

無液面及び有液面蒸気発生器の 大リーク・ナトリウム-水反応解析 (II)

大リーク・ナトリウム-水反応解析 (第16報)

1988年6月

技術資料コード	
開示区分	レポートNo.
T	N9410 88-068
この資料は 図書室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です	
動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センター技術管理室	

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)

1988年6月

無液面及び有液面型蒸気発生器の

大リーク・ナトリウム-水反応解析(Ⅱ)

— 大リーク・ナトリウム-水反応解析(第16報) —

田辺 裕美* 鈴木 道博**
橋本 博***

要 旨

大型高速増殖炉の蒸気発生器(以下SG)に、カバーガス空間を設置した場合と設置しない場合との、大リーク・ナトリウム-水反応時の圧力挙動の比較を行った。今年、特にSG上部に圧力開放系配管を設置した場合の初期スパイク圧及び準定常圧計算を行った。解析にはSWACSコードを使用した。

解析結果から次のことが判った。

圧力解放系として、SG上部及び下部プレナムに16Bの配管をそれぞれ設置するよりも、SG上部プレナムに16B2本、または24B1本の配管を設置する方が、初期スパイク圧低減効果が大きく、準定常圧力評価上も発生水素ガスの排出効果が大きい。

ミドルレグ配管短縮については、主循環ポンプ液面と反応点が近づくことから、圧力波減衰効果が大きい。

* 大洗工学センター 安全工学部 プラント安全工学室
** 茨城ソフトウェア開発㈱
*** 大洗工学センター 技術開発部 プラント工学室

June 1988

Evaluation of Large Leak Sodium-Water Reaction Events for the
Cover-Gas Type and Non-Cover-Gas Type Steam Generators (II)
- Large Leak Sodium-Water Reaction Analysis (Report No.16)

Hiromi Tanabe*, Michihiro Suzuki**
and Hiroshi Hashimoto***

Abstract

Pressure behaviors in a large scale sodium-water reaction event were analyzed to clarify the effect of the location of a cover gas region and to reflect on the design study of the Large LMFBR plant of Japan. In the present study, initial spike pressures and quasi-static pressures were calculated by the SWACS code in the case that the pressure relief line was installed at the upper plenum of the non-cover gas type steam generator. The calculated results revealed as follows:

The attachment of two 16 inch or one 24 inch diameter pipe on the upper plenum is more advisable than that of two 16 pipes on the lower and upper plenum, respectively, from the viewpoint of initial spike pressure depression and hydrogen gas expulsion. The shortening of the crossover-leg piping also has an initial spike pressure depression effect because the sodium free surface approaches the reaction zone.

* FBR Plant Safety Section, Safety Engineering Division, O-arai Engineering Center

** Ibaraki Software Development, Inc.

*** Plant Engineering Office, Technology Development Division, O-arai Engineering Center

目 次

	Page
1. はじめに	1
2. 概要	2
3. プラント概念	3
3.1 系統構成	3
3.2 圧力開放系の設置検討	11
3.3 圧力開放板の設定圧について	13
3.4 2次主冷却系配管の短縮効果の反映	14
4. 初期スパイク圧力評価	16
4.1 解析条件	16
4.2 計算モデル	20
4.3 計算結果	29
4.3.1 無液面型SG	29
4.3.2 有液面型SG	39
4.3.3 無液面型SGと有液面型SGとの比較	43
5. 準定常圧力評価	49
5.1 解析条件	49
5.2 計算モデル	52
5.3 計算結果	62
5.3.1 無液面型SG	62
5.3.2 有液面型SG	73
5.3.3 無液面型SGと有液面型SGとの比較	79
6. 結論	93
7. 参考文献	96
8. 謝辞	97
APPENDIX	98

List of Tables

	Page
Table 3.1	一体貫流型蒸気発生器管束部設計主要目 4
Table 3.2	圧力開放系設置パラメータ 12
Table 3.3	配管ベローズ採用による配管短縮の例 14
Table 4.1	初期スパイク圧計算ケースの内容 19
Table 4.2	圧力開放板作動時刻（無液面型SG） 31
Table 4.3	通常運転時の主な場所での発生最高圧力（無液面型SG）... 32
Table 4.4	圧力開放板作動時刻（有液面型SG） 40
Table 4.5	通常運転時の主な場所での発生最高圧力（有液面型SG）... 40
Table 4.6	圧力開放板作動時刻（無液面型と有液面型SGとの比較）... 44
Table 4.7	通常運転時の主な場所での発生最高圧力 （無液面型と有液面型SGとの比較） 44
Table 5.1	準定常圧計算ケースの内容 51
Table 5.2	圧力開放板作動時刻（無液面型SG） 63
Table 5.3	通常運転時の主な場所での発生最高圧力（無液面型SG）... 64
Table 5.4	圧力開放板作動時刻（有液面型SG） 74
Table 5.5	通常運転時の主な場所での発生最高圧力（有液面型SG）... 74
Table 5.6	圧力開放板作動時刻（無液面型と有液面型SGとの比較）... 80
Table 5.7	通常運転時の主な場所での発生最高圧力 （無液面型と有液面型SGとの比較） 80
Table 6.1	無液面型／有液面型SG大リーク解析結果のまとめ 95

List of Figures

	Page
Fig 3.1	2次主冷却系及び圧力開放系系統図（無液面型） 6
Fig 3.2	無液面型SG構成図 7
Fig 3.3	2次主冷却系及び圧力開放系系統図（有液面型） 9
Fig 3.4	有液面型SG構成図 10
Fig 3.5	配管ベローズ継手を用いた2次主冷却の鳥瞰図 15
Fig 4.1	水リーク率入力値（初期スパイク圧時間領域） 16
Fig 4.2(a)	初期スパイク圧・解析モデル（無液面・IRF0及びIRF5） 21
Fig 4.2(b)	初期スパイク圧・解析モデル（無液面・IRF1） 22
Fig 4.2(c)	初期スパイク圧・解析モデル（無液面・IRF2） 23
Fig 4.2(d)	初期スパイク圧・解析モデル（無液面・IRF4） 24
Fig 4.2(e)	初期スパイク圧・解析モデル（無液面・IRF6A及びIRF6B） ... 25
Fig 4.2(f)	初期スパイク圧・解析モデル（無液面・ICG0） 26
Fig 4.2(g)	初期スパイク圧・解析モデル（無液面・ICG3） 27
Fig 4.2(h)	初期スパイク圧・解析モデル（無液面・ICG4） 28
Fig 4.3(a)	初期スパイク圧挙動（無液面型SG） 33
Fig 4.3(b)	初期スパイク圧挙動（無液面型SG） 35
Fig 4.3(c)	初期スパイク圧挙動（無液面型SG） 37
Fig 4.4	初期スパイク圧挙動（有液面型SG） 41
Fig 4.5(a)	初期スパイク圧挙動（無液面型SGおよび有液面型SG） 45
Fig 4.5(b)	初期スパイク圧挙動（無液面型SGおよび有液面型SG） 47
Fig 5.1	水リーク率入力値（準定常圧時間領域） 49
Fig 5.2(a)	準定常圧計算・ネットワークモデル（無液面・QRF0） 53
Fig 5.2(b)	準定常圧計算・ネットワークモデル（無液面・QRF1） 54
Fig 5.2(c)	準定常圧計算・ネットワークモデル（無液面・QRF2） 55
Fig 5.2(d)	準定常圧計算・ネットワークモデル（無液面・QRF4） 56
Fig 5.2(e)	準定常圧計算・ネットワークモデル（無液面・QRF6A 及びQRF6B） 57
Fig 5.2(f)	準定常圧計算・ネットワークモデル（有液面・QCG0） 59
Fig 5.2(g)	準定常圧計算・ネットワークモデル（有液面・QCG3） 60
Fig 5.2(h)	準定常圧計算・ネットワークモデル（有液面・QCG4） 61
Fig 5.3(a)	準定常圧挙動（無液面型SG） 65
Fig 5.3(b)	2次系内流動状況（無液面型SG） 67

Fig 5.4(a) 準定常圧挙動（無液面型 S G）	69
Fig 5.4(b) 2次系内流動状況（無液面型 S G）	71
Fig 5.5(a) 準定常圧挙動（有液面型 S G）	75
Fig 5.5(b) 2次系内流動状況（有液面型 S G）	77
Fig 5.6(a) 準定常圧挙動（無液面型および有液面型 S G）	81
Fig 5.6(b) 2次系内流動状況（無液面型および有液面 S G）	83
Fig 5.7(a) 準定常圧挙動（無液面型および有液面型 S G）	85
Fig 5.7(b) 2次系内流動状況（無液面型および有液面 S G）	87

1. はじめに

大型炉蒸気発生器（以下、SG）として、無液面型／有液面型のいずれを選定すべきかを判定する際に、SGのコンパクト化の観点から、無液面型式のSGが有利と考えられる。

大リーク・ナトリウム－水反応時の圧力挙動という観点からは、液面での圧力減衰効果が期待できる有液面のSGの方が有利であると考えられるが、無液面型SGにおいても、圧力開放系配管をSG本体上部プレナムに設置することによって、かなり圧力減衰効果が期待できる。

昭和61年度に実施した、SGの液面有無に関する比較検討作業を引き継ぐ形で、今回、数ケースの追加計算を行なった。これは、昭和62年度の大型炉設計研究において、圧力開放系の系統構成の見直し、2次主冷却系配管の短縮化が検討されており、それに対応した大リーク・ナトリウム－水反応事故解析を行なったものである。解析には、SWACSコードを使用した。また、本報告書においては、比較の意味から昨年度の解析結果も併せて記載した。

「無液面型及び有液面型蒸気発生器の大リーク水反応事象評価－大リーク・ナトリウム－水反応解析（第15報）－」の初期スパイク圧計算の全ケースにおいて、入力データの各接合点高さの（自由液面高さを基準点とする。）の誤りがあり再計算を行った。その結果、主な場所での最高圧力に多少影響があり、プラント室はもとより多くの関係者に多大な御迷惑を掛けたことを深くお詫びする。

2. 概 要

本解析は、初期スパイク圧解析と準定常圧解析を行い使用した計算コードは、初期スパイク圧解析がSWAC57Pコードで、準定常圧解析がSWACS. REG3Eコードである。SWACSについての紹介は除く。計算時間は、初期スパイク圧解析が200msec、準定常圧解析が20secで計算した。

3. プラント概念

3.1 系統構成

中間熱交換器（以後、IHXと略す。）、SG、2次主循環ポンプ、膨張タンクを主要機器として構成される2次熱輸送系の合理化方策のひとつとして、その中で最も大きな機器であるSGの小型化が挙げられる。昭和60年度に実施された要素技術設計研究（II）では、SGの小型化（物量削減）、及びカバーガス供給系統削減の合理化の観点から、一体貫流無液面型SGが採用された。SGの主要目をTable 3.1に示す。

(1) 無液面型SG

2次主冷却系系統図及び蒸気発生器構造図をそれぞれ Fig 3.1 及び Fig 3.2 に示す。（ただし、圧力開放系統は、配管系に設けた場合を示す。）

SGは一体貫流ヘリカル型で、頂部から入ったナトリウムはヘリカル状の伝熱部で熱交換を行った後、下部プレナムからセンターパイプを通して、頂部に抜ける。「もんじゅ」のようなダウンコマ部を持たず、給水は胴下部より行われ過熱蒸気となって胴上部から排出される。

IHXで470℃に加熱されたナトリウムは、SGで310℃まで冷却された後、循環ポンプを経て再びIHXに戻る。この設計ではSGはカバーガス空間を持たず、循環ポンプのカバーガス部が膨張タンクの役割を果たしている。

ナトリウム-水反応生成物収納施設としては、SGのナトリウム入口/出口配管部に接液型のラプチャ板がそれぞれ設置されており、更に2つの放出系配管が合流した直後に2段目のラプチャ板が設置されている。このあと放出系配管は、一旦ダンプタンクに入り、水素ガスはサイクロンセパレータでナトリウムから分離されたのち、大気に放出される。

Table 3.1 一体貫流型蒸気発生器管束部設計主要目

項目	内容	単位	仕様	備考
1. 伝熱設計条件	形式	-	一体貫流型	
	交換熱量	MW t	650	
	基数	基/ループ	1	
	ナトリウム入口温度	℃	470	
	ナトリウム出口温度	℃	310	
	ナトリウム流量	kg/h	1.14×10^7	
	給水入口温度	℃	210	
	蒸気出口温度	℃	453	
	給水入口圧力	kg/cm ² a	122	オリフィス考慮せず。
	蒸気出口圧力	kg/cm ² a	108	
	給水流量	kg/h	1.0×10^5	
	水・蒸気出入口間圧力差	kg/cm ²	14	オリフィス圧損: 4kg/cm ²
	ナトリウム側圧力損失	kg/cm ²	0.66	
	最大熱流束	kca /m ² h	3.96×10^5	
2. 伝熱 パラメータ	伝熱管 外径	mm	31.8	
	肉厚	mm	3.2	
	材質	-	1 2-Cr-1Mo 4 鋼	
	本数	本	420	
	層数	層	21	
	配列ピッチ (軸/半径)	mm	48/50	
	傾斜角度	度	8.7	
	内部シュラウド外径	mm	950	

Table 3.1 (続き) 一体貫流型蒸気発生器管束部設計主要目

項目	内容	単位	仕様	備考
2. 伝熱 パラメータ (続き)	ヘリカルコイル径 (最内層)	mm	1000	
	ヘリカルコイル径 (最内層)	mm	3000	
	外部シュラウド内径	mm	3050	
3. 伝熱面積 (コイル部)	有効伝熱部高さ	m	11.8	余裕5%含む
	有効伝熱管平均長さ	m	73.2	//
	伝熱面積	m ²	3270	//

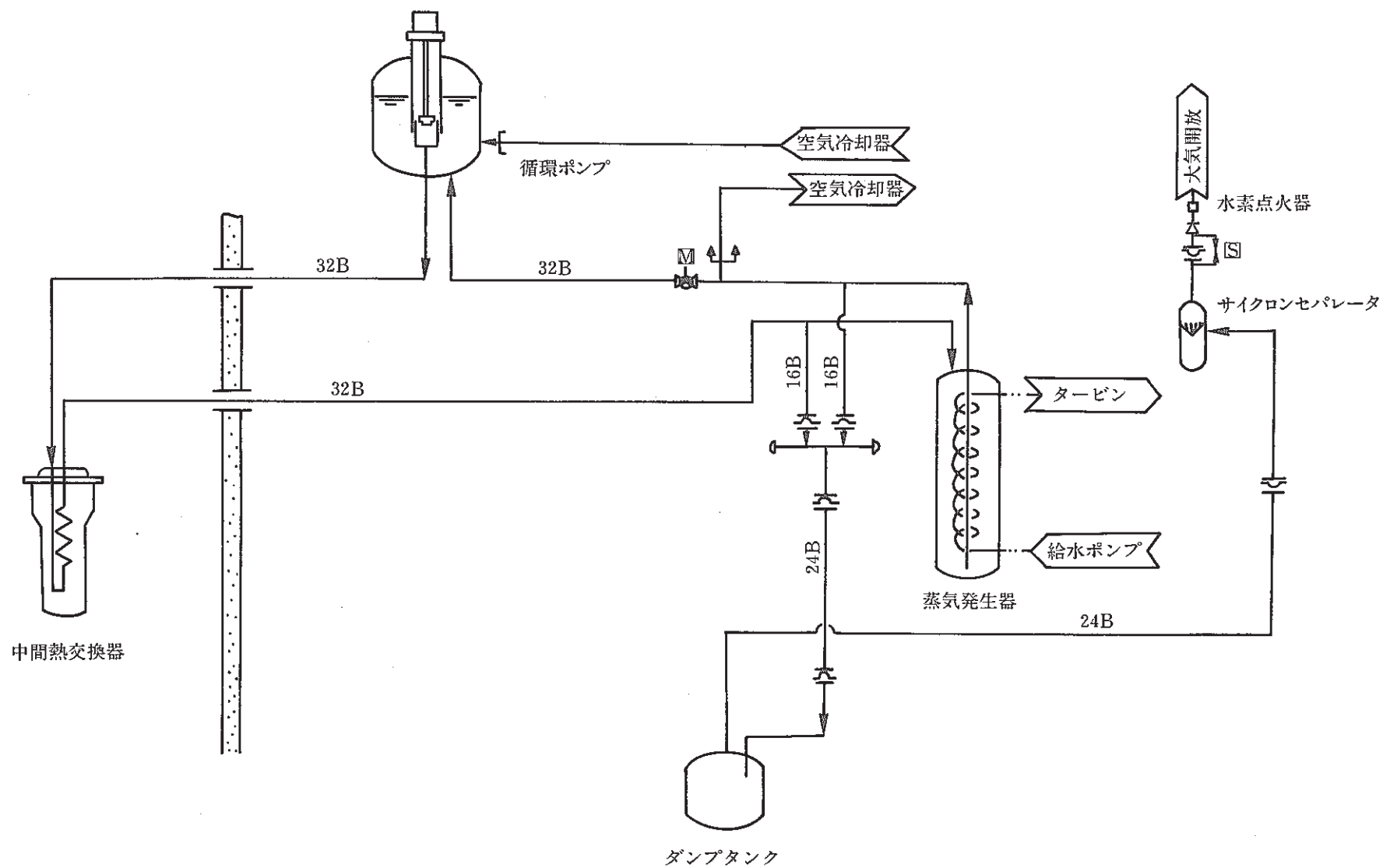


Fig 3.1 2次主冷却系及び圧力開放系系統図（無液面型SG）

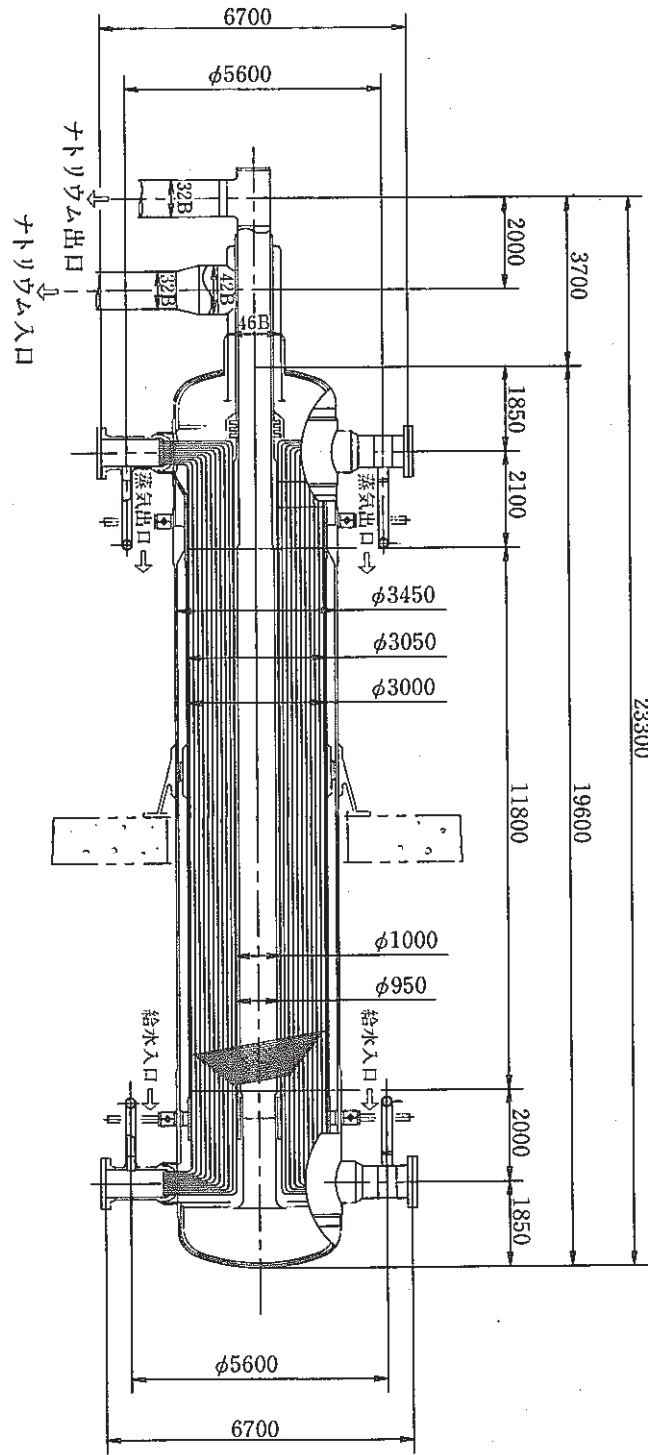


Fig 3.2 無液面型SG構造図

(2) 有液面型 S G

本解析の対象とした有液面型 S G は、前記無液面型 S G を基本として新たに設計したものである。無液面型を有液面型に変える場合、単に S G 上部にカバーガス空間を設けるだけでなく、その影響が他の部分にも波及して来ることは避けられない。本解析でも、液面の有無以外に数点の変更点が生じた。

本解析で使用した有液面型の場合の 2 次主冷却系系統及び S G の構造を Fig 3.3 及び Fig 3.4 に図示する。Fig 3.4 での両図は、それぞれ蒸気出口管板部を液中、又はカバーガス中に設置したものである。本解析では、左側の構造を対象として選択し、以下の記述も同図左側の構造について述べる。このモデルで無液面型との違いは次の 3 点である。

- (1) カバーガス部を作るため S G 胴を単純に約 6.1 m だけ上に伸ばした。この結果、ナトリウムの S G への出入口流路となるセンタパイプ上部のアニユラス部も約 6.1 m 長くなった。
- (2) 圧力開放板をカバーガス部に設置した。但し、後述するように、圧力開放系の設置場所をパラメータ・サーベイの対象としたため、このほかに無液面型と同様に接液型としたケースや両者併設のケースも考えた。
- (3) カバーガス部を設けたことに伴い、無液面型で膨張タンクの役割を果たしていた主循環ポンプの上部空間への流路を狭めて、事実上閉じた。

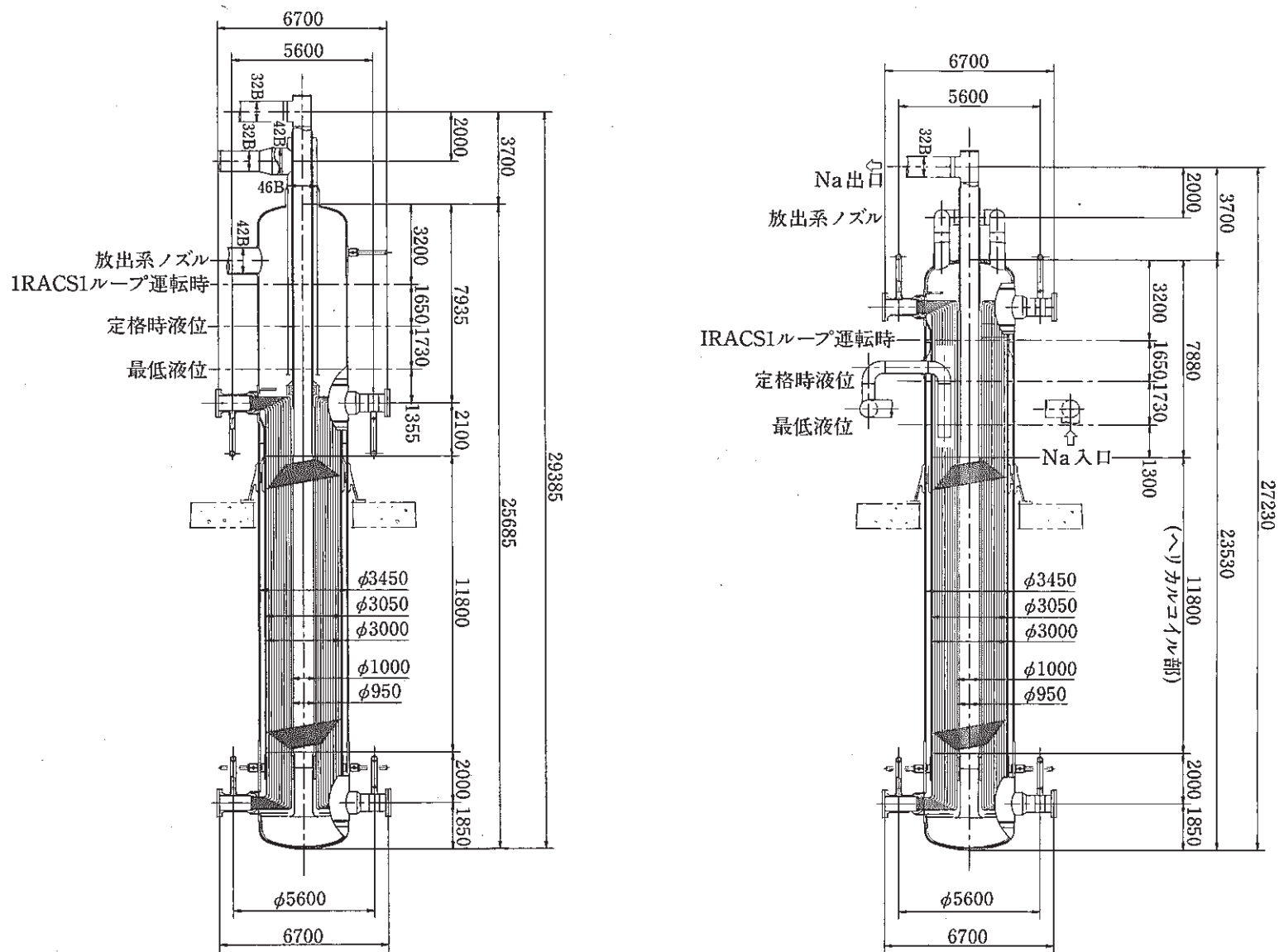


Fig 3.4 有液面型SG構造図

3.2 圧力開放系の設置検討

SG伝熱破損事故時のナトリウム-水反応が、2次主冷却系機器に与える影響を軽減させるため、圧力開放系を設置し、圧力波を低減させる方策が挙げられる。この場合、圧力開放系の設置場所によって、その圧力波の低減効果と2次系内一巡の圧力波形挙動が種々異なることが考えられる。従って、圧力開放系の設置場所（圧力開放板の形式も考慮）変更に伴う圧力波低減効果と圧力波挙動を把握するため、無液面型SG、有液面型SGの両者についてパラメトリックに圧力開放系の設置検討を行った。

(1) 圧力開放系の設置検討

無液面型SGの場合は60年度要素技術設計研究(II)の結果を用いており、コールドレグに自由液面を持つ膨張タンクを設け、主循環ポンプと一体型にし、オーバーフロー系を削除した構成としている。圧力開放系は60年度と同様のホットレグ、ミドルレグ配管から分岐して設置したケース、及び新たに圧力波の効果的な減衰を狙って、SGの上下プレナムに直接設置したケースと上部プレナムに直接設置したケースを想定した。

有液面型SGについては、無液面型SGとの比較の観点から外胴を単純に約6.1m上方に伸ばし、定格運転時約40m³のカバーガス空間を設け、膨張タンクの役割も持たせた。これにより、無液面型に於て主循環ポンプと一体で設けられていた膨張タンクは削除した。圧力開放系は「もんじゅ」SGと同様にカバーガス部のみに設けたケースと、更にホットレグ・ミドルレグ配管、及びSG上下プレナムに圧力開放板を設けたケースを想定した。

圧力開放系の設置パラメータをTable 3.2に示す。放出系配管の口径については、放出系が2系統からなるケース(IRF0、IRF4、IRF6B、IRF5、ICG0、及びICG4)については、合流するまでは16B、合流後は24Bとし、放出系が、1系統である他のケースについては、すべて24Bとした。

Table 3.2 圧力放出系の設置パラメータ

無液面SG	IRF 0, 1, 2, 5	IRF 4	IRF 6A, 6B
	ICGO	ICG 3	ICG 4
	有液面SG		

The table contains schematic diagrams for six different reactor models, arranged in a 2x3 grid. The rows represent '無液面SG' (Dry SG) and '有液面SG' (Wet SG). The columns represent different reactor models: IRF 0, 1, 2, 5; IRF 4; IRF 6A, 6B; ICG 0; ICG 3; and ICG 4. Each diagram shows a vertical steam generator with a heating coil. A feedwater pump (給水ポンプ) is connected to the bottom of the coil, and a turbine (タービン) is connected to the top. Various valves (16B, 24B) and piping configurations are shown for each model. A common label 'D/T' is present at the bottom of each diagram, indicating a connection to a dump tank.

