

分置

# 高压下ナトリウム-水反応予備解析

1994年5月

動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

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

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

# 高圧下ナトリウム-水反応予備解析

大坪 章\*、浜田 広次\*\*

## 要 旨

数百気圧の高圧下で使用される深海炉について、耐圧殻海水漏洩事故を仮想し、この時更に深海炉システムの一部であるベローズ式アキュムレータが破断すると想定して、高圧下に於けるナトリウム-水反応の解析を行った。解析にはナトリウム-水反応解析コードSWACS/REG4を用いた。解析計算の基準ケースとしては、約1秒間で上記アキュムレータが破断するという想定と、SWACS/REG4コードで今まで行ってきた高速増殖炉の熱交換器の伝熱管破損解析との対応から、今回の解析では水リーク率を0.128kg/sとして計算した。

計算結果ではナトリウム-水反応の発生しているアキュムレータ中の破断点と、原子炉容器の間にある口径2cm長さ1.5mの細い長い配管内で圧力波は減衰して、原子炉容器上部プレナム内には大きな圧力波は伝播しないことが分かった。

解析では基準ケース以外に、圧力、水リーク率、及び耐圧殻内に残るガス空間の体積をパラメータとしたサーベイ計算も実施した。

---

\* 大洗工学センター 技術開発部 先進技術開発室

\*\* 大洗工学センター 機器構造開発部 機器システム開発室

# Preliminary Analysis of Sodium-Water Reaction under High Pressure

Akira Otsubo\* , Hirotsugu Hamada \*\*.

## ABSTRACT

Sodium-water reaction under the high pressure condition of several hundred times of atmospheric pressure was analysed based on the occurrence assumption of a hypothetical sea water leakage accident through a pressure hull with the rupture of a bellows type accumulator concerning a deep sea reactor. The sodium-water reaction analysis code of SWACS/REG4 was used in the analysis. The basic calculation case of the analysis adopted the water leakage rate of 0.128 kg/s by considering the accumulator rupture time of 1 s and the water leakage rate used in the heat transfer pipe rupture accident analyses of FBR heat exchangers which had been performed by the code.

The calculational result clarified no existence of pressure wave in the upper plenum of a reactor vessel, which was due to the attenuation of the wave in the long slender pipe of 1.5 m in length and 2 cm in inner diameter between the accumulator rupture point and the reactor vessel.

In the analysis, survey calculations were also performed by changing the parameter values of the pressure, the water leakage rate and the gas space volume remaining in the pressure hull.

---

\* Frontier Technology Development Section, Technology Development Division,  
O-arai Engineering Center.

\*\* Systems and Components Development Section, Systems and Components Division,  
O-arai Engineering Center.

# 目 次

1. はじめに .....	1
2. 解析課題 .....	2
3 解析方法 .....	5
3. 1 解析コード .....	5
3. 2 計算体系 .....	6
4. 解析結果 .....	12
4. 1 計算条件 .....	12
4. 2 計算結果 .....	13
5. 考 察 .....	40
6. おわりに .....	43
謝 辞 .....	44
参考文献 .....	45

# 表 一 覧 表

表 4. 1	固定条件 .....	16
表 4. 2	計算ケース .....	17

# 図 一 覧 表

図2.	1	深海炉システム概念図 .....	4
図3.	1	SWACSコードの計算モジュール結合関係 .....	7
図3.	2	原子炉容器寸法 .....	8
図3.	3	計算体系 .....	9
図3.	4	海水漏洩図 .....	10
図3.	5	計算セクションモデル化 .....	11
図4.	1	破損モデル比較図 .....	18
図4.	2	ネットワークモデル .....	19
図4.	3	圧力波計算結果(ケース1) .....	20
図4.	4	圧力波計算結果(ケース2) .....	22
図4.	5	圧力波計算結果(ケース3) .....	24
図4.	6	圧力波計算結果(ケース4) .....	26
図4.	7	圧力波計算結果(ケース5) .....	28
図4.	8	圧力波計算結果(ケース6) .....	30
図4.	9	圧力波計算結果(ケース7) .....	32
図4.	10	圧力波計算結果(ケース8) .....	34
図4.	11	圧力波計算結果(ケース9) .....	36
図4.	12	炉容器内外圧力(ケース2) .....	38
図5.	1	アッキュムレータ概念 .....	41
図5.	2	炉容器内外圧力(ケース1、ケース5) .....	42

# 1. はじめに

フロンティア新原子動力研究では、深海炉を近い将来に実現する可能性の高いものとして位置づけ、概念検討を行ってきた。数年に亘る研究の結果その概念はほぼ固まった。

深海炉の一次系は、冷却材としてナック (NaK) を第一候補、ナトリウム (Na) を第二候補として用いる高速炉システムであり、二次系はヘリウム-キセノン混合ガス (He-Xeガス) を作動流体とする密閉ブレイトンサイクルシステムである。

従って深海炉は通常の高速炉のように熱交換器で上記液体金属と水が熱交換するということが無いため、この部分でのいわゆるナトリウム-水反応は起こりえない。又深海炉は炉容器が無液面型で、起動時の冷却材の体積膨張吸収用には、後に図5. 1で示すようなベローズ式アキュムレータを設置しているため、第2章で説明するように仮想的な耐圧殻海水漏洩事故時でも、ナトリウム-水反応は原理的に発生しない。

しかし、深海炉は海水中で使用するものであるから、将来実際に深海炉を設計し製作するときには、その安全解析においては何らかの形でナトリウム-水反応を解析することが求められるのではないかと考えられる。このような観点から本報告書では、上記仮想的な耐圧殻海水漏洩事故時に、数百気圧という高圧の条件下でナトリウム-水反応が発生する事故シナリオを作成し、その解析を行うこととした。

尚ナトリウム冷却炉を海中で用いる試みは、既に米国で約40年前の原子力潜水艦開発時になされており<sup>(1)</sup>、この時はナトリウム-水反応についての安全解析のために、池の中にナトリウムを噴出させる実験が行われている<sup>(2)</sup>。



## 2. 解析課題

深海炉は一次系の冷却材としてナック (NaK) 又はナトリウムを予定している。二次系はヘリウムとキセノンの混合ガス (He-Xeガス) を使用した密閉ブレイトンサイクルである。図2. 1にこの報告書で解析対象とする深海炉を示す<sup>(3)</sup>。この炉は電気出力20-40kWeで、水深約5,000mの海底基地での使用を想定して概念検討したものである。

図2. 1で耐圧殻の上半分には耐圧殻内面に設置された冷却器を含む二次系のガス系があり、下半分には一次系、熱交換器及び中性子遮蔽体等が存在する。耐圧殻は厚さ数cmのチタン合金製或いは10%ニッケルを含む超高張力鋼である。この耐圧殻は有人潜水調査船の居住区に使用されるものと同じものであり、深海において海水が耐圧殻内に漏洩するようなことは考えられない。ここではそれにもかかわらずこのような事故を想定するのであり、従ってこのような海水漏洩事故は、いわゆる仮想事故として取り扱われるものである。

ここで発生を仮想する海水漏洩事故としては、このような仮想事故が発生するとした場合比較的発生確率が大いと思われる、耐圧殻の開孔面積の非常に小さい事故とする。従って事故の際には炉は十分な時間的余裕を持って、停止しているとする。

この海水漏洩事故が発生した場合、図2. 1の耐圧殻中には圧力約500気圧の海水が徐々に侵入し、最終的に耐圧殻内の空間は初めに存在していた圧力5気圧のHe-Xeガスは約1/100に圧縮され、殆どの体積を圧力約500気圧の海水が占めることになる。当然耐圧殻内の空間と連通状態にある二次系内にも海水が侵入する。しかし一次系の炉容器境界はこの場合でも健全である。即ちこのとき一次系は次のような状態である。

本システムの一次系の炉容器は無液面型である。このシステムでは深海炉起動及び停止時の温度変動による冷却材体積の膨張と収縮は、後に図5. 1で示すようなベローズ方式のアキュムレータの作動で調整している<sup>(4)</sup>。本システムでは炉容器の内と外は常に均等圧の状態にある。従って上記圧力約500気圧の海水が耐圧殻内の空間を占めたときでも、炉容器内外は均等圧の状態であり釣り合っていることになる。厳密に言えば炉容器内の燃料ピン内のガス空間が押しつぶされることになるが、この燃料ピン内のガス空間に相当する体積を見込んでベローズ方式のアキュムレータを設計すれば、このような耐圧殻内約500気圧の状態でも炉容器境界の健全性は確保される。従ってこのような海水漏洩事故時でも、所謂ナトリウム-水反応は発生しないことになる。

本報告書ではこのような状態でも、敢えてナトリウム-水反応を発生させるというシナリオを採用する。即ち、一次系システムのコンポーネントのうち最も厚さの薄いアキュムレータの一部に、海水による腐食か或いはその他の何らかの原因で亀裂が出来て、海水中でこのアキュムレータが二つの部分にゆっくりと分かると想定する。このような想

定のとき、アッキュムレータの開孔部でナトリウム-水反応が発生し、圧力波が発生することになる。従って次章以降で検討する解析課題は、このようなナトリウム-水反応による圧力波がアッキュムレータで発生し、炉容器方向に伝わって行った場合、炉容器部分で更に破損が発生するようなことがあるかどうかを検討することである。

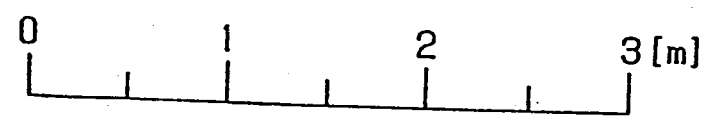
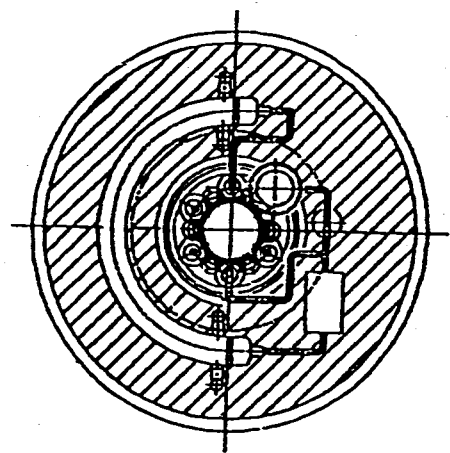
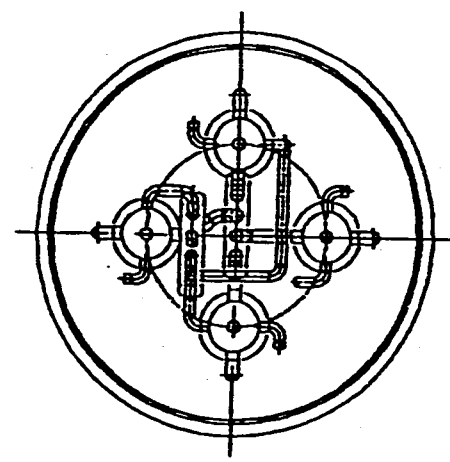
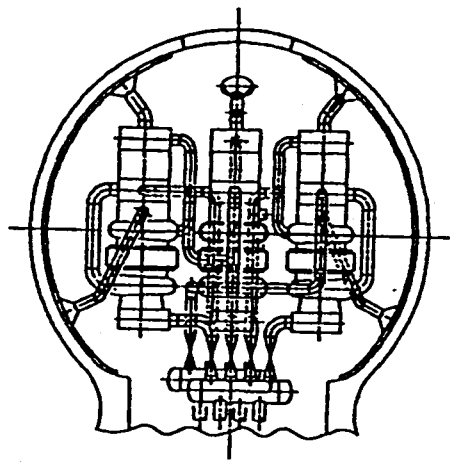
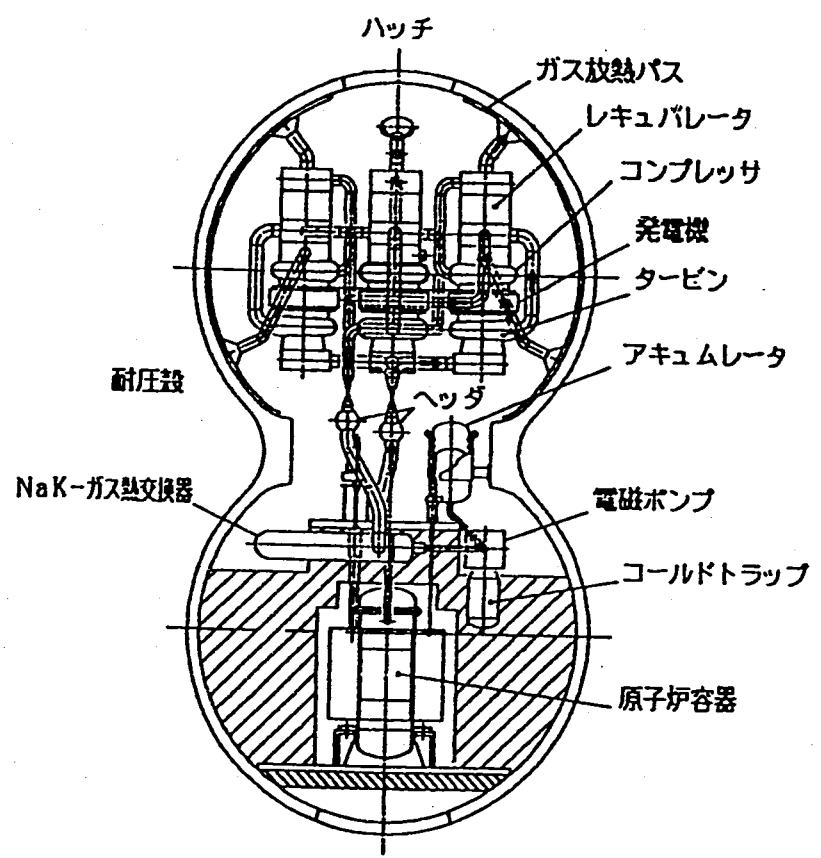


図 2. 1 深海炉システム概念図

A Concept of a Deep Sea Reactor System

## 3. 解析方法

### 3. 1 解析コード

深海炉におけるナトリウム-水反応解析は、大リーク・ナトリウム-水反応解析コード SWACS/REG4 を用いて行う<sup>(5)</sup>。本コードは、通常の高速炉システムの蒸気発生器内におけるナトリウム-水反応を解析するコードで、次の4つのモジュールから成り立っている。

#### (1) 水噴出率計算モジュール

蒸気発生器内で伝熱管が瞬時完全破断した場合の、破断口両端からの水噴出率変化を計算する。

#### (2) 初期スパイク圧計算モジュール

ナトリウム-水反応により発生した水素ガス気泡が等温膨張すると仮定し、事故蒸気発生器内の初期スパイク圧を計算する。

#### (3) 圧力波伝播計算モジュール

事故蒸気発生器で発生した初期スパイク圧が、2次主冷却系内に伝播する過程を計算する。

#### (4) 準定常計算モジュール

初期スパイク圧が収まった後の準定常圧時間領域における、ナトリウム・水素ガス流動及び圧力挙動を計算する。

以上の4つのモジュールの結合関係を図3. 1に示す。この4つのモジュールの内、準定常計算モジュールはナトリウム-水反応開始時から約数十秒経過後の準定常圧を計算するものであるが、深海炉でのナトリウム-水反応の場合このような準定常圧状態では耐圧殻内が一様圧力状態となっており、従って炉容器内外圧も等しいので、炉容器の破損に関係するような現象とはなりえない。よって本報告書の深海炉の解析では、初期スパイク圧計算モジュール及び圧力波伝播計算モジュールによる計算のみ行うこととし、準定常計算モジュールの計算は行わないこととした。

