 5) Devell, L., R. Hesböl and E. Bachofner : Nuclear Technology, 10, 466 (1971)
- 6) Eggleton, A. E. J. : AERE-R 4887 (1967)
- 7) Eguchi, W., M. Adachi and M. Yoneda : Journal of Chemical Engineering of Japan, 6, 389 (1973)
- 8) Eguchi, W., M. Adachi, Y. Miyake and T. Sakamoto : Journal of Nuclear Science and Technology, 12, 567 (1975)
- 9) General Electric Company : BWR/6 Standard Safety Analysis Report, April 1973, AEC Docket No. STN-50447
- 10) Griffiths, V. : AHSB(S)R45 (1963)
- 11) Kawasaki, M. : Nuclear Engineering, 19, 44 (1973)
- 12) Knudsen, J. G. : BNWL-1326 (1970)
- 13) Leaderer, C. M., J. M. Hollander and I. Perlman : " Table of Isotopes ", 6th ed., New York, Wiley (1967)
- 14) Meek, M. E. and B. F. Rider : NEDO-12154-1 (1974)
- 15) Nishizawa, Y., S. Oshima and T. Maekawa : Nuclear Technology, 10, 486 (1971)
- 16) Nishizawa, Y., Y. Kigoshi, S. Oshima, Y. Osawa and T. Maekawa : Journal of the Atomic Energy Society of Japan, 111 205 (1969)
- 17) Owzarski, P. C. and A. K. Postma : BNWL-B-357 (1974)
- 18) Parsly, L. F. : ORNL-TM-1911 (1967)
- 19) Parsly, L. F. : ORNL-TM-2412, Part IV (1970)
- 20) Parsly, L. F. : ORNL-TM-2412, Part VII (1970)
- 21) Parsly, L. F. : Nuclear Technology, 10, 472 (1971)
- 22) Postma, A. K. : WASH-1329 (1973)
- 23) Ranz, W. E. and W. R. Marshall : Chem. Eng. Progr., 48, pp.141 ~ 146 and pp.173 ~ 180 (1952)
- 24) Ritzman, R. L. : BMI-1915 (1971)

- 25) Suguri, S. : " Genshiro Anzen Kogaku ", Nikkan Kogyo Shinbun Sha (1975)
- 26) Sumiya, Y. : IAEA-151, pp.521 ~ 544 (1972)
- 27) Toyota, M., H. Yuhara, K. Mizuno and K. Kuwashima : " Genshiryoku Hatsuden Gijutsu Dokuhon ", Ohmu Sha (1976)
- 28) U. S. Atomic Energy Commission : WASH-1400 (1974)
- 29) Uchida, H. : The Thermal and Nuclear Power, 24, 1001 (1973)
- 30) Wade, G. E. : Nuclear Safety, 15, 163 (1974)
- 31) Wilke, C. R. : Chem. Eng. Prog., 46, 95 (1950)
- 32) Wilke, C. R. : J. Phys. Chem., 18, 517 (1950)
- 33) Wilke, C. R. and C. V. Lee : Ind. Eng. Chem., 47, 1253 (1955)
- 34) Wilke, C. R. and P. Chang : A. I. Ch. E. Journal, 1, 264 (1955)