3.3 圧力開放板の設定圧について

設定圧の算出方法は、

- ① I H Xにおける1次系境界で常に2次系の圧力が高いこと。
- ② 系統に係わる負圧防止の観点。
- ③ 主循環ポンプN P S H_{ave}を満足する系内カバーガス圧力をまず設定する。
- ④ 系統内のNa温度が、最高となる時点（運転状態Ⅳ：I R A C S 1ループ除熱運転状態）での圧力開放板に加わる圧力を算出する。
- ⑤ 圧力開放板の誤作動を考慮に入れて適度に、誤作動防止の為の余裕係数を加える。
- ⑥ 最終的にダンプタンク（D/Tと略称す。）側の背圧分を加味して設定圧（ノミナル値）を算出する。

以上の方法にて、①～④まで算出した圧力開放板に加わる圧力は、無液面型S Gの場合5.1atg、有液面型S Gの場合は、5.9atgである。この差は、S Gの液面有無に依る系統構成の相違（Fig 3.1及びFig 3.3を参照）から生じたもので、無液面型S Gの場合、主循環ポンプが高所に有り、系統に係わる負圧防止条件が有液面型S Gと比較して楽になっている事が最大の要因である。（Appendixに設定圧の算出根拠を詳述する。）

圧力開放板についての比較は、無液面型では圧力開放板はナトリウム接液型となり、「もんじゅ」までのR & Dが、そのまま適用できない。PNCに於ける接液型圧力開放板についての経験は、大洗1MWSG試験施設に於けるI T R（不安定現象試験装置）で4Bという小口径のものについて使用しているが、ループのナトリウムチャージ直後に2回作動開放したことがあるなど、信頼性の面で問題を残している。

接液型圧力開放板はカバーガス中に比べ、前項で述べた圧力解析において初期ピーク圧の鋭い立ち上がりで作動することになっているが、開口率も含めR & Dによる確認が必要である。また、有液面型を採用するとしても接液型圧力開放板をS G下部プレナムに設置することは圧力波の低減に効果のあることであり、液面有無の形式について特に差違はないと考えられる。

以上のように、接液型圧力開放板の設定圧は、カバーガス中の圧力開放板設定圧より更に余裕のある値とする必要がある。このような観点から、本解析では、無液面型S G、及び有液面型S Gの圧力開放板破裂設定圧を、それぞれ8.5及び7.4 kg/cm²aとした。

3.4 2次主冷却系配管の短縮効果の反映

無液面型SGにおける大リーク・ナトリウム水反応事象の圧力波低減方策の一つとして、膨張タンクを兼用した主循環ポンプをSGに可能な限り接近させる（ミドルレグの短縮）ことが有効であることが挙げられる。

今年度、別途、実施した2次系主配管に配管ベローズ継手を用いた配管・配管検討において、配管ベローズ継手を用いた場合は、通常配管方式と比較して大幅な配管短縮が達成できた。（TABLE 3.3 及び Fig 3.5 参照）

この結果を、今年度、実施した事故解析ケースIRF6A、IRF6Bのネットワーク解析モデルに組み入れ、無液面型SGにおける事故時圧力波の低減効果の見極めを計った。

Table 3.3 配管ベローズ採用による配管短縮の例
単位：m

ケース 配管	旧(IRFO等)	新(IRF6A/B)
ホットレグ	40.5	24.9
ミドルレグ	32.2	12.9
コールドレグ	50.4	25.9

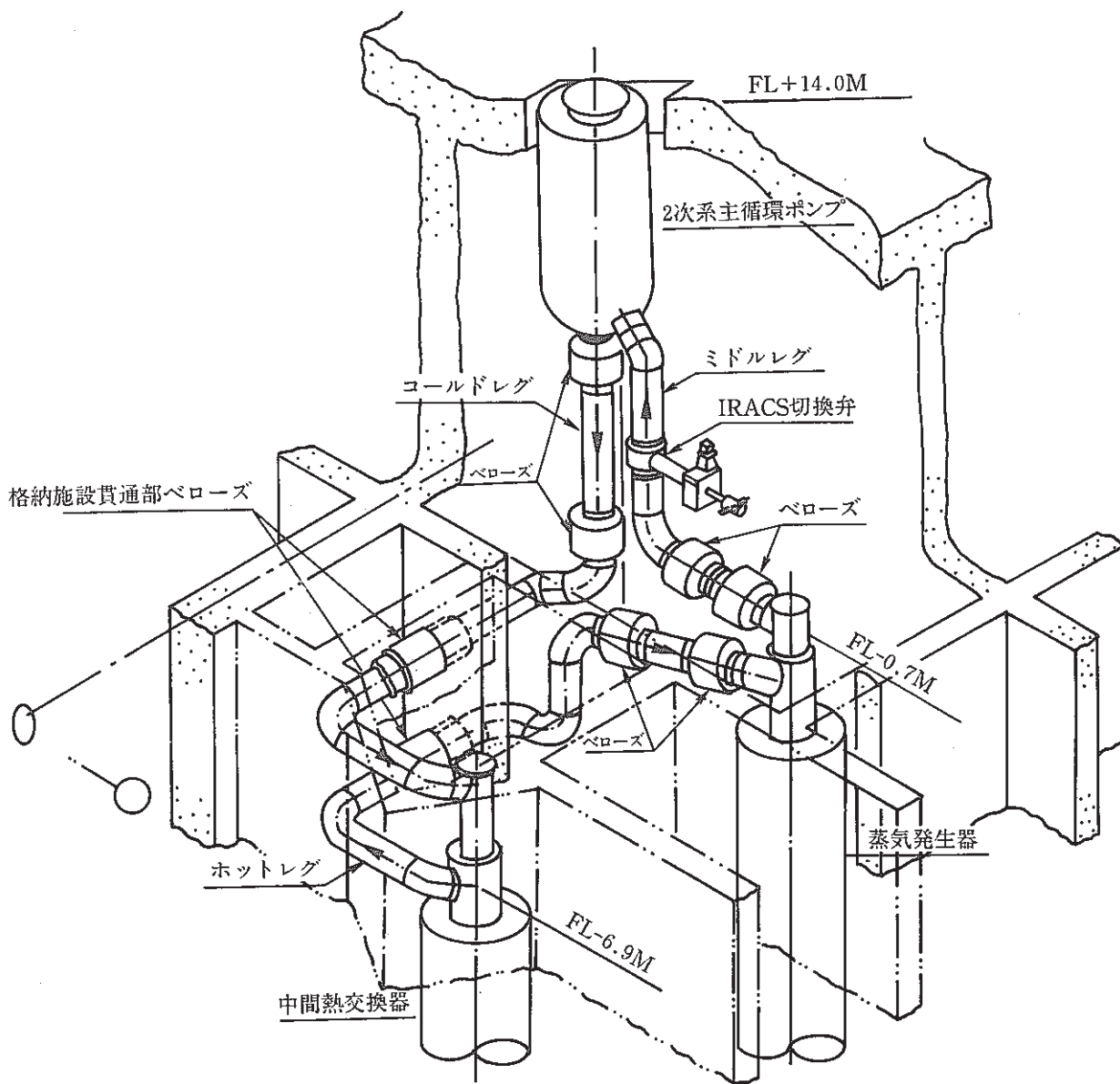


Fig 3.5 配管ベローズ継手を用いた2次主冷却の鳥瞰図

4. 初期スパイク圧力評価

4.1 解析条件

(1) 水リーク率

本解析は、無液面／有液面型の水反応事象評価の一環であるので、前回と同様の伝熱管1本両端ギロチン破損（1 DEG）相当のリーク率を考え、圧力評価上相対的に厳しいと考えられる、ヘリカルコイル管束下部を選び、有効伝熱管部下端より1/6の高さの点とした。

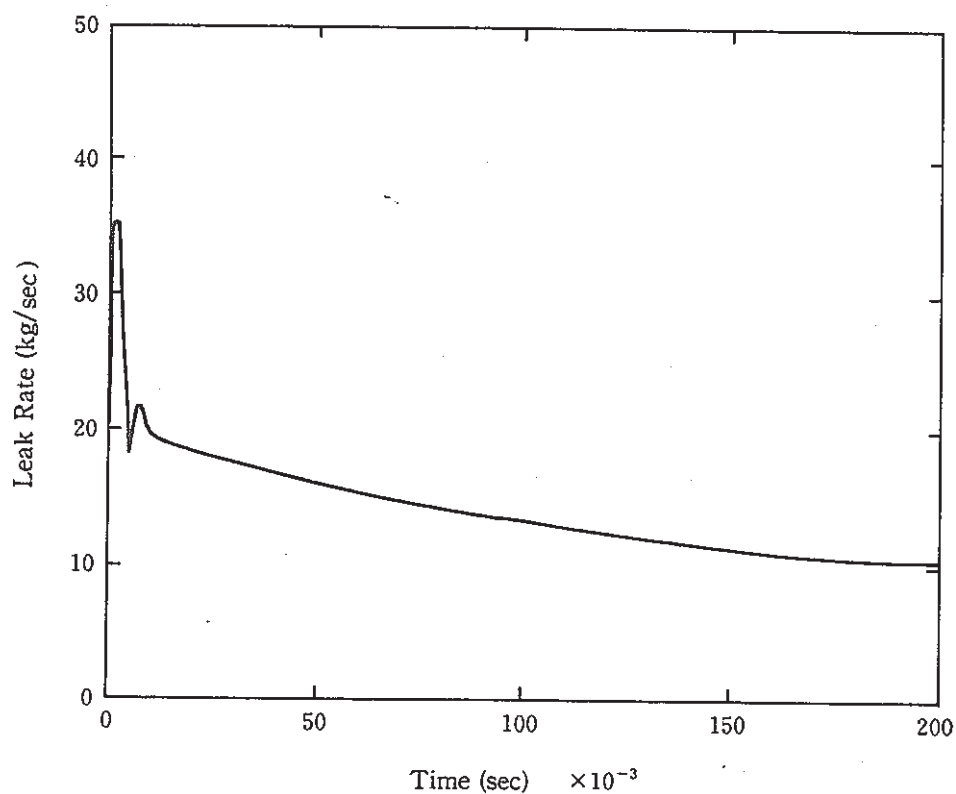


Fig 4.1 水リーク率入力値（初期スパイク圧時間領域）

(2) 開放系設置場所および放出系配管

本解析でパラメータとして用いたものは、まず蒸気発生器内のカバーガス部の有無であるが、このほか圧力開放系配管の設置場所についても検討対象とした。Table 4.1 に各ケースの圧力開放系設置場所と破裂設定圧を示す。

まず、無液面型の場合は、現設計どおり放出系配管をホットレグ及びミドルレグ配管のSG寄りに設置するというケース(IRF0)をレファレンスとして、ホットレグ側のみに設置したケースをIRF1とし、ミドルレグ側のみに設置したケースをIRF2とした。更に、圧力波の効果的な減衰を狙って、圧力開放系をSGの上下プレナムに直接取り付け付けたケースをIRF4、IRF0で主冷却系配管から圧力開放板までの距離をできるだけ短くしたケースをIRF5として計算した。

また、無液面型において、圧力減衰効果が比較的大きいと考えられるSG本体上部プレナムに、圧力開放板を設置し、24Bの配管1本を設置したケースをIRF6A、放出系配管をSG上部プレナムに2本の16B配管を設置したケースをIRF6Bとした。

有液面型ではホットレグ、ミドルレグ併設型をICG0、カバーガス空間にのみ設置するケース(「もんじゅ」と同タイプ)をICG3とし、カバーガス空間

注) ケース名A B B Cの意味は次のとおり。

A : I/Q でそれぞれ初期スパイク圧/準定常圧解析を表す。

B B : R F / C G で無液面型(Reference) / 有液面型(Cover Gas)を表し、

C = 0 : 圧力開放系をホットレグ及びミドルレグに併設

1 : 圧力開放系をホットレグのみに設置

2 : 圧力開放系をミドルレグのみに設置

3 : 圧力開放系をカバーガス空間に設置

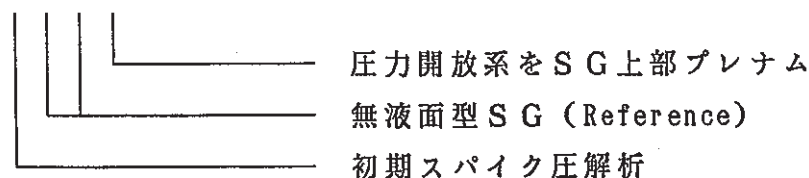
4 : 圧力開放系をSG上部及び下部に設置

5 : C = 0で主冷却系配管～圧力開放板の距離を短縮

6 : 圧力開放系をSG上部プレナムのみに設置

IRF6A ——— 24B配管1本

B ——— 16B配管2本



ほかSG下部プレナムにも開放系を置くものをICG4とした。

放出系配管径については、放出系が2系統からなるケース（IRF0，IRF4，IRF6B，IRF5，ICG0，及びICG4）については、合流するまでは16B，合流後は24Bとし、放出系が1系統である他のケースについてはすべて24Bとした。

(3) 2次主冷却系配管の短縮

『2次系ベローズ継手による配管配置検討(Ⅱ)』に反映する意味でIRF6A，IRF6Bのみホットレグおよびミドルレグ（膨張タンク～SG）の配管レイアウトの変更を行い、配管短縮を行った。

Table 4.1 初期スパイク圧計算ケースの内容

ケース名	液面	圧力開放板破裂設定圧力(kg/cm ² a)		
		ホットレグ	ミドルレグ	カバーガス部
IRF0	無	8.5	8.5	X
IRF1	無	8.5	—	
IRF2	無	—	8.5	
IRF4	無	SG上部 8.5	SG下部 8.5	
IRF5	無	8.5	8.5	
IRF6A ^{*)}	無	SG上部 (24B1本) 8.5	—	
IRF6B ^{*)}	無	SG上部 (16B2本) 8.5	—	
ICG0	有	8.5	8.5	—
ICG3	有	—	—	7.4
ICG4	有	—	SG下部 8.5	7.4

*) 配管ベローズ使用により、2次主冷却系配管を短縮した。

4.2 計算モデル

先に述べたように、本解析では対象とする2次主冷却系全体をひとつのモデルで表し、初期スパイク圧の発生から、圧力波が2次系全体に充分伝わるまでの時間領域について計算を行った。各ケースの計算モデルをFig.4.2(a)～(h)に示す。

無液面型SGの初めの3ケース(IRF0, IRF1, IRF2)の場合は基本的に同じモデルで、使用しない圧力開放系についてはその配管径として充分小さい値を入れて絞るとともに、破裂設定圧を充分高く入力することで計算条件の違いに対応させた。また、IRF4ではIRF0を基本に開放系取付け位置を両ライン共SGに移し、IRF5ではIRF0の部材28と45の長さを、それぞれ2.7m及び2.8mから0.76mに短縮した。

IRF6AおよびIRF6Bは、IRF4の計算モデルと基本的に同じモデルで、一部変更を加えて作成した。下部プレナム側開放系など使用しない配管(接合点16,17,47)については、その配管径および配管長さを充分小さい値を入れて絞るとともに、破裂設定圧力を充分高い設定圧力にすることで、計算条件に適應させた。変更箇所を以下に記す。

- (1) IRF6AおよびIRF6B共に、ホットレグ配管(接合点38～42)とミドルレグ配管(膨張タンク～SG)の、配管長さ短縮を行った。
- (2) 2ケースとも、放出系配管の設置場所は、SG上部プレナム(接合点1)に設置した。
- (3) IRF6Aの圧力開放板までの配管は、24Bとし配管長さは、3.55m(接合点45)とした。また、IRF6Bは、16B2本を圧力評価上等価な1本の配管にし配管長さは、2.6m(接合点45)で、0.95mの24Bの配管(接合点46)と結合する。

有液面型SGのICG0及びICG3については、無液面型のモデルに上部プレナムからカバーガス液面に繋がる流路を付加した。ICG4は、ICG3のSG下部に放出系を設置した。無液面型から有液面型へのモデルの主な変更箇所は次のとおり。

- (1) 上部プレナム部に当たる接合点3からカバーガス液面に至る新たな流路を付加した。
- (2) SG胴を伸ばした分、部材1～4及び21～23の長さ伸ばした。
- (3) 主循環ポンプの膨張タンクとしての役目がなくなるためポンプ・カバーガス部に繋がる部材32及び33の流路断面積を事実上ゼロに等しくした。

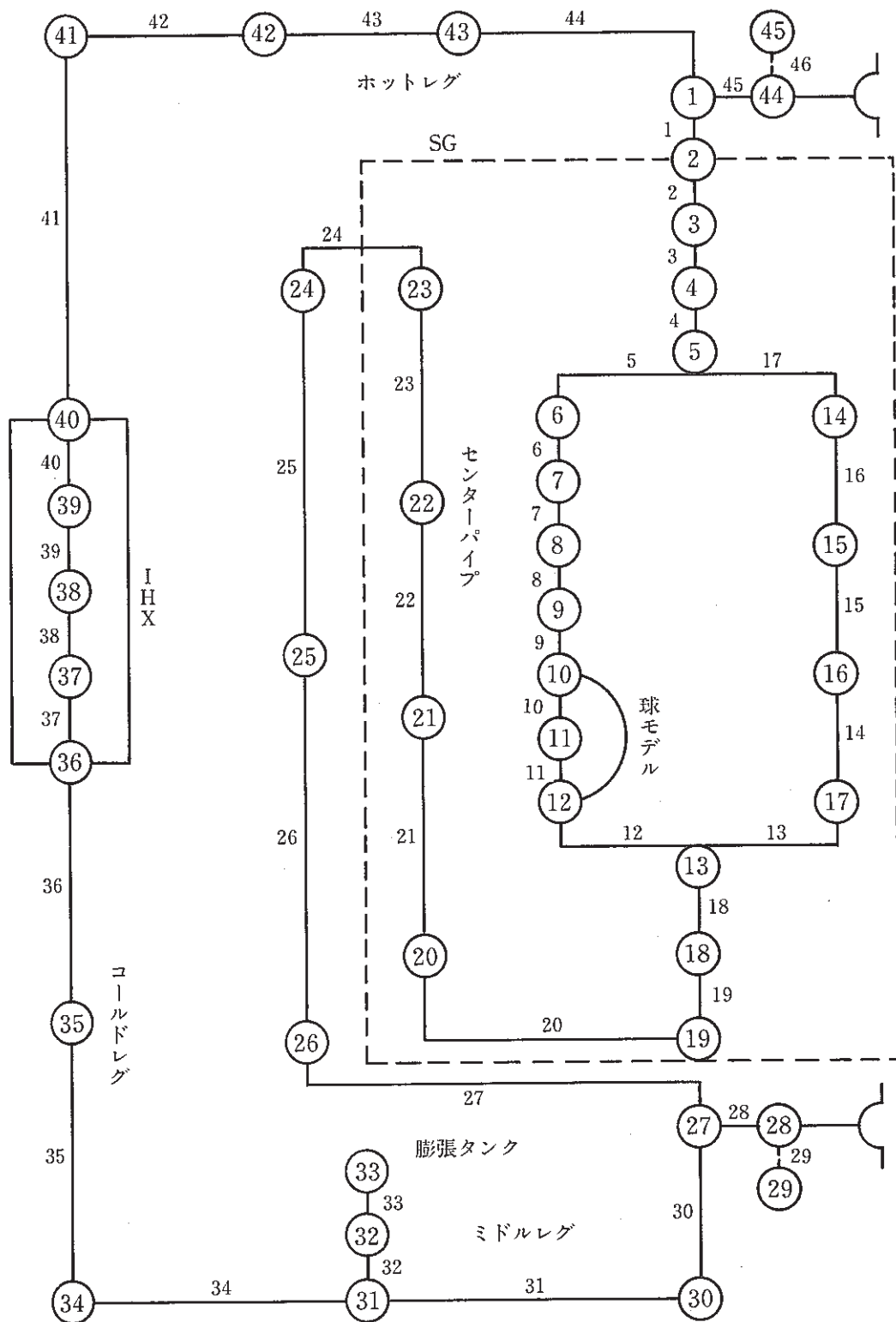


Fig 4.2(a) 初期スパイク圧・解析モデル（無液面・IRF0及びIRF5）

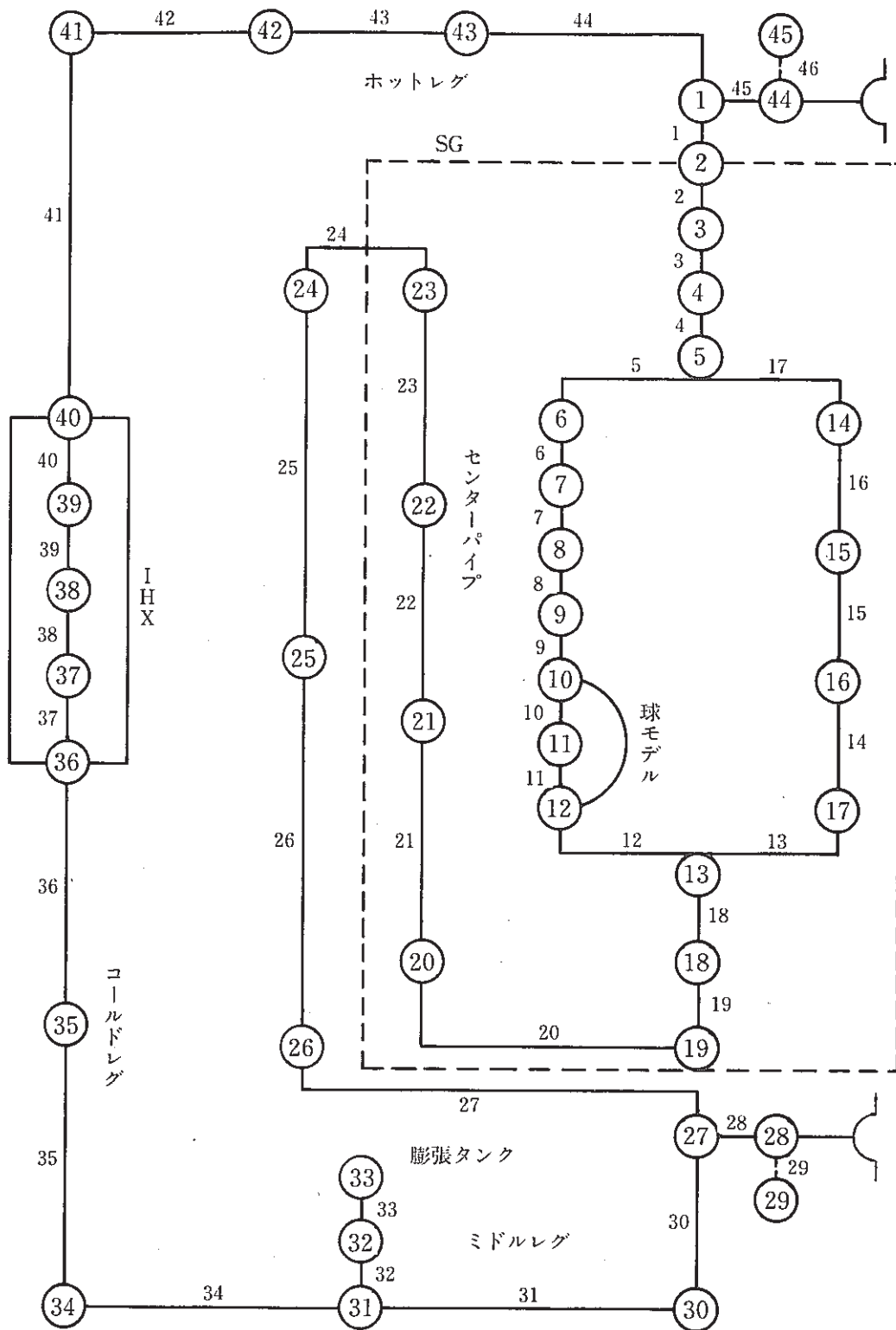


Fig 4.2(b) 初期スパイク圧・解析モデル (無液面・IRF1)

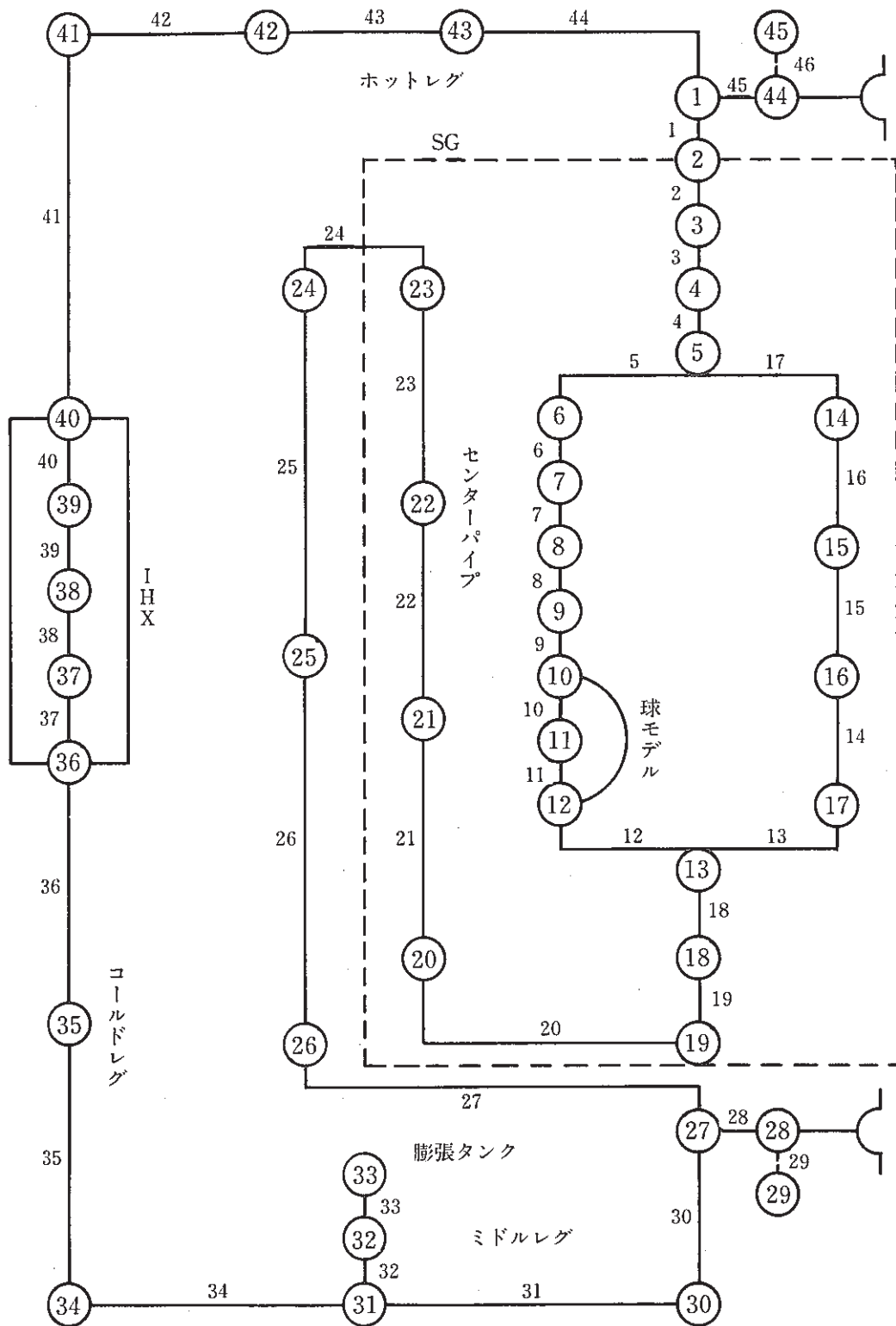


Fig 4.2(c) 初期スパイク圧・解析モデル (無液面・IRF2)