### 3. 2 計算体系

図2. 1の深海炉システムを参考にSWACS/REG4コードで計算する体系を作成する。図2. 1の深海炉システムに用いた原子炉容器寸法を図3. 2に示す。深海炉システムでは一次系境界の破損対策として原子炉容器は二重容器にする予定であるが、原子炉容器と外側容器との間隔等、原子炉容器より外側の部分の詳細はまだ未検討である。更に図2. 1で外側容器と中性子遮蔽体との間隔の寸法等も未検討のままである。このようなことを考慮して、本予備解析ではSWACS/REG4コードで計算する体系を、図2. 1で耐圧殻上半分のガス空間とアキュムレータ、アキュムレータと炉容器を結ぶ細かい配管及び炉容器上部プレナムとした。炉容器外側の耐圧殻内の圧力は、耐圧殻上半分のガス空間の圧力計算値から判断することとした。このような考えで作成した計算体系を図3. 3に示す。

次に図3. 3で耐圧殻内に海水が漏洩した状態を考える。耐圧殻内には正常運転時5気圧のガスが封入されているが、海水が仮に図3. 3では図示されていない耐圧殻下部で漏洩した場合には、図3. 4のようにガス空間は冷却器の外側のA空間と、冷却器内のB空間の2箇所に来ることになる。厳密には内部構造物即ちタービンやコンプレッサ内にもガス空間が出来るであろうが、ここでは省略する。ガス空間体積が大きい程、ナトリウム-水反応による圧力波発生は緩やかになるため、この省略は解析としては安全側の仮定である。

更に検討を進めると次のようになる。即ち図3. 4に於いて、耐圧殻の上部即ちA空間の場所の耐圧殻の部分から海水が漏洩したとすると、空間はB空間のみとなる。又、B空間の場所の耐圧殻の部分から海水が漏洩したとすると、空間は逆にA空間のみとなる。従って空間としては、A或いはBの空間のみ考慮して解析すれば良いことになる。

以上の考え方によって作成した計算セクションのモデル化を図3. 5に示す。アキュムレータの破損が原因となってナトリウム-水反応が発生するのに対応して、図3. 5ではアキュムレータのセクション内に水がリークしてナトリウム-水反応が発生するとした。またガス空間の体積については、A及びBの両方の値を用いて計算した。

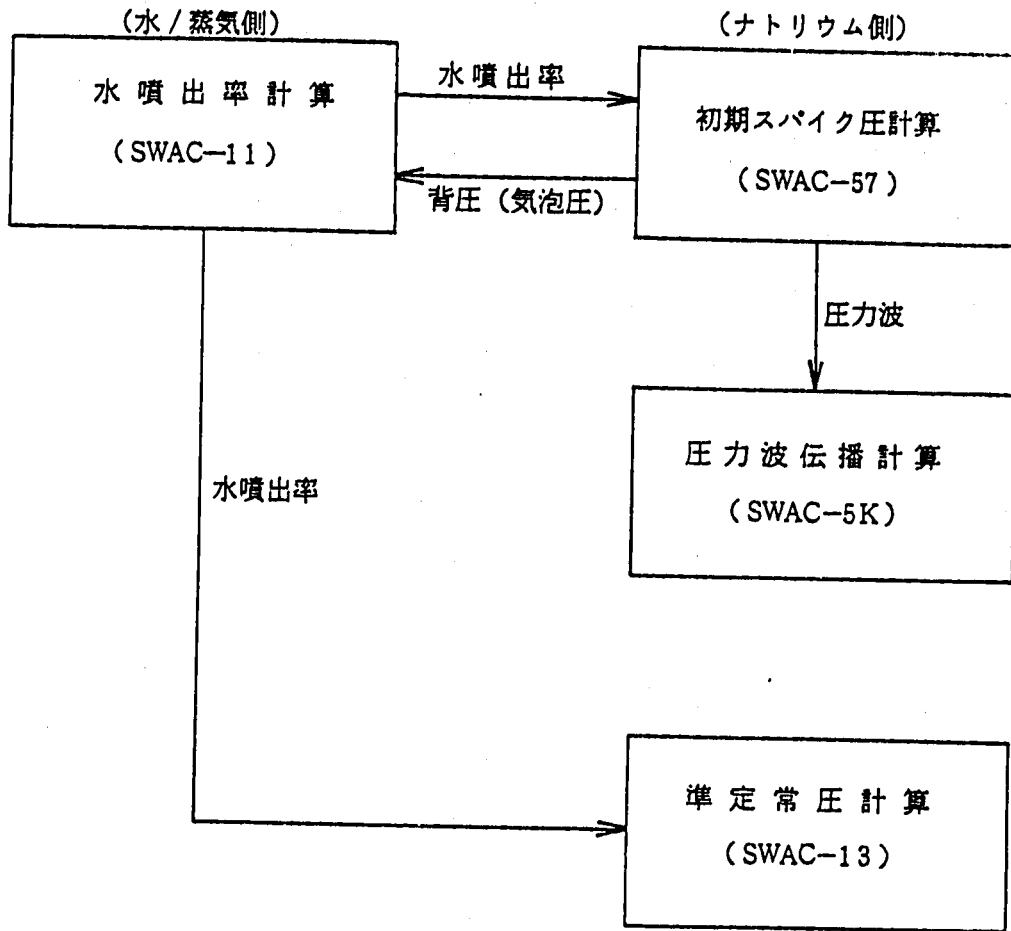


図 3. 1 SWACS コードの計算モジュール結合関係  
Linkage Relation of Calculation Modules in SWACS Code

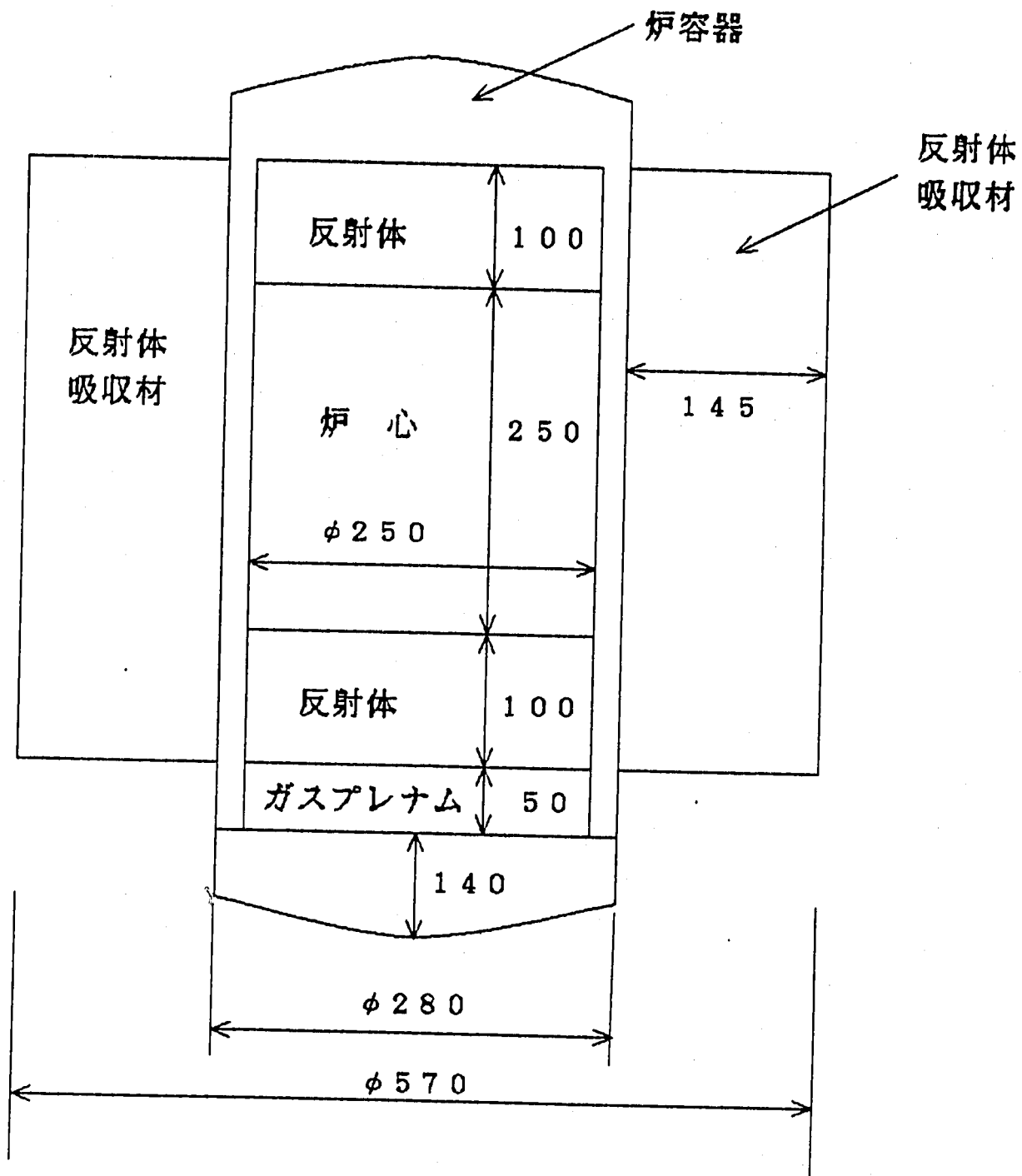


図 3. 2 原子炉容器寸法

Dimensions of a Reactor Vessel

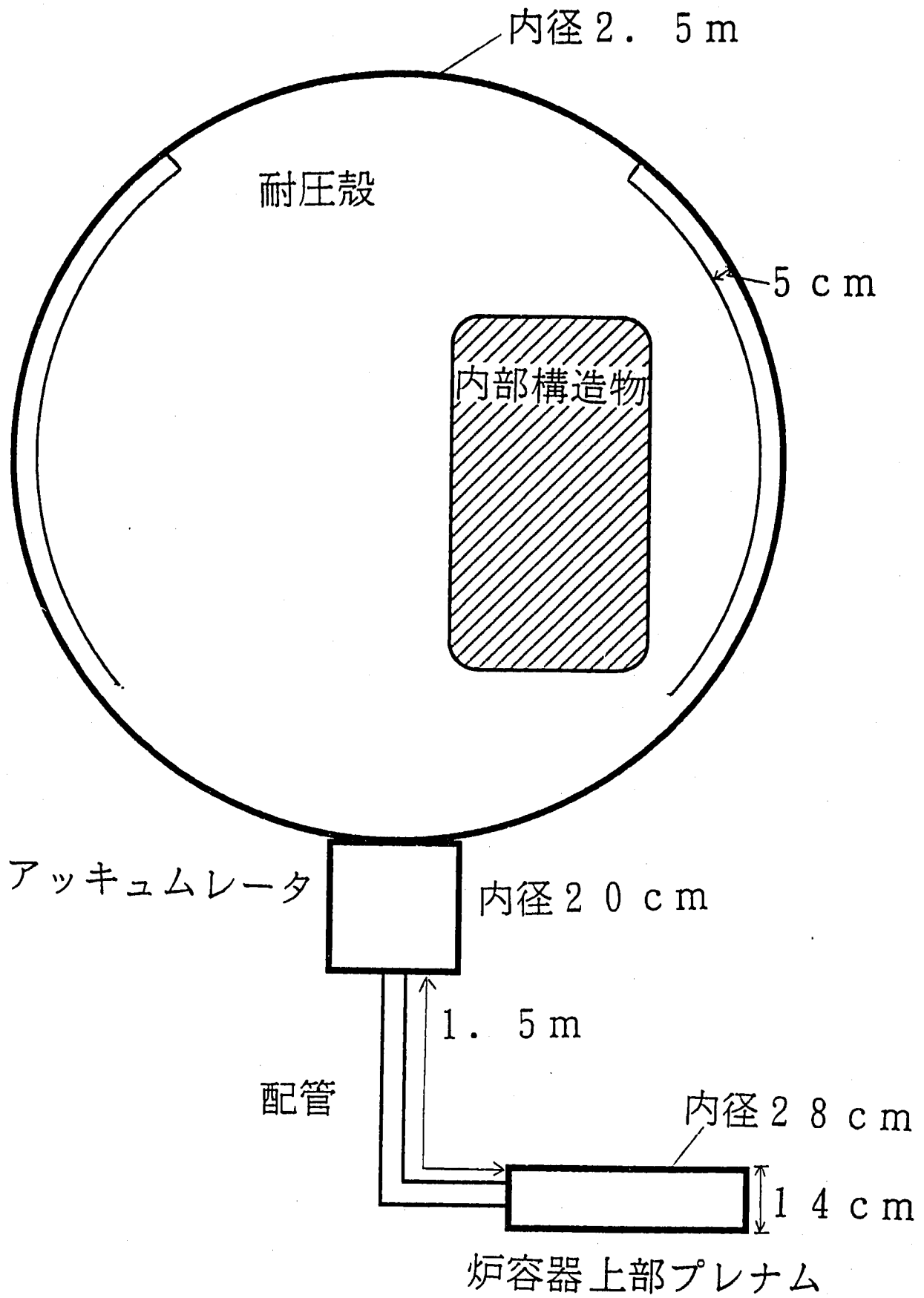


図 3. 3 計算体系

Calculation Configuration



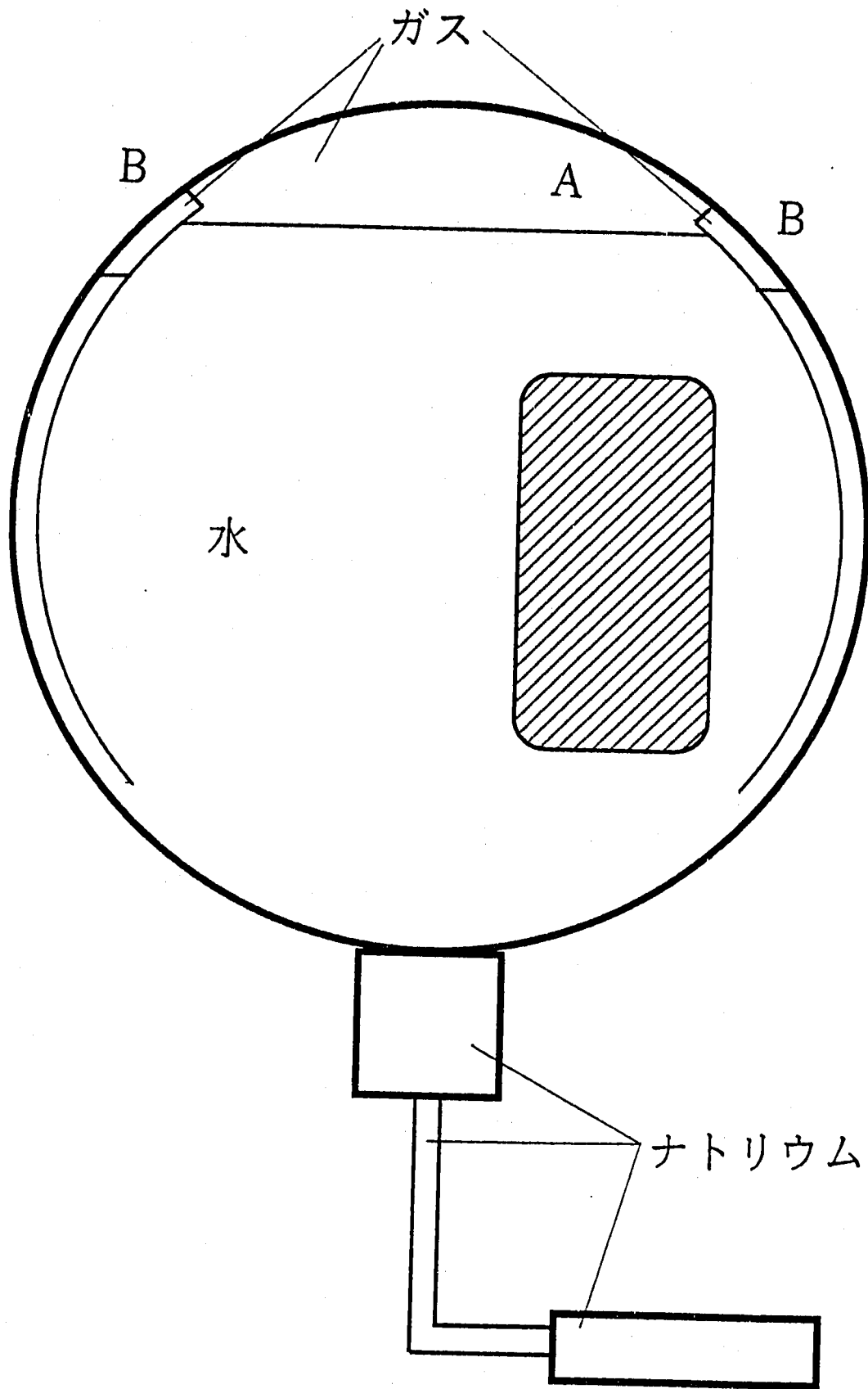


図 3. 4 海水漏洩図  
Leakage of Sea Water

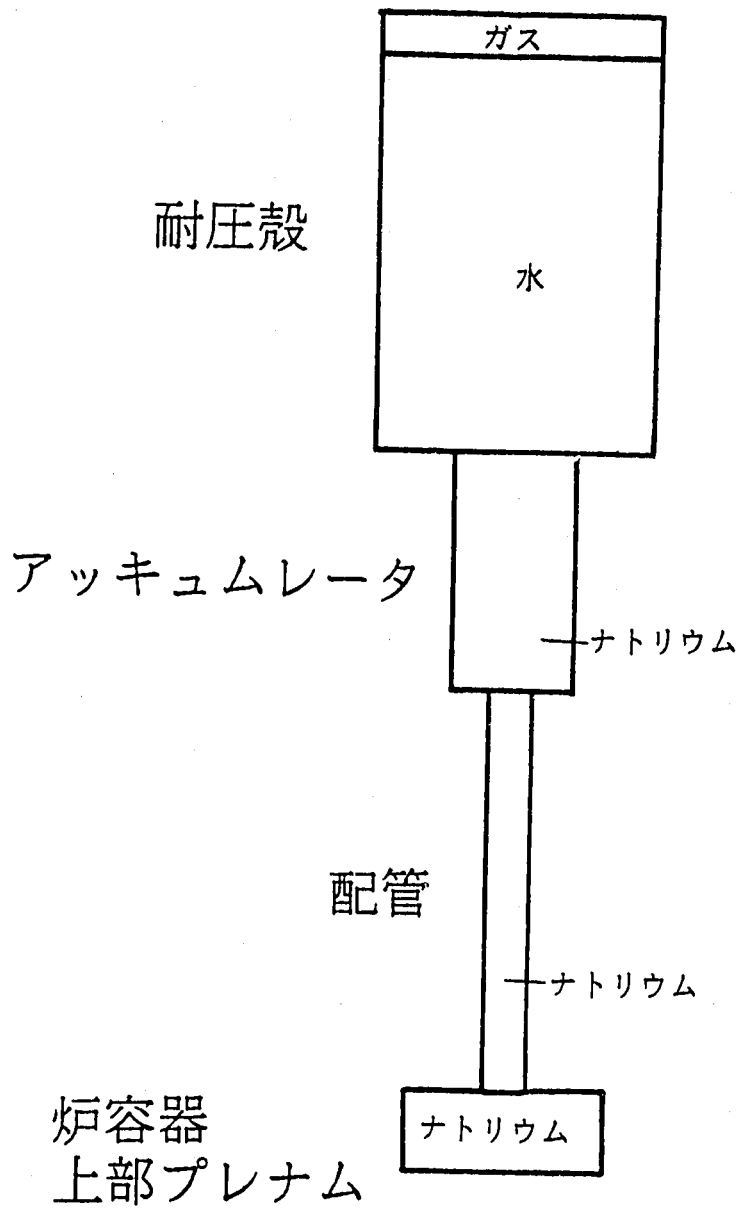


図 3. 5 計算セクションモデル化

Calculation Section Model

## 4. 解析結果

### 4. 1 計算条件

図3. 4に対応して計算を行うための固定条件を表4. 1に示す。この表のうち、耐圧殻の体積については同体積の円筒に置き換えた。ケースAについては耐圧殻中央部分の体積、ケースBについては耐圧殻内面に設置された冷却器内の体積とした。耐圧殻内空間はそれぞれのケースについて、定常運転時 $5 \text{ kg/cm}^2$ のガスが存在していたのが $500 \text{ kg/cm}^2$ の深海圧の状態では体積が小さくなったとして計算した値である。ここで $500 \text{ kg/cm}^2$ という数値は、後に表4. 2で説明するケース1の基準ケースに相当する値である。ナトリウム-水反応で発生する初期のガス気泡の直径は、SWACS/REG 4コードで今までに解析してきた高速増殖炉の蒸気発生器の伝熱管の内径である。

表4. 2に計算ケースを示す。ケース1は基準ケースである。圧力は水深 $5000 \text{ m}$ の太平洋海底を想定して選択した値である。水リーク率は図4. 1に示すアッキュムレータ破損モデルと高速増殖炉蒸気発生器の伝熱管の破断モデルの対応関係から設定した。即ち水リーク率 $0.128 \text{ kg/s}$ という値は、アッキュムレータが1秒間で2つに割れてナトリウム面が水と接触するとした場合のナトリウム面積即ちアッキュムレータ断面積の2倍を、蒸気発生器の伝熱管の破断モデルの初期泡表面積と等しいとして計算した初期泡の個数に相当する初期泡重量を計算して求めたものである。以下にこの計算式を示す。

アッキュムレータ破損時のナトリウムと水の接触面積の増加速度は次のように求められる。

$$\text{アッキュムレータ断面積} \cdots \pi \times 10^2 \text{ cm}^2 = 100 \pi \text{ cm}^2$$

$$\text{アッキュムレータ破損後のナトリウムと水の接触面積} \cdots 200 \pi \text{ cm}^2$$

$$\text{ナトリウムと水の接触面積増加速度} \cdots 200 \pi \text{ cm}^2 \div 1 \text{ s} = 200 \pi \text{ cm}^2/\text{s}$$

一方、蒸気発生器の伝熱管の破断モデルでは、初期泡1個につきその体積と表面積は次のようになる。

$$\text{初期泡体積} \cdots (4/3) \pi \times 0.61^3 \text{ cm}^3 = 0.3026 \pi \text{ cm}^3$$

$$\text{初期泡表面積} \cdots 4 \pi \times 0.61^2 \text{ cm}^2 = 1.4884 \pi \text{ cm}^2$$

アッキュムレータの破損と蒸気発生器伝熱管の破断について、両者の単位時間当たりのナトリウムと水の接触面積増加速度が等しいとして、両者の間の関係式を導く。即ち、 $200 \pi \text{ cm}^2/\text{s}$ という、ナトリウムと水の接触面積増加速度に対応する蒸気発生器の破断伝熱

管からの水流出速度が、次式のように計算される。

$$200 \pi \text{ cm}^2/\text{s} \div 1.4884 \pi \text{ cm}^2 \times 0.3026 \pi \text{ cm}^3 = 0.128 \text{ kg/s}$$

表4. 2で2から9のケースは、1の基準ケースの圧力、水リーク率、耐圧殻空間をパラメータとして変化させて計算したものである。

図4. 2にはネットワークモデルを示す。計算のアウトプットは数字 Joint Number と Member Number で示す位置で出力した。Joint Number と Member Number の読み方については次節で説明する。

#### 4. 2 計算結果

図4. 3から図4. 11に、表4. 2のケース番号に従って計算結果を図示する。このうち図4. 3のケース1は基準ケースである。図4. 3には計算体系内の各位置毎の計算結果を示す小さな図を合計20個記載している。ここではまず、この各位置を示す記号の読み方について解説する。

各小図の中にあるJOINT- $\alpha$ (M $\beta$ - $\gamma$ )という記号は、計算結果の場所を表している。図4. 2でこの記号につき説明する。まず $\beta$ というのは図4. 2では三角印中の数字で、これは部材を示す。部材というのは図4. 2で縦の線分で示されている部分である。次に $\gamma$ は1がその部材の上端、2が下端を示す。最後に $\alpha$ はこの $\beta$ と $\gamma$ で示される点が存在する位置を表す。従って具体的に言うと次のようになる。

JOINT-2(M1-2) . . . . . 耐圧殻の底

JOINT-2(M2-1) . . . . . アッキュムレータの上端

上記の2つの表示は場所は同じ位置であるが部材が異なるため、断面積はJOINT-2(M1-2)の方がJOINT-2(M2-1)の方よりずっと大きい。

図4. 3ではH2 BUBBLE PRESSUREの小図で表されている圧力波はJOINT-6(M6-1)まで伝わっているが、JOINT-7(M6-2)では消えている。これは約1msの短周期の圧力振動である圧力波は、アッキュムレータと原子炉容器をつなぐ口径2cm長さ1.5mの細い長い配管を通過するときに、大きく減衰するからである。従って本計算の最終点であるJOINT-8(M7-2)で表される原子炉容器上部プレナム下端でも、圧力波は存在しない。よって本計算結果によれば基準ケースでは、アッキュムレータ破損によって発生したナトリウム-水反応は、原子炉容器の新たな損傷を引き起こすことはない。

図4. 4のケース2から図4. 7のケース5は基準ケースの圧力の値をパラメータとし

て変化させた計算である。この場合耐圧殻の空間体積は基準ケースの値のままである。即ち実際には圧力 $50 \text{ kg/cm}^2$ の場合、基準ケースでは圧力 $500 \text{ kg/cm}^2$ であるから、耐圧殻の空間体積は基準ケースの値の10倍になる筈であるが、本計算ではそういう配慮はしていない。従って、図4.4のケース2から図4.6のケース4の基準ケースのより圧力の小さい場合には、実際よりも耐圧殻の空間体積を小さくしていることになり、この空間での圧力波減衰効果を小さくしていることになるので、計算結果の圧力波は実際より大きな値となっている。

先ず図4.6のケース4と図4.7のケース5では圧力の値に対応して、JOINT-6(M6-1)での圧力波の大きさは基準ケースの場合の圧力波の大きさと多少相違があるが、このいずれのケースでもJOINT-7(M6-2)及びJOINT-8(M7-2)では圧力波は存在しない。従って水深3000m以上の深海では、アッキュムレータ破損によるナトリウム-水反応は、原子炉容器の新たな損傷を引き起こすことはないと言える。

図4.4のケース2から図4.5のケース3の場合には、原子炉容器上部プレナム内の圧力を示すJOINT-7(M7-1)及びJOINT-8(M7-2)のグラフに、時刻12.5s付近に $8 \text{ kg/cm}^2$ から $15 \text{ kg/cm}^2$ の圧力上昇がみられる。これはナトリウム-水反応で発生した圧力波が、口径2cm長さ1.5mの細い長い配管を通過するとき単に全体的に減衰するのではなく、元の圧力波のうち短周期の成分が特に減衰し、比較的長周期の成分は余り減衰せずに伝播したことによるものである。

図4.4のケース2の場合に関して検討を試みる。ここでは耐圧殻内のJOINT-2(M1-2)或いはJOINT-1(M1-1)の圧力を、本解析では計算しなかった原子炉容器外側の位置での圧力と考えて、JOINT-2(M1-2)或いはJOINT-1(M1-1)の圧力とJOINT-7(M7-1)の圧力の差を検討してみる。この差の値は原子炉容器内外の圧力差を近似的に表していると考えられる。JOINT-2(M1-2)或いはJOINT-1(M1-1)の圧力とJOINT-7(M7-1)の圧力を重ねて、図4.12に示す。この図で分かるようにどちらのグラフでも、この場合原子炉容器内外の圧力差のピーク値はせいぜい約 $4 \text{ kg/cm}^2$ である。従ってこの場合でも原子炉容器の健全性は保てそうである。

図4.8のケース6と図4.9のケース7は水リーク率を10倍及び50倍にして、水リーク率の現象に対する影響を調べることを目的としたケースである。これらの図では細い長い配管入口のJOINT-6(M6-1)で時刻8msあたりからすどい圧力振動がみられるのが上記のケースと特に異なる点である。しかしこの圧力振動も、配管出口のJOINT-7(M6-2)では消えている。図4.9のケース7は本計算では最も水リーク率を大きくしたケースであるが、この場合原子炉容器上部プレナムのJOINT-7(M7-1)では、圧力上昇のピークが約 $25 \text{ kg/cm}^2$ と大きな値になっている。耐圧殻内のJOINT-2(M2-1)でも同程度の圧力上昇がある。従ってこの場合でも原子炉容器内外の圧力差のピーク値は、ずっと小さい値であると考えられる。

図4.10のケース8と図4.11のケース9は、図4.8のケース6と図4.9のケ

ース7と同じ計算を、表4. 1で説明したガス空間体積がずっと大きいB空間の場合について行ったものである。図4. 10を図4. 8のケース6と、図4. 11を図4. 9と比較してみると、上記の細い長い配管内でのするどい圧力振動はより大きくなっているが、それ以外の圧力変化の様子は、ガス空間体積がずっと大きくなったのが効いて、よりゆるやかなものになっている。

表 4. 1 固定条件

Fixed Condition

寸法	
アッキュムレータ	内径 ; 20 cm    高さ ; 22 cm
配管	内径 ; 2 cm    長さ ; 1.5 m
炉容器上部プレナム	内径 ; 28 cm    高さ ; 14 cm
耐圧殻 (当価円筒)	A : 内径 ; 1.94 m    高さ ; 2.5 m B : 内径 ; 0.69 m    高さ ; 2.5 m
耐圧殻内空間	A : 81.8 ℓ    B : 1.57 ℓ
反応初期泡	直径 ; 1.22 cm
温度	
ナトリウム	550 °C
海水	2 °C

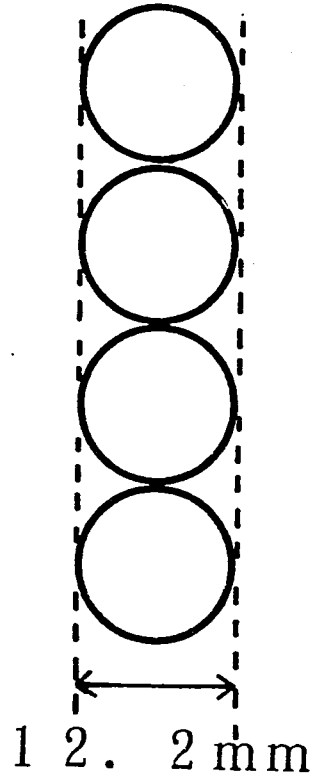
## 表 4. 2 計算ケース

Calculation Cases

ケース	圧力 kg/cm <sup>2</sup>	水リーク率 kg/s	耐圧殻 空間
1	500	0.128	B
2	25	0.128	B
3	50	0.128	B
4	300	0.128	B
5	1000	0.128	B
6	500	1.28	B
7	500	6.4	B
8	500	1.28	A
9	500	6.4	A