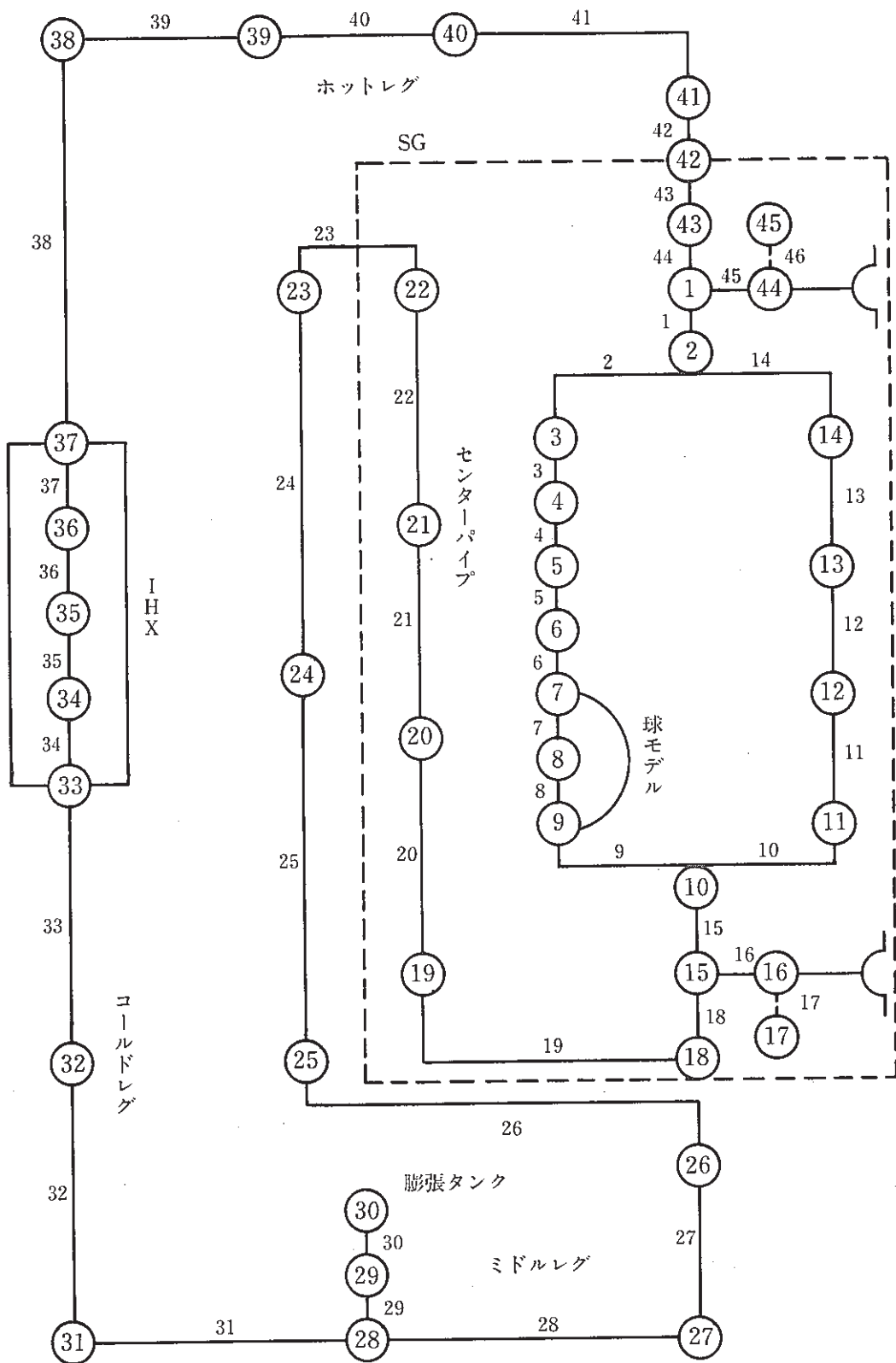


Fig 4.2(e) 初期スパイク圧・解析モデル (無液面・IRF6A及びIRF6B)

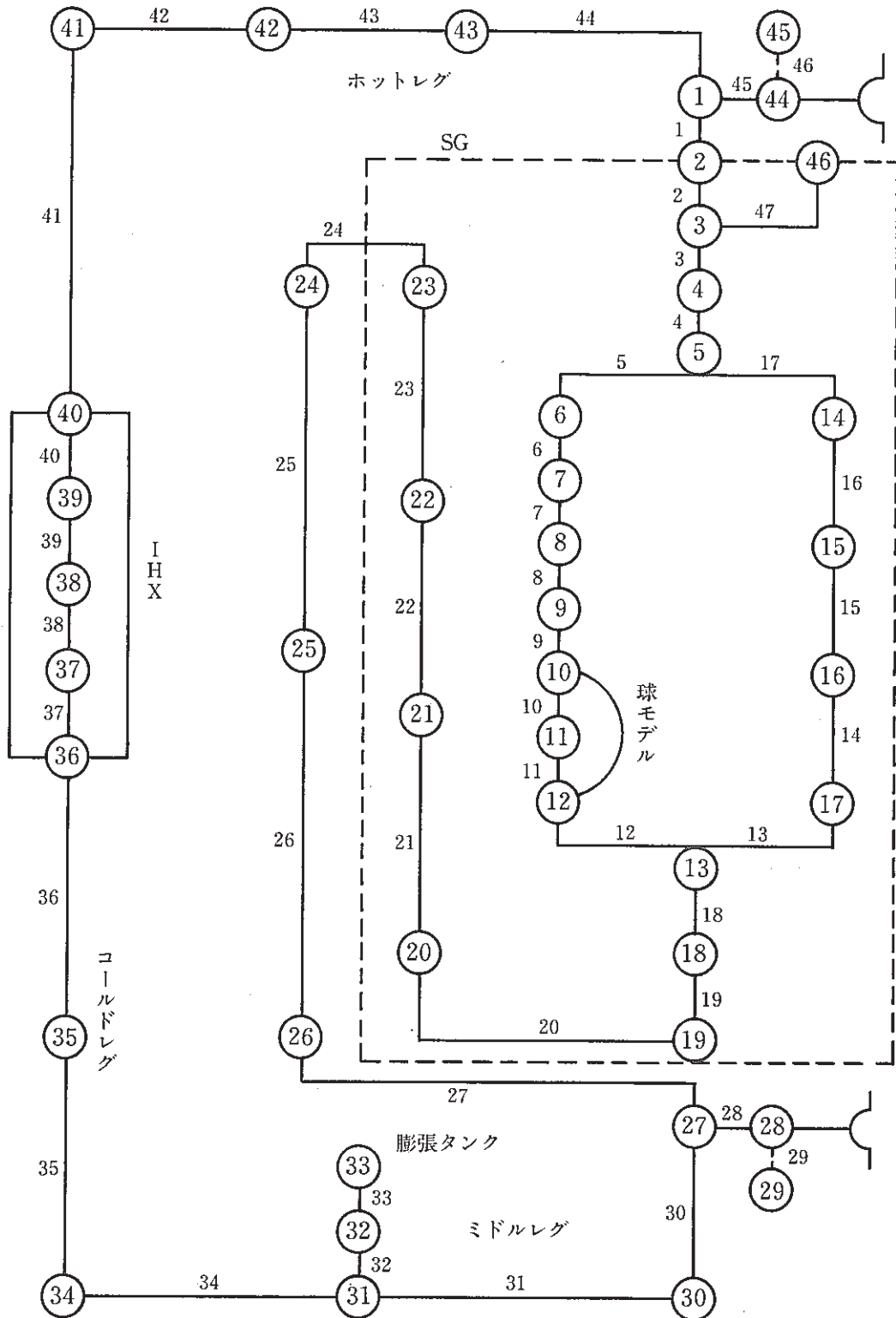


Fig 4.2(f) 初期スパイク圧・解析モデル (無液面・ICG0)

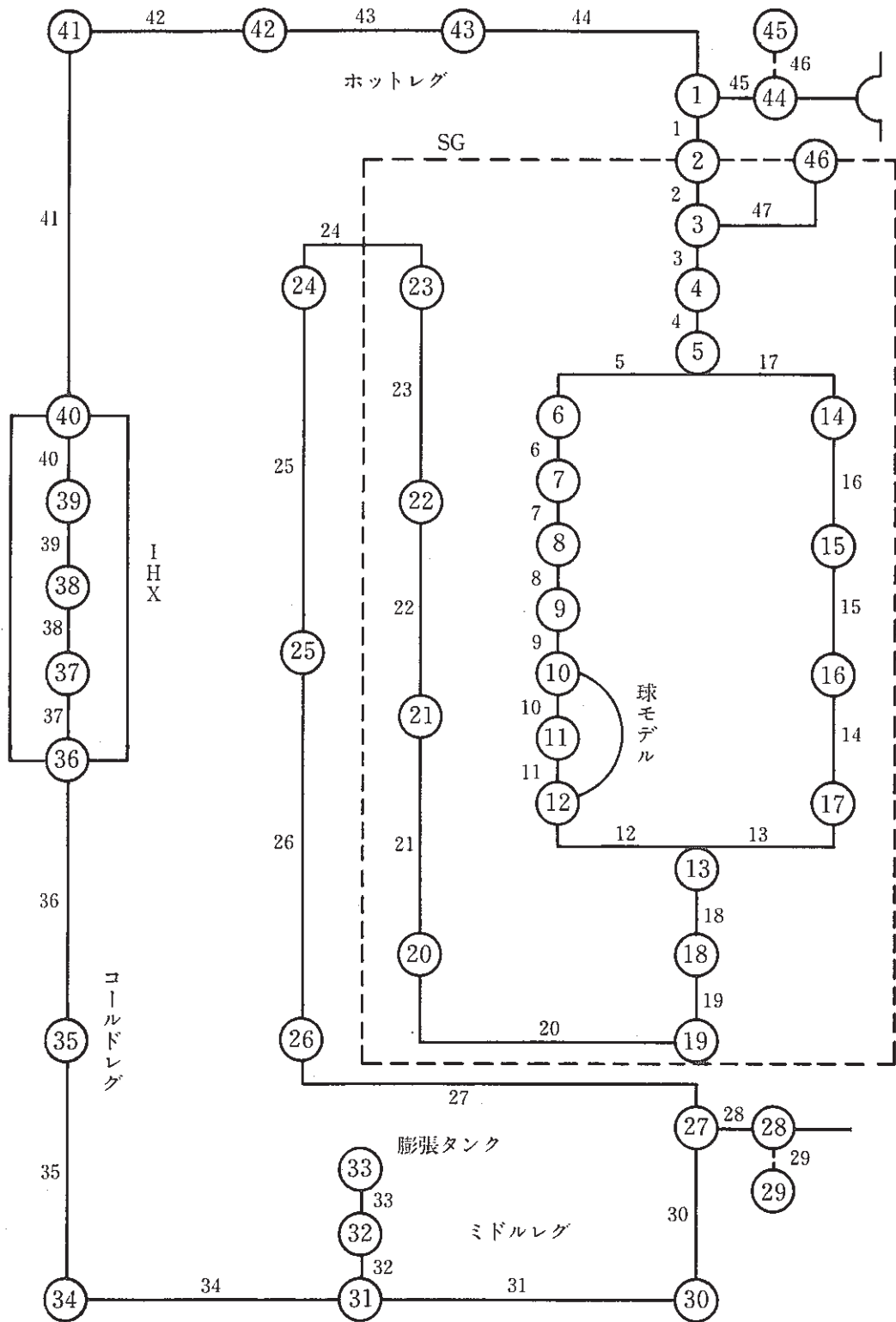


Fig 4.2(g) 初期スパイク圧・解析モデル (無液面・ICG3)

4.3 計算結果

4.3.1 無液面型SG

無液面型SGでの初期スパイク圧計算結果をFig.4.3(a)~(c)に示す。また圧力開放板作動時刻、及び各部位での通常運転時発生最高圧を、それぞれTable 4.2とTable 4.3に示す。ここで、Table 4.3の発生最高圧力は、初期スパイク圧計算結果に通常運転時の圧力分布を加えた結果である。また、圧力開放板作動時刻については通常運転時の作動時刻ではないが、いずれにしてもその差は小さいと考えられる。

(1) ケースIRF0, IRF1, 及びIRF2の比較

Fig 4.3(a)では、線の太いものから順にケースIRF0、IRF1、IRF2である。同図からは、SG内での圧力差はそれほど大きいものではないが、ややIRF2（ミドルレグのみに開放系を設置）が高めとなっている。SG外で見ても、ミドルレグ配管部を除いてIRF2が他のケースより明らかに高くなっている。ミドルレグ配管部でIRF1が最も高いのは、同ケースでここに圧力開放系が設置されていないためであり、ホットレグ側では、逆にここに圧力開放系の設置されていないIRF2が最も高くなっている。圧力開放板が作動することにより、自由液面が形成され、圧力波の減衰効果をもたらすためである。

IHXでの圧力差は次のように説明することができる。ミドルレグからコールドレグを伝播する圧力波は、ポンプ内の自由液面で減衰されるためほとんどIHXには達しない。これに対し、ホットレグ側を伝播する圧力波は、特に大きく減衰される要因がないため、そのままIHXまで達する。特に、ホットレグに圧力開放板のないIRF2の場合が最も高い。このホットレグからの圧力波は、コールドレグまで回り込んでいることが判る。また、IRF0とIRF1との差は、放出配管径がそれぞれ16B、24Bと異なるためで、（主循環系は32B）放出系配管径の大きなIRF1の方が、圧力減衰効果が大きい。

本解析ではリーク点をSGコイル部下部としたが、リーク点が変わる場合は圧力様相も異なってくる可能性はある。しかしながら、リーク点のSG内垂直方向位置が上がれば、もっとホットレグ圧力開放板に近づくことから、ホットレグ側の圧力開放板が一層早く破裂し、ホットレグに圧力開放系を設置したIRF0及びIRF1の圧力挙動はもっと穏やかになり、逆にIRF2の圧力は高くなると予想できる。

圧力開放板作動時刻のTable 4.2からは、ホットレグ側がミドルレグ側より先に作動することが判るが、これは反応部からはホットレグ圧力開放板の方がより近いためである。またTable 4.3からは、3ケースの中でIRF2の圧力の高い

ことが明らかである。この3ケースでの最高圧は、IRF2のホットレグ配管内（部材No.42）で発生しており、 $41.2\text{kg/cm}^2\text{a}$ である（但し水素気泡部を除く。）。

本解析結果をもとに判断すれば、本件のような設計の無液面型SGでは、初期スパイク圧対策としての圧力開放系の機能は、ホットレグ側がより重要であり、ホットレグとミドルレグの両方に設置するよりは、ホットレグ側に大口径の圧力開放系を設置する方がより効果的であると言える。

(2) ケースIRF0, IRF4, 及びIRF5の比較

IRF4及びIRF5は共に圧力低減を狙ったもので、前者は圧力開放系配管をSG本体に設置したもの、後者はIRF0と同じ主冷却系配管分岐ながら、分岐点からラプチャ板までの距離を短縮（ホットレグ： $2.8\text{m}\rightarrow 0.76\text{m}$ ；ミドルレグ： $2.7\text{m}\rightarrow 0.76\text{m}$ ）したものである。Fig 4.3(b)に示し、線の太いものから順に、IRF0、IRF4、IRF5である。

まず、IRF0とIRF4とを比較すると、全般に圧力の低下が見られる。特にTable 4.3にも示すように、SG内の上部プレナムや入口ノズルでは、約40%、IHX内でも約30%の波高値の低下が見られる。

次にIRF0とIRF5とを比較すると、特にSG外で圧力の低下が顕著であることが判る。SG内では、第1波には大差はないが第2波以後はIRF5の方が低くなっている。SG外では第1波からその差が顕著に現れており、特にIHX内でのピーク圧は約30%低下していることが判る。

このように、圧力開放系をSG本体に設置することも、圧力開放板を圧力波が通過する主冷却系配管に近い所に設置することも、共に初期スパイク圧低減上有効であるが、前者はSG内の圧力を下げることにも効果があるのに対し、後者は主として主冷却系配管部の圧力低下に効果があると言える。

更に厳密には、IRF4のSG～開放板までの距離が1mであることと、IRF4とIRF5との減圧レベルが同程度であることを考慮すれば、圧力開放板～圧力波通過点までの距離を短縮することの方が効果が大きいと言える。しかし、両方とも短くできれば、圧力対策上はそれがベストと言える。

圧力開放板作動時刻を見ると、IRF4では半分以下の時刻になっており、配管短縮化の結果が明らかとなっているが、IRF5でもわずかながらIRF0より早く作動している。

(3) ケースIRF0、及びIRF6A、IRF6Bの比較

初期スパイク圧計算をFig 4.3(c)に示し、線の細いものから順にケースIRF6A、IRF6B、IRF0である。

IRF0と比較すると、相対的にIRF6AおよびIRF6Bの方が、特に、

S G 上部は低い圧力になっている。これは、放出系配管の設置場所を S G 本体に設置したため、圧力開放板が反応点により近くなったことにより減圧波の到達時間が短くなったこと、及び I R F 0 よりも放出系配管径が拡大した事により、圧力波減衰割合が増加したことから、全体的にピーク圧が低くなったものである。また、ミドルレグの配管短縮によって、膨張タンクが S G に近くなったことによる影響もある。

ホットレグの配管短縮を圧力効果の観点から見ると、ホットレグ側には S G 上部に放出系配管が設置されており、その後 I H X までに圧力減衰効果となる要因がないので、I H X への圧力波の伝播が速くなったものの、ホットレグ配管短縮による顕著な圧力低減効果は見られない。

Table 4.2 圧力開放板作動時刻（無液面型 S G）

ケース名 開放位置	IRF0	IRF1	IRF2	IRF4	IRF5	IRF6A	IRF6B
ホットレグ 側	13.6 (msec)	13.7 (msec)	不使用	4.2 (msec)	13.3 (msec)	9.6 (msec)	9.7 (msec)
ミドルレグ 側	19.7 (msec)	不使用	19.9 (msec)	8.5 (msec)	19.2 (msec)	不使用	不使用

Table 4.3 通常運転時の主な場所での発生最高圧力（無液面型SG）

単位：kg/cm²a

場所	No	IRFO	IRF1	IRF2	IRF4	IRF5	IRF6A	IRF6B
ヘリカル中部	9	33.8 (35.8)	33.2 (35.8)	33.2 (35.8)	29.2 (32.1)	33.3 (35.9)	33.8 (35.5)	33.8 (35.5)
SG下部プレナム	19	22.8 (25.7)	22.5 (25.4)	<u>24.9</u> (27.8)	17.0 (20.0)	22.5 (25.2)	21.1 (23.2)	21.1 (23.2)
センタパイプ	22	18.4 (21.0)	<u>22.4</u> (25.0)	19.2 (21.8)	15.7 (18.3)	18.4 (21.0)	19.9 (21.6)	19.9 (21.6)
ポンプ入口	31	1.8 (3.4)	<u>2.5</u> (4.1)	1.5 (3.1)	1.3 (2.9)	1.2 (2.8)	1.5 (2.3)	1.6 (2.4)
コールドレグ	35	14.3 (14.1)	9.0 (8.8)	<u>16.2</u> (16.0)	12.9 (12.7)	9.5 (9.3)	10.8 (9.8)	10.8 (9.8)
IHX入口	36	15.0 (15.1)	11.7 (11.8)	<u>27.2</u> (27.3)	11.6 (11.7)	12.0 (12.1)	11.4 (10.6)	12.1 (11.3)
IHX下部	38	14.3 (16.0)	11.3 (13.0)	<u>26.3</u> (28.4)	9.6 (11.0)	11.6 (13.3)	13.1 (14.0)	13.6 (14.5)
IHX出口	40	13.6 (14.8)	9.2 (10.4)	<u>23.7</u> (24.9)	23.7 (18.4)	9.9 (11.1)	12.8 (13.2)	13.1 (13.5)
ホットレグ配管	42	25.1 (26.5)	18.3 (19.7)	<u>41.2</u> (42.6)	17.2 (18.6)	19.6 (21.0)	20.2 (20.8)	20.6 (21.2)
SG入口	2	27.0 (29.0)	25.6 (27.6)	<u>28.8</u> (30.8)	16.2 (18.6)	25.0 (27.0)	19.9 (21.2)	20.3 (21.6)
SG上部プレナム	4	28.6 (30.8)	28.5 (30.7)	29.2 (31.4)	<u>30.1</u> (32.1)	28.4 (30.6)	20.3 (21.4)	20.7 (21.8)

()内は、主な場所での計算結果最高圧力。

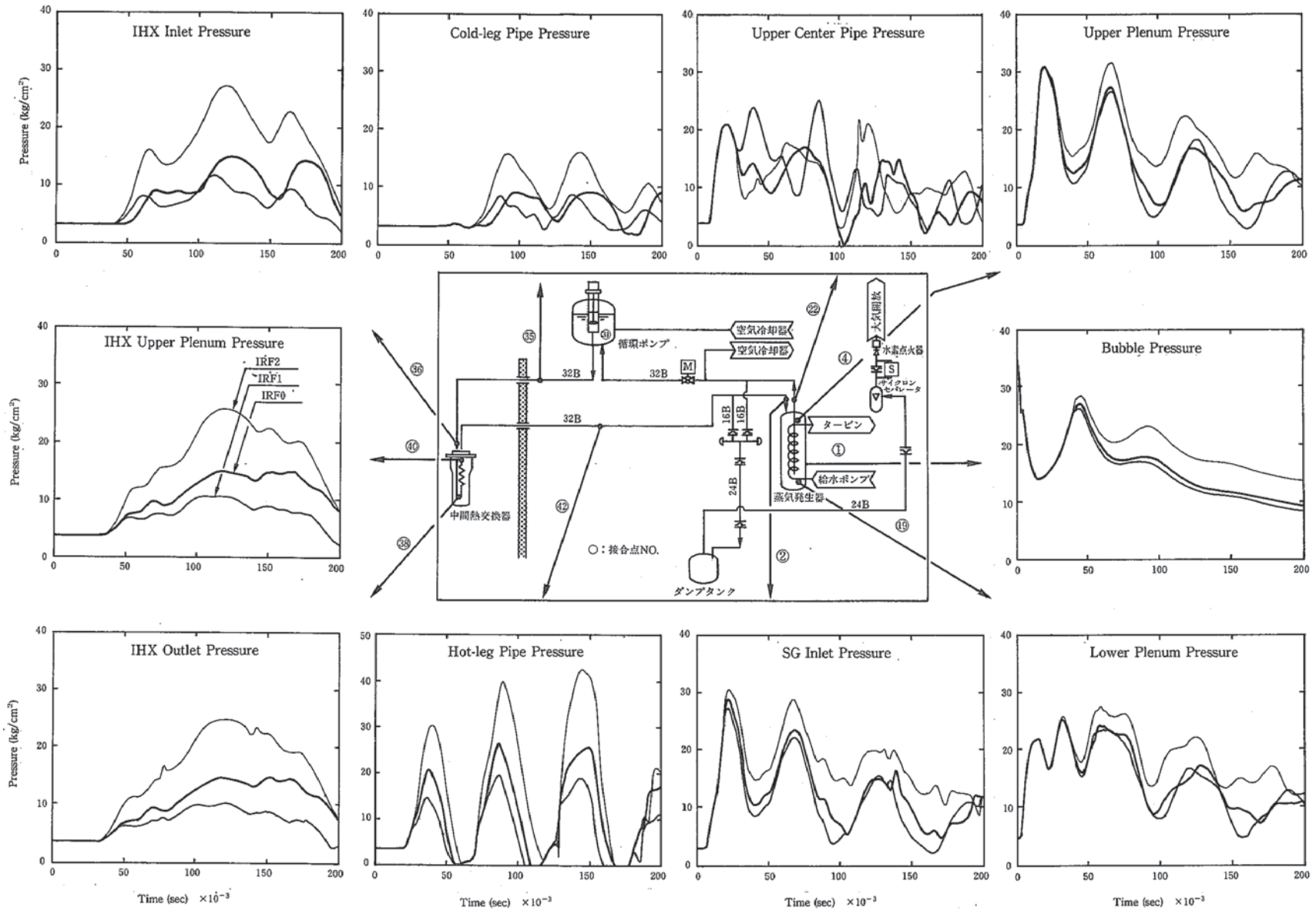


Fig.4.3(a) 初期スパイク圧挙動 (無液面型SG)

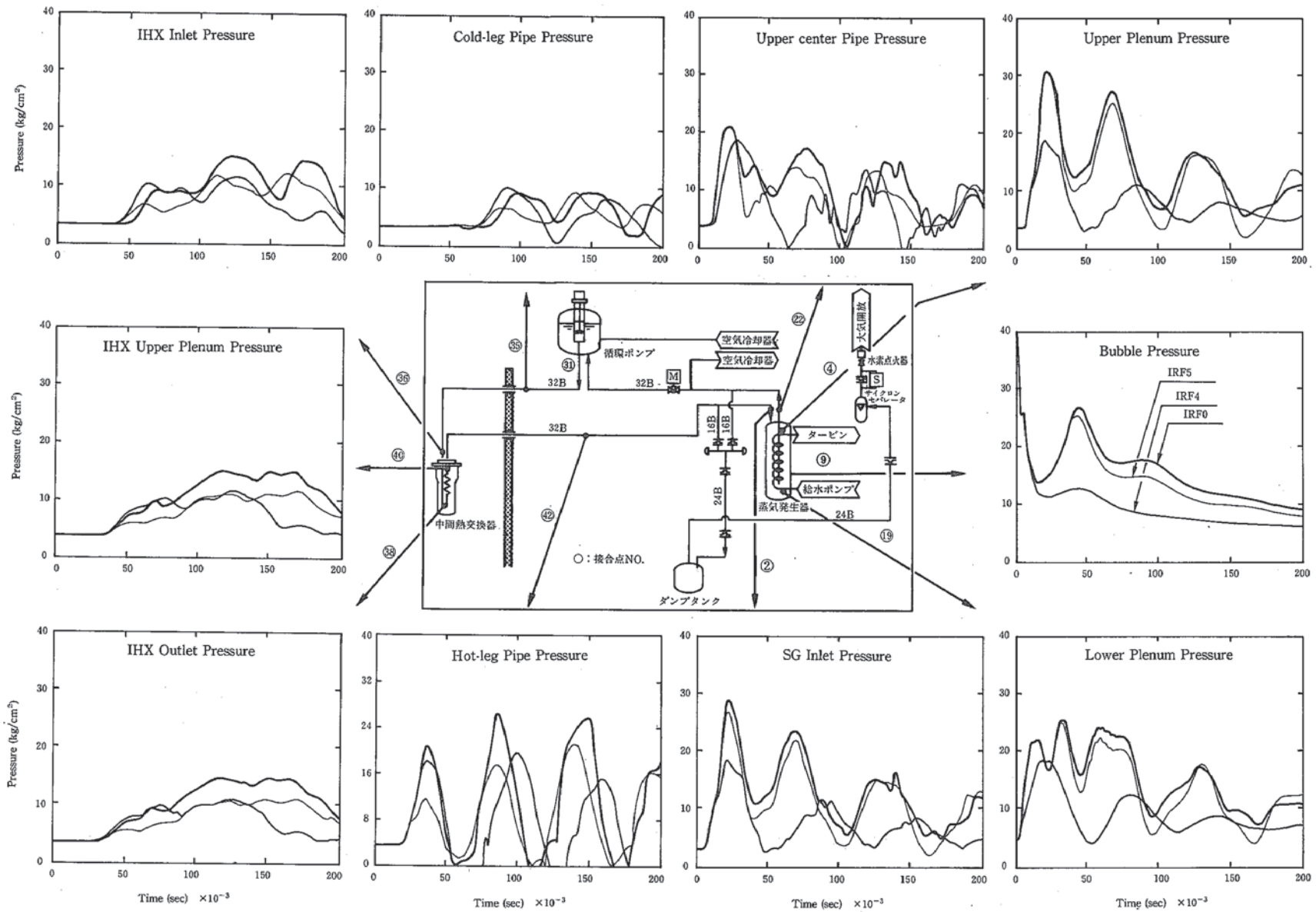


Fig. 4.3(b) 初期スパイク圧挙動 (無液面型SG)

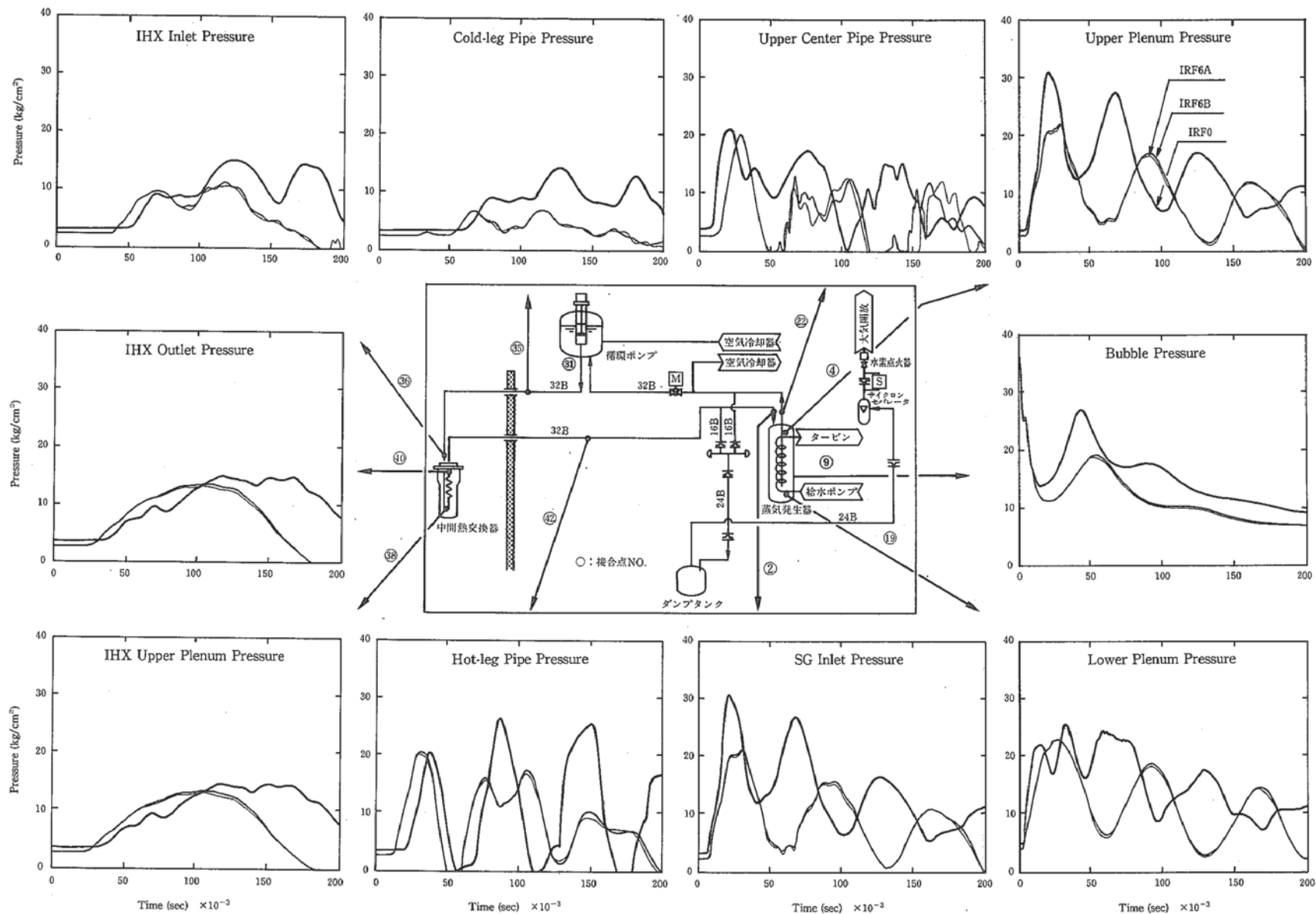


Fig.4.3(c) 初期スパイク圧挙動(無液面型SG)

4.3.2 有液面型SG

各ケースでの圧力開放板作動時刻をTable 4.4 に示す。ICG0ではミドルレグ側の圧力開放板は26.2msecに作動しているが、ホットレグ側は結局作動していない。カバーガス中圧力開放系も、計算した200msecの間には作動していない。ホットレグ側の圧力開放板が作動しないのは、リーク点からの圧力波がSG上部プレナムを通過する際に、カバーガス液面で減衰するためである。

有液面型3ケースの圧力挙動をFig.4.4 に示す。線の太い順にICG3、ICG4、ICG0である。カバーガス空間にしか圧力開放系を持たないケースICG3を見ると、下部プレナム部で発生した $19\text{kg/cm}^2\text{a}$ の圧力波がコールドレグからIHXを経由してホットレグに至っている様子が時間遅れと共に良く判る。無液面型と異なり、ポンプでの減圧効果も見られない。これに対し、リーク点を出て上部プレナムに向かった圧力波は、前述したようにカバーガス液面で減衰されるため、ホットレグ経由の圧力は全体の圧力挙動にはほとんど寄与していない。

従って、これら有液面型のケースでは圧力開放系の位置がコールドレグ経由の圧力にどのような影響を与えるかで全体の圧力挙動も特徴付けられる。ICG0ではミドルレグのSG近辺に圧力開放系があるために、この開放板の作動により、ICG3に比べてやや圧力の低下が見られる。ICG4では、下部プレナムに直接圧力開放系が設置されていることから、下部プレナム内で圧力は既にほとんど減衰しており、2次系全体での圧力挙動もほとんど見られない。

Table 4.5 に主な場所での通常運転時の圧力を考慮した発生最高圧力を示す。Table 4.4 に計算結果による圧力開放板作動時刻を示す。3ケースの中での最高値は、SG内ではケースICG0及びICG3の下部プレナムでの $19.0\text{kg/cm}^2\text{a}$ 、SG外ではSG出口部での $18.1\text{kg/cm}^2\text{a}$ である。

以上の結果から、有液面型SGでは、ホットレグ側に圧力開放系を設置する意味はなく、ミドルレグ側に設置する場合もSGに直接付ける方が効果的であると言える。またリーク点位置の影響と言う意味では、リーク点が管束部の上部～中部に来ると、カバーガス部に近づくため全てのケースで圧力は一層低下すると考えられる。

Table 4.4 圧力開放板作動時刻（有液面型SG）

ケース名 開放系位置	ICG0	ICG3	ICG4
ホットレグ側	不破裂	不使用	不使用
ミドルレグ側 (但し、ICG4 は下部プレナム)	26.2 msec	不使用	20.2 msec
カバーガス部	不使用	不破裂	不破裂

Table 4.5 通常運転時の主な場所での発生最高圧力（有液面型SG）

単位：kg/cm²a

場所	部材No	ICG0	ICG3	ICG4
ヘリカル中部	9	32.9 (35.9)	32.9 (35.9)	32.9 (35.9)
SG下部プレナム	19	19.0 (22.3)	19.0 (22.3)	11.0 (14.4)
セントパイプ	22	18.1 (20.8)	18.1 (20.8)	10.5 (14.2)
ポンプ入口	31	9.3 (10.7)	<u>14.1</u> (15.5)	1.1 (2.5)
コールドレグ	35	11.8 (11.0)	<u>16.5</u> (15.8)	4.1 (3.4)
IHX入口	36	6.0 (5.9)	<u>8.0</u> (7.8)	3.5 (3.4)
IHX下部	38	5.8 (7.5)	<u>8.1</u> (9.8)	2.8 (4.6)
IHX出口	40	5.7 (6.7)	<u>7.8</u> (9.0)	2.6 (3.6)
ホットレグ配管	42	6.8 (8.0)	<u>8.9</u> (10.1)	3.1 (4.3)
SG入口	2	4.1 (5.9)	<u>5.4</u> (7.2)	2.4 (4.1)
SG上部プレナム	4	6.1 (8.7)	6.1 (8.7)	4.3 (6.9)

（ ）内は、主な場所での計算結果最高圧力。

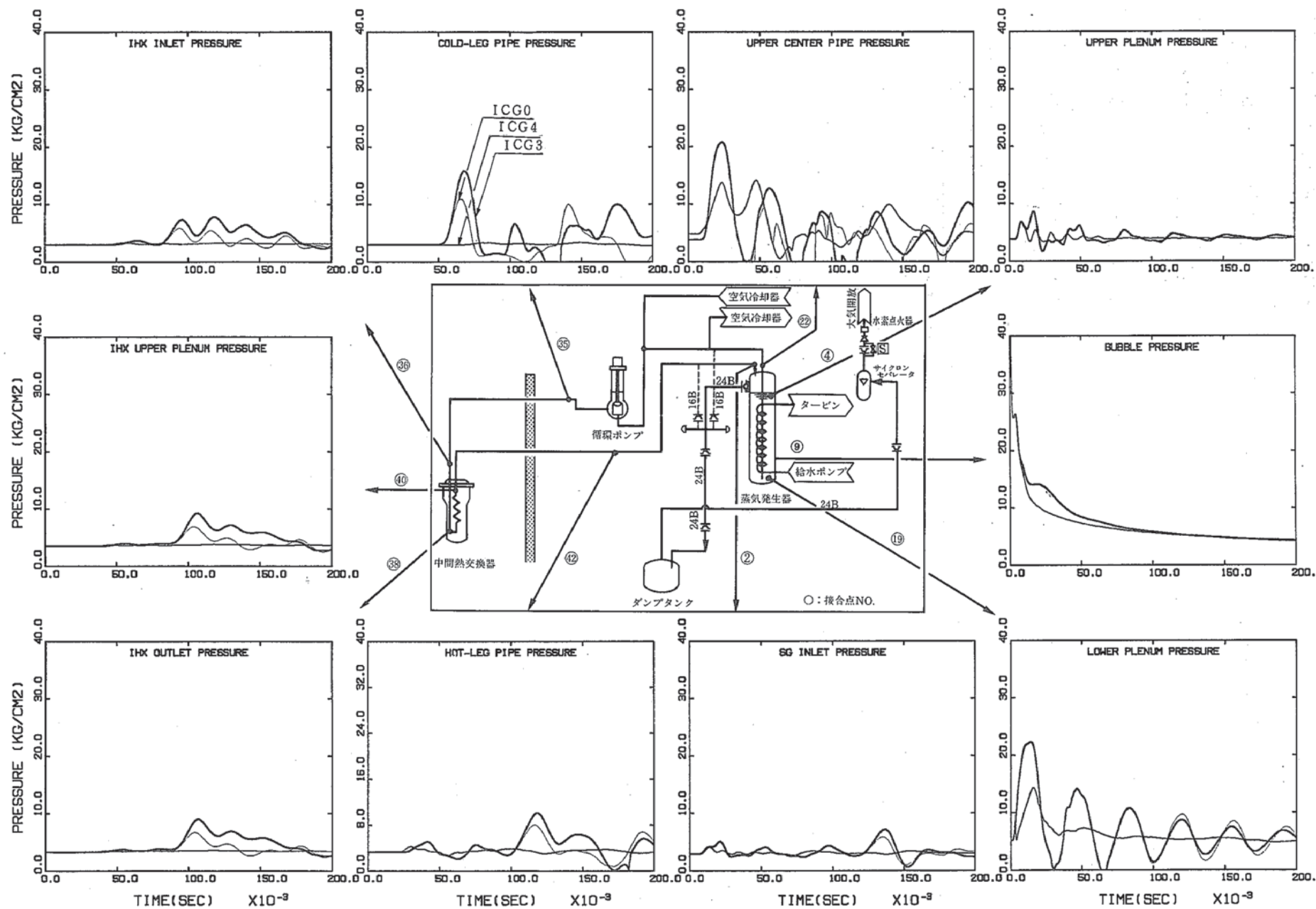


Fig.4.4 初期スパイク圧挙動 (有液面型SG)

4.3.3 無液面型と有液面型との比較

両者の中から最も代表的なケースとして、それぞれIRF0とICG3とを選んだ。また、無液面型で、圧力開放板のホットレグ及びミドルレグ配管部からの距離を0.76mと短縮したケースIRF5と最新の設計例であるIRF6Bについても参考のため比較した。Table 4.6及び4.7に、それぞれ計算結果による圧力開放板作動時刻及び主な場所での通常運転時の発生最高圧を示す。Fig.4.5(a)では太い線から順に、IRF0、ICG3、IRF5、またFig.4.5(b)でも同様に太い順にIRF0、ICG3、IRF6Bである。

IRF0とICG3とを比べると、ポンプ下流のコールドレグ配管で有液面型の方がやや高いのを除けば、ほとんどの場所で無液面型が有液面型を上回っている。これはSG及びポンプのカバーガス部での圧力減衰効果の差によるものと説明できる。すなわち、有液面型では、上部プレナムに向かった圧力波はほぼ消滅するため、下部プレナムからの圧力波が、コールドレグ、IHXを経由してホットレグまで伝播する。これに対し、無液面型の場合は、下部プレナムからミドルレグ～コールドレグに回った圧力波はポンプ・カバーガス液面で消滅するので、上部プレナムからホットレグを経由する圧力波が支配的となる。従って、ホットレグでは無液面型、コールドレグでは有液面型の圧力が高くなる。

しかしながら、有液面型のSGカバーガス液面の減圧効果は、上部プレナムはもちろんのこと、下部プレナムの圧力にも影響を与えるのに対し、リーク点から遠いポンプ・カバーガス液面はコールドレグを経由する圧力波にしか効かない。このことは、Fig.4.5の下部プレナム圧力を見ると、ICG3の方がIRF0より低いことから明らかである。このため、ポンプ近傍を除いて、無液面型の圧力が有液面より高く現れるのである。無液面型のIRF0では、ホットレグ、ミドルレグ両方に圧力開放系が設置されているが、その減衰効果もSGカバーガス部の減衰効果には及ばないと言える。

IRF5とIRF0との比較は既に4.3.1で論じたが、圧力開放板の上流配管の短縮は確かに圧力の減殺に効果がある。特にIHX内でのピーク圧はTable 4.7にも示すように、約30%低下している。有液面型のICG3に比べればまだ圧力は高いが、圧力開放板を圧力波通過点にできるだけ近づけることが、初期スパイク圧低減上、有効であることが判る。

IRF6BとICG3を比較するとミドルレグ側で有液面の方が高いが、それ以外では無液面の方が高い圧力となっている。IHX部での170msec以降からIRF6Bの方が低い圧力になっているのは、ミドルレグ側の配管短縮によって、膨張タンクがより反応点に近くなったこと、SG本体に圧力開放板を設置したことによる効果といえる。

Table 4.6 圧力開放板作動時刻（無液面型と有液面型SGとの比較）

ケース名 開放系位置	IRF0	ICG3	IRF5	IRF6B
ホットレグ側	13.6 msec	不使用	13.3 msec	上部 プレナム 9.7 msec
ミドルレグ側	19.7 msec	不使用	19.2 msec	
カバーガス部		200 msec まで不破裂		

Table 4.7 通常運転時の主な場所での発生最高圧力
（無液面型と有液面型SGとの比較） 単位：kg/cm²a

場 所	No	IRF0	ICG3	IRF5	IRF6B
ヘリカル中部	9	33.8(35.8)	32.9(35.9)	33.3(35.9)	33.8(35.5)
SG下部プレナム	19	<u>22.8</u> (25.7)	19.0(22.3)	22.5(25.2)	21.1(23.2)
センタパイプ	22	18.4(21.0)	18.1(20.8)	18.4(21.0)	<u>19.9</u> (21.6)
ポンプ入口	31	1.8(3.4)	<u>14.1</u> (15.5)	1.2(2.8)	1.6(2.4)
コールドレグ	35	14.3(14.1)	<u>16.5</u> (15.8)	9.5(9.3)	10.8(9.8)
IHX入口	36	<u>15.0</u> (15.1)	8.0(7.8)	12.0(12.1)	12.1(11.3)
IHX下部	38	<u>14.3</u> (16.0)	8.1(9.8)	11.6(13.3)	13.6(14.5)
IHX出口	40	<u>13.6</u> (14.8)	7.8(9.0)	9.9(11.1)	13.1(13.5)
ホットレグ配管	42	<u>25.1</u> (26.5)	8.9(10.1)	19.6(21.0)	20.6(21.2)
SG入口	2	<u>27.0</u> (29.0)	5.4(7.2)	25.0(27.0)	20.3(21.6)
SG上部プレナム	4	<u>28.6</u> (30.8)	6.1(8.7)	28.4(30.6)	20.7(21.8)

()内は、主な場所での計算結果最高圧力。

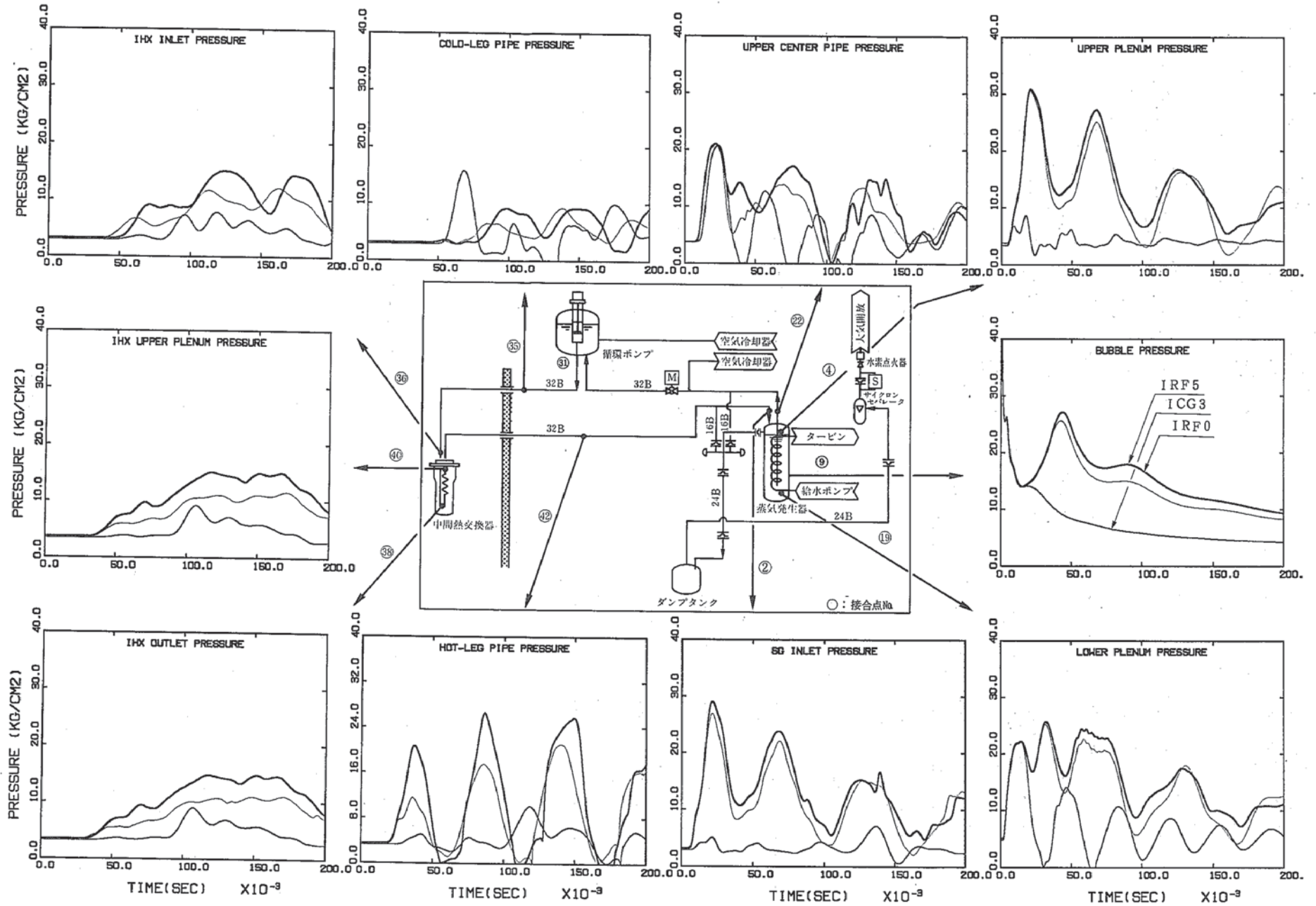


Fig.4.5(a) 初期スパイク圧挙動 (無液面型SGおよび有液面型SG)

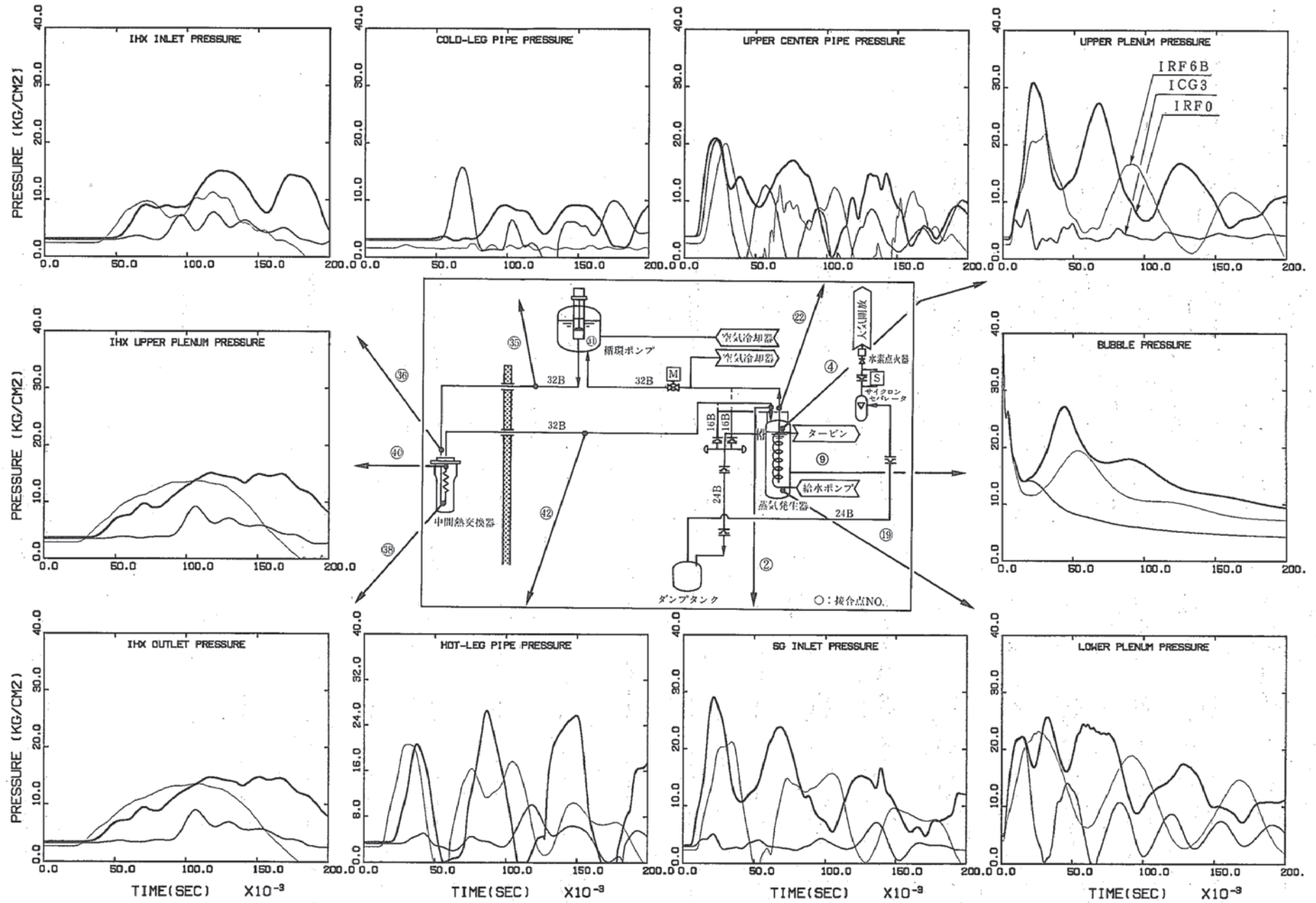


Fig.4.5(b) 初期スパイク圧挙動(無液面型SGおよび有液面型SG)

5. 準定常圧力評価

5.1 解析条件

(1) 水リーク率

準定常圧力評価用の水リーク率として、「もんじゅ」では初期事象としての1 DEGのほかにもその後の破損伝播による3 DEGを加えて、合計4 DEGとした。現在、大型炉のプラント設備軽減の観点から、SGのDBLについても見直しが行われている。具体的には、プラント設計の面からはオリフィスや大口径水系ブロー弁の採用であり、R&Dの側からは伝熱管内部の蒸気による冷却効果を考慮するなど実機条件を厳密に模擬することにより、従来の過度の保守性を改めようとするなどである。

要素技術設計研究(Ⅱ)では、プラント設計面での成果を活かして、準定常圧力評価用DBLとして1+2 DEGを選んだ。これに対しR&D面での前進は、上記R&Dが現在スタート段階であるため未だ得られていないが、DBL低減に及ぼすポテンシャルは高いと推測される。従って、本報告書ではR&Dの進展を前提に準定常圧力評価用DBLとして1 DEGを用いた。伝熱管破断位置は、初期スパイク圧力計算と同様、有効伝熱管部下端より1/6の高さの点とした。Fig.5.1に準定常圧力評価で使用した水リーク率計算値を示す。

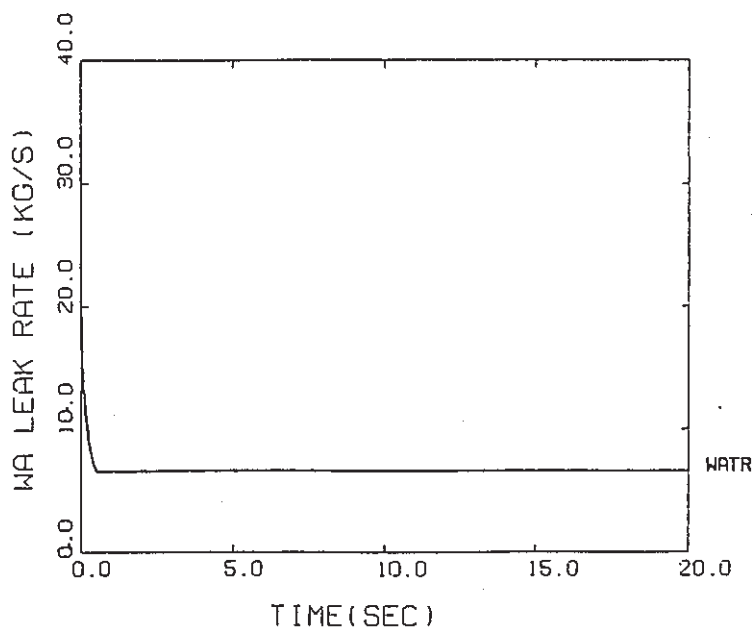


Fig 5.1 水リーク率入力値 (準定常圧時間領域)

(2) 圧力開放系設置場所

準定常圧評価でも液面の有無以外のパラメータは、圧力開放系配管の設置場所である。Table 5.1 に各ケースの圧力開放系設置場所とその設定圧力を示す。

同表に示すように、ほとんど初期スパイク圧計算で設定したものと同一ケースを選んだ。即ち、無液面型では、圧力開放系をホットレグおよびミドルレグ配管に設置するケース QRF 0、ミドルレグ側のみ設置したケース QRF 2、SGの上下プレナムに設置したケース QRF 4 とし、さらに上部プレナムに 24B 1 本設置したケース QRF 6 A、16B 2 本設置したケース QRF 6 B とした。

また有液面型では、接液型のもの、カバーガス中のみのも、カバーガス部と下部プレナム部とに併設のものを、それぞれ、QCG 0、QCG 3、及び QCG 4 とした。但し、無液面型で圧力開放板までの距離を短縮したケースは QRF 0 と大差ないことが予想されるため、特に計算は行わなかった。

(3) ホットレグおよびミドルレグ・配管短縮

初期スパイク圧計算同様、QRF 6 A、QRF 6 B のケースのみホットレグ、ミドルレグの配管短縮を行った。

Table 5.1 準定常圧計算ケースの内容

ケース名	液面	圧力開放板破裂設定圧力(kg/cm ² a)		
		ホットレグ	ミドルレグ	カバーガス部
QRF0	無	8.5	8.5	X
QRF1	無	8.5	—	
QRF2	無	—	8.5	
QRF4	無	SG上部 8.5	SG下部 8.5	
QRF6A	無	SG上部 (24B1本) 8.5	—	
QRF6B	無	SG上部 (16B2本) 8.5	—	
QCG0	有	8.5	8.5	
QCG3	有	—	—	7.4
QCG4	有	—	SG下部 8.5	7.4

5.2 計算モデル

(1) 無液面型SG

無液面型の代表ケースであるQRFOで使用したネットワーク・モデルをFig 5.2(a)に示す。ノード1～11がSG内部に相当し、リーク点はノード2内にある。

QRF1及びQRF2については、圧力開放系をそれぞれホットレグまたは、ミドルレグの一方のみに設置するため、Fig 5.2(b)及び(c)に示すように設置しない圧力開放系配管については取り除いた。また、QRF4についてはFig.5.2(d)に示すように、圧力開放系をSGの上部及び下部プレナムに16Bの配管を結合させて24Bの配管と結合させた。

さらに、Fig 5.2(e)に示すように、SG上部プレナムに24Bの圧力開放系配管を設置したケースをQRF6A、SG上部プレナムに16Bの圧力開放系配管を設置して、すぐさま24Bの配管と結合するケースをQRF6Bとした。QRF6AとQRF6Bの配管短縮については、IRFOと比較すると、ホットレグ配管を約15m短縮して、ミドルレグ配管は、約19m短縮したケースである。

ここで注意しなければならないのは、圧力開放系のモデル化である。現設計では、ホットレグ及びミドルレグ配管から分岐した圧力開放系配管のそれぞれに、まず1段目のラプチャ板があり、両方の配管が合流したのち2段目のラプチャ板がある。しかしながら、現在のSWACSの準定常圧モジュールでは2段ラプチャ板の構造は取り扱う事ができない。

従って、次のようにモデル化を行った。初期スパイク圧評価では、圧力波は液中を伝播し気中では消滅すると考えて良いので、1段目のラプチャ板までモデル化して2段目は考慮しなかった。準定常圧評価ではこれと逆に、1段目を無視して2段目をモデルに組み込んだ。これは、大リーク時は1段目は圧力波で瞬時に破れてしまうが、この時刻は準定常圧領域ではほとんど時刻ゼロと考えても差し支えない。むしろ2段目の破裂時刻の方が準定常圧挙動に影響を及ぼすと考えられるためである。圧力開放系をホットレグ、ミドルレグのいずれか一方にしたケースについても、同様に2段目のみを考慮した。