F B R 蒸気発生器伝熱管  
破損モデル



深海炉アキュムレータ  
破損モデル

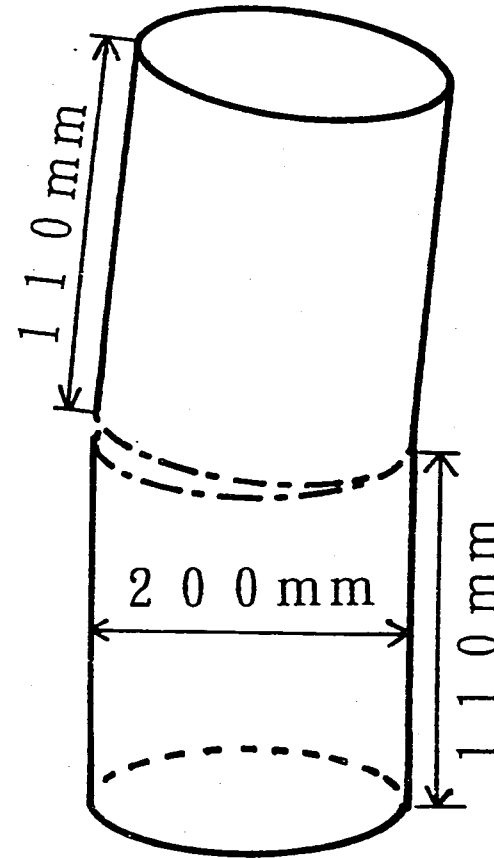


図 4. 1 破損モデル比較図

Comparison between Rupture Models

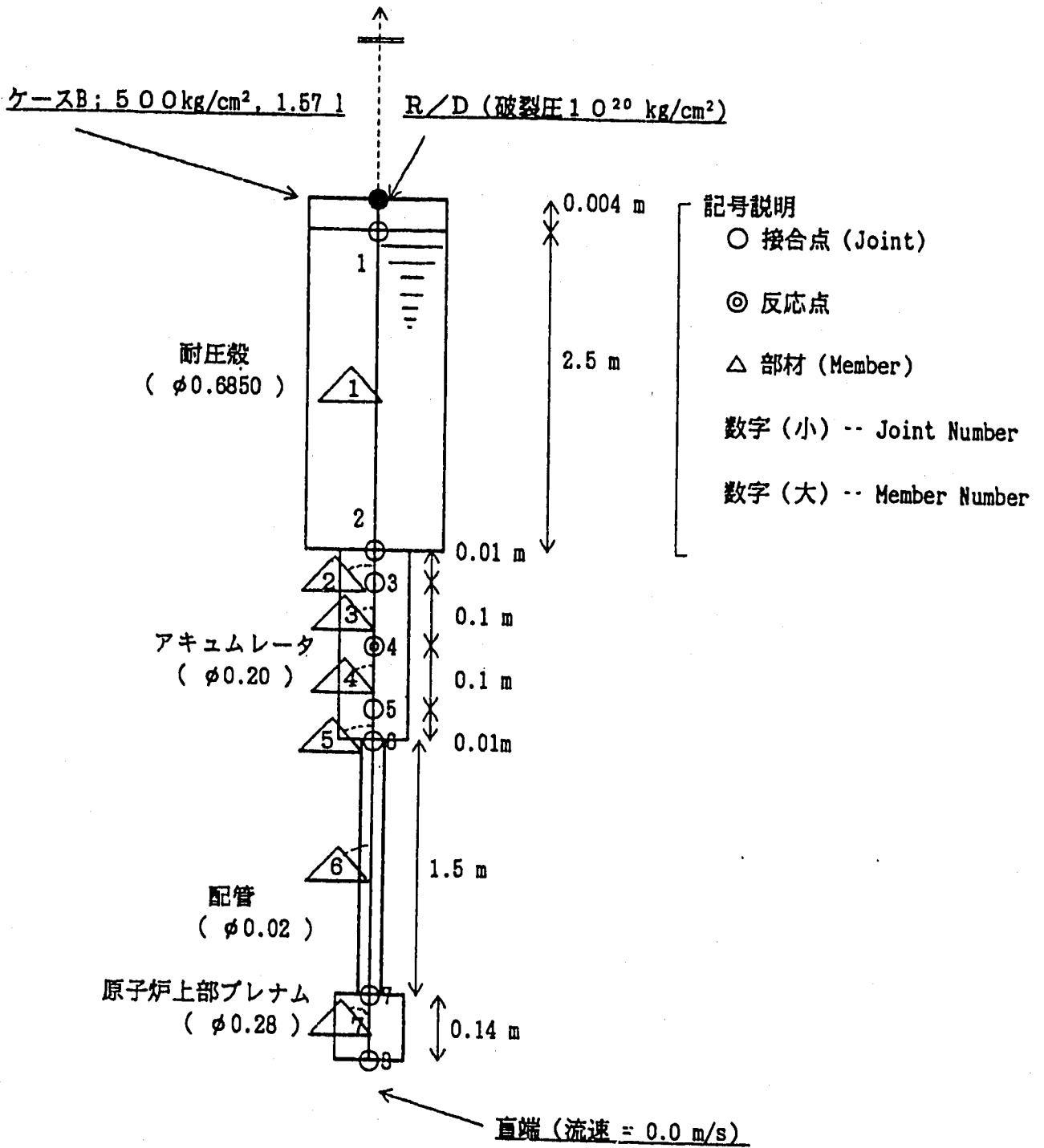


図 4. 2 ネットワークモデル

Network Model



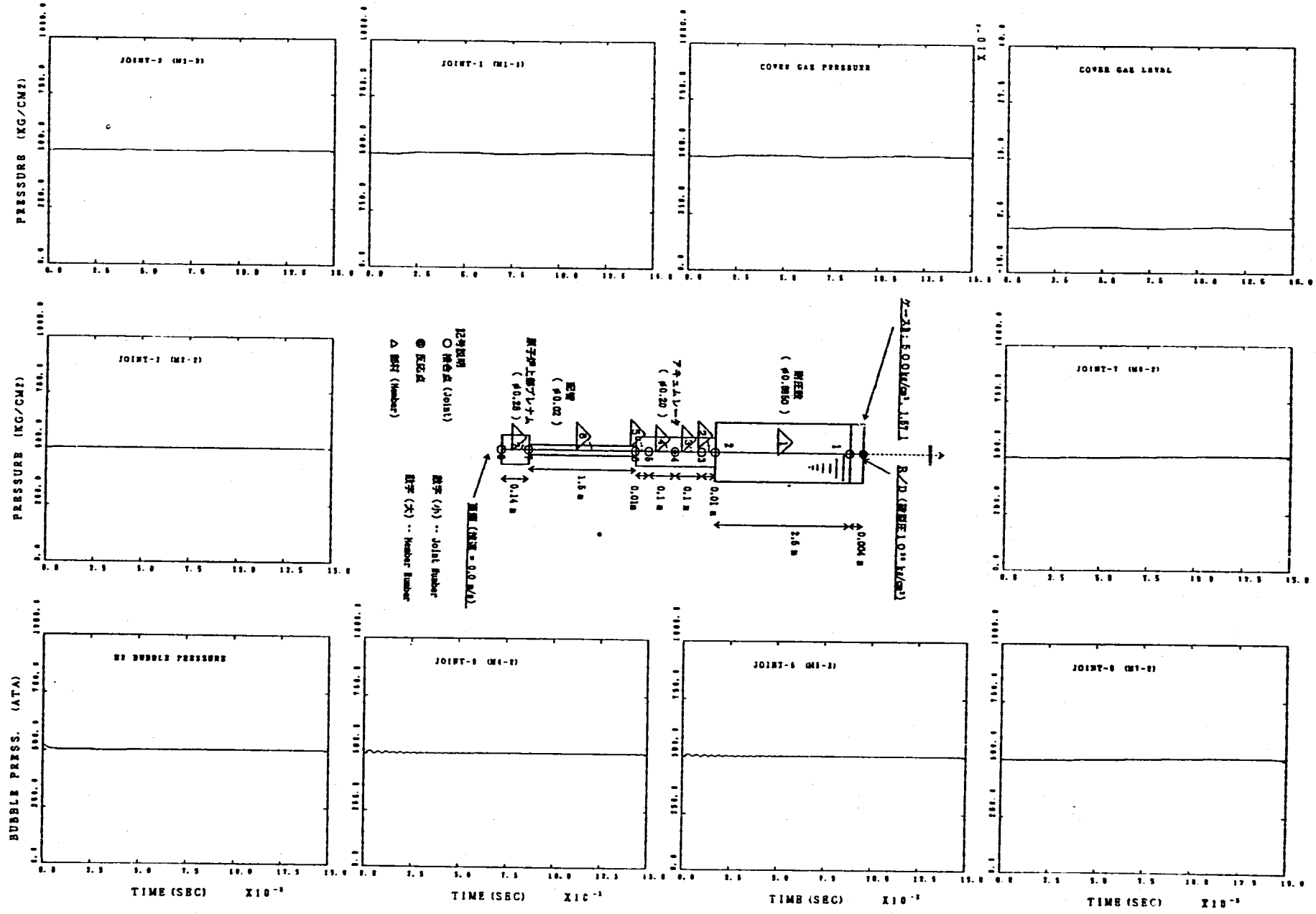


図 4. 3 圧力波計算結果 (ケース 1 続) A Calculation Result of Pressure Wave (Case 1, Continued)

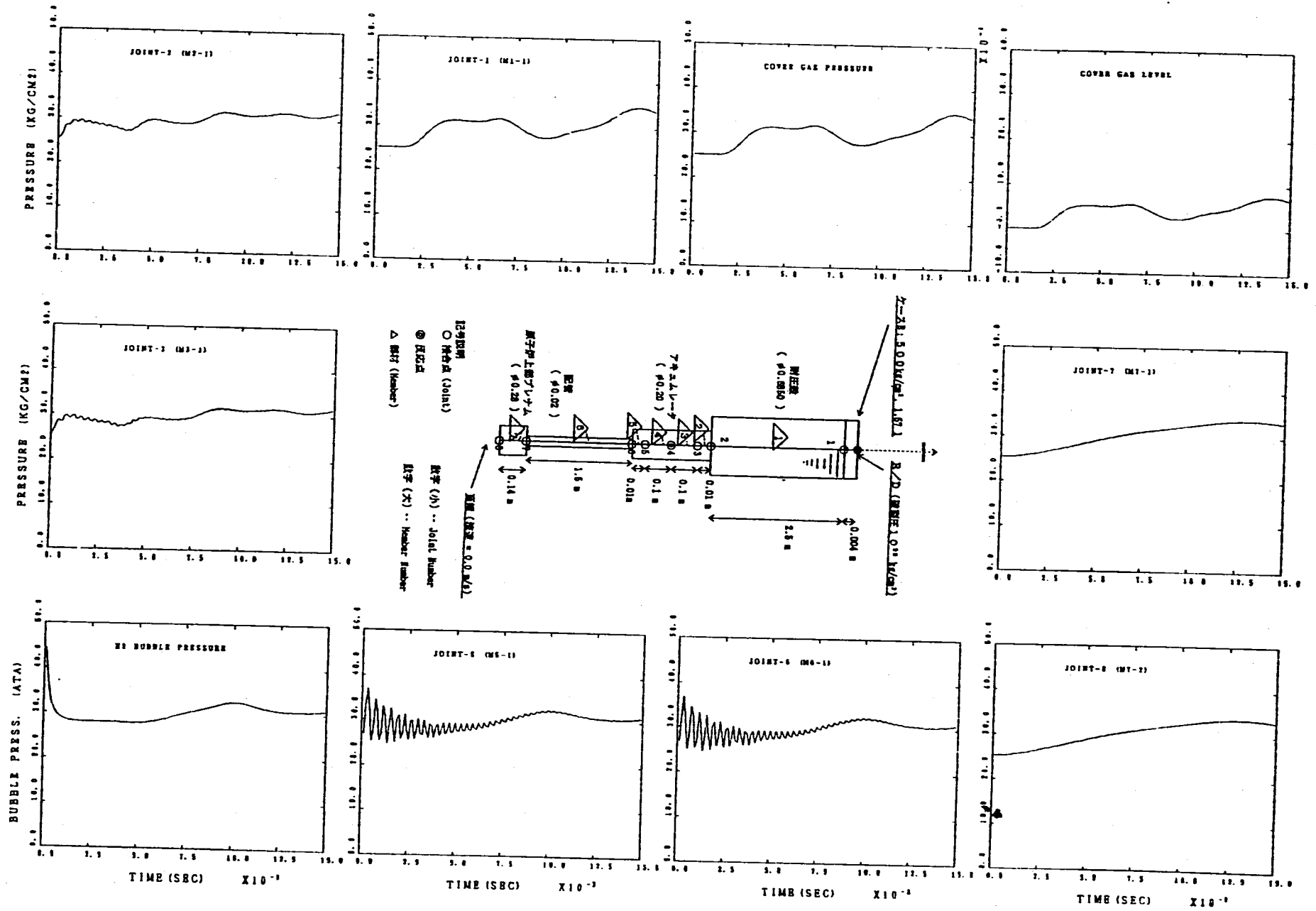


図4. 4 圧力波計算結果 (ケース2) A Caluculation Result of Pressure Wave (Case 2)



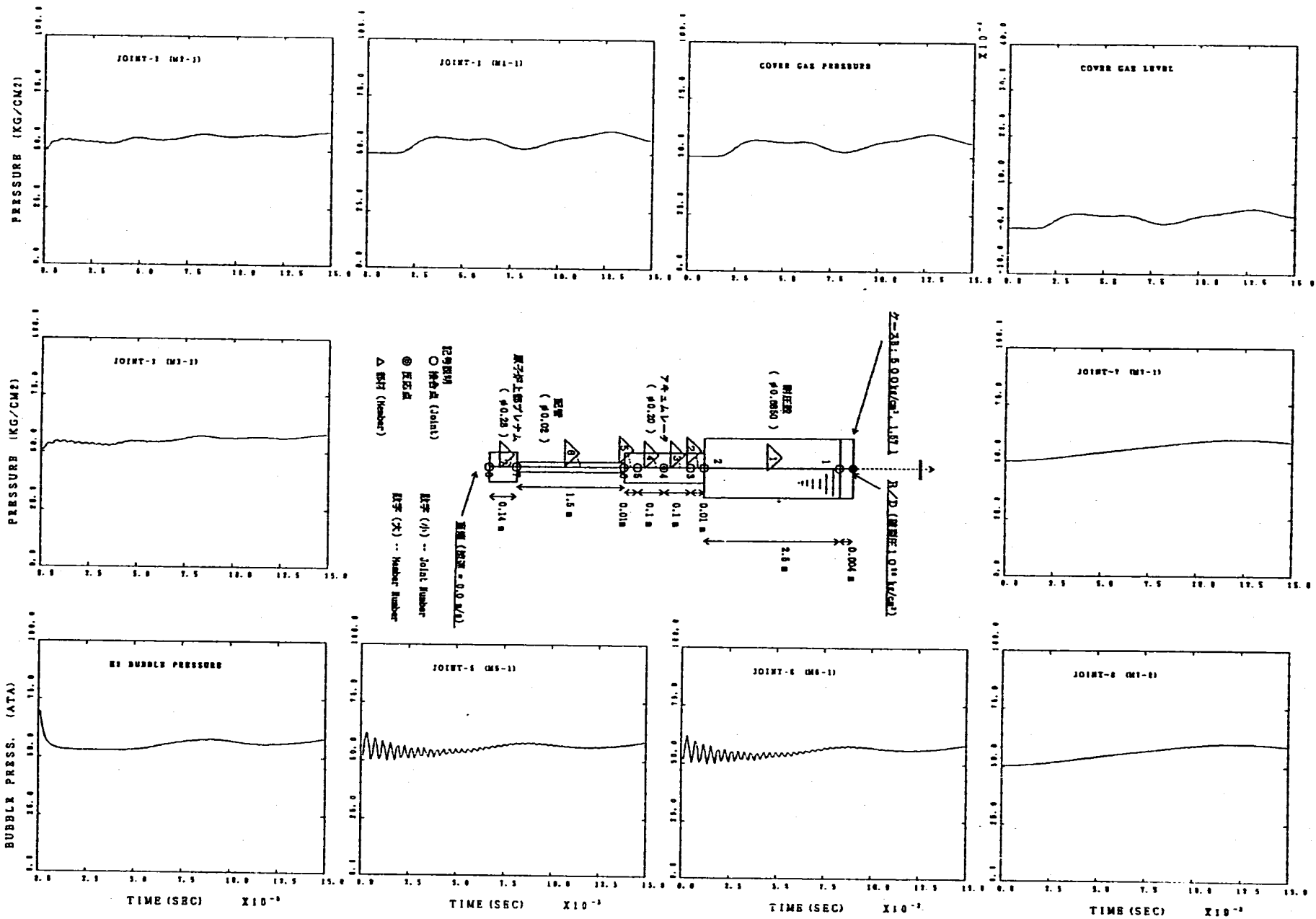


図 4. 5 圧力波計算結果 (ケース 3) A Calculation Result of Pressure Wave (Case 3)