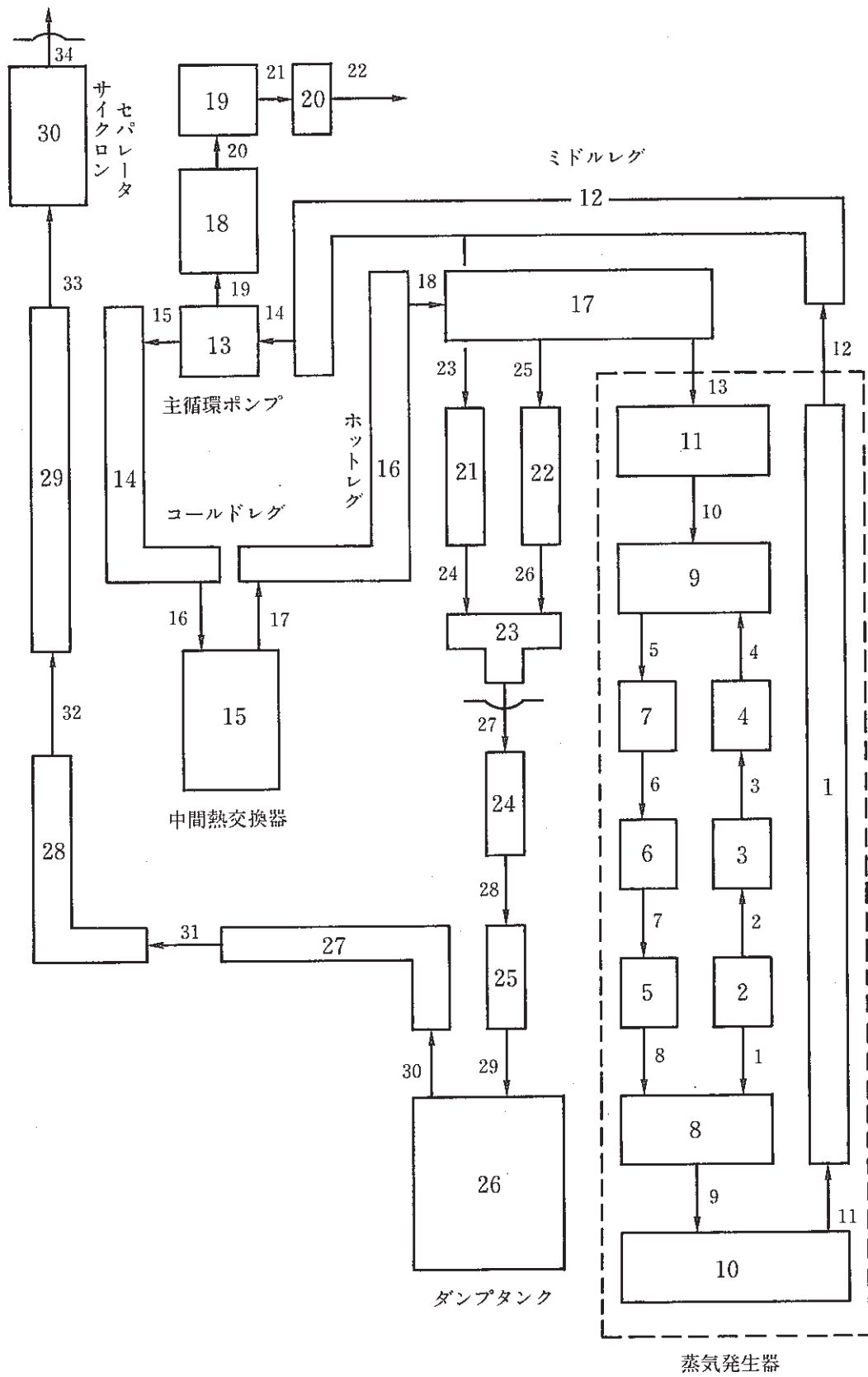


Fig 5.2(a) 準定常圧計算・ネットワークモデル (無液面・QRFO)

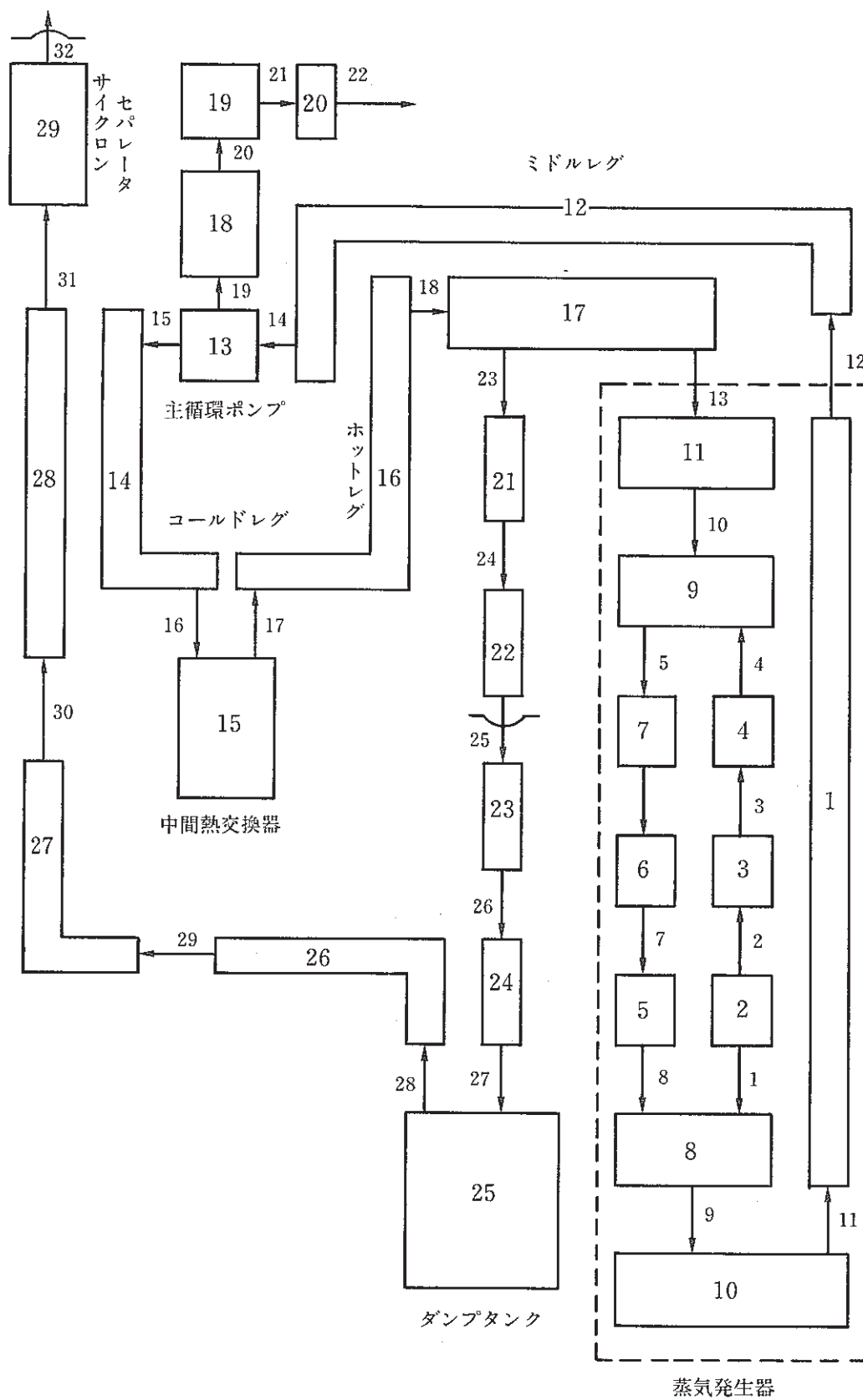


Fig 5.2(b) 準定常圧計算・ネットワークモデル (無液面・QRF1)

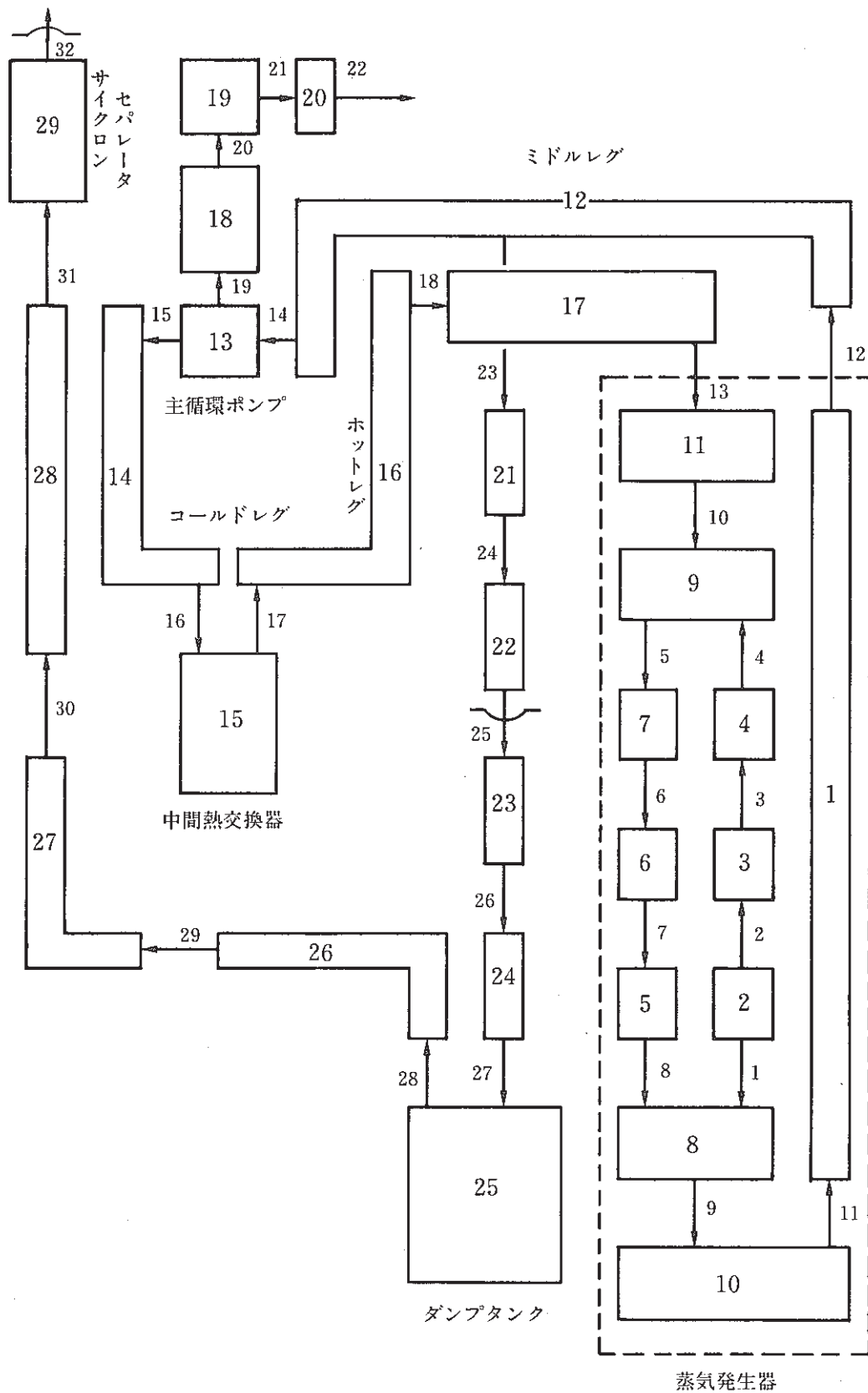


Fig 5.2(c) 準定常圧計算・ネットワークモデル (無液面・QRF2)

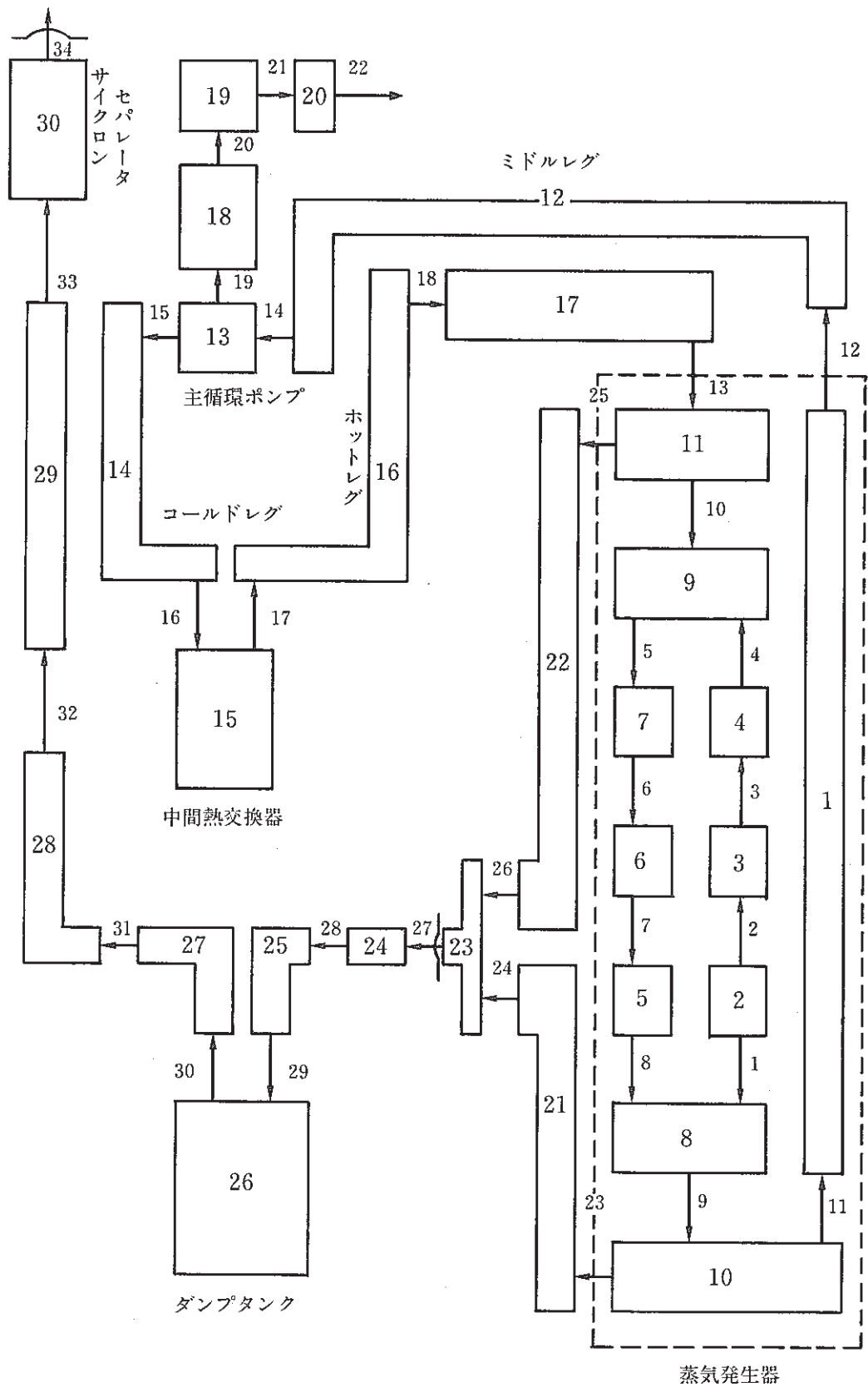


Fig 5.2(d) 準定常圧計算・ネットワークモデル (無液面・QRF4)

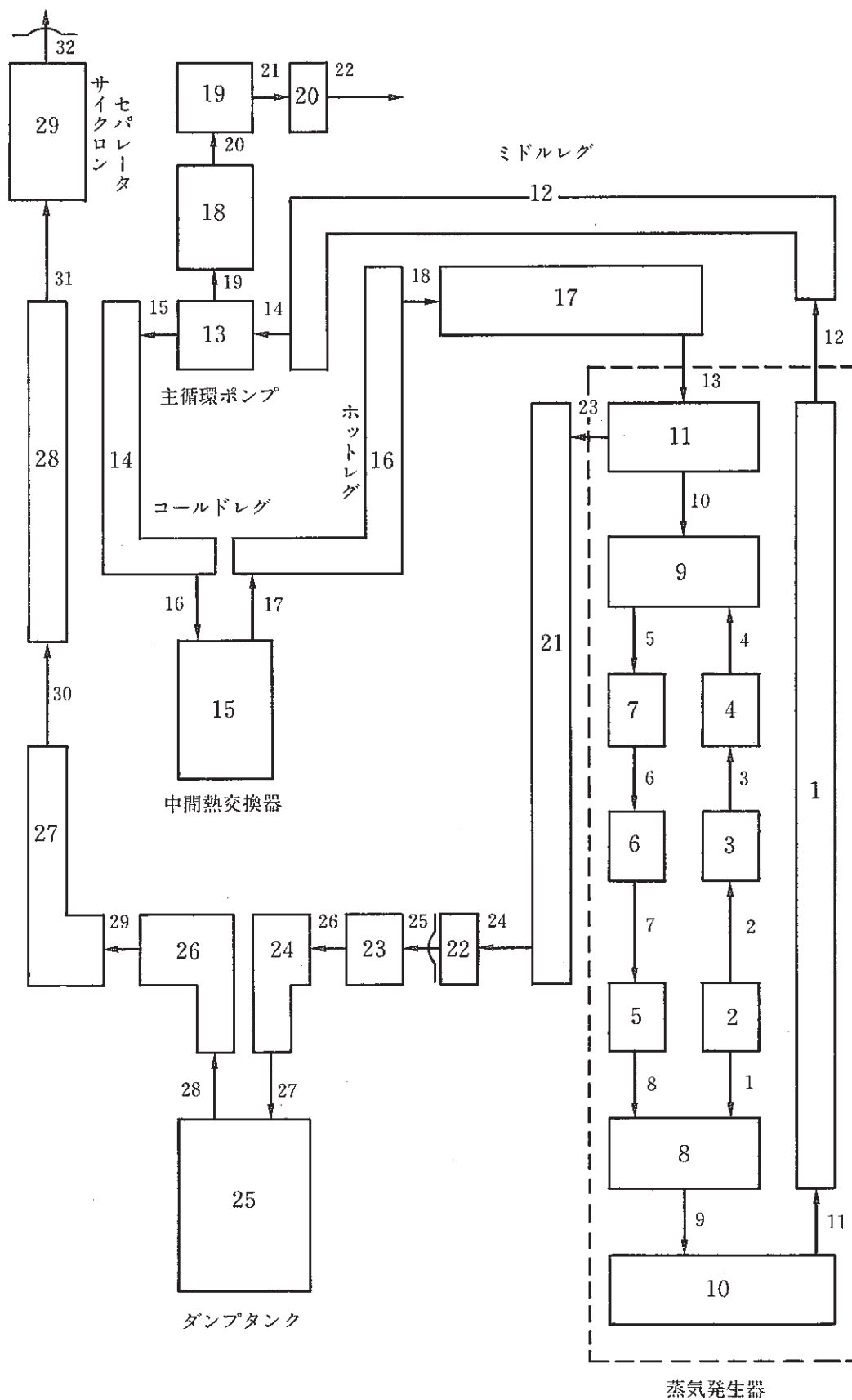


Fig 5.2(e) 準定常圧計算・ネットワークモデル (無液面・QRF6A及びQRF6B)

(2) 有液面型 S G

有液面型 S G の場合の基本的変更点は、3.2 で説明したように①カバーガス部の設置、②圧力開放系の設置場所、③ポンプ・カバーガス液面の取扱である。従って、それに応じてネットワーク・モデルも以下に示すように組み換えを行った。

Fig 5.2(f) に示した Q C G 0 は、圧力開放系レイアウトはそのまま S G にカバーガス部に相当するノード 12 を設け、ポンプ・カバーガスへの流路に当たるリンク 20 及び 21 を狭めた。

Q C G 3 は有液面型の代表的なケースと考えて良いが、Fig 5.2(g) に示すように、圧力開放系配管をカバーガス部のみに設置した。これに伴い主循環系からの開放系配管を取り除くとともに、評価上実質的に意味の無いポンプの上半部も除くなど、ネットワーク・モデルを大きく組み換えた。

Q C G 4 は、Q C G 3 に下部プレナムからの圧力開放系ラインを組み込んだものであるが、Fig 5.2(h) に示すように両方からのラインをノード 21 で合流させている。圧力開放板のモデル化については、ガス中型はもともと 1 枚構造であるためそのままモデル化し、接液型は前述したように 2 段目のラプチャ板を模擬しているが、Q C G 4 ではガス中型と接液型とが併設されているので、リンク 22 にガス中型を置き、リンク 21 に接液型の 2 段目を置くようモデル化した。

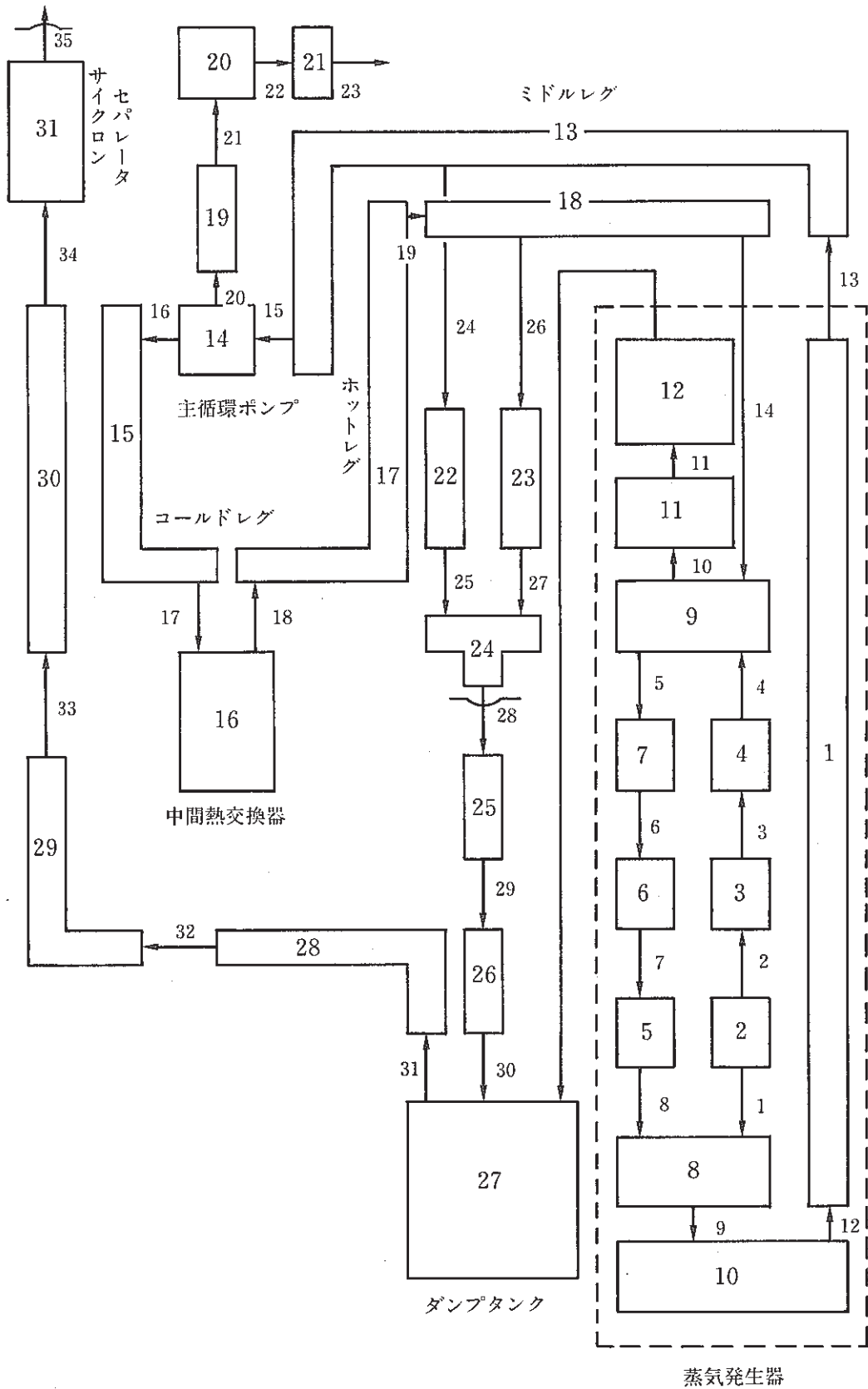


Fig 5.2(f) 準定常圧計算・ネットワークモデル (有液面・QCGO)

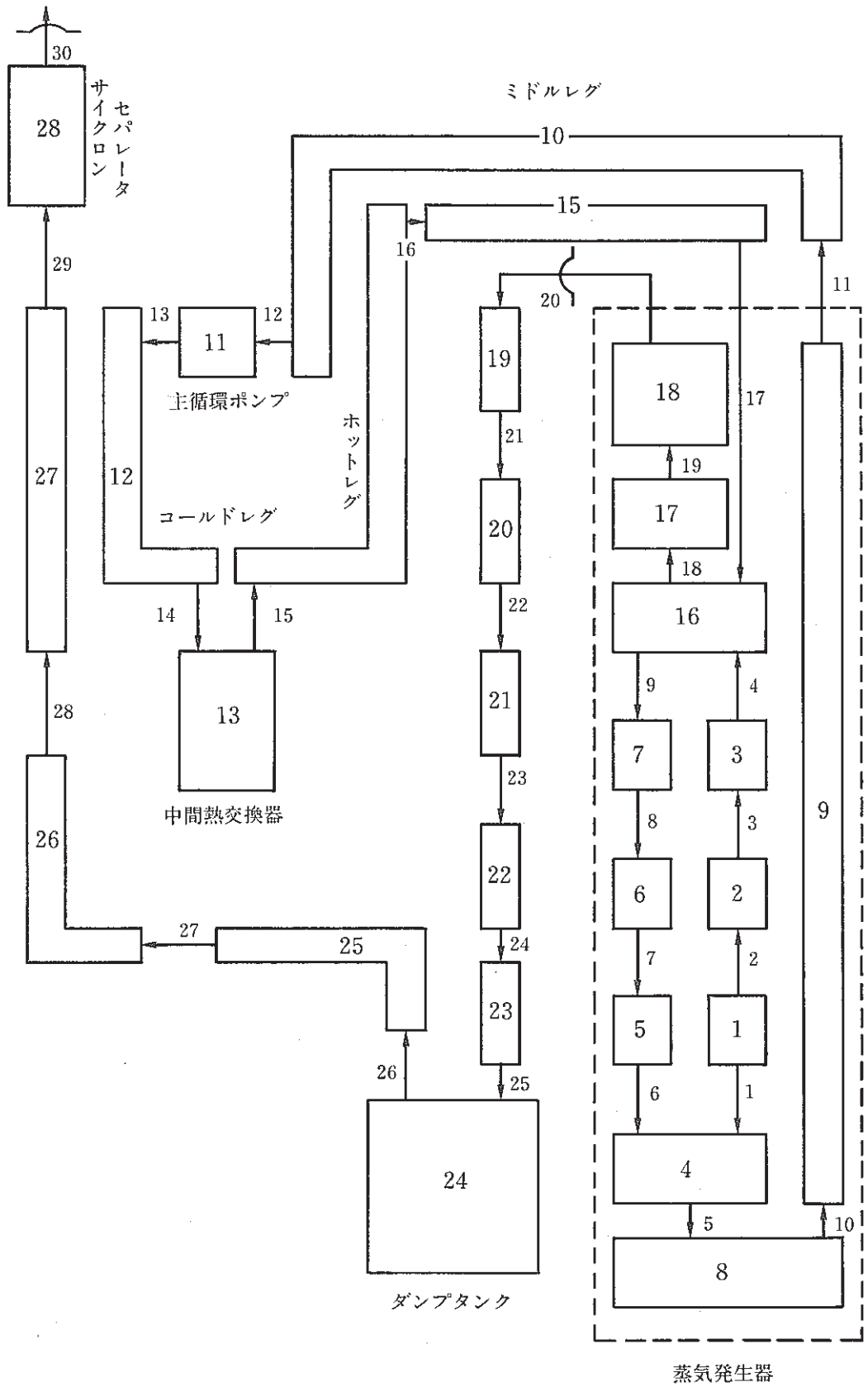


Fig 5.2(g) 準定常圧計算・ネットワークモデル (有液面・QCG3)