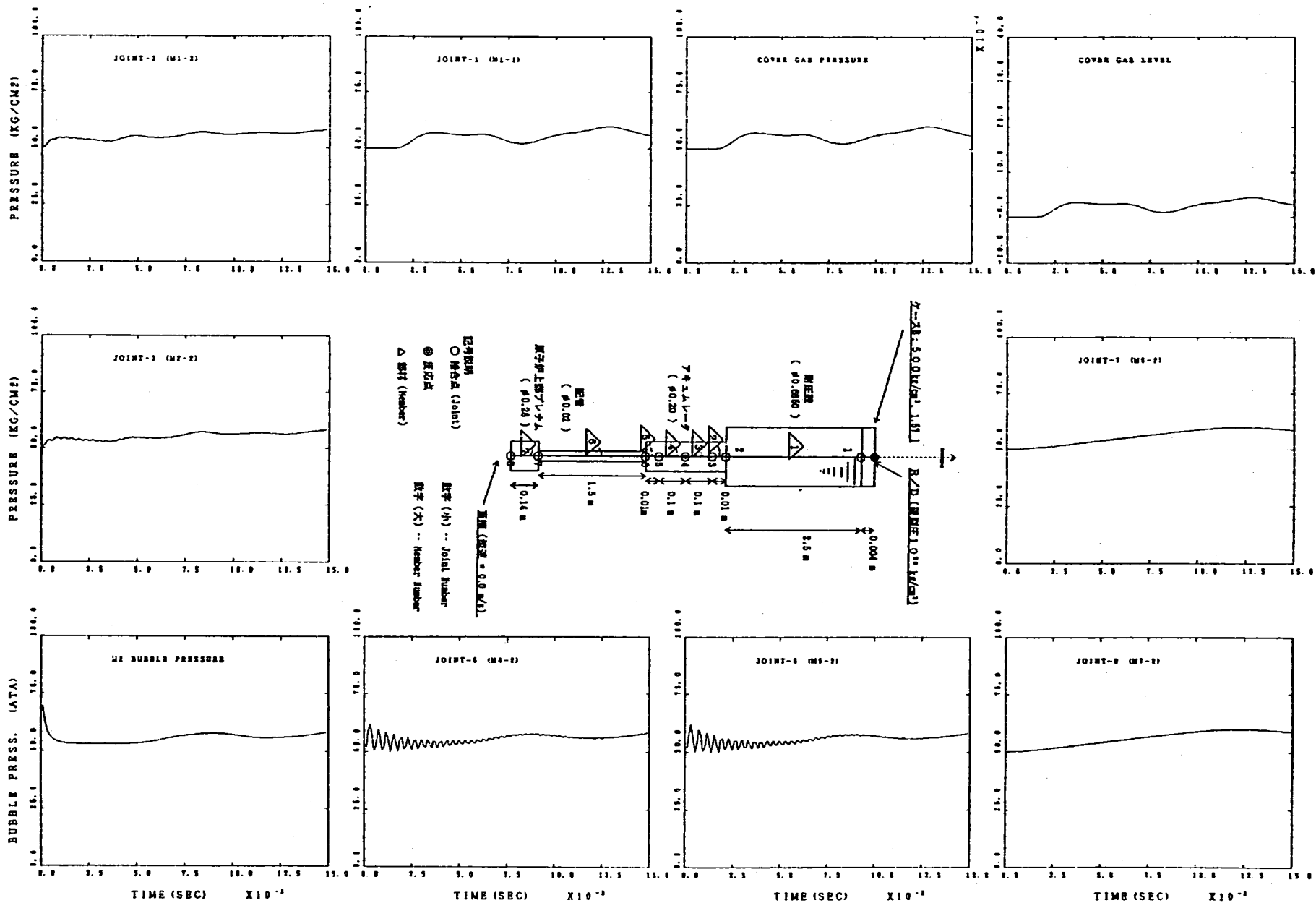


図 4. 5 压力波計算結果 (ケース 3 続) A Calculation Result of Pressure Wave (Case 3, Continued)



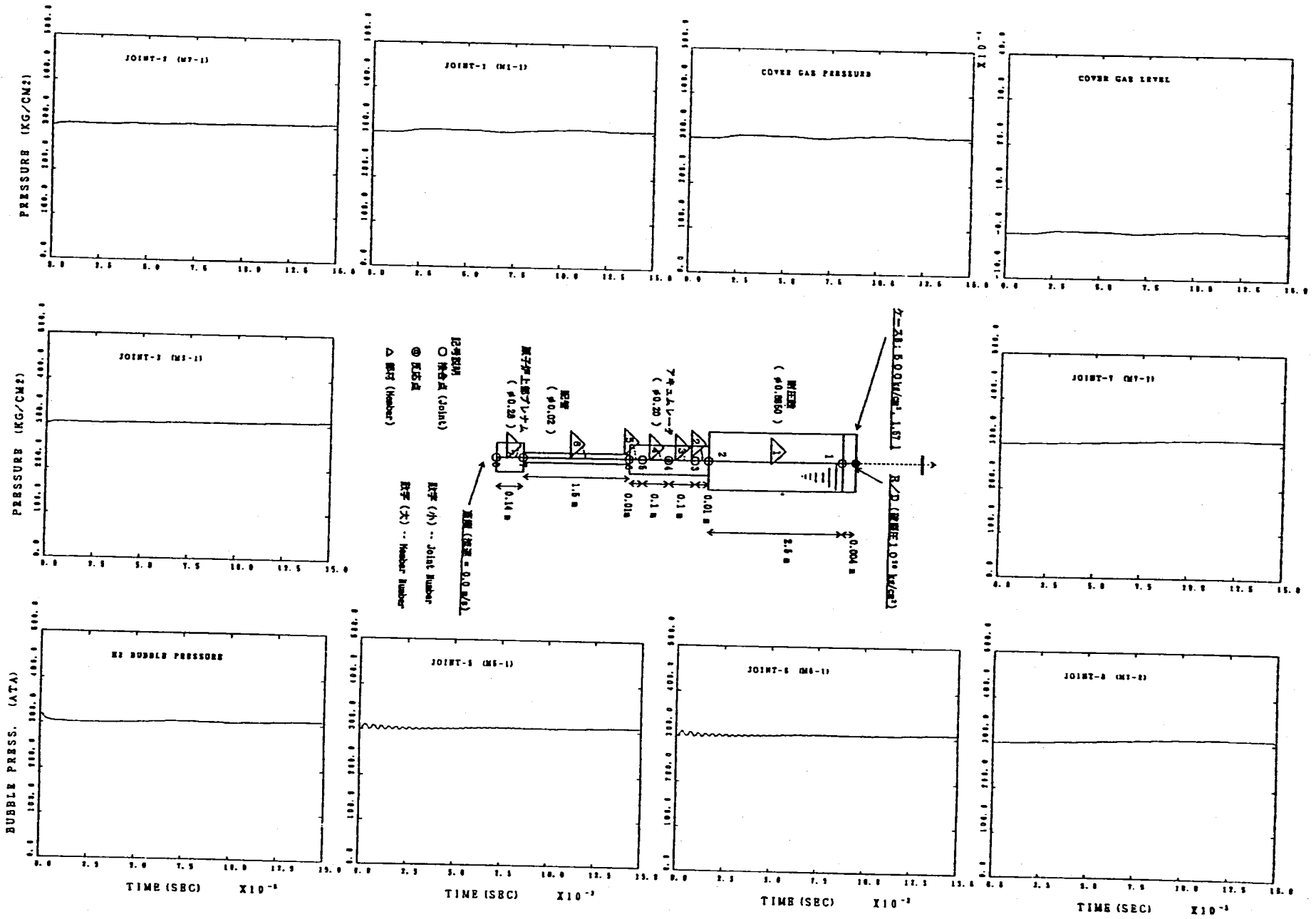


図 4. 6 圧力波計算結果 (ケース 4) A Calculation Result of Pressure Wave (Case 4)

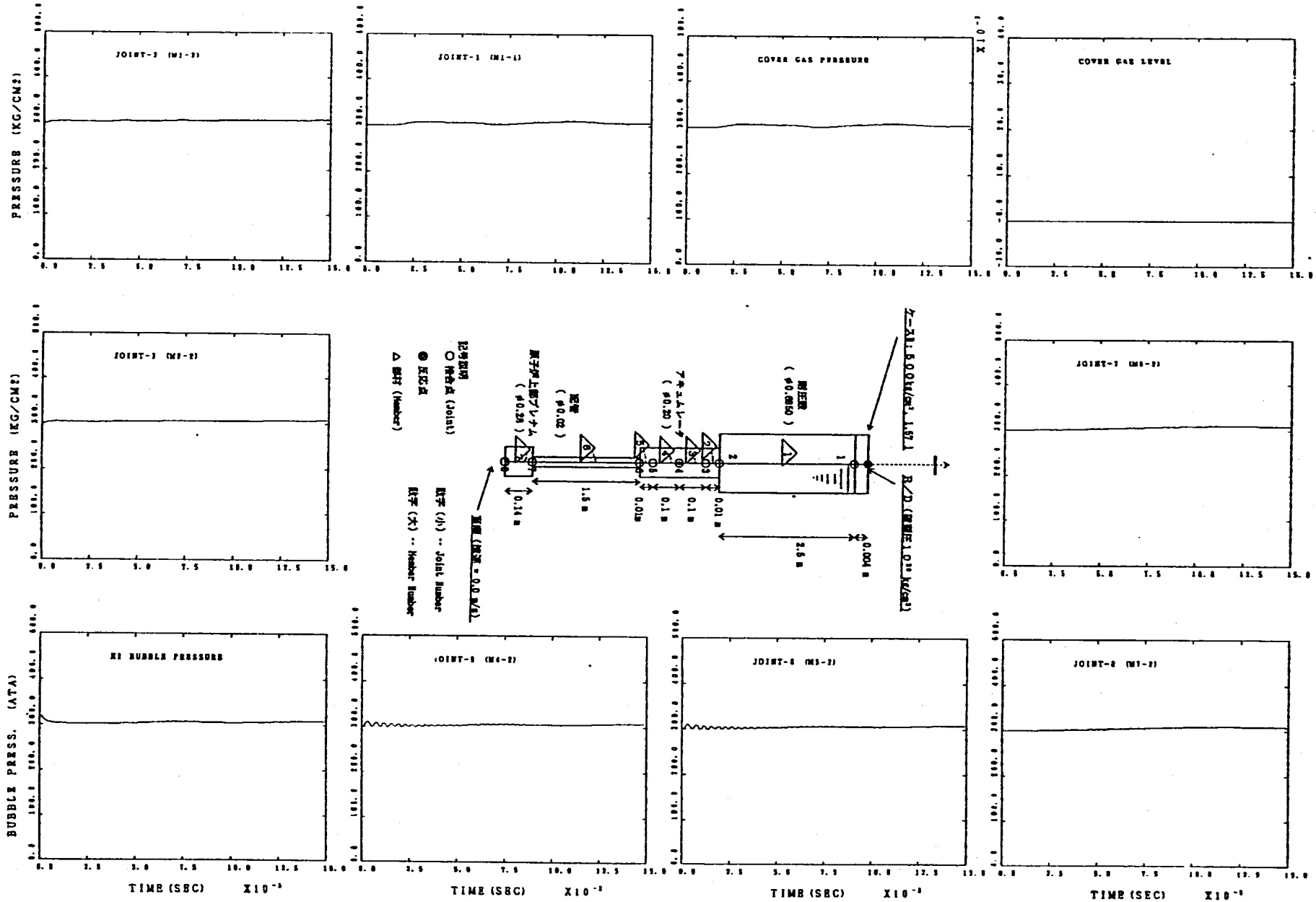


図 4. 6 圧力波計算結果 (ケース 4 続) A Calculation Result of Pressure Wave (Case 4, Continued)

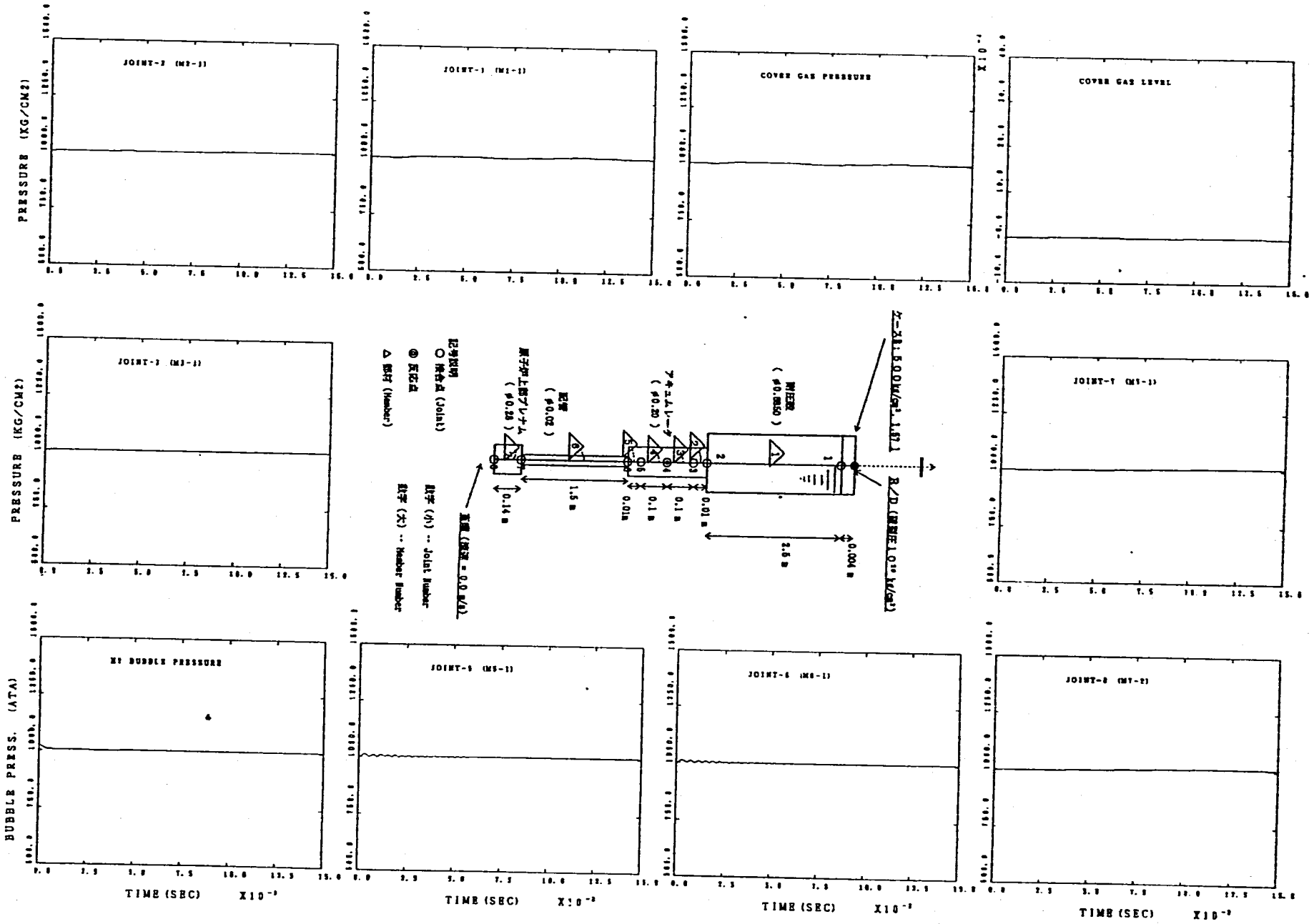


図 4. 7 圧力波計算結果 (ケース 5)