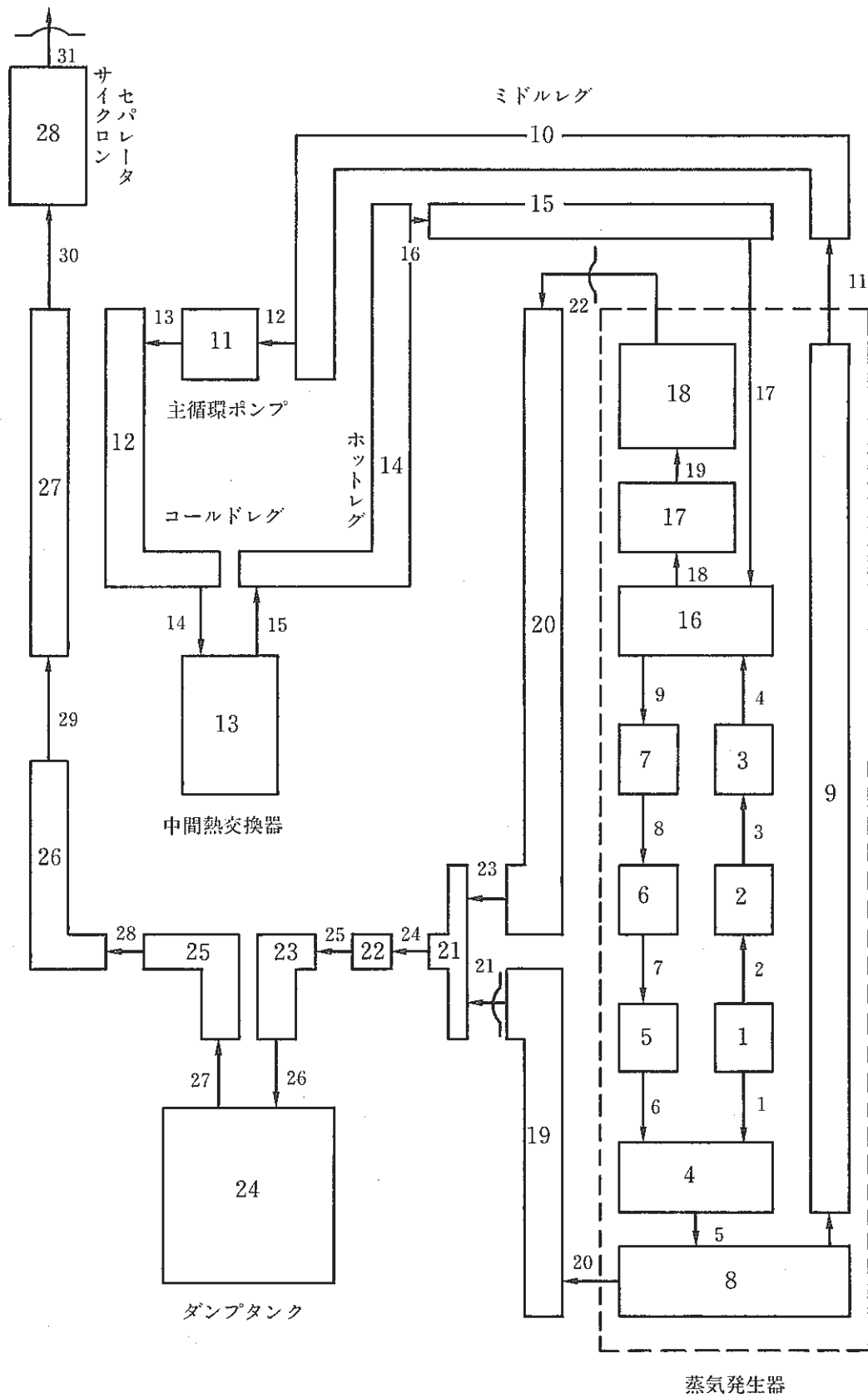


Fig 5.2(h) 準定常圧計算・ネットワークモデル (有液面・QCG4)

5.3 計算結果

5.3.1 無液面型SG

ここでは、特にQRF0～2の比較を行い、QRF4の評価については5.3.3で述べる。2段目の圧力開放板の作動時刻をTable 5.2に示す。

(1) QRF0とQRF1及びQRF2の比較

1段目は時刻ゼロに作動したと仮定している。ホットレグ側のみ使用したQRF1の作動時刻が最も早く、ミドルレグ側のみを使用したQRF2がやや遅れているが、これは初期スパイク圧計算での第1段目のラプチャ板作動時刻(Table 4.2)の傾向とも良く一致している。

圧力挙動をFig 5.2に示す。線の太いものから順にQRF0、QRF1、QRF2である。三者とも良く似た挙動をしており、全体的特徴としては、まず、ポンプ・カバーガス部で緩やかなピストンの振動が見られる。これは水素気泡部とポンプ・カバーガス部とが交互に圧縮/膨張を繰り返すためである。このほか、初期7秒頃までに圧力開放系配管では鋭い圧力振動が発生しているのが見られる。これは、高速の気液2相流中で、水素ガスがナトリウムに圧縮されるため発生しているものと考えられる。

三者のなかでは、QRF1の圧力降下が最もスムーズである。これについては、次のように説明できる。すなわち、リーク点で発生した水素気泡は管束部を上昇するため、センタパイプ→ミドルレグのパスよりも上部プレナム→ホットレグのパスが水素排出路として有効に機能し、従ってホットレグに24Bの開放系配管を用いたQRF1が他のケースより良い開放特性を示したものである。本解析ではリーク点をヘリカルコイル部下部としたが、リーク点が同上部もしくは中部の場合にはこの傾向は一層強まるものと言える。しかし厳密には、初期条件としての定常流動を考慮する必要がある。

各リンクでの質量流量をFig 5.3に示す。QRF1は、ヘリカルコイル部の流量は他に比べ最も小さく、コールドレグ流量は逆に最も大きいことから、上述したように、QRF1は管束部でのボイド率の高い流れであったことが判る。

(2) QRF0とQRF6A及びQRF6Bの比較

圧力挙動をFig 5.4に示し、線の細いものから順にQRF0、QRF6A、QRF6Bである。まず、QRF6AとQRF6Bを比較すると、QRF6Bの方が、わずかに低いピーク圧となっているが、それほど大きな圧力差はなく圧力挙動は、全体としてよく一致している。

QRF0とQRF6A及びQRF6Bを比較すると、QRF6A、QRF6B

の方が低い結果となっている。それは、放出系配管の設置場所をSG本体上部プレナムに設置したケースQRF6A、QRF6Bの方が、より反応点に近いためであり、ラブチャ板作動時刻 (Table 5.2) もQRF6A/Bの方がQRF0より早く作動している。

また、膨張タンクの設置場所がQRF0よりQRF6A、QRF6Bの方がSG本体に近い (ミドルレグ配管短縮) ので、膨張タンクへの圧力の逃げが大きいこともひとつの原因と考えられる。

Table 5.3 に各部での通常運転時の発生最高圧力を示す。放出系の鋭い振動を除いて、全般にQRF6A、QRF6Bの圧力が低いことが判る。

Table 5.2 圧力開放板作動時刻 (無液面型SG)
(但し、全て2段目のラブチャ板)

ケース名 放系位置	QRF0	QRF1	QRF2	QRF4	QRF6A	QRF6B
ホットレグ側 (但し QRF4, QRF6A, QRF6B は、上部プレナム)	0.95 (sec)	0.89 (sec)	不使用	0.35 (sec)	0.05 (sec)	0.05 (sec)
ミドルレグ側 (但し、QRF4は、 下部プレナム)		不使用	1.28 (sec)		不使用	不使用

Table 5.3 通常運転時の主な場所での発生最高圧力（無液面型SG）
単位：kg/cm²a

場 所	Node No.	QRF0	QRF1	QRF2	QRF4	QRF6A	QRF6B
リーク点	2	<u>2.9</u> (5.3)	2.7 (5.1)	2.6 (5.0)	1.8 (4.2)	2.1 (4.5)	1.9 (4.3)
上部プレナム	11	3.2 (4.6)	2.9 (4.3)	<u>3.4</u> (4.8)	2.2 (3.6)	2.2 (3.6)	2.0 (3.4)
下部プレナム	10	3.5 (5.7)	3.3 (5.5)	<u>7.6</u> (3.5)	2.3 (4.5)	2.7 (4.9)	2.5 (4.7)
センタパイプ	1	<u>3.5</u> (5.6)	2.8 (4.9)	2.9 (5.0)	2.2 (4.3)	1.3 (3.4)	1.3 (3.4)
ミドルレグ	12	<u>6.3</u> (5.1)	4.9 (3.7)	5.6 (4.4)	4.0 (2.8)	4.1 (3.0)	4.0 (2.9)
ポンプ下部	13	<u>3.0</u> (4.0)	2.4 (3.4)	2.4 (3.4)	1.7 (2.7)	1.7 (2.7)	1.7 (2.7)
コールドレグ	14	5.3 (4.2)	5.5 (4.4)	<u>6.0</u> (4.9)	4.4 (3.3)	4.0 (3.3)	3.9 (3.2)
IHX	15	5.0 (5.1)	6.1 (6.2)	6.1 (6.2)	3.9 (4.0)	3.8 (3.9)	3.6 (3.7)
ホットレグ配管	17	4.1 (4.4)	5.9 (6.2)	<u>6.5</u> (6.8)	3.2 (3.5)	3.0 (3.7)	2.8 (3.5)
圧力開放板上流	23/22	(4.6)	(<u>29.9</u>)	(13.9)	(3.2)	(3.2)	(1.9)
圧力開放板下流	24/23	(3.7)	(6.4)	(<u>17.9</u>)	(1.6)	(4.5)	(1.5)
圧力開放板下流	25/24	(1.0)	(3.8)	(<u>10.4</u>)	(0.4)	(2.2)	(2.2)
ダンプタンク	26/25	(2.0)	(2.2)	(1.5)	(0.4)	(2.4)	(<u>2.5</u>)

() 内は、主な場所での計算結果最高圧力

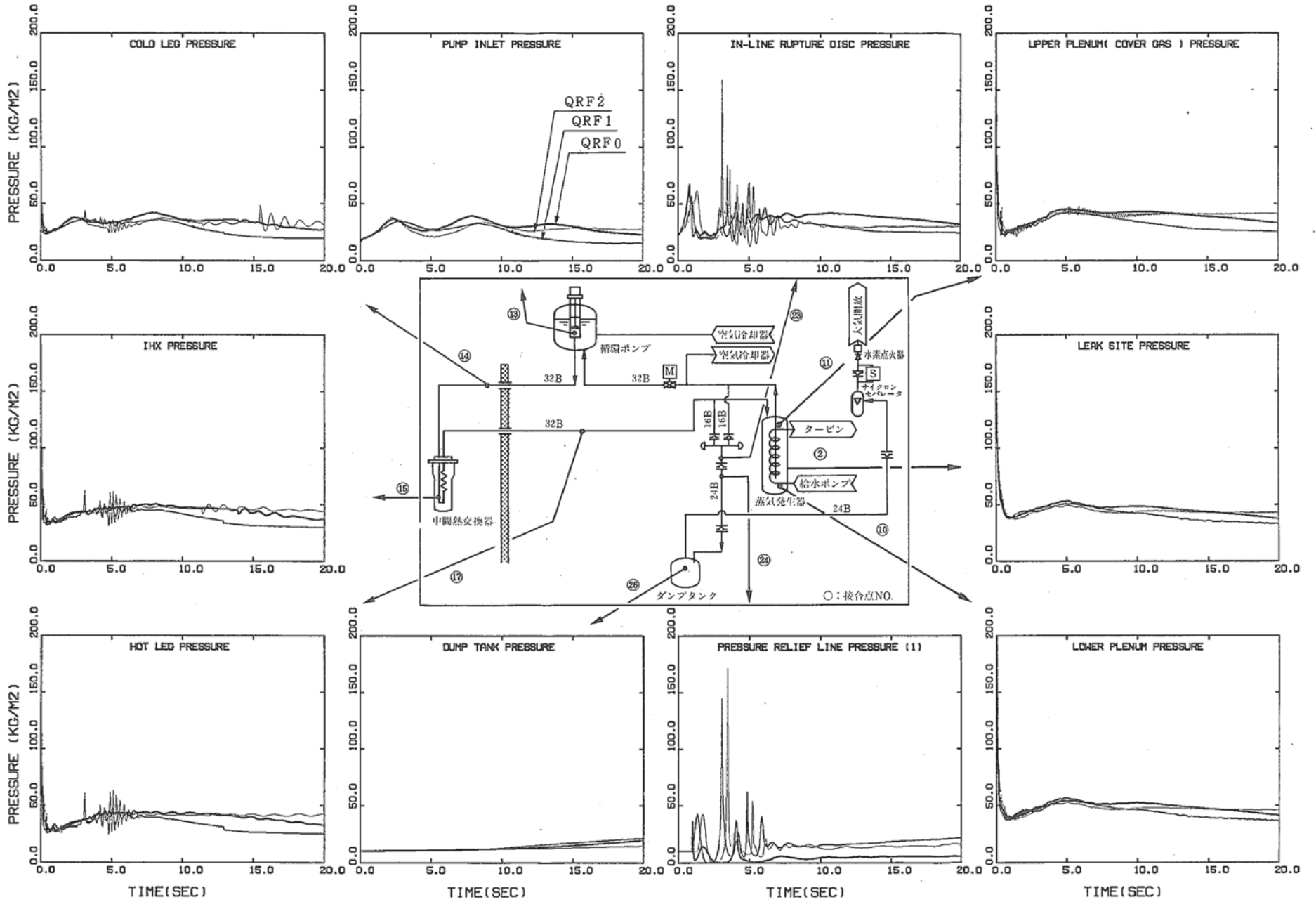


Fig. 5.3(a) 準定常圧挙動 (無液面型 SG)

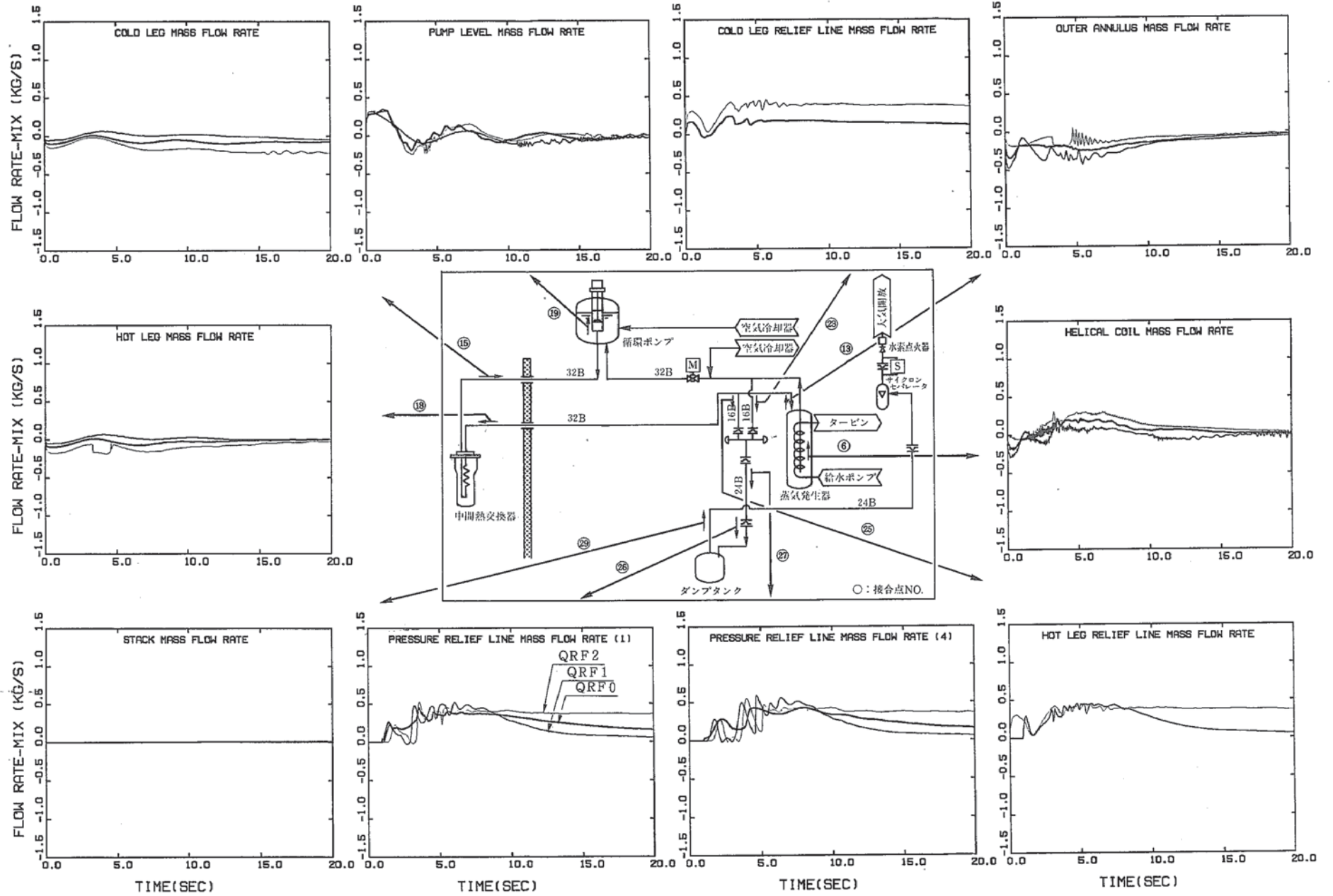


Fig.5.3(b) 2次系内流動状況 (無液面型SG)

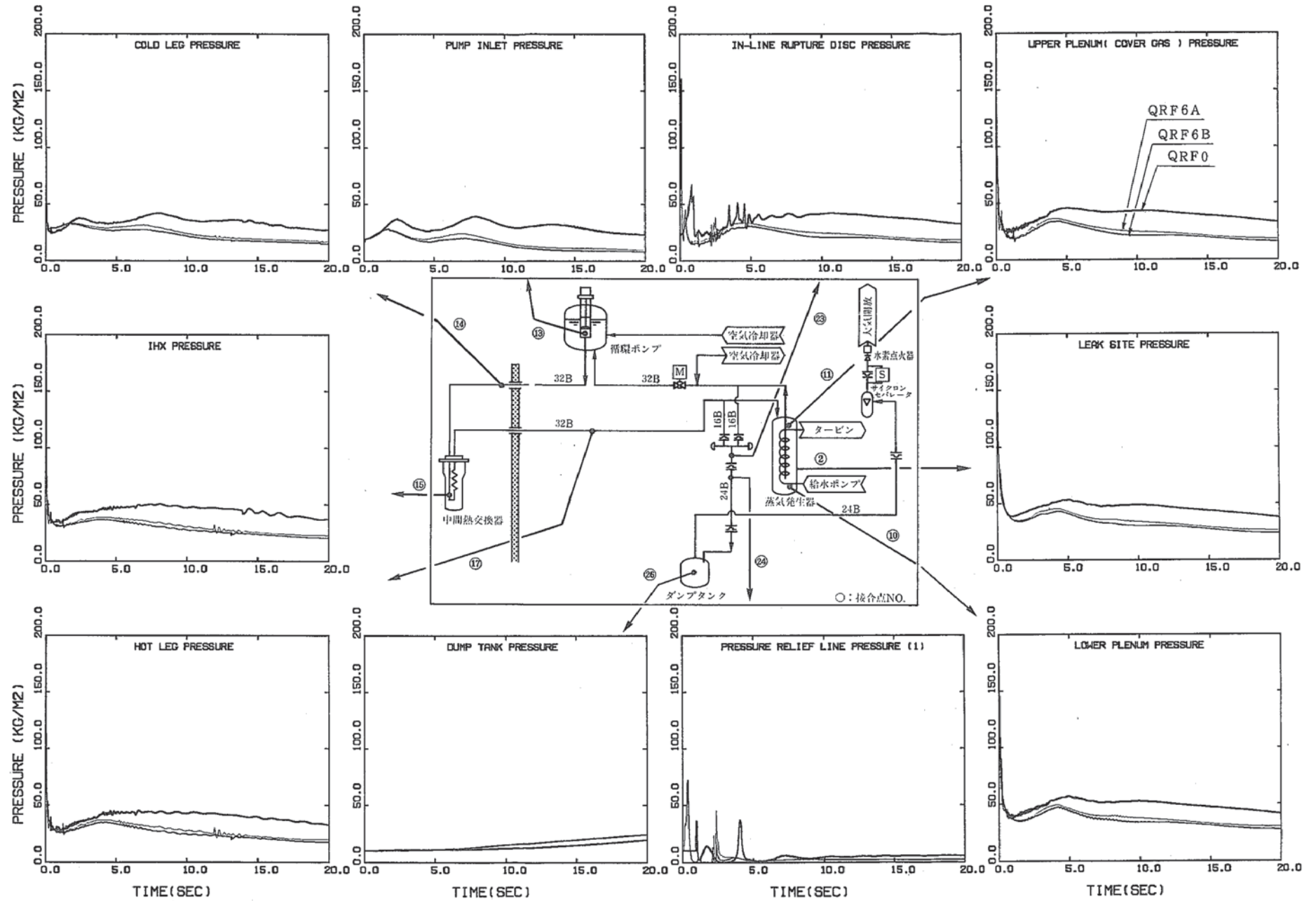


Fig.5.4(a) 準定常圧挙動(無液面型SG)

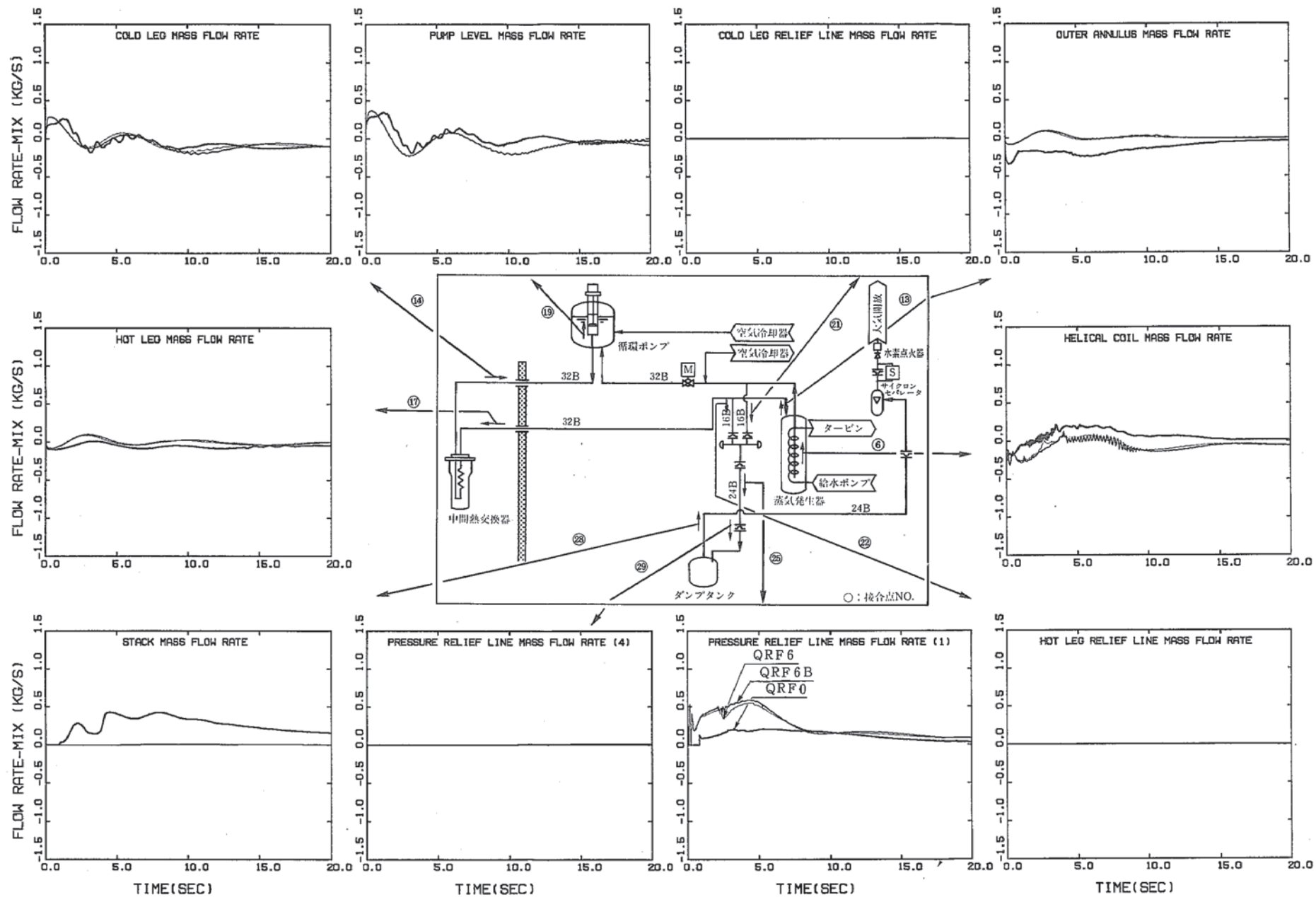


Fig.5.4(b) 2次系内流動状況 (無液面型SG)

5.3.2 有液面型SG

圧力開放系作動時刻（但し、接液型は2段目）をTable 5.4 に示す。接液型の作動時刻は、1sec前後とQCG3の約11secと比べて相当早い。

これは、ガス空間容積の違いに基づくものである。また、QCG4では下部プレナムの接液型が初期に破裂したため、上部のカバーガス部ラプチャ板は遂に作動しなかった。

Fig 5.5 に圧力挙動を示す。線の太いものからQCG3、QCG4、QCG0である。ケース間での違いは大きいですが、ケース毎に見ると小さな振動を除けば圧力波形は各ノード間でよく似ており、空間分布がほとんどないことが判る。これは無液面型と異なり、水素気泡部以外にガス空間がないため圧力差を生み出す流れの振動が発生しないからである。

カバーガス部のみに開放系を設置したQCG3の波形にはその特徴がよく現れている。すなわち、カバーガス部圧力が破裂設定圧に達する11secまでは単調増加し、開放板作動後は単調に減少するという傾向が見られる。そのため、発生最高圧は圧力開放板破裂設定圧で規定されることになる。IHXや配管部には脈動が見られるが、これは開放板破裂後の開放系での圧力振動の影響によるものである。

QCG4では、下部プレナム側の圧力開放板が初期に作動したものの、このため却って発生水素がカバーガス部にこもる形となって単調な圧力増加という現象が見られる。

Fig 5.6 に各リンクでの質量流量を示す。

Table 5.5 に通常運転時の発生ピーク圧をまとめて示す。但し、これらのピーク圧は1sec以後に現れたものに限定し、初期スパイク圧領域の高い圧力は除いている。

Table 5.4 圧力開放板作動時刻（有液面型SG）
（但し、接液型は2段目のラプチャ板）

ケース名 開放系位置	QCG0	QCG3	QCG4
ホットレグ側 （但し、ICG4 は上部プレナム）	1.40 sec	不使用	0.35 sec
ミドルレグ側 （但し、ICG4 は下部プレナム）		不使用	
カバーガス部	不使用	10.97 sec	不使用

Table 5.5 通常運転時の主な場所での発生最高圧力（有液面型SG）
下段は、主な場所での計算結果最高圧力。 単位：kg/cm²a

場 所	Node No.	QCG0	QCG3	QCG4
リーク点	2/1	2.7 (5.1)	<u>6.3</u> (8.3)	4.2 (6.2)
上部プレナム	12/18	2.9 (4.2)	<u>5.1</u> (7.4)	3.5 (5.8)
下部プレナム	10/8	3.2 (5.4)	<u>6.6</u> (8.8)	4.4 (6.6)
センタパイプ	1/9	2.8 (4.6)	<u>6.0</u> (7.8)	3.9 (5.7)
ミドルレグ	12/10	5.0 (3.3)	<u>8.2</u> (6.5)	6.5 (4.8)
ポンプ下部	13/11	3.0 (4.0)	<u>5.7</u> (6.7)	1.7 (2.7)
コールドレグ	15/12	5.0 (3.9)	<u>8.4</u> (7.3)	7.3 (6.2)
IHX	16/13	5.0 (5.1)	<u>8.5</u> (8.6)	3.9 (4.0)
ホットレグ配管	17/14	4.7 (4.4)	<u>7.6</u> (7.3)	3.8 (3.5)
圧力開放板上流	23/20	(2.2)	(<u>6.8</u>)	(1.1)
圧力開放板下流	24/21	(0.9)	(<u>6.2</u>)	(0.9)
圧力開放板下流	25/22	(0.1)	(<u>3.2</u>)	(0.9)
ダンプタンク	27/24	(1.7)	(<u>2.0</u>)	(1.2)

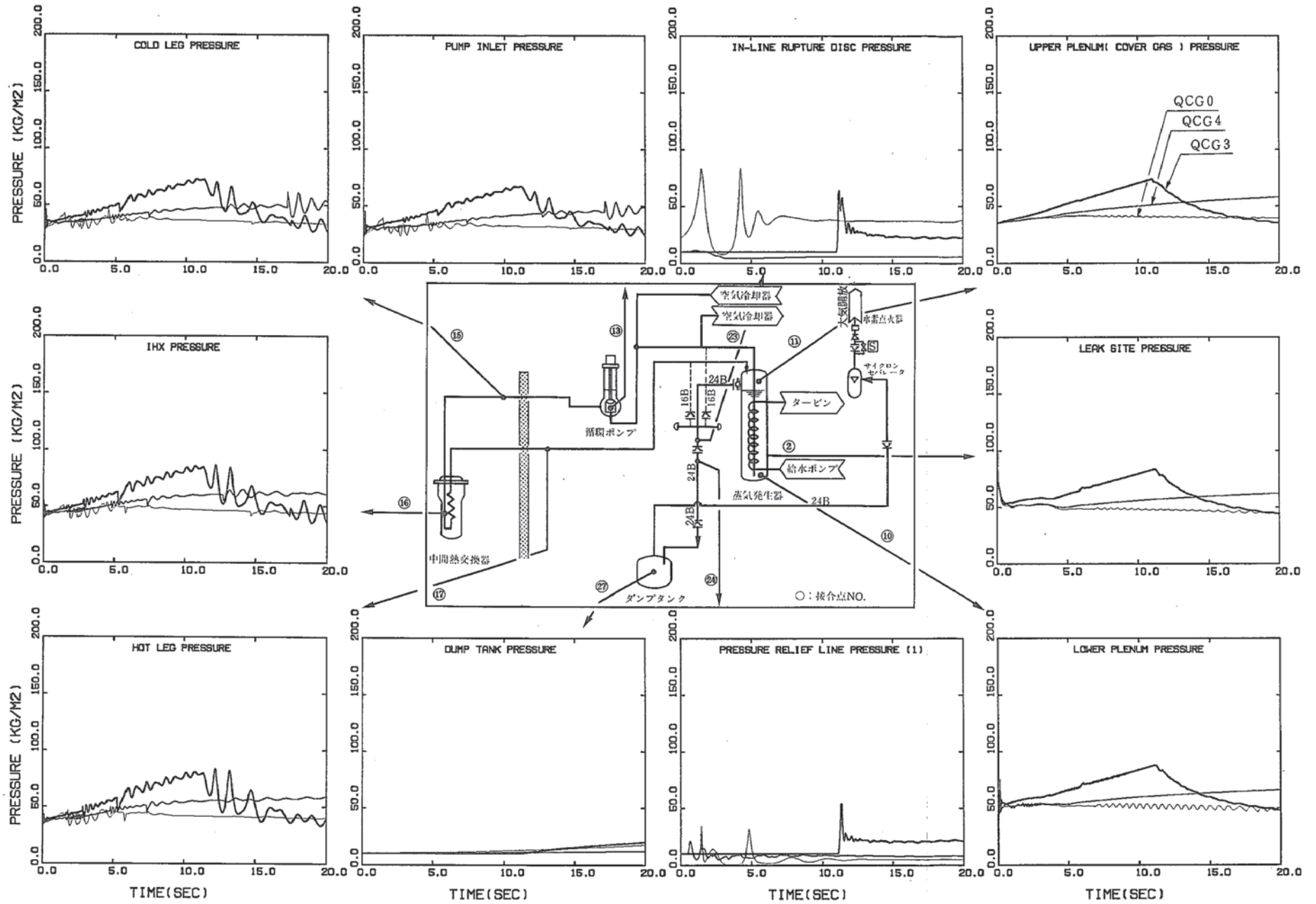


Fig.5.5(a) 準定常圧挙動 (有液面型SG)

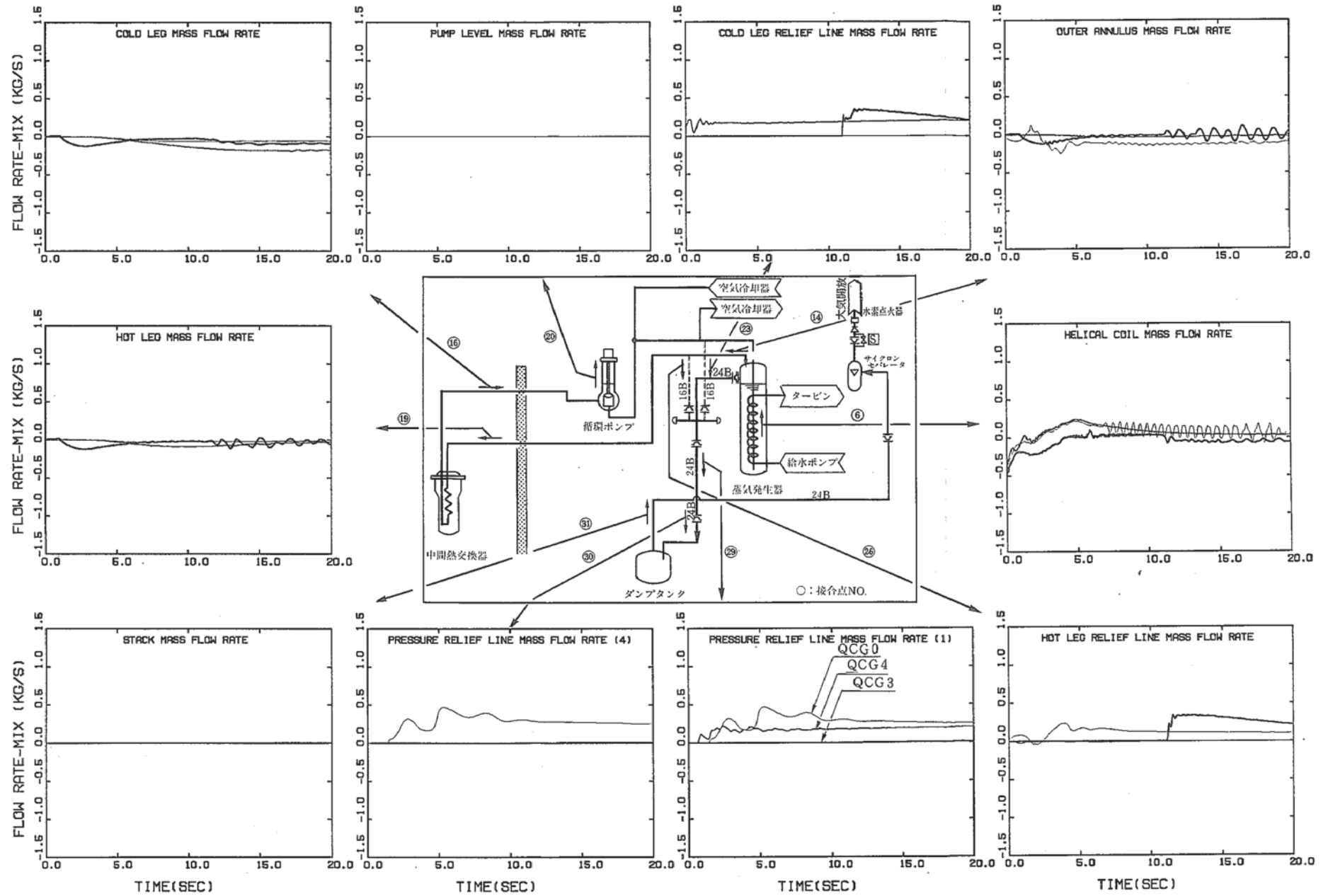


Fig.5.5(b) 2次系内流動状況 (有液面型SG)

5.3.3 無液面型と有液面型との比較

両者の代表ケースとして、それぞれQRF0とQCG3とを選び、また参考ケースとして無液面型で圧力開放系をSG本体に設置したQRF4を合わせて比較する。Fig 5.6(a)に圧力挙動を示す。線の太いものから順に、QRF0、QRF4、QCG3である。

同図からは、有液面型より無液面型の方が全般に圧力が低いことが判る。これは、両タイプのSGとも系内の圧力は圧力開放板の作動圧までは上がる訳であるが、接液型ラプチャ板を用いた無液面型では10m secオーダの初期スパイク圧で作動するため、準定常的な圧力のビルドアップは生じないのに対し、カバーガス部のみに開放系を設置したQCG3のような有液面型のケースでは、10secオーダの準定常圧で開放板が作動するためである。このため、準定常圧評価上は、有液面型の方が高めの結果となる。

QRF0とQRF4との比較では、圧力開放板近辺を除けばQRF4の方が一般に穏やかであると言える。これは、反応点から圧力開放系までの距離の短いQRF4の方が、効率良く水素ガスを排出できるということを示している。

次に、無液面型で圧力開放系をSG本体上部プレナム部に設置したQRF6Bを無液面型QRF4と有液面型QCG3とで比較する。Fig 5.7(a)に圧力挙動を示す。線の太いものから順に、QRF6B、QRF4、QCG3である。この図からも、有液面型より無液面型の方が低い圧力となっていることがわかる。

ここで、無液面型のQRF4とQRF6Bを比較すると、QRF6Bの方が、やや低い圧力となっていることから、SG下部プレナム部に圧力開放系を設置するよりも、SG上部プレナム部に設置して、ラプチャ板までの距離を短縮し、さらに、ミドルレグ配管を短縮した方が圧力減衰効果は大きいといえる。

Table 5.6 に2段目の圧力開放板の作動時刻を示し、Table 5.7 に各部での通常運転時の発生最高圧力を示す。

Table 5.6 圧力開放板作動時刻（無液面型と有液面型SGとの比較）

ケース名 開放系位置	QRF0	QCG3	QRF4	QRF6B
ホットレグ側 （但し、QRF4, QRF6B は、上部プレナム）	0.95 sec	不使用	0.35 sec	0.05 sec
ミドルレグ側 （但し、QRF4 は、下部プレナム）		不使用		不使用
カバーガス部	不使用	10.97 sec	不使用	不使用

Table 5.7 通常運転時の主な場所での発生最高圧力
（無液面型と有液面型SGとの比較） 単位：kg/cm²a

場 所	Node No.	QRF0	QCG3	QRF4	QRF6B
リーク点	1/2	2.9(5.3)	<u>6.3</u> (8.3)	1.8(4.2)	1.9 (4.3)
上部プレナム	18/11	3.2(4.6)	<u>5.1</u> (7.4)	2.2(3.6)	2.0 (3.4)
下部プレナム	8/10	3.5(5.7)	<u>6.6</u> (8.8)	2.3(4.5)	2.5 (4.7)
センタパイプ	9/1	3.5(5.6)	<u>6.0</u> (7.8)	2.2(4.3)	1.3 (3.4)
ミドルレグ	10/12	6.3(5.1)	<u>8.2</u> (6.5)	4.0(2.8)	4.0 (2.9)
ポンプ下部	11/13	3.0(4.0)	<u>5.7</u> (6.7)	1.7(2.7)	1.7 (2.7)
コールドレグ	12/14	5.3(4.2)	<u>8.4</u> (7.3)	4.4(3.3)	3.9 (3.2)
IHX	13/15	5.0(5.1)	<u>8.5</u> (8.6)	3.9(4.0)	3.6 (3.7)
ホットレグ配管	14/16	4.1(4.4)	<u>7.6</u> (7.3)	3.2(3.5)	2.8 (3.5)
圧力開放板上流	20/22	(4.6)	(<u>6.8</u>)	(3.2)	(1.9)
圧力開放板下流	22/24	(3.7)	(<u>6.2</u>)	(1.6)	(1.5)
圧力開放板下流	23/25	(1.0)	(<u>3.2</u>)	(0.4)	(2.2)
ダンプタンク	24/26	(2.0)	(2.0)	(0.4)	(<u>2.5</u>)

() 内は、主な場所での計算結果最高圧力

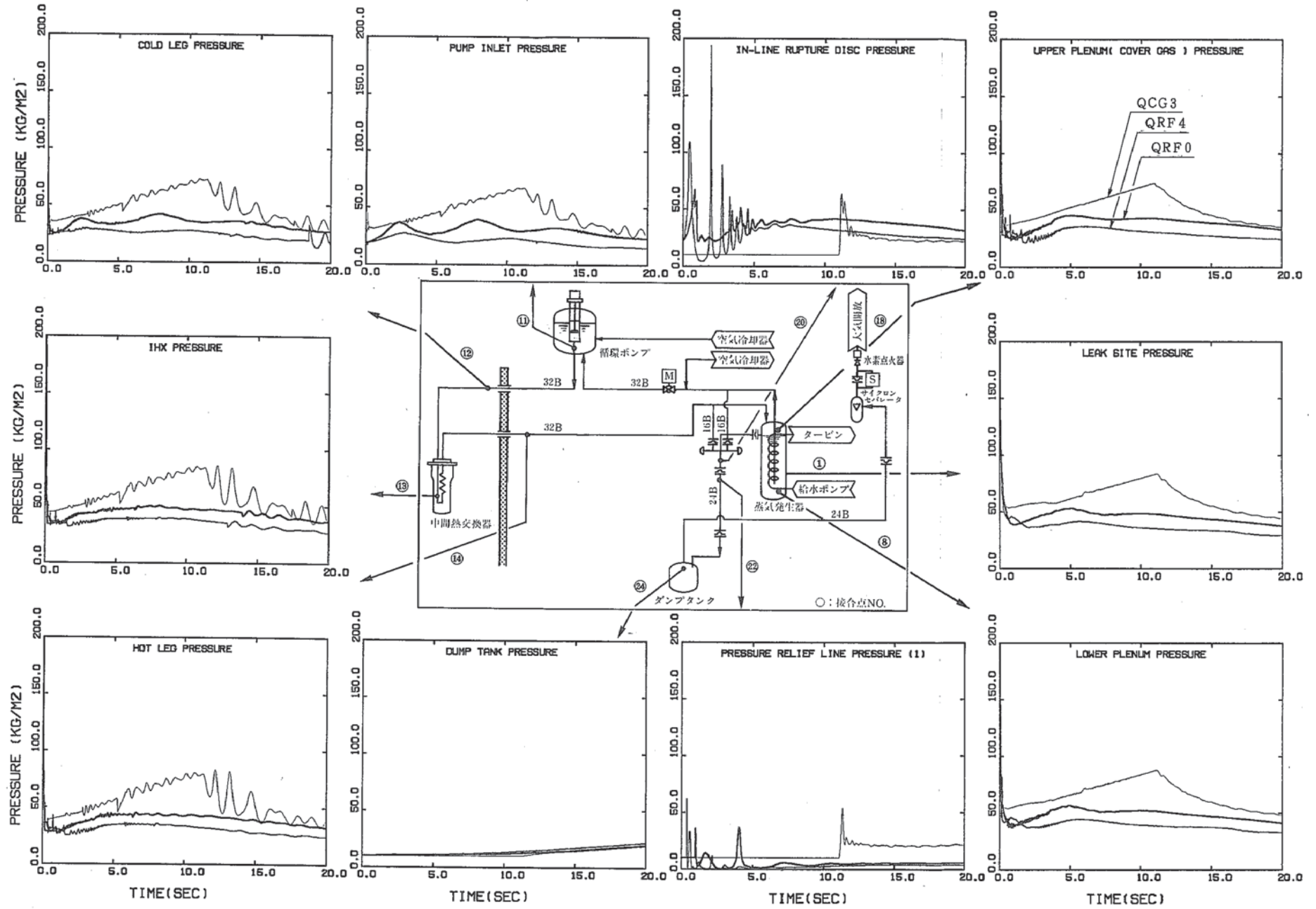


Fig.5.6(a) 準定常圧挙動 (無液面型および有液面型SG)

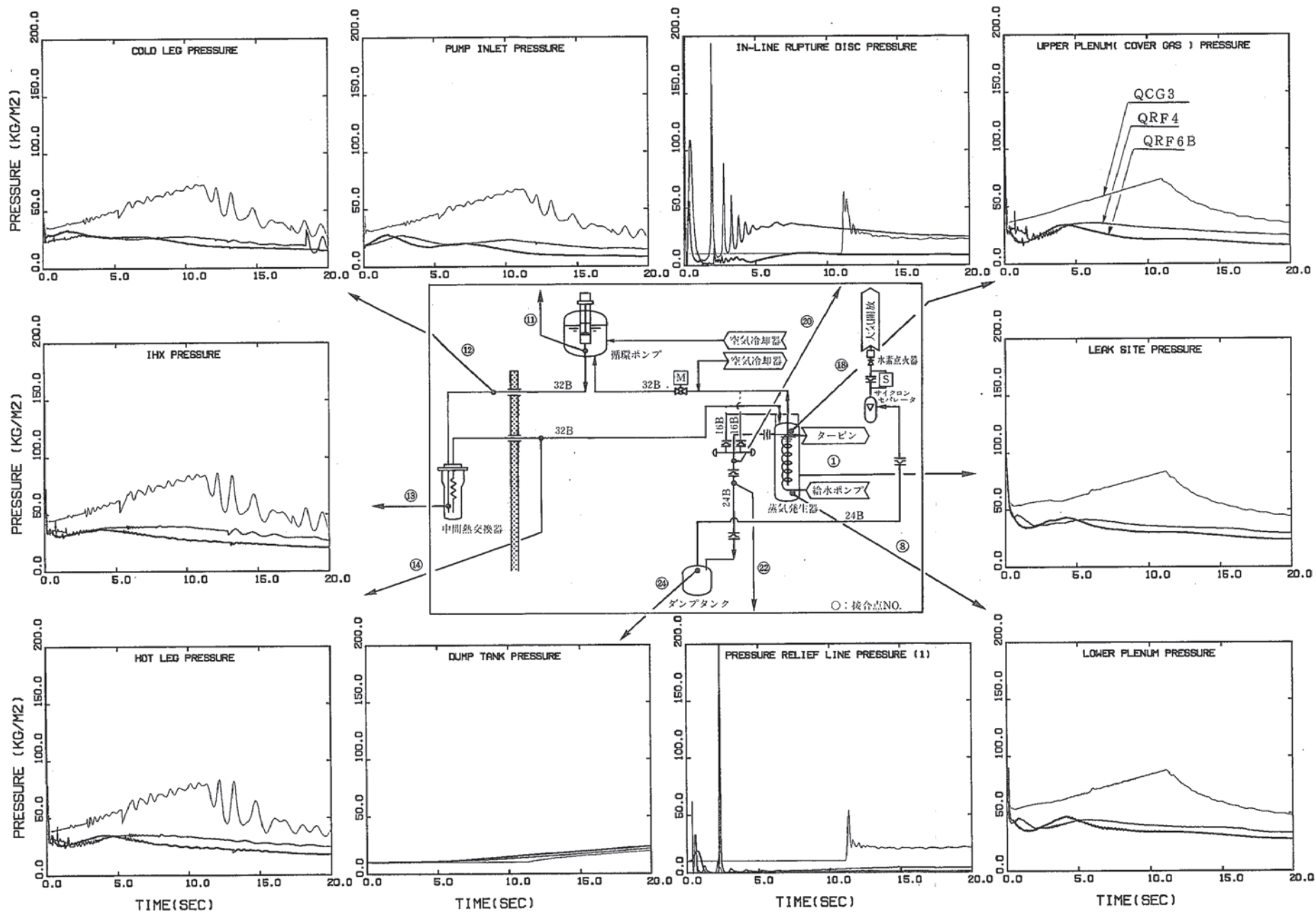


Fig.5.7(a) 準定常圧挙動(無液面型および有液面型SG)

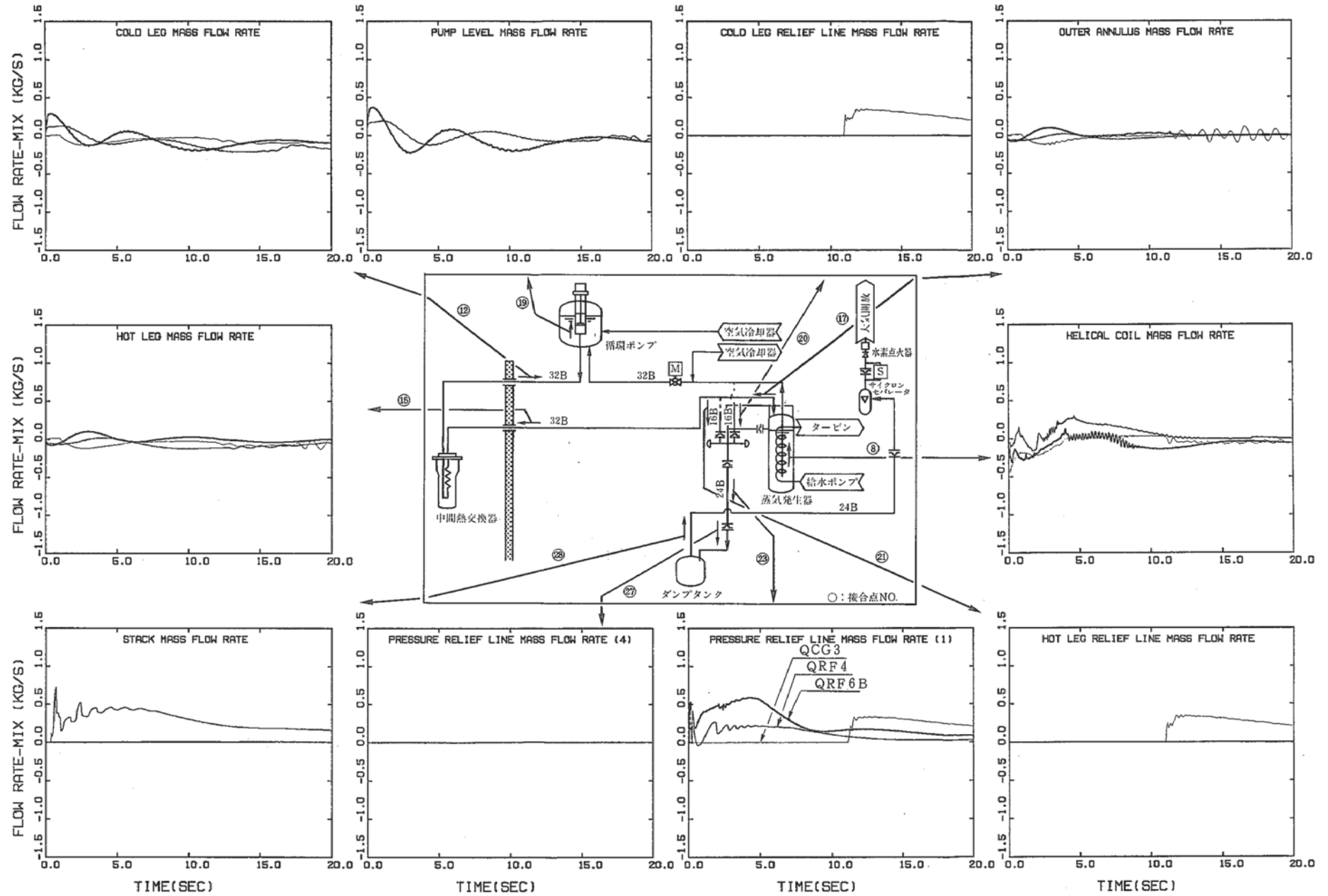


Fig. 5.7(b) 2次系内流動状況（無液面型および有液面SG）

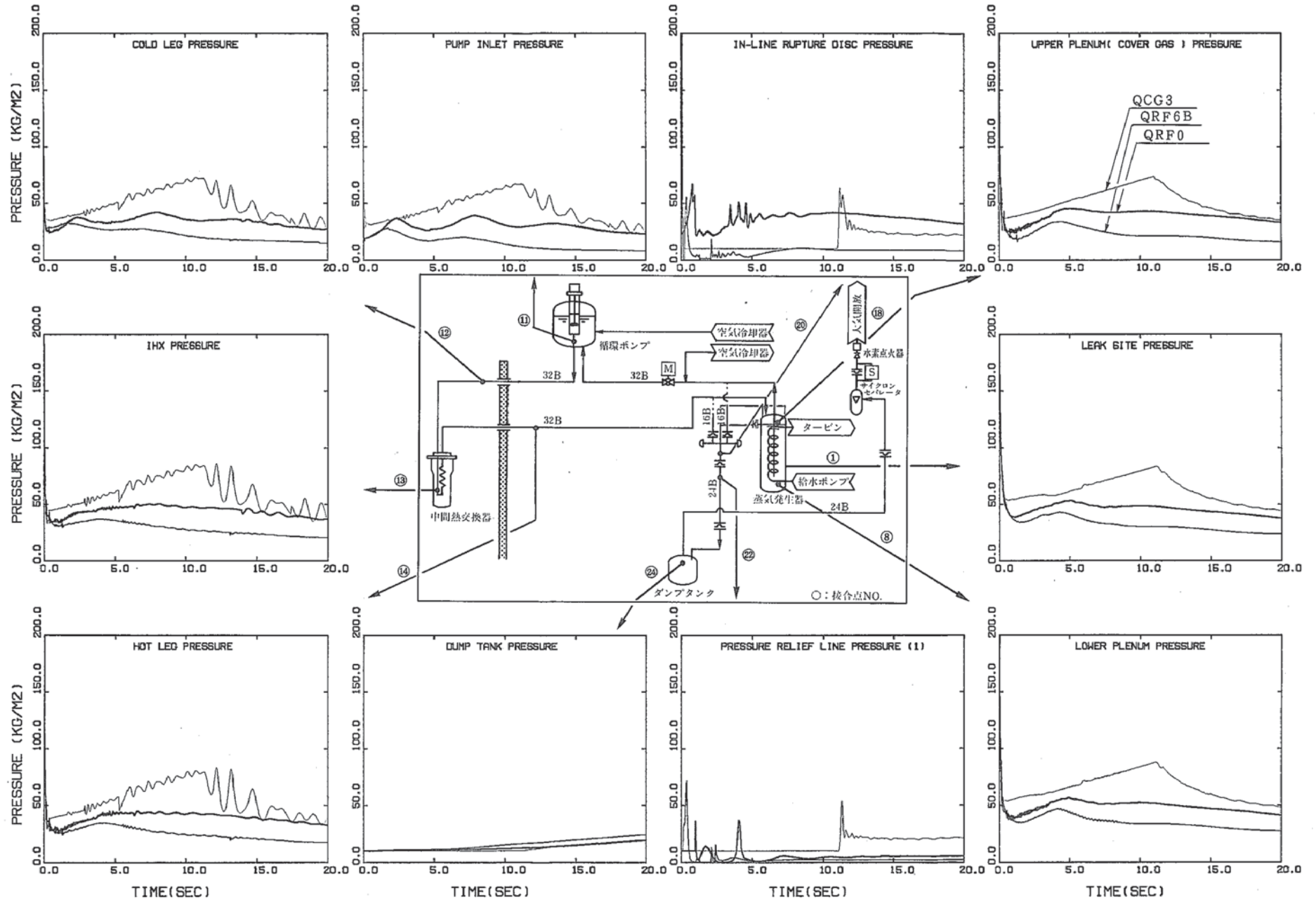


Fig.5.7(a) 準定常圧挙動 (無液面型および有液面型 SG)

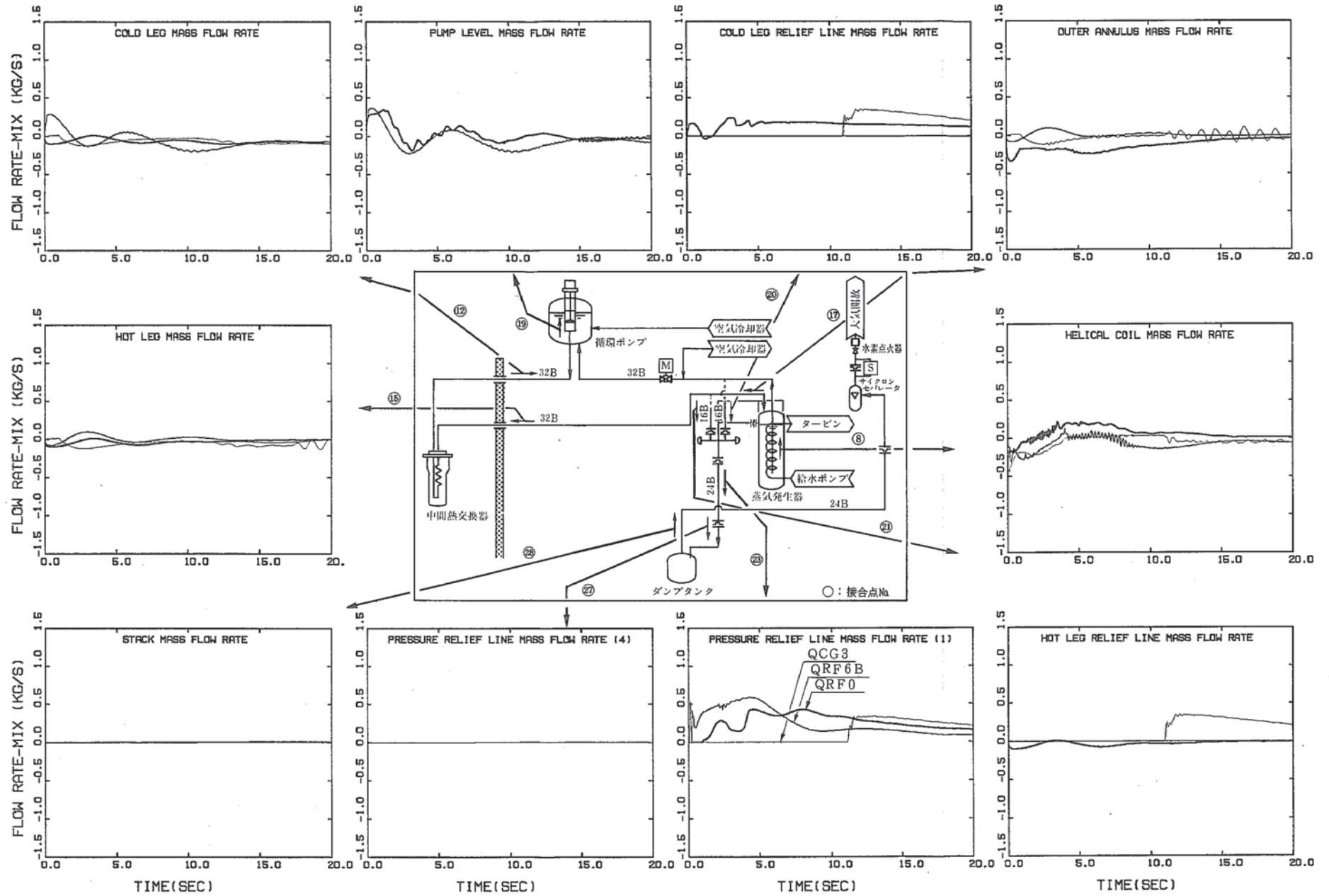


Fig.5.7(b) 2次系内流動状況(無液面型および有液面SG)