A Calculation Result of Pressure Wave (Case 5)

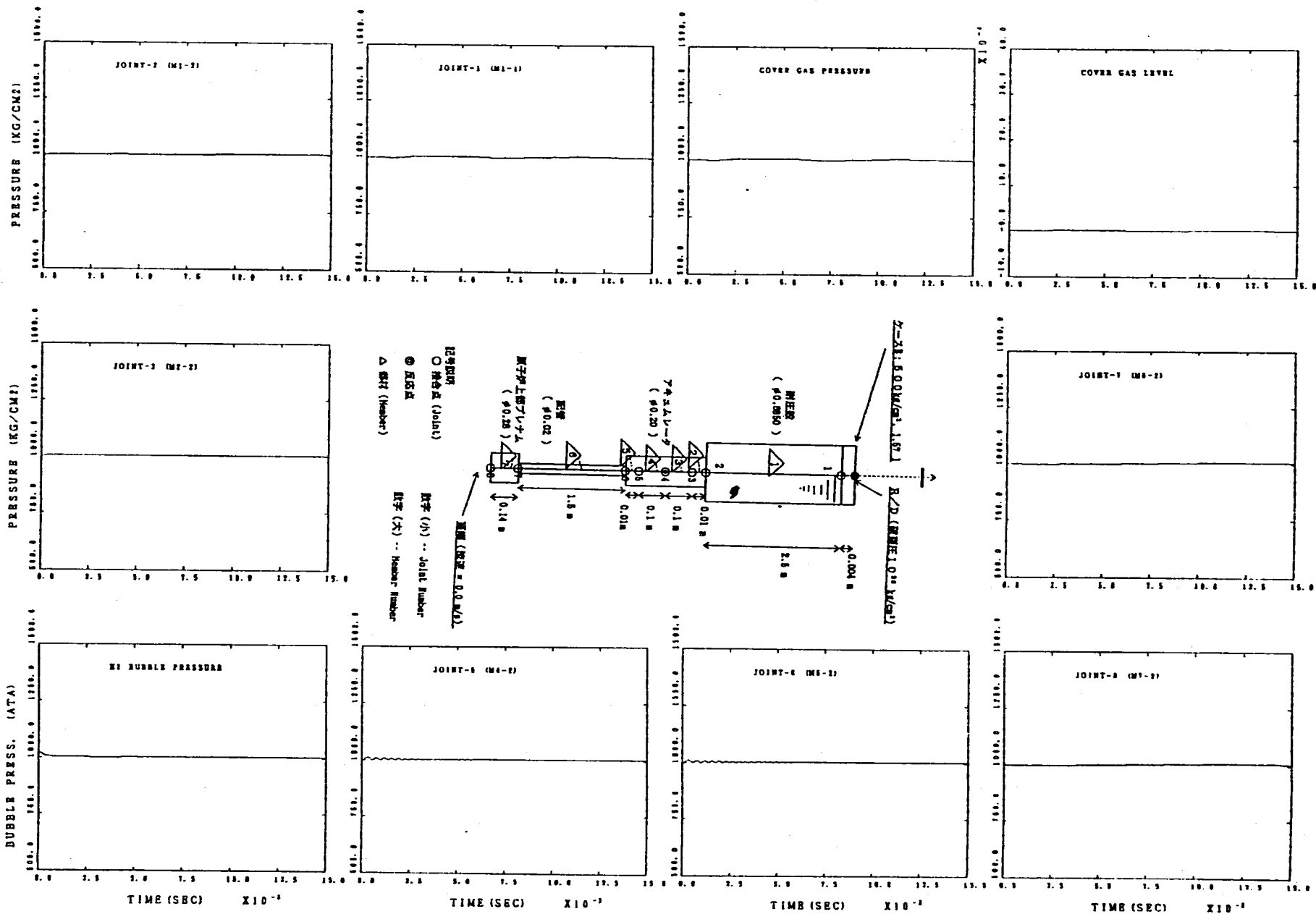


図 4. 7 圧力波計算結果 (ケース 5 続) A Calculation Result of Pressure Wave (Case 5, Continued)

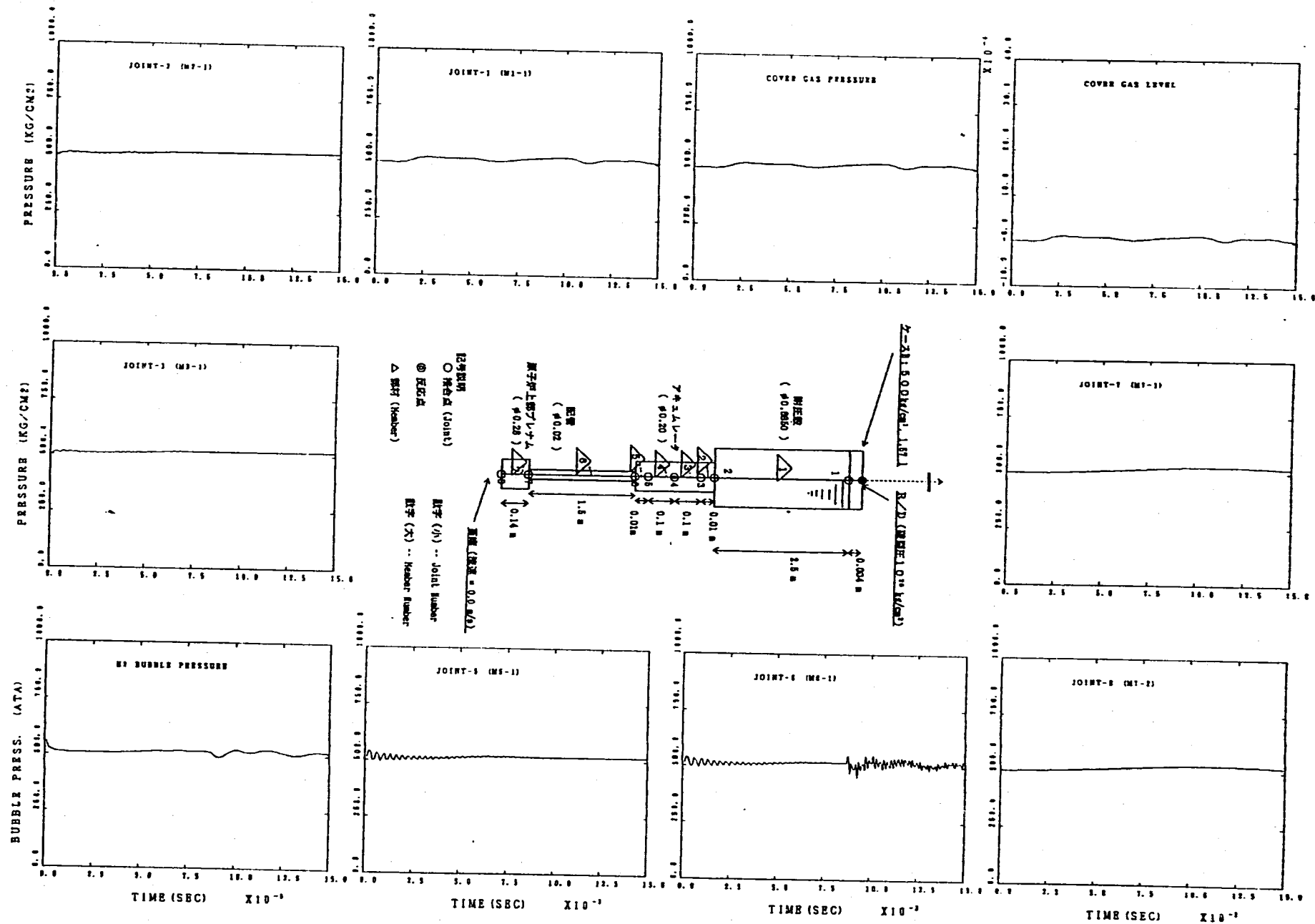


図 4. 8 圧力波計算結果 (ケース 6) A Calculation Result of Pressure Wave (Case 6)

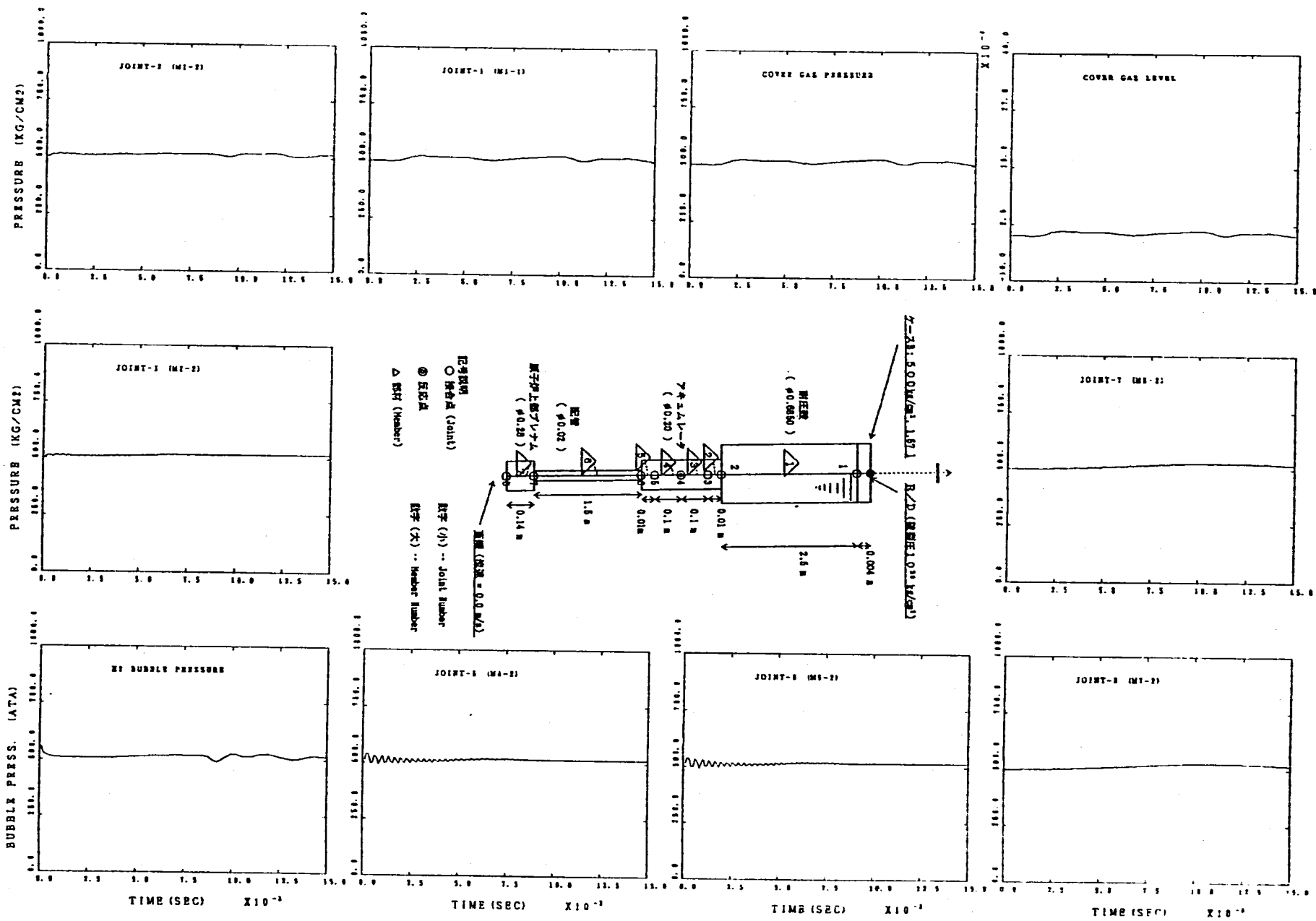


図 4. 8 圧力波計算結果 (ケース 6 続) A Calculation Result of Pressure Wave (Case 6, Continued)

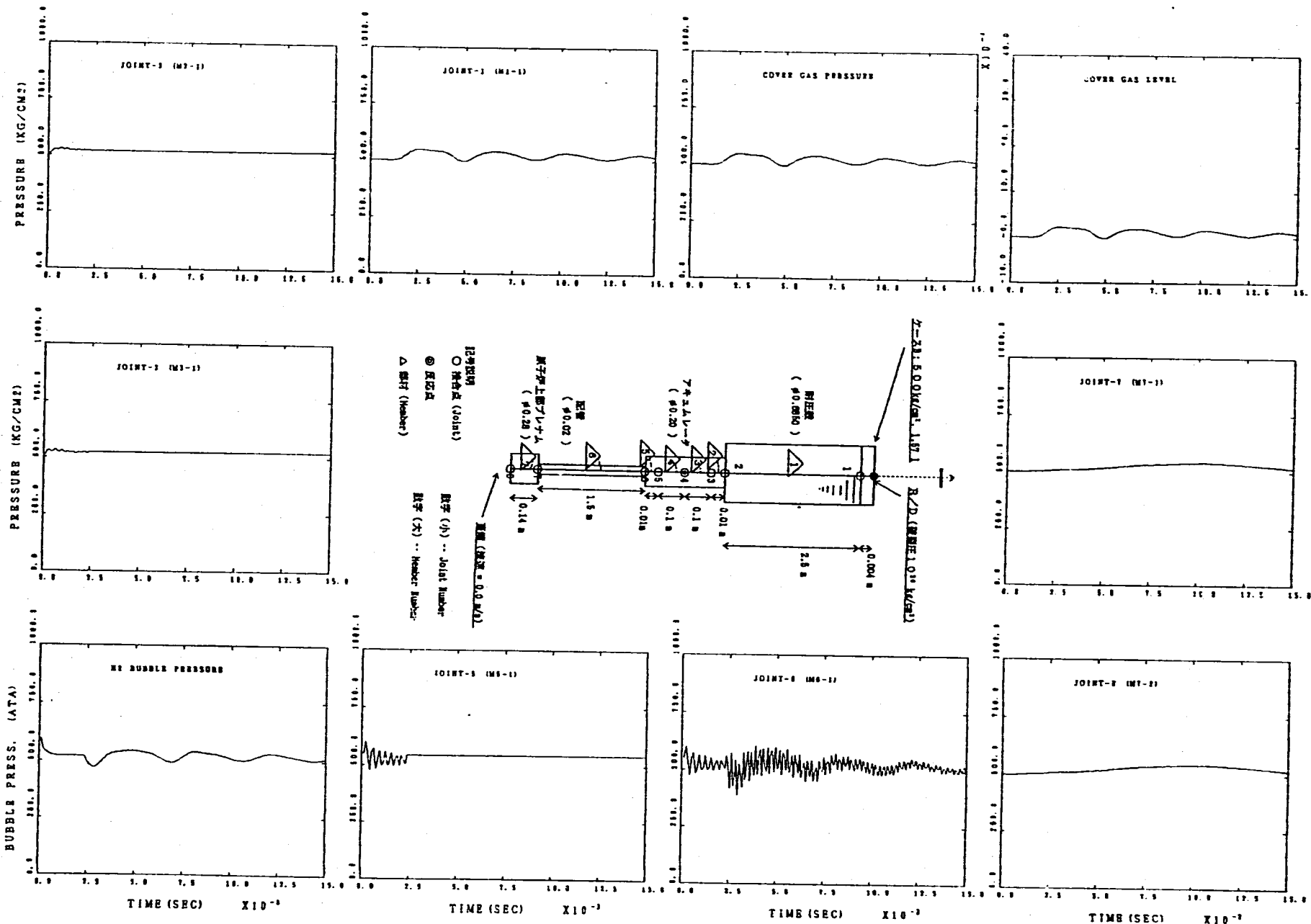


図 4. 9 圧力波計算結果 (ケース 7)