6. 結論

大リーク・ナトリウム-水反応時の圧力挙動に及ぼすSGカバーガスの有無の影響を明らかにするため、要素技術設計研究(Ⅱ)で検討されている無液面型SGとそれを基に新たに設計した有液面型SGについて、SWACSコードによる解析を行った。また無液面型、有液面型SGのそれぞれについて、圧力開放系の設置場所を変えた場合の影響評価も行った。SG内外での発生最高圧力をTable 6.1に示し、以下にその結果を要約する。

(1) 無液面型は圧力開放系をホットレグとミドルレグとに設置したケース、有液面型はカバーガス部のみに圧力開放系を設置したケースをそれぞれの代表ケースとして両者を比較し次の結果を得た。

(a) 初期スパイク圧評価結果からは、SGまたは主循環ポンプのカバーガス液面での圧力波減衰効果の有無により、無液面型ではホットレグ及びIHXの、有液面型ではコールドレグ側の圧力が相対的に高くなるという傾向を得た。SG外でのピーク圧は、無液面型、有液面型それぞれ、25.1及び16.5kg/cm²aである。

(b) 準定常圧評価結果からは、有液面型ではカバーガス圧力開放板の破裂圧がピーク圧となるのに対し、無液面型では圧力開放系が初期に作動するため、準定常的な圧力上昇はほとんど見られない。2相流による圧力脈動の激しい圧力開放系内を除くと、最高圧はいずれの型ともミドルレグ～IHXで発生し、無液面型、有液面型でそれぞれ、6.3及び8.5kg/cm²aである。

(2) 無液面型で圧力開放系の設置場所を変えた場合の解析では、次の結果を得た。

(a) 初期スパイク圧評価上は、ホットレグとミドルレグとの両方に16Bの配管を設置するよりも、ホットレグ側のみに24Bの配管を設置した方が有効である。

(b) 準定常圧評価でも、開放系をホットレグ側に設置することが発生水素の排出機能上最も効果大きい。

(3) 無液面型で、圧力を軽減するための対策として、圧力開放系配管をSG本体に直接設置した場合と、圧力開放板～主冷却系配管の距離を短縮した場合との評価を行い、次の結果を得た。

(a) 圧力開放系をSGに直接つけた場合は、初期スパイク圧は25.1→23.7kg/cm²aに、準定常圧は6.3→4.4kg/cm²aと顕著に低下し、軽減効果が大きい。

- (b) 圧力開放板までの距離を短くしたケースでは、初期スパイク圧にホットレグで $25.1 \rightarrow 19.6 \text{ kg/cm}^2 \text{ a}$ と同様の低下が見られたが、SG内での低下は小さい。
- (4) 無液面型で、圧力開放系をSG本体に設置し、ホットレグ、ミドルレグ配管の短縮を行った場合の評価を行い、次の結果を得た。
- (a) 圧力開放系をSG本体の上部と下部プレナム部に16Bの配管を設置するよりも、ホットレグ側のSG本体上部プレナム部に、16B2本または24B1本の配管を設置した方が有効であり、圧力波減衰効果とともに、発生水素排出効果も大きい。
- (b) ラブチャ板の設置場所については、より反応点に近い位置した方が、圧力開放板が早く作動するため圧力波減衰効果が大きい。
- (c) ミドルレグ配管短縮については、主循環ポンプが、より反応点に近くなるため主循環ポンプのカバーガス液面での圧力波減衰効果が大きい。
- また、ホットレグ配管短縮については、IH Xが反応点に近くなり、途中には主な圧力波減衰要因がないので、顕著な減衰効果は見られない。
- (5) 有液面型で圧力開放系の設置場所を変えた場合の解析では、
- (a) 下部プレナムかミドルレグ内に接液型ラブチャ板を設置することは、ミドルレグ～コールドレグ側での初期スパイク圧力軽減を図る上での効果が大きい。
- (b) 準定常圧上は、圧力開放系設置場所による圧力挙動の違いは大きいですが、いずれのケースでも破裂設定圧以下に収まっており、特に問題はない。

このように、無液面型では有液面型に比べて、一般的に初期スパイク圧の波高値が高いというこれまでの知見を確認することができた。しかし無液面型SGでも、圧力開放系をリーク発生点に近づけることや、圧力開放板の上流配管の長さを短くすることで、かなりの程度まで圧力を低減できるし、また、今回は解析しなかったが、無液面型SGの内部にそれほど大きくないガス溜を作ること、圧力低減上の効果が大きいことは、本解析から充分推察できる。従って、もし無液面型SGを採用する上で、大リーク時の圧力波の高さが設計基準として影響するようならば、その具体的対策の有効性についてSWACSコードで評価することは充分可能である。

Table 6.1 無液面型/有液面型SG大リーク解析結果のまとめ

(圧力の単位: kg/cm²a)

SG型式		無液面型		有液面型
開放系 設置場所		ネットレク ³⁾ & ミドルレク ³⁾	SG上プレナム ⁴⁾	カバーガス部
圧力 作動 開放 時刻	1 段目	H: 13.6msec M: 19.7msec	上: 9.7msec	10.97sec
	2 段目	0.95sec		
反応域 近傍 圧力	初 ¹⁾	33.8	33.8	32.9
	準 ²⁾	2.9	1.9	6.3
SG内 最高 圧力	初	28.6	21.1	19.0
	準	3.5	2.5	6.6
SG外 最高 圧力 ³⁾	初	27.0	20.6	16.5
	準	5.3	4.0	8.5

1) 初期スパイク圧

2) 準定常圧

3) 但し、放出系配管内での短い圧力パルスは無視

4) 前述したように、2次主冷却系配管長が他のケースより短縮化されている。

7. 参考文献

1. 三宅 収、進藤 嘉久、佐藤 稔
「大リーク-水反応解析コード-SWACS/REG3 - (概要説明書) -
大リーク・ナトリウム-水反応解析 (第3報・改訂版) -」
PNC SN952 79-19 (1987年 9月)
2. 三宅 収、進藤 嘉久、佐藤 稔
「大リーク-水反応解析コード-SWACS/REG3 - (使用説明書) -
大リーク・ナトリウム-水反応解析 (第7報) -」
PNC SN952 79-20 (1987年 9月)
3. 「要素技術設計研究 (II) 大型化に関する設計研究に伴う設備設計役務(2)
- 2次熱輸送系設備等 -」 PNC SJ2124 86-009 (2) (1986年 3月)
4. 田辺 裕美、鈴木 道博
「無液面型及び有液面型蒸気発生器の大リーク・ナトリウム-水反応事象評価
-大リーク・ナトリウム-水反応解析 (第15報) -」
PNC SN9410 87-037 (1987年 4月)

8. 謝 辞

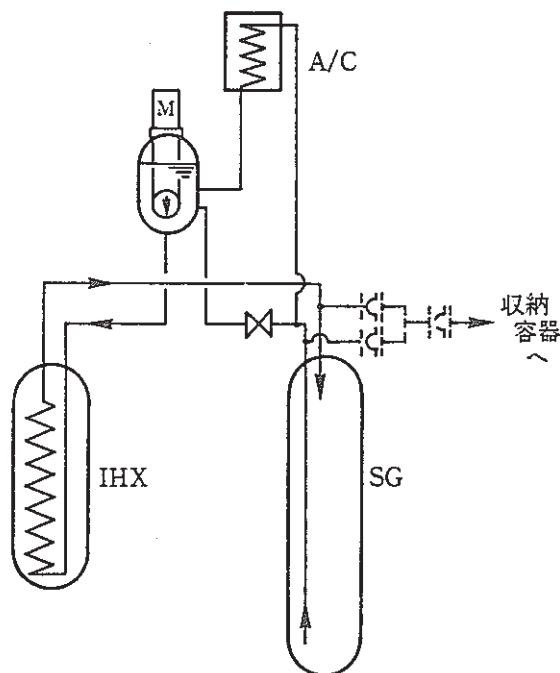
本研究は、「高速増殖大型炉の設計主要目に関する研究（Ⅱ）」の一環として行ったものであり、その過程で適切な指導と助言とを戴いたプラント安全工学室の姫野嘉昭室長、浜田広次氏に謝意を表す。

A P P E N D I X

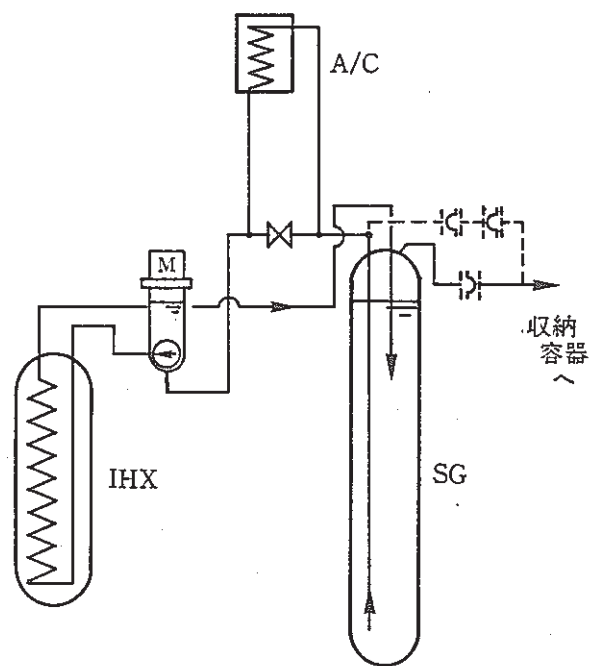
無液面型SG、有液面型SGにおける圧力開放板の設定圧について

2次系基本構成図

無液面、有液面型式SGによる系統構成概念は以下のとおり。



無液面型



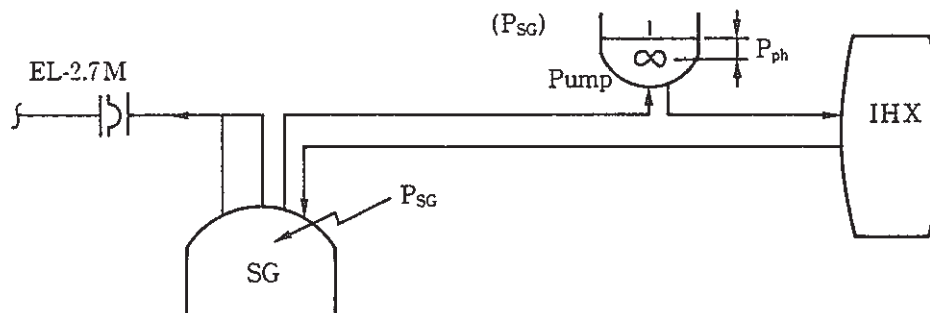
有液面型

注：ポンプリークフローもどしラインは60年度1次主ポンプのようにポンプの処理を想定する。

高低位置関係は図A1を参照のこと。

1. 無液面型SGにおける圧力開放板に加わる圧力算出について

無液面型SGの圧力開放系は、下図の様にSG・TOPから導く系統とするので、SG・TOPでの定格運転時と崩壊熱除去運転時（IRACS1ループ運転時）での圧力値を算出する。



(1) 定格運転時

$$P_{SG} = P_{gs} + P_{PH} + P_{Ph} + \gamma_s H_s - \Delta P_1$$

ここで、 P_{gs} ：ポンプカバーガス圧 = $0.15 \pm 0.05 \text{ kg/cm}^2 \text{ g}$

P_{PH} ：ポンプ定格揚程 = 45 mNa

P_{Phs} ：ポンプ吸込～Na液位 = 3.2 mNa

$\gamma_s H_s$ ：ここで H_s は、ポンプ吸込 (EL 7.24^m) ～ラプチャディスク位置 (EL-2.7^m) で約 10 mNa

ΔP_1 ： P_{UHP} 出口～IHX → SG 入口までの圧損

$$0.62 + 0.88 + 0.65 = 2.15 \text{ kg/cm}^2 \text{ g}$$

γ_s は、 310°C Na の 878 kg/m^3 を採用する。

$$P_{SG} = 0.15 + (45 \times 878 \times 10^{-4}) + (3.2 \times 878 \times 10^{-4})$$

$$+ (878 \times 10^{-4} \times 10.0^{\text{m}}) - 2.15 = 0.15 + 3.95 + 0.28 + 0.88 - 2.15$$

$$\therefore P_{SG} = 3.11 \text{ kg/cm}^2 \text{ g} \approx 3.2 \text{ kg/cm}^2 \text{ g}$$

(2) 崩壊熱除去運転時（IRACS1ループ運転時）

$$P_{SG} = P_{g1} + P_{PH} \cdot f^2 + P_{Ph1} + \gamma_{s1} H_s - \Delta P_1 \cdot f^2$$

ここで、 f ：流量比 = (除去運転時 / 定格運転時) = 7%

P_{Ph1} ：ポンプ吸込～Na液位 = 5 mNa

P_{g1} ：ポンプカバーガス圧 = $3.8 \text{ kg/cm}^2 \text{ g}$

ここで、

$$\frac{P V}{T} = \text{const} \quad \text{から} \quad i \text{ (定格)} \rightarrow j \text{ (除去運転)} \text{へ}$$

状態式

$$\frac{P_i V_i}{T_i} = \frac{P_j V_j}{T_j}$$

$$P_j = P_{gs} = (P_i V_i / T_i) \times (T_j / V_j) = 4.80 \text{ kg/cm}^2 \text{ a}$$

$$P_i = P_{gs} = 0.15 \text{ kg/cm}^2 \text{ g} + 1.033 = 1.183 \text{ kg/cm}^2 \text{ a}$$

$$V_i = 27 \text{ m}^3$$

$$T_i = 310^\circ\text{C} + 273 = 583 \text{ K}$$

$$T_j = 600^\circ\text{C} + 273 = 873 \text{ K}$$

$$V_j = 27 \text{ m}^3 - \underline{17 \text{ m}^3} = 10 \text{ m}^3$$

N a 膨張分

γ_{s1} は、 600°C N a の 808 kg/m^3 を採用する。

$$\begin{aligned} P_{sg} &= 3.8 + (45 \times 808 \times 10^{-4} \times 0.07^2) + (5 \times 808 \times 10^{-4}) \\ &\quad + (808 \times 10^{-4} \times 10.0^0) - (2.15 \times 0.072) \\ &= 3.8 + 0.02 + 0.40 + 0.81 - 0.01 \\ \therefore P_{sg} &= 5.02 \text{ kg/cm}^2 \text{ g} \approx 5.1 \text{ kg/cm}^2 \text{ g} \end{aligned}$$

2. 有液面型 S G における圧力開放板に加わる圧力算出について

有液面型 S G の伝熱面積等については、無液面型との比較ということから、できる限り同一とする。

管板部を N a 中設置にするか、カバーガス中設置にするかは、給水入口については降水管無しの設定から当然 N a 中になる。蒸気出口管板については、添付資料 1 に示す様に N a 中設置とカバーガス中設置とは大きな差がないことから以下に示す様に N a 中設置 (A 案) についてまず検討し、その後で A 案を見直す形でカバーガス中設置 (B 案) について検討する。

A) N a 中設置蒸気出口管板型式について

- (1) N a 入口・出口ノズルは無液面型 S G と同様に上部に 2 重管構造として設置する。(図 2 参照)
- (2) 合理化の観点から 2 次 N a 系にオーバーフロー系は設置せず、S G 及びポンプの自由液面を変動させる。この変動幅は、以下の通り 60 年度設計データを用いて求める。

・低温停止及び N a チャージ温度： 170°C

- 定格運転時温度 : 470°C (H.L)、320°C (C.L)
- I R A C S 1 ループ崩壊熱除去
 運転時最高温度 : 600°C

m³

- ナトリウムインベントリ I H X 高温部: 30
 (LF86-024による) 中温部: 20
 低温部: 20
- SG 高温部: 30(低温停止時の入口
 中温部: 80 プレナム部体積)
 低温部: 30
- A/C (低温部): 10
- ポンプ (低温部): 5 (低温停止時)
- 主配管 高温部: 20
 低温部: 50
- 補助系 (高温部): 10

- 自由液面面積 SG : 8.2m² (3.45mφ、Na流管1.2mφ)
 ポンプ: 1.6m² (1.5mφ、シャフト0.4mφ)

- 低温停止～定格運転時液位差 h₁ γ : 170°C → 911kg/m³
 320°C → 875kg/m³
 高温部 Na 容積 80m³ 470°C → 840kg/m³
 中温部 Na 容積 100m³ 550°C → 820kg/m³
 低温部 Na 容積 125m³(補助系も含める) 600°C → 808kg/m³

$$h_1 = \left\{ 80 \times \left(1 - \frac{840}{911} \right) + 100 \times \left(1 - \frac{858}{911} \right) + 125 \right.$$

$$\left. \times \left(1 - \frac{875}{911} \right) \right\} / (8.2 + 1.6) = 1.73 \text{ (m)}$$

(構造材の熱膨張は無視し h₁ を大きめに見込み安全側とする)

- 低温停止～1ループ崩壊熱除去時 h₂
 高温部 600°C 高温部 Na 容積 190m³
 中温部 550°C とし 中温部 Na 容積 20m³
 低温部 高・低温部の平均 低温部 Na 容積 95m³

$$h_2 = \left\{ 190 \times \left(1 - \frac{808}{911} \right) + 20 \times \left(1 - \frac{814}{911} \right) + 95 \right.$$

$$\left. \times \left(1 - \frac{820}{911} \right) \right\} / (8.2 + 1.6) = 3.38 \text{ (m)}$$

(h₁と同様構造材の熱膨張は無視する)

- (3) 2次系C/Gの設定圧は、IHXにおける1次系境界で常に2次系の圧力が高くなること、2次Na系最上部(A/C入口部ガス抜き弁)において通常運転時負圧にしない、及び2次ポンプNSPH確保の3つの条件から定めるものとする。

SGの高さ配置は、無液面型において下鏡がベースマットに近いことから、有液面型で長くなった分を下方に延ばすことは適切でなく下鏡の位置を同じとすると液面の位置はFL-3.1mとなる。従って、A/C最上部～液面(通常運転時)間のレベル差は

$$(FL + 12.4) - (FL - 3.1) + 0.8 = 16.3(m)$$

↑ A/C入口ガス抜き弁と配管中心差

- Na最上部で負圧にしないためのカバーガス圧は
SGのNa圧損を定格時 0.66kg/cm^2 として(60年度設計より)
 $16.3 \times 875 \times 10^{-4} + 0.66 = 2.09 (\text{kg/cm}^2\text{g})$
これに余裕をもたせて $2.5\text{kg/cm}^2\text{g}$ とする。
- 以上の設定により1次系圧力より2次系圧力の方が高い条件、ポンプNSPH研究の条件は満足できる。

- (4) カバーガス部の体積は以下の通り考える。

IRACS1ループによる崩壊熱除去運転時は運転状態IVであり、カバーガス系の正常な呼吸機能を期待できず、カバーガス締切運転でラプチャーディスクが破損しないこととする(60年度設計での条件)と以下の通りとなる。

カバーガス部体積(通常運転時) $V\text{m}^3$

通常液位～IRACS1ループ時液位間体積

$$(3.38 - 1.73) \times 9.8 = 16.2\text{m}^3$$

IRACS1ループ運転時C/G圧力 $P\text{kg/cm}^2\text{a}$

カバーガス温度

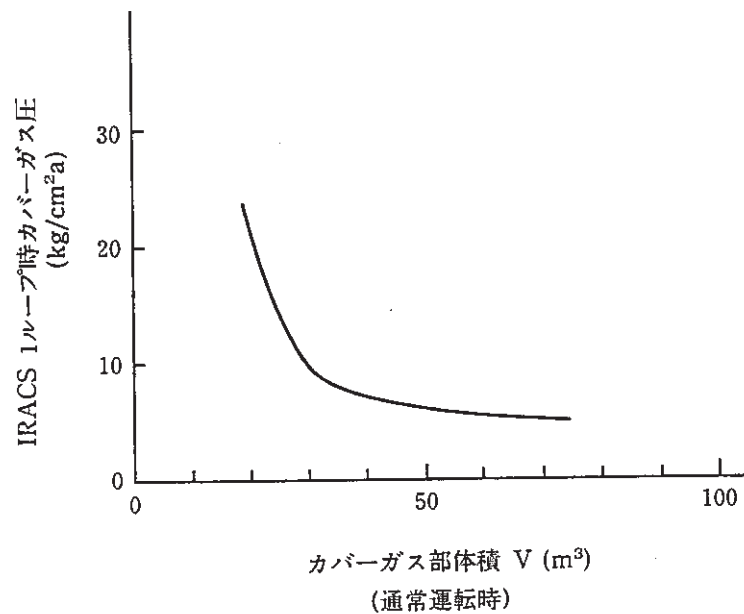
通常運転時 470°C (ホットレグ温度に等しいとする)

IRACS1ループ時 600°C (ホットレグ温度に等しいとする)

$$\frac{P V}{T} = \text{const} \quad \text{から} \quad \frac{3.5 \times V}{743} = \frac{P \times (V - 16.2)}{873}$$

$$\therefore P = \frac{4.11}{1 - \frac{16.2}{V}}$$

これを、図示する。



カバークラス部の体積増加はSG寸法を大きくし、できる限り押さえるべきであるが、一方、ラブチャーディスクの設定圧が高いほど大リーク時の発生圧力も定性的には大きくなる。

以上からカバークラス部体積を40m³と設定し、この場合カバークラス圧力(Ps) (5.9atg)は、6.9kg/cm²aとなる。

ラブチャーディスクの破裂設定圧は、カバークラス圧力-0.5kg/cm²(暫定)とすると6.4kg/cm²gとなる。

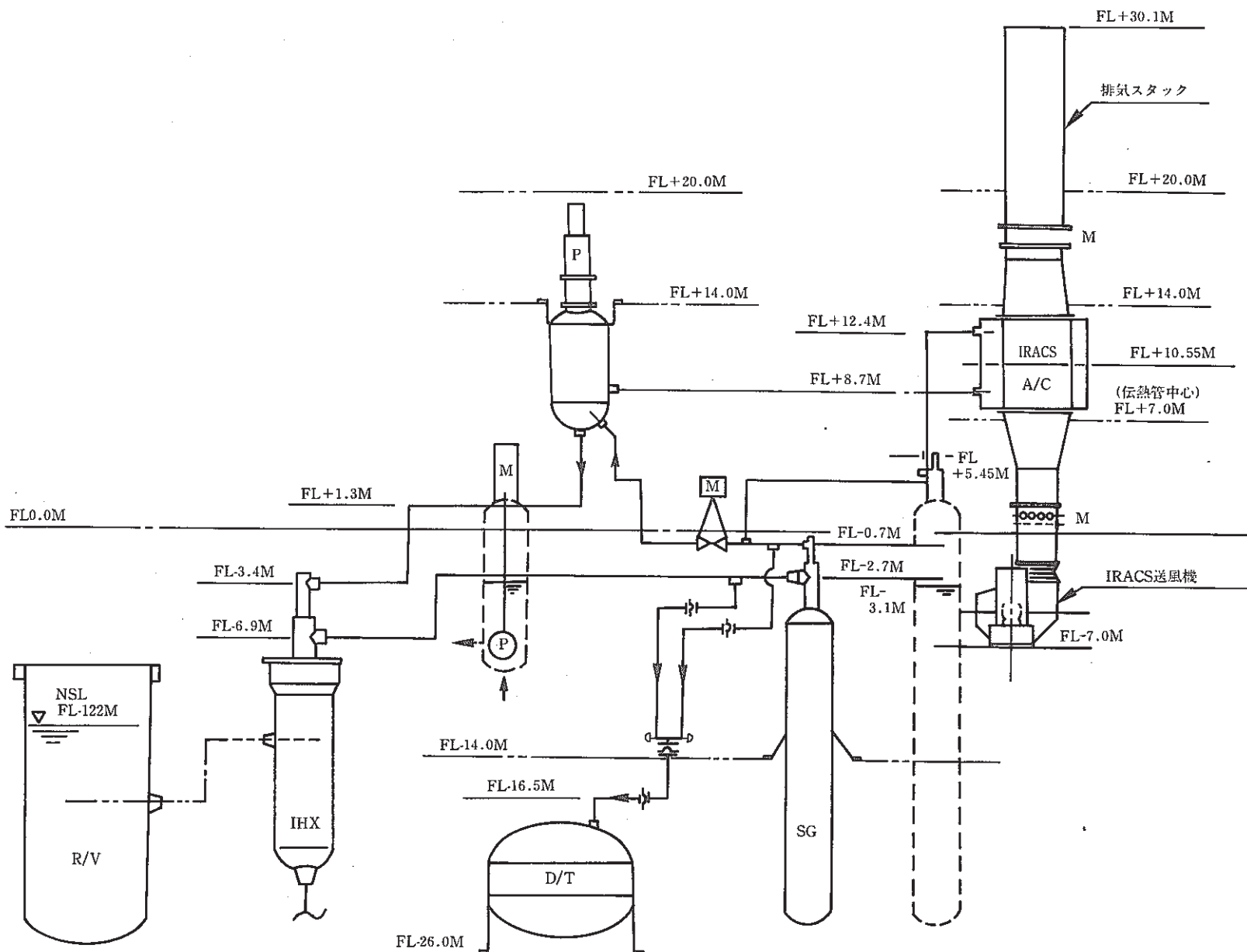


図 A・1 2次系エリア高低位置図

3. 圧力開放板の設定圧の算出

IRACS1ループ運転時の圧力開放板に加わる圧力(P_{SG})を算した後、下記の通りの考え方で作動設定圧(P_{RD})を求める。

$$P_{RD} = P_{SG} + \alpha + P_{D/T} \quad (3-1式)$$

ここで、 P_{RD} : 圧力開放板の作動設定圧

P_{SG} : IRACS1ループ運転時の圧力開放板に加わる圧力

α : 作動誤差分を含めた余裕代

$P_{D/T}$: 圧力開放板下流側(ダンプタンク側)の背圧

圧力開放板の作動誤差を $\pm \beta$ (%)と考えると、誤作動防止の観点から α は、下式として

$$\alpha = \left(\frac{\beta / 100}{1 - \beta / 100} \right) P_{SG} \quad (3-2式)$$

以上を整理すると

$$P_{RD} = P_{SG} \left(1 + \frac{\beta / 100}{1 - \beta / 100} \right) + P_{D/T} \quad (3-3式)$$

前頁の(3-3式)を各々算出した値として下表に示す。

表 A 1 液面有無における圧力開放板の設定圧

(単位: atg)

SG型式	P_{SG}	β (%)	α	P_{RD}	$P_{D/T}$	設定値 (ata)
有液面	5.9	1.0	0.66	6.98	0.4 (MAX)	$\cong 8.0$
有液面 (事故解析ベース)	5.9	2	0.12	6.42	0.4 (MAX)	$\cong 7.4$
無液面	5.1	10	0.57	6.07	0.4 (MAX)	$\cong 7.1$
無液面 (事故解析ベース)	5.1	28	1.98	7.48	0.4 (MAX)	$\cong 8.5$