A Calculation Result of Pressure Wave (Case 7)

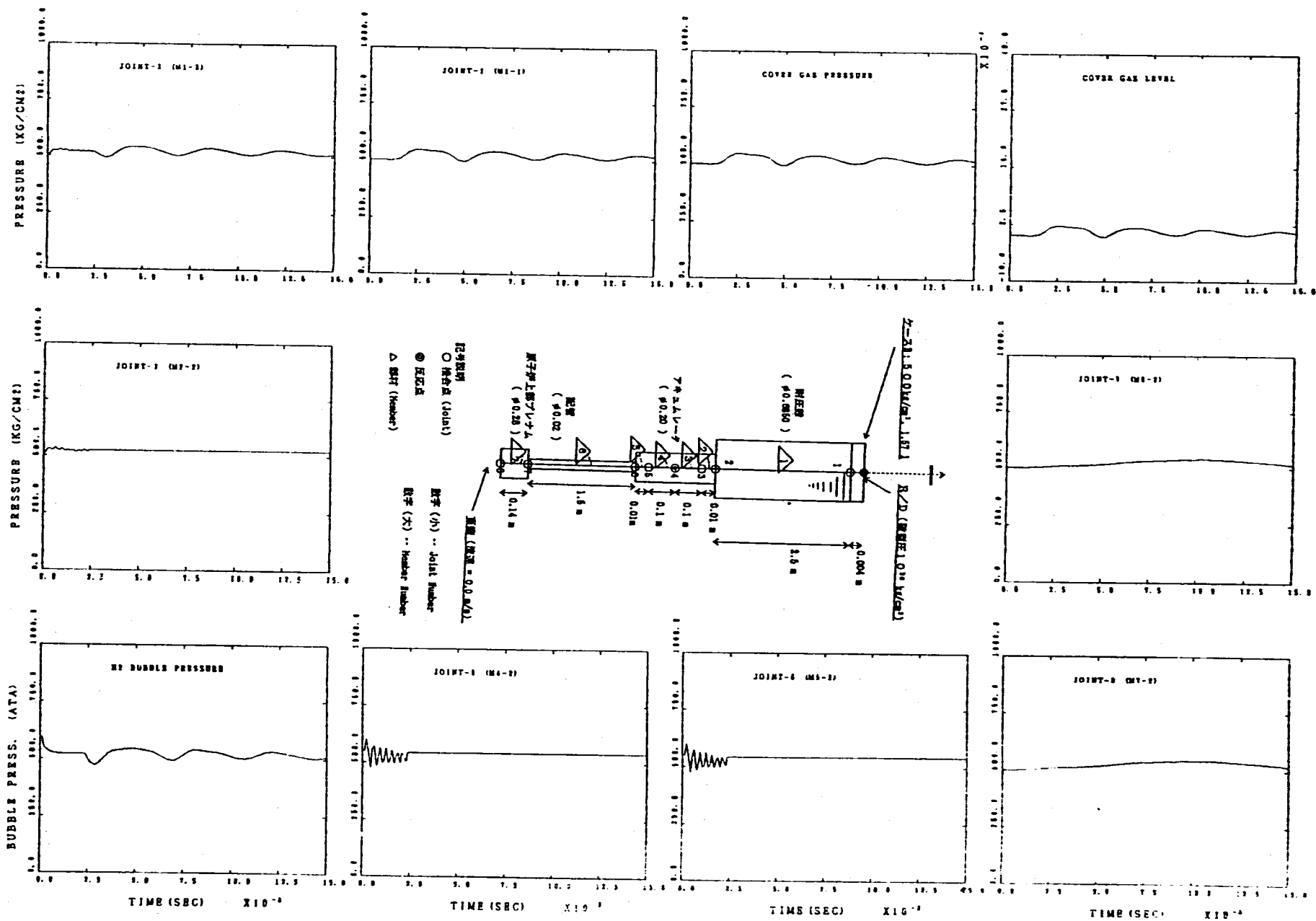


図 4. 9 圧力波計算結果 (ケース 7 続) A Calculation Result of Pressure Wave (Case 7, Continued)







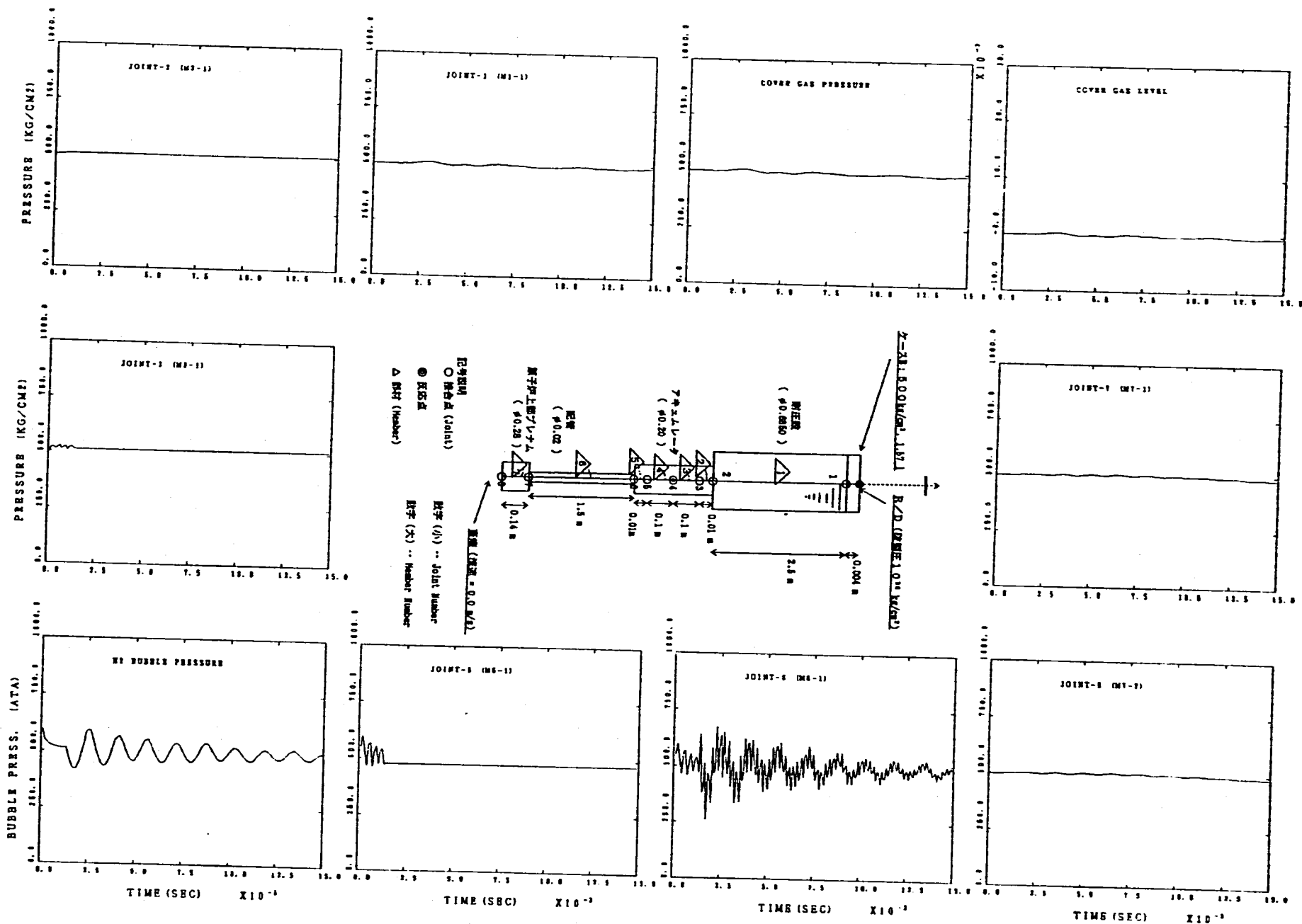


図 4. 1 1 圧力波計算結果 (ケース 9) A Calculation Result of Pressure Wave (Case 9)

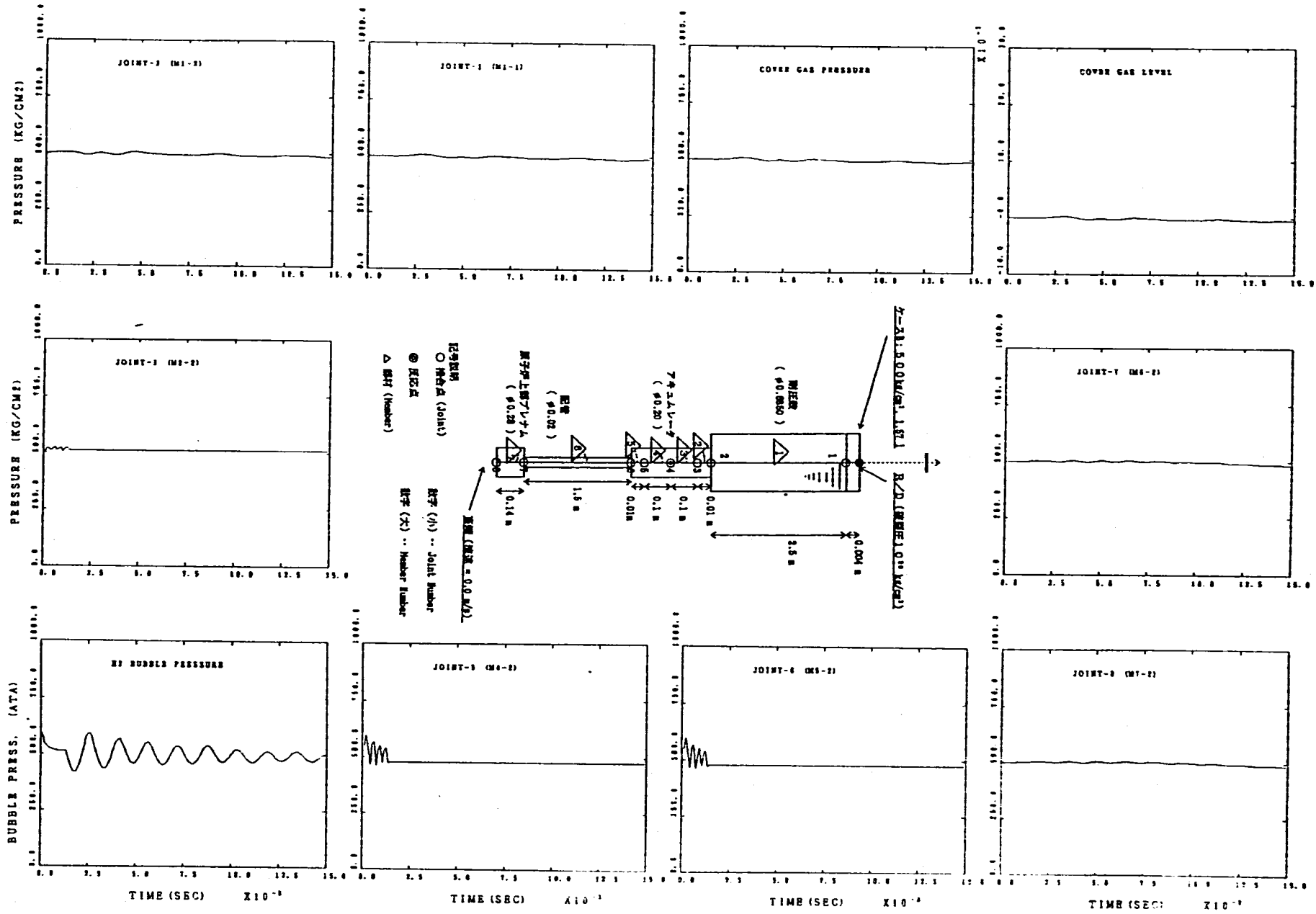


図 4. 1 1 圧力波計算結果 (ケース 9 続) A Calculation Result of Pressure Wave (Case 9, Continued)

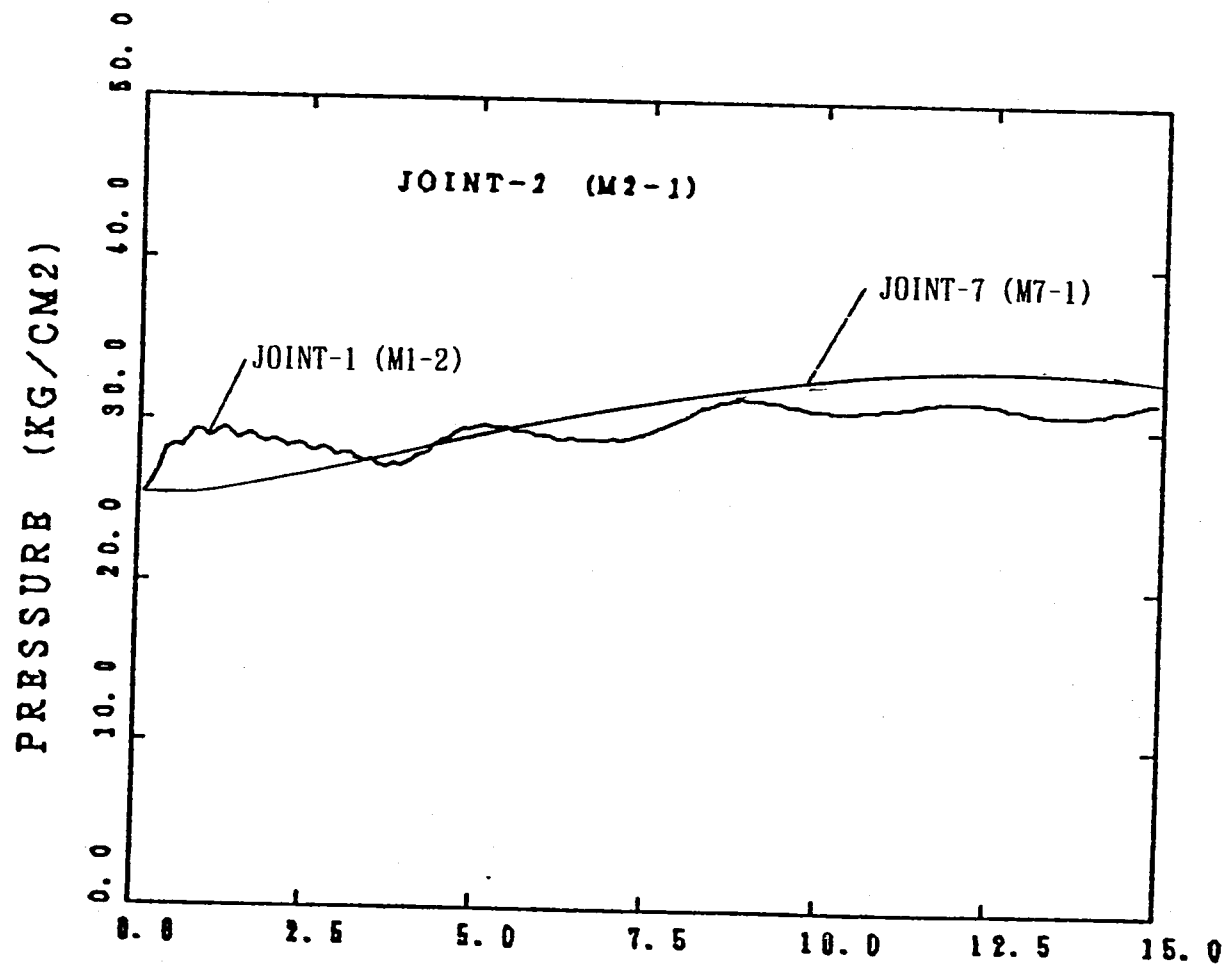


図4. 12 炉容器内外圧力 (ケース2)

Pressure at the inside and the outside of a reactor vessel (Case 2)

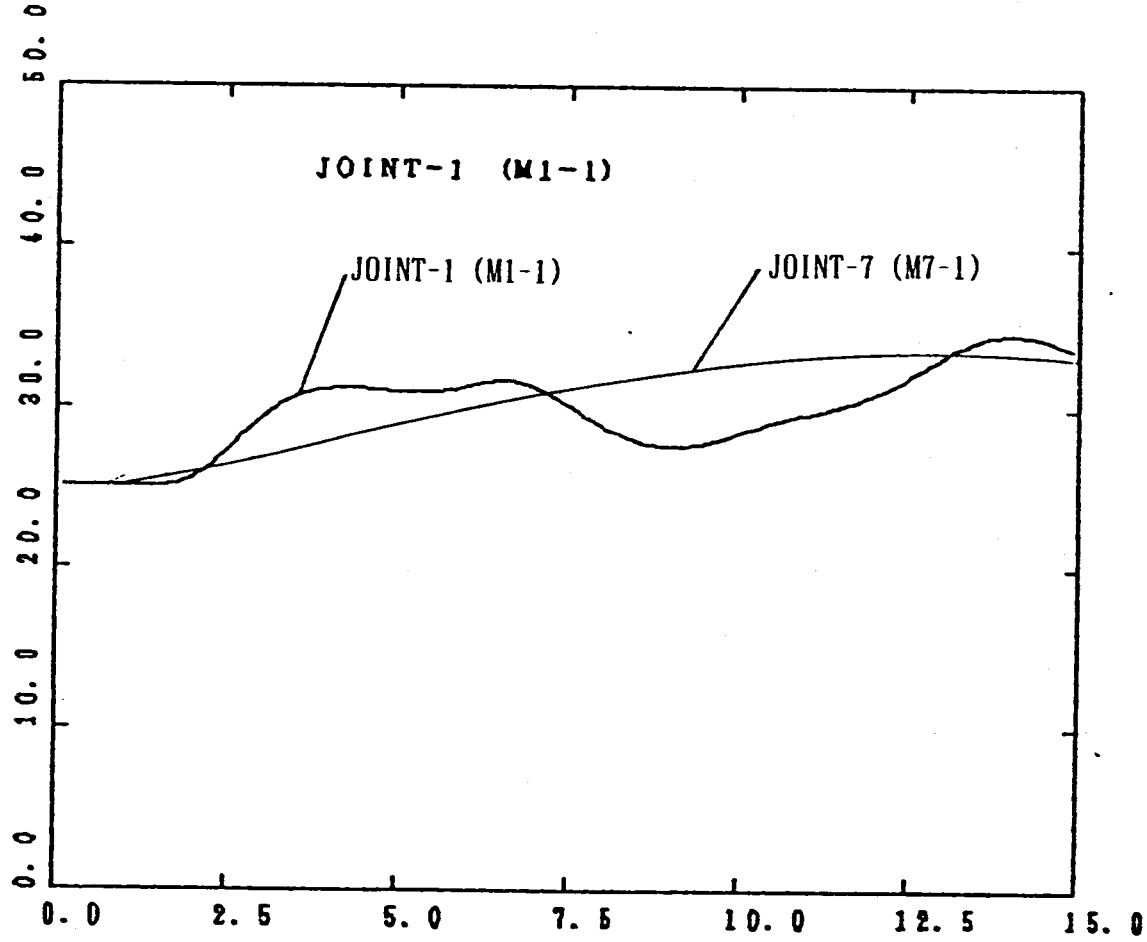


図 4. 1 2 炉容器内外圧力 (ケース 2 続)

Pressure at the inside and the outside of a reactor vessel (Case 2, Continued)

## 5. 考察

本報告書の解析ではナトリウム-水反応の事故原因として耐圧殻からの海水漏洩時に、薄い厚さの金属板から製作されているアッキュムレータが、図4. 1のごとくに2つに破断するとした。しかし実際のアッキュムレータの設計概念は図5. 1のように円筒状の構造物中に設置されることになるので、このような破断は考えられない。深海炉の設計では他に確率的に考えられるようなナトリウム-水反応の事故原因がないので、本報告書の解析ではこのような想定を敢えて行ったのである。

第4章の図4. 12の原子炉容器内外の圧力検討に於いては、本報告書の解析では耐圧殻内下部領域に位置する原子炉容器外での圧力計算を行っていないので、これを耐圧殻内上部領域に於ける位置での圧力で代用した。原子炉容器内とナトリウム-水反応発生位置とは細い長い配管でつながっているが、この耐圧殻内上部領域に於ける位置とナトリウム-水反応発生位置とは広い断面積の領域でつながっている。一方原子炉容器外とナトリウム-水反応発生位置とは、耐圧殻内下部領域に中性子遮蔽体や原子炉制御ドラム等の構造物が存在するため、その中間に断面積の小さい領域が存在するようになる。従って原子炉容器外とナトリウム-水反応発生位置の間での圧力波減衰は、原子炉容器内とナトリウム-水反応発生位置の間での圧力波減衰と良く似たものになり、その結果両者の位置での圧力を図にすると、図4. 12のグラフの2本の線よりもずっと互いに近づいたものになると予想される。将来設計が固まった段階で、原子炉容器外での圧力計算を行なう必要がある。

ここで念のために、このような検討を表4. 2のケース1（基準ケース）とケース5について行ってみる。結果を図5. 2に示す。ケース1及びケース5の両方のグラフともJOINT-2(M2-1)とJOINT-7(M7-1)の圧力差はこの場合もせいぜい約 $4 \text{ kg/cm}^2$ である。尚ここではJOINT-1(M1-2)のかわりにJOINT-2(M2-1)を使用した。両者は実質的に同じ位置で、これらの点での圧力の値はほぼ同じである。

更に、本解析で使用したナトリウム-水反応解析コードSWACS/REG4は、今まで大気圧下でのナトリウム-水反応実験の結果による検証しか行われていないので、本解析のような数百気圧の状態でのナトリウム-水反応実験結果による検証が必要かどうか、将来検討する必要がある。

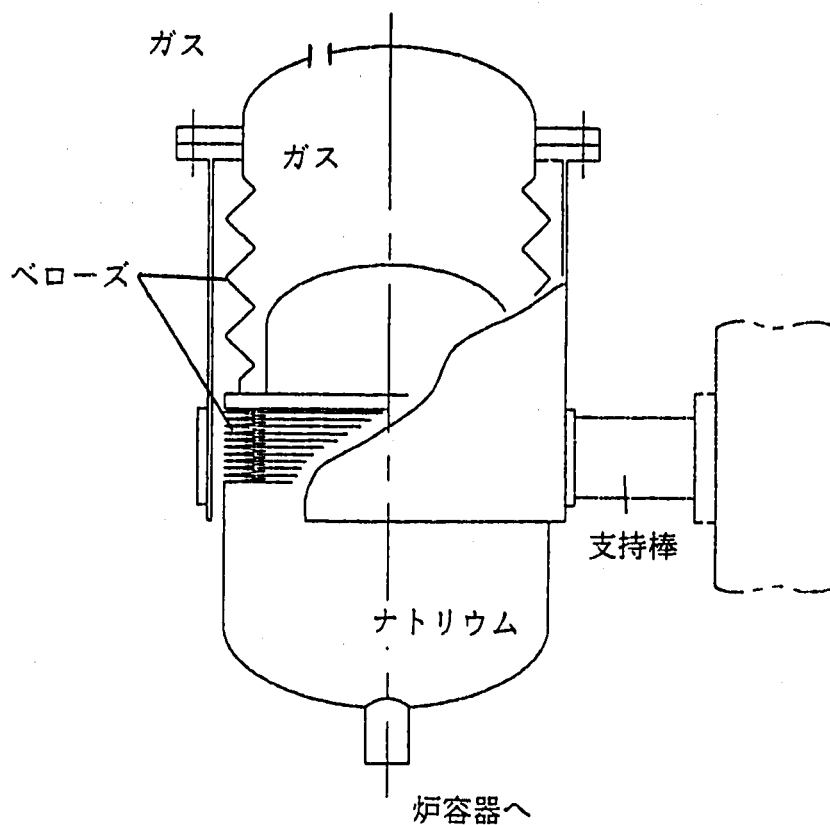


図5. 1 アッキュムレータ概念

A Concept of an accumulator



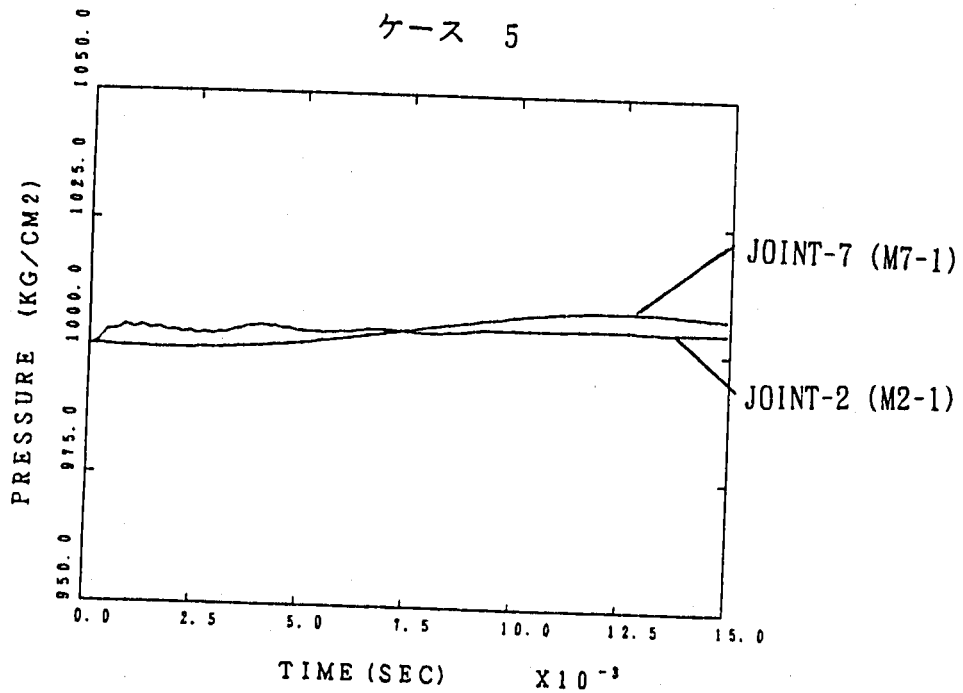
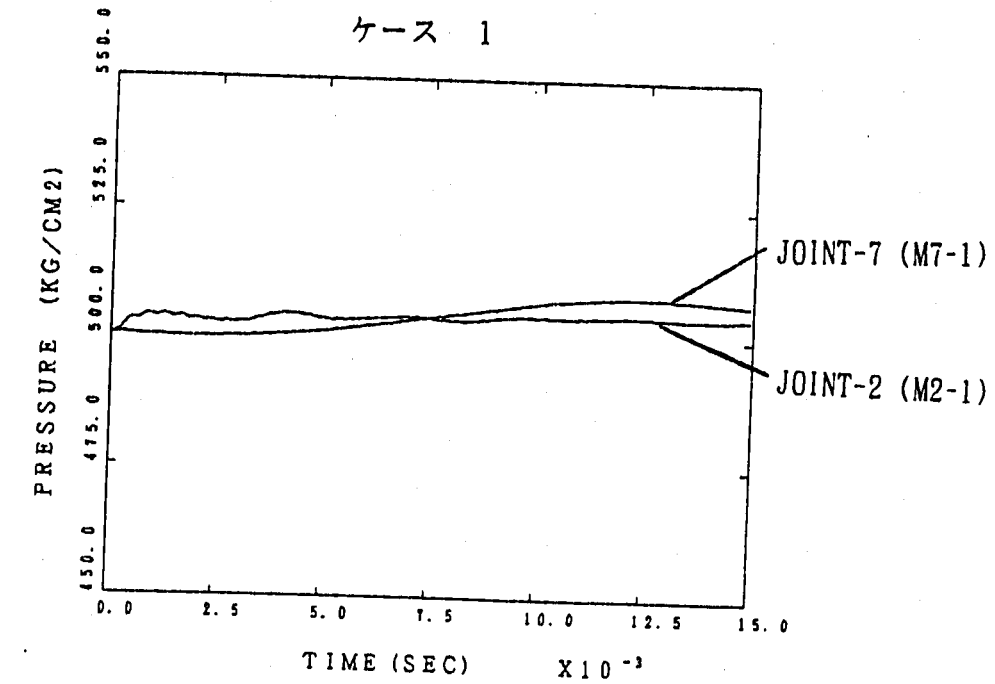


図 5. 2 炉容器内外圧力 (ケース 1、ケース 5)  
 Pressure at the inside and the outside of a reactor vessel (Case 1, Case 5)

## 6. おわりに

深海炉はナトリウム或いはナック等の液体金属を海水中で使用するようになるため、どうしても事故事象の一つとしてこれらの液体金属と海水との化学反応を想定することになる。本報告書ではナトリウム-水反応解析コードSWACS/REG4を使用して予備解析を行った結果、この事故事象に対する理解を深めることが出来、深海炉安全解析上特に問題になることは無かろうという、見通しを得ることが出来た。

今後は深海炉の研究の進展に従って更に本格的な検討を行う必要がある。

## 謝辞

本予備解析に当たっては、機器システム開発室の田辺裕美室長よりコメントを頂いたの  
で、ここに謝意を表します。また計算は原子力システム株式会社小野功氏に実施して頂い  
たので、ここに謝意を表します。

## 参考文献

- (1) Nuclear Navy 1946-1962, R.G.Hewlett and F.Duncan, The University of Chicago Press, Chicago and London.
- (2) LIQUID-METAL HANDBOOK SODIUM-NaK SUPPLEMENT, US AEC and DEPARTMENT OF THE NAVY, Washington, D.C., 1955.
- (3) 動燃報告書 PNC ZN 9410 93-064、深海無人基地用高速炉システムの概念検討、大坪章他、1993年 2月
- (4) 動燃報告書 PNC ZN 9410 93-103、深海炉の炉心熱流力・構造材腐食・アッキュムレータに関する検討、大坪章他、1993年 9月
- (5) 動燃報告書 PNC ZN 9520 89-016、ナトリウム-水反応解析コードSWACS/REG 4 使用説明書、浜田 広次他、1989年 7月